

SKRIPSI

**EVALUASI DURABILITAS BETON GEOPOLIMER DENGAN
PENAMBAHAN PLASTIK PET**

*Evaluation of the Durability of Geopolymer Concrete with the
Addition of PET Plastic*

Disusun dan diajukan oleh:

**HERLI HERMANSAH
D011 20 1108**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

EVALUASI DURABILITAS BETON GEOPOLIMER DENGAN PENAMBAHAN PLASTIK PET

Disusun dan diajukan oleh

Herli Hermansah
D011201108

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 11 September 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Ketua Program Studi,



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

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng
NIP 198702282019031005

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Herli Hermansah
NIM : D011201108
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Evaluasi Durabilitas Beton Geopolimer Dengan Penambahan Plastik PET}

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

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

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

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

Gowa, 11 September 2024

Yang Menyatakan


Herli Hermansah

ABSTRAK

HERLI HERMANSAH. *Evaluasi Durabilitas Beton Geopolimer Dengan Penambahan Plastik PET (dibimbing oleh Fakhruddin)*

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi durabilitas beton geopolimer dengan penambahan serat plastik PET (Polyethylene Terephthalate). Beton geopolimer yang digunakan berbasis abu terbang (fly ash) dan abu sekam padi (Rice Husk Ash - RHA), dengan variasi penambahan serat PET sebesar 0%, 0.25%, 0.50%, dan 0.75% dari volume beton. Uji laboratorium yang dilakukan meliputi sorptivitas, porositas, penetrasi klorida, dan abrasi untuk menilai efektivitas serat PET dalam meningkatkan durabilitas beton geopolimer. Hasil uji sorptivitas menunjukkan bahwa penambahan serat PET dapat menurunkan nilai sorptivitas beton. Beton dengan penambahan 0.25% serat PET (GA) mengalami penurunan sorptivitas sebesar 28.33% dibandingkan beton tanpa serat PET (GN), menandakan kemampuan penyerapan air yang lebih rendah, yang berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap faktor lingkungan. Namun, uji porositas menunjukkan bahwa penambahan serat PET cenderung meningkatkan porositas beton. Sampel dengan penambahan 0.50% serat PET (GB) mengalami peningkatan porositas sebesar 33.8%, mungkin karena serat PET mengurangi kompaksi matriks beton, sehingga lebih banyak ruang pori terbentuk. Uji penetrasi klorida menunjukkan bahwa penambahan serat PET mengurangi kedalaman penetrasi klorida. Beton dengan 0.25% serat PET (GA) menunjukkan penurunan kedalaman penetrasi klorida sebesar 34.60%, menandakan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi tulangan. Hasil uji abrasi menunjukkan bahwa penambahan serat PET meningkatkan ketahanan terhadap keausan. Beton dengan 0.75% serat PET (GC) mengalami penurunan keausan sebesar 13.49%, menandakan ketahanan permukaan yang lebih baik. Secara keseluruhan, penambahan serat PET meningkatkan durabilitas beton geopolimer, terutama dalam hal sorptivitas, penetrasi klorida, dan abrasi, meskipun ada peningkatan porositas.

Kata Kunci: Beton Geopolimer, Serat PET, Durabilitas

ABSTRACT

HERLI HERMANSAH. *Evaluation of the Durability of Geopolymer Concrete with the Addition of PET Plastic* (supervised by Fakhruddin)

This research aims to evaluate the durability of geopolymer concrete with the addition of PET (Polyethylene Terephthalate) plastic fibers. The geopolymer concrete used is based on fly ash and rice husk ash (RHA), with PET fiber additions of 0%, 0.25%, 0.50%, and 0.75% by volume of the concrete. Laboratory tests conducted include sorptivity, porosity, chloride penetration, and abrasion to assess the effectiveness of PET fibers in improving the durability of geopolymer concrete. The sorptivity test results show that the addition of PET fibers can reduce the sorptivity value of the concrete. Concrete with 0.25% PET fibers (GA) experienced a 28.33% reduction in sorptivity compared to concrete without PET fibers (GN), indicating a lower water absorption capability, which potentially enhances resistance to environmental factors. However, the porosity test indicates that the addition of PET fibers tends to increase the porosity of the geopolymer concrete. The sample with 0.50% PET fibers (GB) showed a 33.8% increase in porosity, possibly due to PET fibers reducing the compaction of the concrete matrix, allowing more pore space to form. The chloride penetration test shows that adding PET fibers reduces the depth of chloride penetration. Concrete with 0.25% PET fibers (GA) showed a 34.60% reduction in chloride penetration depth, indicating better resistance to rebar corrosion. The abrasion test results show that PET fibers increase abrasion resistance. Concrete with 0.75% PET fibers (GC) experienced a 13.49% reduction in wear, indicating better surface durability. Overall, the addition of PET fibers enhances the durability of geopolymer concrete, particularly in terms of sorptivity, chloride penetration, and abrasion, although there is an increase in porosity.

Keywords: Geopolymer Concrete, PET Fibers, Durability

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	15
1.1 Latar Belakang	15
1.2 Rumusan Masalah.....	17
1.3 Tujuan Penelitian	17
1.4 Manfaat Penelitian	18
1.5 Ruang Lingkup.....	18
1.6 Sistematika Penulisan	18
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	20
2.1 Penelitian Terdahulu	20
2.2 Beton Geopolimer.....	22
2.3 Bahan Penyusun Beton Geopolimer	24
2.3.1 Abu Terbang (<i>fly ash</i>).....	24
2.3.2 Agregat	24
2.3.2.1 Agregat Kasar	25
2.3.2.2 Agregat Halus	26
2.3.3 <i>Rice Husk Ash</i> (RHA).....	27
2.3.4 <i>Poly Ethylne Terephthalate</i> (PET).....	28
2.3.5 Alkali Aktivator.....	29
2.3.6 Bahan Tambah (<i>Admixtures</i>).....	30
2.3.6.1 <i>Superplasticizer</i>	30
2.3.6.2 <i>Retarder</i>	30
2.4 <i>Deterioration</i> (Kerusakan) pada Beton.....	31
2.5 <i>Pore Connectivity</i> (Konektivitas Pori).....	33
2.6 Tingkat Penyerapan Air (<i>Sorptivity</i>).....	34
2.7 Pengujian Porositas (<i>Porosity</i>).....	35
2.8 Kedalaman Penetrasi Klorida (<i>Chloride Penetration Depth</i>).....	35
2.9 Pengujian Abrasi pada Beton.....	36
2.10 Implementasi Beton Geopolimer	37
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	39
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	39
3.2 Tahapan Penelitian.....	39
3.3 Jenis Penelitian dan Sumber Data.....	40
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	40
3.5 Pemeriksaan Karakteristik Agregat	42
3.5.1 Agregat Halus	42

