

Perilaku Mekanis dan Durabilitas Perkerasan Beton Geopolimer dengan Limbah Plastik PET - ANDY SURYANTO

by disertasi ft

Submission date: 02-Jun-2025 09:44AM (UTC+0700)

Submission ID: 2690152407

File name: ANDY_SUR_-_KOMPILASI.pdf (12.63M)

Word count: 46732

Character count: 286059

*Perilaku Mekanis dan Durabilitas
Perkerasan Beton Geopolimer dengan Limbah Plastik PET*



Oleh:

Andy Suryanto
10201900018

Disetujui Untuk Diajukan dalam:
Sidang Terbuka Disertasi Hari/Tanggal: Sabtu, 17 Mei 2025

Promotor

Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.

⁶³
Ko – Promotor

Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, S.T., M.T.

¹⁶
PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG, SEMARANG
2025

LEMBAR PENGUJI

Sidang Terbuka

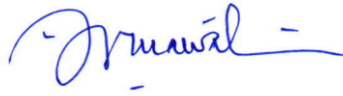
Hari : Sabtu, 17 Mei 2025

Promotor :



Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.

Ko-Promotor :



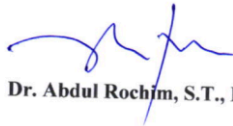
Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, S.T., M.T.

Penguji Eksternal :



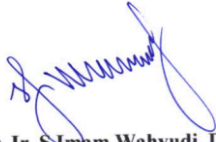
Dr. Ir. Hamkah, ¹⁰M.T., IPM., ASEAN. Eng.

Penguji Internal :



Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.

Penguji Internal :



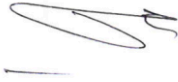
Prof. Dr. Ir. Simam Wahyudi, DEA.

Penguji Internal:



Prof. Ir. Pratikso, MST., Ph.D.

Penguji Internal :



Dr. Ir. Sumirin, MS.

**PERILAKU MEKANIS DAN DURABILITAS
PERKERASAN BETON GEOPOLIMER DENGAN
LIMBAH PLASTIK PET**

**16
DISERTASI**

Diajukan Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk Mencapai Gelar Doktor



**Andy Suryanto
10201900018**

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

**PERILAKU MEKANIS DAN DURABILITAS PERKERASAN BETON
GEOPOLIMER DENGAN LIMBAH PLASTIK PET**



Oleh:

**Andy Suryanto
10201900018**

176

Disetujui Untuk Diajukan Sidang dalam:

Sidang Ujian Hari/Tanggal :

Promotor:

Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.

Ko-Promotor:

1

Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, S.T., M.T

16

PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG

2025

LEMBAR PENGUJI

SIDANG UJIAN DISERTASI

Hari:

Promotor:

Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.

Ko-Promotor:

Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, S.T., M.T.

Penguji Eksternal:

Dr. Ir. Hamkah, M.T.

Penguji Internal:

Prof. Dr. Ir. S. Imam Wahyudi, DEA.

Penguji Internal:

16

16

Prof. Ir. Pratikso, MST, Ph.D.

Penguji Internal:

Dr. Ir. Sumirin, MS

MOTTO

6

QS. Ali Imran: 110 yang artinya: "Kamu adalah umat yang terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh kepada yang ma'ruf, dan mencegah dari yang munkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli Kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka, diantara mereka ada yang beriman dan kebanyakan mereka adalah orang-orang yang fasik."

240

QS. Al-Insyirah: 5-6 yang artinya: "Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan."

Puji Syukur Kehadirat Allah SWT atas limpahan Taufik, Rahmat dan Hidayah-Nya.

Sholawat dan Salam kepada Junjungan Nabi Muhammad SAW.

Terima kasih untuk Orang Tua Bapak Wakidi, Ibu Suginem dan Bapak Paiman Adi Prayitno dan Ibu Slamet atas kasih sayang dan dukungannya.

Terima kasih untuk Istriku tercinta Ibu Kecil Jati Suyati dan ananda tersayang Alisha Sasmita Jati dan Malikha Arsyila Janitrajati atas dukungannya.

Terima kasih kepada Bapak Ibu dosen atas bimbingannya.

Terima kasih kepada teman-teman DTS atas dukungannya.

Terima kasih kepada atasan dan teman-teman di kantor atas dukungannya.

ABSTRAK

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 sehingga limbah dari pembakaran batu bara yaitu *fly ash* dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan beton yang ramah lingkungan. Abu sekam padi (RHA) yang merupakan limbah hasil pertambangan dapat digunakan sebagai bahan tambahan beton. Sampah plastik PET membutuhkan waktu sekitar 500 tahun untuk terurai sedangkan pada proses pembakaran menimbulkan masalah seperti polusi. Latar belakang tersebut dibutuhkan inovasi untuk mengoptimalkan pemanfaatan limbah *fly ash*, RHA dan plastik PET sebagai bahan pembuatan beton geopolimer. Selain itu penggunaan perkerasan beton semakin banyak digunakan dikarenakan memiliki umur rencana yang lebih panjang dibandingkan perkerasan aspal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan limbah plastik PET sebagai serat pada beton geopolimer yang terbuat dari *fly ash*, *rice husk ash* (RHA), dan aktivator alkali. Beton geopolimer merupakan inovasi material konstruksi yang lebih ramah lingkungan karena memanfaatkan bahan limbah dan mengurangi penggunaan semen portland. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi perilaku mekanik dan sifat durabilitas, termasuk kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, nilai porositas, *sorptivity*, penetrasi klorida, dan ketahanan terhadap abrasi. Hasil penelitian menunjukkan pada umur 90 hari sifat mekanik beton geopolimer untuk variasi PET 0; 0,25%; 0,50% dan 0,75% adalah nilai kuat tekan sebesar 42,75 MPa; 41,84 MPa; 34,57 MPa; 31,86 MPa, nilai kuat tarik belah sebesar 2,65 MPa; 1,96 MPa; 2,10 MPa; 2,26 MPa, nilai kuat lentur sebesar 3,71 MPa; 3,41 MPa; 3,33 MPa; 3,43 MPa. Pada umur 28 hari, evaluasi durabilitas beton geopolimer yang mengandung variasi persentase PET sebesar 0%, 0,25%, 0,50%, dan 0,75% menghasilkan tingkat porositas masing-masing sebesar 12,50%, 9,80%, 10,70%, dan 10,30%, nilai pengujian *sorptivity* sebesar 2,40; 1,72; 2,13; 2,23, nilai pengujian penetrasi klorida sebesar 20,75 mm; 13,57 mm; 15,86 mm; 14,17 mm dan nilai pengujian abrasi 81,50%; 76,40%; 71,69%, 70,51%. Penambahan limbah plastik PET dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap retak, meskipun terdapat sedikit penurunan pada sifat mekanik kuat tekan, kuat tarik dan kuat lentur. Selain itu, model hubungan sifat mekanik yang dirumuskan menunjukkan bahwa penambahan serat PET berkontribusi negatif terhadap modulus elastisitas beton geopolimer. Hasil penelitian menunjukkan juga bahwa penambahan limbah plastik PET menaikkan nilai parameter-parameter durabilitas beton yaitu pengujian poristas, *sorptivity*, penetrasi klorida serta pengujian abrasi. Implikasi penelitian ini mencakup rekomendasi penggunaan limbah plastik PET sebagai bahan penguat pada perkerasan jalan beton (*rigid pavement*). Penelitian ini juga memberikan kontribusi terhadap pengelolaan limbah plastik serta pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi. Diharapkan hasil ini dapat menjadi dasar pengembangan material beton yang lebih ramah lingkungan dengan performa mekanik dan durabilitas yang optimal.

Kata Kunci: Beton geopolimer, limbah plastik PET, perilaku mekanik, durabilitas, perkerasan jalan beton

ABSTRACT

The significant increase in population, infrastructure, and industrial activities—especially in developing countries with high demand for cement and concrete—has contributed substantially to greenhouse gas emissions. In response, the utilization of fly ash, a by-product of coal combustion, as a raw material for eco-friendly concrete production has become increasingly important. Additionally, rice husk ash (RHA), an agricultural waste product, can be used as a supplementary material in concrete. Polyethylene terephthalate (PET) plastic waste takes approximately 500 years to decompose and poses environmental concerns during incineration due to pollution. Based on this background, there is a need for innovation to optimize the use of fly ash, RHA, and PET plastic waste as components in geopolymer concrete production. Moreover, the use of concrete pavements is gaining popularity due to their longer service life compared to asphalt pavements. This research aims to analyze the effect of adding PET plastic waste as fibers in geopolymer concrete made from fly ash, rice husk ash (RHA), and alkaline activators. Geopolymer concrete is an innovative and environmentally friendly construction material that utilizes industrial and agricultural waste, thereby reducing the dependence on Portland cement. Tests were conducted to evaluate the mechanical behavior and durability characteristics, including compressive strength, split tensile strength, flexural strength, porosity, sorptivity, chloride penetration, and abrasion resistance. The results at 187 days showed that the mechanical properties of geopolymer concrete with PET fiber variations of 0%, 0.25%, 0.50%, and 0.75% yielded compressive strengths of 42.75 MPa, 41.84 MPa, 34.57 MPa, and 31.86 MPa, respectively. The indirect tensile strengths were 1.55, 1.96, 2.10, and 2.26 MPa, while the flexural strengths were 3.71, 3.41, 3.33, and 3.43 MPa, respectively. At 28 days, the durability test results for PET variations of 0%, 0.25%, 0.50%, and 0.75% showed porosity values of 12.50%, 9.80%, 10.70%, and 10.30%; sorptivity values of 2.40, 1.72, 2.13, and 2.23; chloride penetration depths of 20.75 mm, 13.57 mm, 15.86 mm, and 14.17 mm; and abrasion resistance values of 81.50%, 76.40%, 71.69%, and 70.51%, respectively. The addition of PET plastic waste fibers can improve the crack resistance of concrete, despite slight reductions in compressive, tensile, and flexural strengths. Furthermore, the developed model for mechanical property correlations indicates that the inclusion of PET fibers negatively affects the elastic modulus of geopolymer concrete. The study also shows that PET fiber inclusion enhances durability-related parameters, such as porosity, sorptivity, chloride penetration, and abrasion resistance. The implications of this research include recommendations for using PET plastic waste as reinforcement in concrete pavement (rigid pavement). This study contributes to plastic waste management and promotes sustainable development in the construction sector. The findings are expected to serve as a foundation for the development of more environmentally friendly concrete materials with optimal mechanical and durability performance.

Keywords: Geopolymer concrete, PET plastic waste, mechanical properties, durability, rigid pavement

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas berkat Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Disertasi dengan judul: **"Perilaku Mekanis dan Durabilitas Perkerasan Beton Geopolimer Dengan Limbah Plastik PET"**

Penulis banyak mendapat bimbingan dan pengarahan serta dukungan dari berbagai pihak, baik secara moril maupun materil. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. H. Gunarto, S.H., S.E. Akt. M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung, Semarang.
2. Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Agung, Semarang
3. Prof. Dr. Ir. H. S. Imam Wahyudi, DEA selaku penguji sekaligus sebagai Ketua Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, Semarang yang telah memberikan arahan serta dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan Disertasi ini,
4. Prof. Ir. Pratikso, MST., Ph.D. selaku penguji sekaligus Sekretaris Program Doktor Teknik Sipil Universitas Sultan agung, Semarang
5. Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T., selaku Promotor yang telah memberikan arahan serta dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan Disertasi ini,
6. Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, S.T., M.T., selaku Ko promotor yang telah memberikan arahan serta dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan Disertasi ini,
7. Dr. Ir. Sumirin, MS., selaku Penguji yang telah memberikan arahan serta dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan Disertasi ini,
8. Dr. Ir. Hamkah, M.T., selaku Penguji yang telah memberikan arahan serta dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan Disertasi ini,

9. Para dosen yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan kepada Penulis selama mengikuti kuliah Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, Semarang.
10. Staf, Pegawai Unissula dan rekan-rekan mahasiswa DTS, serta para pihak yang turut berkontribusi dalam mewujudkan disertasi ini.
11. Keluarga tercinta, orang tua, istri dan anak-anak yang telah mendukung penulis untuk menyelesaikan perkuliahan di Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, Semarang.
- Semoga Allah SWT memberikan balasan yang berlipat ganda kepada semua pihak atas bantuan yang telah diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan penulisan Disertasi ini. Semoga tersusunnya Disertasi ini dapat memberikan manfaat yang besar bagi kita semua. Penulis sangat mengharapkan segala saran dan kritik yang bersifat membangun dan sebagai masukan bagi penelitian dan penulisan yang selanjutnya.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Semarang, Maret 2025
Penulis

Andy Suryanto
10201900029

4 DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL/SAMPUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
MOTTO	v
PERSEMBAHAN.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	9
1.3 Rumusan Masalah	9
1.4 Maksud dan Tujuan	10
1.5 Manfaat Penelitian.....	10
1.6 Batasan Masalah	11
1.7 Originalitas dan Pembaharuan.....	11
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	13
2.1 Geopolimer.....	13
2.2 Sifat-Sifat Geopolimer.....	15
2.3 Material Pembentuk Mortar Geopolimer	16
2.3.1 Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>)	16
2.3.2 <i>Rice Hush Ash (RHA)</i>	19
2.3.3 Alkali Aktivator	20
2.3.4 Air.....	21
2.4 Plastik	21
2.5 Beton Serat	25
2.6 Perkerasan Kaku	31
2.7 Sifat Fisik Beton.....	35

2.7.1	Berat Jenis (densitas)	35
2.7.2	Kelecekan Beton (<i>workability</i>)	36
2.8	Sifat Mekanik Beton	37
2.8.1	Kuat Tekan Beton	37
2.8.2	Kuat Tarik Belah Beton	38
2.8.3	Kuat Lentur Beton	39
2.9	Sifat Durabilitas Beton	42
2.9.1	Pengujian Tingkat Penyerapan Air (<i>Sorptivity</i>)	42
2.9.2	Pengujian Porositas	43
2.9.3	Pengujian Kedalaman Penetrasi Klorida (<i>Chloride Penetration Depth</i>)	44
2.9.4	Pengujian Abrasi	44
2.10	Perilaku Tegangan-Regangan	45
2.11	Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity	47
2.12	Pengujian Mikrostruktur Material	50
2.16.1	Metode <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	50
2.16.2	Metode <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	51
2.16.3	Metode <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	52
54	BAB III METODE PENELITIAN	53
3.1	Jenis Pengujian	53
3.2	Lokasi dan Waktu Penelitian	53
3.3	Peralatan dan Bahan Penelitian	53
3.3.1	Peralatan Penelitian	53
3.3.2	Bahan Penelitian	54
3.4	Variabel Penelitian	55
3.5	Metode Penelitian	56
3.6	Metode Analisis	56
3.6.1	Pemeriksaan Karakteristik Material dan Beton Geopolimer	56
3.6.2	Bagan Alir Penelitian	71
	BAB IV DATA DAN HASIL ANALISIS	74
4.1	Karakteristik Material	74

7	4.1.1	Karakteristik Fisik Agregat Kasar	74
	4.1.2	Karakteristik Fisik Agregat Halus	76
	4.1.3	Karakteristik Fisik dan Kimia <i>Fly Ash</i>	77
	4.1.4	Karakteristik Fisik dan Kimia <i>Rice Hush Ash (RHA)</i>	80
4.2		Rancangan Campuran Beton Geopolimer	82
1	4.3	Hasil Pengujian Sifat Fisik Beton	83
	4.3.1	Hasil Uji <i>Slump Flow</i>	83
	4.3.2	Hasil Uji Densitas Beton	84
	4.3.1	Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	85
8	4.4	Hasil Pengujian Sifat Mekanis Beton	87
	4.4.1	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	87
	4.4.2	Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	89
	4.4.3	Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton	91
	4.4.4	Pola Keruntuhan Beton Geopolimer	93
21	4.5	Hasil Pengujian Durabilitas Beton	97
	4.5.1	Hasil Pengujian Porositas Beton	97
	4.5.2	Hasil Pengujian <i>Sorptivity</i>	98
	4.5.3	Hasil Pengujian Penetrasi Klorida	99
	4.5.4	Hasil Pengujian Abrasi	100
		BAB V PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN	102
	5.1	Pembahasan Sifat Mekanis Beton	102
14	5.1.1	Pembahasan Kuat Tekan Beton	102
	5.1.2	Pembahasan Kuat Tarik Beton	111
	5.1.3	Pembahasan Kuat Lentur Beton	115
228	5.1.4	Hubungan Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas	120
	5.1.5	Hubungan Sifat Mekanik Beton Geopolimer, Umur dan Persentase Limbah Plastik	121
	5.2	Analisis Pengujian Semi Kuantitatif Beton Geopolimer	124
	5.3	Pembahasan Sifat Durabilitas Beton	125
	5.3.1	Pembahasan Porositas Beton	125
	5.3.2	Pembahasan <i>Sorptivity</i> Beton	127
	5.3.3	Pembahasan Penetrasi Klorida Beton	129

5.3.4	Pembahasan Ketahanan Abrasi.....	131
5.4	Hubungan Sifat Mekanik, Durabilitas dan Perkerasan Beton Geopolimer	133
5.5	Temuan Empirik	153
109	BAB VI KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI.....	155
6.1	Kesimpulan	155
6.2	Implikasi	156
6.3	Rekomendasi	157
	DAFTAR PUSTAKA	158

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur <i>RHA</i> yang dilihat dari mikroskop	20
Gambar 2.2 Jenis-jenis serat.....	29
Gambar 2.3 Penyebaran Beban pada Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku.....	32
Gambar 2.4 Skema Pengujian <i>Sorptivity</i>	43
Gambar 2.5 Pengukuran Kedalaman Penetrasi Klorida	44
Gambar 2.6 Hubungan tegangan dan regangan linear	46
Gambar 2.7 Hubungan tegangan regangan non linear.....	47
Gambar 2.8 Skematik Pengujian UPV	50
Gambar 3.1 Material beton geopolimer	55
Gambar 3.2 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>	60
Gambar 3.3 Posisi benda uji pengujian kuat tekan, modulus elastisitas dan Poisson ratio	62
Gambar 3.4 Posisi benda uji pada pengujian kuat tarik belah beton.....	63
Gambar 3.5 Sketsa pengujian kuat lentur.....	63
Gambar 3.6 Pengujian kuat lentur beton	64
Gambar 3.7 Difraktogram polimer kristalin	65
Gambar 3.8 Pengujian <i>sorptivity</i> beton geopolimer	66
Gambar 3.9 Proses pengujian <i>sorptivity</i> beton geopolimer	67
Gambar 3.10 Proses pengujian porositas beton geopolimer.....	68
Gambar 3.11 Proses pengujian penetrasi klorida beton geopolimer	68
Gambar 3.12 Proses pengujian porositas beton geopolimer.....	70
Gambar 3.13 Alat uji abrasi <i>Los Angeles</i>	71
Gambar 3.14 Diagram alir penelitian	73
Gambar 4.1 Gradasi agregat kasar (batu pecah).....	75
Gambar 4.2 Gradasi agregat halus (pasir)	77
Gambar 4.3 Grafik distribusi ukuran butir <i>fly ash</i>	78
Gambar 4.4 Visualisasi <i>fly ash</i> dengan SEM	78
Gambar 4.5 Persebaran unsur kimia <i>fly ash</i>	79
Gambar 4.6 Hasil Pemeriksaan XRF besaran senyawa dari <i>fly ash</i>	79
Gambar 4.7 Visualisasi <i>RHA</i> dengan SEM	80
Gambar 4.8 Persebaran unsur kimia <i>RHA</i>	81

Gambar 4.9 Hasil Pemeriksaan XRF besaran senyawa dari <i>RHA</i>	81
Gambar 4.10 Slump beton geopolimer.....	83
Gambar 4.11 Densitas beton geopolimer	84
Gambar 4.12 Hubungan kuat tekan terhadap umur	88
Gambar 4.13 Hubungan kuat tarik belah beton geopolimer dengan umur.....	90
Gambar 4.14 Kurva hubungan variasi benda uji dengan kuat lentur	92
Gambar 4.15 Pola keruntuhan beton variasi A (0%).....	93
Gambar 4.16 Pola keruntuhan beton variasi A1 (0,25%).....	94
Gambar 4.17 Pola keruntuhan beton variasi A2 (0,50%).....	95
Gambar 4.18 Pola keruntuhan beton variasi A3 (0,75%).....	96
Gambar 4.19 Hubungan nilai I dan akar waktu beton geopolimer.....	99
Gambar 4.20 Perbandingan jumlah putaran dan keausan beton geopolimer	100
Gambar 5.1 Hubungan kuat tekan beton geopolimer dengan umur.....	103
Gambar 5.2 Presentase kenaikan kuat tekan beton geopolimer	104
Gambar 5.3 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur tanpa menggunakan limbah plastik.....	107
Gambar 5.4 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur dengan 0,25 % limbah plastik.....	107
Gambar 5.5 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur dengan 0,50 % limbah plastik.....	108
Gambar 5.6 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur dengan 0,75% limbah plastik.....	108
Gambar 5.7 Rasio antara kuat tekan hasil pengujian dan persamaan.....	109
Gambar 5.8 Kurva hubungan kuat tarik belah dengan umur.....	114
Gambar 5.9 Kurva hubungan kuat lentur dengan umur	116
Gambar 5.10 Morfologi permukaan geopolimer berdasarkan citra SEM	124
Gambar 5.11 Kurva hubungan variasi benda uji dengan porositas	126
Gambar 5.12 Kurva hubungan variasi benda uji dengan <i>sorptivity</i>	128
Gambar 5.13 Kurva hubungan variasi benda uji dengan kedalaman penetrasi klorida	130
Gambar 5.14 Kurva hubungan variasi benda uji dengan abrasi	132
Gambar 5.15 Hubungan antara kuat tekan- <i>sorptivity</i>	137

Gambar 5.16 Hubungan antara kuat tekan-kedalaman penetrasi klorida	139
Gambar 5.17 Hubungan antara kuat tekan-porositas.....	140
Gambar 5.18 Hubungan antara kuat tekan-abrasi	141
Gambar 5.19 Hubungan antara kuat tarik belah- <i>sorptivity</i>	143
Gambar 5.20 Hubungan antara kuat tarik belah-kedalaman penetrasi klorida...	144
Gambar 5.21 Hubungan antara kuat tarik belah-porositas	145
Gambar 5.22 Hubungan antara kuat tarik belah-abrasi	147
Gambar 5.23 Hubungan antara kuat lentur- <i>sorptivity</i>	148
Gambar 5.24 Hubungan antara kuat lentur-kedalaman penetrasi klorida	149
Gambar 5.25 Hubungan antara kuat lentur-porositas.....	151
Gambar 5.26 Hubungan antara kuat lentur-abrasi.....	152

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik fisik pasta, mortar dan beton geopolimer	14
Tabel 2.2. Kebutuhan fisik <i>fly ash</i> (ASTM C618-2019)	18
Tabel 2.3. Kebutuhan kandungan kimia <i>fly ash</i> (ASTM C618-2019)	18
Tabel 2.4. Jenis-jenis serat dan sifat-sifat fisiknya	26
Tabel 3.1 Metode pengujian karakteristik agregat	56
Tabel 3.2 Rancangan campuran beton geopolimer 10 M (kg/m ³)	58
Tabel 3.3 Jumlah benda uji penelitian	59
Tabel 3.4 Korelasi antara cepat rambat gelombang ultrasonic terhadap kualitas beton (<i>direct method</i>) BS 1881: part 203: 1986	61
Tabel 3.5 Jadwal waktu dan toleransi pengujian	66
Tabel 4.1 Karakteristik fisik agregat kasar	75
Tabel 4.2 Karakteristik fisik agregat halus	76
Tabel 4.3 Hasil pemeriksaan karakteristik fisik abu terbang	77
Tabel 4.4 Hasil pemeriksaan karakteristik kimia abu terbang	79
Tabel 4.5 Rancangan campuran beton geopolimer (kg/m ³)	82
Tabel 4.6 Hasil uji <i>slump flow</i>	83
Tabel 4.7 Hasil pengujian <i>UPV</i> beton geopolimer	86
Tabel 4.8 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer	87
Tabel 4.9 Hasil uji kuat tarik belah beton geopolimer	89
Tabel 4.10 Hasil uji kuat lentur beton geopolimer	91
Tabel 4.11 Nilai porositas beton geopolimer	97
Tabel 4.12 Nilai <i>sorptivity</i> beton geopolimer	98
Tabel 4.13 Nilai penetrasi klorida beton geopolimer	99
Tabel 5.1 Modulus Elastisitas	121

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan dalam sektor transportasi turut mendorong meningkatnya kebutuhan akan konstruksi perkerasan jalan yang tidak hanya andal dan ekonomis, tetapi juga berwawasan lingkungan. Dalam konteks ini, perkerasan beton menjadi pilihan yang semakin populer karena memiliki umur layan yang relatif lebih panjang dibandingkan perkerasan aspal. Meski demikian, beton cenderung lemah terhadap gaya tarik, sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan kinerjanya, salah satunya melalui penambahan material serat ke dalam campurannya. Jenis serat yang umum digunakan antara lain serat baja, besi, fiberglass, ijuk, dan berbagai serat lainnya. Sejumlah penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa penambahan serat tersebut mampu meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton secara signifikan.

Semen secara luas dimanfaatkan sebagai bahan pengikat utama dalam pembuatan beton dan mortar melalui pencampuran dengan agregat. Namun, proses produksi semen tergolong sangat intensif secara energi, karena membutuhkan konsumsi energi yang tinggi sepanjang tahap pembuatannya. Selain itu, industri semen juga menjadi salah satu kontributor utama emisi karbon dioksida (CO₂), dengan menyumbang sekitar 7% dari total emisi global ke atmosfer. Peningkatan populasi, infrastruktur, dan aktivitas industri yang nyata, terutama di negara berkembang yang memiliki permintaan besar akan semen dan beton, menjadi penyebab masalah gas rumah kaca yang diciptakan oleh pabrik semen (Oyejobi et al., 2022). Batu bara secara luas dimanfaatkan sebagai sumber energi utama dalam pembangkitan listrik. Namun, proses pembakarannya menghasilkan produk sampingan berupa fly ash, yang dikategorikan sebagai limbah industri. Fly ash ini merupakan partikel halus yang terbawa keluar bersama gas buang, dan jika tidak ditangani dengan tepat dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Semakin bertambahnya kebutuhan listrik maka pembakaran batu bara semakin meningkat sehingga limbah batu bara (*fly ash*) semakin meningkat. Hanya sebagian

kecil dari limbah batu bara yang terserap digunakan untuk membuat semen campuran (*blended cement*), sebagian besar dibuang di kolam pembuangan.

Fly ash memiliki potensi reaktivitas kimia yang tinggi ketika dikombinasikan dengan larutan alkali pada suhu tertentu, membentuk pasta pengikat yang menyerupai sifat semen konvensional. Pasta hasil reaksi ini kemudian dapat dicampurkan dengan agregat untuk menghasilkan beton geopolimer, sehingga mengeliminasi kebutuhan akan penggunaan semen Portland dalam proses produksinya. Pendekatan ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan dalam industri konstruksi. Berbagai studi terdahulu telah meneliti potensi fly ash sebagai alternatif pengganti semen, seperti yang telah dikaji oleh (Kosim et al., 2021), (N. B. Singh, 2018), (Nyale et al., 2013), dan (Tumpu & Mabui, 2022). 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.

Fly ash dapat dicampur dengan klinker semen Portland untuk membuat semen campuran, salah satu diantaranya adalah semen portland komposit yang diproduksi di Indonesia (SNI 2049-2004), telah banyak penelitian yang menggunakan *fly ash* bersama semen portland sebagai material pembentuk beton dan mortar. Prof. Davidovits pada 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. Secara umum, aktivator alkali yang digunakan dalam sistem geopolimer terdiri dari kombinasi larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3), atau alternatif lainnya seperti kalium hidroksida (KOH) yang dikombinasikan dengan kalium silikat (K_2SiO_3). Kombinasi ini berfungsi untuk memicu reaksi polimerisasi bahan sumber seperti fly ash, menghasilkan struktur matriks yang kuat dan stabil. Beberapa produk sampingan industri yang umum digunakan sebagai substitusi semen adalah *fly ash*, *slag* (terak), dan *silica fume* (Kishore, 2023). Tujuan utama dari berbagai penelitian tersebut adalah untuk sepenuhnya menggantikan penggunaan semen Portland dengan fly ash, sebagai upaya mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Pendekatan ini dimungkinkan melalui pemanfaatan fly ash sebagai bahan dasar dalam

pembentukan material geopolimer. Dengan dukungan aktivator alkali yang tepat, fly ash dapat mengalami reaksi geopolimerisasi, membentuk matriks pengikat yang memiliki karakteristik serupa atau bahkan lebih unggul dibandingkan semen konvensional.

Salah satu strategi yang ditempuh untuk menekan konsumsi semen sekaligus meminimalkan limbah hasil pembakaran batu bara adalah dengan mengembangkan material geopolimer, yang aplikasinya dapat diterapkan baik pada beton maupun mortar. Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa bahan pengikat berbasis geopolimer mampu membentuk struktur mortar dan beton dengan kinerja yang kompetitif. Mortar dan beton yang diproduksi menggunakan fly ash sebagai bahan dasar geopolimer diketahui memiliki karakteristik fisik yang sebanding dengan mortar dan beton konvensional berbasis semen, baik dari segi kekuatan maupun durabilitas. Pendekatan ini memberikan peluang besar untuk menghasilkan material konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Geopolimerisasi adalah berdasarkan rantai alumina silika. Reaksi polimerisasi yang terjadi antara sejumlah alumina dan silika bersama dengan larutan alkali yang luas (seperti NaOH, KOH, Na_2SiO_4 atau kombinasinya).

¹⁰⁷ Fly ash adalah produk sampingan yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara dalam pembangkit listrik bertenaga uap untuk menghasilkan energi listrik. Partikel halus ini terbawa oleh gas buang selama proses pembakaran dan dapat terkumpul dalam sistem filter. Fly ash, meskipun dianggap limbah, memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk sebagai bahan pengganti semen dalam produksi beton. Fly ash yang mengandung sejumlah besar silika (S) dan alumina (Al) yang berbentuk amorf (*amorphous*) yang sesuai dan merupakan sumber material untuk membuat pengikat geopolimer. Medium alkali yang kuat sangat berpengaruh untuk fase amorf yang aktif dari fly ash, medium alkali memainkan peran katalisasi dalam reaksi geopolimer, sehingga konsentrasi dari medium alkaline memainkan peran yang penting dalam proses reaksi. Medium alkali melarutkan kandungan amorf yang mampu larut dari kandungan fly ash pada tahap awal dari reaksi polimerik untuk membentuk *precursor* geopolimer dan akhirnya material alumina silika. Oleh karena itu, salah satu parameter penting dalam geopolimerisasi adalah konsentrasi medium basa. Beton geopolimer umumnya memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan

beton konvensional yang menggunakan semen Portland biasa (OPC). Hal ini disebabkan oleh sifat kimia dan fisik dari material geopolimer, yang mampu membentuk ikatan yang lebih kuat antara partikel-partikel penyusunnya. Reaksi alkali-aktivasi yang terjadi dalam beton geopolimer menghasilkan matriks yang lebih padat dan stabil, memberikan daya dukung yang lebih besar serta ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan yang keras. 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, 2022). 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), telah terbukti efektif sebagai bahan tambahan atau pengganti semen dalam produksi beton. RHA mengandung silika yang cukup tinggi, yang dapat bereaksi dengan alkali dalam campuran beton untuk membentuk senyawa yang mirip dengan semen, meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton. Penggunaan RHA tidak hanya membantu mengurangi konsumsi semen, tetapi juga memberikan solusi ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah pertanian yang umumnya sulit dikelola. 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 & Zaheer (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.

Sebagian besar sampah yang mencemari laut (*marine debris*) terdiri dari plastik. Material ini sangat berbahaya bagi ekosistem laut karena tidak mudah terurai dan dapat bertahan di lingkungan selama ratusan tahun. Plastik yang terbuang ke laut dapat menyebabkan dampak buruk bagi kehidupan laut, mulai dari terperangkapnya hewan hingga kontaminasi rantai makanan. Upaya pengurangan

penggunaan plastik dan pengelolaan sampah yang lebih baik sangat diperlukan untuk mengatasi masalah ini. Akhir-akhir ini pertumbuhan sampah plastik menjadi sangat mengkhawatirkan jumlahnya. Hal ini disebabkan karena plastik merupakan material yang sangat sulit terurai secara alami. Proses degradasi plastik di alam memerlukan waktu yang sangat lama, bahkan hingga ratusan tahun, tergantung pada jenis plastiknya. Akibatnya, plastik yang terbuang ke lingkungan, khususnya laut, akan terus bertahan dan mengakumulasi, menyebabkan pencemaran yang signifikan dan menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem dan kehidupan laut. Usaha membatasi jumlah plastik dan memanfaatkan sampah plastik, menjadi upaya global untuk mengurangi jumlah limbah plastik di dunia. Indonesia, dengan jumlah penduduk mencapai 270,2 juta menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2020, menghadapi tantangan besar dalam mengurangi jumlah sampah plastik. Dengan populasi yang sangat besar, tingkat konsumsi plastik yang tinggi, serta sistem pengelolaan sampah yang belum sepenuhnya efektif, masalah plastik menjadi isu yang kompleks. Banyaknya sampah plastik yang tidak dikelola dengan baik berpotensi mencemari lingkungan, khususnya di wilayah pesisir dan laut, yang mempengaruhi kesehatan ekosistem serta kehidupan manusia. Perlu dilakukan upaya-upaya keras untuk menggunakan limbah plastik agar bernilai ekonomis. Pemerintah Indonesia telah meratifikasi Kyoto Protokol (1997) dan Paris Agreement (2015) dalam berkomitmen dalam menurunkan emisi gas rumah kaca serta meluncurkan IDX Carbon Credit Tahun 2023, dimana industri dan proyek yang berhasil mengurangi emisi akan mendapatkan kredit yang dapat dijual dalam bursa (Mor et al., 2023).

Selain itu, meningkatnya sampah yang dihasilkan dari proses manufaktur dan industri jasa memberikan keprihatinan terhadap lingkungan. Salah satu jenis sampah plastik yang paling banyak dihasilkan adalah PET (*Polyethylene Terephthalate*), yang memerlukan waktu sekitar 500 tahun untuk terurai di tempat pembuangan sampah. Selain itu, pembakaran PET dapat menyebabkan masalah polusi yang merugikan lingkungan. 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 et al., 2023).

Modifikasi banyak dilakukan untuk meningkatkan mutu perkerasan jalan, khususnya perkerasan jalan beton (*rigid pavement*), penelitian ini dilakukan dalam upaya mengatasi permasalahan tersebut. Selain itu perlu juga dilakukan upaya peningkatan ketahanan dan keawetan, serta pencegahan deformasi alur akibat beban lalu lintas yang meningkat. Peningkatan kualitas perkerasan jalan beton dapat dicapai dengan memodifikasi komposisi beton agar memiliki keunggulan lebih, atau dengan menambahkan bahan tambahan seperti serat ke dalam campuran beton, yang dapat meningkatkan kekuatan beton dalam menahan beban tarik.

Bahan tambah yang sering digunakan dalam campuran beton adalah polimer, yang terdapat pada plastik yang kita gunakan sehari-hari dan memiliki sifat plastomer. Plastik ini berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan tambah dalam pembuatan perkerasan jalan beton berbasis beton serat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja campuran beton berserat yang menggunakan limbah plastik sebagai bahan tambah, melalui percobaan laboratorium. Berbagai studi sebelumnya juga telah dilakukan untuk menilai efektivitas penggunaan plastik, baik sebagai bahan tambah maupun sebagai serat, dalam campuran perkerasan jalan beton.

Penelitian menunjukkan bahwa beton normal hanya memiliki kuat tarik sekitar 9-15% dari kuat tekannya, menjadikannya sangat rentan terhadap gaya tarik. Hal ini menyebabkan beton mudah retak, dengan retakan yang semakin meluas seiring waktu. Untuk meningkatkan kekuatan tarik beton, penggunaan bahan tambah menjadi suatu kebutuhan. Salah satu bahan tambah yang efektif adalah serat. Beton serat (*fiber reinforced concrete*) merupakan bentuk modifikasi beton konvensional dengan penambahan serat ke dalam campurannya. Berbagai jenis serat yang dapat digunakan untuk meningkatkan sifat beton pada beton serat meliputi serat baja, plastik, kaca, karbon, serta serat alami seperti ijuk, rami, dan serat dari tumbuhan lainnya (Anas et al., 2022).

Menurut N. B. Singh (2018), penelitian beton geopolimer 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. Penggunaan serat sintetis untuk memperkuat beton telah memperoleh popularitas yang signifikan, baik dari segi ekonomi maupun peningkatan karakteristik mekanik beton. Serat sintetis menawarkan berbagai manfaat yang dapat memperbaiki kekuatan dan daya tahan beton. Namun, penelitian terkait perilaku mekanis beton yang diperkuat dengan serat-serat ini masih terbatas, sehingga masih diperlukan kajian lebih lanjut untuk memahami sepenuhnya potensi dan keefektifan penggunaannya.

Rangan et al. (2023) melaksanakan sebuah studi eksperimental yang bertujuan untuk mengeksplorasi penggunaan limbah, seperti *fly ash* (FA), sebagai bahan utama dalam pembuatan produk geopolimer. Penelitian ini difokuskan untuk mengkaji dampak perbandingan antara FA dan *rice husk ash* (RHA) terhadap perubahan struktur mikro serta kinerja mekanik beton geopolimer setelah terpapar pada kondisi perendaman air laut. Terdapat lima variasi perbandingan bahan dasar FA dan RHA, yaitu (85:15) %, (80:20) %, (75:25) %, (70:30) %, dan (65:35) %. Kedua bahan dasar tersebut disintesis menggunakan larutan alkali aktivator yang terdiri dari NaOH, H₂O, dan Na₂SiO₃, dengan perbandingan larutan alkali terhadap bahan dasar sebesar 1:2,5. Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer untuk variasi perbandingan FA: RHA diperoleh nilai berturut-turut sebesar 45,76 MPa, 58,89 MPa, 51,72 MPa, 49,84 MPa, dan 35,55 MPa. Semua variasi perbandingan bahan dasar FA dan RHA yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi standar untuk beton yang digunakan di bawah laut. Nilai kuat tekan yang diperoleh jauh melebihi persyaratan 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 bahan tambah yang dapat diterapkan pada beton adalah limbah plastik. Sampah plastik menjadi masalah besar saat ini karena sulit terurai oleh bakteri dan penggunaannya yang sangat luas. Indonesia tercatat sebagai penyumbang sampah plastik terbesar kedua di dunia. Oleh karena itu, penambahan plastik dalam bentuk serat ke dalam campuran beton dapat meningkatkan kekuatan tarik beton, sekaligus membantu mengurangi masalah sampah plastik yang semakin meningkat.

Modesta & Zaidir (2019) melaksanakan sebuah penelitian yang menambahkan serat plastik PET (Polyethylene Terephthalate) dengan ukuran 1–3 mm dan panjang 2,5 cm pada benda uji berbentuk silinder dengan tinggi 20 cm dan

diameter 10 cm. Variasi persentase serat yang digunakan dalam campuran beton adalah 0%, 0,25%, 0,5%, dan 1%. Berdasarkan pengujian yang dilakukan pada hari ke-7, 14, dan 28, beton yang mengandung serat plastik PET menunjukkan peningkatan signifikan dalam kuat tekan dan kuat tarik belah dibandingkan dengan beton biasa. Penambahan serat plastik PET sebesar 0,5% memberikan peningkatan kuat tekan sebesar 11,667% dan meningkatkan kuat tarik belah secara signifikan sebesar 25,507% pada hari ke-28, dibandingkan dengan beton tanpa serat plastik.

Penelitian lain juga dilakukan oleh Kosim et al. (2021), Titik puncak yang tercatat dalam pengujian kuat tekan rata-rata untuk variasi beton campuran limbah cup plastik terjadi pada persentase 0,5%, di mana kuat tekan rata-rata beton normal adalah 24,04 MPa, sementara kuat tekan rata-rata beton campuran limbah cup plastik 0,5% mencapai 24,20 MPa. Peningkatan yang terjadi sebesar 0,16% atau setara dengan 0,16 MPa.

Penelitian serupa juga telah dilakukan oleh [nama peneliti], yang mengkaji studi eksperimental beton geopolimer dengan penambahan serat plastik PET pada variasi 0,25% dan 0,5% terhadap berat beton. Serat PET ini diperoleh dari sisa-sisa botol plastik yang tidak terpakai. Peneliti menyiapkan 30 sampel benda uji yang terbagi menjadi tiga kelompok, yaitu 9 benda uji kubus tanpa penambahan PET, 3 benda uji kubus dengan 0,25% penambahan PET dari berat beton, dan 6 benda uji kubus dengan 0,5% penambahan PET dari berat beton. Selain itu, ada 6 benda uji silinder tanpa serat PET dan 6 benda uji silinder dengan penambahan 0,25% PET. Benda uji kubus digunakan untuk mengukur kuat tekan, sementara benda uji silinder digunakan untuk mengukur 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%.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan potensi geopolimer dengan menggabungkan *Fly Ash (FA)* dan *Rice Husk Ash (RHA)* dalam pembuatan beton yang mengandung serat dari limbah plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*). Aktivator berupa NaOH dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3), bersama dengan serat plastik limbah, dipilih sebagai bahan untuk beton serat dalam eksperimen ini.

Berdasarkan hal tersebut, judul penelitian ini adalah: **“Perilaku Mekanis dan Durabilitas Perkerasan Beton Geopolimer dengan Menggunakan Limbah Plastik PET”**.

1.2 Identifikasi Masalah

Beberapa masalah yang diidentifikasi terkait dengan perkerasan beton geopolimer yang menggunakan limbah plastik antara lain:

1. Perkerasan beton lemah terhadap kuat tarik sehingga perlu diperkuat dengan penggunaan serat.
2. Perkerasan beton pada lingkungan yang ekstrim dan pengaruh gesekan akibat beban lalu lintas yang berulang menyebabkan perkerasan tidak tahan lama sehingga perlu diperkuat dengan penggunaan serat.
3. Permasalahan limbah yang semakin besar dapat diatasi ¹salah satunya dengan pemanfaatan limbah plastik PET sebagai campuran beton dengan fungsi sebagai serat.
4. Inovasi yang digunakan adalah dengan penggunaan beton geopolimer dan penggunaan limbah plastik PET sebagai serat untuk menaikkan sifat mekanis dan sifat durabilitas beton.

1.3 Rumusan Masalah ⁴³

Berdasarkan uraian di atas, penulis mengidentifikasi beberapa permasalahan sebagai berikut:

1. ²⁰⁰Bagaimana limbah plastik PET yang digunakan sebagai serat mempengaruhi sifat mekanik beton geopolimer yang terbuat dari fly ash (FA), rice husk ash (RHA), dan alkali aktivator?
2. Bagaimana pengaruh limbah plastik PET sebagai serat pada sifat durabilitas beton geopolimer yang terbuat dari fly ash (FA), rice husk ash (RHA) dan alkali aktivator.
3. Bagaimana hubungan sifat mekanik dan sifat durabilitas beton geopolimer yang terbuat dari fly ash (FA), rice husk ash (RHA) dan alkali aktivator yang diperkuat dengan limbah plastik PET sebagai serat.

15

1.4 Maksud dan Tujuan

Tujuan dari penelitian disertasi ini adalah untuk mengembangkan alternatif perkerasan beton polimer dengan penambahan limbah plastik PET sebagai serat, guna memperoleh kinerja perkerasan beton yang lebih optimal.

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis dampak penggunaan limbah plastik PET sebagai serat terhadap sifat mekanik beton geopolimer.
2. Menganalisis dampak penggunaan limbah plastik PET sebagai serat terhadap sifat durabilitas beton geopolimer.
3. Merumuskan hubungan sifat mekanik dan durabilitas beton geopolimer.
4. Mengetahui manfaat penggunaan *fly ash (FA)*, *rice husk ash (RHA)* dan limbah plastik PET sebagai bahan alternatif pembuatan beton geopolimer.

12

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemahaman tentang karakteristik mekanik dan durabilitas beton geopolimer yang terbuat dari *fly ash (FA)*, *rice husk ash (RHA)*, dan alkali aktivator, baik dengan maupun tanpa penambahan limbah plastik PET sebagai serat, dapat digunakan sebagai referensi awal dalam proyek konstruksi.
2. Penelitian ini dapat memberikan pertimbangan dan rekomendasi kepada pemerintah, sektor swasta, serta semua pihak yang terlibat dalam industri konstruksi, khususnya dalam upaya mengurangi penggunaan semen, mengoptimalkan pemanfaatan material limbah (seperti *fly ash*, RHA, dan limbah plastik), serta mendukung pembangunan infrastruktur di daerah-daerah yang kekurangan atau tidak memiliki bahan pengikat untuk pembuatan beton.
3. Penelitian ini dapat menjadi sumber referensi untuk penelitian lebih lanjut mengenai beton geopolimer yang dibuat dari *fly ash* dan alkali aktivator, baik dengan maupun tanpa penambahan limbah plastik PET sebagai serat, serta terkait dengan pemanfaatan material limbah (seperti *fly ash (FA)*, *rice husk ash (RHA)*, dan limbah plastik) dalam pembuatan beton geopolimer yang diperkuat dengan serat plastik PET.

1.6 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilaksanakan melalui uji eksperimen yang dilakukan di laboratorium.
2. Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari limbah buangan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang terletak di Kabupaten Jeneponto, Provinsi Sulawesi Selatan.
3. Rice husk ash (RHA) yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari limbah pertanian yang ada di Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan.
4. Beton geopolimer yang dihasilkan akan diuji melalui berbagai uji, termasuk uji kuat tekan, uji kuat tarik belah, uji kuat lentur, serta pengujian homogenitas, XRD, dan SEM.
5. Alkali aktivator yang digunakan dalam penelitian ini adalah NaOH (Natrium Hidroksida) dan Na_2SiO_3 (Natrium Silikat).
6. Serat yang digunakan yakni limbah plastik jenis PET (Polyethylene Therephthalate).
7. Fraksi volume serat limbah plastik yaitu 0%, 0,25, 0,5%, 0,75% terhadap volume beton.
8. Curing beton menggunakan curing udara.
9. Analisis perhitungan dalam penelitian ini tidak mempertimbangkan efek bridging.
10. Uji kekuatan tekan, tarik, dan lentur dilaksanakan pada usia beton masing-masing 3, 7, 28, dan 90 hari. Sementara itu, uji sorptivitas, penetrasi klorida, porositas, serta abrasi dilakukan pada sampel beton yang telah mencapai umur 28 hari.

1.7 Originalitas dan Pembaharuan

Penelitian ini diawali pekerjaan peneliti yang berhubungan dengan monitoring kualitas pekerjaan perkerasan beton khususnya pada jalan-jalan daerah yang lebih banyak menggunakan perkerasan beton dibandingkan perkerasan aspal. Kerusakan perkerasan beton sebagian besar dikarenakan lemahnya plat beton dalam menahan gaya tarik sehingga menyebabkan retak pada beton. Penelitian beton

dengan menggunakan serat baja, serat fiberglass sudah dilakukan oleh peneliti lainnya. Penelitian beton dengan menggunakan serat limbah plastik, khususnya beton geopolimer pada aplikasi perkerasan beton belum terlalu banyak sehingga peneliti bermaksud mengembangkan penelitian ini.

A. Pengembangan (*development*) Penelitian

Pengembangan dari penelitian ini diantaranya:

1. Pengembangan penelitian terhadap perilaku mekanis dan durabilitas perkerasan beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik.
2. Pengembangan variasi penambahan limbah plastik pada campuran beton geopolimer.

B. Pembaharuan (*novelty*) Penelitian

Hasil yang diharapkan dari penelitian ini, yang dapat menjadi inovasi dan pembaruan, adalah:

1. Pemanfaatan *fly ash* sebagai limbah dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan *rice husk ash* (RHA) sebagai limbah dari sektor pertanian, yang dapat dijadikan bahan utama dalam pembuatan beton geopolimer untuk aplikasi pada perkerasan beton.
2. Limbah plastik dapat menjadi salah satu alternatif pemilihan material untuk peningkatan sifat mekanis dan durabilitas beton geopolimer yang dapat diaplikasikan pada perkerasan beton.
3. Memberikan gambaran hubungan kekuatan dan durabilitas beton geopolimer berbahan material *fly ash* (FA), *rice husk ash* (RHA) dan limbah plastik PET yang dapat diaplikasikan pada perkerasan beton.
4. Menyediakan pemahaman mengenai hubungan antara kekuatan beton geopolimer dengan rasio persentase limbah plastik PET yang digunakan sebagai serat, yang di aplikasikan pada perkerasan beton.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geopolimer

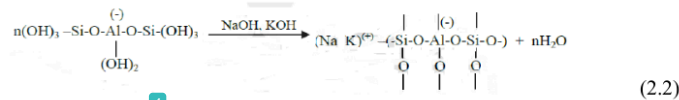
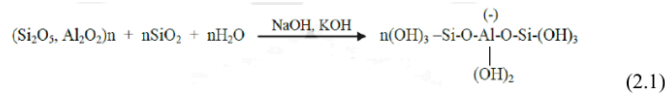
Geopolimer adalah material yang ramah lingkungan yang sedang dikembangkan sebagai calon pengganti beton semen di masa depan. Beton jenis ini terbentuk melalui proses sintesis bahan non-organik yang mengalami polimerisasi. Bahan utama dalam pembuatan beton geopolimer mengandung kandungan silika dan alumina yang tinggi, yang banyak ditemukan pada limbah industri, seperti fly ash atau abu terbang, yang merupakan hasil pembakaran batu bara (Budiningrum et al., 2021).