3.5.2 Agregat Kasar	42
3.6 Komposisi Campuran Beton Geopolimer (Mix Design)	43
3.7 Pembuatan Benda Uji.....	44
3.8 Metode Pengujian <i>Slump Test</i>	44
3.9 Perawatan Benda Uji.....	45
3.10 Pengujian Benda Uji	45
3.10.1 Kuat Tekan.....	46
3.10.2 Pengujian <i>Sorptivity</i> Beton	46
3.10.3 Pengujian Porositas Beton	48
3.10.4 Pengujian <i>Chloride Penetration</i> Beton.....	50
3.11.5 Pengujian Abrasi Beton	51
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Pemeriksaan Karakteristik Material.....	53
4.1.1 Karakteristik Agregat Kasar	53
4.1.2 Karakteristik Agregat Halus	54
4.2 Pengujian Kuat Tekan	55
4.3 <i>Sorptivity</i> Beton Geopolimer	57
4.4 Porositas Beton Geopolimer	58
4.5 Hubungan Antara Kuat Tekan dengan Nilai Porositas Beton Geopolimer	59
4.6 <i>Chloride Penetration</i> pada Beton Geopolimer	61
4.7 Abrasi Beton Geopolimer	63
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Penelitian terkait	20
Gambar 2. Keuntungan Potensial Beton Geopolimer dalam Konstruksi Berkelanjutan	23
Gambar 3. Struktur RHA pada suhu 800°C.....	27
Gambar 4. Proses geopolimerisasi	29
Gambar 5. Skematik dari berbagai probabilitas konektivitas.....	33
Gambar 6. Skema pengujian.....	35
Gambar 7. Pengukuran kedalaman penetrasi klorida	36
Gambar 8. Diagram alir penelitian	40
Gambar 9. Material beton geopolimer (1. <i>Fly Ash</i> ; 2. RHA; 3. Agregat Halus; 4. Agregat Kasar; 5. NaOH; 6. Na ₂ SiO ₃ ; 7. PET; 8. <i>Superplastizer</i> ; 9. <i>Retarder</i>)	42
Gambar 10. Benda Uji Balok 15cm x 10cm x 5cm.....	44
Gambar 11. Pemeriksaan <i>slump flow</i>	45
Gambar 12. Curing udara benda uji	45
Gambar 13. Pengujian kuat tekan beton	46
Gambar 14. <i>Set Up</i> Pengujian <i>Sorptivity</i> Beton	47
Gambar 15. Proses pengujian <i>sorptivity</i> beton geopolimer	48
Gambar 16. Proses pengujian porositas beton; (a) pemanasan beton dengan oven, (b) perendaman beton; (c) perebusan beton; (d) Penimbangan beton dalam air	49
Gambar 17. <i>Set Up</i> Pengujian <i>Chloride Penetration</i> Beton.....	50
Gambar 18. Proses pengujian <i>chloride penetration</i> beton; (a) pemanasan beton dengan oven, (b) menyimpan beton pada wadah tertutup; (c) perendaman beton; (d) penyemprotan dengan AgNO ₃	51
Gambar 19. Alat <i>Los Angeles</i>	52
Gambar 20. Kuat tekan rata-rata umur 28 hari	56
Gambar 21. Hubungan I dengan \sqrt{t} Beton Geopolimer Umur 28 Hari	57
Gambar 22. Hubungan kuat tekan dengan porositas.....	60
Gambar 23. Perhitungan kedalaman penetrasi klorida.....	61
Gambar 24. Hubungan kedalaman penetrasi klorida, porositas, dan sorptiviti...	63
Gambar 25. Perbandingan jumlah putaran terhadap persen keausan	63

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kandungan senyawa kimia <i>fly ash</i>	24
Tabel 2. Gradasi agregat kasar	25
Tabel 3. Gradasi agregat halus	26
Tabel 4. Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	42
Tabel 5. Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar	42
Tabel 6. Rancangan campuran beton geopolimer	43
Tabel 7. Jenis Pengujian dan standar pengujian	45
Tabel 8. Jadwal waktu dan toleransi pengujian	47
Tabel 9. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar.....	53
Tabel 10. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus.....	54
Tabel 11. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan 28 hari.....	55
Tabel 12. Nilai porositas beton geopolimer	58
Tabel 13. Nilai kedalaman penetrasi pada beton geopolimer	61

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
a	Luas area yang terkena air pada spesimen dalam mm ²
A	Berat kering oven benda uji dalam kg
AgNO ₃	<i>Silver nitrate</i>
ASR	Alkali Silica Reaction
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
C	Berat beton kondisi SSD dalam kg
CAF	<i>Coarse aggregate filler</i>
d	densitas air dalam g/mm ³
D	Berat beton dalam air dalam kg
FA	<i>Fly ash</i> atau abu terbang
GA	Beton Geopolimer PET 0.25%
GB	Beton Geopolimer PET 0.50%
GC	Beton Geopolimer PET 0.75%
GN	Beton Geopolimer PET 0.00%
GPC	<i>Geopolymer Concrete</i>
I	Penyerapan
K ₂ SiO ₃	Kalium Silikat
KOH	Kalium Hidroksida
m _t	Perubahan massa spesimen dalam gram pada waktu t
n	Porositas benda uji
Na ₂ SiO ₃	Natrium Silikat

NaCl	Natrium klorida
NaOH	Natrium Hidroksida
NASH	Natrium Aluminosilikat Hidrat
PET	<i>Polyethylne terephthalate</i> atau Limbah plastik
RCA	<i>Recycled concrete aggregate</i>
RFA	<i>Recycled fine aggregate</i>
RHA	<i>Rice Husk Ash</i> atau Abu sekam padi
SNI	Standar nasional indonesia
SSD	<i>Saturated surface dry</i>
w ₀	Berat benda uji semula
w ₁	Berat benda uji setelah pengujian