Pembuatan beton geopolimer memerlukan penggunaan alkali aktivator untuk merespons kandungan silika dan alumina dalam fly ash, karena bahan ini tidak bersifat semen. Aktivator yang digunakan umumnya berupa sodium hidroksida dan sodium silikat. Sodium silikat berfungsi untuk mempercepat proses polimerisasi, sedangkan sodium hidroksida bertugas merespons unsur alumina dan silika, membentuk ikatan polimer yang kokoh. Peningkatan konsentrasi molaritas aktivator dapat meningkatkan kekuatan tekan dan tarik belah beton geopolimer. Namun, beton geopolimer diketahui memiliki sifat yang lebih rapuh dibandingkan beton konvensional (Alextriando & Jaya Ekaputri, 2019).

Seperti halnya semen, fly ash yang dicampurkan dengan alkali aktivator memerlukan waktu untuk bereaksi dan mengeras. Pada pengujian waktu pengaturan semen, hal ini dipengaruhi oleh jenis semen dan jumlah air yang digunakan, sementara pada fly ash, waktu pengaturan sangat tergantung pada klasifikasi kelas fly ash, perbandingan antara fly ash dan alkali aktivator, serta molaritas alkali aktivator yang digunakan. Penelitian menunjukkan bahwa aktivator yang umum digunakan adalah sodium hidroksida dengan molaritas antara 8 M hingga 14 M, serta sodium silikat dengan perbandingan antara 0,5 hingga 2,5.

Dalam proses geopolimerisasi, terjadi reaksi kimia antara oksida alumina-silikat (SiO_2 , Al_2O_3) dan alkali polisilikat, yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Polisilikat yang digunakan biasanya berupa natrium silikat atau kalium silikat, yang diperoleh dari industri kimia atau sebagai produk sampingan dari proses

metalurgi ferro-silikon, berupa bubuk silika halus. Proses polikondensasi oleh alkali menghasilkan poli(sialat-siloks), yang dapat dijelaskan dalam reaksi kimia berikut:



Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa geopolimer memiliki berbagai keunggulan, antara lain kekuatan awal yang tinggi, penyusutan yang rendah, serta ketahanan terhadap sulfat, korosi, asam, api, dan reaksi agregat alkali yang aman. Keunggulan-keunggulan ini menjadikan geopolimer sebagai bahan yang ramah lingkungan dan aman untuk digunakan. Tabel 2.1 menunjukkan karakteristik fisik dari pasta, mortar, dan beton geopolimer yang terbuat dari fly ash serta alkali aktivator KOH dan Na_2SiO_3 . Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa beton geopolimer memiliki kekuatan tekan pada umur 3 hari sekitar 70 MPa, yang menandakan bahwa beton ini memiliki performa kekuatan tekan yang baik pada umur awal (*early strength concrete*).

Tabel 2.1 Karakteristik fisik pasta, mortar dan beton geopolimer

Tipe	Rongga udara (%)	Berat jenis (kg/m ³)	Kuat tekan pada umur 3 hari (MPa)	
			Tidak terekspos	Terekspos
Pasta	2,35	1940,4	71,2	19,0
Mortar	2,30	2291,8	72,3	0,0
Beton	2,40	2575,8	70,5	29,3

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 terdegradasi dalam campuran *geopolimer-fly ash* yang diaktifkan dengan alkali.

Ahmed et al. (2020) 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. Evin & Rachmansyah (2023) menemukan bahwa kekuatan lentur spesimen geopolimer yang mengandung partikel PET juga lebih tinggi daripada komposit dengan strip dan serpihan. Apabila 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 et al. (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 PET 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 pada beton yang mengandung plastik daur ulang disebabkan oleh ketidakteraturan dan ketidakseragaman bentuk partikel plastik yang digunakan. Kondisi ini berdampak negatif pada kemampuan kerja campuran beton.

Dawood et al. (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 Sifat-Sifat Geopolimer

Berbagai penelitian yang telah dilakukan melaporkan bahwa geopolimer memiliki kekuatan awal yang tinggi, penyusutan (*shrinkage*) yang rendah, serta memiliki ketahanan terhadap sulfat, korosi, asam, api, dan reaksi agregat alkali

yang tidak berbahaya. Penggunaan ini menunjukkan bahwa geopolimer sangat cocok digunakan sebagai material yang ramah terhadap lingkungan karena memanfaatkan bahan material yang tergolong sebagai limbah.

Solikin (2021) melakukan penelitian mengenai beton geopolimer dengan menggabungkan fly ash tipe F untuk menekan biaya produksi beton. Tujuan dari studi literatur ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi slag dan fly ash tipe F dalam perbandingan 1:1 terhadap kekuatan tekan beton geopolimer serta dampaknya terhadap biaya pembuatan beton, menggunakan metode curing. Penelitian ini mengumpulkan data sekunder dari jurnal yang diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2020. Jurnal yang digunakan memilih kombinasi bahan pengikat, yaitu fly ash tipe F dan slag dalam rasio 1:1, serta 100% fly ash tipe F dan 100% slag. Analisis pada kekuatan tekan menggunakan molaritas 8 M, 12 M, dan 16 M untuk kombinasi binder fly ash dan slag 1:1, 100% fly ash, dan 100% slag. Selain itu, rasio alkali aktivator ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) yang dianalisis meliputi 0,5; 2; 2,5 dengan molaritas 8 M dan 12 M. Untuk analisis metode curing dan perbedaan biaya beton, digunakan molaritas 8 M dan 12 M dengan rasio 2,5.

Budiningrum et al. (2021) melakukan penelitian mengenai perilaku tekan beton geopolimer yang berbahan dasar fly ash melalui pendekatan eksperimen. Metode desain beton geopolimer yang digunakan mirip dengan beton semen, karena hingga saat ini belum ada standar yang baku untuk desain campuran beton geopolimer. Komposisi utama beton geopolimer terdiri dari agregat, larutan alkali, dan prekursor, dengan kandungan agregat kasar antara 70 hingga 75%, sementara larutan alkali dan prekursor memiliki kandungan antara 20 hingga 35%. Larutan alkali yang berfungsi sebagai aktivator terdiri dari Natrium Hidroksida (NaOH) yang berperan dalam mereaksikan bahan pengikat dengan senyawa yang ada dalam fly ash, sedangkan natrium silikat (Na_2SiO_3) berfungsi untuk mempercepat proses polimerisasi. Fly ash menjadi prekursor utama dalam pembuatan beton geopolimer ini.

2.3 Material Pembentuk Mortar Geopolimer

2.3.1 Abu Terbang (Fly Ash)

Berdasarkan ASTM C618-17a (2017), Fly ash merupakan partikel halus berukuran mikroskopis yang dihasilkan sebagai produk samping dari proses

pembakaran batu bara dalam sistem pembangkit energi. *Fly ash* umumnya tersusun atas komponen kimia utama berupa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3), yang memberikan kontribusi signifikan terhadap sifat pozzolaniknya. Di samping itu, *fly ash* juga mengandung unsur kimia lainnya dalam jumlah yang bervariasi, seperti oksida kalsium (CaO), magnesium (MgO), sulfur trioksida (SO_3), alkali (Na_2O dan K_2O), fosfor pentoksida (P_2O_5), mangan oksida (Mn_2O_3), serta titanium dioksida (TiO_2). Berdasarkan klasifikasi yang ditetapkan dalam standar ASTM C618-19, *fly ash* dibagi ke dalam tiga kelas, yaitu kelas N, F, dan C, sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 2.2. Kelas N mensyaratkan kandungan gabungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 minimal sebesar 70%, sedangkan untuk kelas F dan C, persentase total ketiga oksida tersebut berada dalam rentang antara 50% hingga 70%. Dengan demikian, *fly ash* kelas N (hanya dilaporkan) dan kelas F (maksimal 18%) memiliki kadar CaO yang relatif rendah jika dibandingkan dengan kelas C, yang secara khas memiliki kandungan CaO melebihi 18% (ASTM C618-17a, 2017).

Material padat merupakan salah satu unsur utama dalam sistem anorganik geopolimer. Bahan padat yang digunakan dalam formulasi geopolimer dapat berasal dari mineral alami seperti kaolin, tanah liat, mika, andalusit, dan spinel. Sebagai alternatif, sejumlah limbah industri juga dapat dimanfaatkan, termasuk *fly ash*, silika fume, slag (terak), abu sekam padi (*rice husk ash*), lumpur merah, dan residu lainnya. Dalam penelitian ini, *fly ash* digunakan sebagai sumber bahan padat utama. *Fly ash* adalah produk samping dari aktivitas industri, terutama sebagai residu dari pembakaran batu bara dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Material ini termasuk dalam kategori pozzolan, yaitu bahan yang kaya akan silika atau alumina yang secara alami tidak menunjukkan sifat semen (*cementitious*), namun mampu bereaksi secara kimia dengan larutan alkali pada kondisi suhu tertentu untuk membentuk produk dengan karakteristik menyerupai semen. *Fly ash* dikenal sebagai partikel serbuk halus hasil pembakaran batu bara, yang dipisahkan dari gas buang melalui sistem penangkap mekanis atau elektrostatis. Secara fisik, *fly ash* tersusun atas partikel dengan ukuran dominan antara 1 hingga 150 mikrometer, dan umumnya lolos dari ayakan berukuran 45 mikrometer. Berdasarkan (ASTM C618-17a, 2017), *fly ash* merupakan partikel halus yang terbentuk sebagai residu dari proses pembakaran batu bara. Pemanfaatan *fly ash*

dalam campuran **beton** maupun mortar menawarkan berbagai keunggulan, baik pada kondisi segar maupun setelah mengeras. Pada tahap beton atau mortar segar, penggunaan *fly ash* diketahui dapat meningkatkan kelacakan (*workability*), menurunkan kebutuhan air, serta meminimalkan terjadinya *bleeding*. Selain itu, fly ash juga berkontribusi dalam memperlambat proses pengikatan awal, yang sangat bermanfaat dalam memperpanjang waktu kerja (*setting time*) selama tahap pengecoran.

Tabel 2.2. Kebutuhan fisik abu terbang (ASTM C618-17a, 2017)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
Persentase maksimum partikel yang melewati saringan basah berukuran No. 325 (45 mikrometer)	34	34	34
Pada pengujian dengan semen Portland, evaluasi dilakukan pada usia perawatan selama 7 hari	75 ^c	75 ^c	75 ^c
Pengujian dilakukan menggunakan semen Portland setelah periode perawatan selama 28 hari	75 ^c	75 ^c	75 ^c
Kebutuhan air maksimum. % dari kontrol	115	105	105
Persentase maksimum ekspansi atau perubahan dimensi	0,8	0,8	0,8
Persentase variasi maksimum dari rata-rata berat jenis	5	5	5
Persentase maksimum variasi dari rata-rata partikel yang lolos saringan No. 325 (45 mikrometer)	5	5	5

Tabel 2.3. Kebutuhan kandungan kimia *fly ash* (ASTM C618-17a, 2017)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
Persentase minimum gabungan antara silikon dioksida (SiO ₂), aluminium oksida (Al ₂ O ₃), dan besi oksida (Fe ₂ O ₃)	70,0	50,0	50,0
Persentase kalsium oksida (CaO)	dilaporkan	maks.18,0	>18,0
Persentase maksimum sulfur trioksida (SO ₃)	4,0	5,0	5,0
Persentase maksimum kandungan air	3,0	3,0	3,0
Persentase maksimum kehilangan pada pembakaran (LOI)	10,0	6,0	6,0

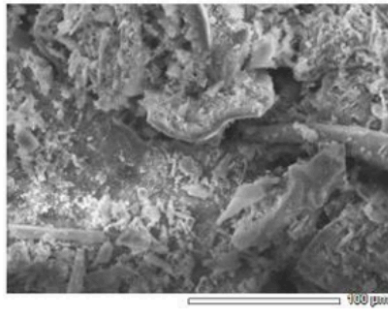
Pemanfaatan fly ash dalam beton memberikan berbagai keuntungan, baik pada tahap beton segar maupun setelah beton mengeras. Pada beton segar, fly ash

dapat meningkatkan kelancaran pencampuran (workability), mengurangi kebutuhan air, mengurangi terjadinya bleeding, serta memperlambat waktu pengikatan selama proses pengecoran. Sementara pada beton yang sudah mengeras, fly ash melanjutkan aktivitas pozzolan yang memungkinkan beton mencapai kekuatan yang lebih tinggi di kemudian hari. Hal ini terjadi karena fly ash berreaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang dihasilkan selama hidrasi semen.

Penggunaan fly ash dalam beton tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan kekuatan beton, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi emisi karbon dioksida (CO_2) yang dilepaskan selama proses produksi semen. Fly ash memiliki potensi besar sebagai substitusi semen dalam campuran beton. Selain memberikan kekuatan yang optimal pada beton, fly ash juga berperan dalam menurunkan dampak lingkungan dengan mengurangi CO_2 yang dihasilkan. Menurut Skariah Thomas et al. (2022), meskipun silikat dan alumina adalah komponen utama dalam reaksi geopolimer, kandungan kalsium oksida (CaO) yang tinggi serta proporsi partikel fly ash yang lebih kecil dari $5\ \mu\text{m}$ dapat memengaruhi karakteristik geopolimer. Mereka merekomendasikan agar kandungan CaO yang melebihi 20% dihindari dalam pembuatan geopolimer karena dapat mempercepat proses pengerasan beton.

2.3.2 Rice Husk Ash (RHA)

Abu sekam padi (Rice Husk Ash/RHA) adalah produk sampingan dari sektor pertanian yang diperoleh melalui proses pembakaran sekam padi. RHA memiliki potensi untuk digunakan sebagai pupuk bagi tanaman, serta sebagai bahan tambahan dalam campuran beton, mengingat kandungan silika yang tinggi. Silika ini diserap oleh tanaman padi dari tanah dan disimpan dalam biji-bijian serta sekam yang melapisi biji tersebut (Mohseni et al., 2019). Sekam padi yang dibakar pada suhu antara 600 hingga 900°C menghasilkan abu sekam padi (RHA) dengan kandungan sekitar 16 hingga 25%, yang mengandung silika dengan konsentrasi tinggi, berkisar antara 87 hingga 97%. Kandungan silika yang tinggi ini menjadikan RHA berguna dalam berbagai aplikasi, seperti kosmetik dan deterjen. RHA yang dibakar pada suhu antara 400 hingga 500°C menghasilkan silika amorf, sementara yang dibakar pada suhu lebih dari 1000°C akan menghasilkan silika kristalin.



Gambar 2.1 Struktur RHA yang dilihat dari mikroskop

Sumber: (Sandya et al., 2019)

2.3.3 Alkali Aktivator

Alkali aktivator diklasifikasikan dalam enam kelompok berdasarkan komposisi kimianya:

1. Alumino-silicates: $M_2O \cdot nAl_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$
2. Aluminates: $M_2O \cdot nAl_2O_3$
3. Silicates: $M_2O \cdot nSiO_2$
4. Non-silicate weak acid salts: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF dan lain-lain.
5. Non-silicate strong acid salts: M_2SO_4
6. Caustic alkalis: MOH

Penelitian menunjukkan bahwa aktivator alkali, seperti sodium silikat (Na_2SiO_3) atau campuran antara sodium silikat dan sodium hidroksida (NaOH), dapat menghasilkan kekuatan yang baik pada geopolimer berbasis fly ash. Kombinasi Na_2SiO_3 dan NaOH dipilih dalam penelitian ini karena telah banyak digunakan oleh peneliti sebelumnya dan terbukti memberikan hasil yang memuaskan.

Dosis aktivator alkali (% Na_2O) didefinisikan sebagai rasio antara Na_2O dan berat binder (fly ash), sementara modulus aktivator (M_s) adalah rasio antara berat SiO_2 dan Na_2O dalam aktivator alkali, yaitu:

$$\%Na_2O = \%Na_2O \text{ pada } SiO_3 \text{ dan NaOH} / \text{berat binder}$$

$$M_s = SiO_2 \text{ (aktivator)} / Na_2O$$

Aktivator adalah senyawa yang digunakan untuk memicu polimerisasi dalam beton geopolimer. Hidroksida yang terkandung dalam aktivator akan bereaksi dengan silika dan alumina yang ada dalam fly ash, menghasilkan pelepasan H_2O sebagai produk sampingan dari proses polimerisasi. NaOH berfungsi sebagai aktivator dalam beton geopolimer berbahan dasar fly ash, yang dapat memengaruhi kekuatan tekan beton geopolimer. Semakin tinggi konsentrasi NaOH, maka kekuatan beton geopolimer akan meningkat. Hal ini disebabkan oleh jumlah mol yang semakin banyak, yang memperkuat reaksi polimerisasi. Sementara itu, Na_2SiO_3 memainkan peran krusial dalam mempercepat proses polimerisasi dengan mempercepat pembentukan polimer (Karyawan Salain et al., 2021).

2.3.4 Air

Air diperlukan dalam pembuatan mortar untuk memfasilitasi reaksi kimia dengan semen, membasahi agregat, serta melumasi campuran agar lebih mudah saat diproses. Biasanya, air minum digunakan dalam campuran beton. Namun, air yang mengandung zat-zat berbahaya seperti garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya dapat merusak kualitas beton jika digunakan. Penggunaan air yang tercemar tersebut dapat menurunkan kekuatan beton, mengubah sifat semen, serta mengurangi afinitas antara agregat dan pasta semen, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi kenyamanan dan kemudahan dalam pengerjaan campuran beton.

Oleh karena pasta semen terbentuk melalui reaksi kimia antara semen dan air, yang menentukan kualitas campuran bukanlah perbandingan jumlah air terhadap total material (semen + agregat halus + agregat kasar), melainkan perbandingan antara air dan semen saja. Penggunaan air yang berlebihan dapat menyebabkan terbentuknya banyak gelembung udara setelah proses hidrasi selesai, sementara kekurangan air dapat menghambat proses hidrasi sehingga tidak berjalan dengan sempurna.

2.4 Plastik

Plastik awalnya diproduksi dari minyak dan gas sebagai bahan alami, namun seiring berjalannya waktu, bahan sintetis mulai digunakan untuk menggantikan sumber alami tersebut. Hal ini memungkinkan pembuatan plastik dengan sifat-sifat yang diinginkan melalui proses kompolimerisasi, laminasi, dan ekstrusi. Plastik

adalah polimer yang memiliki keunggulan seperti kekuatan yang tinggi namun ringan, tahan karat, bersifat termoplastis, serta dapat diwarnai sesuai kebutuhan.

Duggal et al. (2020), membagi beberapa jenis plastik yang biasa digunakan yaitu:

1. PET (Polyethylene Terephthalate) banyak digunakan dalam pembuatan botol kemasan air mineral, botol minyak goreng, botol obat-obatan, dan botol kosmetik.
2. HDPE (High Density Polyethylene) biasanya digunakan untuk pembuatan botol susu cair, botol obat, serta botol kosmetik.
3. LDPE (Low Density Polyethylene) sering digunakan untuk membuat tutup plastik, pembungkus daging, serta berbagai jenis plastik tipis lainnya.
4. PE (Polyethylene).
5. PP (Polypropylene) digunakan dalam pembuatan tutup botol plastik, mainan anak-anak, serta wadah margarin.
6. PS (Polystyrene) digunakan untuk memproduksi garpu dan sendok plastik, wadah makanan dari styrofoam, serta tempat makan plastik transparan.
7. Vinyl (Polyvinyl Chloride).

Sampah plastik memberikan dampak negatif bagi lingkungan karena kesulitan dalam proses penguraian. Limbah plastik yang dibuang sembarangan dapat menyumbat saluran air, selokan, dan sungai, yang pada akhirnya berisiko menyebabkan banjir. Selain itu, pembakaran limbah plastik menghasilkan zat-zat berbahaya bagi kesehatan manusia, seperti karbon monoksida, dioksin, senyawa volatil, dan berbagai bahan beracun lainnya.

Pengolahan limbah plastik dapat dilakukan secara manual oleh individu maupun oleh fasilitas pabrik. Limbah plastik yang diproses secara manual sering kali diubah menjadi kreasi atau produk dengan sentuhan ide kreatif. Sementara itu, limbah plastik yang diolah oleh pabrik umumnya akan diproses menjadi barang serupa dengan produk asli yang sudah didaur ulang. Sebagian besar limbah plastik dimanfaatkan kembali sebagai produk yang sama, meskipun kualitasnya cenderung lebih rendah. Penggunaan limbah plastik sebagai bahan konstruksi masih jarang ditemukan.

Menurut Napper & Thompson (2023), selain dimanfaatkan sebagai bahan daur ulang, sejumlah besar limbah plastik juga memiliki potensi untuk digunakan

dalam industri konstruksi. Beberapa aplikasi limbah plastik dalam sektor konstruksi antara lain:

1. Agregat yang digunakan dalam pembuatan beton ringan.
2. gregat yang digunakan sebagai komponen dalam campuran aspal.
3. Serat yang digunakan untuk memperkuat campuran beton.
4. Agregat sintetis atau bahan pengikat beton yang diperoleh melalui proses pencairan.
5. Penguatan pada plester dengan menggunakan plastik.

Plastik merupakan bahan yang sangat multifungsi dan digunakan secara luas dalam kehidupan sehari-hari. Saat ini, plastik menjadi bahan baku yang lebih ekonomis dan efisien. Berbagai sektor kehidupan manusia, seperti kemasan, otomotif, elektronik, kelistrikan, konstruksi, dan komunikasi, memanfaatkan plastik. Namun, plastik memiliki sifat non-biodegradable, yang artinya limbah plastik memerlukan waktu hingga 4.500 tahun untuk terurai. Hal ini mengakibatkan pencemaran lingkungan jika limbah plastik tidak dikelola dengan baik.

Salah satu cara untuk mendaur ulang plastik PET adalah dengan menjadikannya sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Apriliya et al. (2021) menganalisis perbandingan antara berat isi dan kuat tekan beton dengan penambahan serat plastik PET sebagai pengganti agregat halus pada berbagai persentase (1%, 2%, dan 3%), dibandingkan dengan beton dengan campuran standar. Sampel beton yang digunakan berbentuk silinder dengan dimensi 11 cm x 12 cm, dan dirancang untuk memiliki mutu beton sebesar 25 MPa. Pengujian dilakukan pada hari ke-7, 14, dan 28 setelah pembuatan sampel. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa penggunaan serat plastik PET menyebabkan penurunan berat isi beton antara 1% hingga 4%, dengan penurunan terbesar terjadi pada sampel dengan penambahan serat plastik PET sebesar 3%. Kuat tekan beton pada hari ke-28, dengan penambahan serat plastik PET sebanyak 1%, tercatat mencapai 16,48 MPa, yang menunjukkan peningkatan sebesar 23,684% dibandingkan beton standar. Serat plastik PET digunakan dalam bentuk potongan berukuran 1-3 mm dengan panjang 2,5 cm dalam adukan beton.

Beton yang menggunakan campuran limbah plastik PET merupakan salah satu solusi untuk mengurangi akumulasi limbah plastik di lingkungan. Plastik PET yang berasal dari botol plastik dipotong memanjang sehingga membentuk serat-

serat kecil. Penambahan serat ini dalam campuran beton penting, mengingat beton memiliki kelemahan pada kekuatan tariknya (Saikia & De Brito, 2012). Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) adalah resin polimer termoplastik yang termasuk dalam kelompok poliester. PET banyak digunakan dalam industri kimia, terutama untuk memproduksi botol minuman, wadah makanan, serta dipadukan dengan serat kaca dalam pembuatan resin teknik. PET juga merupakan bahan baku utama dalam industri tekstil. Secara kimia, rumus PET adalah $(-CO-C_6H_5-CO-O-CH_2-CH_2-O)_n$. Plastik PET dikenali dengan kode daur ulang nomor 1, seperti pada botol air mineral. PET memiliki titik leleh yang relatif tinggi, kekuatan dan kekakuan yang tinggi, dimensi yang stabil, serta tahan terhadap bahan kimia dan panas. Selain itu, plastik ini juga memiliki sifat listrik yang baik. Kekuatan tarik PET lebih tinggi dibandingkan dengan plastik lainnya seperti HDPE (High Density Polyethylene), PP (Polypropylene), dan LDPE (Low Density Polyethylene).

Penelitian yang dikembangkan oleh Irmawaty dkk. (2020) mengenai properti mekanis beton, khususnya uji kuat tekan beton silinder yang menggunakan limbah plastik sebagai substitusi parsial terhadap agregat kasar. Dalam penelitian ini, tiga benda uji silinder dengan ukuran 100 x 200 mm disiapkan untuk empat variasi substitusi parsial yaitu 0%, 10%, 15%, dan 20%, dengan nilai rasio air-semen (w/c) sebesar 0,40. Beton yang diuji tekan menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*) di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai kuat tekan pada umur 28 hari untuk tiap variasi berturut-turut adalah 26,84 MPa, 21,14 MPa, 13,86 MPa, dan 12,84 MPa. Kuat tekan beton mengalami penurunan seiring dengan peningkatan persentase plastik PET, di mana penambahan plastik PET lebih dari 10% menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan sebesar 48%. Oleh karena itu, substitusi parsial terhadap volume agregat kasar sebaiknya dibatasi hingga 10% saja.

Polimer merupakan salah satu bahan pengubah (modifier) yang umum diterapkan untuk meningkatkan mutu campuran beraspal. Mengingat plastik mengandung senyawa polimer, maka limbah plastik memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton geopolimer, khususnya sebagai serat. Hal ini memungkinkan pemanfaatan limbah plastik untuk memperbaiki karakteristik dan performa beton geopolimer.

2.5 Beton Serat

Serat (fiber) adalah salah satu bahan tambahan yang digunakan dalam pembuatan beton. Beton yang ditambahkan dengan serat dikenal sebagai beton serat (fiber reinforced concrete). Penambahan serat ini menjadikan beton sebagai bahan komposit yang terdiri dari beton dan serat. Serat yang digunakan dapat berupa berbagai jenis, seperti asbestos, kaca, plastik, baja, atau serat alami seperti jerami dan ijuk. Tujuan utama penambahan serat pada beton adalah untuk meningkatkan kekuatan tariknya, mengingat beton secara alami memiliki kekuatan tarik yang sangat rendah. Kekuatan tarik yang rendah ini menyebabkan beton rentan terhadap retakan, yang dapat mengurangi umur pakai dan keawetan beton. Dengan adanya serat, beton menjadi lebih tahan terhadap retak. Namun, perlu dicatat bahwa penambahan serat tidak secara signifikan meningkatkan kuat tekan beton, melainkan hanya menambah ketangguhan atau ductility beton.

Penambahan serat baja pada beton tidak memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kuat tekan beton, namun terbukti dapat memperbaiki kekuatan lentur beton. Dalam beton yang diperkuat serat, beban dan deformasi akan dialihkan kepada serat tersebut. Dengan penggunaan serat yang memiliki kekuatan tinggi, akan tercapai peningkatan sifat mekanik beton, baik dari segi kekuatan statis maupun dinamis, jika fraksi volume serat mencapai nilai minimum tertentu. Namun, salah satu kendala dalam penggunaan serat baja adalah harga yang masih relatif tinggi hingga saat ini.

Penggunaan serat dalam campuran beton memberikan dampak positif dengan memperbaiki sifat-sifat beton, seperti meningkatkan daktilitas dan kekuatan lentur. Retak-retak yang dapat menyebabkan keruntuhan pada struktur beton sering kali dimulai dari retakan mikro (micro cracks). Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan beton fiber antara 0,8% hingga 6% tidak memberikan perbedaan yang signifikan dibandingkan beton normal. Namun, setelah mencapai tegangan maksimum, beton fiber mampu mempertahankan sekitar 55% dari tegangan maksimum meskipun mengalami deformasi yang signifikan, yang menandakan bahwa beton fiber memiliki sifat daktil. Pada beton yang diperkuat dengan serat, beban dan deformasi dialihkan kepada serat, dan dengan serat yang memiliki kekuatan tinggi, peningkatan sifat serta kekuatan statis dan dinamis dapat tercapai jika fraksi volume serat mencapai nilai minimum tertentu.

Secara umum, penambahan serat dapat meningkatkan kekuatan tarik beton, karena serat pada beton berfungsi menghambat gaya tarik belah, yang berkaitan dengan susunannya yang acak. Akibatnya, untuk membelah beton yang mengandung serat, dibutuhkan energi yang lebih besar dibandingkan beton tanpa serat. Berdasarkan hasil pengujian terhadap benda uji, dapat disimpulkan bahwa kehadiran serat dalam beton dapat mencegah pembesaran retakan. Penambahan serat pada campuran beton juga terbukti meningkatkan ketahanan terhadap daktilitas, beban kejut (*impact resistance*), dan kekuatan desak. Proses penambahan serat ini dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu:

1. Proses kering, yaitu penambahan serat ke dalam campuran beton sebelum penambahan air.
2. Proses basah, yaitu penambahan serat ke dalam campuran beton setelah air ditambahkan.

Tabel 2.4. Jenis-jenis serat dan sifat-sifat fisiknya (Roshan et al., 2023)

Jenis Serat	Tegangan Tarik (N/mm ²)	Kemampuan Mulur (%)	Spesific Gravity
Acrylic	210-420	25-45	1,10
Asbestos	560-985	0,6	3.20
Catton	420-700	3-10	1,5
Glass	1050-3870	1,5-3,5	2,5
Nylon	780-850	16-20	1,1
Polyster	750-880	11-13	1,4
Polythelene	-700	10	0,95
Polypropoline	560-780	25	0,9
Rayon	420-360	10-25	,5
Steel	280-420	0,5-25	7,8

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dengan cermat dalam penggunaan beton fiber adalah masalah penyebaran serat (*fiber dispersion*) dan teknik pencampuran adukan untuk memastikan serat tersebar secara merata dengan orientasi acak dalam beton. Selain itu, kelecikan (*workability*) adukan juga menjadi perhatian penting. Secara umum, salah satu cara untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan memodifikasi proporsi adukan, salah satunya dengan memperkecil diameter maksimum agregat. Teknik modifikasi pencampuran adukan (*mixing technique*) dapat membantu mengatasi masalah *fiber dispersion*. Namun, perlu dicatat bahwa semakin banyak serat yang ditambahkan, semakin besar

kemungkinan penurunan workability, terutama jika persentase serat dan rasio kelangsingan fiber meningkat. Jenis-jenis serat yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.4, dan Gambar 2.2 menyajikan berbagai jenis serat yang dapat dimanfaatkan dalam campuran beton.

Beton Serat (*fiber reinforced concrete*) menurut ACI Committee adalah jenis beton yang terdiri dari bahan susun semen, agregat halus, agregat kasar, dan sejumlah kecil serat (*fiber*). Beberapa jenis bahan serat yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat beton telah dilaporkan oleh (ACI committee 318, 2011). Bahan serat tersebut meliputi baja (*steel*), plastik (*polypropylene*), kaca (*glass*), dan karbon. Selain itu, untuk keperluan non-struktural, serat dari bahan alami seperti ijuk, rami, atau serat tumbuhan lainnya juga dapat dimanfaatkan. Berdasarkan penelitian sebelumnya, beberapa sifat beton yang dapat diperbaiki dengan penambahan serat antara lain:

1. Keliatan (*ductility*), yang berkaitan dengan kemampuan beton untuk menyerap energi sebelum mengalami kerusakan. Penambahan serat pada beton dapat meningkatkan ketahanannya terhadap deformasi dan keretakan, sehingga beton menjadi lebih tahan terhadap tegangan tarik dan mampu mengatasi beban yang lebih besar tanpa mengalami kegagalan struktural secara tiba-tiba.
2. Ketahanan terhadap beban kejut (*impact resistance*), yang merujuk pada kemampuan beton untuk menahan kerusakan yang disebabkan oleh beban yang datang secara mendadak atau kejut. Penambahan serat pada beton dapat meningkatkan kemampuannya untuk menyerap energi akibat benturan atau tekanan tiba-tiba, sehingga mengurangi risiko keretakan atau kerusakan struktural ketika beton terpapar beban kejut, seperti yang terjadi pada penggunaan beton di area yang sering terpapar getaran atau dampak.
3. Kemampuan untuk menahan tarik dan momen lentur, yang berkaitan dengan peningkatan kekuatan tarik dan lentur beton. Penambahan serat pada beton dapat meningkatkan kemampuan beton untuk menahan gaya tarik dan momen lentur yang diterima. Hal ini terjadi karena serat berfungsi untuk mendistribusikan beban secara lebih merata dan mengurangi kemungkinan terjadinya retakan, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap gaya tarik dan lentur yang biasanya menyebabkan kerusakan pada beton.
4. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*), yang mengacu pada

kemampuan beton untuk bertahan terhadap kerusakan atau penurunan kekuatan setelah mengalami siklus beban berulang. Penambahan serat pada beton dapat meningkatkan ketahanan terhadap kelelahan, karena serat membantu menyebarkan beban secara lebih merata dan mengurangi perambatan retak yang terjadi akibat siklus pembebanan berulang. Hal ini menjadikan beton lebih tahan lama dan lebih mampu menahan kerusakan yang disebabkan oleh beban yang diteruskan secara terus-menerus.

5. Ketahanan terhadap pengaruh susutan (shrinkage resistance), yang merujuk pada kemampuan beton untuk mengurangi retakan akibat susut volumetrik yang terjadi selama proses pengeringan. Penambahan serat pada beton dapat mengurangi pengaruh susutan, karena serat berfungsi sebagai penghalang yang memperkecil pembentukan retakan yang disebabkan oleh penyusutan. Serat membantu memperkuat struktur beton dengan mendistribusikan tegangan secara merata, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan pada permukaan beton akibat susutan.
6. Ketahanan terhadap ausan (abrasion resistance), yang mengacu pada kemampuan beton untuk bertahan terhadap kerusakan akibat gesekan atau pergesekan dengan permukaan lain. Beton yang ditambahkan dengan serat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap abrasi, karena serat berfungsi sebagai penguat yang mengurangi keausan permukaan beton. Dengan adanya serat, beton dapat lebih tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh gesekan atau benturan, yang menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi di area dengan beban lalu lintas tinggi atau kondisi abrasif lainnya.

Apabila serat yang digunakan memiliki modulus elastisitas yang lebih besar daripada beton, maka serat tersebut akan lebih efektif dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap benturan dan lenturan. Sebaliknya, jika modulus elastisitas serat lebih rendah daripada beton, serat tersebut hanya akan meningkatkan ketahanan beton terhadap benturan. Mekanisme bagaimana serat beton berfungsi untuk meningkatkan sifat beton adalah sebagai berikut:

a. Spacing concept

Teori ini mengemukakan bahwa dengan memperkecil jarak antar serat dalam campuran beton, beton akan lebih efektif dalam membatasi munculnya retakan dan mencegah retakan tersebut berkembang menjadi lebih besar.

Efektivitas kerja serat akan meningkat jika serat diletakkan sejajar dan terdistribusi secara merata tanpa tumpang tindih. Namun, dalam praktiknya, penyebaran serat dalam campuran beton sulit untuk dibuat teratur dan bebas dari tumpang tindih, sehingga volume efektif serat hanya dapat dianggap sekitar 41% dari volume total serat yang ada.



Gambar 2.2 Jenis-jenis serat

12

b. *Composit material concept*

Merupakan sebuah pendekatan konsep untuk memperkirakan kuat tarik dan kuat lentur beton, dengan asumsi bahwa bahan penyusun beton saling terikat dengan sempurna, serta memperkirakan kekuatan material komposit pada saat retakan pertama kali muncul (*first crack strength*). Pada beton serat, hal-hal yang perlu mendapatkan perhatian adalah:

a. Kelecekan adukan beton

Kelecekan adukan, yang sering diukur dengan menggunakan nilai slump, memiliki dampak signifikan terhadap sifat kemudahan pengerjaan (*workability*) campuran beton segar. Penambahan serat ke dalam campuran beton akan mengurangi kelecekan campuran, yang dipengaruhi oleh:

1. Rasio aspek serat, yaitu perbandingan panjang dan diameter serat. Batas

maksimum ²rasio ini agar pengadukan tetap mudah dilakukan adalah $l_f/d_f < 100$, dengan l_f dan d_f masing-masing panjang dan diameter serat. Rasio aspek yang tinggi dapat menyebabkan serat menggumpal (balling effect) dan menyulitkan penyebarannya secara merata (Park & Kim, 2020).¹² Semakin tinggi konsentrasi serat, nilai kelecakan dan sifat dapat dikerjakan beton semakin berkurang.

2. Persentase serat yang dicampurkan ke dalam beton segar (dikenal sebagai *fiber volume fraction*) memengaruhi tingkat kelecakan adukan. Semakin banyak serat yang ditambahkan, maka kelecakan dan kemudahan pengerjaan beton segar akan semakin menurun, meskipun besarnya pengaruh ini tergantung pada jumlah serat yang digunakan.

¹²b. Teknik pencampuran serat (*fiber dispersion*)

Teknik ¹²pencampuran serat adalah metode yang digunakan untuk memastikan serat yang ditambahkan ke dalam beton segar dapat terdistribusi secara merata. Salah satu cara untuk membantu pemerataan distribusi serat adalah dengan mengurangi ukuran maksimum agregat dalam campuran. ACI ²³¹committee 318 (2011) merekomendasikan penggunaan agregat dengan ukuran maksimum 19 mm agar proses pengadukan lebih mudah dan tersedia ruang yang cukup untuk serat. Proses pencampuran ¹⁵dilakukan dengan menambahkan serat secara bertahap ke dalam campuran beton yang telah diaduk, sambil pengadukan tetap berlangsung.

Serat adalah material berbentuk memanjang menyerupai benang yang ²³umumnya digunakan sebagai bahan dasar dalam pembuatan tekstil atau pakaian. Secara umum, serat dapat dibedakan ⁷²menjadi dua jenis, yaitu serat alami dan serat sintetis atau buatan.

a. Serat alami

Serat alami mencakup serat yang berasal dari tumbuhan, hewan, maupun hasil proses geologis. Jenis serat ini memiliki sifat yang mudah terurai secara alami atau mengalami pelapukan. Berdasarkan asalnya, serat alami dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Serat Selulosa adalah serat yang berasal dari tumbuhan dan umumnya tersusun atas komponen utama berupa selulosa, disertai dengan hemiselulosa dan kadang mengandung lignin. Serat jenis ini memiliki sifat higroskopis atau

mudah menyerap air, cenderung mudah kusut, dan saat dibakar akan mengeluarkan bau serta arang menyerupai bahan organik yang terbakar. Contoh serat selulosa meliputi kapas, kapuk, serabut kelapa, dan serat manila, serta bahan tekstil seperti katun dan kain rami.

2. Serat Protein merupakan jenis serat tekstil yang tersusun dari senyawa kimia berbasis protein. Serat ini umumnya berasal dari sumber hewani dan memiliki karakteristik alami yang khas, seperti kelembutan dan daya isolasi termal yang baik. Dua contoh utama dari serat protein yang banyak diproduksi adalah sutera, yang berasal dari ulat sutera, dan wool, yang diperoleh dari bulu domba.

b. Serat Buatan/ Sintetis

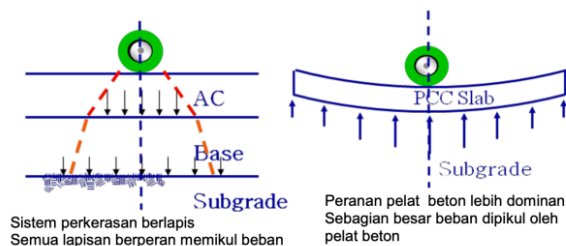
⁷⁵ Serat sintetis atau buatan merupakan jenis serat yang saat ini paling banyak dimanfaatkan dalam industri tekstil, baik sebagai bahan utama maupun sebagai bahan campuran. Beberapa contoh serat sintetis yang umum digunakan di antaranya adalah Aramid, Acrylic, Cationic Dyeable Polyester, Polyester, Polyamide (Nylon), dan Spandex. ¹⁰³ Setiap jenis serat ini memiliki sifat khas yang dipengaruhi oleh unsur-unsur kimia pembentuknya. Namun secara umum, serat sintetis dikenal karena kekuatannya yang tinggi, elastisitas yang baik, serta ketahanannya terhadap gesekan. Karena sifat-sifat inilah, serat sintetis juga mulai banyak diterapkan dalam campuran beton, khususnya untuk meningkatkan kuat tarik belah dan kuat lentur pada beton geopolimer. ¹¹⁴ Penambahan serat dalam beton bahkan memungkinkan terciptanya beton tanpa tulangan, karena serat mampu meningkatkan daya tahan dan ketangguhan beton secara keseluruhan.

²⁷ 2.6 Perkerasan Kaku

⁶⁵ Perkerasan kaku merupakan jenis perkerasan jalan yang menggunakan pelat beton sebagai elemen struktural utama, yang diletakkan di atas lapis pondasi atau langsung di atas tanah dasar (*subgrade*). Kinerja perkerasan kaku akan lebih optimal jika diterapkan pada jalur dengan volume lalu lintas berat, khususnya apabila beban kumulatif lalu lintas melebihi 30 juta ESA (*Equivalent Standard Axle Load*) 4 ton. (Maryam & Putra, 2020) atau Perkerasan kaku umumnya digunakan pada Jalan Kelas I yang memiliki Muatan Sumbu Terberat (MST) di atas 10 ton. Namun, saat ini penggunaannya juga mulai meluas ke Jalan Kelas III atau jalan

daerah karena dianggap memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan perkerasan lentur. Salah satu keunggulan utama dari perkerasan kaku adalah ketebalan strukturnya yang lebih tinggi serta biaya pemeliharaan jangka panjang yang lebih rendah. Meskipun demikian, perkerasan kaku juga memiliki beberapa kekurangan, seperti biaya konstruksi yang relatif lebih tinggi untuk jalan dengan lalu lintas rendah, kecenderungan lebih mudah retak jika daya dukung tanah dasar tidak mencukupi, serta tingkat kenyamanan berkendara yang cenderung lebih rendah dibandingkan perkerasan lentur (Jagad et al., 2020).

Sifat utama perkerasan kaku terletak pada daya dukung yang diberikan oleh pelat beton itu sendiri, yang memungkinkan perkerasan ini memiliki ketebalan lebih tipis dibandingkan perkerasan lentur. Karena sifat kaku dari pelat beton, tegangan yang diterima dapat tersebar secara merata pada area yang lebih luas, baik pada lapisan pondasi maupun lapisan tanah dasar (subgrade). Kekuatan perkerasan kaku sangat dipengaruhi oleh daya dukung dan keseragaman tanah dasar, karena tanah dasar berfungsi sebagai lapisan yang menerima dan mendistribusikan beban yang diterima dari perkerasan.



Gambar 2.3 Penyebaran Beban pada Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku

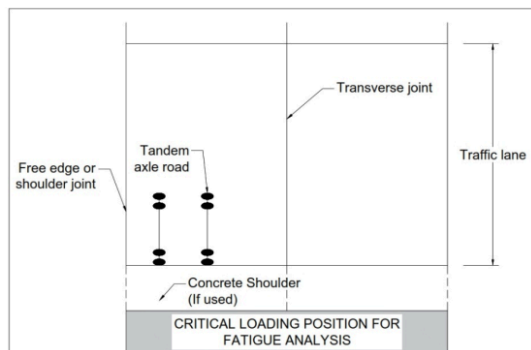
Perkerasan beton semen adalah struktur yang terdiri dari pelat beton semen yang terhubung (tidak menerus) dengan atau tanpa tulangan, atau bisa juga diteruskan dengan tulangan, yang diletakkan di atas lapis fondasi bawah atau tanah dasar, dengan atau tanpa lapisan permukaan beraspal. Metode perencanaan perkerasan beton semen umumnya didasarkan pada beberapa pertimbangan, di antaranya:

- Estimasi lalu lintas dan komposisinya selama masa rencana.

- b) Daya dukung tanah dasar yang dinyatakan dengan CBR (%)
- c) Kekuatan beton yang digunakan
- d) Jenis bahu jalan.
- e) Jenis perkerasan
- f) Jenis penyaluran beban

Mutu perkerasan beton semen sebaiknya dinyatakan dalam nilai kuat tarik lentur (*flexural strength*), yang diperoleh melalui pengujian balok beton dengan metode pembebanan tiga titik. Pengujian ini dilakukan untuk mengukur kemampuan beton dalam menahan gaya lentur atau membengkok sebelum mengalami kerusakan. Nilai kuat tarik lentur ini penting untuk menentukan seberapa baik beton dapat bertahan terhadap beban dinamis dan stress yang terjadi akibat lalu lintas atau perubahan suhu. Hasil pengujian ini memberikan gambaran mengenai ketahanan beton terhadap retak atau pecah yang mungkin timbul selama umur jalan (Dharmawan, 2022). Berdasarkan Maryam & Putra (2020) dan Jagad et al. (2020) batas minimum kuat tarik lentur untuk lalu lintas tinggi 4,5 MPa. Lalu lintas rendah mengacu pada SNI 8457:2017, minimum kuat tarik lentur 3,5 MPa. Namun kuat tarik lentur tersebut juga dapat dihitung secara analitis terhadap tebal perancangan perkerasan beton. Prosedur penentuan tebal perkerasan beton berdasarkan (Jagad et al., 2020) dan (Maryam & Putra, 2020) terdapat dua mode kerusakan yang dilihat pada prosedur perhitungan adalah:

- a. Retak lelah (*fatigue*) pada perkerasan beton



Gambar 2.4 Posisi kritis pembebanan untuk analisis fatigue pada perkerasan beton

$$\log_{10} N_r = \left(\frac{0,9719 - S_r}{0,0828} \right) \text{ Jika } S_r > 0,55 \quad (2.3)$$

$$N_r = \left(\frac{4,258}{S_r - 0,4325} \right) \text{ Jika } 0,45 \leq S_r \leq 0,55$$

$$S_r = \frac{S_e}{0,944 f_{cf}} \left(\frac{PL_{SF}}{4,45 F_1} \right)^{0,94}$$

Keterangan:

S_e : tegangan ekuivalen beton (MPa)

f_{cf} : kuat lentur karakteristik desain pada umur beton 28 hari (MPa)

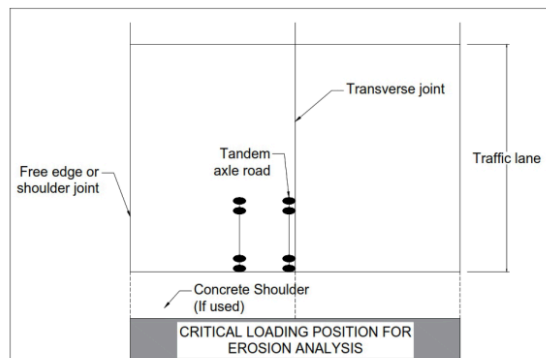
P : beban kelompok sumbu (kN)

L_{SF} : faktor *load safety*

F_1 : 9 untuk sumbu tunggal dengan roda tunggal (STRT), 18 untuk sumbu tunggal dengan roda ganda (STRG), 18 untuk sumbu tandem dengan roda tunggal (STdRT), 36 untuk sumbu tandem dengan roda ganda (STdRG), 54 untuk sumbu tridem dengan roda ganda (STrRG) dan 72 untuk sumbu sempit dengan roda gandar (SQdRG)

N_r : tak terhingga jika nilai S_r

- b. Erosi tanah dasar atau lapis fondasi bawah yang timbul akibat lendutan berulang pada sambungan dan retakan



Gambar 2.5 Posisi kritis pembebebanan untuk analisis erosi pada perkerasan beton

$$\log_{10}(F_2 N_e) = 14,524 - 6,777 \left[\max \left(0 \text{ atau } \left(\frac{PL_{SF}}{4,45 F_4} \right)^2 \cdot \frac{10^{F_3}}{41,35} - 9,0 \right) \right]^{0,103} \quad (2.4)$$

Keterangan:

- ¹⁸
F₂ : penyesuaian untuk efek pada sisi plat; 0,06 untuk pelat dengan bahu bukan beton dan 0,94 untuk pelat dengan bahu beton
- F₃ : faktor erosi
- F₄ : penyesuaian beban untuk erosi karena kelompok sumbu, 9 untuk dumbu tunggal dengan roda tunggal (STRT), 18 untuk sumbu tunggal dengan roda ganda (STRG), 18 untuk sumbu tandem dengan roda tunggal (STdRT), 36 untuk sumbu tandem dengan roda ganda (STdRG), 54 untuk sumbu tridem dengan roda ganda (STrRG) dan 54 untuk sumbu sempit dengan roda gandar (SQdRG)

2.7 Sifat Fisik Beton

Sifat fisik beton merujuk pada karakteristik beton yang dapat diamati atau diukur tanpa merubah komposisi kimianya. ¹³⁷ Umumnya, beton terdiri dari sekitar 15% semen, 8% air, 3% udara, dan sisanya terdiri dari agregat kasar serta halus. Setelah beton mengeras, sifat-sifatnya akan beragam tergantung pada berbagai faktor seperti cara pembuatan, perbandingan campuran, metode pencampuran, pengangkutan, pencetakan, pemadatan, serta perawatan. Semua variabel ini akan memengaruhi sifat yang dimiliki oleh beton tersebut.

Namun, tidak semua sifat ini diperlukan dalam setiap jenis konstruksi beton, dan sifat-sifat tersebut dapat disesuaikan dengan tujuan pemanfaatan beton. Sebagai contoh, pada kolom bangunan, sifat yang paling penting adalah ⁸¹ kemampuan beton dalam menahan beban atau kuat tekan yang tinggi, sementara ketahanan terhadap air tidak begitu krusial. Sebaliknya, pada aplikasi seperti bak penampung air, sifat kedap air menjadi faktor utama. Sifat fisik beton berkaitan erat dengan struktur dan komponen materialnya, yang memengaruhi tampilan dan performa beton dalam kondisi lingkungan tertentu. Beberapa sifat fisik beton yang penting untuk diperhatikan meliputi berat jenis (density), kelecakan (workability), dan warna beton.

2.7.1 Berat Jenis (densitas)

Berat jenis beton (densitas) adalah rasio massa beton terhadap volume beton yang ditempati oleh bahan tersebut. Beton dengan berat jenis tinggi cenderung lebih padat, yang mempengaruhi kekuatan dan ketahanan terhadap penyusutan atau

pemuaian. Beton dengan berat jenis yang ringan dapat digunakan untuk konstruksi yang membutuhkan pengurangan beban struktural. Rumus untuk menghitung berat jenis beton, adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.5)$$

Dimana:

ρ = Berat jenis beton (densitas) (Kg/m³)

m = Berat beton (Kg).

V = Volume beton (m³)

2.7.2 Kelecekan Beton (*workability*)

Sifat kelecekan beton atau *workability* adalah kemampuan beton untuk dapat dicampur, dipindahkan, diletakkan, dan dipadatkan dalam kondisi yang diinginkan tanpa kehilangan kualitas atau struktur yang diharapkan. Sifat ini sangat penting dalam proses pengerjaan beton, karena mempengaruhi kemudahan dalam pengecoran dan kekompakan beton, serta kualitas beton yang dihasilkan. Sifat kelecekan beton mencakup beberapa aspek yang berkaitan dengan bagaimana beton dapat diproses dalam tahap pembuatan dan pengecoran. Sifat ini dipengaruhi oleh faktor seperti konsistensi campuran, rasio air-semen, jenis agregat, dan penggunaan aditif atau bahan tambahan lainnya.

Metode digunakan untuk mengukur kelecekan beton, di antaranya:

- a. Uji slump (*slump test*): Uji slump adalah metode yang paling umum digunakan untuk mengukur kelecekan beton. Uji ini mengukur sejauh mana beton yang dituang ke dalam corong khusus (slump cone) akan turun setelah corong diangkat. Hasilnya disebut slump yang mengindikasikan sejauh mana beton itu "terpenuhi" atau mengalir. Semakin besar nilai slump, semakin encer beton, dan semakin kecil nilai slump, semakin kental beton. Nilai Slump Normal: 50 hingga 100 mm untuk beton dengan konsistensi yang baik. Slump Rendah: Kurang dari 25 mm untuk beton dengan konsistensi sangat kental. Slump Tinggi: Lebih dari 150 mm untuk beton yang lebih encer.
- b. Uji *flow table*: Metode ini digunakan untuk mengukur kemampuan beton untuk mengalir dengan mudah tanpa kehilangan bentuk. Beton dicetak dalam bentuk tertentu dan kemudian dipindahkan ke meja yang bergetar untuk melihat sejauh mana beton menyebar.

c. Uji *vebe*: Uji ini mengukur waktu yang diperlukan untuk memadatkan beton dalam cetakan dengan getaran tertentu. Waktu yang lebih singkat menunjukkan kecekakan yang lebih baik.

Self Compacting Concrete (SCC) adalah jenis beton yang memiliki kemampuan untuk mengalir dan memadat dengan sendirinya dalam bekisting tanpa memerlukan getaran eksternal. Sifat beton SCC adalah memiliki viskositas dan kemampuan deformasi yang tinggi. ASTM C1611 merupakan standar yang digunakan untuk mengukur kemampuan alir (*flowability*) beton *Self-Consolidating Concrete (SCC)* tanpa pemadatan eksternal. Pengujian disini digunakan untuk mengevaluasi kinerja beton SCC dalam kondisi segar. Nilai *slump flow* yang digunakan menjadi acuan adalah 50-75 cm. Kiran Kumar (2023) melakukan penelitian pengaruh molaritas larutan NaOH terhadap beton geopolimer *self-compacting* berbasis *fly ash*. Molaritas NaOH yang lebih tinggi meningkatkan kekuatan mekanik dan densitas mikrostruktur beton geopolimer *self-compacting*. Namun, peningkatan molaritas juga menurunkan workability campuran, yang ditunjukkan oleh penurunan *slump flow* dan peningkatan waktu. Molaritas NaOH sebesar 14 M dianggap optimal untuk mencapai keseimbangan antara workability dan kekuatan mekanik.

2.8 Sifat Mekanik Beton

Sifat mekanik beton mengacu pada kemampuan beton untuk menahan beban atau gaya yang diterimanya tanpa mengalami kerusakan atau perubahan bentuk yang berlebihan. Sifat ini sangat penting untuk mengetahui bagaimana beton akan berfungsi dalam struktur bangunan atau jalan, serta kemampuannya dalam menghadapi berbagai gaya yang timbul selama penggunaannya atau akibat pengaruh lingkungan. Beberapa sifat mekanik beton yang utama termasuk kekuatan tekan, kekuatan tarik, kekuatan lentur, modulus elastisitas, dan ketahanannya terhadap kerusakan atau retakan.

2.8.1 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah kemampuan beton untuk menahan beban maksimum per satuan luas tanpa mengalami kerusakan. Kuat tekan beton normal umumnya berkisar antara 20 hingga 40 MPa. Faktor-faktor yang memengaruhi kuat tekan beton antara lain rasio air-semen (w/c), jenis dan sifat agregat, komposisi campuran,

kelecekan (*workability*), proses perawatan (*curing*), serta umur beton. Kuat tekan beton akan meningkat seiring bertambahnya umur beton, dan biasanya dianggap mencapai 100% setelah berumur 28 hari. Kuat tekan beton geopolimer diuji pada umur 3, 7, dan 28 hari. Berdasarkan penelitian, beton geopolimer menunjukkan kuat tekan yang tinggi pada usia awalnya. Berdasarkan Gunawan (2016), kuat tekan beton dihitung dengan cara membagi kuat tekan maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang. Persamaan untuk menghitung kuat tekan beton dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

Dimana:

f = kuat tekan beton (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm²).

2.8.2 Kuat Tarik Belah Beton

Kuat tarik beton diukur melalui pengujian *split cylinder*, yang hasilnya mendekati nilai kuat tarik sebenarnya. Nilai kuat tarik beton dapat dihitung dengan rumus 0,50 hingga 0,60 kali akar kuadrat dari kuat tekan beton $\sqrt{f'_c}$, sehingga untuk beton normal digunakan $0,57\sqrt{f'_c}$. Pengujian ini menggunakan benda uji yang sama dengan uji kuat tekan, yaitu silinder beton dengan diameter 150 mm dan panjang 300 mm, atau diameter 100 mm dan panjang 200 mm. Silinder diletakkan memanjang di atas alat penguji, kemudian diberikan beban merata searah tegak dari atas pada seluruh panjang silinder. Ketika batas kuat tarik terlampaui, benda uji akan terbelah menjadi dua bagian. Tegangan tarik yang terjadi saat benda uji terbelah disebut sebagai *split cylinder strength*, dan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.7)$$

dimana:

f_t = Kuat tarik belah (N/mm²)

P = Beban pada waktu belah (N)

L = Panjang benda uji silinder (mm)

D = Diameter benda uji silinder (mm)

2.8.3 Kuat Lentur Beton

Kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua titik tumpuan untuk menahan gaya yang diterapkan tegak lurus terhadap sumbu balok, hingga balok tersebut patah, dan hasilnya dinyatakan dalam satuan Mega Pascal (MPa), yaitu gaya per satuan luas. Pengujian kuat lentur di laboratorium dilakukan menggunakan balok uji beton dengan penampang bujur sangkar dan panjang total balok yang empat kali lipat dari lebar penampangnya (SNI, 1997).

Pada beton normal, agregat dapat mengembangkan penjembutan atau bridging. Aggregate interlocking tidak terjadi pada beton dengan agregat ringan karena kekakuan agregat lebih rendah dibandingkan dengan kekakuan matriks. Namun, dengan penambahan serat sebagai perkuatan, efek penjembutan dapat tercapai melalui interaksi lekatan antara serat dan matriks. Jika fraksi volume serat cukup dan lekatan antara serat dan matriks baik, maka retak mikro yang terbentuk di depan ujung retak akan cukup kuat dan mampu menahan deformasi di bawah tegangan leleh yang lebih besar dari kuat tarik atau kuat retak.

Jarak antara titik belah balok dan ujung balok sangat penting karena hal ini memengaruhi pemilihan rumus yang digunakan dalam pengujian. Jarak ini harus diperhatikan untuk memastikan akurasi dalam perhitungan kekuatan lentur balok, karena mempengaruhi distribusi tegangan dan respons balok terhadap gaya yang diterapkan, yaitu:

- a. Untuk pengujian di mana patahnya benda uji terjadi di daerah pusat pada $1/3$ jarak titik perletakan pada bagian tarik beton, maka kuat lentur beton dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$R = \frac{P.L}{bd^2}, \text{ bila benda uji patah pada } 1/3 \text{ bentang} \quad (2.8)$$

- b. Untuk pengujian di mana patahnya benda uji terjadi di luar pusat (di luar daerah $1/3$ jarak titik perletakan) pada bagian tarik beton, dan jarak antara titik perletakan dan titik patah kurang dari 5% dari panjang titik perletakan, maka kuat lentur beton dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R = \frac{3P.a}{bd^2}, \text{ bila benda uji patah diluar } 1/3 \text{ bentang dan garis patah } < 5\%$$

dari bentang (2.9)

dimana:

R = modulus of rupture (N/mm²)

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.

Hubungan kuat lentur dengan kuat tekan oleh ACI dirumuskan yaitu:

$$f_r = 7.5 \sqrt{f'_c} \text{ (Psi)} \quad (2.10)$$

dimana:

f_r = Kuat lentur beton (MPa)

f'_c = Kuat tekan beton (Psi)

$$f_r = 0.62 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (2.11)$$

dimana:

f_r = Kuat lentur beton (MPa)

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

Berbagai faktor yang dapat mempengaruhi pengujian kuat lentur benda uji beton antara lain:

1. Dimensi benda uji

Dimensi benda uji yang baku, seperti 100 mm x 100 mm x 400 mm, memiliki rasio bentang terhadap ketinggian sekitar tiga kali. Dalam pengujian kuat lentur, semakin tinggi ketinggian benda uji dengan lebar dan bentang yang tetap, maka nilai kekuatan lentur yang diperoleh cenderung semakin kecil. Oleh karena itu, dimensi benda uji memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan hasil kuat lentur yang didapatkan. Dimensi yang tidak sesuai dengan persyaratan yang ada dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) dapat mempengaruhi hasil pengujian secara signifikan. Penyesuaian dimensi yang tepat sangat diperlukan agar pengujian kuat lentur menghasilkan nilai yang akurat dan sesuai dengan standar yang berlaku.

2. Ukuran benda uji

Hasil pengujian cenderung lebih seragam ketika ukuran benda uji diperbesar. Namun, secara umum, kekuatan lentur beton akan menurun seiring dengan meningkatnya ukuran benda uji. Hal ini disebabkan oleh peningkatan

kemungkinan ketidaksempurnaan dalam material atau proses pembuatan beton pada benda uji yang lebih besar, yang dapat mempengaruhi kemampuan beton untuk menahan beban lentur. Sebagai hasilnya, meskipun pengujian dengan benda uji yang lebih besar menunjukkan keseragaman yang lebih baik, kekuatan lenturnya mungkin lebih rendah dibandingkan dengan benda uji yang lebih kecil.

3. Laju pembebanan

Seperti halnya kuat tarik beton, kekuatan lentur beton juga cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya laju pembebanan yang diberikan. Ketika beban diterapkan dengan kecepatan yang lebih tinggi, beton dapat menunjukkan respons yang lebih besar terhadap gaya tersebut, yang mengarah pada peningkatan kekuatan lenturnya. Hal ini disebabkan oleh sifat material beton yang memungkinkan penyebaran tegangan yang lebih efisien saat beban diberikan dengan cepat. Namun, meskipun demikian, penting untuk mempertimbangkan bahwa laju pembebanan yang sangat tinggi juga dapat menyebabkan kerusakan atau kegagalan yang lebih cepat pada beton, tergantung pada ketahanan material dan kondisi pengujian.

4. Kelembaban dan Suhu

Hasil pengujian kekuatan lentur beton sangat dipengaruhi oleh kelembaban benda uji saat pengujian. Benda uji yang diuji dalam kondisi kering umumnya menunjukkan nilai kuat lentur yang lebih rendah, biasanya sekitar 10-30% lebih rendah dibandingkan dengan benda uji yang jenuh dengan air. Selain itu, suhu juga memainkan peran penting dalam kekuatan lentur beton. Pengujian pada suhu yang lebih tinggi cenderung menyebabkan penurunan kekuatan lentur, karena temperatur yang tinggi dapat mempengaruhi struktur mikro beton dan memperlemah ikatan antara agregat dan matriks semen. Oleh karena itu, untuk memperoleh hasil yang konsisten dan akurat, penting untuk mengontrol kondisi kelembaban dan temperatur pada saat pengujian.

Pada umumnya, peningkatan kuat lentur beton cenderung lebih signifikan dibandingkan dengan peningkatan kuat tekan atau kuat tarik belah. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan serat baja dalam beton dapat memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap peningkatan kemampuan beton dalam

menahan beban lentur. Volume penambahan serat baja dan aspek rasio serat baja (perbandingan panjang terhadap diameter serat) memainkan peran yang sangat penting dalam meningkatkan kekuatan lentur. Semakin banyak volume serat baja yang ditambahkan dan semakin baik aspek rasio serat, semakin besar peningkatan yang dapat dicapai pada kuat lentur beton. Dengan kata lain, penambahan serat baja yang tepat dapat meningkatkan kemampuan beton untuk menahan gaya lentur secara efektif, memperbaiki ketahanan terhadap retak, dan meningkatkan daya tahan struktur beton (Balaguru, 1992).

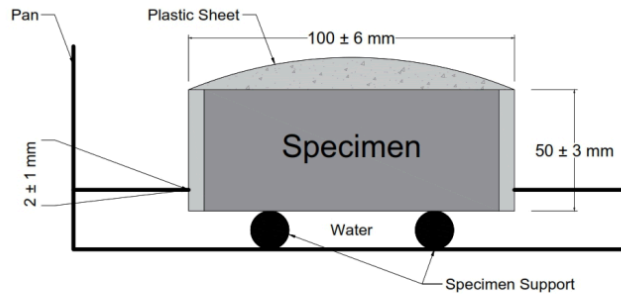
2.9 Sifat Durabilitas Beton

Sifat durabilitas beton adalah kemampuan beton untuk bertahan terhadap degradasi atau kerusakan yang disebabkan oleh faktor lingkungan, baik yang bersifat mekanis maupun kimiawi, selama masa pakainya. Durabilitas beton sangat penting untuk memastikan umur panjang beton dalam aplikasi konstruksi, terutama dalam kondisi lingkungan yang keras atau di area yang terpapar zat kimia atau perubahan suhu yang ekstrem. Beton yang memiliki durabilitas yang baik akan dapat mempertahankan kualitas struktural dan fungsionalnya lebih lama tanpa memerlukan perawatan yang mahal atau perbaikan yang terlalu sering.

2.9.1 Pengujian Tingkat Penyerapan Air (*Sorptivity*)

Pengujian tingkat penyerapan air (*sorptivity*) merupakan salah satu parameter penting untuk mengukur kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori-pori kapilernya yang disebabkan oleh aksi kapilaritas. Proses ini melibatkan pergerakan air ke dalam beton melalui celah-celah mikroskopis pada struktur beton, yang dapat mempengaruhi daya tahan beton terhadap kerusakan akibat kelembaban atau air. Semakin tinggi tingkat *sorptivity* suatu beton, semakin besar kemampuannya dalam menyerap air, yang dapat berdampak pada penurunan ketahanan beton terhadap kerusakan seperti pembekuan dan pelebaran retak. Pengujian *sorptivity* ini umumnya dilakukan dengan menempatkan sampel beton yang dipotong pada ujung yang terendam air dan mengukur seberapa cepat air meresap ke dalam beton dalam waktu tertentu. *Sorptivity* memiliki hubungan erat dengan porositas dan kualitas mikrostruktur beton. Semakin rendah nilai *sorptivity*, semakin kecil kemampuan air untuk meresap ke dalam beton, sehingga menunjukkan beton dengan ketahanan yang baik terhadap penyerapan air dan degradasi lingkungan.

Menurut ASTM C1585-13 (2013) pengujian untuk mengukur *sorptivity*, atau "Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes", adalah dengan menentukan laju penyerapan air pada beton semen hidraulik. Gambar 2.6 menunjukkan skema pengujian *sorptivity*.



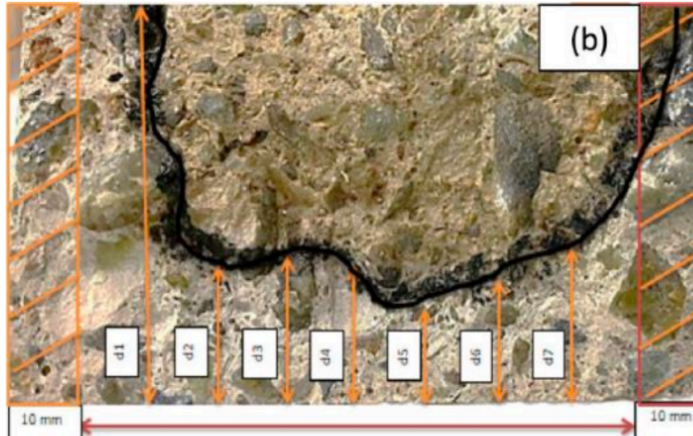
Gambar 2.6 Skema Pengujian *Sorptivity*
Sumber: (ASTM C1585-13, 2013)

2.9.2 Pengujian Porositas

Porositas merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi sifat mekanis dan durabilitas beton. Porositas berkaitan langsung dengan jumlah ruang kosong (*void*) dalam struktur beton yang memengaruhi kemampuan material dalam menahan penetrasi cairan, gas, dan ion-ion berbahaya seperti klorida dan sulfat. Beton geopolimer umumnya memiliki porositas yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional karena reaksi geopolimerisasi menghasilkan matriks aluminosilikat yang lebih padat. Porositas berkaitan dengan permeabilitas pada beton. Semakin tinggi kepadatan beton, semakin besar pula kuat tekan yang dimilikinya. Hal ini karena kepadatan yang tinggi berarti terdapat lebih sedikit ruang kosong atau pori di dalam struktur beton, sehingga meningkatkan daya dukung dan kekuatannya. Sebaliknya, semakin besar tingkat porositas beton, yaitu semakin banyak ruang kosong dalam beton, semakin rendah pula kuat tekan yang dapat dicapai. Porositas yang tinggi mengurangi integritas struktural beton dan memungkinkan air atau zat lain untuk memasuki beton, yang dapat menyebabkan penurunan kinerja beton, termasuk kekuatan tekan yang lebih rendah.

2.9.3 Pengujian Kedalaman Penetrasi Klorida (*Chloride Penetration Depth*)

Penetrasi klorida merupakan salah satu parameter penting dalam menilai durabilitas beton, terutama untuk struktur yang terpapar lingkungan agresif seperti wilayah pantai atau infrastruktur laut. Ion klorida dapat memasuki beton melalui mekanisme difusi, yang kemudian menyebabkan korosi pada tulangan baja. Proses ini akan mengurangi kekuatan dan ketahanan struktur beton tersebut. Sebagai alternatif, beton geopolimer telah diteliti karena memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi ion klorida dibandingkan beton konvensional. Hal ini disebabkan oleh mikrostruktur beton geopolimer yang lebih padat dan produk hidrasi yang memiliki kapilaritas lebih rendah, sehingga lebih sulit bagi ion klorida untuk masuk dan merusak struktur. Pengujian kedalaman penetrasi klorida dilakukan dengan perendaman menggunakan larutan natrium klorida (NaCl) dengan konsentrasi tertentu (biasanya 3-5%) selama periode waktu tertentu (umumnya 28 hari atau lebih). Setelah dilakukan perendaman kemudian dilakukan penyemprotan cairan silver nitrate (AgNO_3) dan dilakukan pengukuran pada interval 10 mm.



Gambar 2.7 Pengukuran Kedalaman Penetrasi Klorida

2.9.4 Pengujian Abrasi

Ketahanan terhadap abrasi merupakan salah satu parameter penting yang menentukan durabilitas beton, terutama pada struktur yang terpapar beban mekanis

berulang atau kondisi lingkungan yang abrasif, seperti lantai pabrik, jalan raya, atau bendungan. Beton geopolimer menawarkan sifat mekanis dan ketahanan yang lebih baik dibandingkan beton konvensional karena struktur matriksnya yang lebih padat. Penambahan plastik daur ulang seperti PET dalam beton geopolimer dapat memengaruhi ketahanan abrasi melalui perannya sebagai bahan pengisi dan modifikasi struktur mikro. Metode pengujian ketahanan terhadap abrasi berdasarkan spesifikasi (AEN/CTN 146, 2010) menggunakan 8 buah kubus beton berukuran 5x5x5 cm yang diputar bersama dengan 8 buah bola baja dalam mesin abrasi Los Angeles. Mesin tersebut diputar sebanyak 1000 putaran, dengan pengukuran perubahan berat benda uji dilakukan setiap 100 putaran. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur sejauh mana beton dapat bertahan terhadap pengikisan atau abrasi yang disebabkan oleh gesekan dengan bola baja selama proses rotasi.

2.10 Perilaku Tegangan-Regangan

Tegangan adalah rasio antara gaya yang bekerja pada beton dengan luas penampang beton tersebut. Regangan, di sisi lain, adalah rasio antara perubahan panjang (ΔL) dengan panjang awal (L), dan dilambangkan dengan ϵ , yang tidak memiliki satuan. Persamaan untuk regangan yang terjadi pada beton dapat dinyatakan sebagai berikut:

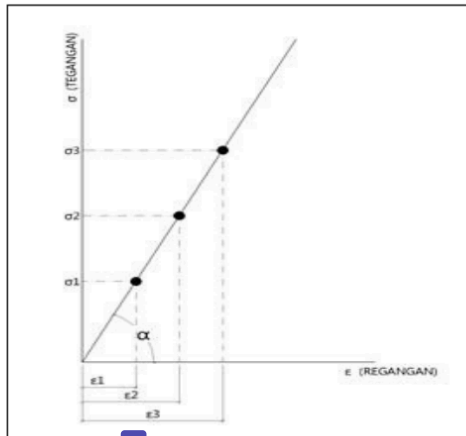
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.12)$$

dimana:

ΔL = Perubahan Panjang (mm)

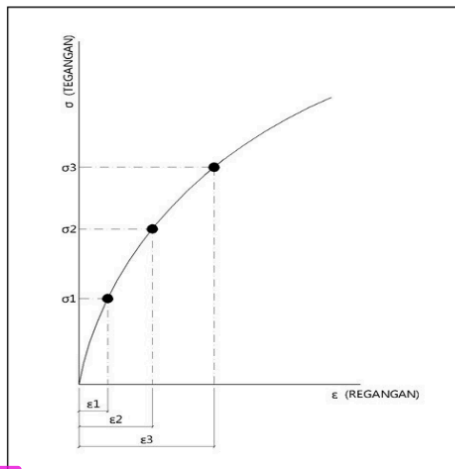
L = Panjang awal (mm)

Jika hubungan antara tegangan dan regangan digambarkan dalam bentuk grafik, dengan setiap pasangan nilai tegangan dan regangan dimasukkan sebagai titik-titik, maka titik-titik tersebut akan membentuk garis lurus. Ini menunjukkan adanya hubungan linear antara tegangan dan regangan. Grafik ini menggambarkan apa yang disebut sebagai **hukum Hooke** untuk material elastis, di mana tegangan dan regangan berbanding lurus dalam batas elastis material tersebut. Gambar 2.6 dapat memperlihatkan grafik ini, di mana sumbu X mewakili regangan (ϵ) dan sumbu Y mewakili tegangan (σ), dengan garis lurus yang menunjukkan proporsionalitas antara keduanya dalam rentang elastis.



Gambar 2.8 Hubungan tegangan dan regangan linear

Hubungan tegangan-regangan yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 adalah hubungan linear, di mana regangan berbanding lurus dengan tegangan, sesuai dengan Hukum Hooke. Dalam kondisi ini, material bersifat elastis, dan tegangan serta regangan memiliki hubungan langsung yang proporsional. Namun, dalam praktiknya, hubungan tegangan dan regangan tidak selalu tetap linear. Dalam banyak kasus, saat material menerima tegangan lebih tinggi atau berada di luar batas elastisnya, hubungan tersebut mulai berubah. Jika hubungan ini digambarkan dalam bentuk titik-titik, hasilnya akan menunjukkan pola yang lebih kompleks, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9. Pada grafik ini, setelah mencapai batas elastis, material menunjukkan perilaku plastik atau deformasi permanen, di mana tegangan dan regangan tidak lagi berbanding lurus, dan kurva tersebut akan melengkung atau berfluktuasi sesuai dengan karakteristik material yang diuji.



Gambar 2.9 Hubungan tegangan regangan non linear.

2.11 Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity

(Jiang et al., 2022) melakukan penelitian yang mengkaji hubungan antara kuat tekan beton dan perilaku non-destruktif melalui pengukuran kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) pada beton yang mengandung berbagai jenis limbah plastik. Dalam penelitian ini, sebanyak 102 data observasi dikumpulkan dari sembilan studi terdahulu mengenai sifat beton yang menggunakan limbah plastik sebagai bahan campuran, yang kemudian dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang lemah antara kuat tekan beton dan kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) pada beton yang mengandung agregat plastik. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun UPV dapat digunakan untuk memeriksa kualitas beton, hubungan antara parameter tersebut dengan kuat tekan beton yang mengandung limbah plastik tidak sekuat yang diharapkan. Penelitian juga menunjukkan bahwa meskipun hubungan antara kuat tekan dan kecepatan pulsa ultrasonik (UPV) tidak begitu kuat, terdapat korelasi yang lebih signifikan antara rasio kuat tekan beton dengan limbah plastik terhadap beton kontrol dan rasio kecepatan pulsa ultrasonik. Dengan menggunakan analisis regresi, sebuah persamaan dikembangkan untuk memperkirakan kuat tekan beton yang mengandung limbah plastik berdasarkan data uji kecepatan pulsa ultrasonik. Persamaan yang diusulkan ini sangat berguna untuk

menilai kekuatan tekan beton yang telah mengalami penggantian sebagian agregat dengan limbah plastik. Hal ini memungkinkan pemantauan kesehatan struktur bangunan yang terbuat dari beton campuran limbah plastik, dengan dasar utama pada data uji kecepatan pulsa ultrasonik dan kuat tekan beton kontrol.

Dalam ASTM C597:2012 mengenai Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang melalui Beton, pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dilakukan dengan cara merambatkan gelombang longitudinal yang dipancarkan oleh transduser elektroakustik. Gelombang ini diteruskan melalui beton yang diuji dengan transduser yang dipasang pada salah satu permukaan beton. Kecepatan gelombang pulsa yang merambat ini kemudian diukur untuk menentukan sifat-sifat material beton, seperti kepadatan, integritas, dan adanya cacat atau kerusakan pada struktur beton (Ghaffari Moghaddam et al., 2022). Kecepatan rambat gelombang longitudinal V dalam beton berhubungan dengan sifat elastisitas dan kerapatan beton. Secara umum, kecepatan rambat gelombang ini dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2.13)$$

8
keterangan:

E adalah modulus elastisitas dinamis

μ adalah rasio poisson dinamis

ρ adalah kerapatan beton

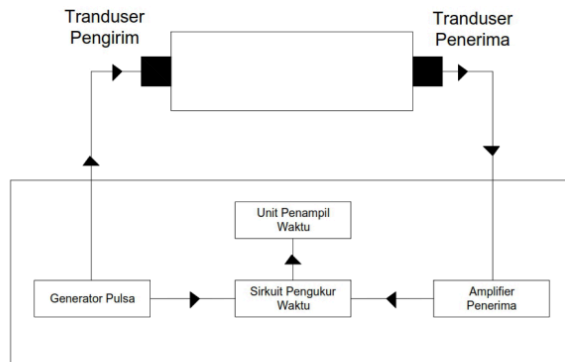
Pengujian kecepatan rambat gelombang melalui beton dengan menggunakan Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) memiliki berbagai aplikasi yang sangat berguna dalam bidang konstruksi. Beberapa manfaat utama dari pengujian ini antara lain: menilai keseragaman dan mutu beton, mendeteksi rongga dan retakan, evaluasi perbaikan retakan, memperkirakan kerusakan atau retakan, pengamatan perubahan kondisi dalam periode tertentu. Pengujian kecepatan rambat gelombang (UPV) memberikan cara yang tidak merusak untuk memeriksa dan memantau kondisi struktural beton, membantu dalam pengambilan keputusan terkait perawatan dan pemeliharaan struktur.

Tingkat kelembaban beton mempengaruhi kecepatan gelombang ultrasonik, yang harus diperhatikan saat menguji beton. Beton yang jenuh air memiliki kecepatan gelombang yang sedikit lebih cepat daripada beton kering, bisa sampai

5% lebih tinggi. Namun, beton yang jenuh air kurang peka terhadap perubahan kualitas beton, sehingga sulit mendeteksi perubahan kecil dalam mutu beton tersebut. Selain itu, ukuran benda uji tidak mempengaruhi kecepatan gelombang, selama dimensi terkecil benda uji lebih besar dari panjang gelombang ultrasonik. Ini berarti meskipun ukuran benda uji bervariasi, selama memenuhi persyaratan ukuran, hasil pengujian tetap dapat diandalkan. Pantulan gelombang dari sisi benda uji juga tidak mempengaruhi hasil waktu yang dihitung, karena hanya gelombang langsung yang dihitung dalam pengujian. Secara keseluruhan, untuk memastikan hasil pengujian yang akurat, penting untuk memperhatikan kondisi kelembaban beton saat melakukan pengujian kecepatan gelombang ultrasonik.

Ketelitian pengukuran sangat dipengaruhi oleh kemampuan operator dalam menentukan jarak yang tepat antara transduser pengirim dan penerima, serta kemampuan peralatan untuk mengukur waktu tempuh gelombang dengan akurat. Kekuatan sinyal yang diterima dan waktu tempuh yang tercatat dipengaruhi oleh penempatan transduser pada permukaan beton. Agar waktu tempuh tetap stabil, perlu digunakan bahan perantara (coupling agent) dan tekanan yang memadai pada transduser. Selain itu, kekuatan sinyal yang diterima juga dipengaruhi oleh jarak tempuh gelombang dan kondisi beton, seperti adanya keretakan atau penurunan mutu beton yang diuji.

Peralatan yang digunakan untuk pengujian ini, seperti yang digambarkan secara skematis pada Gambar 2.10, terdiri dari beberapa komponen utama. Komponen-komponen tersebut meliputi generator untuk mengatur kecepatan rambat gelombang, sepasang alat transduser (pengirim dan penerima), amplifier untuk memperkuat sinyal, sirkuit pengukur waktu untuk mencatat waktu tempuh gelombang, unit untuk menampilkan waktu yang diukur, serta kabel penghubung untuk menghubungkan seluruh perangkat.



Gambar 2.10 Skematik Pengujian UPV

Untuk menghitung nilai kecepatan rambat gelombang dalam beton, dapat digunakan persamaan berikut:

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.14)$$

8
Keterangan:

V adalah kecepatan rambat gelombang, meter per detik (m/s)

L adalah jarak antara pusat permukaan tranduse, meter (m)

T adalah waktu tempuh, detik (s)

2.12 Pengujian Mikrostruktur Material

2.16.1. Metode *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk memvisualisasikan bentuk permukaan material yang sedang dianalisis. Pada proses ini, berkas elektron ditembakkan dan berinteraksi dengan bahan, menghasilkan sinyal yang mengandung informasi mengenai topografi, morfologi, komposisi, dan struktur kristal bahan tersebut. SEM sangat berguna dalam analisis permukaan material dan memungkinkan untuk mempelajari data kristalografi, yang membantu dalam identifikasi elemen atau senyawa pada sampel.

Prinsip kerja SEM melibatkan dua sinar elektron yang digunakan secara bersamaan. Satu berkas elektron diarahkan pada spesimen untuk memeriksa

permukaannya, sementara berkas lainnya mengarahkan tampilan gambar melalui CRT (*Cathode Ray Tube*). SEM beroperasi dengan prinsip pemindaian (scanning), di mana berkas elektron bergerak dari satu titik ke titik lainnya pada permukaan objek untuk "membaca" struktur objek secara sistematis. Komponen utama SEM terdiri dari dua bagian utama: kolom elektron (*electron column*) yang menghasilkan berkas elektron, dan konsol tampilan (*display console*) yang menampilkan gambar hasil pemindaian.

2.16.2. Metode *X-Ray Diffraction* (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah alat yang digunakan untuk menganalisis struktur kristal dan ukuran kristal dari bahan padat. Ketika bahan yang mengandung kristal dianalisis dengan XRD, akan muncul puncak-puncak spektrum yang spesifik, yang mencerminkan struktur kristal bahan tersebut. XRD menggunakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang sangat pendek, sekitar 0,5 hingga 2,5 Å (Angstrom), yang hampir sama dengan jarak antar atom dalam kristal, dan memiliki energi yang cukup tinggi. Ketika berkas sinar X yang sejajar dan monokromatik ditembakkan ke permukaan material, atom-atom dalam kristal akan menyerap energi dan kemudian memantulkan sinar X ke segala arah. Analisis dari pola hamburan ini memungkinkan penentuan struktur kristal dan identifikasi fase materi dalam bahan tersebut.

Metode difraksi sinar-X (XRD) sering digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang belum diketahui dalam suatu material padat dengan membandingkan pola difraksi yang diperoleh dengan data yang ada dalam database, seperti PDF (*Powder Diffraction File*) yang dikeluarkan oleh *International Centre for Diffraction Data*. Ketika sinar X mengenai sampel dan mengalami pembiasan, sinar yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor dan diterjemahkan menjadi puncak-puncak pada pola difraksi. Semakin banyak bidang kristal dalam sampel, semakin kuat intensitas pembiasan yang terdeteksi. Setiap puncak yang muncul dalam pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi spesifik dalam ruang tiga dimensi. Puncak-puncak yang diperoleh kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X untuk berbagai jenis material guna mengidentifikasi komponen atau fase yang ada dalam sampel tersebut.

Komposisi senyawa kimia yang terbentuk dalam sampel ditentukan berdasarkan perbandingan luas area puncak (peak) dari masing-masing senyawa kimia kristal terhadap total luas area puncak yang terbentuk dalam pola difraksi. Luas area puncak ini dihitung menggunakan metode integrasi, di mana sumbu absis (sumbu x) mewakili lebar puncak, sementara sumbu ordinat (sumbu y) menunjukkan intensitas puncak yang diukur dari garis latar belakang pada grafik XRD. Dalam penelitian ini, uji XRD bertujuan untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terbentuk akibat proses hidrasi pada beton, yang meliputi senyawa seperti CSH (Calcium Silicate Hydrate), CH (Calcium Hydroxide), ettringite, Friedel's salt, serta kristal-kristal lain yang terbentuk selama proses tersebut.

2.16.3. Metode X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF (*X-ray Fluorescence*) adalah salah satu metode pengujian yang digunakan untuk menganalisis mikrostruktur bahan dengan tujuan untuk mengidentifikasi unsur-unsur kimia yang terkandung dalam sampel yang diuji. Prinsip dasar XRF melibatkan penggunaan sinar-X untuk merangsang sampel, yang kemudian menyebabkan atom-atom dalam sampel memancarkan sinar fluoresen dengan energi karakteristik. Energi yang dipancarkan ini tergantung pada elemen-elemen yang ada dalam sampel, sehingga memungkinkan untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi unsur-unsur tersebut. Metode XRF sering digunakan untuk analisis bahan-bahan padat seperti logam, semen, dan material lainnya, karena memberikan hasil yang cepat dan non-destruktif (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.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Pengujian

Metode penelitian merujuk pada pendekatan yang diterapkan untuk memperoleh hasil penelitian secara menyeluruh. Dalam penelitian ini, pendekatan yang digunakan adalah penelitian eksperimen, di mana percobaan dilakukan untuk mengumpulkan data yang diperlukan. Setelah data terkumpul, tahap selanjutnya adalah menganalisis dan membandingkannya dengan kriteria atau syarat yang telah ditetapkan sebelumnya, untuk memperoleh kesimpulan yang valid dan mendalam terkait topik yang sedang diteliti.

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan secara bertahap, mulai dari pengujian karakteristik material berupa karakteristik fisik agregat (agregat kasar dan agregat halus), karakteristik kimia (XRD) dan mikrostruktur (SEM) dari *fly ash* dan RHA yang digunakan. Limbah plastik PET yang dijadikan sebagai serat di dalam beton geopolimer dipotong dengan ukuran 2 x 20 mm. Langkah selanjutnya pembuatan campuran beton geopolimer terdiri dari *fly ash* dan RHA sebagai pengganti semen, agregat kasar, agregat halus dan alkali aktivator (NaOH dan Na₂SiO₃), serta pembuatan benda uji. Pengujian karakteristik mekanik beton geopolimer dilakukan setelah mencapai umur uji, yang meliputi pengujian kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur. Pengujian parameter durabilitas beton geopolimer dilakukan dengan pengujian *sorptivity*, penetrasi klorida, porositas dan ketahanan terhadap abrasi. Selain itu, juga dilakukan uji kerapatan beton dengan UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*).

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penelitian ini dilaksanakan selama 7 bulan dimulai dari bulan Januari 2024 sampai dengan Juli 2024.

3.3 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.3.1 Peralatan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.)* kapasitas 1000 kN,
2. Data logger dan satu set komputer,
3. Mesin pencampur bahan (*mixer*),
4. Satu set alat pengukur *slump flow*,
5. Cetakan berbentuk silinder (10 cm x 20 cm),
6. Cetakan berbentuk balok (40 cm x 10 cm x 10 cm),
7. LVDT (*Linier Variable Displacement Transducer*) 10 mm dan 25 mm,
8. *Concrete Cutting Machine*,
9. Timbangan digital,
10. *Stopwatch*,
11. Mesin *Los Angeles*,
12. Gelas ukur.

3.3.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang diperlukan pada penelitian ini antara lain:

1. Agregat kasar adalah agregat dengan ukuran terkecil yang tertahan diatas saringan dengan ukuran 2,38 mm atau yang lebih besar 4,75 mm ASTM, lebih besar dari 2 mm menurut ASHTO,
2. Agregat halus adalah agregat dengan ukuran terkecil yang tertahan diatas saringan No, 200 (0,074 mm),
3. *Fly ash* diperoleh dari hasil buangan PLTU Jeneponto, *fly ash* yang digunakan adalah *fly ash* kelas C,
4. Cacahan limbah plastik PET ukuran 2 x 20 mm,
5. Air yang digunakan berasal dari PDAM setempat,
6. Alkali Aktivator adalah Natrium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3),
7. *Superplasticizer* dan *retarder*,
8. Natrium Chloride (NaCl), sebagai bahan utama membuat larutan NaCl 5% dengan campuran air,
9. Silver nitrate (AgNO_3), sebagai indikator kedalaman penetrasi klorida,
10. Cat waterproof, sebagai pelapis pada permukaan spesimen.



Gambar 3.1 Material beton geopolimer

118

3.4 Variabel Penelitian

Variabel Metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

32

1. Variabel bebas (*independent variable*) adalah variabel yang menjadi penyebab perbedaan pada variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah plastik PET dengan kandungan 0%; 0,25%; 0,50% dan 0,75%.
2. Variabel terikat (*dependet variable*) adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah UPV, pengujian

kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, *sorptivity*, kedalaman penetrasi klorida, porositas, dan pengujian abrasi.

3.5 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini, yaitu metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dalam penelitian ini mengaplikasikan dua metode pengumpulan data, yakni:

1. Studi pustaka, metode ini digunakan dengan tujuan untuk memperoleh data data sekunder melalui berbagai sumber, yaitu artikel-artikel ilmiah, jurnal penelitian, buku, serta standar pengujian yang berlaku di Indonesia.
2. Pemeriksaan dan pengujian sampel di laboratorium dengan tujuan untuk memperoleh data-data primer yang akan digunakan untuk menganalisis hasil penelitian yang dilakukan.

3.6 Metode Analisis

3.6.1. Pemeriksaan Karakteristik Material dan Beton Geopolimer

Pemeriksaan karakteristik material yang dilakukan berupa karakterisik agregat (agregat kasar dan agregat halus) dan karakteristik *fly ash* yang digunakan. Selain itu, dilakukan pengujian terhadap karakteristik limbah plastik yang dijadikan sebagai serat di dalam beton geopolimer.

1. Pengujian Karakteristik Agregat

Sebelum pembuatan benda uji di laboratorium, dilakukan pengujian terhadap karakteristik agregat kasar dan agregat halus. Adapun pengujian dan metode pengujian yang digunakan dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada tabel

3.1.

Tabel 3.1 Metode pengujian karakteristik agregat

Pengujian	Metode Pengujian	
	Agregat Kasar	Agregat Halus
Analisa Saringan	SNI 03-1968-1990	
Berat jenis dan penyerapan agregat	SNI 03-1969-2008	SNI 03-1970-2008
Kadar lumpur	SNI 03-4142-1996	
Kausan agregat kasar dengan mesin Los Angeles	SNI 2417-2008	
Indeks Kepipihan	SNI 03-4137-1996	
<i>Sand Equivalent</i>	SNI 03-4428-1997	

2. Rancangan Campuran Beton Geopolimer

Rancangan campuran beton geopolimer terdiri dari *fly ash* dan abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) sebagai pengganti semen, agregat kasar, agregat halus, alkali aktivator (NaOH dan Na_2SiO_3) sebagai bahan kimia yang mengaktifkan *fly ash*, RHA, dan air. Penelitian Krishnam Raju et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* dan RHA dalam proporsi tertentu mampu meningkatkan kekuatan tekan beton geopolimer secara signifikan, terutama pada umur 28 hari. Hal ini disebabkan oleh tingginya kandungan silika reaktif pada RHA yang mempercepat reaksi geopolimerisasi ketika dikombinasikan dengan *fly ash* kelas C. Aktivator alkali seperti natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) memegang peran penting dalam melarutkan silika dan alumina dari bahan pozzolanik, sehingga membentuk struktur polimer anorganik yang kuat dan tahan lama. Dalam penelitian tersebut juga ditemukan bahwa rasio Na_2SiO_3 terhadap NaOH yang ideal adalah sekitar 2,5, sedangkan molaritas NaOH yang optimal berkisar antara 10 hingga 12 M untuk memperoleh kekuatan maksimal. Beton geopolimer hasil pencampuran ini dinilai lebih ramah lingkungan karena mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland, serta memanfaatkan limbah industri dan pertanian sebagai bahan utama.

Mehta & Siddique (2018) melakukan penelitian pengaruh penambahan variasi RHA 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% dan 30% dengan molaritas NaOH 10 M terhadap nilai permeabilitas dan kuat tekan pada beton geopolimer. Hasil penelitian menunjukkan penambahan RHA meningkatkan nilai kuat tekan pada variasi 0%, 5%, 10%, 15% akan tetapi menurun pada variasi 20%, 25% dan 30%. Firdaus (2023) melakukan penelitian pengaruh penambahan RHA terhadap kuat tekan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan *granulated blast furnace slag* dengan variasi RHA 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%. Hasil penelitian menunjukkan nilai densitas dan kuat tekan tertinggi didapatkan pada variasi RHA 5% dan penambahan RHA lebih dari 5% menurunkan nilai kuat tekan mortar secara signifikan.

Konsentrasi larutan NaOH yang digunakan adalah 10 M. Campuran beton geopolimer dilakukan dengan curing udara. Adapun komposisi campuran beton geopolimer disajikan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rancangan campuran beton geopolimer 10 M (kg/m³)

Kode	Fly Ash (Kg)	RHA (Kg)	Batu Pecah (Kg)	Pasir (Kg)	Alkali Aktivator (Kg)		Retarder (Kg)	Sp (Kg)	PET (Kg)
					NaOH 10M	Na ₂ SiO ₃			
A (0%)	857,7	45	654,55	436,36	135	271	1,4	9	0,0
A1 (0,25%)	857,7	45	654,55	432,91	135	271	1,4	9	3,5
A2 (0,50%)	857,7	45	654,55	429,50	135	271	1,4	9	6,9
A3 (0,75%)	857,7	45	654,55	426,00	135	271	1,4	9	10,4

3. Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji berdasarkan Maryoto (2018) tentang Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji di Laboratorium. Pembuatan benda uji dengan menggunakan cetakan silinder berukuran 10 x 20 cm dan balok ukuran 40 cm x 10 cm x 10 cm. Adapun jumlah benda uji dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.3.

3.3. Metode pencampuran yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Menyiapkan Material dengan komposisi yang sudah di tentukan;
2. Agregat kasar dan agregat halus dimasukkan ke dalam mangkuk mixer;
3. Fly ash dan RHA dimasukkan ke dalam mangkuk mixer;
4. Mengaduk fly ash, agregat kasar dan agregat halus menggunakan mixer dengan kecepatan rendah (*slow speed*) selama 30 detik kemudian matikan mesin mixer, mengaduk manual campuran hingga tercampur rata dan homogen;
5. Memasukkan alkali aktivator (NaOH dan Na₂SiO₃), *superplasticizer* dan retarder yang telah dilarutkan dalam air, mix selama 60 detik dengan kecepatan rendah (*slow speed*). Kemudian matikan mesin mixer;
6. Mengaduk manual campuran sampai merata. Setelah itu, mengaduk campuran menggunakan mixer dengan kecepatan tinggi (*high speed*) selama 60 detik;
7. Hasil campuran dimasukkan ke dalam cetakan dan dipadatkan menggunakan meja getar;
8. Setelah 24 jam, keluarkan benda uji dari cetakan, kemudian curing benda uji selama 3, 7, 28 dan 90 hari dalam kondisi curing udara (*moist curing*);
9. Setelah tiba umur pengujian, dilakukan pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur;

10. Selain itu, dilakukan pula pengujian kerapatan beton dengan UPV.

Curing udara yang dilakukan yaitu pada suhu ruangan (*ambient*) yang berkisar 20°C - 25°C. Benda uji beton geopolimer dipastikan terjadi reaksi polimerisasi antara *fly ash* RHA, agregat dan alkali aktivator supaya dapat berlangsung secara optimal sehingga mutu beton yang diharapkan dapat tercapai, dan menjaga supaya tidak terjadi susut yang berlebihan pada beton akibat kehilangan kelembaban yang terlalu cepat atau tidak seragam, yang dapat menyebabkan retak.

Pelaksanaan curing/perawatan beton dilakukan segera setelah beton mengalami atau memasuki fase *hardening* (untuk permukaan beton yang terbuka) atau setelah pembukaan cetakan/acuan/bekisting, selama durasi tertentu yang dimaksudkan untuk memastikan terjaganya kondisi yang diperlukan untuk proses reaksi senyawa kimia yang terkandung dalam campuran beton.

Jumlah benda uji yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah sebanyak 72 buah silinder dan 36 buah balok yang terdiri atas 3 jenis pengujian yaitu kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur dengan curing (perawatan) udara, dimana lama curing yaitu 3, 7, 28 dan 90 hari.