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengujian Porosity	69
Lampiran 2. Pengujian Sorptivity	70
Lampiran 3. Pengujian Chloride Penetration	70
Lampiran 4. Pengujian Abrasi.....	71

KATA PENGANTAR

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

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

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.** dan **Dr. Eng. Bambang Bakri, ST, MT.**, selaku ketua dan sekretaris Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Dr. Eng. Fakhrudin, ST, M.Eng.**, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, S.T., M.eng.**, dan **Ibu Prof. Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.**, selaku dosen Laboratorium Riset Rekayasa Perkuatan Struktur dan dosen penguji yang telah memberikan ilmu dan motivasi untuk penulis.
5. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kepada kedua orang tua saya yang tercinta, ibunda **Lilik Purati** kata-kata tak akan pernah cukup untuk mengungkapkan rasa terima kasih dan cinta yang mendalam. Dari kecil hingga dewasa, kalian telah menjadi pilar yang kokoh, menyinari setiap langkah saya dengan kasih sayang, semangat, dan teladan. Ibu, dengan doa-doa dan kelembutanmu, engkaulah yang selalu membuat saya percaya pada diri sendiri. Skripsi ini adalah bukti kehormatan dan penghargaan atas segala pengorbanan dan cinta yang telah kalian berikan. Terima kasih, dari lubuk hati yang paling dalam.
2. Kepada Keluarga Laboratorium Struktur dan Bahan **Kak Hasan, Mitha, Syawal, Fadhil, Acha, dan Valdo** yang telah kebersamai penulis dalam segala keadaan dan telah melalui banyak momen bersama.
3. Kepada Keluarga KKN 111 Inovasi Teknologi Tepat Guna Bantaeng, **Lala** yang telah menemani penyusun selama menyusun skripsi, **Pawad, Yabol, Nunu, Nanda, Mber, Rini** dan **Lanny** terima kasih atas kenangan indah dan dukungan tanpa batasnya.
4. Rekan-rekan di **RM C-09** yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir.
5. Teman kuliah penulis (**adu nazib**) yang selalu menemani, menyemangati, dan menghibur penulis
6. Saudara-saudari **ENTITAS 2021**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Angkatan 2020 yang senantiasa memberikan warna serta pengalaman yang sangat berharga selama masa perkuliahan.
7. Dan untuk seluruh orang yang turut membantu dan mendukung penulis dalam perjalanan menyelesaikan skripsi ini, meskipun tak bisa penulis sebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas dukungan dan kontribusi tak terhingga yang telah diberikan. Semoga Allah membalas dengan kebaikan yang berlipat ganda.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kepada pembaca

kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

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

Gowa, 11 September 2024

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan luas wilayah yang sangat besar, memiliki jaringan jalan yang sangat vital untuk mendukung mobilitas penduduk dan distribusi barang. Infrastruktur jalan di Indonesia mencakup berbagai jenis perkerasan, yaitu perkerasan lentur (aspal) dan perkerasan kaku (beton). Jalan merupakan urat nadi perekonomian nasional, menghubungkan berbagai daerah dan mendukung aktivitas ekonomi, sosial, dan budaya.

Perkerasan jalan beton menjadi salah satu pilihan utama di berbagai proyek infrastruktur karena kekuatannya yang tinggi dan umur layanannya yang panjang. Namun, penggunaan perkerasan beton juga menghadapi berbagai tantangan, termasuk masalah durabilitas seperti retak, reaksi alkali-silika, dan korosi tulangan. Oleh karena itu, penelitian dan inovasi dalam teknologi perkerasan terus dilakukan untuk meningkatkan kualitas dan keawetan jalan beton di Indonesia.

Permasalahan durabilitas perkerasan jalan menggunakan beton konvensional seringkali mencakup retak akibat beban lalu lintas berat, pengaruh cuaca ekstrem, dan reaksi alkali-silika (ASR). Kondisi ini menyebabkan penurunan performa struktural dan fungsional jalan, serta meningkatkan biaya pemeliharaan. Beton konvensional juga rentan terhadap penetrasi air dan bahan kimia yang dapat mempercepat korosi tulangan dan degradasi material. Perkembangan teknologi beton, seperti penggunaan bahan aditif dan desain campuran yang lebih tahan lama, terus diupayakan untuk mengatasi masalah ini (Taha et al., 2021).

Oleh karena itu terdapat bahan lain pengganti beton konvensional, yaitu beton geopolimer yang memiliki durabilitas yang lebih tinggi. Durabilitas beton geopolimer disebabkan oleh pembentukan gel natrium aluminosilikat hidrat (N-A-S-H) melalui proses geopolimerisasi yang melibatkan tiga tahap: destruksi-koagulasi, koagulasi-kondensasi, dan kondensasi-kristalisasi. Proses ini dimulai dengan degradasi struktur aluminosilikat oleh ion hidroksida dari aktivator alkali, yang kemudian membentuk oligomer aluminosilikat. Proses ini berlanjut sampai terbentuknya gel N-A-S-H yang mengkristal seiring waktu, bergantung pada campuran geopolimer dan suhu pengawetan (Wong, 2022).

Pada tahun 1978, Prof. Dzavidovits mengatasi masalah emisi karbon yang dihasilkan dari pembuatan semen yang digunakan sebagai bahan dasar beton dengan mengembangkan beton geopolimer yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Beton geopolimer dapat diproduksi dengan menggunakan limbah hasil industri atau pozolan alami bersama dengan aktivator alkali. Aktivator alkali dapat berupa natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) atau kalium hidroksida (KOH) dan kalium silikat (K_2SiO_3). Beberapa produk sampingan industri yang umum adalah abu terbang (*fly ash*), slag, dan asap silika (silica fume), di antara produk limbah lainnya. Abu terbang telah diakui memiliki sifat pozolanik dan kaya akan alumina dan silikat. Abu terbang telah digunakan dalam pembuatan beton geopolimer sebagai pengganti semen Portland yang biasa digunakan (Kishore, 2023).