Tabel 3.3 Jumlah benda uji penelitian

Variasi Benda Uji (%PET)	Lama Curing (hari)	Jumlah Benda Uji Silinder (buah)	Jumlah Benda Uji Balok (buah)
0	7	6	3
	28	6	3
	90	6	3
0,25	7	6	3
	28	6	3
	90	6	3
0,5	7	6	3
	28	6	3
	90	6	3
0,75	7	6	3
	28	6	3
	90	6	3
Jumlah		72	36
		108	

4. Pengujian Karakteristik Mekanis Beton Geopolimer

a. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

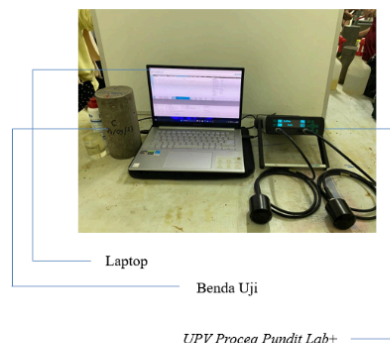
Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dilakukan berdasarkan Nasruddin et al. (2020) tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton.

Pengujian *UPV* menggunakan alat *Ultrasonic Pulse Velocity Proceq Pundit Lab+*.

Tujuan dari pengujian ini ialah untuk mengetahui kerapatan beton berdasarkan nilai kecepatan rambat gelombang dari beton. Setiap variasi terdapat 3 sampel yang akan diuji dengan metode direct. Sehingga nilai kecepatan rambat gelombang yang diambil ialah nilai kecepatan rata-rata dari tiap sampel pada setiap variasi.

Prosedur pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel yang akan diuji
2. Menyiapkan alat *UPV Proceq Pundit Lab+* yang akan digunakan dengan memasang transduser penerima dan penguat (Amplifier)
3. Memasang gemuk pada ujung sampel yang akan diletakkan transduser
4. Memulai pembacaan kecepatan rambat gelombang pada alat
5. Mencatat hasil kecepatan rambat gelombang dari alat.



Gambar 3.2 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity*

Adapun kriteria kualitas beton ditentukan berdasarkan nilai cepat rambat gelombang ultrasonic menurut Neville & Brooks (2015) seperti tersaji pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Korelasi antara cepat rambat gelombang ultrasonic terhadap kualitas beton (*direct method*) (Neville & Brooks, 2015)

Kecepatan Rambat Gelombang Ultrasonic (UPV), (km/sec)	Kualitas Beton
>4.5	Sangat Baik
3.5 – 4.5	Baik
3.0 – 3.5	Cukup Baik
2.0 – 3.0	Buruk
< 2.0	Sangat Buruk

b. Pengujian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton

Berdasarkan SNI-1974 (2011) dan ASTM C39/C39M (2003), Pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberikan beban monoton secara terus-menerus dengan laju yang konstan pada benda uji yang ditempatkan di antara dua batang pembebanan. Beban yang diberikan ini menciptakan tegangan tekan pada benda uji. Pada pengujian ini, posisi benda uji ditunjukkan pada Gambar 3.3, di mana digunakan untuk mengukur kuat tekan serta modulus elastisitas beton geopolimer. Dalam pengujian ini, compressometer digunakan untuk mengukur regangan longitudinal, sementara LVDT (*Linear Variable Displacement Transducers*) digunakan untuk mengukur perpindahan transversal yang terjadi akibat beban yang diberikan pada benda uji. Kuat tekan (f_c) dihitung dengan persamaan:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

dimana: f_c = kuat tekan beton (N/mm²), P = Beban maksimum (N) dan A = Luas penampang yang menerima beban (mm²).

Modulus elastisitas dan Poisson ratio beton geopolimer dihitung berdasarkan ASTM C469-02 sebagai berikut:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (3.2)$$

$$\mu = \frac{\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (3.3)$$

dengan E = modulus elastisitas (N/mm²)

S_2 = tegangan 40% yang sesuai dengan beban ultimit (N/mm²)

S_1 = tegangan pada regangan longitudinal 50 $\mu\epsilon$ (N/mm²)

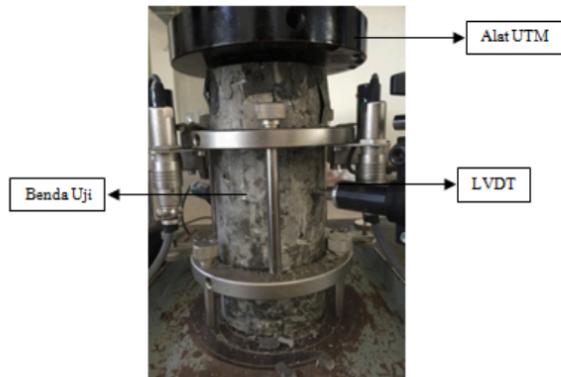
ϵ_1 = regangan longitudinal sebesar 50 $\mu\epsilon$

ϵ_2 = regangan longitudinal yang dihasilkan oleh tegangan S_2 ($\mu\epsilon$)

μ = Poisson ratio

ϵ_{t1} = regangan transversal yang menghasilkan S_1

ϵ_{t2} = regangan transversal yang menghasilkan S_2



Gambar 3.3 Posisi benda uji pengujian kuat tekan, modulus elastisitas dan Poisson ratio

c. Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Pengujian kuat tarik belah berdasarkan ASTM C496-96, (2004), dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.)* kapasitas 1000 kN dan *LVDT (Longitudinal Variable Diferencial Tranducer)* 25 mm yang di sambungkan ke *data logger* dan *switching box* serta satu set computer.

Kuat tarik belah (f_t) dihitung dengan persamaan:

$$f_t = \frac{2 P}{\pi L D} \quad (3.4)$$

dimana P = beban maksimum (N), L = panjang silinder (mm) dan D = diameter silinder (mm). Gambar 3.4 menunjukkan posisi benda uji pada pengujian kuat tarik belah beton.



Gambar 3.4 Posisi benda uji pada pengujian kuat tarik belah beton

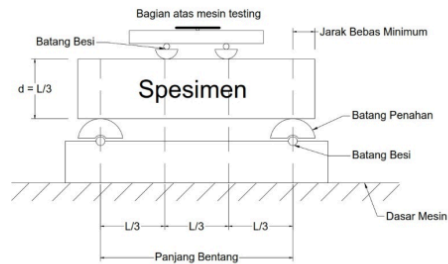
d. **Pengujian Kuat Lentur Beton**

Pengujian dilakukan berdasarkan SNI (1997) dan ASTM (2002) dengan tiga titik pembebanan. 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:

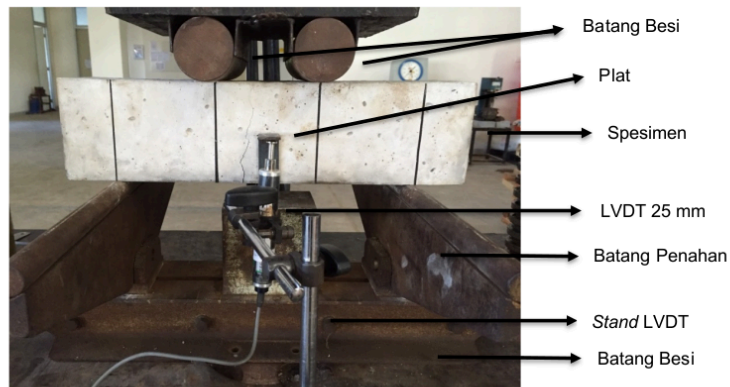
$$R = \frac{P \cdot L}{b d^2} \quad \text{bila benda uji patah pada } 1/3 \text{ bentang} \quad (3.5)$$

dimana R = modulus of rupture (N/mm^2), P = beban maksimum (N), L = Panjang bentang (mm), b = Lebar benda uji (mm), dan d = Tebal benda uji (mm).

Gambar 3.5 memperlihatkan sketsa pengujian kuat lentur beton dan Gambar 3.6 memperlihatkan pengujian kuat lentur beton geopolimer yang dilakukan di laboratorium, dimana menggunakan *Linear Variable Displacement Transducers* (LVDT) untuk mengukur lendutan dari benda uji akibat beban yang diberikan. Hasil uji lentur kemudian dibuat grafik hubungan beban dan lendutan, yang akan digunakan untuk menghitung *Toughness Index*.



Gambar 3.5 Sketsa pengujian kuat lentur



Gambar 3.6 Pengujian kuat lentur beton

e. Pengujian Karakteristik Senyawa Kimia (XRD)

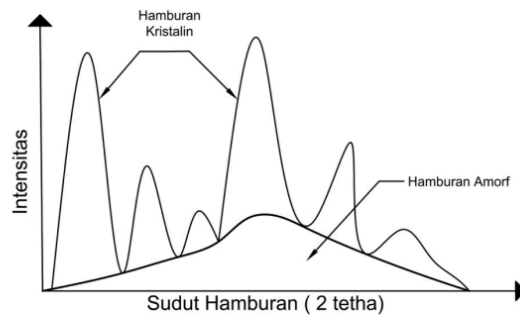
X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk menghasilkan sinar-X dan merekam pola difraksi yang timbul akibat interaksi antara sampel uji dan sinar-X. Proses difraksi sinar-X memberikan informasi penting mengenai struktur polimer, baik itu keadaan amorf maupun kristalin. Polimer sering kali memiliki daerah kristalin yang tercampur secara acak dengan daerah amorf. Difraktogram sinar-X dari polimer kristalin biasanya menghasilkan puncak-puncak tajam, sementara polimer amorf menghasilkan puncak yang lebih lebar dan tersebar.

Pola hamburan sinar-X juga memberikan informasi penting mengenai konfigurasi rantai dalam kristalit, perkiraan ukuran kristalit, dan perbandingan antara daerah kristalin dan amorf (derajat kristalinitas) dalam sampel polimer. Analisis ini memungkinkan penilaian seberapa teratur struktur kristalin dalam polimer dan sejauh mana polimer tersebut memiliki sifat amorf, yang mempengaruhi karakteristik mekanik dan termal dari material tersebut ((Jenkins & Eagar, 2005); (Iguchi et al., 2020)). Pada umumnya, bahan polimer bersifat semikristalin, yang berarti memiliki campuran antara bagian amorf dan kristalin. Setiap bagian, baik amorf maupun kristalin, dapat menunjukkan intensitas hamburan sinar-X yang spesifik. Bagian kristalin cenderung menghasilkan puncak yang tajam pada pola difraksi, sementara bagian amorf menghasilkan puncak yang lebih melebar. Hal ini mencerminkan perbedaan dalam keteraturan struktur atom

atau molekul pada kedua bagian tersebut. Gambar 3.7 akan memperlihatkan contoh pola hamburan yang menunjukkan karakteristik ini.

Penentuan derajat kristalinitas (X_c) menggunakan difraksi sinar-X didasarkan pada asumsi bahwa daerah kristalin dan amorf dalam suatu bahan memberikan kontribusi hamburan yang ekuivalen, namun memiliki intensitas yang berbeda pada pola difraksi. Derajat kristalinitas dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Morissette et al., 2003).

$$X_c (\%) = \frac{\text{Luas daerah kristalin}}{\text{Luas daerah (kristalin+amorf)}} \times 100\% \quad (3.6)$$



Gambar 3.7 Difraktogram polimer kristalin

f. Pengujian Mikrostruktur (SEM)

Material penyusun geopolimer *fly ash* dan RHA dilakukan pemeriksaan kandungan unsur dan senyawa kimia yang menyusunnya dengan uji *SEM (Scanning Electron Microscope)* dan *EDX (Electron Dispersi X-ray)* adalah merupakan alat untuk melihat secara mikrostruksur morfologi dan kandungan unsur kimia. Morfologi dari beton geopolimer ditampilkan dalam dua dimensi (2D). *Scanning Electron Microscope* akan menganalisis senyawa oksidasi dan unsur kimia secara global pada benda uji yang diteliti.

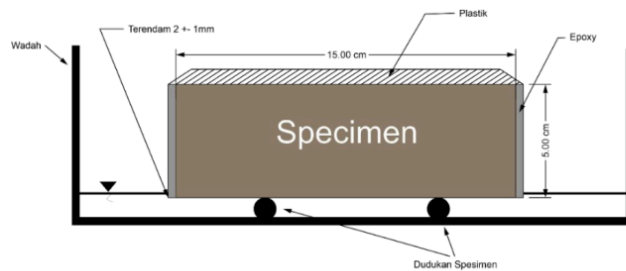
5. Pengujian Durabilitas Beton Geopolimer

a. Pengujian *Sorptivity*

Pengujian *sorptivity* mengacu pada standar (ASTM C1585-13, 2013). Prosedur pengujian adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji yang diambil dari bagian spesimen beton dengan ukuran

- 15 cm x 10 cm dengan tebal 5 cm.
2. Benda uji dimasukkan dalam oven dengan suhu $50 \pm 20^{\circ}\text{C}$ selama 3 hari,
 3. Benda uji dimasukkan dan disimpan dalam wadah tertutup selama 15 hari pada ruang dengan suhu $23 \pm 20^{\circ}\text{C}$ sebelum prosedur penyerapan dimulai.
 4. Benda uji dikeluarkan dari wadah dan ditutup sisi keliling spesimen dengan cat epoksi dan tutup sisi atas dengan plastik untuk mencegah penyerapan air,
 5. Mendiamkan beberapa menit, kemudian menimbang berat awal benda uji,
 6. Benda uji diletakkan pada wadah pengujian yang telah dipersiapkan dengan kedalaman permukaan yang tercelup $2 \pm 1\text{ mm}$ seperti yang ditunjukkan Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pengujian *sorptivity* beton geopolimer

7. Benda uji ditimbang pada saat pencelupan berjalan selama waktu yang tercantum dalam Tabel 3.5 berikut,

Tabel 3.5 Jadwal waktu dan toleransi pengujian

Waktu	60"	5'	10'	20'	30'	60'	Setiap 1 jam hingga jam ke 6	24 jam selama 8 hari
Toleransi	2"	10"	2'	2'	2'	2'	5'	2jam

("): Detik; ('): Menit

8. Membuat grafik hubungan antara *RTA sorptiviti* (I) dengan waktu (*t*) dan,
9. Menghitung nilai *sorptivity*.

Penyerapan, I (mm), adalah perubahan massa yang dibagi dengan hasil perkalian luas penampang specimen uji dan densitas air. Pengaruh suhu terhadap densitas air diabaikan dan digunakan nilai $0,001\text{ g/mm}^3$.

Rumus penyerapan (I) sebagai berikut:

$$I = \frac{m_t}{a \cdot d} \quad (3.7)$$

Keterangan:

- I = Penyerapan (mm),
 m_t = Perubahan massa spesimen dalam gram pada waktu t ,
 a = Luas area yang terkena air pada sampel, dalam mm^2 , dan
 d = Densitas air dalam g/mm^3



(a) Persiapan sampel

(b) Perendaman sampel

Gambar 3.9 Proses pengujian *sorptivity* beton geopolimer

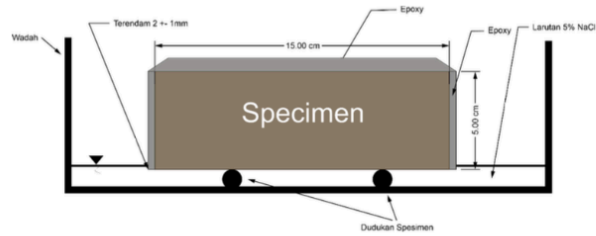
b. Pengujian Penetrasi Klorida

Pengujian penetrasi klorida mengacu pada metode yang disampaikan oleh Guo et al. (2019) and Gluth et al. (2020). Prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji dari sampel beton dengan ukuran 15cm x 10cm dengan tebal 5 cm,
2. Benda uji dimasukkan dalam oven dan dipanaskan sampai suhu $50 \pm 2^\circ\text{C}$ selama 3 hari,
3. Benda uji dikeluarkan dan disimpan dalam wadah tertutup selama 15 hari pada ruang dengan suhu $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sebelum proses penyerapan dimulai,
4. Benda uji dikeluarkan dari wadah dan semua sisi sampel beton diberikan cat epoxy kecuali permukaan bawahnya untuk memastikan penetrasi klorida searah seperti pada gambar 3.10,
5. Benda uji dibiarkan beberapa menit sampai dengan cat epoxy pada sampel sepenuhnya kering,
6. Benda uji ditelakkan pada wadah pengujian dengan kedalaman permukaan yang

tercelup 2 mm seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.10,

7. Sampel didiamkan terendam selama 28 hari,



Gambar 3.10 Proses pengujian porositas beton geopolimer

8. Sampel pada hari ke 28 diangkat dan dibelah menjadi 2 bagian,
9. Bagian sampel yang tidak dicat epoxy disemprot dengan menggunakan cairan 0,1 N silver nitrate (AgNO_3) dan diperhatikan bagian sampel yang berubah warna menjadi lebih terang,
10. Pengukuran kedalaman penetrasi klorida setiap interval 10mm,



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3.11 Proses pengujian penetrasi klorida beton geopolimer

c. Pengujian Porositas

Pengujian porositas mengacu pada standar *American Society for Testing and Material* (2013) dan dilakukan pengujian pada umur 28 hari. Prosedur pengujian sebagai berikut

1. Menyiapkan benda uji dari sampel beton dengan volume minimal 350 cm³ atau berat 800 gram,
2. Benda uji dimasukkan dalam oven dan dipanaskan sampai suhu 80-100°C selama minimal 24 jam dan didinginkan dalam desicator sampai suhu kamar,
3. Benda uji ditimbang dan diukur beratnya,
4. Mengulangi kembali langkah (2) dan (3) sampai diperoleh berat yang tetap atau selisih dari berat pertama dan kedua tidak lebih 0,5 % berat pertama,
5. Menentukan berat benda uji kering oven, w₁ (gr),
6. Benda uji direndam dalam air suhu sekitar 21-25°C minimal 48jam,
7. Benda uji dikeluarkan dari dalam air dan permukaannya dilap hingga tercapai kondisi kering permukaan (SSD),
8. Menentukan berat benda uji kering permukaan sebesar w₂ (SSD),
9. Benda uji dimasukkan dalam wadah berisi air panas dan dididihkan selama 5 jam,
10. Benda uji didinginkan kembali hingga suhu 25°C,
11. Benda uji dikeluarkan dari dalam air dan permukaannya dilap hingga tercapai kondisi kering permukaan (SSD),
12. Menentukan berat benda uji kering permukaan sebesar w₃ (SSD),
13. Benda uji ditimbang dalam air dan ditentukan beratnya sebesar w₄.

Porositas beton dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$n = \frac{(C - A)}{(C - D)} \times 100\% \quad (3.8)$$

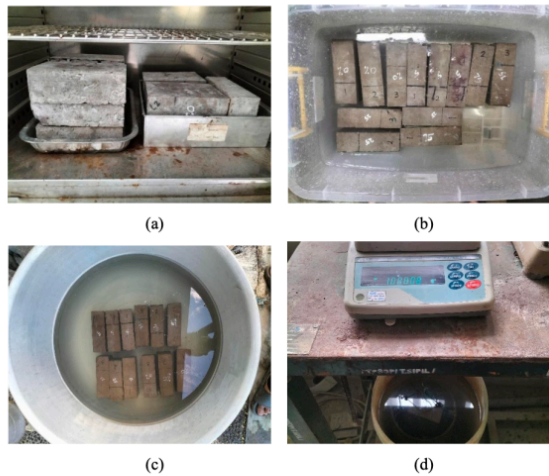
keterangan:

n = Porositas benda uji (%)

A = Berat kering oven benda uji (kg)

C = Berat beton kondisi SSD (kg)

D = Berat beton dalam air (kg)



Gambar 3.12 Proses pengujian porositas beton geopolimer

d. Pengujian Abrasi

Pengujian abrasi mengacu pada spesifikasi AEN/CTN 146 (2010) yang dilakukan pada umur 28 hari. Prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji dari sampel beton dengan ukuran 5cm x 5cm x 5cm sejumlah 8 buah,
2. Bola baja disiapkan sejumlah 8 buah,
3. Melakukan penimbangan pada sampel yang telah disiapkan, berat benda uji semula (w_0),
4. Sampel dan bola baja dimasukkan kedalam mesin abrasi *Los Angeles* lalu ditutup rapat,
5. Mesin abrasi *Los Angeles* diputar sebanyak 1000 putaran dimana setiap 100 putaran dilakukan penimbangan terhadap berat benda uji (w_1),



Gambar 3.13 Alat uji abrasi *Los Angeles*

6. Mesin abrasi *Los Angeles* diputar sebanyak 1000 putaran dimana setiap 100 putaran dilakukan penimbangan terhadap berat benda uji (w_1),
7. Menghitung presentase kehilangan berat beton dari hasil pengujian abrasi.

Persamaan untuk menghitung persentase kehilangan berat dari beton adalah sebagai berikut:

$$\text{Keausan} = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100\% \quad (3.9)$$

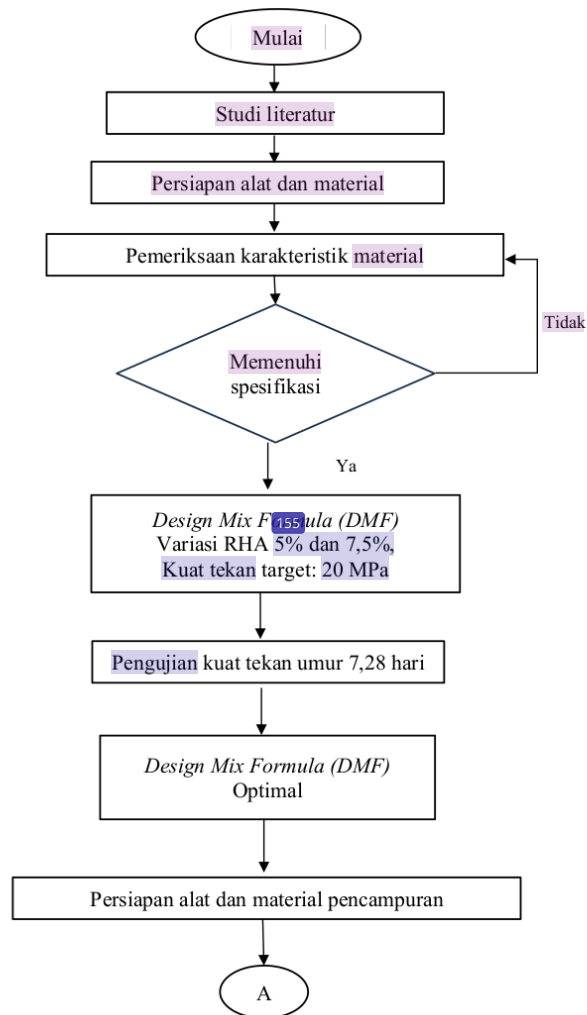
dimana:

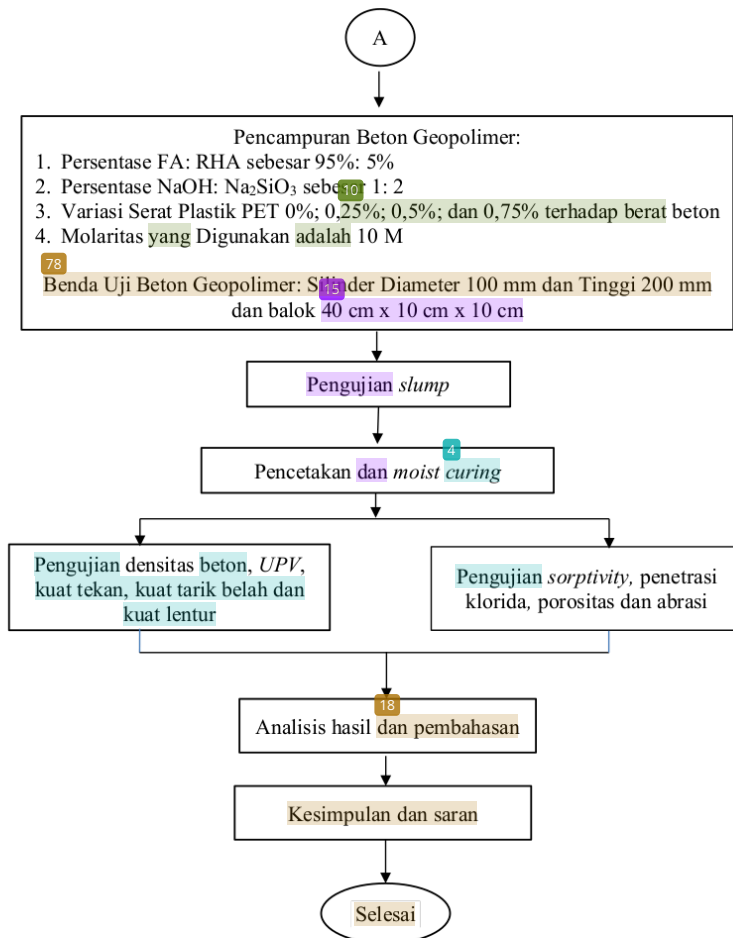
w_0 = berat benda uji semula (gr)

w_1 = berat benda uji setelah pengujian (gr)

3.6.2. **Bagan Alir Penelitian**

Secara garis besar, tahapan penelitian ini dibagi atas pengujian properti material, pengujian eksperimental di laboratorium dan analisis hasil. Prosedur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.14.





Gambar 3.14 Diagram alir penelitian

BAB IV

DATA DAN HASIL ANALISIS

4.1 Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material yang dilakukan dalam penelitian ini mencakup berbagai pengujian untuk menganalisis sifat fisik dan kimia dari material yang digunakan dalam pembuatan beton geopolimer. Pengujian tersebut melibatkan agregat kasar (batu pecah) dan agregat halus (pasir), serta *fly ash* dan *rice husk ash* (RHA) yang digunakan sebagai bahan pengganti semen.

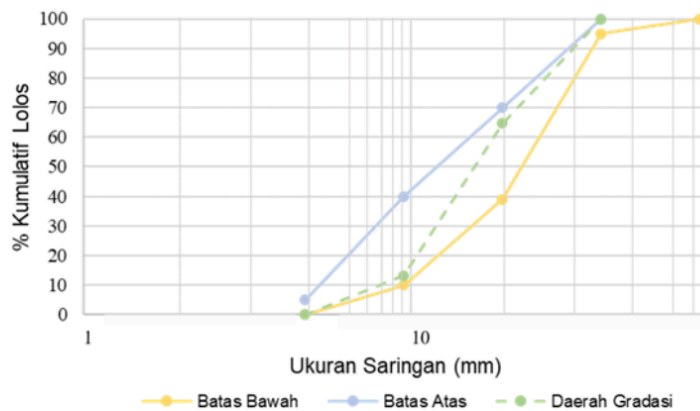
4.1.1 Karakteristik Fisik Agregat Kasar

Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 memberikan informasi mengenai karakteristik fisik dan gradasi agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini untuk memproduksi beton geopolimer. Pemeriksaan karakteristik material sangat penting dilakukan untuk memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi syarat kelayakan dalam pembuatan beton geopolimer yang diinginkan. Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah batu pecah yang berasal dari daerah Bili-Bili, Kabupaten Gowa. Pemeriksaan karakteristik fisik mencakup pengukuran seperti ukuran butir, kepadatan, dan kadar air agregat. Parameter-parameter ini berperan penting dalam menentukan kekuatan dan konsistensi beton yang akan dihasilkan.

Berdasarkan pemeriksaan karakteristik material agregat kasar, dapat dilihat bahwa kadar lumpurnya tidak memenuhi spesifikasi, sehingga saat penggunaan dilakukan pencucian agregat hingga kadar lumpurnya berkurang dan dapat digunakan kembali pada pencampuran beton geopolimer. Selain itu, hasil pengujian berat volume untuk keadaan padat dan lepas menunjukkan bahwa material yang digunakan tidak memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Hal ini dapat mempengaruhi kualitas beton geopolimer yang dihasilkan, karena berat volume yang tidak sesuai dapat mempengaruhi proporsi campuran dan kepadatan beton. Oleh karena itu, untuk memastikan kualitas material tetap terjaga, diperlukan metode perbaikan dalam penyimpanan dan penanganan material. Selain itu, penggunaan bahan aditif untuk meningkatkan sifat beton, seperti *superplasticizer* dan *retarder*

10
Tabel 4.1 Karakteristik fisik **agregat kasar**

No	Karakteristik agregat	Hasil pemeriksaan	Spesifikasi		Keterangan
1	Modulus kehalusan	7,0	5,5 - 8,5		Memenuhi
2	Kadar lumpur	3,1%	0,2 - 1,0	SNI ASTM C1117:2012	Tidak Memenuhi
3	Berat jenis spesifik				
	a. BJ Semu	2,71	1,6 – 3,2	SNI 1969:2016	Memenuhi
	b. BJ Kering	2,68			
	c. BJ SSD	2,69			
4	Penyerapan air	0,4%	0,2 - 4,0	SNI 1969:2016	1 Memenuhi
5	Berat volume				
	a. Kondisi lepas	1,37 kg/ltr	1,4 - 1,9	SNI 03-4804-1998	Memenuhi
	b. Kondisi padat	1,52 kg/ltr			



Gambar 4.1 Gradasi agregat kasar (batu pecah).

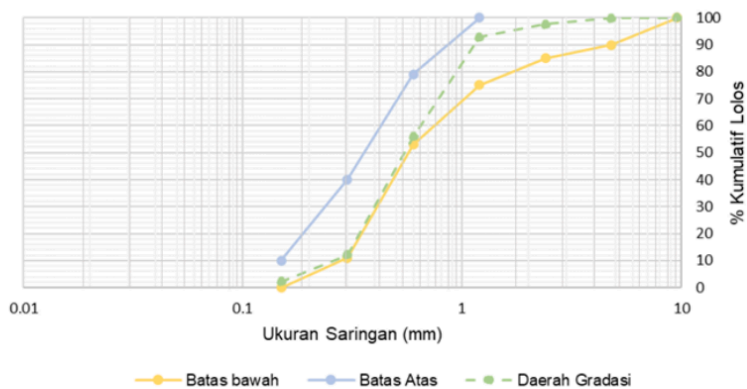
4.1.2 Karakteristik Fisik Agregat Halus

Tabel 4.2 dan Gambar 4.2 menunjukkan karakteristik fisik dan gradasi agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini untuk pembuatan beton geopolimer. Pengujian terhadap material dilakukan untuk menilai kesesuaian material yang digunakan. Selain itu, berdasarkan hasil analisis saringan agregat halus yang ditampilkan pada Gambar 4.2, diketahui bahwa gradasi pasir yang digunakan termasuk dalam zona 3, yaitu kategori pasir yang agak halus.

Berdasarkan pemeriksaan karakteristik material agregat halus, berat volume untuk keadaan padat dan lepas juga tidak memenuhi spesifikasi yang telah diatur, sehingga saat penggunaan material dilakukan metode perbaikan penyimpanan dan penanganan material yang harus dipastikan di tempat yang kering agar terhindar dari kontaminasi dan degradasi kualitas yang berlebih. Selain itu, penggunaan bahan aditif untuk meningkatkan sifat beton, seperti *superplasticizer* dan *retarder*.

Tabel 4.2 Karakteristik fisik agregat halus

No	Karakteristik agregat	Hasil pemeriksaan	Spesifikasi		Keterangan
1	Modulus kehalusan	2,4	2,2 – 3,1	SNI 03-6861-2002	Memenuhi
2	Kadar lumpur	4,6%	0,2 - 6,0	SNI ASTM C1117:2012	Tidak Memenuhi
3	Berat jenis spesifik a. BJ Semu b. BJ Kering c. BJ SSD	2,56 2,43 2,48	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016	Memenuhi
4	Penyerapan air	2,1%	0,2 - 3,0	SNI 1970:2016	Memenuhi
5	Berat volume a. Kondisi lepas b. Kondisi padat	1,32 kg/ltr 1,44 kg/ltr	1,4 - 1,9	SNI 03-4804-1998	Memenuhi



Gambar 4.2 Gradasi agregat halus (pasir)

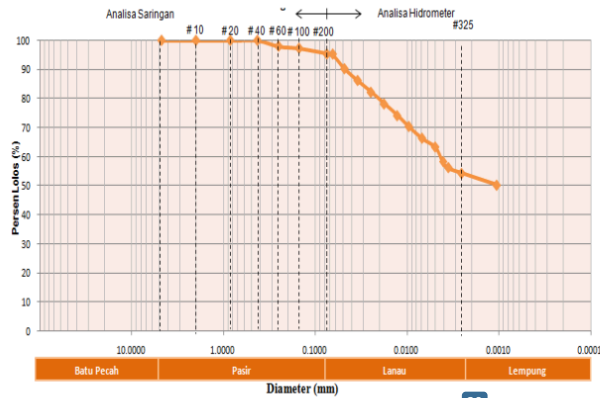
Pengujian ini dilakukan berdasarkan standar dan persyaratan-persyaratan yang diatur oleh SNI (Standar Nasional Indonesia). Terlihat **agregat halus dan agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini** memenuhi karakteristik untuk digunakan sebagai bahan beton berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 1969).

4.1.3 Karakteristik Fisik dan Kimia Fly Ash

Tabel 4.3 dan Gambar 4.3 masing-masing memperlihatkan hasil pengujian karakteristik fisik dan grafik distribusi ukuran butir *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini. Dilakukan pengujian mikroskopis pada *fly ash* yang digunakan sebagai pengganti semen dalam campuran beton geopolimer. Hasil dari pengujian *Scanning Electron Microscopy (SEM)* dan *X-Ray Fluorescence (XRF)* dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan 4.5. Tabel 4.5 memperlihatkan hasil pemeriksaan *fly ash* berdasarkan jumlah senyawa silika dan alumina yang terkandung dikategorikan ke dalam kelas C.

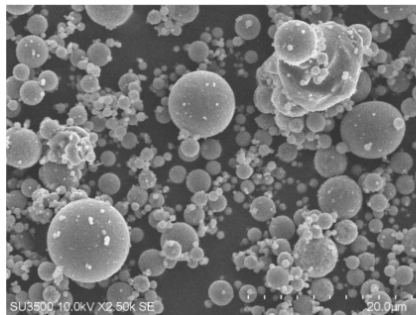
Tabel 4.3 Hasil pemeriksaan karakteristik fisik *fly ash*

No.	Karakteristik material	Hasil pemeriksaan
1	Berat jenis	2,88
2	Analisa saringan	> 90% lolos saringan No.200

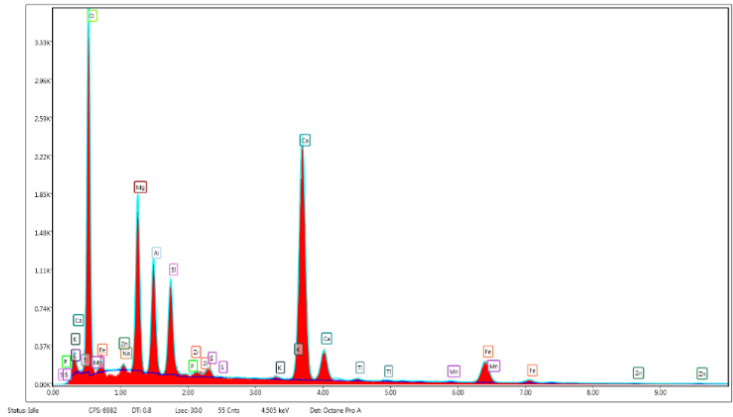


Gambar 4.3 Grafik distribusi ukuran butir *fly ash*

Menurut *ACI Committee 226*, *fly ash* memiliki partikel yang sangat halus, dengan lebih dari 90% lolos ayakan No. 200 dan sekitar 5-27% lolos ayakan No. 325 (45 mikron). *Fly ash* umumnya memiliki bentuk bola padat atau berongga. Densitas *fly ash* adalah 2,23 gr/cm³ dengan kandungan air sekitar 4%. Nilai *specific gravity fly ash* berkisar antara 2,15 hingga 2,6, bahkan dapat mencapai 2,9, dan biasanya berwarna abu-abu kehitaman. Partikel *fly ash* yang berasal dari pembakaran batubara bituminous umumnya berukuran lebih kecil dari 0,075 mm. *Fly ash* memiliki luas permukaan spesifik antara 170 hingga 1000 m²/kg. Ukuran partikel rata-rata *fly ash* dari jenis sub-bituminous berkisar antara 0,01 mm hingga 0,015 mm, dengan luas permukaan 1-2 m²/g. Partikel *fly ash* sebagian besar berbentuk bola, yang memberikan kelecakan lebih baik.



Gambar 4.4 Visualisasi *fly ash* dengan SEM



Gambar 4.5 Persebaran unsur kimia *fly ash*

EDAX Inc. - ORBIS Applications Lab Mahwah N.J					
C:\Users\Administrator\Documents\Measurement\2024\Fathur\1 Januari\24-01-29					
[5-DFT-LAB-EM-XRF-01-2024] Akbar C\Pak Andi\Fly Ash-J\Area 1.SPC					
10:10 AM 29-Jan-2024					
Oxide:	Net	Wt%	At%	I-Error%	BG
MgO	7.49358	10.31973	16.72	4.11	1.07211
Al2O3	50.58405	16.27160	10.42	1.43	1.21964
SiO2	157.8302	30.72179	33.40	0.80	1.40653
Y2O3	7.27609	1.624702	0.47	4.33	1.40653
P2O5	0.00000	0.000022	0.00	0.00	1.40653
SO3	36.43195	4.222592	3.45	1.72	1.72127
K2O	14.23246	0.749229	0.52	3.03	2.36060
CaO	586.7964	26.15776	30.47	0.41	2.12454
TiO2	21.39295	0.840158	0.69	2.29	1.47538
Cr2O3	1.43603	0.030627	0.01	17.33	2.42945
MnO	11.72432	0.178643	0.16	3.53	2.84256
Fe2O3	621.0448	8.736301	3.57	0.40	3.36386
CoO	7.78015	0.084842	0.07	4.83	3.28517
Ni2O3	1.07211	0.012930	0.01	24.74	3.03927
CuO	1.63275	0.016459	0.01	16.85	3.02944
ZnO	1.91799	0.017910	0.01	14.60	3.02944
Ga2O3	1.50488	0.014722	0.01	18.77	3.30484
Total		100.0000	100.00		
kV: 40	uA: 355	LSec: 102	Method: FP	NoStds	

Gambar 4.6 Hasil Pemeriksaan XRF besaran senyawa dari *fly ash*

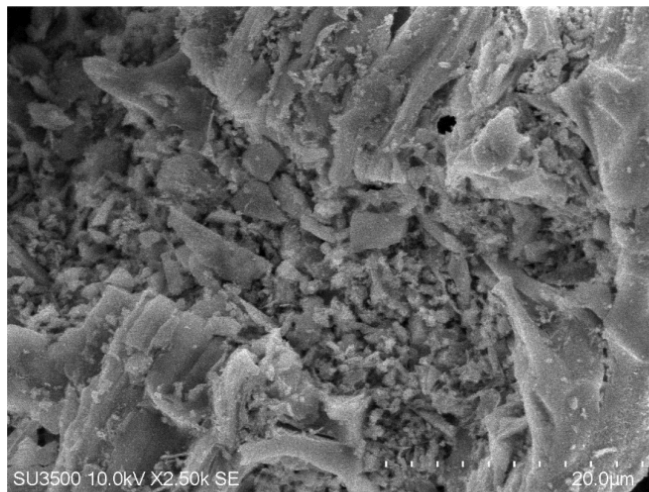
Tabel 4.4 Hasil pemeriksaan karakteristik kimia *fly ash*

Klasifikasi	Hasil pengujian	Kelas C
Silikon dioxide (SiO ₂) + aluminium oxide (Al ₂ O ₃) + iron oxide (Fe ₂ O ₃) min., %	54,98	50,00
Calcium oxide (CaO), %	26,16	>18,0

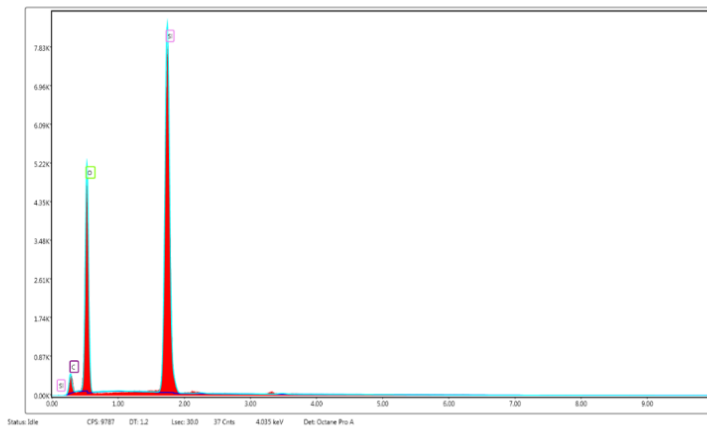
Berdasarkan Tabel 4.4, pengujian mikrostruktur pada material *fly ash* diperoleh kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 30,72\% + 16,27\% + 8,74\% = 54,98\%$ ($>50\%$) dan $\text{CaO} >18\%$, sehingga dapat disimpulkan bahwa *fly ash* PLTU Bosowa Energi, Jenepono, yang digunakan termasuk tipe kelas C.

4.1.4 Karakteristik Fisik dan Kimia Rice Husk Ash (RHA)

Pengujian mikrostruktur *XRF* (*X-ray Fluorescence*) pada material *rice husk ash* dilakukan untuk mengetahui besar kandungan silikanya. Hasil pengujian menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8. Silika yang diperoleh dari RHA (*Rice Husk Ash*) adalah silika amorf, yang dalam beberapa tahap dianggap memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan silika kristalin, serta memiliki struktur sferikal yang kompleks. Hal tersebut sejalan dengan sifat higroskopisnya yang bersifat menyerap air atau bahan cair lainnya. Output dari pengujian XRF ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam perancangan *mix design* beton geopolimer khususnya dalam penentuan rasio larutan alkali aktivator (molaritas NaOH dan Na_2SiO_3).



Gambar 4.7 Visualisasi RHA dengan SEM



Gambar 4.8 Persebaran unsur kimia RHA

Berdasarkan pengujian mikrostruktur pada material RHA diperoleh kadar senyawa yang dominan yaitu SiO_2 yakni sebesar 92,93%, diharapkan dengan kandungan Si yang besar dapat berkontribusi untuk meningkatkan kekuatan beton geopolimer.

EDAX Inc. - ORBIS Applications Lab Mahwah N.J					
C:\Users\Administrator\Documents\Measurement\2024\Fathur\1 Januari\24-01-29					
[5-DFT-LAB-EM-XRF-01-2024] Akbar C\Pak Andi\RHA\Area 1.SPC					
9:58 AM 29-Jan-2024					
Oxide:	Net	Wt%	At%	I-Error%	BG
MgO	0.85591	0.886124	1.35	19.50	1.03677
Al2O3	5.34723	1.178371	0.71	5.04	1.14140
SiO2	740.5520	92.93130	95.13	0.36	1.23652
Y2O3	5.20305	1.283425	0.35	5.17	1.19847
P2O5	3.27201	0.790620	0.34	6.99	1.11287
SO3	4.92705	0.641832	0.49	5.36	1.19847
K2O	23.35115	1.300369	0.85	2.10	0.99873
CaO	10.42479	0.449861	0.49	3.31	1.06531
TiO2	2.04501	0.048824	0.04	10.35	1.33163
Cr2O3	1.80722	0.022731	0.01	14.47	2.69180
MnO	10.93842	0.093092	0.08	3.69	3.07227
Fe2O3	43.90587	0.334984	0.13	1.59	3.53834
CoO	1.32212	0.007737	0.01	22.12	3.83320
Ni2O3	0.71338	0.003882	0.00	42.18	4.40390
CuO	1.68357	0.007558	0.01	20.09	5.17435
ZnO	3.19592	0.013153	0.01	11.92	6.03040
Ga2O3	1.43626	0.006138	0.00	27.33	7.38106
Total		99.99998	100.00		
kV: 40	uA: 355	LSec: 105	Method: FP	NoStds	

Gambar 4.9 Hasil Pemeriksaan XRF besaran senyawa dari RHA

213 4.2 Rancangan Campuran Beton Geopolimer

Rancangan campuran beton geopolimer diperlihatkan pada Tabel 4.5 dengan perbandingan antara *fly ash* dan RHA adalah sebesar 95%: 5% dan konsentrasi NaOH 10 M. Persyaratan Rancangan campuran beton geopolimer dilakukan dengan proses trial mix dengan mutu rencana beton adalah $f_c > 20$ MPa.

Benda uji dalam penelitian diberikan kode dengan variasi, yaitu A untuk beton geopolimer normal sedangkan A1, A2, dan A3 untuk beton geopolimer dengan variasi penambahan PET 0,25; 0,5, dan 0,75% terhadap volume beton. Pada rancangan campuran, rasio antara Na_2SiO_3 dengan NaOH adalah 2, rasio antara alkalin aktivator dengan binder adalah 0,45, rasio antara pasta geopolimer dengan total agregat adalah 6:5, rasio antara pasir dengan batu pecah adalah 2:3.

Dalam penelitian ini, pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur dilakukan untuk menilai kinerja beton geopolimer pada umur 7, 28, dan 90 hari. Benda uji berbentuk silinder berukuran $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ digunakan untuk pengujian kuat tekan dan tarik belah, sementara pengujian kuat lentur menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran $40 \times 10 \times 10 \text{ cm}$. Sebagai pelengkap data mekanik, juga dilakukan pengujian semi kuantitatif. Seluruh pengujian dilaksanakan mengikuti standar prosedur laboratorium yang berlaku untuk memastikan hasil yang akurat dan konsisten. Hasil dari pengujian ini akan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi mutu dan perkembangan kekuatan beton geopolimer seiring waktu.

Tabel 4.5 Rancangan campuran beton geopolimer (kg/m^3)

Material	Berat Material Masing-Masing Variasi PET (kg)			
	A (0 %)	A1 (0,25 %)	A2 (0,50 %)	A3 (0,75 %)
Agregat halus	436,36	432,91	429,50	426,00
Agregat kasar	654,55	654,55	654,55	654,55
<i>Fly ash</i>	857,70	857,70	857,70	857,70
RHA	45,00			
Larutan NaOH	135,00			
Na_2SiO_3	271,00			
Plastik PET	-	3,50	6,90	10,40
<i>Retarder</i>	1,4			
<i>Superplasticizer</i>	9,00			
Total	2.400			

20

4.3 Hasil Pengujian Sifat Fisik Beton

4.3.1 Hasil Uji *Slump Flow*

Pengukuran *slump flow* dilakukan untuk mengetahui tingkat kekentalan adukan beton, yang dapat menggambarkan kemudahan pengerjaan (*workability*) beton untuk diaduk, diangkut, dituang, dan dipadatkan tanpa menimbulkan porositas pada beton dan pemisahan bahan penyusun beton (*segregasi*). Adapun hasil pengujian *slump* beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan plastik PET dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan dokumentasi hasil pengujian *slump* test diperlihatkan pada Gambar 4.10.

Tabel 4.6 Hasil uji *slump flow*

No	Variasi penggunaan PET	Nilai <i>slump</i> (cm)
1	A (0%)	60
2	A1 (0,25%)	64
3	A2 (0,50%)	67
4	A3 (0,75%)	58



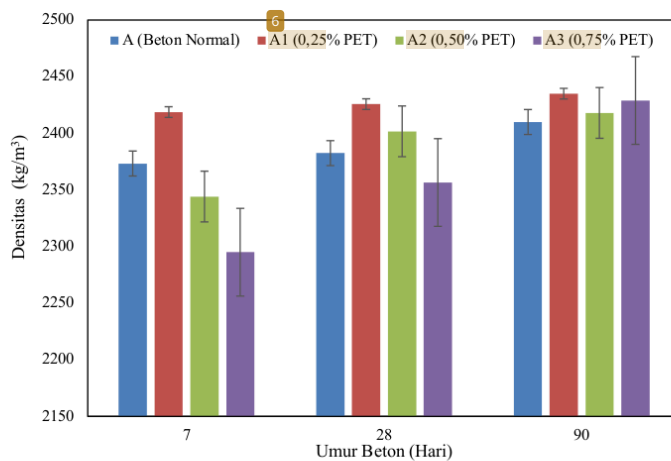
Gambar 4.10 Slump beton geopolimer

Hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa beton segar dari setiap variasi campuran geopolimer, baik yang mengandung limbah plastik PET maupun yang tidak, memiliki sifat adhesif sehingga tidak tampak adanya pemisahan material (*segregasi*) maupun keluarnya air berlebih (*bleeding*).

Nilai slump yang diperoleh saat pembuatan sampel beton berada di interval 50 – 67 cm, di mana variasi PET 0%; 0,25%; 0,50%, dan 0,75% memenuhi spesifikasi *slump flow* rencana sesuai dengan ASTM 1611M – 05 yaitu 50-70 cm (Laskar, 2009). Adapun pada saat penambahan PET 0,25% dan 0,50% mengalami kenaikan nilai slump dengan persentase kenaikan masing masing sebesar 6,72% dan 5,51%, kemudian saat penambahan PET 0,75% mengalami penurunan nilai slump dengan persentase penurunan sebesar 3,45%.

4.3.2 Hasil Uji Densitas Beton

Pengujian densitas beton, juga dikenal sebagai pengujian berat jenis beton, merupakan langkah penting untuk menentukan kualitas dan karakteristik beton. Densitas beton geopolimer diuji berdasarkan ASTM Standards (2017) dengan waktu atau umur betony aitu 7, 28 dan 90 hari. Gambar 4.11 memperlihatkan hasil pengujian densitas beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik PET sebesar 0,25%, 0,50% dan 0,75%.



Gambar 4.11 Densitas beton geopolimer

Densitas yang dihasilkan pada beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik PET pada umur 7 hari adalah sebesar 2373, 2419, 2344 dan 2295 kg/m³. Pada umur 28 hari adalah sebesar 2383, 2426, 2402 dan 2357 kg/m³ sedangkan umur 90 hari adalah sebesar 2410, 2435, 2418 dan 2429 kg/m³.

Terlihat pada Gambar 4.11, beton A1 meningkat sebesar 1,90%; 1,77% dan 1,02% terhadap beton geopolimer normal (A) pada umur 7, 28 dan 90 hari. Hal tersebut sejalan dengan riset yang dikembangkan oleh Swetha & Harihanandh (2023) menemukan bahwa penambahan kandungan plastik lebih dari 5% pada beton menyebabkan nilai densitas berkurang.

4.3.1 Hasil Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Rata-rata hasil dari tiga benda uji dalam pengujian UPV menggunakan metode langsung (*direct method*) disajikan pada Tabel 4.7. Pengujian UPV menghasilkan nilai waktu tempuh gelombang (*travel time*), yang kemudian digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang ultrasonik (V) melalui pengukuran pada dua titik yang berbeda. Berdasarkan data pada Tabel 4.7, kecepatan rata-rata rambat gelombang pada beton geopolimer, baik tanpa maupun dengan penambahan limbah plastik PET sebesar 0,25%; 0,50%; dan 0,75%, pada umur 7 hari tercatat masing-masing sebesar 3904, 3668, 2697, dan 3904 m/s. Pada umur 28 hari, kecepatan tersebut tercatat sebesar 4078, 4078, 2986, dan 3860 m/s. Sementara itu, pada umur 90 hari, nilai kecepatan masing-masing adalah 3845, 3685, 3337, dan 3224 m/s. Terjadi penurunan kecepatan rambat gelombang ultrasonik (UPV) yang signifikan pada beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET jika dibandingkan dengan beton tanpa PET (benda uji A). Pada umur 7 hari, benda uji A1 dan A2 mengalami penurunan masing-masing sebesar 6,43% dan 44,75% terhadap benda uji A. Hal serupa terjadi pada umur 28 hari, di mana benda uji A2 dan A3 menunjukkan penurunan sebesar 15,22% dan 19,26%. Sedangkan pada umur 90 hari, penurunan UPV tercatat sebesar 4,34% untuk A1 (0,25% PET), 15,22% untuk A2 (0,50% PET), dan 19,26% untuk A3 (0,75% PET) jika dibandingkan dengan benda uji tanpa campuran PET. Penurunan ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi persentase limbah PET yang ditambahkan, semakin rendah kecepatan rambat gelombang, yang dapat mencerminkan menurunnya kerapatan atau homogenitas internal beton.

Penurunan ini dapat disebabkan oleh degradasi mikrostruktur atau ketidakterpaduan jangka panjang antara plastik PET dengan matriks geopolimer. Secara umum, penambahan limbah PET dalam jumlah yang terlalu tinggi (di atas 0,25%) cenderung menurunkan kualitas internal beton geopolimer, sebagaimana

tercermin dari penurunan kecepatan UPV. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan PET sebagai bahan tambahan perlu dibatasi agar tidak mengganggu integritas struktur beton.

² Tabel 4.7 Hasil pengujian *UPV* beton geopolimer

Benda uji	³³ <i>UPV</i> (m/s)			Kualitas beton		
	7 hari	28 hari	90 hari	7 hari	28 hari	90 hari
A	3904	4078	3845	Baik	Baik	Baik
A1	3668	4078	3685	Baik	Baik	Baik
A2	3697	3986	3337	Baik	Baik	Cukup Baik
A3	3904	3860	3224	Baik	Baik	Cukup Baik

⁵ Pada umur 7 dan 28 hari, kualitas beton geopolimer, baik tanpa maupun dengan penambahan limbah plastik PET, masih tergolong dalam kategori *Baik* untuk seluruh benda uji. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat penurunan nilai UPV akibat penambahan PET, kecepatan rambat gelombang yang dihasilkan masih berada dalam rentang nilai yang mencerminkan kepadatan dan integritas struktur beton yang memadai menurut standar kualitas beton berdasarkan metode UPV. Pada umur 90 hari kualitas beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik PET 0,25% adalah Baik sedangkan benda uji dengan menggunakan limbah plastik PET sebesar 0,50% dan 0,75% adalah Cukup Baik.

Penjelasan yang dapat diberikan dari penurunan nilai kecepatan rambat gelombang hasil pengujian *UPV* seiring dengan penambahan PET adalah lemahnya lekatan antara PET dengan matrix beton. ⁸⁹ Hal tersebut sejalan dengan riset yang dikembangkan oleh M. H. Bata et al. (2019) menemukan bahwa dengan menambahkan ⁹⁷ cacahan botol plastik PET bekas sebagai agregat kasar dapat menurunkan nilai *UPV* beton. Penurunan ini dikaitkan dengan faktor-faktor yang disebutkan sebelumnya, seperti kepadatan PET yang lebih rendah, perlekatan yang lebih lemah antara PET dan matrix beton, serta rongga udara yang terperangkap di permukaan PET. Selain itu, daya ikat antara material PET dengan beton menyebabkan kekuatan beton semakin menurun yang disebabkan oleh rongga yang berlebihan.

67

4.4 Hasil Pengujian Sifat Mekanis Beton

4.4.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Sifat mekanik beton geopolimer, baik tanpa maupun dengan penambahan limbah plastik PET sebesar 0,25%; 0,50%; dan 0,75%, dievaluasi melalui pengujian kuat tekan pada umur 7, 28, dan 90 hari, sesuai dengan acuan (SNI-1974, 2011). Pengujian ini bertujuan untuk menilai pengaruh variasi kadar PET terhadap perkembangan kekuatan tekan beton dari waktu ke waktu. Hasil lengkap dari pengujian kuat tekan tersebut disajikan dalam Tabel 4.8 dan divisualisasikan dalam Gambar 4.12 untuk memberikan gambaran perbandingan antar variasi campuran secara lebih jelas.

2

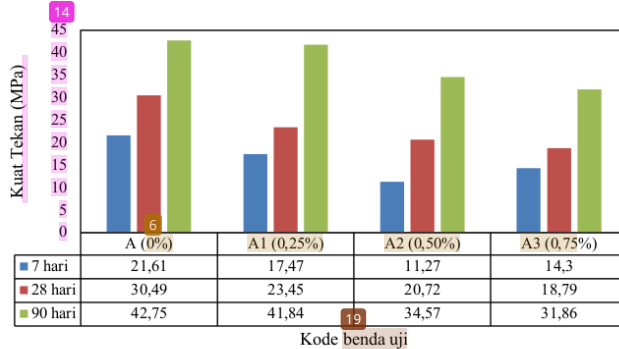
Tabel 4.8 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer

No.	Benda uji (% PET)			
	A (0%)	A1 (0,25%)	A2 (0,50%)	A3 (0,75%)
Kuat tekan umur 7 hari (MPa)				
1	22,18	*11,07	10,10	12,54
2	*13,88	15,40	*7,70	17,39
3	21,04	19,54	12,45	12,96
Rata-rata	21,61	17,47	11,27	14,30
Kuat tekan umur 28 hari (MPa)				
1	27,55	23,23	20,79	18,11
2	32,64	22,86	20,05	19,60
3	31,27	24,24	21,33	18,66
Rata-rata	30,49	23,45	20,72	18,79
Kuat tekan umur 90 hari (MPa)				
1	42,05	40,87	36,66	28,98
2	35,15	40,80	30,46	34,28
3	48,84	43,84	36,60	35,70
Rata-rata	42,75	41,84	34,57	31,86

125

Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer pada umur 7 hari menunjukkan bahwa beton tanpa limbah plastik PET (0%) memiliki kuat tekan tertinggi, yaitu 21,61 MPa, sedangkan beton dengan penambahan PET 0,25%, 0,50%, dan 0,75% masing-masing menghasilkan kuat tekan sebesar 17,47 MPa, 11,27 MPa, dan 14,30 MPa. Pada umur 28 hari, terjadi peningkatan kuat tekan secara signifikan pada semua variasi campuran, dengan beton tanpa PET mencapai 30,49 MPa, dan beton dengan PET 0,25%, 0,50%, dan 0,75% masing-masing menghasilkan 23,45 MPa,

20,72 MPa, dan 18,79 MPa. Pada umur 90 hari, beton tanpa PET kembali menunjukkan kekuatan tekan tertinggi, yaitu 42,75 MPa, diikuti oleh beton dengan PET 0,25% (41,84 MPa), 0,50% (34,57 MPa), dan 0,75% (31,86 MPa). Peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur beton menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan penambahan PET tetap mengalami penguatan, meskipun beton tanpa PET tetap menunjukkan kekuatan tekan yang lebih tinggi pada setiap umur pengujian.



Gambar 4.12 Hubungan kuat tekan terhadap umur

Berdasarkan umur beton, untuk semua variasi benda uji beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik PET 0,25%; 0,50% dan 0,75% mengalami peningkatan. Hal ini serupa dengan perilaku beton berbahan semen portland komposit sebagai bahan pengikat, di mana kekuatan beton meningkat seiring dengan pertambahan umur. Pada beton geopolimer yang mengandung limbah plastik PET, meskipun terjadi penurunan kekuatan tekan dibandingkan beton tanpa PET, tren peningkatan kekuatan pada umur 28 dan 90 hari tetap terlihat. Proses hidrasi yang berlangsung pada beton portland komposit dan reaksi kimia pada beton geopolimer, yang melibatkan aktivasi silika dan alumina, memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan seiring waktu. Penambahan PET, meskipun memberikan dampak penurunan kekuatan, tidak menghalangi beton geopolimer untuk memperlihatkan peningkatan kekuatan dalam jangka panjang, mirip dengan beton portland komposit yang menunjukkan sifat peningkatan kekuatan seiring waktu.

5 4.4.2 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

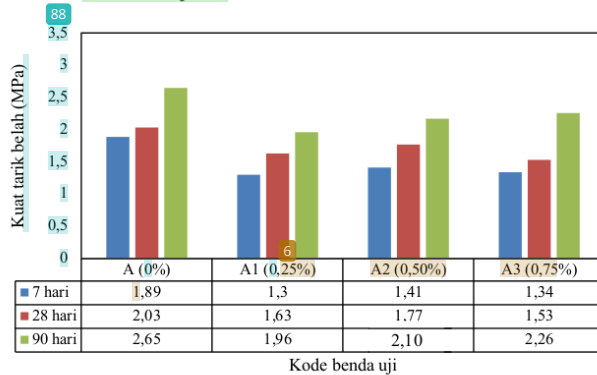
Pengujian kuat tarik belah beton geopolimer, baik tanpa maupun dengan penambahan limbah plastik PET sebesar 0,25%, 0,50%, dan 0,75%, dilakukan pada umur 7, 28, dan 90 hari. Setiap variasi penggunaan limbah plastik PET diuji dengan tiga benda uji untuk memperoleh hasil yang representatif. Hasil rekapitulasi dari pengujian kuat tarik belah ini disajikan dalam Tabel 4.9 untuk memberikan gambaran perbandingan antara variasi campuran beton geopolimer pada berbagai umur pengujian.

2
Tabel 4.9 Hasil uji kuat tarik belah beton geopolimer

No.	Benda uji (% PET)			
	A (0%)	A1 (0,25%)	A2 (0,50%)	A3 (0,75%)
Kuat tarik belah umur 7 hari (MPa)				
1	1,72	1,28	0,83	1,05
2	2,00	1,33	1,94	1,71
3	1,95	1,29	1,46	1,28
Rata-rata	1,89	1,30	1,41	1,34
Kuat tarik belah umur 28 hari (MPa)				
1	2,25	1,90	1,43	1,25
2	1,89	1,49	2,03	1,50
3	1,95	1,52	1,84	1,84
Rata-rata	2,03	1,63	1,77	1,53
Kuat tarik belah umur 90 hari (MPa)				
1	3,21	1,81	*6,87	2,74
2	1,91	2,42	2,16	*6,56
3	2,83	1,65	2,04	1,78
Rata-rata	2,65	1,96	2,10	2,26

22
Berdasarkan Tabel 4.9, hasil pengujian kuat tarik belah beton geopolimer menunjukkan variasi nilai yang tergantung pada umur beton dan persentase penggunaan limbah plastik PET. Beton geopolimer tanpa limbah plastik (0%) menunjukkan nilai kuat tarik belah berturut-turut pada umur 7, 28, dan 90 hari sebesar 1,89 MPa, 2,03 MPa, dan 2,65 MPa. Untuk beton dengan penambahan limbah plastik 0,25%, nilai kuat tarik belah yang dihasilkan pada umur 7, 28, dan 90 hari masing-masing adalah 1,30 MPa, 1,63 MPa, dan 1,96 MPa. Pada penggunaan PET sebesar 0,50%, nilai kuat tarik belah pada umur 7, 28, dan 90 hari masing-masing adalah 1,41 MPa, 1,77 MPa, dan 2,10 MPa. Sedangkan untuk penggunaan 0,75% PET, nilai kuat tarik belah yang dihasilkan pada umur 7, 28,

dan 90 hari adalah 1,34 MPa, 1,53 MPa, dan 2,26 MPa, dengan hasil serupa pada umur 90 hari dengan campuran 0,50% PET. Secara keseluruhan, beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET menunjukkan peningkatan nilai kuat tarik belah pada umur 90 hari, meskipun ada penurunan pada umur 7 dan 28 hari untuk sebagian besar variasi campuran.



Gambar 4.13 Hubungan kuat tarik belah terhadap umur

Gambar 4.13 memperlihatkan kurva hubungan kuat tarik belah dengan umur beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik 0,25%; 0,50% dan 0,75% yaitu umur 7, 28 dan 90 hari yang cenderung berbentuk regresi non linier logaritma. Terlihat bahwa nilai kuat tarik belah pada beton geopolimer meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton. Peningkatan ini serupa dengan perilaku beton konvensional yang menggunakan bahan semen Portland komposit, batu pecah, agregat halus, dan air, di mana kekuatan tarik belah cenderung meningkat seiring dengan waktu akibat proses hidrasi yang berlangsung dan pembentukan ikatan kuat antara komponen bahan. Meskipun beton geopolimer mengandung limbah plastik PET, yang dapat mempengaruhi sifat mekaniknya, tren peningkatan kekuatan pada umur 28 dan 90 hari menunjukkan bahwa reaksi kimia dalam beton geopolimer masih dapat menghasilkan kekuatan yang terus berkembang, mirip dengan beton konvensional.

Peningkatan kekuatan tarik belah ini menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET tetap dapat memiliki daya tahan dan

performa yang baik dalam jangka panjang, meskipun ada variasi tergantung pada persentase PET yang ditambahkan.

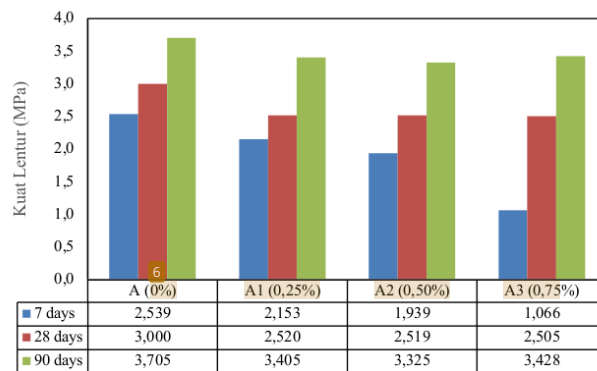
4.4.3 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton

Pengujian kuat lentur beton geopolimer dilakukan dengan variasi penambahan limbah plastik PET yang sama seperti pada pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah, dengan umur beton yang diuji pada 7, 28, dan 90 hari. Pada pengujian kuat lentur, beban yang diterapkan pada balok menyebabkan deformasi dan regangan tambahan, yang pada akhirnya mengarah pada retak lentur sepanjang bentang balok. Seiring dengan bertambahnya beban, balok akan mencapai titik keruntuhan struktur, yang dikenal sebagai keadaan limit lentur. Saat terjadi pembebanan, balok yang mengalami lentur pasti akan mengalami defleksi atau lendutan. Selama pelaksanaan pengujian kuat lentur, pengamatan juga dilakukan terhadap deformasi yang terjadi pada balok selama pembebanan, yang dikenal dengan istilah lendutan. Pengujian kuat lentur ini dilakukan sesuai dengan standar SNI 4431:2011 pada umur 7, 28, dan 90 hari. Hasil dari pengujian kuat lentur disajikan dalam Tabel 4.10 dan Gambar 4.14 untuk memberikan gambaran perbandingan kekuatan lentur pada berbagai variasi campuran beton geopolimer.

Tabel 4.10 Hasil uji kuat lentur beton geopolimer

No.	Benda uji (% PET)			
	A (0%)	A1 (0,25%)	A2 (0,50%)	A3 (0,75%)
Kuat lentur umur 7 hari (MPa)				
1	2,77	2,28	1,73	-
2	2,61	2,01	2,29	1,51
3	2,22	2,16	1,77	1,67
Rata-rata	2,53	2,15	1,93	1,59
Kuat lentur umur 28 hari (MPa)				
1	3,12	2,16	2,55	2,77
2	2,52	2,58	2,58	2,67
3	3,36	2,82	2,41	2,05
Rata-rata	3,00	2,52	2,51	2,50
Kuat lentur umur 90 hari (MPa)				
1	4,10	3,38	3,26	3,05
2	3,30	3,41	3,59	3,80
3	2,90	3,41	3,11	*4,25
Rata-rata	3,70	3,40	3,32	3,42

Secara umum, nilai kuat lentur beton geopolimer mengalami penurunan seiring dengan peningkatan persentase limbah plastik PET yang ditambahkan ke dalam campuran beton. Pada umur 7 hari, beton geopolimer dengan variasi PET sebesar 0,25%; 0,50%; dan 0,75% terhadap volume beton menunjukkan penurunan kuat lentur masing-masing sebesar 15,20%; 23,63%; dan 35,17%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan PET pada campuran beton dapat mengurangi kemampuan lentur beton pada umur dini. Sedangkan pada umur 28 hari, penurunan kuat lentur pada beton geopolimer dengan variasi PET sebesar 0,25%; 0,50%; dan 0,75% masing-masing tercatat sebesar 16%; 16,03%; dan 16,50%. Penurunan yang relatif lebih stabil pada umur 28 hari menunjukkan bahwa penambahan PET memiliki dampak yang lebih kecil pada beton setelah periode pengerasan yang lebih lama, meskipun masih ada penurunan yang signifikan pada semua variasi PET.



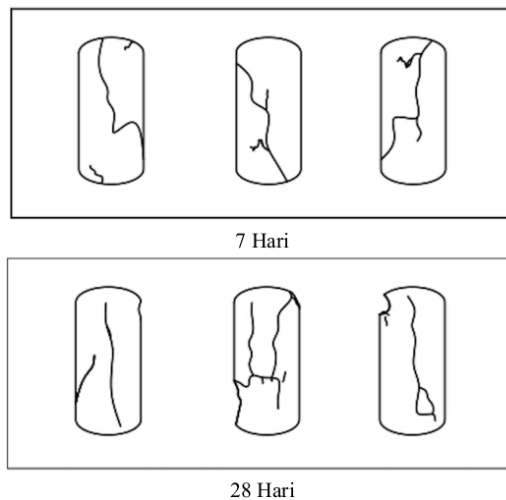
Gambar 4.14 Kurva hubungan variasi benda uji dengan kuat lentur

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Wahyudi et al., 2024) menemukan hasil serupa ketika mengganti agregat halus pada beton dengan PET. Diketahui bahwa penambahan limbah botol plastik PET secara bertahap menurunkan nilai kuat lentur beton. A. Shubbar & Al-Shadeedi (2017) menggunakan penambahan limbah plastik jenis PET sebagai pengganti agregat halus terhadap *flexural strength* beton memperoleh nilai bahwa penambahan plastik PET secara umum menurunkan nilai kuat lentur beton. Penurunan ini semakin signifikan dengan semakin tingginya persentase plastik PET.

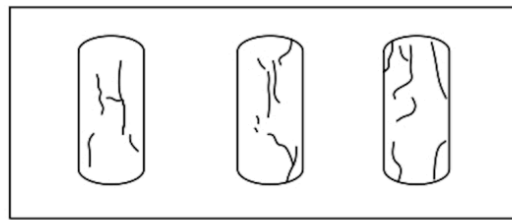
4.4.4 Pola Keruntuhan Beton Geopolimer

Beton silinder dari pengujian kuat tekan mengalami keruntuhan yang membentuk pola yang dapat menunjukkan kegagalan beton dalam menahan beban tertentu. Gambar 4.15 hingga Gambar 4.18 menunjukkan pola keruntuhan beton geopolimer dengan variasi A, A1, A2 dan A3.

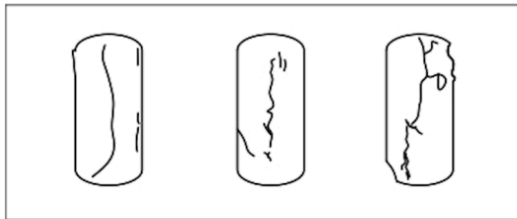
Gambar 4.15 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan variasi A (0%) dan pola keruntuhan pada tiga sampel beton untuk umur 7 dan 28 hari. Pola keruntuhan yang terlihat pada gambar ini menggambarkan bagaimana beton bereaksi terhadap beban yang diterapkan selama pengujian, serta memperlihatkan distribusi retak dan kerusakan yang terjadi pada setiap sampel pada kedua umur tersebut. Pola keruntuhan ini sangat penting untuk memahami bagaimana beton geopolimer tanpa penambahan limbah plastik PET (0%) berperilaku dalam hal distribusi kekuatan dan ketahanan terhadap kerusakan struktural seiring dengan waktu. Pada umur 7 hari, beton cenderung menunjukkan kerusakan yang lebih cepat dan signifikan, dibandingkan dengan umur 28 hari, di mana beton mulai menunjukkan peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap pola keruntuhan kolom, kerucut, geser.



Gambar 4.15 Pola keruntuhan beton variasi A (0%)



7 Hari

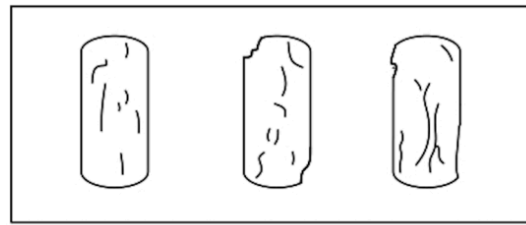


28 Hari

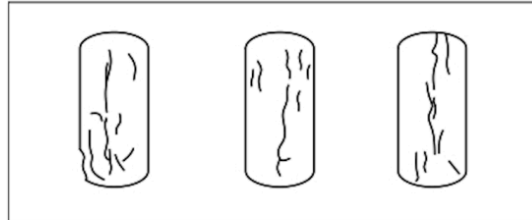
Gambar 4.16 Pola keruntuhan beton variasi A1 (0,25%)

Gambar 4.16 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan variasi A1 (0,25%) dan pola keruntuhan pada tiga variasi sampel beton pada umur 7 hari dan 28 hari. Pada umur 7 hari, pola keruntuhan yang terlihat pada ketiga sampel adalah sebagai berikut: pertama adalah pola keruntuhan kerucut dan geser, kedua adalah pola keruntuhan kolom, dan yang ketiga adalah pola keruntuhan kolom. Pola keruntuhan ini menunjukkan adanya perbedaan dalam cara beton merespon beban pada tahap awal pengerasan (umur 7 hari), dengan beberapa sampel mengalami keruntuhan pada area yang lebih terlokalisasi, seperti kolom, sedangkan lainnya mengalami keruntuhan yang lebih luas seperti kerucut dan geser.

Pada umur 28 hari, pola keruntuhan mengalami perubahan menjadi lebih stabil, dengan sampel pertama menunjukkan pola keruntuhan geser, sampel kedua menunjukkan pola keruntuhan kolom, dan sampel ketiga juga menunjukkan pola keruntuhan geser. Perubahan pola keruntuhan ini mencerminkan peningkatan kekuatan beton seiring dengan bertambahnya umur, di mana beton geopolimer dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap kerusakan struktural setelah 28 hari pengerasan.



7 Hari

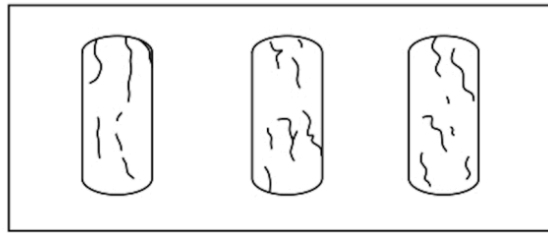


28 Hari

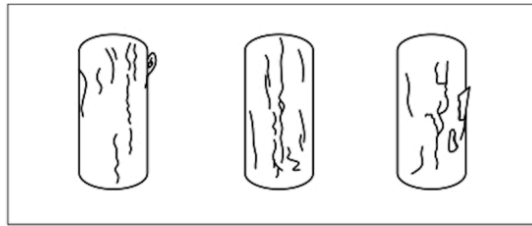
Gambar 4.17 Pola keruntuhan beton variasi A2 (0,50%)

Gambar 4.17 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan variasi A2 (0,5%) dan pola keruntuhan pada tiga variasi sampel beton pada umur 7 hari dan 28 hari. Pada umur 7 hari, pola keruntuhan yang terlihat pada ketiga sampel adalah sebagai berikut: pertama adalah pola keruntuhan kolom, kedua adalah pola keruntuhan geser, dan ketiga adalah pola keruntuhan geser. Pola keruntuhan ini mengindikasikan adanya variasi dalam respons beton terhadap beban pada tahap awal pengerasan, dengan beberapa sampel mengalami keruntuhan yang lebih terlokalisasi pada kolom, sementara yang lainnya menunjukkan keruntuhan yang lebih bersifat geser.

Pada umur 28 hari, pola keruntuhan berubah menjadi lebih konsisten, dengan ketiga sampel menunjukkan pola keruntuhan kolom. Perubahan ini menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan penambahan 0,5% limbah plastik PET mengalami peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap kerusakan struktural, sehingga lebih mampu mempertahankan integritasnya pada umur yang lebih lama (28 hari).



7 Hari



28 Hari

Gambar 4.18 Pola keruntuhan beton variasi A3 (0,75%)

Gambar 4.18 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan variasi A3 (0,75%) dan pola keruntuhan pada tiga variasi sampel beton pada umur 7 hari dan 28 hari. Pada umur 7 hari, pola keruntuhan yang terlihat pada ketiga sampel adalah sebagai berikut: pertama adalah pola keruntuhan kolom, kedua adalah pola keruntuhan geser, dan ketiga adalah pola keruntuhan geser. Pola keruntuhan ini mengindikasikan bahwa pada umur 7 hari, beton geopolimer dengan penambahan 0,75% limbah plastik PET menunjukkan variasi dalam ketahanan terhadap beban, dengan beberapa sampel mengalami keruntuhan yang lebih terlokalisasi pada kolom, sementara yang lainnya menunjukkan keruntuhan dengan pola geser yang lebih luas.

Pada umur 28 hari, pola keruntuhan berubah menjadi lebih konsisten, dengan dua sampel menunjukkan pola keruntuhan kolom, sementara satu sampel menunjukkan pola keruntuhan geser. Perubahan ini menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan penambahan 0,75% limbah plastik PET mengalami peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap kerusakan struktural, terutama pada

bagian kolom, meskipun masih ada satu sampel yang menunjukkan pola keruntuhan geser.

Pengamatan visual pola retak uji tekan beton menurut Neville & Brooks, (2015) dan Day (2021) bahwa dianalisis bahwa hasil pola retak geser terjadi ketika gesekan yang terjadi menunjukkan benda uji beton berusaha menahan ekspansi lateral beton saat gaya tekan vertikal diterapkan. Pola retak tersebut lebih sering terjadi pada pengujian spesimen benda uji yang memiliki kuat tekan relatif lebih besar, sedangkan retak kolom lebih cenderung terjadi pada spesimen beton yang memiliki kuat tekan yang rendah.

23 4.5 Hasil Pengujian Durabilitas Beton

4.5.1 Hasil Pengujian Porositas Beton

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai porositas pada beton normal (A) dan beton geopolimer dengan tambahan PET sebesar 0,25% (A1), 0,50% (A2), dan 0,75% (A3). Tabel 4.11 menunjukkan nilai porositas pada empat variasi yaitu A, A1, A2, A3 dengan nilai 20,60; 17,74; 16,11; dan 15,40%. Beton normal (A) memiliki tingkat porositas tertinggi dibandingkan variasi A1, A2, A3. Hal ini dikarenakan struktur beton berbasis semen Portland yang cenderung memiliki kapiler mikro (*micro-capillary*) dan makro (*macro-capillary*) lebih banyak.

Tabel 4.11 Nilai porositas beton geopolimer

No	Sampel (% PET)	Porositas
		(%)
39 2	A (0%)	20,60
2	A1 (0,25%)	17,74
3	A2 (0,50%)	16,11
4	A3 (0,75%)	15,40

Beton geopolimer memiliki struktur yang lebih padat karena produk reaksi geopolimerisasi, yaitu natrium aluminosilikat hidrat (N-A-S-H), yang mampu mengisi ruang kosong dalam matriks beton. Penambahan 0,25% PET memberikan kontribusi kecil terhadap pengurangan porositas dengan bertindak sebagai bahan pengisi (*filler*). Penambahan 0,50% PET memberikan efek pengisian yang lebih signifikan, yang mampu mengurangi ruang antar partikel dalam matriks beton. Penelitian oleh Qaidi et al. (2023) menyebutkan bahwa penambahan partikel plastik

pada campuran beton dapat mengurangi porositas dengan menghalangi jalur kapiler mikro. Penambahan 0,75% PET semakin mengurangi jumlah ruang kosong dalam matriks beton. Namun, jumlah PET yang terlalu tinggi juga dapat memengaruhi ikatan antar partikel dan mengurangi kohesi matriks, yang perlu diperhatikan untuk memastikan sifat mekanis tetap optimal. Hasil ini konsisten dengan temuan Bachtiar et al. (2022), yang mencatat bahwa penggunaan plastik sebagai bahan pengisi mampu mengurangi porositas tanpa meningkatkan rasio air-semen secara signifikan.

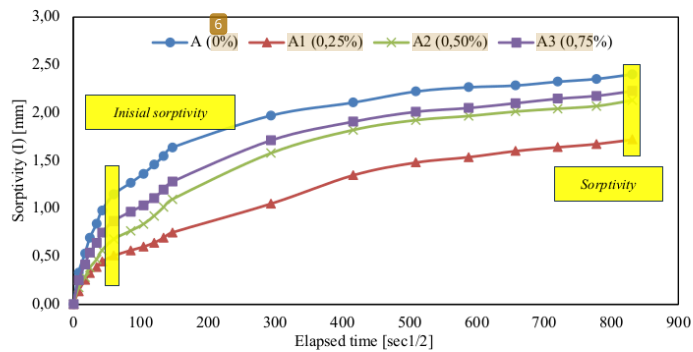
4.5.2 Hasil Pengujian *Sorptivity*

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai *sorptivity* pada beton normal (A) dan beton geopolimer dengan tambahan PET sebesar 0,25% (A1), 0,50% (A2), dan 0,75% (A3). Nilai *initial sorptivity* menunjukkan nilai A, A1, A2, dan A3 sebesar 1,15; 0,51, 0,68, dan 0,87 mm. Gambar 4.19 menunjukkan terjadi peningkatan yang signifikan pada waktu 60 s^{1/2}, nilai akhir *sorptivity* diperoleh nilai A, A1, A2, dan A3 masing-masing sebesar 2,40; 1,72; 2,13; dan 2,23 mm.

Beton normal (A) memiliki nilai *sorptivity* yang paling tinggi di antara semua variasi, menunjukkan tingginya tingkat penyerapan air. Pengurangan nilai *sorptivity* mulai terlihat pada variasi A3 dan pada variasi A2 terus berkurang sampai dengan A1. Variasi A1 menunjukkan nilai *sorptivity* terendah di antara semua variasi. Penambahan PET dapat menurunkan nilai *sorptivity* dimana pengisian pori-pori beton secara signifikan, menciptakan mikrostruktur yang lebih padat dan dapat menurunkan kapilaritas. Penurunan kapilaritas ini tentunya berbanding lurus dengan kekuatan beton dan sifat mekanik beton seperti kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur.

Tabel 4.12 Nilai *sorptivity* beton geopolimer

No	Sampel (% PET)	Nilai <i>initial sorptivity</i>	Nilai <i>sorptivity</i>
1	A (0%)	1,15	2,40
2	A1 (0,25%)	0,51	1,72
3	A2 (0,50%)	0,68	2,13
4	A3 (0,75%)	0,87	2,23



Gambar 4.19 Hubungan nilai I dan akar waktu beton geopolimer

4.5.3 Hasil Pengujian Penetrasi Klorida

Pengujian penetrasi klorida ini membandingkan kemampuan beton normal (A) dan beton geopolimer dengan variasi PET (A1, A2, dan A3) dalam menahan penetrasi klorida. Beton normal menunjukkan penetrasi klorida yang paling tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya. Hal ini disebabkan oleh porositas kapiler yang lebih besar pada beton berbasis semen portland akibat produk hidrasi seperti kalsium hidroksida yang rentan terhadap difusi ion klorida seperti dinyatakan oleh Alqahtani (2021).

Tabel 4.13 Nilai penetrasi klorida beton geopolimer

No	Sampel (% PET)	Kedalaman penetrasi klorida
		(mm)
1	A (0%)	20.75
2	A1 (0,25%)	13.57
3	A2 (0,50%)	15.86
4	A3 (0,75%)	14.17

Tabel 4.13 menunjukkan nilai penetrasi klorida beton geopolimer pada masing-masing variasi. Variasi A1, penetrasi klorida mencapai tingkat terendah. Penambahan 0,25% PET meningkatkan kepadatan mikrostruktur secara signifikan, menurunkan permeabilitas, dan mengurangi difusi ion klorida. Variasi A2 dengan 0,50% PET menunjukkan hasil yang lebih baik dalam menghambat penetrasi klorida dibandingkan A. PET yang bersifat hidrofobik menghambat pergerakan ion-ion air yang membawa klorida ke dalam beton.

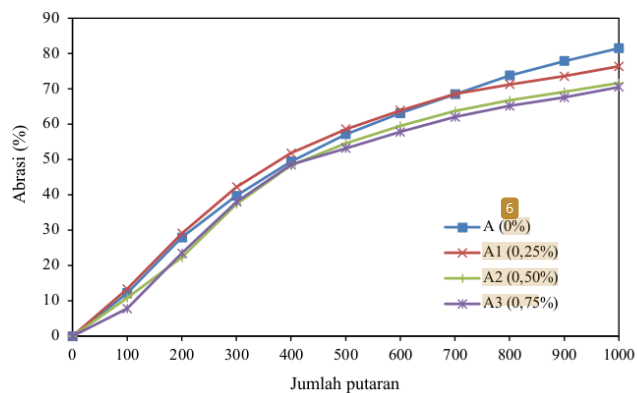
Pada variasi A3, beton geopolimer menunjukkan penurunan signifikan dalam penetrasi klorida dibandingkan dengan beton normal. Penambahan PET sebanyak 0,75% membantu mengisi sebagian pori-pori kapiler, sehingga mengurangi jalur difusi ion klorida.

2 4.5.4 Hasil Pengujian Abrasi

Pengujian abrasi ini membandingkan kemampuan beton normal (A) dan beton geopolimer dengan variasi PET (A1, A2, dan A3) dalam menahan struktur yang terpapar beban mekanis berulang atau kondisi lingkungan yang abrasif, seperti lantai pabrik, jalan raya, atau bendungan. Beton geopolimer menawarkan sifat mekanis dan ketahanan yang lebih baik dibandingkan beton konvensional karena struktur matriksnya yang lebih padat. Penambahan plastik daur ulang seperti PET dalam beton geopolimer dapat memengaruhi ketahanan abrasi melalui perannya sebagai bahan pengisi dan modifikasi struktur mikro.

Tabel 4.14 Nilai abrasi beton geopolimer

No	Sampel (% PET)	Abrasi (%)
		(%)
39	A (0%)	81,50
2	A1 (0,25%)	76,40
3	A2 (0,50%)	71,69
4	A3 (0,75%)	70,51



Gambar 4.20 Perbandingan jumlah putaran dan abrasi beton geopolimer

Variasi A (beton normal) menunjukkan nilai abrasi tertinggi, menunjukkan ketahanan yang paling rendah terhadap abrasi. Hal ini disebabkan oleh struktur mikro beton normal yang memiliki lebih banyak ruang pori dan ikatan pasta semen yang lebih lemah dibandingkan beton geopolimer dengan penambahan PET. Penelitian sebelumnya oleh Gouasmi et al. (2019) mencatat bahwa produk hidrasi dalam beton konvensional, seperti kalsium hidroksida, cenderung kurang stabil terhadap beban mekanis dan degradasi lingkungan, sehingga mengurangi ketahanan terhadap abrasi. Beton geopolimer A1 memiliki ketahanan abrasi yang lebih baik dibandingkan beton normal. Hal ini disebabkan oleh struktur matriks yang lebih padat akibat reaksi geopolimerisasi, menghasilkan produk natrium aluminosilikat hidrat (N-A-S-H) yang lebih kuat dan tahan terhadap abrasi. Penambahan 0,25% PET membantu memperkuat matriks beton dengan mengisi ruang kosong mikro tanpa mengganggu kohesi antar partikel. Variasi A2, nilai abrasi semakin menurun, menunjukkan peningkatan ketahanan abrasi. Penambahan PET sebesar 0,50% memberikan kontribusi lebih besar sebagai bahan pengisi (filler) yang mengurangi ruang pori dan meningkatkan densitas beton. Hasil ini konsisten dengan penelitian Saxena et al. (2020), yang menunjukkan bahwa partikel plastik dapat meningkatkan ketahanan mekanis beton, termasuk ketahanan abrasi, dengan memodifikasi struktur mikro. Variasi A3 memiliki ketahanan abrasi terbaik dibandingkan semua variasi lainnya. Penambahan 0,75% PET menciptakan matriks beton yang sangat padat dengan ruang pori yang minimal.

PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

5.1 Pembahasan Sifat Mekanis Beton

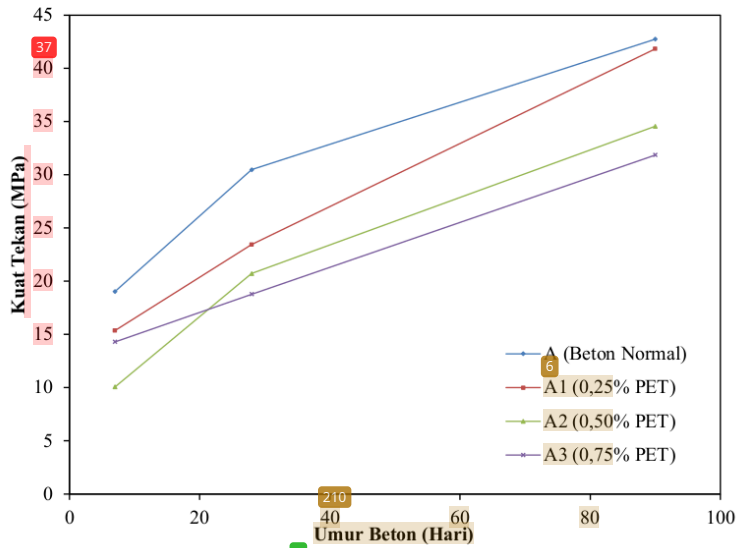
5.1.1 Pembahasan Kuat Tekan Beton

Penurunan nilai kuat tekan terlihat pada benda uji beton geopolimer yang menggunakan limbah plastik PET dengan variasi 0,25% (A1), 0,50% (A2), dan 0,75% (A3) dibandingkan dengan benda uji yang tidak menggunakan limbah plastik PET (A) pada umur 7, 28, dan 90 hari. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun penambahan limbah plastik PET dapat memberikan manfaat dalam beberapa aspek, seperti keberlanjutan material, terdapat pengaruh negatif terhadap kekuatan beton geopolimer pada pengujian kuat tekan seiring dengan peningkatan persentase penggunaan limbah plastik PET. Umur 7 hari terjadi penurunan nilai kuat tekan yang terjadi adalah masing-masing sebesar 23,87%; 89,07% dan 33,15%. Umur 28 hari terjadi penurunan nilai kuat tekan yang terjadi adalah masing-masing sebesar 30,02%; 47,15% dan 62,27%. Sedangkan pada umur 90 hari penurunan nilai kuat tekan yang terjadi adalah masing-masing sebesar 2,17%; 23,66%; 34,18%.

Gambar 5.1 menunjukkan kurva hubungan antara kuat tekan dan umur beton geopolimer pada umur 7 hari, 28 hari, dan 90 hari, yang cenderung mengikuti pola regresi non-linier logaritmik. Pada beton geopolimer yang menggunakan limbah plastik PET, terlihat adanya penurunan kuat tekan dibandingkan dengan beton geopolimer yang tidak menggunakan limbah plastik PET. Meskipun demikian, untuk semua variasi benda uji, terdapat kecenderungan peningkatan nilai kuat tekan seiring dengan bertambahnya umur beton, yang mengindikasikan bahwa beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET masih dapat mengalami pemadatan dan peningkatan kekuatan seiring waktu.

Penambahan plastik PET pada beton geopolimer memiliki pengaruh yang kompleks terhadap kekuatan tekan. Secara umum, stik PET dapat mengganggu proses pembentukan gel silika yang merupakan komponen utama dalam pengikatan beton geopolimer. Penurunan kekuatan tekan yang signifikan terjadi pada usia dini (7 dan 28 hari) untuk campuran dengan penambahan PET. Sedangkan pada umur

90 hari, terlihat adanya sedikit peningkatan kekuatan tekan pada beberapa campuran dengan penambahan PET. Hal ini disebabkan oleh proses adaptasi yang terjadi antara partikel plastik PET dengan matriks beton geopolimer seiring waktu. Kinerja beton geopolimer dipengaruhi oleh sifat permukaan, densitas, dan kompatibilitas kimia plastik PET dengan bahan-bahan dalam campuran beton.

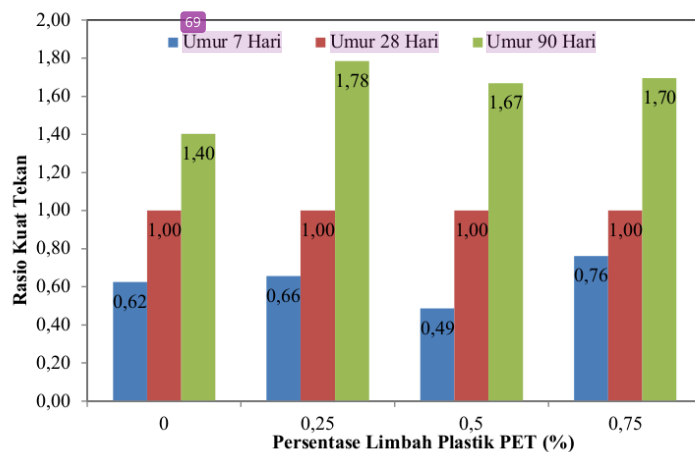


Gambar 5.1 Hubungan kuat tekan beton geopolimer dengan umur

Secara umum, persentase kenaikan nilai kuat tekan beton geopolimer cenderung seragam. Hal ini disebabkan oleh proses geopolimerisasi, yaitu reaksi kimia yang melibatkan aktivasi silika dan alumina dari fly ash dan RHA dengan larutan alkali untuk membentuk struktur tiga dimensi yang dikenal sebagai gel silika-alumina. Gel ini terdiri dari jaringan tiga dimensi yang terdiri dari tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 yang saling terhubung melalui atom oksigen. Struktur gel tersebut memberikan beton geopolimer kekuatan dan kekompakan, yang berperan dalam meningkatkan nilai kuat tekan meskipun ada penambahan limbah plastik PET pada campuran beton.

Material yang digunakan dalam penyusunan beton geopolimer memiliki peran krusial dalam menentukan nilai kuat tekan beton tersebut. Beton geopolimer

mengandalkan fly ash, RHA, natrium silikat, dan natrium hidroksida sebagai bahan pengikat, menggantikan semen konvensional yang biasa digunakan dalam beton biasa. Kombinasi bahan-bahan ini melalui proses geopolimerisasi membentuk struktur yang sangat kuat dan tahan lama, yang memberikan beton geopolimer keunggulan dalam hal kekuatan mekanik dan daya tahan, meskipun tanpa menggunakan semen portland.



Gambar 5.2 Presentase kenaikan kuat tekan beton geopolimer

Penambahan limbah plastik PET dapat mempengaruhi kuat tekan tergantung pada jenis dan proporsi plastik yang digunakan. Menurut penelitian oleh Islam et al. (2022), penambahan limbah plastik dalam jumlah kecil dapat meningkatkan kekuatan awal beton karena partikel plastik membantu mengisi pori-pori dalam campuran beton, tetapi apabila jumlahnya terlalu besar, akan menurunkan kekuatan karena sifat plastik yang tidak dapat terikat kuat dengan matriks geopolimer.

Karakteristik fisik beton geopolimer, seperti densitas, porositas, dan ukuran partikel agregat, sangat memengaruhi kuat tekan. Penelitian oleh Islam et al. (2022), menunjukkan bahwa beton dengan densitas yang lebih tinggi cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi, hal ini disebabkan oleh porositas yang lebih rendah pada beton tersebut. Porositas yang rendah mengurangi jumlah ruang kosong dalam struktur beton, sehingga meningkatkan kekuatan material karena adanya pengurangan jalur pergerakan air atau udara yang dapat mengurangi

integritas struktural beton. Namun, penggunaan limbah plastik PET dapat meningkatkan porositas apabila tidak tercampur dengan ⁵ baik, sehingga menurunkan nilai kuat tekan. Oleh karena itu, kontrol terhadap distribusi material sangat penting untuk mencapai homogenitas yang baik.

Homogenitas campuran adalah faktor penting dalam menentukan kekuatan mekanis beton geopolimer. Penelitian oleh Akçaözöglü et al. (2010) menunjukkan bahwa distribusi yang merata dari partikel plastik PET dalam matriks beton dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban tekan. Namun, apabila distribusinya tidak merata, akan terjadi zona lemah yang dapat menyebabkan retak awal. Oleh karena itu, proses pencampuran yang optimal diperlukan untuk memastikan homogenitas yang baik. Ikatan kimia yang terbentuk dalam beton geopolimer sangat berbeda dari beton konvensional. Geopolimerisasi menghasilkan ikatan aluminosilikat yang kuat, yang memberikan kekuatan mekanis tinggi. Penelitian oleh N. B. Singh (2018) menunjukkan bahwa limbah plastik PET tidak terlibat dalam proses geopolimerisasi, tetapi dapat memengaruhi struktur ikatan dengan bertindak sebagai filler. Apabila filler ini memiliki sifat yang kompatibel dengan matriks geopolimer, nilai kuat tekan dapat meningkat.

Penelitian oleh Uche et al. (2023) membandingkan kuat tekan beton geopolimer dengan beton konvensional. Beton geopolimer dengan limbah plastik PET menunjukkan kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional tanpa limbah plastik. Namun, keunggulan utama beton geopolimer terletak pada ketahanannya terhadap lingkungan ekstrem dan pengurangan emisi karbon selama produksi. Ukuran dan bentuk partikel plastik PET juga memengaruhi kuat tekan. Penelitian oleh Samingthong et al. (2023) menemukan bahwa partikel PET yang lebih kecil dan berbentuk irregular ² memberikan hasil yang lebih baik dalam meningkatkan kuat tekan dibandingkan dengan partikel yang besar dan berbentuk seragam. Hal ini disebabkan oleh kemampuan partikel kecil untuk mengisi ruang kosong dengan lebih efektif.

Rasio air-geopolimer dalam campuran beton juga memengaruhi nilai kuat tekan. Penelitian oleh Ahdal et al. (2022) menunjukkan bahwa rasio air yang terlalu tinggi dapat menurunkan kuat tekan karena meningkatkan porositas. Sementara itu, penambahan plastik PET dalam jumlah kecil dapat membantu mengurangi

kebutuhan air, tetapi apabila jumlahnya berlebihan, justru dapat meningkatkan kebutuhan air dan menurunkan kuat tekan.

Sifat termal dari plastik PET juga dapat memengaruhi perilaku beton geopolimer. Penelitian oleh Orie & Olusesi (2023) menunjukkan bahwa pada suhu tinggi, plastik PET dapat melunak dan menyebabkan perubahan struktur internal beton, yang dapat menurunkan kuat tekan. Namun, pada suhu lingkungan normal, plastik PET dapat memberikan stabilitas tambahan apabila tercampur dengan baik. Durabilitas beton geopolimer sangat penting dalam menentukan penggunaan jangka panjangnya. Penelitian oleh Ramakrishnan & Jegan (2023) menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan limbah plastik PET memiliki durabilitas yang baik terhadap lingkungan agresif seperti air laut dan suhu ekstrem. Durabilitas yang baik dapat membantu mempertahankan nilai kuat tekan selama masa pakai beton.