Namun, beton geopolimer memiliki daktilitas yang rendah. Sehingga diperlukan sebuah bahan tambah untuk meningkatkan daktilitas beton. Serat plastik PET (*Polyethylene terephthalate*) menunjukkan karakteristik mekanis seperti tarik tinggi dan kekuatan tarik, daya tahan dan ulet perilaku ulet yang telah terbukti meningkatkan mekanik beton sifat-sifat seperti kekuatan lentur, ketangguhan, penyerapan energi, dan ketahanan benturan karena efek penghubungnya yang meningkatkan sehingga mengurangi perambatan retak dan menawarkan beton dengan daktilitas yang jauh lebih tinggi. Banyak faktor yang memainkan peran dominan dalam menentukan keuntungan peningkatan mekanis yang dicapai dengan menambahkan serat PET ke dalam beton, termasuk kekuatan tarik serat, fraksi volume, dan panjang serat, ukuran dan bentuk (Mouna et al., 2024).

Salah satu pemanfaatan beton geopolimer yang paling sering digunakan adalah sebagai bahan perkerasan jalan. Perkerasan beton kaku sering digunakan dalam konstruksi jalan raya karena dapat memberikan kekuatan dan ketahanan yang baik. Perkerasan ini memiliki kelebihan dalam alokasi muatan di atas tanah dasar dan strukturnya lebih dangkal dibandingkan dengan jalan aspal yang fleksibel. Namun, lempengan perkerasan jalan ini dapat mengalami kerusakan akibat lintasan berulang dan beban berat. Untuk meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan perkerasan beton, dilakukan pengembangan dengan menggunakan bahan sumber seperti RHA (*rice husk ash*) yang kaya silikon dan campuran natrium hidroksida serta natrium silikat sebagai aktivator basa pada beton geopolimer. Selain itu, penambahan serat basalumina juga meningkatkan ketahanan lelah perkerasan

beton. Metode pembangunan ini bertujuan untuk menciptakan perkerasan jalan yang lebih tahan lama dan ramah lingkungan (Abbass & Singh, 2021).

Dari uraian diatas, dilakukan penelitian beton geopolimer berbasis abu terbang (*fly ash*), *Rice Husk Ash* (RHA) dengan penambahan serat plastik PET pada variasi 0.00%, 0.25%, 0.50%, dan 0.75% terhadap volume beton. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui durabilitas beton geopolimer dengan menggunakan *fly ash*, RHA, dengan penambahan serat plastik PET maka peneliti mengangkat tugas akhir yang berjudul **“EVALUASI DURABILITAS BETON GEOPOLIMER DENGAN PENAMBAHAN PLASTIK PET”**.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Berapa besar nilai *Sorptivity* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET ?
2. Berapa besar nilai *Porosity* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET ?
3. Berapa besar nilai *Chloride Penetration* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET ?
4. Berapa besar nilai *Abrasion* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian pada rumusan masalah diatas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengevaluasi nilai *Sorptivity* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET
2. Untuk mengevaluasi nilai *Porosity* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET
3. Untuk mengevaluasi *Chloride Penetration* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET
4. Untuk mengevaluasi nilai *Abrasion* pada beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Mengetahui manfaat penggunaan *fly ash* yang dihasilkan melalui limbah pembakaran batu bara yang bisa dijadikan sebagai bahan alternatif pencampuran beton *geopolymer*.
2. Evaluasi terhadap durabilitas beton *geopolymer* dengan campuran *fly ash* (FA) dan *rice husk* (RHA) dengan variasi serat plastik PET melalui pengujian *sorptivity*, *porosity*, *chloride penetration test*, dan *abrasion*.

1.5 Ruang Lingkup

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

1. Penelitian bersifat eksperimental dan dilakukan di laboratorium yang menggunakan standar sesuai dengan ASTM dan SNI;
2. *Fly ash* yang digunakan adalah limbah batubara PLTU Jeneponto milik PT.Bosowa Energi;
3. Pasir dan kerikil yang digunakan berasal dari PT. Wijaya Karya Beton, Tbk.
4. *Rice husk ash* (RHA) yang digunakan diperoleh dari pembakaran tungku di Danau Mawang, Gowa.
5. PET yang digunakan berasal dari cacahan limbah plastik dengan ukuran panjang 20 mm dan lebar 3-5 mm. Adapun variasi PET yang digunakan adalah 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap berat beton geopolimer.

1.6 Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini diuraikan secara sistematis tentang teori, pemikiran, dan hasil penelitian terdahulu yang memiliki hubungan dengan penelitian ini. Bab ini memberikan kerangka dasar mengenai konsep dan teori yang akan digunakan untuk dasar atau landasan bagi penelitian yang akan dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

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

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini berisi pembahasan *sorptivity*, *porosity*, *chloride peneration test*, dan abrasi beton.

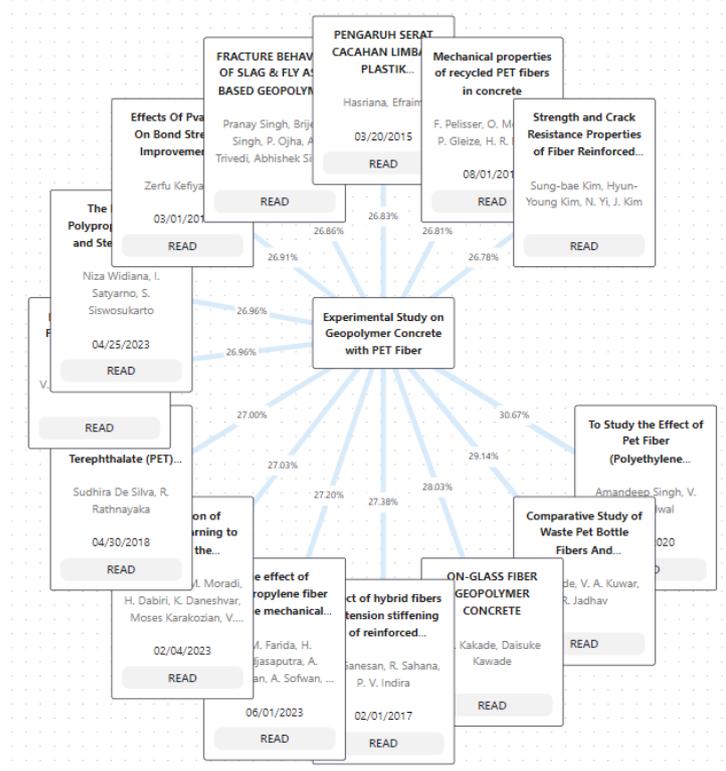
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Ojha & Aggarwal, 2023 menyatakan bahwa daya tahan beton dapat diartikan sebagai kemampuan untuk menahan keausan dengan tetap mempertahankan karakteristik yang diinginkan. Daya tahan beton bervariasi tergantung pada kegunaannya. Daya tahan kinerja beton adalah persyaratan penting, yang tergantung pada *diffusivity*, *permeability*, dan *sorptivity*. Karakteristik-karakteristik ini dapat dinilai dengan menempatkan beton melalui berbagai tes, seperti *air water absorption*, *water permeability*, *sorptivity*, *acid resistance*, *sulphate resistance*, *rapid chloride penetration*, dll.