Penggunaan limbah plastik PET dalam beton geopolimer memiliki implikasi praktis yang signifikan. Penelitian oleh Janfeshan Araghi et al. (2015) menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik dapat mengurangi masalah limbah plastik di lingkungan sekaligus mengurangi ketergantungan pada bahan baku alami. Namun, diperlukan kontrol yang ketat terhadap proporsi plastik dalam campuran untuk memastikan nilai kuat tekan yang optimal. Selain itu, standar baru mungkin perlu dikembangkan untuk mengakomodasi penggunaan limbah plastik dalam beton geopolimer.

Menurut ACI 209R-92, kuat tekan beton dengan fungsi waktu dapat dilihat pada persamaan 4.1 (Abdallhmid et al., 2019).

$$(\sigma)_t = \frac{t}{\alpha + \beta t} (\sigma)_{28} \quad (4.1)$$

Dengan $(\sigma)_t$ = kuat tekan beton umur t hari (MPa), t = umur beton (hari), $(\sigma)_{28}$ = kuat tekan beton pada umur 28 hari, α dan β adalah koefisien hasil regresi.

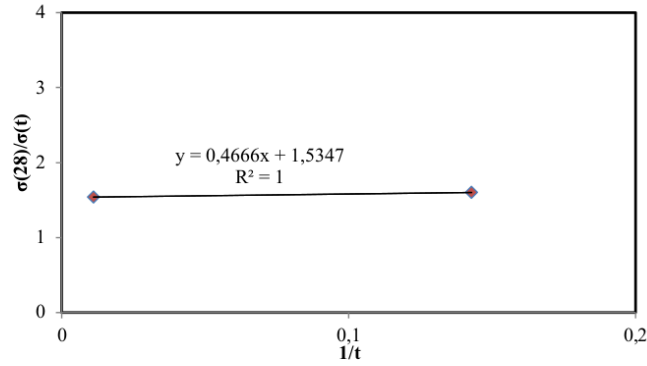
Gambar 5.3 sampai dengan Gambar 5.8 memperlihatkan kurva hubungan rasio kuat tekan dan umur pada beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik PET 0,25%, 0,50%, dan 0,75%. Hubungan persamaan kuat tekan dengan fungsi waktu dapat ditulis seperti pada persamaan 4.2 sampai dengan persamaan 4.5.

$$\sigma_{0\% \text{ PET}} = \sigma_{0\% \text{ PET}}(28) \left(\frac{t}{0,466 + 1,534t} \right) \quad (4.2)$$

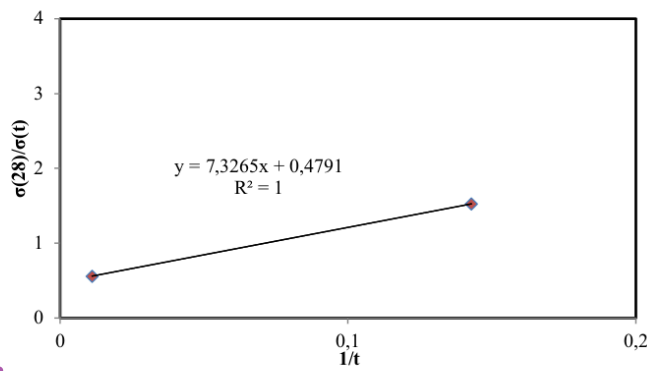
$$\sigma_{0,25\% \text{ PET}} = \sigma_{0,25\% \text{ PET}} (28) \left(\frac{t}{7,326 + 0,479t} \right) \quad (4.3)$$

$$\sigma_{0,50\% \text{ PET}} = \sigma_{0,50\% \text{ PET}} (28) \left(\frac{t}{11,069 + 0,476t} \right) \quad (4.4)$$

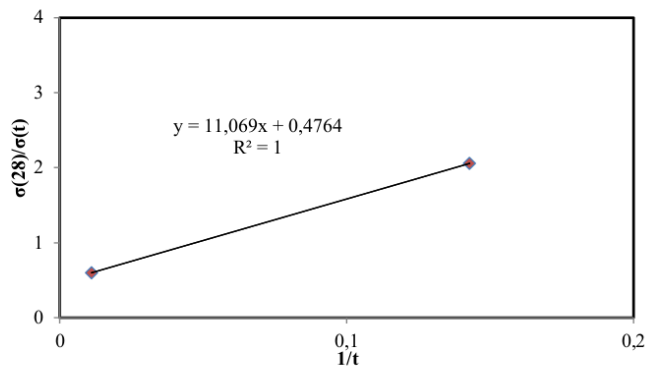
$$\sigma_{0,75\% \text{ PET}} = \sigma_{0,75\% \text{ PET}} (28) \left(\frac{t}{8,920 + 0,857t} \right) \quad (4.5)$$



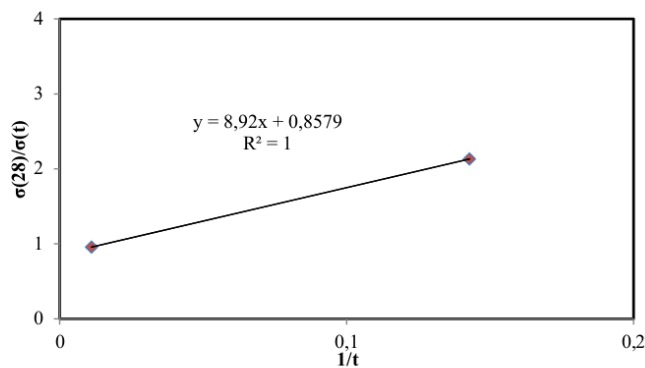
Gambar 5.3 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur tanpa menggunakan limbah plastik



Gambar 5.4 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur dengan 0,25 % limbah plastik



Gambar 5.5 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur dengan 0,50 % limbah plastik

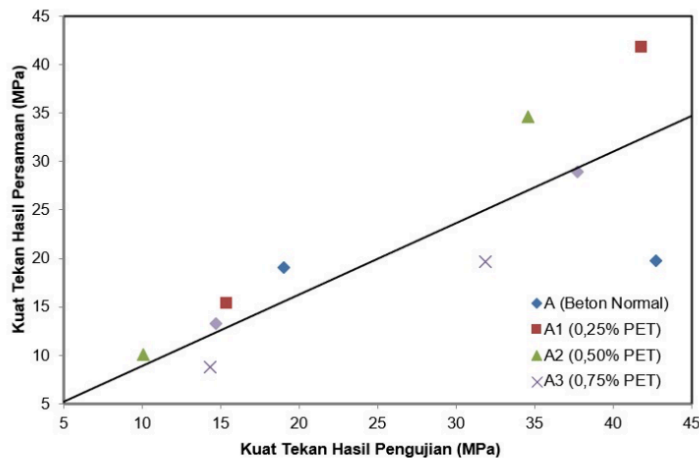


Gambar 5.6 Kurva hubungan perbandingan kuat tekan dan umur dengan 0,75% limbah plastik

Selanjutnya, dilakukan validasi terhadap persamaan 2 hingga persamaan 5 dengan menghitung kuat tekan berdasarkan rumusan ⁴⁹tersebut. Hasil perhitungan ini kemudian dibandingkan dengan nilai kuat tekan yang diperoleh dari pengujian langsung. Perbandingan antara kedua nilai tersebut ditampilkan pada Gambar 5.7. Jika dibandingkan dengan garis *line of equity*, terlihat bahwa beberapa perhitungan kuat tekan menghasilkan nilai yang lebih tinggi dari hasil pengujian (*over estimate*), sementara yang lainnya memberikan hasil yang lebih rendah (*under estimate*). Persamaan tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik 0,75% kuat tekan hasil

hitung menghasilkan nilai *under estimate*, ada yang menyimpang dari garis *line of equity*, kuat tekan dibawah 23 MPa. Selain itu persamaan tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik 0,25% dan 0,50% kuat tekan tidak menyimpang banyak dari garis *line of equity*.

Kuat tekan dan modulus elastisitas memiliki hubungan yang sangat erat dalam menentukan sifat mekanis beton. Secara umum, beton dengan kuat tekan yang lebih tinggi cenderung memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi pula. Hal ini disebabkan oleh struktur beton yang lebih padat dan lebih kaku, yang memungkinkan material untuk lebih tahan terhadap perubahan bentuk atau regangan ketika diberikan beban. Dengan kata lain, beton yang lebih kuat akan lebih tahan terhadap deformasi elastis. Penelitian oleh Ahdal et al. (2022) menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET memiliki kecenderungan untuk menurunkan kuat tekan, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan modulus elastisitas. Hal ini disebabkan oleh sifat plastik yang lebih fleksibel dibandingkan dengan bahan penyusun beton konvensional, yang mengurangi kekakuan material.



Gambar 5.7 Rasio antara kuat tekan hasil pengujian dan persamaan

Struktur internal beton memiliki pengaruh signifikan terhadap hubungan antara kuat tekan dan modulus elastisitas. Komposisi material, kepadatan agregat, serta distribusi dan ukuran pori dalam beton dapat memengaruhi sejauh mana beton

mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen. Beton dengan struktur internal yang lebih padat dan homogen, yang memiliki sedikit porositas, cenderung memiliki kuat tekan yang lebih tinggi serta modulus elastisitas yang lebih besar. Sebaliknya, beton dengan struktur yang lebih berpori atau tidak terorganisir dengan baik akan menunjukkan penurunan pada kedua sifat mekanis tersebut.

Beton geopolimer memiliki ikatan aluminosilikat yang berbeda dengan beton konvensional, yang memberikan kekuatan awal yang baik. Namun, penambahan limbah plastik PET dapat menciptakan zona lemah yang mengurangi kekakuan struktur internal. Penelitian oleh Zhou et al. (2024) menemukan bahwa distribusi partikel PET yang merata dapat membantu mempertahankan modulus elastisitas meskipun terjadi penurunan kuat tekan.

Homogenitas campuran beton geopolimer sangat krusial dalam mempertahankan hubungan yang stabil antara kuat tekan dan modulus elastisitas. Campuran yang tidak homogen dapat menyebabkan distribusi material yang tidak merata, yang berakibat pada ketidakseragaman dalam pengikatan antara komponen beton. Ketidakhomogenan ini dapat mengarah pada distribusi tegangan yang tidak merata ketika beton mengalami pembebanan, yang pada akhirnya mengurangi kapasitas beton untuk menahan deformasi tanpa kerusakan. Hal ini menyebabkan penurunan modulus elastisitas, yang merupakan ukuran ketahanan beton terhadap perubahan bentuk akibat beban eksternal. Sebaliknya, campuran yang lebih homogen akan memastikan tegangan terdistribusi secara merata, meningkatkan performa mekanis beton secara keseluruhan. Penelitian oleh B. Singh et al. (2016) menunjukkan bahwa distribusi partikel plastik yang merata dapat meningkatkan kapasitas beton untuk menahan deformasi elastis, meskipun kuat tekan menurun.

Proporsi limbah plastik PET dalam campuran beton memengaruhi nilai modulus elastisitas. Penelitian oleh Rabadia & Aslani (2023) menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik dalam jumlah kecil dapat meningkatkan modulus elastisitas karena partikel PET berfungsi sebagai filler yang memperkuat struktur beton. Namun, apabila proporsi plastik terlalu tinggi, modulus elastisitas akan menurun karena meningkatnya porositas dan berkurangnya ikatan antara partikel penyusun beton.

Penggunaan beton geopolimer dalam aplikasi perkerasan beton memerlukan perhatian khusus pada hubungan antara kuat tekan dan modulus elastisitas, karena kedua sifat ini sangat mempengaruhi kinerja dan daya tahan jalan terhadap beban lalu lintas. Beton dengan kuat tekan yang tinggi akan mampu menahan beban lebih besar tanpa mengalami kerusakan, sedangkan modulus elastisitas yang tinggi menandakan beton tersebut lebih tahan terhadap deformasi elastis, yang berarti jalan akan tetap stabil meskipun diberi tekanan yang bervariasi. Dalam perkerasan jalan, beton geopolimer yang memiliki kedua sifat ini dengan baik dapat meningkatkan ketahanan terhadap kelelahan material dan perubahan bentuk akibat beban lalu lintas yang terus-menerus. Oleh karena itu, pemahaman tentang hubungan ini sangat penting untuk memastikan umur panjang dan keberlanjutan infrastruktur perkerasan jalan yang terbuat dari beton geopolimer. Beton geopolimer dengan limbah plastik PET dapat digunakan untuk aplikasi ini apabila nilai modulus elastisitas tetap dalam batas yang dapat diterima. Penggunaan limbah plastik PET dalam proporsi yang tepat dan distribusi yang merata dapat berperan penting dalam mempertahankan modulus elastisitas beton geopolimer, yang esensial untuk ketahanan terhadap beban lalu lintas. Plastik PET, yang diintegrasikan dengan baik ke dalam campuran beton, dapat meningkatkan daya tahan terhadap deformasi elastis, memberikan beton kemampuan untuk kembali ke bentuk semula setelah beban diterapkan. Ketika distribusi PET dilakukan secara merata, material ini dapat menyebarkan tegangan lebih efektif, mengurangi kemungkinan terjadinya titik lemah pada beton. Namun, penggunaan limbah plastik PET harus dilakukan dengan hati-hati, karena jika proporsi atau distribusinya tidak tepat, dapat menyebabkan penurunan kekuatan dan modulus elastisitas yang mengarah pada potensi deformasi permanen, yang dapat memengaruhi daya tahan jangka panjang struktur beton geopolimer tersebut. Oleh karena itu, pengujian lanjutan diperlukan untuk memastikan bahwa campuran beton ini memenuhi persyaratan mekanis yang diperlukan untuk perkerasan beton.

5.1.2 Pembahasan Kuat Tarik Beton

Peningkatan nilai kuat tarik belah pada beton geopolimer tanpa menggunakan limbah plastik PET pada umur 28 dan 90 hari terhadap umur 7 hari, masing-masing sebesar 6,90% dan 28,68%, menunjukkan bahwa beton geopolimer cenderung

mengalami peningkatan kinerja mekanik seiring dengan bertambahnya umur. Proses hidrasi yang terus berlangsung pada beton geopolimer, meskipun tidak menggunakan semen Portland, tetap menghasilkan peningkatan kekuatan seiring waktu. Pada umur 28 hari, beton geopolimer tanpa limbah plastik PET menunjukkan peningkatan sebesar 6,90%, yang mencerminkan penguatan yang lebih signifikan dibandingkan dengan umur 7 hari. Sementara itu, pada umur 90 hari, peningkatan yang lebih besar sebesar 28,68% menunjukkan potensi peningkatan kekuatan beton seiring berjalannya waktu, meskipun tidak ada penggunaan bahan tambahan seperti limbah plastik PET. Peningkatan ini dapat dijelaskan oleh proses geopolimerisasi yang berlangsung secara progresif dan lebih matang pada umur yang lebih lama, menghasilkan ikatan yang lebih kuat antara partikel-partikel material yang membentuk struktur beton

Pada benda uji dengan menggunakan 0,25% limbah plastik ²²meningkatkan nilai kuat tarik belah masing-masing sebesar 2,24% dan 33,67%. Peningkatan yang terjadi pada beton geopolimer yang menggunakan 0,50% limbah plastik adalah masing-masing sebesar 20,34% dan 61,79% sedangkan pada benda uji beton geopolimer yang menggunakan 0,75% limbah plastik adalah masing-masing sebesar 12,42% dan 63,68%.

Beton ¹²geopolimer dengan penggunaan limbah plastik ³⁷menyebabkan terjadinya penurunan nilai kuat tarik belah pada setiap variasi umur beton. Gambar 5.8 memperlihatkan kurva hubungan kuat tarik belah dengan umur beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik PET yang cenderung membentuk persamaan linier dan fungsi *power exponential*. Secara umum, kuat tarik belah beton geopolimer cenderung meningkat seiring bertambahnya usia. Ini menunjukkan bahwa proses pengerasan dan penguatan terus berlangsung dalam beton geopolimer.

Material penyusun dalam beton geopolimer sangat mempengaruhi kuat tarik tidak langsung. Beton geopolimer menggunakan bahan pengikat seperti *fly ash* atau RHA yang memiliki karakteristik ikatan aluminosilikat. Penelitian oleh Rashad (2020) menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik PET dalam campuran beton dapat mengurangi nilai kuat tarik tidak langsung apabila tidak tercampur dengan baik, karena plastik cenderung menciptakan zona lemah di dalam beton. Karakteristik fisik seperti densitas dan porositas sangat berperan dalam menentukan

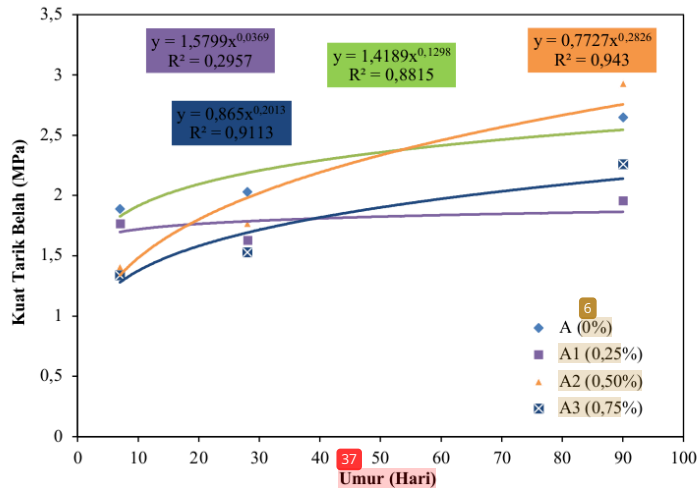
kuat tarik tidak langsung beton geopolimer. Penelitian oleh Nguyen et al. (2023) menemukan bahwa peningkatan porositas akibat penambahan limbah plastik PET dapat menurunkan nilai kuat tarik. Namun, penggunaan partikel PET yang lebih kecil dan bentuk yang tidak beraturan dapat mengurangi porositas dan meningkatkan ikatan internal dalam beton.

Homogenitas campuran beton sangat penting dalam menentukan kuat tarik tidak langsung. Penelitian oleh Szpetulski et al. (2022) menunjukkan bahwa distribusi partikel plastik PET yang merata dalam matriks beton dapat memperbaiki kuat tarik tidak langsung karena mencegah terjadinya zona lemah. Sebaliknya, distribusi yang tidak merata dapat menyebabkan retak mikro yang menurunkan kekuatan tarik. Ikatan kimia dalam beton geopolimer memengaruhi kuat tarik tidak langsung. Proses geopolimerisasi menghasilkan ikatan aluminosilikat yang kuat, tetapi limbah plastik PET tidak terlibat langsung dalam proses tersebut. Menurut penelitian Islam (2022), penambahan PET hanya berfungsi sebagai filler yang memperkuat struktur apabila partikel PET dapat terikat secara mekanis dengan matriks beton.

Rasio air terhadap geopolimer dalam campuran beton berpengaruh signifikan terhadap kuat tarik tidak langsung. Penelitian oleh Kumar et al. (2022) menunjukkan bahwa rasio air yang tinggi dapat meningkatkan porositas dan menurunkan kuat tarik tidak langsung. Penambahan PET dalam jumlah kecil dapat membantu mengurangi kebutuhan air, tetapi apabila digunakan secara berlebihan, dapat meningkatkan porositas dan menurunkan kekuatan tarik.

Ukuran dan bentuk partikel plastik PET memengaruhi kuat tarik tidak langsung beton geopolimer. Penelitian oleh Khalid Ali et al. (2022) menemukan bahwa partikel PET yang lebih kecil dan tidak beraturan lebih efektif dalam meningkatkan kuat tarik tidak langsung karena dapat mengisi ruang kosong dalam matriks beton dengan lebih baik dan mengurangi retakan mikro. Penelitian oleh Thomas et al. (2020) membandingkan ³⁰ kuat tarik tidak langsung antara beton geopolimer dan beton konvensional. Hasilnya menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan limbah plastik PET memiliki nilai kuat tarik tidak langsung yang lebih rendah dibandingkan dengan beton konvensional tanpa limbah plastik. Namun, dengan modifikasi pada ukuran partikel PET dan homogenitas campuran, nilai ini dapat ditingkatkan.

Penggunaan limbah plastik PET dalam beton geopolimer memiliki implikasi praktis yang signifikan dalam upaya mengurangi limbah plastik di lingkungan. Penelitian oleh Khalid Ali et al. (2022) merekomendasikan penggunaan limbah plastik PET sebagai bahan tambahan yang dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap retak mikro. Namun, diperlukan pengaturan yang tepat pada proporsi plastik untuk memastikan nilai kuat tarik tidak langsung yang optimal dan mencegah penurunan kekuatan mekanis beton.



Gambar 5.8 Kurva hubungan kuat tarik belah dengan umur

Dalam analisis regresi untuk menghubungkan hubungan antara umur beton geopolimer dan kuat tarik belah pada berbagai variasi penggunaan limbah plastik PET, dihasilkan persamaan berbentuk kurva power eksponensial. Kurva ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik belah meningkat secara signifikan seiring dengan waktu, namun dengan laju yang lebih lambat pada tahap-tahap berikutnya, yang mana dapat ditulis dan dilakukan pendekatan dengan menggunakan persamaan 4.6 sampai dengan persamaan 4.9.

$$T_{0\% \text{ PET}} = 0,0094x + 1,802 \quad (4.6)$$

$$T_{0,25\% \text{ PET}} = 0,9524x^{0,1611} \quad (4.7)$$

$$T_{0,50\% \text{ PET}} = 1,0484x^{0,1551} \quad (4.8)$$

$$T_{0,75\% \text{ PET}} = 0,0112x + 1,2451 \quad (4.9)$$

5.1.3 Pembahasan Kuat Lentur Beton

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 dan Spesifikasi Khusus Bina Marga SKH.1.5.24 (2023), beton yang digunakan untuk perkerasan jalan harus memiliki nilai kuat lentur yang memadai untuk menahan beban lalu lintas yang berbeda. Adapun nilai kuat lentur yang dibutuhkan sesuai dengan spesifikasi adalah 4,5 MPa untuk jalan dengan lalu lintas padat, 3,8 MPa untuk jalan dengan lalu lintas sedang (jalan kolektor), 3,5 MPa untuk jalan dengan lalu lintas ringan (jalan lokal).

Berdasarkan Gambar 4.15, yang menunjukkan hasil pengujian kuat lentur beton geopolimer dengan variasi penggunaan plastik PET, dapat disimpulkan bahwa meskipun nilai kuat lentur beton geopolimer dengan atau tanpa penambahan plastik PET belum memenuhi nilai standar untuk jalan lalu lintas padat (4,5 MPa), namun pada variasi tertentu, nilai kuat lentur beton geopolimer mendekati standar yang dibutuhkan untuk jalan dengan lalu lintas sedang (3,8 MPa).

Pada umur 90 hari, beton geopolimer dengan variasi A (0% PET) menghasilkan kuat lentur sebesar 3,7 MPa, sedangkan beton geopolimer dengan variasi A1 (0,25% PET) menghasilkan kuat lentur sebesar 3,4 MPa. Kedua nilai ini mendekati standar minimum yang dibutuhkan untuk jalan lalu lintas sedang dan hanya sedikit di bawah nilai minimum yang diharapkan.

Gambar 5.9 menunjukkan kurva hubungan kuat lentur dengan umur beton, di mana kurva ini menggambarkan peningkatan kekuatan lentur seiring bertambahnya umur beton. Meskipun nilai kuat lentur beton geopolimer tidak mencapai nilai minimum untuk jalan lalu lintas padat, data ini menunjukkan potensi penggunaan beton geopolimer dengan limbah plastik PET untuk aplikasi jalan kolektor dengan beberapa perbaikan lebih lanjut pada formulasi campuran beton untuk meningkatkan performa pada umur yang lebih lama.

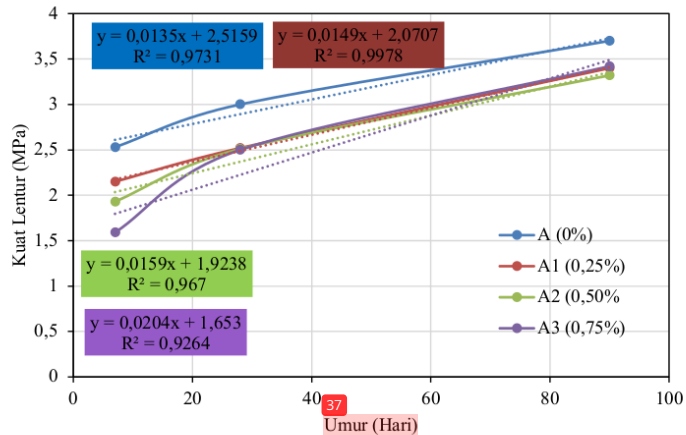
Dengan regresi, kenaikan kuat lentur pada seluruh jenis beton geopolimer yang diuji menunjukkan hubungan linear seiring dengan waktu. Kurva linear ini menggambarkan kecenderungan bahwa seiring bertambahnya umur beton, nilai kuat lentur juga meningkat secara proporsional. Hasil analisis regresi menghasilkan persamaan hubungan kuat lentur untuk setiap variasi penggunaan limbah plastik PET dalam beton geopolimer, yang mana dapat ditulis dengan Persamaan 4.10 sampai dengan Persamaan 4.13.

$$T_{0\% \text{ PET}} = 0,0135x + 2,5159 \quad (4.10)$$

$$T_{0,25\% \text{ PET}} = 0,0149x + 2,0707 \quad (4.11)$$

$$T_{0,50\% \text{ PET}} = 0,0159x + 1,9238 \quad (4.12)$$

$$T_{0,75\% \text{ PET}} = 0,0204x + 1,653 \quad (4.13)$$



Gambar 5.9 Kurva hubungan kuat lentur dengan umur

Grafik yang menunjukkan hubungan antara umur beton dan kuat lentur (MPa) untuk berbagai campuran dengan variasi bahan tambahan memperlihatkan tren umum yang serupa di seluruh sampel beton geopolimer, yaitu peningkatan kuat lentur seiring bertambahnya umur beton. Proses ini dapat dijelaskan dengan beberapa faktor yaitu Reaksi Geopolimerisasi: Seiring waktu, proses geopolimerisasi yang terjadi dalam beton geopolimer semakin berkembang, menghasilkan struktur gel silika-alumina yang semakin padat dan kuat. Gel ini memberikan kekuatan tambahan pada beton, yang tercermin dalam peningkatan kuat lentur seiring bertambahnya umur; Peningkatan Kekompakan Material: Selama periode pengerasan beton, material mengalami pemadatan dan pengikatan yang lebih baik antara partikel fly ash, RHA, dan bahan pengikat alkali. Hal ini meningkatkan kohesi antarpartikel dan pada akhirnya memperbaiki sifat mekanis beton, termasuk kuat lentur; Efek Penambahan Limbah Plastik PET: Meskipun penambahan limbah plastik PET pada beton geopolimer mengurangi kuat lentur secara langsung pada umur awal (7 hari), seiring berjalannya waktu, peningkatan

kuat lentur terlihat pada sampel beton dengan proporsi PET. Ini bisa disebabkan oleh pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan penguat pada matrix beton yang memperkuat struktur internal seiring berjalannya waktu; Efek Umur pada Beton Geopolimer: Umur beton geopolimer memberikan waktu yang cukup bagi proses kimiawi dan fisik untuk mengoptimalkan struktur dan kinerja material, yang memungkinkan beton menjadi semakin kuat dan lebih tahan terhadap deformasi.

Secara keseluruhan, meskipun ada penurunan kekuatan pada campuran dengan PET dibandingkan dengan campuran tanpa PET, tren peningkatan kuat lentur dengan bertambahnya umur menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki potensi yang cukup besar untuk digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan peningkatan kekuatan seiring waktu, seperti untuk jalan dan struktur lainnya. Campuran dengan 0,75% bahan tambahan (A3) memiliki gradien tertinggi dalam persamaan regresinya, menunjukkan bahwa peningkatan kuat lenturnya lebih cepat dibandingkan campuran lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan bahan tertentu dapat meningkatkan daya tahan beton terhadap beban lentur, yang merupakan salah satu faktor penting dalam pemilihan material untuk konstruksi infrastruktur seperti jalan raya.

Penelitian mengenai beton geopolimer berbahan *fly ash* dan RHA yang ditambahkan limbah plastik PET dalam variasi 0,25%, 0,50%, dan 0,75% meskipun belum menunjukkan hasil yang signifikan dalam meningkatkan sifat mekanis beton. Penggunaan material limbah ini tidak hanya memberikan solusi atas permasalahan limbah plastik, tetapi juga memperkuat beton geopolimer yang ramah lingkungan, khususnya untuk aplikasi perkerasan jalan beton atau *rigid pavement*.

Beton geopolimer dengan limbah plastik PET belum menunjukkan peningkatan dalam kuat lentur (*flexural strength*). Ketahanan terhadap beban lentur sangat penting dalam aplikasi jalan beton, di mana perkerasan menerima beban berulang dari kendaraan. Penelitian oleh Abu-Saleem et al. (2021) menunjukkan bahwa penambahan serat plastik dalam campuran beton meningkatkan modulus patah (*modulus of rupture*), yang berarti beton menjadi lebih tahan terhadap retakan dan kegagalan struktural.

Kuat lentur merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan performa beton yang digunakan pada perkerasan beton. Perkerasan beton memerlukan beton yang mampu menahan beban lentur akibat lalu lintas kendaraan

berat serta perubahan suhu. Penelitian menunjukkan bahwa material penyusun beton geopolimer, seperti *fly ash* dan RHA, memberikan kontribusi terhadap nilai kuat lentur. Penambahan limbah plastik PET berfungsi sebagai serat yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak apabila tercampur secara merata. Namun, apabila partikel plastik tidak homogen, dapat terjadi zona lemah yang menurunkan nilai kuat lentur. Penelitian oleh (Jiang et al., 2022) menemukan bahwa penggunaan partikel PET yang lebih kecil dan tidak beraturan dapat meningkatkan nilai kuat lentur pada beton geopolimer.

Ikatan yang terbentuk dalam beton geopolimer dengan limbah plastik PET mempengaruhi mekanisme perpindahan beban. Proses geopolimerisasi menghasilkan ikatan kimia yang kuat antara partikel penyusun beton. Limbah plastik PET berperan sebagai pengisi ruang kosong dalam matriks beton, yang dapat mengurangi konsentrasi tegangan di sekitar retak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik hingga proporsi tertentu dapat meningkatkan kemampuan beton menahan beban lentur sebelum terjadi kegagalan struktural. Dibandingkan dengan beton konvensional, beton geopolimer dengan limbah plastik PET menunjukkan performa yang kompetitif dalam pengujian kuat lentur. Menurut penelitian oleh Alqahtani (2021), beton geopolimer memiliki keunggulan dalam hal ketahanan terhadap lingkungan agresif seperti korosi dan perubahan suhu yang ekstrem. Aplikasi pada perkerasan beton akan lebih efektif apabila menggunakan beton geopolimer dengan komposisi yang tepat, karena dapat mengurangi biaya pemeliharaan dan memperpanjang umur layanan jalan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET memiliki potensi untuk diaplikasikan pada perkerasan beton dengan beberapa rekomendasi. Pertama, diperlukan optimasi proporsi limbah plastik PET untuk menjaga keseimbangan antara kekuatan dan durabilitas. Kedua, proses pencampuran harus memastikan distribusi partikel yang merata untuk menghindari zona lemah. Ketiga, pengujian lanjutan pada skala lapangan perlu dilakukan untuk mengukur performa beton geopolimer dalam kondisi nyata, seperti beban kendaraan dan perubahan cuaca. Dengan implementasi yang tepat, beton geopolimer ini dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk konstruksi perkerasan beton.

Aplikasi pada perkerasan beton, beton geopolimer dengan komposisi penambahan limbah plastik PET yang tepat memiliki beberapa keunggulan. Kekuatan tekan yang tinggi, ketahanan terhadap retak, serta ketahanan terhadap air dan bahan kimia membuatnya sangat cocok untuk digunakan pada perkerasan jalan yang menghadapi beban lalu lintas berat dan kondisi lingkungan yang menantang. Selain itu, beton jenis ini juga memiliki potensi umur layanan yang lebih panjang dibandingkan beton konvensional, yang berarti biaya pemeliharaan jalan dapat dikurangi dalam jangka panjang.

Dalam konteks pemanfaatannya sebagai perkerasan beton di Indonesia, beton dengan kuat lentur tinggi sangat diperlukan untuk menopang beban lalu lintas yang berat, terutama pada jalan-jalan dengan volume kendaraan tinggi. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 1732 (2022), perkerasan beton semen direkomendasikan untuk jalan dengan lalu lintas harian rata-rata (LHR) di atas 20.000 kendaraan/hari, termasuk jalan arteri dan jalan nasional. Berdasarkan gambar 5.3 campuran A3 (0,75%) menunjukkan peningkatan kuat lentur paling signifikan secara umur beton.

Selain itu, ketahanan terhadap beban berulang dan retak menjadi faktor krusial dalam perkerasan beton. Dengan meningkatnya kuat lentur beton pada campuran tertentu, kemungkinan terjadinya retak akibat beban lalu lintas dapat berkurang, yang pada akhirnya memperpanjang umur layanan jalan dan mengurangi biaya pemeliharaan. Apabila hasil penelitian ini dikembangkan lebih lanjut dan diuji sesuai dengan kondisi iklim serta beban lalu lintas di Indonesia, maka pemanfaatannya dapat meningkatkan kualitas infrastruktur jalan, mendukung mobilitas yang lebih baik, dan mengurangi biaya perbaikan jalan dalam jangka panjang.

Berdasarkan aspek keberlanjutan, dengan potensi aplikasinya pada jalan beton, beton geopolimer dengan limbah plastik PET dapat menjadi solusi inovatif dan ramah lingkungan. penggunaan *fly ash* dan RHA sebagai bahan utama beton geopolimer mengurangi ketergantungan pada semen Portland, yang merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi karbon dioksida dalam industri konstruksi. Dengan memanfaatkan limbah plastik PET, penelitian ini juga membantu mengurangi volume limbah plastik yang sulit terurai di lingkungan. Dalam konteks pembangunan infrastruktur jalan, penggunaan beton geopolimer dengan bahan

tambah limbah plastik dapat menjadi solusi hijau yang mendukung konsep pembangunan berkelanjutan.

5.1.4 Hubungan Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas

Penggunaan limbah plastik pada variasi beton geopolimer menyebabkan terjadinya penurunan nilai kuat tekan. Tabel 5.1 memperlihatkan hasil perhitungan modulus elastisitas benda uji beton geopolimer tanpa dan dengan menggunakan limbah plastik PET pada umur 28 hari. Hasil perhitungan menunjukkan perbandingan rata-rata nilai modulus elastisitas beton menggunakan tiga pendekatan persamaan secara empiris dan eksperimental. Persamaan ASTM C496-96 (2004) – 02 yaitu $E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050}$ dihitung berdasarkan pendekatan eksperimental. Sedangkan ACI 318M-19 nilai modulus elastisitas dihitung berdasarkan pendekatan empiris, yaitu nilai kuat tekan beton dan berat beton, yang dituliskan sebagai $E(1a) = 4700\sqrt{f'c}$ dan $E(1b) = wc^{1,5} \times 0,043\sqrt{f'c}$, dimana $f'c$ menyatakan kuat tekan beton (MPa) dan wc adalah berat satuan beton (kg/m^3). Secara eksperimen, nilai modulus elastisitas cukup rendah, hal ini disebabkan oleh sifat beton geopolimer yang *brittle*. Selain itu, struktur gel silika-alumina yang terbentuk pada beton geopolimer memiliki sifat yang berbeda dengan struktur kristal pada semen portland, yang mana struktur gel ini cenderung lebih fleksibel dan kurang kaku. Oleh karena itu, nilai modulus elastisitas tidak dapat didekati secara empiris berdasarkan ACI 318M-19 karena memberikan nilai yang sangat besar.

Perbedaan antara nilai modulus elastisitas beton geopolimer yang diperoleh secara eksperimen dan melalui pendekatan empiris menggunakan persamaan *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete* (1967) merupakan fenomena yang cukup umum ditemui. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Persamaan ACI 318M-19 umumnya dikembangkan berdasarkan data eksperimen beton konvensional yang menggunakan semen Portland sebagai pengikat utama. Beton geopolimer memiliki matriks pengikat yang berbeda (gel silika-alumina), sehingga asumsi yang digunakan dalam persamaan tersebut tidak sepenuhnya berlaku.
- Persamaan ACI 318M-19 tidak memperhitungkan secara spesifik pengaruh struktur mikro beton yang kompleks, seperti distribusi pori, ukuran partikel,

dan tingkat hidrasi. Struktur mikro beton geopolimer yang unik dapat menyebabkan perilaku mekanik yang berbeda.

- c. Beton geopolimer dapat menunjukkan perilaku viskoelastis, di mana modulus elastisitasnya dapat berubah seiring waktu dan dengan laju pembebanan. Persamaan ACI 318M-19 umumnya diasumsikan untuk bahan elastis linear.

Tabel 5.1 Modulus Elastisitas

Variasi	Kode Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)		
			ASTM C469-02	ACI 318M-19 (1a)	ASTM C469-02 (1b)
0% PET	A1	25,60	17842,34	23781,72	24841,97
	A2	32,64	13220,43	26853,83	27766,84
	A3	31,27	16949,12	26280,94	27396,91
	Rata-rata	29,84	15883,96	25673,36	26709,15
0,25% PET	A11	19,45	5890,67	20729,08	21609,30
	A12	17,20	6248,93	19493,95	19828,10
	A13	22,76	10081,59	22422,99	23232,75
	Rata-rata	19,80	7407,07	20916,32	21583,28
0,50% PET	A21	13,43	8367,52	17222,15	17807,69
	A22	20,05	6733,02	21043,20	20700,24
	A23	16,93	4392,98	19336,27	19587,18
	Rata-rata	16,80	6497,84	19264,27	19459,68
0,75% PET	A31	18,12	9674,24	20004,00	20811,07
	A32	19,60	10016,27	20807,79	21295,77
	A33	30,82	15625,65	26092,83	26979,97
	Rata-rata	18,86	9845,26	20405,90	21060,66

5.1.5 Hubungan Sifat Mekanik Beton Geopolimer, Umur dan Persentase Limbah Plastik

Penelitian tentang beton geopolimer berbahan *fly ash* dan RHA dengan penambahan limbah plastik PET dalam berbagai persentase (0,25%, 0,50%, dan 0,75%) menunjukkan bahwa sifat mekanik beton, seperti kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur, berkembang seiring dengan bertambahnya umur beton (7, 28, dan 90 hari). Kinerja mekanik beton geopolimer ini dipengaruhi oleh reaksi geopolimerisasi serta distribusi serat plastik PET dalam campuran beton.

Pada umur 7 hari, beton geopolimer menunjukkan perkembangan kuat tekan yang cukup signifikan, terutama pada variasi 0,25% limbah plastik PET. Penelitian oleh Rangan (2008) menunjukkan bahwa beton geopolimer cenderung mengalami perkembangan kuat tekan yang lebih cepat dibandingkan beton konvensional

karena proses polimerisasi yang intensif dalam 7 hari pertama. Namun, pada persentase 0,50% dan 0,75%, terjadi penurunan kuat tekan akibat distribusi serat yang kurang merata dan kecenderungan aglomerasi serat plastik.

Umur 28 hari, beton dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET menunjukkan peningkatan kuat tekan yang paling stabil dibandingkan variasi lainnya. Hasil penelitian oleh Rabadia & Aslani (2023) mendukung temuan ini, di mana penggunaan serat plastik dalam jumlah moderat dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap retak mikro, yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan tekan. Sementara itu, beton dengan 0,75% PET menunjukkan peningkatan yang baik, tetapi sedikit lebih rendah dibandingkan 0,25%, sedangkan pada 0,50%, kuat tekan kembali menurun akibat kurang optimalnya ikatan antara serat plastik dan matriks geopolimer.

Kuat tarik belah dan kuat lentur beton juga menunjukkan hubungan yang serupa dengan umur dan persentase limbah plastik. Pada umur 28 hari, variasi 0,25% PET memberikan hasil yang terbaik dalam hal kuat tarik belah dan kuat lentur. Penelitian oleh Lazorenko et al. (2022) menemukan bahwa serat plastik PET yang didistribusikan secara merata dalam campuran beton dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap gaya tarik dan lentur. Pada umur 90 hari, beton dengan 0,25% PET tetap menunjukkan performa yang stabil, dengan peningkatan signifikan dalam ketahanan terhadap beban lentur.

Perspektif *Life Cycle Assessment (LCA)* dan *embodied carbon*, penggunaan limbah plastik PET dalam beton geopolimer memberikan manfaat lingkungan yang signifikan. Dengan mengurangi penggunaan semen Portland dan memanfaatkan limbah plastik, beton geopolimer memiliki jejak karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Penelitian oleh Passuello et al. (2015) menyatakan bahwa beton geopolimer dapat mengurangi emisi karbon hingga 80% dibandingkan dengan beton berbasis semen Portland. Penambahan limbah plastik PET dalam jumlah yang optimal, seperti 0,25%, dapat lebih mengurangi embodied carbon tanpa mengorbankan kinerja mekanik beton.

Penggunaan limbah plastik PET pada kadar 0,25% juga memberikan keseimbangan terbaik antara kinerja mekanik dan keberlanjutan lingkungan. Penelitian oleh Abu-Saleem et al. (2021) menunjukkan bahwa penambahan serat plastik dalam jumlah yang moderat dapat meningkatkan ketahanan jangka panjang

beton, yang berarti umur layanan beton dapat diperpanjang, sehingga mengurangi kebutuhan akan perbaikan dan pemeliharaan. Kesimpulannya, variasi 0,25% limbah plastik PET memberikan hasil terbaik dalam hal kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton geopolimer, terutama pada umur 28 dan 90 hari. Selain itu, dari segi LCA dan *embodied carbon*, variasi ini juga memberikan manfaat lingkungan yang signifikan dengan mengurangi jejak karbon. Oleh karena itu, penggunaan 0,25% limbah plastik PET pada beton geopolimer dapat dianggap sebagai pilihan optimal untuk aplikasi infrastruktur yang berkelanjutan.

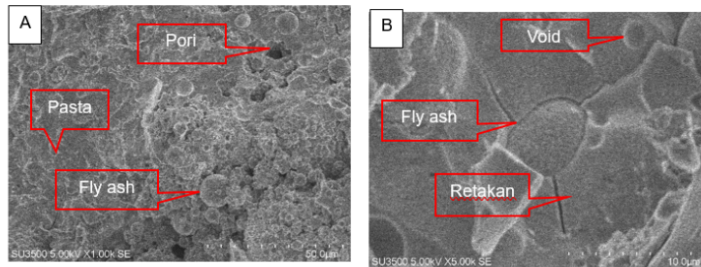
Pola retak yang terjadi pada beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET juga menunjukkan perbedaan signifikan dibandingkan beton tanpa tambahan serat. Gambar 4.16 menunjukkan pola retak pada beton geopolimer dengan variasi 0; 0,25; 0,50 dan 0,75%. Beton geopolimer dengan 0,25% limbah plastik PET menunjukkan pola retak yang lebih halus dan terdistribusi merata, yang mengindikasikan adanya ketahanan yang lebih baik terhadap propagasi retak. Penelitian oleh Boko (2021) menunjukkan bahwa serat plastik dalam beton geopolimer dapat bertindak sebagai jembatan yang menghambat perkembangan retak mikro menjadi retak makro, sehingga meningkatkan durabilitas struktur.

Variasi 0,50%, pola retak mulai menunjukkan karakteristik retak yang lebih besar tetapi masih dalam batas toleransi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan serat plastik yang lebih tinggi memberikan efek positif hingga titik tertentu, tetapi distribusi serat yang tidak merata dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada beberapa titik, yang akhirnya mempercepat pembentukan retak. Hasil penelitian oleh Arunaditya P Singh (2020) mengonfirmasi bahwa distribusi serat yang seragam sangat penting dalam mengoptimalkan ketahanan beton terhadap retak.

Sebaliknya, pada variasi 0,75%, pola retak yang terbentuk cenderung lebih besar dan terkonsentrasi di beberapa area, yang menunjukkan bahwa penambahan serat plastik yang berlebihan dapat mengurangi kemampuan beton untuk mendistribusikan tegangan secara merata. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Habert et al. (2011), yang menemukan bahwa jumlah serat yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aglomerasi, mengurangi ikatan antar partikel dalam beton, dan meningkatkan risiko retak lokal. Oleh karena itu, penambahan limbah plastik PET sebesar 0,25% tetap menjadi pilihan terbaik untuk meminimalkan pola retak dan meningkatkan durabilitas beton geopolimer.

5.2 Analisis Pengujian Semi Kuantitatif Beton Geopolimer

Analisis morfologi permukaan geopolimer berdasarkan citra SEM dengan kadar limbah plastik 0,25% yang diperlihatkan pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Morfologi permukaan geopolimer berdasarkan citra SEM

Citra SEM yang ditunjukkan pada Gambar 5.10 memperlihatkan morfologi permukaan geopolimer pada magnifikasi yang berbeda. Gambar (a) tampak bahwa permukaan geopolimer terdiri atas fasa pasta geopolimer yang cukup homogen, dan partikel *fly ash* yang tidak bereaksi secara sempurna. Hal ini disebabkan oleh kuantitas larutan alkali yang tidak cukup untuk melarutkan seluruh partikel *fly ash* dari bahan dasar pada saat proses polimerisasi berlangsung. Tampak pula permukaan geopolimer yang terdiri atas banyak mesopori yang secara umum disebabkan oleh penguapan air reaksi pada saat sampel melewati tahap kondensasi. Penguapan air yang terlalu cepat dari dalam sampel akan meninggalkan jejak panjang dan membentuk pori dari ukuran mikro hingga meso, bahkan makropori. Gambar (b) memperlihatkan permukaan sampel pada perbesaran yang lebih tinggi. Tampak dengan jelas partikel *fly ash* yang masih mempertahankan bentuk sferisnya dan dikelilingi dengan retakan mikro membentang dengan panjang mencapai 10 µm atau lebih. Selain itu, tampak pula sejumlah kantong udara pada permukaan geopolimer. Kantong-kantong udara tersebut dipandang sebagai cacat permukaan (*void*) yang terbentuk pada saat sampel mengalami agitasi atau vibrasi dalam rangka pemadatan matriks geopolimer.

Hasil pemeriksaan morfologi permukaan beton geopolimer dengan menggunakan citra SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada variasi 0,25% limbah plastik PET menunjukkan struktur yang lebih homogen dengan distribusi pori yang lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa tambahan serat. Struktur ini

menunjukkan bahwa serat plastik PET berperan dalam mengisi rongga mikro dalam matriks geopolimer, yang dapat meningkatkan densitas dan mengurangi porositas beton. Penelitian oleh (Arifin & Sanwani, 2023) menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan densitas yang lebih tinggi memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi air dan ion berbahaya, yang penting untuk meningkatkan durabilitas jangka panjang.

Berdasarkan citra SEM, permukaan beton dengan 0,25% limbah plastik PET juga menunjukkan adanya interaksi yang baik antara serat plastik dan matriks geopolimer. Serat plastik terlihat tertanam dalam matriks tanpa adanya celah besar, yang menunjukkan ikatan yang kuat antara kedua material tersebut. Penelitian oleh Szpetulski et al. (2022) menemukan bahwa interaksi yang baik antara serat plastik dan matriks geopolimer dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap retak mikro, yang penting untuk aplikasi infrastruktur seperti jalan beton yang menerima beban dinamis secara terus-menerus.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu, hasil citra SEM ini konsisten dengan temuan oleh Zhou et al. (2024), yang menunjukkan bahwa penggunaan serat plastik dalam jumlah moderat dapat mengurangi porositas dan meningkatkan ikatan antar partikel dalam beton geopolimer. Penambahan limbah plastik PET dalam jumlah 0,25% terbukti memberikan hasil terbaik dalam menciptakan struktur beton yang lebih padat dan tahan terhadap kerusakan mekanis. Oleh karena itu, penggunaan 0,25% limbah plastik PET dalam beton geopolimer dapat dianggap sebagai solusi optimal untuk meningkatkan performa mekanis dan durabilitas beton pada aplikasi konstruksi yang berkelanjutan.

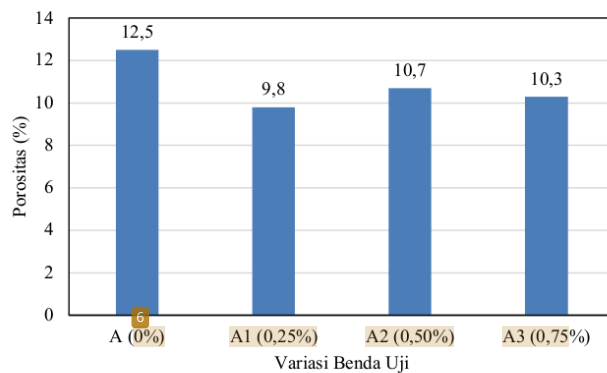
5.3 Pembahasan Sifat Durabilitas Beton

5.3.1 Pembahasan Porositas Beton

Porositas yang lebih rendah pada beton geopolimer disebabkan oleh reaksi kimia antara bahan pembentuk geopolimer seperti *fly ash*, metakaolin, atau slag dengan aktivator alkali, menghasilkan produk hidrat dengan ikatan yang lebih kuat. Duxson et al. (2007) menyatakan bahwa beton geopolimer memiliki densitas yang lebih tinggi dibandingkan beton Portland, yang berkontribusi pada pengurangan porositas. Selain itu, penambahan PET, yang bersifat inert dan non-higroskopik,

membantu mengurangi jalur kapiler yang memungkinkan masuknya cairan dan ion-ion agresif.

Pengujian porositas menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan tambahan PET memiliki porositas lebih rendah dibandingkan beton normal. Variasi A3 dengan 0,75% PET memberikan hasil terbaik dalam mengurangi porositas, menjadikannya lebih tahan terhadap penetrasi cairan dan ion-ion kimia. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memastikan bahwa penambahan PET dalam jumlah besar tidak memengaruhi kekuatan tekan atau sifat mekanis lainnya. Perlu dilakukan pengujian jangka panjang untuk mengevaluasi pengaruh porositas terhadap sifat durabilitas beton, seperti ketahanan terhadap siklus pembekuan-pencairan, penetrasi klorida, dan serangan sulfat. Selain itu, kombinasi material tambahan lain dapat dipertimbangkan untuk lebih meningkatkan performa beton geopolimer. Dengan peningkatan performa ini tentunya dapat berimplikasi pada pemanfaatan beton geopolimer pada konstruksi jalan. Gambar 5.13 memperlihatkan hasil pengujian porositas beton geopolimer.



Gambar 5.11 Kurva hubungan variasi benda uji dengan porositas

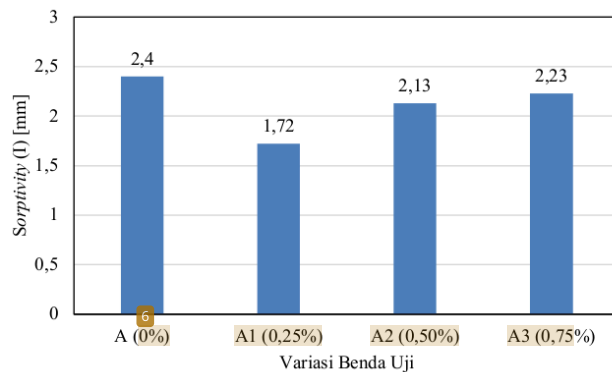
Gambar 5.11 menunjukkan nilai porositas (%) dari berbagai variasi benda uji beton geopolimer, yaitu A (0%), A1 (0,25%), A2 (0,50%), dan A3 (0,75%). Porositas merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kepadatan dan ketahanan beton terhadap penetrasi air serta zat agresif seperti ion klorida. Semakin rendah nilai porositas, semakin padat struktur beton, sehingga ketahanannya terhadap infiltrasi air dan bahan kimia semakin baik.

Berdasarkan grafik, beton tanpa tambahan limbah plastik PET (A 0%) memiliki porositas tertinggi, yaitu 12,5%, yang menunjukkan bahwa beton ini memiliki lebih banyak rongga atau celah dalam strukturnya, sehingga lebih rentan terhadap serapan air dan penetrasi klorida. Dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET (A1), nilai porositas turun signifikan menjadi 9,8%, menandakan bahwa plastik PET dalam jumlah kecil mampu meningkatkan kepadatan beton dengan mengisi rongga-rongga mikro. Namun, ketika jumlah limbah plastik ditingkatkan menjadi 0,50% (A2) dan 0,75% (A3), nilai porositas kembali meningkat menjadi 10,7% dan 10,3%, yang menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik dalam jumlah lebih tinggi dapat menciptakan rongga mikro baru akibat kurangnya ikatan sempurna antara partikel beton dan agregat plastik. Hasil ini selaras dengan uji *sorptivity* dan penetrasi klorida, di mana variasi A1 (0,25%) memiliki nilai terbaik dalam mengurangi daya serap air dan penetrasi klorida. Dengan demikian, penambahan 0,25% limbah plastik PET merupakan komposisi yang paling optimal untuk meningkatkan kepadatan beton, mengurangi porositas, serta meningkatkan ketahanannya terhadap lingkungan agresif. Dalam konteks perkerasan beton untuk jalan raya, beton dengan porositas rendah lebih tahan terhadap penetrasi air dan ion klorida, sehingga dapat memperpanjang umur layan jalan, terutama di daerah dengan curah hujan tinggi atau dekat dengan lingkungan yang mengandung klorida (misalnya daerah pesisir). Namun, apabila kandungan plastik terlalu tinggi ($\geq 0,50\%$), kepadatan beton dapat menurun kembali, sehingga komposisi material perlu dioptimalkan agar tetap memenuhi standar ketahanan yang diperlukan.

5.3.2 Pembahasan *Sorptivity* Beton

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan PET ke dalam beton geopolimer secara signifikan mengurangi nilai *sorptivity*, meningkatkan ketahanan beton terhadap serapan air. Nilai *sorptivity* menurun seiring dengan meningkatnya persentase PET dalam beton geopolimer. Beton geopolimer dengan 0,25% PET (A1) memberikan hasil terbaik dalam hal pengurangan penyerapan air. Penemuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Choi et al. (2005) dan Saikia & Brito (2014), yang menyatakan bahwa bahan tambahan plastik seperti PET dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap permeabilitas air dengan

mengurangi porositas kapiler. Penerapan aplikasi lapangan untuk persentase PET sebesar 0,25% hingga 0,50% direkomendasikan untuk beton geopolimer dalam struktur yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap serapan air. Namun, perlu diperhatikan bahwa terlalu banyak PET dalam campuran beton dapat mempengaruhi sifat mekanis beton, seperti kuat tekan, sebagaimana dinyatakan oleh Ismail et al. (2016). Oleh karena itu, optimalisasi proporsi PET penting untuk keseimbangan antara ketahanan *sorptivity* dan kekuatan mekanis. Gambar 5.11 memperlihatkan hasil pengujian *sorptivity* beton geopolimer.



Gambar 5.12 Kurva hubungan variasi benda uji dengan *sorptivity*

Gambar 5.12 menunjukkan nilai *sorptivity* (I) dalam mm untuk berbagai variasi benda uji beton geopolimer, yaitu A (0%), A1 (0,25%), A2 (0,50%), dan A3 (0,75%). Sorptivity adalah parameter yang menunjukkan kemampuan beton dalam menyerap air melalui kapilaritas. Nilai *sorptivity* yang lebih rendah mengindikasikan beton yang lebih padat dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi air dan zat kimia.

Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa benda uji A (0%) memiliki nilai *sorptivity* tertinggi, yaitu 2,4 mm, yang menunjukkan bahwa beton tanpa tambahan limbah plastik PET memiliki porositas yang lebih tinggi, sehingga lebih mudah menyerap air. Penurunan signifikan terjadi pada A1 (0,25%) dengan nilai 1,72 mm, yang menunjukkan bahwa penambahan 0,25% limbah plastik PET meningkatkan kepadatan beton dan mengurangi penyerapan air. Namun, pada A2 (0,50%) dan A3 (0,75%), nilai *sorptivity* kembali meningkat menjadi 2,13 mm dan 2,23 mm,

meskipun masih lebih rendah dibandingkan A (0%). Hal ini dapat disebabkan oleh distribusi limbah plastik PET yang pada konsentrasi lebih tinggi mulai membentuk rongga kecil dalam beton, sehingga meningkatkan kembali porositasnya.

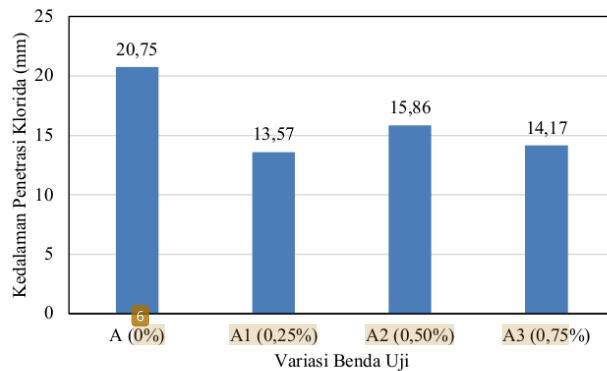
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik PET dalam jumlah kecil (0,25%) dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air, yang sangat penting untuk perkerasan beton di jalan raya guna mengurangi risiko kerusakan akibat infiltrasi air. Namun, pada kadar yang lebih tinggi ($\geq 0,50\%$), efek peningkatan kepadatan tidak berlanjut secara linier, dan sorptivity mulai meningkat kembali. Oleh karena itu, dalam aplikasi perkerasan jalan, perlu dilakukan optimasi komposisi agar mendapatkan keseimbangan antara kuat tekan, daya tahan air, dan durabilitas.

5.3.3 Pembahasan Penetrasi Klorida Beton

Studi oleh Alaneme et al. (2023) mencatat bahwa beton geopolimer cenderung memiliki daya tahan lebih baik terhadap penetrasi klorida karena ikatan kimiawi produk geopolimer yang stabil dan mikrostruktur yang lebih rapat. Hasil penelitian ini sejalan dengan literatur yang menyebutkan bahwa beton geopolimer memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap ion klorida dibandingkan beton berbasis semen portland. Menurut Khalid Ali et al. (2022), beton geopolimer menghasilkan struktur ikatan yang stabil secara kimiawi, dengan produk hidrasi berbasis aluminosilikat yang lebih tahan terhadap serangan kimia dibandingkan produk kalsium hidrat pada beton konvensional. Selain itu Abdalhmied et al. (2019) melaporkan bahwa beton geopolimer dengan bahan tambahan tertentu seperti PET atau bahan lain yang bersifat inert dapat mengurangi jalur difusi ion klorida melalui pengisian pori-pori mikro.

Beton geopolimer dengan variasi PET memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi klorida dibandingkan beton normal. Variasi A3 (0,75% PET) memiliki performa terbaik dalam menghambat penetrasi klorida, tetapi tetap diperlukan evaluasi untuk memastikan kekuatan mekanisnya. Penggunaan beton geopolimer dengan PET sangat cocok untuk aplikasi di lingkungan yang agresif, seperti infrastruktur pantai dan pelabuhan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi ketahanan jangka panjang terhadap klorida, termasuk pengaruh siklus basah-kering dan interaksi dengan bahan kimia lain seperti sulfat. Selain itu,

proporsi optimal PET perlu diselidiki untuk memaksimalkan kinerja beton geopolimer tanpa mengorbankan sifat mekanisnya. Gambar 5.12 memperlihatkan hasil pengujian kedalaman penetrasi klorida beton geopolimer.



Gambar 5.13 Kurva hubungan variasi benda uji dengan kedalaman penetrasi klorida

Gambar 5.13 menunjukkan kedalaman penetrasi klorida (mm) untuk berbagai variasi benda uji beton geopolimer, yaitu A (0%), A1 (0,25%), A2 (0,50%), dan A3 (0,75%). Kedalaman penetrasi klorida merupakan parameter penting dalam menilai ketahanan beton terhadap serangan klorida yang dapat menyebabkan korosi pada tulangan baja di dalam beton. Semakin kecil nilai penetrasi klorida, semakin baik daya tahan beton terhadap lingkungan yang agresif, seperti di daerah pesisir atau jalan raya yang sering terkena cipratan air laut dan bahan kimia *de-icing*.

Hasil menunjukkan bahwa beton tanpa tambahan limbah plastik PET (A 0%) memiliki kedalaman penetrasi klorida tertinggi, yaitu 20,75 mm, yang mengindikasikan bahwa beton ini lebih rentan terhadap serangan penetrasi klorida. Penambahan 0,25% limbah plastik PET (A1) menunjukkan nilai kedalaman penetrasi klorida menurun drastis menjadi 13,57 mm, menunjukkan peningkatan ketahanan beton terhadap klorida karena berkurangnya porositas material. Namun, ketika kandungan limbah plastik PET ditingkatkan menjadi 0,50% (A2) dan 0,75% (A3), kedalaman penetrasi klorida sedikit meningkat kembali menjadi 15,86 mm dan 14,17 mm. Hal ini dapat disebabkan oleh peningkatan jumlah plastik yang

mungkin mengganggu ikatan antar partikel geopolimer, menciptakan mikro-rongga yang memungkinkan difusi ion klorida ke dalam beton.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan 0,25% limbah plastik PET memberikan efek paling optimal dalam meningkatkan ketahanan beton geopolimer terhadap penetrasi klorida. Hal ini sangat penting untuk aplikasi perkerasan beton di jalan raya, terutama di daerah pesisir atau yang sering terpapar air hujan dan bahan kimia, karena dapat memperpanjang umur layanan beton serta mengurangi risiko korosi pada tulangan baja di dalamnya. Namun, apabila kandungan limbah plastik terlalu tinggi ($\geq 0,50\%$), ketahanan terhadap klorida mulai menurun, sehingga perlu adanya optimasi dalam pemilihan komposisi material yang tepat.

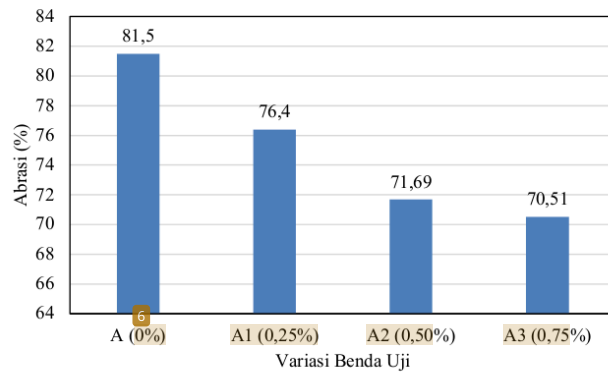
5.3.4 Pembahasan Ketahanan Abrasi

Ketahanan abrasi pada beton geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk densitas matriks, kualitas ikatan antar partikel, dan distribusi ruang kosong. Menurut penelitian Alaneme et al. (2023), reaksi geopolimerisasi menghasilkan produk hidrat dengan ikatan yang lebih kuat dibandingkan produk hidrasi semen Portland, yang meningkatkan resistensi terhadap abrasi. Selain itu, penambahan bahan daur ulang seperti PET membantu memperkuat struktur mikro beton dengan mengurangi ruang antar partikel dan meningkatkan distribusi beban saat terjadi abrasi.

Pengujian abrasi menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan penambahan PET memiliki ketahanan abrasi yang lebih baik dibandingkan beton normal. Variasi A3 dengan 0,75% PET memberikan ketahanan terbaik, menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan tinggi terhadap abrasi, seperti jalan raya atau lantai industri. Namun, perlu diperhatikan bahwa penambahan PET dalam jumlah besar harus tetap memperhatikan sifat mekanis lainnya. Dianjurkan untuk melakukan pengujian lebih lanjut terkait durabilitas jangka panjang beton geopolimer dengan PET, termasuk ketahanan terhadap siklus beku-cair dan reaksi kimia dari lingkungan yang abrasif.

Grafik 5.14 menunjukkan persentase abrasi (%) dari berbagai variasi benda uji beton geopolimer, yaitu A (0%), A1 (0,25%), A2 (0,50%), dan A3 (0,75%). Abrasi merupakan parameter yang menggambarkan ketahanan aus beton akibat

gesekan atau keausan mekanis, yang sangat penting dalam aplikasi perkerasan jalan. Semakin rendah nilai abrasi, semakin baik ketahanan beton terhadap gesekan dan keausan.



Gambar 5.14 Kurva hubungan variasi benda uji dengan abrasi

Berdasarkan gambar 5.14, variasi A (0%) tanpa tambahan limbah plastik PET memiliki nilai abrasi tertinggi (81,5%), menunjukkan bahwa beton ini lebih mudah mengalami keausan. Dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET (A1), nilai abrasi turun menjadi 76,4%, yang mengindikasikan adanya peningkatan ketahanan terhadap gesekan. Penambahan lebih lanjut menjadi 0,50% (A2) dan 0,75% (A3) semakin menurunkan nilai abrasi menjadi 71,69% dan 70,51%, menunjukkan bahwa penggunaan plastik PET dalam jumlah lebih tinggi membantu meningkatkan ketahanan beton terhadap keausan.

Pengujian ini dilakukan dengan jumlah revolusi 1000 dalam mesin abrasi, yang merupakan standar umum untuk menilai daya tahan aus beton terhadap gesekan dalam kondisi lalu lintas yang berat. Nilai abrasi yang lebih rendah pada variasi A1, A2, dan A3 menunjukkan bahwa beton dengan tambahan limbah plastik PET memiliki struktur yang lebih padat dan lebih tahan terhadap keausan dibandingkan beton tanpa tambahan plastik.

Berdasarkan hasil ini, beton geopolimer dengan tambahan limbah plastik PET lebih tahan terhadap abrasi, yang merupakan faktor penting dalam perkerasan beton jalan raya, terutama di daerah dengan volume lalu lintas tinggi. Variasi A3 (0,75%) memiliki ketahanan abrasi terbaik, yang dapat memperpanjang umur layan jalan

dan mengurangi frekuensi perawatan. Namun, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut mengenai dampak dari peningkatan kadar plastik PET terhadap sifat mekanis lain, seperti kuat tekan dan modulus elastisitas, untuk memastikan bahwa beton tetap memenuhi standar yang ditetapkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk perkerasan beton.

5.4 Hubungan Sifat Mekanik, Durabilitas dan Perkerasan Beton Geopolimer

Beton merupakan material konstruksi yang memiliki sifat mekanik dan durabilitas yang berperan penting dalam kinerja jangka panjangnya. Sifat mekanik seperti kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur sering menjadi parameter utama dalam desain struktural, sementara durabilitas beton meliputi *sorptivity*, penetrasi klorida, porositas, dan ketahanan abrasi yang menentukan ketahanannya terhadap lingkungan agresif. Hubungan antara sifat mekanik dan durabilitas beton telah menjadi fokus penelitian untuk memahami bagaimana berbagai faktor mempengaruhi kinerja keseluruhan beton dalam aplikasi struktural.

Kuat tekan merupakan parameter utama dalam menentukan kualitas beton, dan penelitian telah menunjukkan bahwa terdapat korelasi antara kuat tekan dan *sorptivity*. Menurut penelitian oleh B.E et al. (2022), semakin tinggi kuat tekan beton, semakin rendah nilai *sorptivity*-nya. Hal ini disebabkan oleh peningkatan densitas mikrostruktur beton yang mengurangi laju penyerapan air kapiler. Dengan demikian, beton berkekuatan tinggi lebih tahan terhadap penetrasi air yang dapat membawa ion berbahaya seperti klorida. Penelitian menunjukkan bahwa beton dengan kuat tekan tinggi memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi klorida. Hal ini disebabkan oleh pengurangan ukuran pori dan distribusi yang lebih homogen dari pasta semen yang menghambat pergerakan ion klorida. Namun, pada beton berkekuatan tinggi dengan faktor air-semen yang sangat rendah, risiko retak mikro akibat penyusutan juga perlu diperhatikan karena dapat meningkatkan jalur difusi klorida.

Hubungan antara kuat tekan dan porositas beton telah banyak diteliti, termasuk dalam studi oleh Manikandan & Vasugi (2021) yang menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan umumnya disertai dengan pengurangan porositas. Beton dengan porositas yang lebih rendah memiliki ikatan antar partikel yang lebih kuat

dan lebih tahan terhadap degradasi lingkungan. Penggunaan bahan tambahan seperti *fly ash* dan *silica fume* dapat lebih lanjut mengurangi porositas dan meningkatkan kuat tekan. Ketahanan abrasi beton sangat dipengaruhi oleh kuat tekan, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian oleh Mohammed & Ikram A. Saeed (2021). Beton dengan kuat tekan yang lebih tinggi cenderung memiliki ketahanan abrasi yang lebih baik karena struktur matriks yang lebih padat dan kuat. Penggunaan agregat berkualitas tinggi juga meningkatkan ketahanan abrasi dengan mengurangi pelepasan partikel akibat gesekan mekanik.

Kuat tarik beton memiliki korelasi dengan *sorptivity*, meskipun lebih lemah dibandingkan dengan kuat tekan. Menurut studi oleh Ofori et al. (2023), beton serat dengan peningkatan kuat tarik menunjukkan nilai *sorptivity* yang lebih rendah karena serat membantu mengontrol retak mikro yang dapat menjadi jalur penetrasi air. Oleh karena itu, penggunaan serat dapat meningkatkan durabilitas beton terhadap serangan air dan ion agresif. Penetrasi klorida lebih mudah terjadi pada beton dengan kuat tarik rendah karena retak yang berkembang lebih cepat akibat beban tarik. Studi oleh Boko (2021) menunjukkan bahwa beton dengan serat polimer atau baja mampu mengurangi penyebaran klorida dengan menghambat pembentukan retak yang dapat menjadi jalur difusi ion klorida. Hal ini penting untuk meningkatkan ketahanan struktur beton di lingkungan laut atau daerah dengan paparan klorida tinggi.

Kuat lentur beton sering digunakan sebagai indikator ketahanan terhadap beban siklik dan kejutan. Penelitian oleh Salman et al. (2023) menemukan bahwa beton dengan porositas yang lebih rendah memiliki kuat lentur yang lebih tinggi karena ikatan antar partikel yang lebih kuat. Dengan demikian, pengurangan porositas melalui penggunaan bahan tambahan seperti nano-silika dapat meningkatkan kekuatan lentur serta durabilitas beton. Hubungan antara kuat lentur dan ketahanan abrasi erat kaitannya dengan kemampuan beton untuk menahan beban dinamis dan gesekan permukaan.

Hasil penelitian telah menunjukkan bahwa korelasi antara penambahan PET akan menurunkan sifat mekanis beton sedangkan terhadap sifat durabilitas penambahan PET akan meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan yang agresif. Sifat mekanis beton geopolimer, seperti kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur dapat menurun akibat penambahan PET dikarenakan sifat PET yang fleksibel

dimana PET memiliki modulus elastisitas yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan matriks geopolimer, sehingga mengurangi kekakuan dan kekuatan mekanik beton. Penurunan sifat mekanik juga disebabkan kelemahan adhesi dengan matriks beton dimana PET tidak bereaksi secara kimia dengan geopolimer dan permukaannya yang halus dan tidak berpori apabila dibandingkan dengan agregat tradisional, sehingga terjadi pengurangan transfer beban yang efektif. Penambahan PET juga menyebabkan gangguan pada kerapatan struktur dimana prosentase PET dalam jumlah besar dapat mengganggu kontinuitas fasa geopolimer, menciptakan zona lemah dalam struktur beton yang berkontribusi pada penurunan kekuatan mekanik. Zona lemah akibat penambahan PET menciptakan *slip stress* dimana tegangan geser atau tegangan lepas (*slip*) yang terjadi di antara permukaan plastik dan beton. *Slip stress* terjadi ketika ada perbedaan pergerakan antara serat plastik dan beton di sekitarnya, terutama saat beton mengalami beban. Ikatan yang lemah dapat menyebabkan slip atau pelepasan serat dari beton, yang berisiko mengurangi kekuatan tekan, tarik dan lentur beton.

Peningkatan sifat durabilitas beton geopolimer dikarenakan sifat PET bersifat hidrofobik (kemampuan material menahan penetrasi air) sehingga dapat mengurangi penyerapan air dan meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi sulfat dan klorida. PET juga dapat meningkatkan pengisian rongga atau retakan mikro pada matriks beton, sehingga dapat mengurangi porositasnya karena partikel PET berperan sebagai pengisi ruang kosong sehingga mengurangi jalur bagi air dan penetrasi sulfat dan klorida untuk masuk ke dalam beton. Pengaruh PET terhadap ketahanan terhadap abrasi dikarenakan PET bersifat yang bersifat elastis dan tahan lama dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap abrasi. Serat ini membantu menyerap sebagian energi dari gaya gesek, sehingga mengurangi tingkat keausan pada permukaan beton.

Menurut Neville & Brooks (2015), beton dengan kuat lentur tinggi lebih tahan terhadap keausan akibat beban siklik, terutama pada aplikasi jalan raya dan lantai industri. Oleh karena itu, perancangan beton dengan ketahanan abrasi tinggi harus mempertimbangkan peningkatan kuat lentur dengan campuran agregat keras dan aditif yang meningkatkan kepadatan matriks. Secara umum, penambahan PET akan meningkatkan durabilitas beton geopolimer dengan mengurangi permeabilitas dan meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan agresif. Sifat dari PET yang

fleksibel dan kurangnya interaksi kimia dengan geopolimer, PET cenderung menurunkan sifat mekanik beton. Oleh karena itu, optimalisasi jumlah dan distribusi PET dalam campuran beton menjadi faktor kunci untuk menyeimbangkan antara sifat durabilitas dan sifat mekanik beton geopolimer.

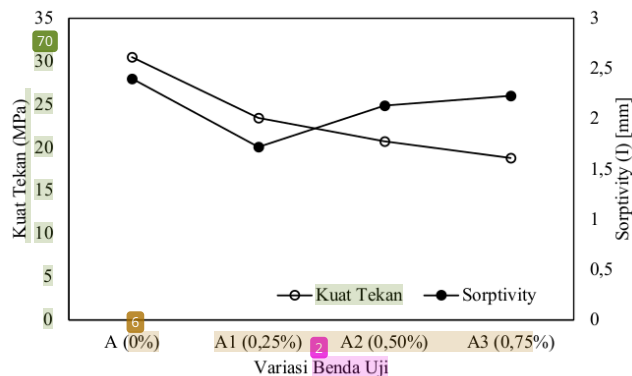
Berdasarkan Dziljalal et al. (2023) dalam perencanaan teknis jalan beton untuk lalu lintas rendah meliputi persyaratan teknis tanah dasar, lapis fondasi bawah, beton kurus, beton semen, lalu lintas, dan sambungan. Rancangan jalan beton untuk lalu lintas rendah digunakan untuk melayani beban lalu lintas harian rata-rata kendaraan niaga (LHRN) kurang dari 500 kendaraan per hari dan beban lalu lintas kurang dari satu juta ESAL dengan umur rencana 20 (dua puluh) tahun. Perencanaan teknis jalan beton untuk lalu lintas rendah faktor yang berpengaruh pada penentuan tebal jalan beton didasarkan pada kategori lalu lintas yang dinyatakan dalam lalu lintas rata-rata kendaraan niaga (LHRN) meliputi kendaraan angkutan barang, bus, truk sedang, dan truk berat dengan sumbu tunggal roda tunggal. Berdasarkan hasil dari pengujian disebutkan bahwa nilai kuat lentur beton geopolimer untuk prosentase PET 0,25 % pada umur 90 hari adalah 3,40 Mpa. Nilai kuat lentur ini dapat dikorelasikan untuk penerapannya pada jalan lokal dapat memberikan umur rencana 19,46 Tahun. Hal ini dapat kita simpulkan bahwa penambahan PET 0,25 % masih dapat memberikan kinerja yang cukup optimal secara teknis dan lingkungan.

Secara keseluruhan, hubungan antara perilaku mekanik dan durabilitas beton menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur umumnya berkontribusi pada peningkatan ketahanan beton terhadap faktor lingkungan yang merusak. Faktor-faktor seperti porositas, *sorptivity*, penetrasi klorida, dan ketahanan abrasi sangat dipengaruhi oleh desain campuran beton dan metode pemadatan yang digunakan. Studi lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi strategi optimal dalam meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton secara bersamaan untuk aplikasi konstruksi yang lebih tahan lama dan berkelanjutan.

5.4.1. Hubungan Kuat Tekan-Durabilitas-Perkerasan Beton Geopolimer

Perkerasan beton geopolimer merupakan alternatif ramah lingkungan terhadap beton konvensional, yang dalam penelitian ini dibuat dari kombinasi fly ash, RHA, dan limbah plastik PET dengan variasi komposisi 0%, 0,25%, 0,50%,

dan 0,75%. Dalam penggunaannya sebagai material perkerasan jalan, hubungan antara kuat tekan dan durabilitas (*sorptivity*, penetrasi klorida, porositas dan abrasi) menjadi faktor krusial dalam menentukan daya tahan serta durabilitasnya terhadap beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan. Kuat tekan mencerminkan kemampuan beton dalam menahan gaya tekan, sementara durabilitas (*sorptivity*, penetrasi klorida, porositas dan abrasi) menggambarkan tingkat penyerapan air ke dalam beton, yang berpengaruh terhadap ketahanannya terhadap degradasi akibat kelembaban dan zat kimia. Korelasi antara kedua parameter ini sangat penting dalam desain perkerasan beton berbasis beton geopolimer, terutama dalam menyesuaikan campuran material agar memenuhi standar ketahanan mekanis dan ketahanan terhadap penetrasi air. Dengan optimasi komposisi bahan tambahannya, beton geopolimer ini berpotensi digunakan dalam infrastruktur jalan yang berkelanjutan dan lebih tahan lama. Gambar 5.15 memperlihatkan hubungan antara kuat tekan beton dengan hasil pengujian durabilitas yaitu *sorptivity*.



Gambar 5.15 Hubungan antara kuat tekan-*sorptivity*

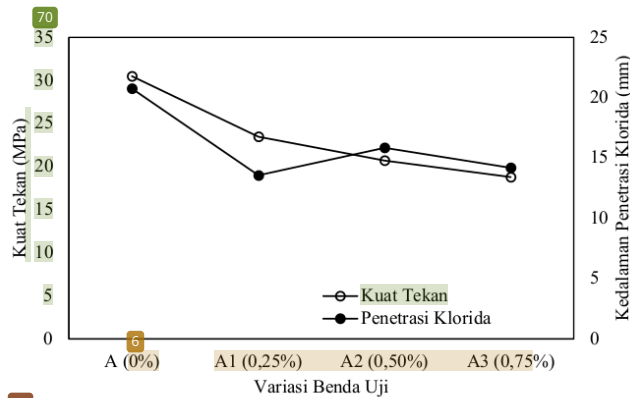
Grafik 5.15 menunjukkan hubungan antara kuat tekan (MPa) dan *sorptivity* (mm) untuk berbagai variasi beton geopolimer dengan tambahan limbah plastik PET (0%, 0,25%, 0,50%, dan 0,75%). Kuat tekan adalah parameter utama dalam menilai kemampuan beton menahan beban tekan, sedangkan *sorptivity* mengukur kemampuan beton menyerap air kapiler, yang berpengaruh terhadap durabilitasnya. Dari grafik, terlihat bahwa beton A (0%) memiliki kuat tekan tertinggi (sekitar 30 MPa), tetapi juga memiliki *sorptivity* tertinggi (sekitar 2,4 mm), yang menandakan

bahwa beton ini lebih mudah menyerap air dan berpotensi mengalami degradasi lebih cepat dalam lingkungan agresif.

Dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET (A1), kuat tekan menurun menjadi sekitar 25 MPa, tetapi *sorptivity* juga turun signifikan menjadi sekitar 1,72 mm. Hal ini menunjukkan bahwa beton menjadi lebih padat dan lebih tahan terhadap infiltrasi air. Namun, ketika persentase plastik meningkat ke 0,50% (A2) dan 0,75% (A3), kuat tekan terus menurun (sekitar 22-24 MPa), tetapi *sorptivity* justru meningkat kembali (sekitar 2,1-2,2 mm). ²¹¹ Ini menunjukkan bahwa meskipun penggunaan limbah plastik dalam jumlah kecil dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air, penggunaan yang berlebihan dapat mengganggu ikatan antar partikel dalam beton, sehingga menurunkan kekuatan tekan dan meningkatkan porositas mikro.

Dalam konteks perkerasan beton untuk jalan raya, kombinasi antara kuat tekan yang cukup tinggi dan nilai *sorptivity* yang rendah sangat penting untuk memastikan beton tidak hanya mampu menahan beban lalu lintas tinggi tetapi juga tahan terhadap serapan air yang dapat menyebabkan degradasi dini. Berdasarkan grafik ini, variasi A1 (0,25%) adalah pilihan yang paling optimal, karena memiliki keseimbangan antara kuat tekan yang masih memenuhi standar perkerasan jalan (> 25 MPa) dan *sorptivity* yang rendah, yang berarti lebih tahan terhadap penetrasi air dan ion klorida. Dengan demikian, pemanfaatan beton geopolimer dengan 0,25% limbah plastik PET berpotensi menjadi alternatif ramah lingkungan dalam konstruksi jalan di Indonesia, terutama di daerah dengan curah hujan tinggi atau lingkungan agresif seperti kawasan pesisir.

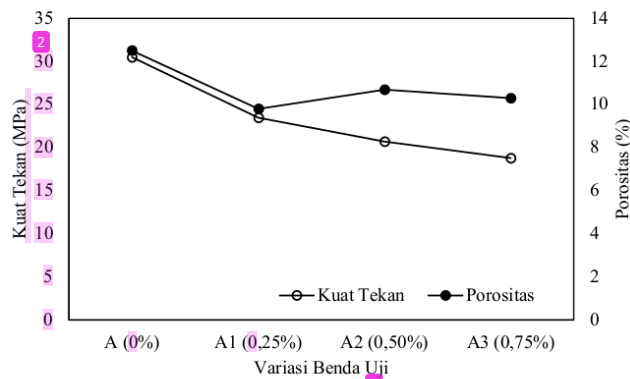
Gambar 5.16 menunjukkan hubungan antara kuat tekan (MPa) dan kedalaman penetrasi klorida (mm) pada beton geopolimer dengan variasi penambahan limbah plastik PET (0%, 0,25%, 0,50%, dan 0,75%). Kuat tekan merupakan parameter utama dalam menentukan ketahanan struktural beton, sedangkan penetrasi klorida menunjukkan ketahanan beton terhadap ion klorida, yang dapat menyebabkan korosi pada tulangan baja di dalamnya. Dari grafik, terlihat bahwa beton A (0%) memiliki kuat tekan tertinggi sekitar 30 MPa, tetapi juga memiliki kedalaman penetrasi klorida terbesar sekitar 20,75 mm, menunjukkan bahwa beton ini lebih rentan terhadap serangan klorida yang dapat mempercepat proses korosi pada perkerasan jalan.



Gambar 5.16 Hubungan antara kuat tekan-kedalaman penetrasi klorida

Dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET (A1), kuat tekan mengalami penurunan menjadi sekitar 25 MPa, tetapi penetrasi klorida juga berkurang signifikan menjadi 13,57 mm. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan tambahan plastik dalam jumlah kecil lebih padat, sehingga lebih tahan terhadap serangan klorida. Namun, pada penambahan 0,50% (A2) dan 0,75% (A3), terjadi peningkatan kembali pada kedalaman penetrasi klorida (15,86 mm dan 14,17 mm), meskipun kuat tekan masih mengalami penurunan bertahap. Tren ini mirip dengan hubungan kuat tekan dan *sorptivity*, dimana penambahan limbah plastik PET dalam jumlah kecil dapat meningkatkan durabilitas beton, tetapi jumlah yang berlebihan dapat meningkatkan porositas mikro, sehingga memungkinkan ion klorida masuk lebih dalam.

Dalam konteks perkerasan beton untuk jalan raya, kombinasi kuat tekan yang cukup tinggi dan penetrasi klorida yang rendah sangat penting, terutama untuk jalan yang berada di lingkungan dengan paparan klorida tinggi seperti daerah pesisir atau kawasan industri dengan polusi kimia. Berdasarkan grafik ini, variasi A1 (0,25%) menjadi pilihan terbaik karena memiliki keseimbangan antara kuat tekan yang memenuhi standar (> 25 MPa) dan kedalaman penetrasi klorida yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan 0,25% limbah plastik PET dapat meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap ion klorida tanpa mengorbankan kekuatan mekanisnya, sehingga berpotensi diterapkan dalam konstruksi jalan dengan lalu lintas tinggi dan lingkungan agresif.



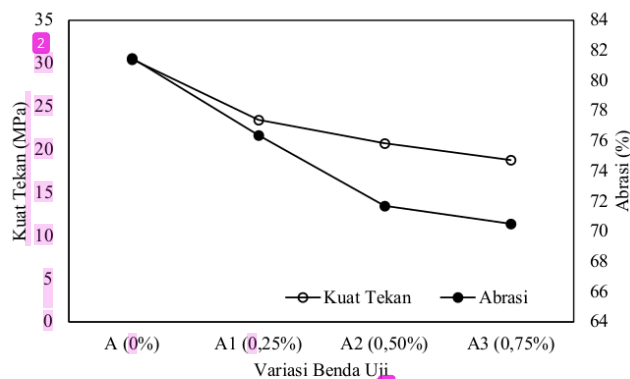
Gambar 5.17 Hubungan antara kuat tekan-porositas

Gambar 5.17 menunjukkan hubungan antara kuat tekan (MPa) dan porositas (%) dari beton geopolimer dengan variasi penambahan limbah plastik PET (0%, 0,25%, 0,50%, dan 0,75%). Kuat tekan merupakan parameter utama dalam menilai kekuatan struktural beton, sementara porositas berpengaruh terhadap ketahanan beton terhadap air dan zat agresif lainnya. Dari grafik, terlihat bahwa beton A (0%) memiliki kuat tekan tertinggi sekitar 30 MPa dan porositas tertinggi sekitar 12,5%, yang menunjukkan bahwa beton ini masih memiliki banyak rongga internal yang dapat memengaruhi ketahanan durabilitasnya.

Dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET (A1), kuat tekan menurun menjadi sekitar 25 MPa, sementara porositas juga turun menjadi 9,8%. Penurunan porositas ini menunjukkan bahwa struktur beton menjadi lebih padat, yang selaras dengan hasil uji penetrasi klorida dan *sorptivity* sebelumnya—di mana varian A1 memiliki penetrasi klorida dan *sorptivity* terendah. Namun, pada penambahan 0,50% (A2) dan 0,75% (A3), porositas meningkat kembali menjadi 10,7% dan 10,3%, sementara kuat tekan terus menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar plastik yang lebih tinggi, terjadi peningkatan rongga mikro yang dapat berdampak negatif pada ketahanan mekanis beton.

Dalam pengaplikasiannya sebagai perkerasan beton, hubungan antara kuat tekan dan porositas sangat penting karena jalan raya memerlukan beton yang kuat serta tahan terhadap infiltrasi air dan zat kimia agresif. Berdasarkan data ini, beton dengan 0,25% limbah plastik PET (A1) adalah yang paling optimal, karena

memiliki kuat tekan yang masih memenuhi standar perkerasan (> 25 MPa) dengan porositas yang rendah, yang berarti lebih tahan terhadap infiltrasi air dan ion klorida. Apabila porositas terlalu tinggi, seperti pada A2 dan A3, maka perkerasan akan lebih rentan terhadap kerusakan akibat siklus pembekuan-pencairan dan korosi tulangan baja. Oleh karena itu, A1 menjadi pilihan terbaik untuk diaplikasikan dalam konstruksi perkerasan beton, terutama di lingkungan dengan lalu lintas tinggi dan paparan air atau zat kimia yang signifikan.



Gambar 5.18 Hubungan antara kuat tekan-abrasi

Gambar 5.18 menunjukkan hubungan antara kuat tekan (MPa) dan abrasi (%) dari beton geopolimer dengan variasi penambahan limbah plastik PET. Secara umum, kuat tekan menunjukkan tren penurunan seiring dengan meningkatnya kadar plastik PET, sedangkan abrasi juga mengalami penurunan, yang berarti ketahanan terhadap keausan meningkat. Beton A (0%) memiliki kuat tekan tertinggi sekitar 30 MPa dengan tingkat abrasi tertinggi sekitar 81,5%, menunjukkan bahwa beton ini memiliki ketahanan aus yang lebih rendah dibandingkan variasi lainnya.

Variasi A1 (0,25%) menunjukkan terjadi penurunan kuat tekan menjadi sekitar 25 MPa, namun abrasi juga menurun menjadi 76,4%, yang menunjukkan bahwa material menjadi lebih tahan terhadap keausan. Penurunan abrasi ini berkorelasi dengan berkurangnya porositas yang telah diamati pada grafik sebelumnya, yang berarti beton menjadi lebih padat dan lebih tahan terhadap gesekan. Namun, pada variasi A2 (0,50%) dan A3 (0,75%), meskipun abrasi terus menurun menjadi 71,69% dan 70,51%, kuat tekan juga mengalami penurunan lebih

lanjut, yang menunjukkan bahwa ada batas optimal dalam penambahan limbah plastik PET.

Dalam pengaplikasiannya sebagai perkerasan beton, hubungan antara kuat tekan dan abrasi sangat penting karena jalan beton harus memiliki daya tahan yang baik terhadap beban lalu lintas dan gesekan akibat kendaraan. Beton dengan A1 (0,25%) menjadi pilihan terbaik karena masih memiliki kuat tekan yang memenuhi standar (> 25 MPa) dan lebih tahan terhadap abrasi dibandingkan beton tanpa tambahan limbah plastik. Apabila kadar plastik terlalu tinggi seperti pada A2 dan A3, meskipun abrasi lebih rendah, kuat tekan yang menurun dapat mengurangi kemampuan beton dalam menahan beban berat, sehingga berisiko mengalami retak dan kegagalan struktural lebih cepat. Oleh karena itu, pemilihan komposisi yang optimal harus mempertimbangkan keseimbangan antara kuat tekan, porositas, abrasi, dan durabilitas secara keseluruhan.

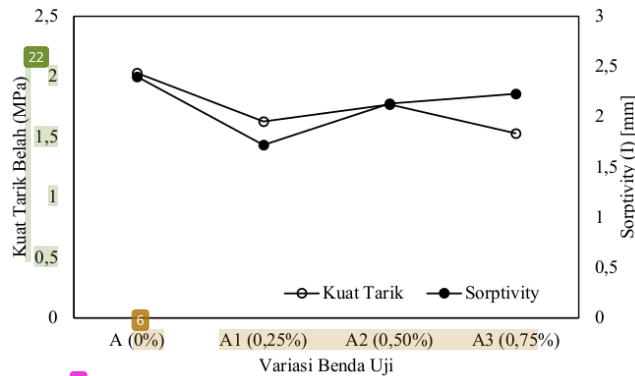
5.4.2. Hubungan Kuat Tarik Belah-Durabilitas-Perkerasan Beton Geopolimer

Kuat tarik belah pada perkerasan beton geopolimer merupakan parameter penting yang berkaitan dengan ketahanan beton terhadap retak akibat beban tarik yang terjadi selama penggunaan. Sementara itu, durabilitas yang mencakup *sorptivity*, kedalaman penetrasi klorida, porositas, dan abrasi sangat mempengaruhi daya tahan beton terhadap pengaruh lingkungan seperti serapan air, penetrasi ion klorida, serta ketahanan terhadap keausan. Hubungan antara kuat tarik belah dan durabilitas sangat krusial dalam menentukan kinerja jangka panjang perkerasan beton geopolimer. Beton dengan kuat tarik belah yang baik cenderung memiliki porositas yang lebih rendah, *sorptivity* yang kecil, serta ketahanan yang lebih tinggi terhadap abrasi dan serangan klorida, sehingga lebih cocok digunakan untuk infrastruktur perkerasan beton yang terpapar beban dinamis dan lingkungan agresif. Oleh karena itu, pemahaman tentang interaksi antara kuat tarik belah dan durabilitas sangat penting dalam pengembangan beton geopolimer yang lebih tahan lama dan berkelanjutan.

Gambar 5.19 menunjukkan hubungan antara kuat tarik belah dan *sorptivity* pada berbagai variasi benda uji beton geopolimer. Dari grafik, terlihat bahwa kuat tarik belah mengalami penurunan setelah penambahan variasi A1 (0,25%) tetapi kembali meningkat pada variasi A2 (0,50%) dan A3 (0,75%). Sementara itu, nilai *sorptivity* menunjukkan tren yang cenderung meningkat seiring dengan

peningkatan variasi campuran. Pola ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat peningkatan kuat tarik belah pada variasi tertentu, kemampuan beton dalam menahan penetrasi air tetap menjadi tantangan yang perlu diperhatikan dalam aplikasi perkerasan beton.

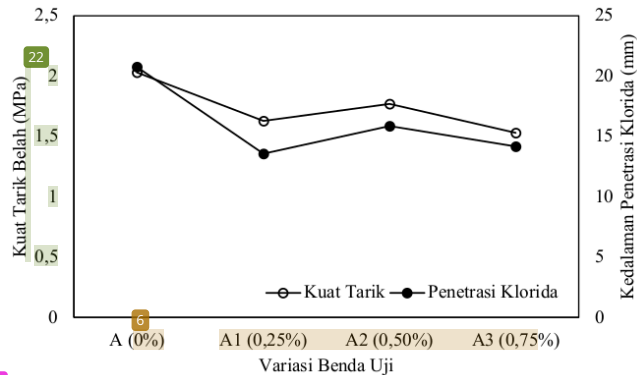
Apabila dibandingkan dengan kuat tekan-*sorptivity*, hasilnya menunjukkan pola yang serupa, di mana kuat tekan dan kuat tarik belah menurun pada awal variasi campuran dan mengalami sedikit peningkatan pada variasi yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa sifat mekanis beton geopolimer, termasuk kuat tekan dan kuat tarik belah, memiliki keterkaitan yang erat dengan sifat durabilitasnya, terutama dalam hal penyerapan air. Semakin tinggi porositas dalam beton, semakin besar kemungkinan air masuk, yang dapat berdampak negatif pada kekuatan jangka panjang beton tersebut. Oleh karena itu, penting untuk mencari keseimbangan antara kuat tarik belah yang optimal dengan nilai *sorptivity* yang rendah agar beton memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungan eksternal.



Gambar 5.19 Hubungan antara kuat tarik belah-*sorptivity*

Dalam aplikasi perkerasan beton, kombinasi kuat tekan dan kuat tarik belah yang baik sangat penting untuk memastikan beton mampu menahan beban lalu lintas tanpa mengalami retak yang signifikan. Nilai *sorptivity* yang tinggi dapat meningkatkan risiko kerusakan akibat penetrasi air dan ion klorida, yang dapat menyebabkan degradasi material dari dalam. Oleh karena itu, optimasi material beton geopolimer harus mempertimbangkan tidak hanya kekuatan mekanisnya

tetapi juga aspek durabilitas seperti *sorptivity*, porositas, dan ketahanan terhadap abrasi, sebagaimana ditunjukkan dalam empat grafik sebelumnya.



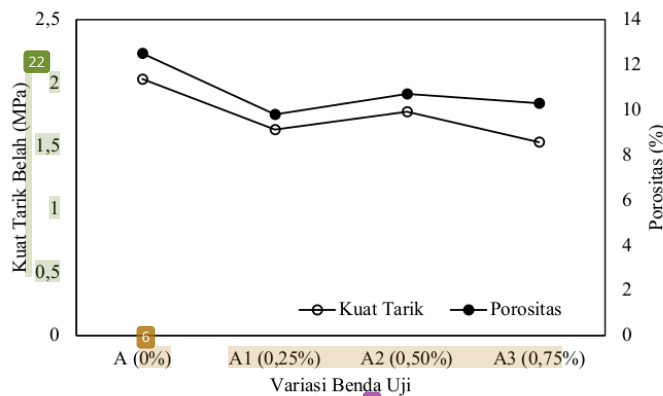
Gambar 5.20 Hubungan antara kuat tarik belah-kedalaman penetrasi klorida

Gambar 5.20 menunjukkan hubungan antara kuat tarik belah dan kedalaman penetrasi klorida pada berbagai variasi benda uji beton geopolimer. Dari grafik, terlihat bahwa kuat tarik belah mengalami tren penurunan pada A1 (0,25%), tetapi kemudian mengalami sedikit peningkatan pada variasi A2 (0,50%) dan A3 (0,75%). Pola ini sejalan dengan tren penetrasi klorida, yang menunjukkan bahwa semakin tinggi variasi campuran geopolimer, semakin dalam penetrasi klorida yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan dalam komposisi material mempengaruhi baik sifat mekanis maupun ketahanan terhadap ion klorida, yang merupakan faktor penting dalam ketahanan jangka panjang beton terhadap lingkungan agresif.

Apabila dibandingkan dengan grafik kuat tekan-penetrasi klorida yang hasilnya memiliki pola yang serupa, di mana kuat tekan dan kuat tarik belah menurun pada awal penambahan variasi campuran, kemudian mengalami sedikit peningkatan pada variasi yang lebih tinggi. Ini menunjukkan bahwa peningkatan porositas pada beton berkontribusi terhadap peningkatan kedalaman penetrasi klorida, yang sejalan dengan tren peningkatan *sorptivity* yang terlihat pada grafik sebelumnya. Beton dengan nilai penetrasi klorida yang tinggi lebih rentan terhadap korosi tulangan, yang dapat menyebabkan penurunan kekuatan struktural seiring waktu. Oleh karena itu, kombinasi kuat tarik belah yang memadai dengan

ketahanan yang baik terhadap penetrasi klorida harus menjadi pertimbangan utama dalam desain beton geopolimer.