Gambar 1. Penelitian terkait

Ahmed & Tobbala, 2024 melakukan penelitian menggunakan ban karet daur ulang dan serat *polyethylene terephthalate* (PET-F) dari botol air bekas sebagai pengganti sebagian agregat alami dan serat *macro-polypropylene* (Pp-F) dalam produksi beton. Dalam penelitian ini potongan karet digunakan sebagai 40% dari agregat kasar. Jadi, kedua serat tersebut ditambahkan ke dalam campuran yang diuji pada rasio 0,5%, 1%, dan 1,5% dari volume beton. Menambahkan 0,5% bubuk

aluminium (Al-P) ke 1,5% serat yang diperkuat campuran juga dipelajari. Dalam penelitian ini, waktu pengaturan awal dan akhir, kepadatan segar dan kering, sifat mekanik, konduktivitas termal dan difusivitas, struktur mikro, dan hilangnya kepadatan dan kekuatan tekan karena paparan beton yang diringankan secara elektrokimia yang dibuat dengan magnesium klorida semuanya dievaluasi. Uji mekanis kuat tekan (f_c), tegangan tidak langsung (f_t), kekuatan lentur (f_f), ketangguhan (T), dan indeks daktilitas (DI) dilakukan pada sampel yang diuji. PET-F mengungguli Pp-F pada semua persentase yang diteliti dan dapat berhasil digabungkan ke dalam beton karet hingga 1,5%.

Meraz et al., 2023 mengevaluasi tentang dampak penyerapan air pada campuran beton dengan menggunakan campuran RHA (rice husk ash) dan FA (fly ash) pada umur 28 dan 56 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyerapan air secara signifikan dipengaruhi oleh penggabungan RHA dan FA. Setelah 28 hari, penyerapan air dari campuran F0R0, F10, F20, dan F30 masing-masing adalah 3,27%, 3,74%, 3,68%, dan 3,58%, dengan penurunan yang terlihat secara keseluruhan. Setelah 56 hari, penyerapan air bervariasi antara 0,152% hingga 0,366%, dengan campuran F0R0 menunjukkan penyerapan air maksimum. Namun, campuran F10R30 menunjukkan jumlah penyerapan air paling sedikit, yaitu 3,51% dan 3,53% setelah 28 dan 56 hari. Penggunaan FA menghasilkan struktur mikro yang tebal di dalam beton karena ukuran butirannya yang lebih kecil dan luas permukaannya yang lebih besar. Penggunaan RHA juga dapat meningkatkan area nukleasi untuk pengendapan gel geopolimer. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian lain yang menunjukkan penurunan penyerapan air setelah penambahan FA dan RHA ke dalam beton.

Dash et al., 2023 Porositas mortar beton dapat mempengaruhi daya tahan prestasi beton. Penyerapan air dipengaruhi oleh panjang saluran mikro, yang ditentukan oleh rongga antarmuka dan hubungan antara rongga-rongga tersebut. Tren porositas mengikuti tren SC, sehingga meningkat dengan peningkatan fraksi volume CAF (*Coarse Aggregate Filler*) dan RCA (*Recycled Concrete Aggregate*) dalam campuran beton. Peningkatan RCA menyebabkan penurunan volume beton, tetapi membutuhkan air yang lebih banyak dan meningkatkan porositas. Pada dosis CAF hingga 1,5%, peningkatan porositas tidak signifikan, tetapi setelah 1,5%, terjadi peningkatan porositas yang cepat. Peningkatan fraksi volume serat (lebih dari 1,5%) menyebabkan akumulasi serat dengan kekakuan yang lebih besar dan

distribusi yang tidak merata dalam mortar, yang dapat meningkatkan porositas. Tren porositas pada campuran berbasis RFA (*Recycled Fine Aggregate*) mirip dengan campuran berbasis RCA. Terdapat peningkatan porositas yang berbeda untuk dosis RF 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, dan 2,5% pada campuran RFA.

Cern, 2020 melakukan penelitian terkait mengeksplorasi pengaruh serat basalt terhadap kekuatan tekan, kekuatan lentur, dan ketahanan abrasi pada RPC. Dalam studi tersebut, serat basalt dengan panjang 12 mm dan diameter 18 μm ditambahkan dalam berbagai konsentrasi (2, 3, 6, 8, dan 10 kg/m^3).

Temuan Utama:

- **Kekuatan Tekan:** Penambahan serat hingga 10 kg/m^3 menurunkan kekuatan tekan sebesar 18.2% setelah 2 hari, 7.8% setelah 7 hari, dan 13.6% setelah 28 hari.
- **Kekuatan Lentur:** Meningkat hingga 15.9% dengan penambahan serat hingga 6 kg/m^3 , namun menurun setelah melebihi jumlah tersebut, dengan penurunan maksimal 17.7%.
- **Ketahanan Abrasi:** Terdapat penurunan yang sejalan dengan penurunan kekuatan tekan, di mana terdapat hubungan linear dengan koefisien determinasi 0.97.

Studi ini juga mencatat bahwa peningkatan serat basalt meningkatkan total porositas beton, yang mempengaruhi distribusi volume pori. Akibatnya, terdapat perubahan signifikan dalam sifat mekanis RPC, terutama dalam hal ketahanan abrasi yang berkurang seiring dengan meningkatnya kandungan serat.

Jurnal ini menyimpulkan bahwa meskipun serat basalt dapat meningkatkan kekuatan lentur beton, peningkatan jumlah serat juga dapat menyebabkan penurunan kekuatan tekan dan ketahanan abrasi, terutama karena peningkatan porositas.

2.2 Beton Geopolimer

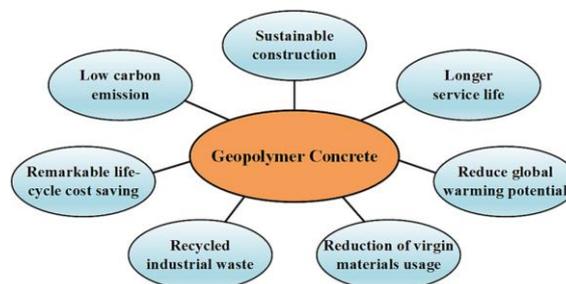
Beton geopolimer adalah jenis beton inovatif yang menggunakan bahan pengikat hasil reaksi antara silika dan alumina dari bahan-bahan seperti abu terbang (fly ash), terak tanur tinggi (GGBFS), dan abu sekam padi, dengan aktivator alkali seperti natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat. Proses ini, yang dikenal sebagai geopolimerisasi, menghasilkan material konstruksi yang tidak memerlukan

semen Portland tradisional, sehingga mengurangi emisi karbon dioksida yang signifikan.

Beton geopolimer menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan beton konvensional, termasuk ketahanan yang lebih tinggi terhadap serangan kimia, api, dan suhu tinggi, serta memiliki kekuatan tekan dan tarik yang lebih baik. Penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer dapat memiliki kekuatan tekan hingga 40.54% lebih tinggi dan kekuatan lentur hingga 93.75% lebih tinggi dibandingkan beton konvensional tergantung pada komposisi dan jenis bahan penguat yang digunakan (Zubarev et al., 2024).

Selain itu, beton geopolimer dianggap lebih ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah industri seperti fly ash dan slag, yang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam tetapi juga mengurangi polusi yang dihasilkan dari pembuangan limbah tersebut. Beton ini juga lebih ekonomis dan memiliki umur layanan yang lebih panjang, menjadikannya pilihan yang berkelanjutan untuk konstruksi infrastruktur seperti jembatan, bangunan tinggi, jalan raya, terowongan, dan bendungan (Zubarev et al., 2024).

Disamping itu, geopolimer diproduksi dari mineral aluminosilikat atau produk sampingan industri (misalnya, abu terbang, gangue batu bara, asap silika, slag, dan metakaolin, dll.), yang tidak hanya mencapai daur ulang sumber daya limbah padat industri, tetapi juga secara efektif mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca yang disebabkan oleh produksi OPC. Hal ini mewujudkan efektivitas biaya, penghematan energi, pengurangan emisi gas rumah kaca, dan keberlanjutan lingkungan hijau, sejalan dengan strategi "double-carbon" di Tiongkok. Manfaat keberlanjutan dari penggunaan beton geopolimer untuk berbagai aplikasi konstruksi digambarkan dalam Gambar 1 (Zhang, 2024).



Gambar 2. Keuntungan Potensial Beton Geopolimer dalam Konstruksi Berkelanjutan

Sumber: Zhang, (2024)

Secara keseluruhan, beton geopolimer merupakan alternatif yang menjanjikan untuk beton tradisional, menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan dengan performa mekanik yang superior.

2.3 Bahan Penyusun Beton Geopolimer

2.3.1 Abu Terbang (*fly ash*)

Fly ash atau abu terbang merupakan material berbutir halus yang berasal dari hasil residu pembakaran batu bara atau bubuk batu bara (ASTM C 618). Material ini memiliki kadar bahan semen yang tinggi dan bersifat *pozzolanic*. Menurut penelitian yang diterbitkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) dan *Environmental Protection Agency* (EPA) Amerika Serikat, *fly ash* dibedakan dalam tiga jenis yaitu kelas F, kelas C dan kelas N dengan kandungan kimia seperti tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan senyawa kimia *fly ash*

Senyawa kimia	Jenis N	Jenis F	Jenis C
Silicon dioxide (SiO ₂) + alumunium oxide (Al ₂ O ₃) + iron oxide (Fe ₂ O ₃), min, %	70%	50%	Min. 50 %
Calcium oxide (CaO), %	Berdasarkan laporan	Maks. 18.0	>18.0
Sulfur trioxide (SO ₃), maks, %	4.0	5.0	5.0
Kadar Air, maks, %	3.0	3.0	3.0
Kehilangan panas, maks, %	10.0	6.0 ^A	6.0

^APenggunaan pozzolan Kelas F yang mengandung hingga 12,0% kehilangan saat pembakaran dapat disetujui oleh pengguna jika tersedia catatan kinerja yang dapat diterima atau hasil uji laboratorium. Sumber: ASTM C618-19 (2019)

2.3.2 Agregat

Agregat merupakan bahan berbutir, seperti pasir, kerikil, batu pecah, dan slag tanur (*blast-furnace slag*), yang digunakan dengan media perekat untuk menghasilkan beton atau mortar semen hidrolis (SNI 2847:2019).

Agregat berdasarkan ukuran butirannya didakan menjadi dua yaitu:

2.3.2.1 Agregat Kasar

Menurut American Society for Testing and Materials (ASTM), agregat kasar didefinisikan sebagai material granular yang memiliki ukuran butir lebih besar dari 4,75 mm (atau lolos ayakan No. 4). Agregat kasar termasuk kerikil, batu pecah, dan material sejenis lainnya yang digunakan dalam campuran beton atau mortar. ASTM C33/C33M-18, yang merupakan standar spesifikasi untuk agregat beton, menetapkan berbagai persyaratan untuk agregat kasar, termasuk karakteristik fisik, kimia, dan mekanik yang harus dipenuhi agar agregat tersebut dapat digunakan dalam beton berkualitas tinggi. Beberapa persyaratan yang diatur dalam ASTM C33 mencakup:

1. **Kekerasan dan Ketahanan:** Agregat kasar harus cukup keras dan tahan lama untuk menahan proses pengangkutan, pencampuran, dan pengerasan beton tanpa mengalami kerusakan signifikan. Pengujian seperti uji abrasi Los Angeles sering digunakan untuk mengukur ketahanan abrasi dari agregat kasar.
2. **Kebersihan dan Bebas dari Kontaminan:** Agregat kasar harus bebas dari kotoran, bahan organik, dan partikel halus yang dapat mengganggu proses pengikatan dan pengerasan beton. Pengujian untuk kandungan lumpur dan bahan organik biasanya dilakukan untuk memastikan kebersihan agregat.
3. **Distribusi Ukuran Butir:** Agregat kasar harus memiliki distribusi ukuran butir yang sesuai dengan persyaratan gradasi yang ditetapkan. Gradasi yang tepat memastikan bahwa campuran beton memiliki kepadatan yang baik dan sifat mekanik yang optimal.
4. **Kandungan Zat Berbahaya:** Agregat harus bebas dari zat kimia berbahaya yang dapat menyebabkan reaksi deleterious dengan semen atau mengurangi kekuatan dan daya tahan beton. Pengujian untuk kandungan sulfat, klorida, dan bahan reaktif alkali-silika sering dilakukan sesuai standar ASTM.