Dalam aplikasi perkerasan beton, hubungan antara kuat tarik belah dan kedalaman penetrasi klorida sangat penting karena beton yang digunakan pada jalan raya harus memiliki ketahanan tinggi terhadap lingkungan eksternal, termasuk paparan ion klorida dari garam de-icing atau air laut di daerah pesisir. Penurunan kuat tarik belah dapat meningkatkan risiko retak, yang memungkinkan penetrasi klorida lebih dalam dan mempercepat korosi pada tulangan. Oleh karena itu, optimalisasi desain beton geopolimer harus memperhitungkan kombinasi sifat mekanis dan durabilitasnya, sebagaimana ditunjukkan dalam lima grafik sebelumnya, untuk memastikan performa yang baik dalam aplikasi perkerasan beton.



Gambar 5.21 Hubungan antara kuat tarik belah-porositas

Gambar 5.21 menunjukkan hubungan antara kuat tarik belah dan porositas pada berbagai variasi benda uji beton geopolimer. Berdasarkan grafik terlihat bahwa kuat tarik belah mengalami penurunan pada A1 (0,25%), sedikit meningkat pada A2 (0,50%), dan kembali mengalami sedikit penurunan pada A3 (0,75%). Sementara itu, porositas menunjukkan tren yang berlawanan, di mana semakin tinggi variasi campuran, semakin tinggi pula porositasnya. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan porositas berkontribusi terhadap penurunan kuat tarik belah karena struktur material menjadi lebih terbuka, sehingga mengurangi ikatan antar partikel yang penting untuk menahan beban tarik.

Apabila dibandingkan dengan grafik sebelumnya, pola ini konsisten dengan tren yang ditunjukkan oleh kuat tekan-porositas, kuat tekan-*sorptivity*, dan kuat tekan-penetrasi klorida. Peningkatan porositas menyebabkan peningkatan nilai *sorptivity* dan penetrasi klorida, yang berimplikasi pada meningkatnya risiko penyerapan air dan ion klorida ke dalam beton. Dengan demikian, seiring meningkatnya porositas, beton menjadi lebih rentan terhadap degradasi akibat lingkungan eksternal, yang pada akhirnya dapat mempercepat kerusakan struktural. Oleh karena itu, keseimbangan antara kuat tarik belah dan porositas harus diperhatikan untuk menjaga ketahanan beton dalam aplikasi jangka panjang.

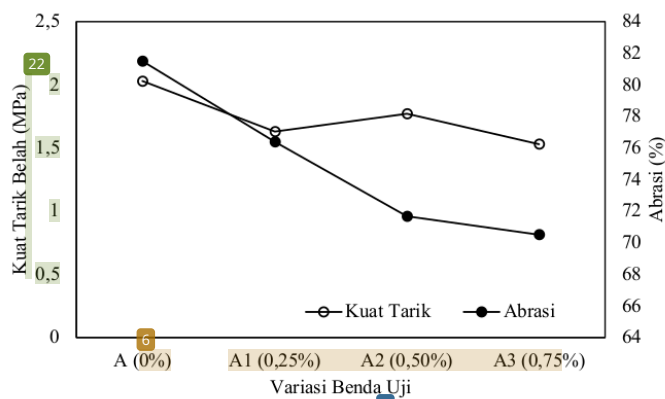
Dalam perkerasan beton, hubungan kuat tarik belah dan porositas sangat krusial karena beton yang memiliki porositas tinggi cenderung lebih mudah mengalami retak akibat beban lalu lintas dan perubahan suhu. Retak ini dapat mempercepat penetrasi air dan ion klorida, yang pada akhirnya mempercepat proses korosi pada tulangan dan mengurangi umur layanan perkerasan. Oleh karena itu, meskipun beton geopolimer memiliki keunggulan dalam aspek keberlanjutan, optimasi campuran yang mampu menekan porositas dan tetap menjaga kuat tarik belah yang cukup sangat penting agar perkerasan beton tetap memiliki daya tahan tinggi terhadap beban dan lingkungan eksternal.

Gambar 5.22 menunjukkan hubungan antara kuat tarik belah dan abrasi pada berbagai variasi benda uji beton geopolimer. Terlihat bahwa kuat tarik belah mengalami tren penurunan dengan meningkatnya variasi campuran, sementara abrasi menunjukkan pola yang sejalan dengan kuat tarik belah, yaitu semakin besar variasi campuran, semakin tinggi tingkat abrasi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan variasi campuran menyebabkan beton menjadi lebih tahan terhadap aus, yang berarti beton tidak kehilangan material lebih cepat ketika terkena gesekan atau beban berulang.

Apabila dibandingkan dengan grafik sebelumnya, tren ini selaras dengan hubungan kuat tekan-abrasi serta kuat tekan-porositas, di mana semakin berkurangnya kuat tekan dan kuat tarik belah, semakin rendah tingkat abrasi dan porositas beton. Hal ini juga sejalan dengan peningkatan *sorptivity* dan penetrasi klorida, yang mengindikasikan bahwa beton dengan ketahanan mekanik yang lebih rendah juga lebih aman terhadap serangan lingkungan. Dengan meningkatnya abrasi, permukaan beton menjadi lebih kasar dan terbuka, yang dapat mempercepat

laju degradasi akibat faktor eksternal seperti air, klorida, dan siklus pembekuan-pencairan.

Dalam aplikasi perkerasan beton, sifat abrasi sangat penting karena perkerasan beton mengalami beban lalu lintas yang konstan. Apabila tingkat abrasi terlalu tinggi, permukaan beton akan cepat mengalami keausan, mengurangi daya tahan dan kenyamanan berkendara. Selain itu, abrasi yang tinggi dapat mempercepat pembentukan retak mikro yang kemudian berkembang menjadi retak struktural lebih besar, memungkinkan penetrasi air dan ion klorida yang mempercepat korosi pada tulangan baja di dalamnya. Oleh karena itu, optimasi campuran beton geopolimer harus mempertimbangkan keseimbangan antara kuat tarik belah dan ketahanan abrasi untuk memastikan umur layanan perkerasan beton yang lebih panjang dan minim perawatan.

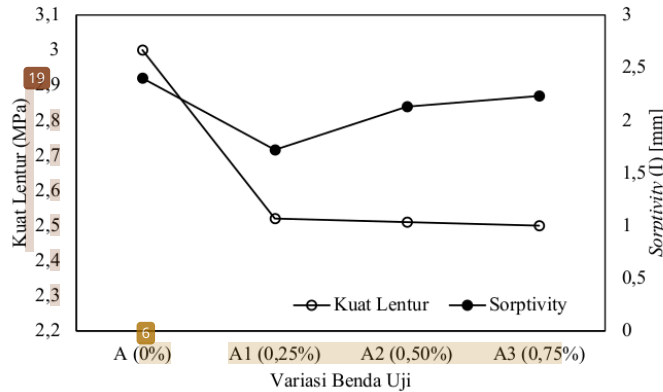


Gambar 5.22 Hubungan antara kuat tarik belah-abrasi

5.4.3. Hubungan Kuat Lentur-Durabilitas-Perkerasan Beton Geopolimer

Hubungan antara kuat lentur, durabilitas, dan perkerasan beton geopolimer merupakan aspek penting dalam pengembangan material ramah lingkungan sebagai alternatif beton konvensional. Kuat lentur menentukan kemampuan beton geopolimer dalam menahan beban tarik akibat lenturan, sedangkan durabilitas mencerminkan ketahanan material terhadap berbagai faktor lingkungan seperti *sorptivity*, kedalaman penetrasi klorida, porositas serta keausan. Kombinasi dari kedua sifat ini sangat mempengaruhi kinerja perkerasan beton geopolimer, terutama dalam infrastruktur jalan dan bangunan yang membutuhkan daya tahan tinggi

terhadap beban lalu lintas dan kondisi cuaca ekstrem. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai hubungan antara kuat lentur dan durabilitas pada beton geopolimer menjadi krusial dalam meningkatkan kualitas dan umur layan perkerasan beton yang lebih berkelanjutan.



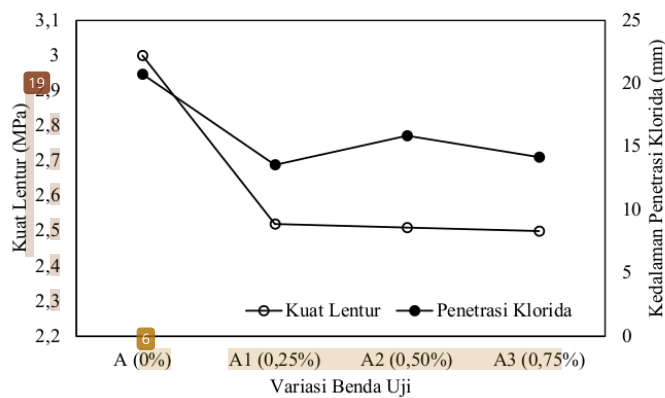
Gambar 5.23 Hubungan antara kuat lentur-sorptivity

Berdasarkan grafik hubungan antara kuat lentur dan *sorptivity* yang ditunjukkan pada Gambar 5.23, terlihat adanya tren penurunan kuat lentur seiring dengan peningkatan kadar variasi benda uji hingga 0,25%, diikuti oleh stabilisasi pada variasi 0,50% dan 0,75%. Kuat lentur merupakan salah satu parameter utama dalam menilai kinerja perkerasan beton geopolimer, karena berpengaruh terhadap daya dukung material terhadap beban lalu lintas. Menurut Mehta & Monteiro (2014), kuat lentur beton dipengaruhi oleh komposisi material dan kepadatan mikrostruktur, yang dalam penelitian ini kemungkinan mengalami perubahan akibat penambahan material tertentu yang memengaruhi reaksi geopolimerisasi. Sementara itu, *sorptivity* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan penurunan kuat lentur, yang mengindikasikan adanya peningkatan porositas atau penurunan ketahanan material terhadap penetrasi air.

Hubungan antara kuat lentur dan *sorptivity* ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, yang menyatakan bahwa peningkatan *sorptivity* berkorelasi dengan berkurangnya ketahanan beton terhadap degradasi lingkungan, termasuk penetrasi air dan zat kimia agresif (Ofori et al., 2023). Nilai *sorptivity* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa beton lebih mudah menyerap air, yang dapat mempercepat

proses degradasi dan menurunkan ketahanan jangka panjang. Dalam konteks perkerasan beton, peraturan seperti yang tercantum dalam AASHTO dan Hernadi et al. (2021) menyarankan bahwa beton harus memiliki kuat lentur yang memadai agar mampu menahan beban kendaraan tanpa mengalami retak berlebih. Oleh karena itu, penurunan kuat lentur pada variasi tertentu perlu diperhatikan untuk memastikan bahwa material tetap memenuhi standar kelayakan perkerasan beton.

Berdasarkan hasil pembahasan grafik-grafik sebelumnya, dapat dilihat bahwa faktor-faktor lain seperti kepadatan, porositas, dan kadar binder dalam campuran juga berpengaruh terhadap karakteristik mekanik dan durabilitas beton geopolimer. Data dari grafik lain menunjukkan bahwa peningkatan *sorptivity* cenderung berkorelasi dengan peningkatan porositas, yang sejalan dengan penurunan kuat lentur akibat melemahnya struktur ikatan dalam matriks beton. Oleh karena itu, pemilihan komposisi optimal harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap faktor lingkungan, agar beton geopolimer dapat digunakan secara efektif sebagai material perkerasan beton yang tahan lama dan berkelanjutan.



Gambar 5.24 Hubungan antara kuat lentur-kedalaman penetrasi klorida

Berdasarkan grafik hubungan antara kuat lentur dan kedalaman penetrasi klorida yang diperlihatkan pada Gambar 5.24, terlihat bahwa semakin tinggi nilai penetrasi klorida, semakin rendah kuat lentur beton geopolimer. Variasi 0% (A) menunjukkan kuat lentur mencapai nilai tertinggi, sementara penetrasi klorida juga cukup tinggi. Namun, dengan peningkatan variasi hingga 0,25%, terjadi penurunan

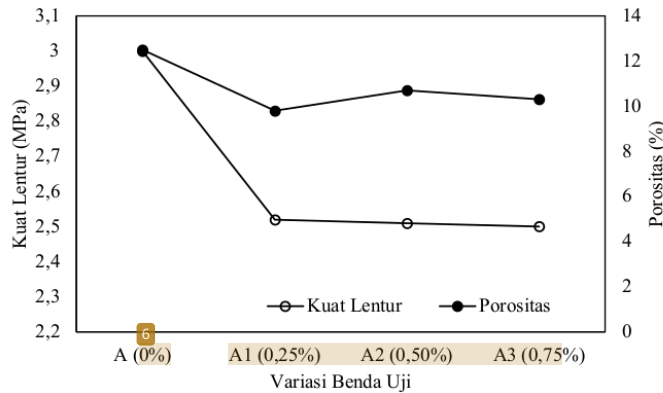
tajam pada kuat lentur dan kedalaman penetrasi klorida. Hal ini mengindikasikan bahwa adanya penambahan material tertentu dapat memengaruhi mikrostruktur beton, yang berakibat pada perubahan kepadatan dan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida. Sejalan dengan penelitian Mehta & Monteiro (2014), kuat lentur sangat dipengaruhi oleh komposisi dan ikatan antar partikel dalam matriks beton, di mana peningkatan porositas dapat menyebabkan melemahnya kekuatan mekanik sekaligus meningkatkan kemampuan penetrasi zat agresif seperti klorida.

Penetrasi klorida merupakan faktor penting dalam durabilitas beton, terutama untuk perkerasan yang digunakan di lingkungan dengan paparan air laut atau de-icing salt. Menurut penelitian Szpetulski et al. (2022), peningkatan kedalaman penetrasi klorida dapat menyebabkan korosi tulangan pada beton bertulang, yang mengurangi daya tahan strukturalnya. Dalam konteks perkerasan beton, Standar SNI 2847:2019 dan AASHTO menggarisbawahi bahwa beton harus memiliki ketahanan yang baik terhadap penetrasi klorida untuk menghindari degradasi dini akibat korosi. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa pada variasi A2 (0,50%) dan A3 (0,75%), kedalaman penetrasi klorida mengalami sedikit peningkatan dibandingkan A1 (0,25%), meskipun kuat lentur cenderung stabil. Hal ini menunjukkan bahwa optimalisasi komposisi sangat penting dalam memastikan keseimbangan antara kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap penetrasi zat berbahaya.

Apabila dikaitkan dengan grafik sebelumnya yang menunjukkan hubungan kuat lentur dan *sorptivity*, tren yang serupa dapat diamati dimana peningkatan *sorptivity* cenderung berbanding lurus dengan peningkatan kedalaman penetrasi klorida, yang menegaskan bahwa beton dengan daya serap air tinggi juga lebih rentan terhadap serangan klorida. Hal ini mengindikasikan bahwa kontrol terhadap porositas dan permeabilitas sangat krusial dalam desain beton geopolimer untuk perkerasan beton. Oleh karena itu, pemilihan variasi bahan yang dapat mengurangi *sorptivity* dan penetrasi klorida, sambil tetap mempertahankan kuat lentur yang memenuhi standar, menjadi strategi utama dalam meningkatkan performa beton geopolimer untuk aplikasi struktural jangka panjang.

Berdasarkan grafik hubungan antara kuat lentur dan porositas yang diperlihatkan pada Gambar 5.25, terlihat bahwa semakin tinggi nilai porositas, semakin tinggi kuat lentur beton geopolimer. Pada variasi 0% (A), kuat lentur

mencapai nilai tertinggi dengan porositas yang cukup tinggi. Namun, pada variasi A1 (0,25%), terjadi penurunan porositas yang signifikan, yang diikuti oleh penurunan kuat lentur. Menurut Mehta & Monteiro (2014), porositas yang tinggi dalam beton dapat menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata, meningkatkan risiko retak mikro, dan pada akhirnya menurunkan kekuatan mekaniknya.

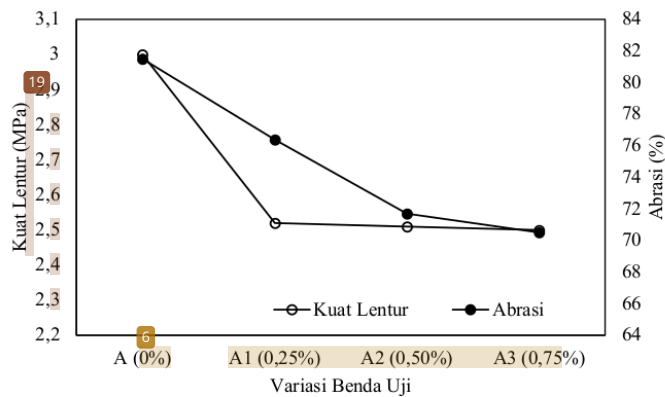


Gambar 5.25 Hubungan antara kuat lentur-porositas

Porositas merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap durabilitas beton, terutama dalam aplikasi perkerasan beton. Penelitian Hernadi et al. (2021) dan AASHTO menekankan bahwa beton untuk perkerasan jalan harus memiliki kepadatan yang baik guna menghindari penyerapan air yang berlebihan, yang dapat menyebabkan kerusakan akibat siklus pembekuan-pencairan serta reaksi kimia yang merugikan. Apabila dikaitkan dengan dua grafik sebelumnya, terlihat bahwa peningkatan porositas berbanding lurus dengan peningkatan *sorptivity* dan kedalaman penetrasi klorida. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan porositas tinggi memiliki kecenderungan untuk menyerap lebih banyak air dan ion klorida, yang dapat mempercepat proses degradasi material. Oleh karena itu, pengendalian porositas menjadi faktor kunci dalam memastikan beton geopolimer memiliki umur layan yang lebih panjang.

Hubungan antara kuat lentur, porositas, *sorptivity*, dan penetrasi klorida menunjukkan bahwa ada keseimbangan yang perlu dicapai dalam pemilihan komposisi beton geopolimer. Meskipun peningkatan variasi bahan tertentu dapat

memberikan manfaat dalam aspek tertentu, seperti peningkatan durabilitas, namun efeknya terhadap mikrostruktur beton harus diperhatikan agar tidak menyebabkan penurunan kekuatan mekanik secara signifikan. Oleh karena itu, strategi optimal dalam desain beton geopolimer untuk perkerasan beton adalah dengan mencari komposisi yang mampu mengurangi porositas tanpa mengorbankan kuat lentur, sehingga beton tidak hanya kuat menahan beban lalu lintas, tetapi juga memiliki ketahanan tinggi terhadap serangan lingkungan.



Gambar 5.26 Hubungan antara kuat lentur-abrasi

Berdasarkan grafik hubungan antara kuat lentur dan abrasi yang diperlihatkan pada Gambar 5.26, terlihat bahwa semakin tinggi tingkat abrasi, semakin rendah kuat lentur beton geopolimer. Pada variasi 0% (A), kuat lentur mencapai nilai tertinggi, sementara tingkat abrasi juga masih lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Namun, dengan meningkatnya variasi bahan hingga 0,25%, terjadi penurunan pada abrasi yang diikuti dengan penurunan kuat lentur yang drastis. Penurunan tingkat abrasi menandakan bahwa beton lebih aman terhadap keausan akibat gesekan atau beban berulang, yang dapat berdampak pada umur layanan perkerasan.

Ketahanan terhadap abrasi merupakan faktor penting dalam pemilihan material untuk perkerasan beton, terutama pada jalan raya dan landasan pacu yang menerima beban lalu lintas tinggi. Menurut Neville & Brooks (2015), beton dengan kekuatan mekanik yang lebih rendah cenderung memiliki ketahanan abrasi yang lebih buruk karena adanya penurunan kepadatan mikrostruktur yang menyebabkan

material lebih mudah tergerus. Menurut Hernadi et al. (2021) dan AASHTO menyebutkan bahwa beton yang digunakan untuk perkerasan harus memiliki ketahanan abrasi yang baik guna menghindari kerusakan permukaan yang dapat mengurangi kualitas layanan jalan. Apabila dikaitkan dengan tiga grafik sebelumnya (kuat lentur vs. porositas, *sorptivity*, dan penetrasi klorida), terlihat bahwa tren peningkatan abrasi cenderung mengikuti peningkatan porositas dan *sorptivity*. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan porositas tinggi tidak hanya memiliki daya serap air lebih besar dan lebih rentan terhadap serangan klorida, tetapi juga lebih mudah mengalami keausan. Oleh karena itu, keseimbangan antara kuat lentur dan ketahanan abrasi harus diperhatikan agar beton geopolimer dapat memenuhi persyaratan perkerasan beton yang tahan lama.

Hubungan antara kuat lentur, abrasi, porositas, dan penetrasi klorida menunjukkan bahwa beton dengan ketahanan mekanik rendah cenderung memiliki durabilitas yang lebih baik. Oleh karena itu, dalam pemanfaatan beton geopolimer sebagai perkerasan beton, diperlukan optimasi komposisi agar material tidak hanya memiliki kuat lentur yang cukup tetapi juga memiliki ketahanan abrasi yang baik. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah dengan mengurangi porositas dan meningkatkan densitas material, sehingga beton menjadi lebih padat, lebih kuat terhadap beban lentur, serta lebih tahan terhadap gesekan dan keausan. Dengan strategi ini, beton geopolimer dapat menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan dalam konstruksi perkerasan beton yang tahan terhadap beban dan lingkungan eksternal.

5.5 Temuan Empirik

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa temuan, yaitu:

1. **Kinerja kuat lentur dan ketahanan terhadap beban.** Beton geopolimer dengan penambahan 0,25% limbah plastik PET menunjukkan kinerja kuat lentur yang optimal pada umur 90 hari walaupun sedikit ada penurunan dibandingkan dengan tanpa limbah plastik PET. Kuat lentur yang tinggi ini sangat penting dalam aplikasi jalan beton (*rigid pavement*) yang harus mampu menahan beban kendaraan berat secara terus-menerus.

2. **Kinerja durabilitas beton geopolimer.** Penambahan limbah plastik (PET) menunjukkan terjadi penambahan nilai parameter durabilitas beton, hal ini menandakan terjadi peningkatan kualitas ketahanan pada beton geopolimer dengan penambahan plastik limbah (PET).
3. **Pola retak yang terkendali.** Penggunaan limbah plastik PET sebesar 0,25% dapat mengurangi pola retak mikro yang dapat berkembang menjadi retak makro. Hal ini sangat relevan untuk aplikasi pada *rigid pavement* yang rentan terhadap retak akibat beban dinamis dan perubahan suhu. Penelitian oleh Sofi et al. (2007) menunjukkan bahwa serat plastik berfungsi sebagai penguat internal yang menghambat propagasi retak, sehingga meningkatkan umur layan jalan beton.
4. **Efisiensi lingkungan dan konstruksi berkelanjutan.** Beton geopolimer dengan tambahan 0,25% limbah plastik PET memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Konsep ini sejalan dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA), yang menekankan pentingnya mengurangi embodied carbon dalam material konstruksi. Beton geopolimer dengan limbah plastik PET dapat digunakan dalam proyek jalan beton yang berkelanjutan, mengurangi kebutuhan akan perawatan dan perbaikan jangka panjang, serta mendukung target pengurangan emisi karbon di sektor konstruksi.

KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian maka dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Penambahan limbah plastik PET sebagai serat dalam beton geopolimer yang terbuat dari *fly ash*, RHA, dan aktivator alkali menunjukkan pengaruh terhadap sifat mekanik beton. Nilai kuat tekan beton geopolimer pada umur 90 hari untuk variasi PET 0%; 0,25%; 0,50% dan 0,75% adalah 42,75 MPa; 41,84 MPa, 34,57 MPa dan 31,86 MPa. Nilai kuat tarik belah beton geopolimer pada umur 90 hari untuk variasi PET 0%, 0,25%, 0,50% dan 0,75% adalah 2,65 MPa; 1,96 MPa; 2,10 MPa dan 2,26 MPa. Nilai kuat lentur beton geopolimer pada umur 90 hari untuk variasi PET 0%; 0,25%; 0,50% dan 0,75% adalah 3,70 MPa; 3,41 MPa; 3,32 MPa dan 3,42 MPa. Limbah plastik PET meningkatkan ketahanan beton terhadap pengendalian pola dan penyebaran retak, hal ini menunjukkan bahwa limbah plastik PET dapat berperan sebagai bahan penguat yang efektif dalam mengurangi keretakan mikro pada beton geopolimer.
2. Penambahan serat plastik PET juga memberikan kontribusi positif terhadap durabilitas beton geopolimer. Peningkatan sifat durabilitas beton geopolimer dapat terlihat dari pengujian ketahanan terhadap porositas, *sorptivity*, penetrasi klorida, dan abrasi. Nilai pengujian porositas beton geopolimer pada umur 28 hari untuk variasi PET 0%; 0,25%; 0,50% dan 0,75% adalah 20,60%; 17,74 %, 16,11% dan 15,40%. Nilai pengujian *sorptivity* beton geopolimer pada umur 28 hari untuk variasi PET 0%, 0,25%, 0,50% dan 0,75% adalah 2,40; 1,72; 2,13 dan 2,23. Nilai pengujian penetrasi klorida beton geopolimer pada umur 28 hari untuk variasi PET 0%; 0,25%; 0,50% dan 0,75% adalah 20,75 mm; 13,57 mm; 15,86 mm dan 14,17 mm. Nilai pengujian ketahanan terhadap abrasi beton geopolimer pada umur 28 hari untuk variasi PET 0%; 0,25%; 0,50% dan 0,75% adalah 81,50%; 76,40%; 71,69% dan 70,51%.
3. Model hubungan antara sifat mekanik dan sifat durabilitas beton geopolimer menunjukkan penambahan PET 0,25% memberikan hasil kompromi yang

paling optimal dimana penurunan sifat mekanik dalam batas toleransi sedangkan peningkatan sifat durabilitas berlangsung secara signifikan.

4. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan *fly ash*, RHA dan limbah plastik PET dalam pembuatan beton geopolimer memiliki potensi dalam pengembangan material beton dengan performa yang lebih baik untuk aplikasi perkerasan beton, khususnya untuk pada volume lalu lintas yang menengah dan rendah. Hal ini dapat digunakan sebagai alternatif teknologi konstruksi yang ramah lingkungan sehingga dapat menjadi solusi untuk mewujudkan pembangunan yang berkelanjutan.

6.2 Implikasi

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh limbah plastik PET pada sifat mekanik beton geopolimer, berikut beberapa saran yang bersifat rekomendasi dan implikasi praktis untuk pengembangan lebih lanjut:

1. Implikasi Kebijakan
 - a. Penelitian ini memberikan implikasi bagi kebijakan pengelolaan limbah plastik, khususnya dalam mendorong upaya daur ulang plastik menjadi material yang memiliki nilai tambah dalam sektor konstruksi.
 - b. Pemerintah dan pemangku kebijakan perlu mempertimbangkan regulasi yang mendukung penggunaan material daur ulang dalam proyek infrastruktur, termasuk beton geopolimer dengan limbah plastik.
 - c. Implikasi kebijakan juga mencakup perlunya standar dan pedoman teknis yang mengatur penggunaan limbah plastik dalam campuran beton, sehingga dapat memastikan keamanan dan kualitas konstruksi.
2. Implikasi untuk Pendidikan dan Penelitian Akademik
 - a. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang material konstruksi, khususnya terkait beton geopolimer dan pemanfaatan limbah plastik.
 - b. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa dan peneliti dalam mengembangkan inovasi material beton yang lebih ramah lingkungan

- c. Lembaga pendidikan dan penelitian disarankan untuk menjalin kerja sama dengan industri konstruksi dan pemerintah dalam mengembangkan dan menguji material inovatif yang dihasilkan dari penelitian ini.

6.3 Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh limbah plastik PET pada sifat mekanik beton geopolimer, berikut beberapa rekomendasi dan implikasi praktis untuk pengembangan lebih lanjut:

1. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya
 - a. Disarankan agar penelitian lebih lanjut dilakukan dengan variasi proporsi limbah plastik PET yang lebih luas untuk menentukan komposisi optimal yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton geopolimer.
 - b. Penelitian lanjutan juga perlu mengeksplorasi penggunaan jenis limbah plastik lainnya sebagai bahan penguat beton, sehingga dapat memperluas aplikasi limbah plastik dalam bidang konstruksi.
 - c. Perlu dilakukan pengujian jangka panjang terhadap durabilitas beton geopolimer dengan penambahan limbah plastik PET, khususnya dalam kondisi lingkungan yang ekstrem seperti paparan air laut dan suhu tinggi.
2. Rekomendasi untuk aplikasi praktis
 - a. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan material beton ramah lingkungan untuk konstruksi perkerasan jalan beton dan elemen struktural lainnya yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap retak.
 - b. Penggunaan limbah plastik PET sebagai bahan penguat beton diharapkan dapat mengurangi limbah plastik yang mencemari lingkungan sekaligus meningkatkan performa sifat durabilitas beton.
 - c. Disarankan agar industri konstruksi mulai mengadopsi teknologi beton geopolimer dengan bahan daur ulang seperti limbah plastik PET untuk mendukung pembangunan yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Shubbar, S. D., & Al-Shadeedi, A. S. (2017). Utilization Of Waste Plastic Bottles As Fine Aggregate In Concrete. *Kufa Journal of Engineering*, 8(2). <https://doi.org/10.30572/2018/kje/821171>.
- Abdallhmid, J. M., Ashour, A. F., & Sheehan, T. (2019). Long-term drying shrinkage of self-compacting concrete: Experimental and analytical investigations. In *Construction and Building Materials* (Vol. 202). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.152>.
- Abu-Saleem, M., Zhuge, Y., Hassanli, R., Ellis, M., Rahman, M. M., & Levett, P. (2021). Stress-strain behaviour and mechanical strengths of concrete incorporating mixed recycled plastics. *Journal of Composites Science*, 5(6). <https://doi.org/10.3390/jcs5060146>.
- ACI committee 318. (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11). In *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*.
- AEN/CTN 146. (2010). UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. *AENOR*, septiembre.
- Ahdal, A. Q., Amrani, M. A., Ghaleb, A. A. A., Abadel, A. A., Alghamdi, H., Alamri, M., Wasim, M., & Shameeri, M. (2022). Mechanical performance and feasibility analysis of green concrete prepared with local natural zeolite and waste PET plastic fibers as cement replacements. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01256>.
- Ahmed, H. Q., Jaf, D. K., & Yaseen, S. A. (2020). Flexural strength and failure of geopolymer concrete beams reinforced with carbon fibre-reinforced polymer bars. *Construction and Building Materials*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117185>
- Akçaözöğlu, S., Atiş, C. D., & Akçaözöğlu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>.
- Alaneme, G. U., Olonade, K. A., & Esenogho, E. (2023). Critical review on the application of artificial intelligence techniques in the production of geopolymer-concrete. In *SN Applied Sciences* (Vol. 5, Issue 8). <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05447-z>.
- Alextrianto, V., & Jaya Ekaputri, J. (2019). Pemanfaatan Kapur (CaCO₃) dan Lumpur Sidoarjo Sebagai Bahan Dasar Pembuatan Semen Portland. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(Vol 11, No 2 (2019)).
- Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Mohamed, A. M. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090>.
- Alqahtani, F. K. (2021). Sustainable green lightweight concrete containing plastic-based green lightweight aggregate. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ma14123304>.

- American Society for Testing and Material. (2013). ASTM C642-13: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, United States. *Annual Book of ASTM Standards, March*.
- American Society For Testing and Materials (ASTM). (2002). Astm C78/C78M - 02: *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)* ASTM International. USA, 04.02.
- Anas, M., Khan, M., Bilal, H., Jadoon, S., & Khan, M. N. (2022). Fiber Reinforced Concrete: A Review †. *Engineering Proceedings*, 22(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2022022003>.
- Apriliya, R., Bahar, S. B., & Sayfullah, Muh. (2021). Pengaruh Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Bahan Tambah Botol Plastik Kemasan Air Mineral Jenis Polyethylene Terephthalate (Pet). *SCEJ (Shell Civil Engineering Journal)*, 6(1). <https://doi.org/10.35326/scej.v6i1.1546>.
- Arifin, D. N., & Sanwani, E. (2023). Potential utilization of natural zeolite, fly ash and rice husk ash for geopolymer concrete production. *Mining of Mineral Deposits*, 17(3). <https://doi.org/10.33271/mining17.03.086>.
- Arunaditya P Singh. (2020). Experimental Study on Geopolymer Concrete with PET Fiber. *International Journal of Engineering Research And*, V9(09). <https://doi.org/10.17577/ijertv9is090464>
- Askar, M. K., Al-Kamaki, Y. S. S., & Hassan, A. (2023). Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete: A Review. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/polym15153320>.
- ASTM C39/C39M. (2003). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1. *ASTM Standard Book*, i(March).
- ASTM C496-96. (2004). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete. *American Society for Testing and Materials*.
- ASTM C618-17a. (2017). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C1585-13. (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes. *ASTM International*, 41(147).
- ASTM Standards. (2017). C138/C138M – 17a: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete 1. In *ASTM standards*.
- Bachtiar, E., Ihsan, M., Irfan, U. R., Setiawan, A., Makbul, R., Setiawan, A. M., & Tata, A. (2022). Utilization of Artificial Coarse Aggregate from Polyethylene Terephthalate Plastic Waste in Concrete. *International Review of Civil Engineering*, 13(1). <https://doi.org/10.15866/irece.v13i1.21122>
- Balaguru, P. (1992). Fiber-reinforced rapid-setting concrete. *Concrete International*, 14(2).
- B.E, Y., B. J., J., & S. T., O. (2022). Application of Palm Oil Fuel Ash as Source Material for Geopolymer Concrete Production. *International Journal Of Scientific Advances*, 3(4). <https://doi.org/10.51542/ijscia.v3i4.8>.
- Boko, I. A. (2021). Alat Automatic Pet Feeder Mixer Menggunakan Wemos D1 Berbasis Mobile Phone. In *Frontiers in Neuroscience* (Vol. 14, Issue 1).
- Budiningrum, D. S., Kustirini, A., Purnijanto, B., Mahasukma, D., & Utama, T. Y. (2021). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Pltu Tanjungjati B Jepara. *Bangun Rekaprima*, 7(2). <https://doi.org/10.32497/bangunrekaprima.v7i2.2997>.

- Dawood, A. O., AL-Khazraji, H., & Falih, R. S. (2021). Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00482>.
- Day, K. W. (2021). Properties of concrete. In *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*. <https://doi.org/10.4324/9780203967874-11>.
- Dharmawan, A. B. (2022). Kuat Lentur Beton Akibat Beban Terpusat (ASTM C-78). *Jurnal Ilmu Teknik*, 2(1).
- Duggal, P., Shisodia, A. S., Havelia, S., & Jolly, K. (2020). Use of Waste Plastic in Wearing Course of Flexible Pavement. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 38). https://doi.org/10.1007/978-981-13-7615-3_16.
- Dziljalal, F., Iswandi, A., & Aida, N. (2023). Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) pada Jalan Kapten Piere Tendean. *Journal of Research and Innovation in Civil Engineering as Applied Science (RIGID)*, 2(2). <https://doi.org/10.58466/rigid.v2i2.1169>.
- Evin, & Rachmansyah. (2023). The ratio between flexural strength to compressive strength of geopolymers concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1195(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1195/1/012034>.
- Farid, S. A., & Zaheer, M. M. (2023). Production of new generation and sustainable concrete using Rice Husk Ash (RHA): A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.034>.
- Firdaus, Safana Nada. (2023). Analisis Pengaruh Penambahan Rice Husk Ash Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbasis Fly Ash dan Ground Granulated Blast Furnace Slag. Other thesis, Institut Teknologi Sepuluh November.
- Ghaffari Moghaddam, F., Akbarpour, A., & Firouzi, A. (2022). Dynamic modulus of elasticity and compressive strength evaluations of modified reactive powder concrete (MRPC) by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(2). <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1869020>.
- Gluth, G. J. G., Arbi, K., Bernal, S. A., Bondar, D., Castel, A., Chithiraputhiran, S., Dehghan, A., Dombrowski-Daube, K., Dubey, A., Ducman, V., Peterson, K., Pipilikaki, P., Valcke, S. L. A., Ye, G., Zuo, Y., & Provis, J. L. (2020). RILEM TC 247-DTA round robin test: carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 53(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1449-3>.
- Gouasmi, M. T., Benosman, A. S., & Taïbi, H. (2019). Improving the properties of waste plastic lightweight aggregates-based composite mortars in an experimental saline environment. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0089-1>.
- Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. (1967). *ACI Journal Proceedings*, 64(8). <https://doi.org/10.14359/7576>.
- Gunawan, A. (2016). Pengaruh Pencampuran Dua Jenis Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton. *Inersia: Jurnal Teknik Sipil*, 8(1).
- Guo, K., Miao, H., Liu, L., Zhou, J., & Liu, M. (2019). Effect of graphene oxide on chloride penetration resistance of recycled concrete. *Nanotechnology Reviews*, 8(1). <https://doi.org/10.1515/ntrev-2019-0059>.

- Habert, G., D'Espinose De Lacaillerie, J. B., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymers based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>.
- Hernadi, A., Sahara, R., & Dewi, S. U. (2021). Perbandingan Kekuatan Kolom Berdasarkan SNI 2847:2013 dan SNI 2847:2019. *Borneo Engineering : Jurnal Teknik Sipil*, 5(3). <https://doi.org/10.35334/be.v5i3.1661>.
- Iguchi, Y., Yamada, T., Sakata, O., Yoshino, M., & Nagasaki, T. (2020). Fabrication of (Pb_{0.9}Sr_{0.1})TiO₃/SrTiO₃ artificial superlattice thin films and their electromechanical response. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 128(8). <https://doi.org/10.2109/jcersj2.20022>.
- Islam, M. J. (2022). Comparative Study of Concrete with Polypropylene and Polyethylene Terephthalate Waste Plastic as Partial Replacement of Coarse Aggregate. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4928065>.
- Jagad, S. T. S., Mulyono, A. T., & Santosa, W. (2020). Penyebab Badan Jalan Nasional Ambles Di Provinsi Jawa Barat. *Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia*, 6(2).
- Janfeshan Araghi, H., Nikbin, I. M., Rahimi Reskati, S., Rahmani, E., & Allahyari, H. (2015). An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.037>.
- Jenkins, N. T., & Eagar, T. W. (2005). Chemical analysis of welding fume particles. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 84(6).
- Jiang, J., Zhang, D., Gong, F., & Zhi, D. (2022). Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity for Cement, Mortar, and Concrete through a Multiscale Homogenization Approach. *Materials*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/ma15093241>.
- Karyawan Salain, I. M. A., Wiryasa, N. M. A., & Adi Pamungkas, I. N. M. M. (2021). KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER MENGGUNAKAN ABU TERBANG. *JURNAL SPEKTRAN*, 9(1). <https://doi.org/10.24843/spektran.2021.v09.i01.p09>.
- Khalid Ali, O., Ismail Al-Hadithi, A., & Tareq Noaman, A. (2022). Flexural performance of layered PET fiber reinforced concrete beams. *Structures*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.007>.
- Kishore, K. (2023). Geopolymer concrete and its strength influencing variables. *Materials Today: Proceedings*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.225>.
- Kosim, Ibrahim, Sartika, T., & Yustika Savira, M. (2021). Pengaruh Kuat Tekan Beton Dengan Menggunakan Bahan Limbah Cup Plastik. *Pilar Jurnal Teknik Sipil*, 16(01).
- Krishnam Raju, G. L. V., Vamsi Nagaraju, T., Jagadeep, K., Venkata Rao, M., & Chanakya Varma, V. (2023). Waste-to-energy agricultural wastes in development of sustainable geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.
- Kumar, A., Berwal, P., Al-Mansour, A. I., Khan, M. A., Alam, S., Lee, S. M., Malik, A., & Iqbal, A. (2022). Impact of Crumb Rubber Concentration and Plastic Coated Aggregates on the Rheological Performance of Modified

- Bitumen Asphalt. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14073907>.
- Laskar, A. I. (2009). Correlating slump, slump flow, vebe and flow tests to rheological parameters of high-performance concrete. *Materials Research*, 12(1). <https://doi.org/10.1590/S1516-14392009000100009>.
- Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., & Fini, E. H. (2022). Polyethylene terephthalate (PET) waste plastic as natural aggregate replacement in geopolymer mortar production. *Journal of Cleaner Production*, 375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134083>.
- Manikandan, P., & Vasugi, V. (2021). A Critical Review of Waste Glass Powder as an Aluminosilicate Source Material for Sustainable Geopolymer Concrete Production. In *Silicon* (Vol. 13, Issue 10). <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00929-w>.
- Maryam, M., & Putra, K. H. (2020). Analisis Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Bina Marga (Studi Kasus: Jalan Luar Lingkar Timur Surabaya). *Jurnal Teknologi Dan Manajemen*, 1(2). <https://doi.org/10.31284/j.jtm.2020.v1i2.1113>
- Maryoto, A. (2018). Proposed concrete compaction method using an electrical internal vibrator: A review of compaction standard for concrete in laboratory according to SNI 2493:2011. *MATEC Web of Conferences*, 195. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819501003>.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties. *Journal of Cleaner Production*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.313>
- Modesta, E., & Zaidir. (2019). Pengaruh Penggunaan Botol Plastik Polyethylene Terephthalate (Pet) Sebagai Tambahan Serat Terhadap Kekuatan Beton. *ACE Conference*.
- Mohammed, T., & Ikram A. Saeed, I. A. S. (2021). Production Of Geopolymer Concrete From Local Materials. *Kufa Journal of Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.30572/2018/kje/090412>
- Mohseni, E., Kazemi, M. J., Koushkbaghi, M., Zehtab, B., & Behforouz, B. (2019). Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina. *Construction and Building Materials*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.067>.
- Mor, S., Aneja, R., Madan, S., & Ghimire, M. (2023). Kyoto Protocol and Paris Agreement: Transition from Bindings to Pledges – A Review. *Millennial Asia*. <https://doi.org/10.1177/09763996221141546>.
- Morissette, S. L., Soukasene, S., Levinson, D., Cima, M. J., & Almarsson, Ö. (2003). Elucidation of crystal form diversity of the HIV protease inhibitor ritonavir by high-throughput crystallization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(5). <https://doi.org/10.1073/pnas.0437744100>.
- Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2023). Plastics and the Environment. In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 48). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112522-072642>.
- Nasruddin, Sampebulu, V., & Mushar, P. (2020). Value of concrete compressive strength with variation of candlenut shell applicated to plate on a non-destructive

- test using UPV. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 575(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/575/1/012167>.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2015). Concrete Technology. A. M. Neville & J. J. Brooks. In *JNCCN Journal of the National Comprehensive Cancer Network* (Vol. 13).
- Nguyen, D. B., Wu, C. J., & Liao, W. C. (2023). Experimental Study and Development of Prediction Model of Self-Compacting Concrete Incorporating Fly Ash on Compressive Creep Behaviour. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 21(8). <https://doi.org/10.3151/jact.21.596>.
- Nyale, S. M., Babajide, O. O., Birch, G. D., Böke, N., & Petrik, L. F. (2013). Synthesis and Characterization of Coal Fly Ash-based Foamed Geopolymer. *Procedia Environmental Sciences*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.098>
- Ofori, P., McNally, C., & Hodgkinson, J. (2023). Coal Mining Waste As A Resource For Recovery Of Rare-Earth Elements And For Geopolymer Concrete Production. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 24(8). <https://doi.org/10.1615/INTERJENERCLEANENV.2023044844>
- Orie, O. U., & Olusesi, O. J. (2023). Effect Of Partial Replacement Of Aggregate With Granulated Polyethylene Terephthalate (PET) On Compressive Strength Of Concrete. *Nigerian Journal of Technology*, 42(1). <https://doi.org/10.4314/njt.v42i1.5>
- Oyejobi, D. O., Adewuyi, A. P., Hassan, I. A., Suleiman, I., Oyebanji, Y. O., & Yusuf, S. O. (2022). Performance evaluation of fly-ash based geopolymer mortar. *Materials Today: Proceedings*, 86(C). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.292>.
- Park, J. K., & Kim, M. O. (2020). Mechanical properties of cement-based materials with recycled plastic: A review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 21). <https://doi.org/10.3390/su12219060>.
- Passuello, A., Rodriguez, E. D., Hirt, E., Longhi, M., Bernal, S. A., Provis, J. L., & Kirchheim, A. P. (2015). Deflection analysis of flexible pavements-Materials and Test Division Report. *Construction and Building Materials*, 29(1).
- Qaidi, S., Al-Kamaki, Y., Hakeem, I., Dulaimi, A. F., Özkılıç, Y., Sabri, M., & Sergeev, V. (2023). Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1101146>.
- Rabadia, K., & Aslani, F. (2023). Development of creep and shrinkage prediction models for recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 24(5). <https://doi.org/10.1002/suco.202300072>.
- Ramakrishnan, A., & Jegan, J. (2023). Surface Modified Synthetic Plastic Aggregate for Concrete – Experimental and Analytical Studies. *Medziagotyra*, 29(1). <https://doi.org/10.5755/j02.ms.31124>.
- Rangan, P. R., Tumpu, M., Mansyur, & Mabui, D. S. (2023). Assessment of Fly Ash-Rice Straw Ash-Laterite Soil Based Geopolymer Mortar Durability. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 9(6). <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-06-012>.
- Roshan, N., Ghalehnovi, M., & Pakzad, S. S. (2023). Recycled steel fiber for fiber reinforced concrete production: fresh and hardened properties, cost, and ecological assessments. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00270-w>.

- Saikia, N., & De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 34). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>.
- Salman, S. D., Jubier, N. J., & Al-Zubaidi, A. B. (2023). Geopolymer Concrete Production by Using Nano-Bauxite Binder. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10). <https://doi.org/10.12911/22998993/169182>.
- Samingthong, W., Hoy, M., Ro, B., Horpibulsuk, S., Yosthasaen, T., Suddepong, A., Buritatum, A., Yaowarat, T., & Arulrajah, A. (2023). Natural Rubber Latex-Modified Concrete with PET and Crumb Rubber Aggregate Replacements for Sustainable Rigid Pavements. *Sustainability (Switzerland)*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/su151914147>.
- Sandya, Y., Prihantono, & Musalamah, S. (2019). Penggunaan Abu Sekam Padi Sebagai Pengganti Semen Pada Beton Geopolimer. *Educ. Build. J. Pendidik. Tek. Bangunan Dan Sipil*, 5(2).
- Sarfaraz Ali, M., & Sachan, A. K. (2022). A review on the durability and applicability of Geopolymer concrete from the recent research studies. *Materials Today: Proceedings*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.302>.
- Saxena, R., Gupta, T., Sharma, R. K., Chaudhary, S., & Jain, A. (2020). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing PET waste. *Scientia Iranica*, 27(1). <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20334>.
- Singh, B., Rahman, M. R., Paswan, R., & Bhattacharyya, S. K. (2016). Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.008>.
- Singh, N. B. (2018). Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. In *Minerals* (Vol. 8, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/min8070299>.
- Skariah Thomas, B., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S. N., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Hamada, H. M. (2022). Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. In *Cleaner Materials* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100056>.
- SNI. (1997). SNI 03-4431-1997. *Nucl. Phys.*, 13(1).
- SNI-1974. (2011). Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder, SNI 1974-2011. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.
- Solikin, M. (2021). Analisis Pemakaian Kombinasi Fly Ash Tipe F Dan Slag 1:1 Pada Beton Geopolymer Dengan Na₂SiO₃ Dan NaOH Sebagai Alkali Aktivator: Sebuah Kajian Literatur. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, 14(1). <https://doi.org/10.23917/dts.v14i1.15274>.
- Swetha, M., & Harihanandh, M. (2023). Behaviour of high-density concrete and low-density concrete in alkaline environment. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.242>.
- Szpetulski, J., Stawiski, B., & Witkowski, P. (2022). Tests Regarding the Effect of Dispersed Reinforcement Made with a Prototype Device from PET Beverage Bottles on the Strength Properties of Concrete. *Energies*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072415>.
- Tumpu, M., & Mabui, D. S. (2022). Effect of hydrated lime (Ca(OH)₂) to compressive strength of geopolymer concrete. *AIP Conference Proceedings*, 2391. <https://doi.org/10.1063/5.0086702>.
- Uche, C. K. A., Abubakar, S. A., Nnamchi, S. N., & Ukagwu, K. J. (2023). Polyethylene terephthalate aggregates in structural lightweight concrete: a meta-

- analysis and review. In *Discover Materials* (Vol. 3, Issue 1).
<https://doi.org/10.1007/s43939-023-00060-8>.
- Wahyudi, Y., Andi Marini Indriani, & Gunaedy Utomo. (2024). Analisis Kuat Tekan Beton Modifikasi Polyethylene Terephthalate (PET). *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS)*, 1(6).
<https://doi.org/10.62603/konteks.v1i6.133>.
- Zhou, X., Bai, L., Rong, H., Fan, X., Zheng, J., & Geng, Y. (2024). An improved approach for the continuous retardation spectra of concrete creep and applications. *Frontiers in Materials*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1340883>.