Tabel 2. Gradasi agregat kasar

Diameter Saringan		% Lolos Saringan		
		Ukuran Maks.	Ukuran Maks.	Ukuran Maks.
mm	ASTM	10 mm	20 mm	40 mm
75.0	3 in			100 – 100
37.5	1 1/2 in		100 – 100	95 – 100
19.0	3/8 in	100 – 100	95 – 100	35 – 70

9.5	3/8 in	50 – 85	30 – 60	10 – 40
4.75	no.4	0 – 10	0 – 10	0 – 5

Sumber: ASTM C33

2.3.2.2 Agregat Halus

Menurut *American Society for Testing and Materials* (ASTM), agregat halus didefinisikan sebagai material granular yang lolos ayakan dengan ukuran 4,75 mm (No. 4 sieve) dan tertahan pada ayakan dengan ukuran 0,075 mm (No. 200 sieve). Agregat halus biasanya berupa pasir alami, pasir buatan, atau kombinasi keduanya. ASTM C33/C33M-18, yang merupakan standar spesifikasi untuk agregat beton, menetapkan berbagai persyaratan untuk agregat halus yang digunakan dalam campuran beton. Beberapa persyaratan utama yang diatur dalam ASTM C33/C33M-18 untuk agregat halus mencakup:

1. Kebersihan dan Bebas dari Kontaminan: Agregat halus harus bebas dari bahan organik, lumpur, dan partikel halus yang dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton. Pengujian untuk kandungan lumpur dan bahan organik biasanya dilakukan untuk memastikan kebersihan agregat halus.
2. Gradasi Ukuran Butir: Agregat halus harus memiliki distribusi ukuran butir yang sesuai dengan persyaratan gradasi yang ditetapkan dalam ASTM C33. Gradasi yang tepat memastikan bahwa campuran beton memiliki kepadatan dan kohesi yang baik serta sifat mekanik yang optimal.
3. Kandungan Zat Berbahaya: Agregat halus harus bebas dari zat kimia berbahaya yang dapat menyebabkan reaksi merugikan dengan semen atau mengurangi kekuatan dan daya tahan beton. Pengujian untuk kandungan sulfat, klorida, dan bahan reaktif alkali-silika sering dilakukan sesuai standar ASTM.
4. Kestabilan Kimia dan Fisik: Agregat halus harus memiliki kestabilan kimia dan fisik yang memadai untuk memastikan tidak terjadi perubahan volume yang signifikan saat digunakan dalam campuran beton.

Tabel 3. Gradasi agregat halus

Ukuran Saringan		SNI 03-2834-2000				ASTM C-33
(Aayakan)		Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Agak Halus	Pasir Halus	Fine Aggregate
mm	ASTM	Gradasi No.1	Gradasi No.2	Gradasi No.3	Gradasi No.4	Sieve Analysis
9.50	3/8 in	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100

4.75	No. 4	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100	95 – 100
2.36	No. 8	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100	80 – 100
1.18	No. 16	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100	50 – 85
0.60	No. 30	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100	25 – 60
0.30	No. 50	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50	5 – 30
0.15	No. 100	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15	0 – 10

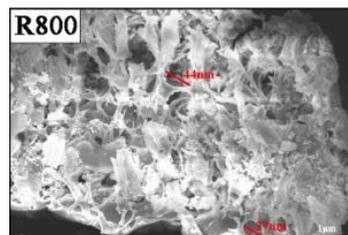
Sumber: SNI 03-2834-2000 dan ASTM C-33

2.3.3 Rice Husk Ash (RHA)

Rice Husk Ash (RHA) adalah abu yang dihasilkan dari pembakaran sekam padi, dan telah banyak diteliti sebagai bahan pozzolanik yang potensial dalam industri konstruksi. Menurut penelitian terbaru oleh para ahli pada tahun 2022, RHA kaya akan silika amorf dan memiliki sifat pozzolanik yang signifikan, yang berarti dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam beton untuk membentuk senyawa yang meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton.

Dalam penelitian yang dipublikasikan oleh para ahli pada tahun 2022, seperti yang ditemukan dalam jurnal "Construction and Building Materials", RHA yang dihasilkan dari pembakaran pada suhu tertentu (sekitar 600-700°C) menunjukkan kandungan silika yang tinggi dan struktur mikro yang sesuai untuk aplikasi beton. Selain itu, RHA juga diakui sebagai bahan yang ramah lingkungan karena merupakan produk limbah dari industri pertanian yang dapat digunakan kembali, mengurangi limbah dan emisi karbon dalam produksi beton.

Untuk suhu pembakaran di bawah 700°C, tidak ada puncak difraksi tajam yang muncul dalam kurva pada rentang $2\theta = 15^\circ-30^\circ$, yang sesuai dengan pola difraksi amorf SiO₂ dalam RHA. Namun, puncak difraksi yang sempit dan tajam muncul pada pola difraksi RHA ketika suhu pembakaran dinaikkan menjadi 700°C, menunjukkan adanya kristalinitas cristobalite. Pada suhu 800°C, intensitas puncak difraksi kristal SiO₂ semakin meningkat, menunjukkan transformasi bertahap dari SiO₂ amorf dalam RHA menjadi kristal cristobalite (Li et al., 2024).



Gambar 3. Struktur RHA pada suhu 800°C

Sumber: Li et al., (2024)

2.3.4 Poly Ethylene Terephthalate (PET)

Polyethylene Terephthalate (PET) adalah jenis polimer termoplastik dari keluarga poliester yang terkenal dengan sifat mekanik yang baik, transparansi tinggi, ketahanan terhadap kelembapan, dan stabilitas termal. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan PET sebagai serat tambahan dalam beton telah menjadi topik penelitian yang signifikan. Penambahan serat PET ke dalam beton menawarkan berbagai manfaat, terutama dalam meningkatkan kekuatan dan ketahanan material.

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

Penambahan serat PET dalam campuran beton dapat meningkatkan kekuatan tarik dan lentur beton. Penelitian menunjukkan bahwa serat PET membantu memperkuat matriks beton dengan mengurangi propagasi retakan. Sebagai hasilnya, beton menjadi lebih tahan terhadap beban tarik dan lentur, yang penting untuk aplikasi struktural (Mohammed & Rahim, 2020).

Serat PET berfungsi sebagai agen penghambat retak dalam beton. Penggunaannya telah terbukti mengurangi retakan yang terjadi akibat penyusutan plastis dan termal, yang sering terjadi selama proses pengerasan awal. Pengurangan keretakan ini berkontribusi pada peningkatan durabilitas beton dan umur layan yang lebih panjang (Al-luhybi, 2021).

Salah satu keuntungan utama penggunaan serat PET dalam beton adalah pemanfaatan limbah plastik daur ulang. Ini tidak hanya mengurangi jumlah limbah plastik yang masuk ke lingkungan tetapi juga mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru. Dengan demikian, penggunaan serat PET dalam beton berkontribusi pada praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan.

Serat PET juga meningkatkan kinerja termal dan durabilitas beton. Penelitian menunjukkan bahwa beton yang diperkuat dengan serat PET memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap siklus pembekuan-pencairan, abrasi, dan dampak mekanis. Ini membuatnya lebih cocok untuk aplikasi di lingkungan ekstrem dan untuk konstruksi infrastruktur yang tahan lama.

Penggunaan serat PET dalam beton memberikan sejumlah manfaat yang signifikan, termasuk peningkatan kekuatan mekanik, pengurangan keretakan, pemanfaatan limbah plastik, dan peningkatan durabilitas. Ini menjadikan PET sebagai bahan tambahan yang menjanjikan untuk aplikasi beton yang lebih berkelanjutan dan berkinerja tinggi.

2.3.5 Alkali Aktivator

Alkali aktivator adalah komponen kimia yang digunakan untuk memulai dan mempercepat reaksi polikondensasi dalam produksi beton geopolimer. Dalam beton geopolymer digunakan bahan yang berbasis aluminosilikat, seperti fly ash atau slag, yang bereaksi dengan larutan alkali activator untuk membentuk bahan pengikat yang memiliki sifat mekanik dan durabilitas yang unggul.

Alkali aktivator terdiri dari satu atau lebih basa kuat yang mampu melarutkan bahan aluminosilikat, memfasilitasi pelepasan ion aluminium (Al) dan silikon (Si) yang diperlukan untuk membentuk struktur polimer tiga dimensi yang kuat. Alkali aktivator yang paling umum digunakan dalam beton geopolimer meliputi:

1. Natrium Hidroksida (NaOH), merupakan basa kuat yang digunakan untuk melarutkan bahan aluminosilikat. Ketika dicampur dengan air, NaOH menghasilkan larutan alkali yang sangat reaktif yang dapat memecah struktur kristalin bahan aluminosilikat, melepaskan ion Al dan Si.
2. Natrium Silikat (Na_2SiO_3), juga dikenal sebagai water glass, menyediakan sumber silika yang penting untuk reaksi geopolimerisasi. Natrium silikat membantu dalam pembentukan rantai polimer yang lebih panjang dan lebih stabil, meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton geopolimer.



Gambar 4. Proses geopolimerisasi

Pada saat proses pelapukan dan pelepasan ion, larutan alkali akan memecah struktur kristalin bahan aluminosilikat, melepaskan ion Al dan Si ke dalam larutan. Kemudian dilanjutkan ke tahap polikondensasi, dimana ion – ion Al dan Si yang dilepaskan mengalami reaksi polikondensasi, membentuk jaringan polimer aluminosilikat. Reaksi ini menghasilkan pembentukan gel geopolimer yang mulai mengeras. Dan diakhiri oleh tahap pengerasan yakni struktur geopolymer mengeras, menghasilkan bahan yang kuat dan stabil. Proses pengerasan ini terjadi melalui pengaturan dan pemadatan jaringan polimer aluminosilikat.

2.3.6 Bahan Tambah (*Admixtures*)

2.3.6.1 *Superplasticizer*

Menurut standar ASTM C494/C494M-19, *superplasticizer* termasuk dalam kategori Type F dan Type G *admixtures*. *Superplasticizer* adalah bahan tambahan kimia yang digunakan dalam campuran beton untuk meningkatkan kemampuan alir (*workability*) secara signifikan tanpa penambahan air yang berlebihan. *Superplasticizer* memungkinkan pengurangan air yang tinggi dalam campuran beton, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kekuatan tekan beton. Dengan menggunakan *superplasticizer*, campuran beton dapat dibuat dengan lebih sedikit air namun tetap mencapai atau melebihi kemampuan alir yang diinginkan. Ini memungkinkan produksi beton dengan kekuatan tinggi dan kepadatan yang lebih baik. Beton yang dihasilkan memiliki kepadatan yang lebih tinggi dan porositas yang lebih rendah, meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia, abrasi, dan kondisi cuaca ekstrim.

2.3.6.2 *Retarder*

Berdasarkan standar ASTM C494/C494M-19, *retarder* termasuk dalam kategori Type B dan Type D *admixtures*. *Retarder* adalah bahan tambahan yang digunakan untuk memperlambat waktu pengikatan awal beton. Fungsi utama *retarder* adalah mengontrol kecepatan reaksi hidrasi semen, memungkinkan waktu yang lebih panjang untuk transportasi dan penempatan beton sebelum mulai mengeras. Hal ini sangat penting dalam kondisi di mana pengerjaan beton memerlukan waktu yang lebih lama atau dalam suhu tinggi yang dapat mempercepat proses pengikatan.

2.4 *Deterioration* (Kerusakan) pada Beton

Deterioration adalah proses penurunan kualitas atau kondisi suatu material akibat pengaruh lingkungan, penggunaan, atau faktor lainnya yang menyebabkan kerusakan atau kemunduran performa. Menurut Bowers, deteriorasi beton merujuk pada kerusakan fisik dan kimia yang terjadi pada beton selama masa pakainya, yang dapat disebabkan oleh faktor-faktor seperti korosi besi tulangan, pembekuan-pencairan, dan reaksi kimia. Deteriorasi ini menyebabkan penurunan performa dan umur layanan beton (Bowers et al. 2008).

1. Korosi besi tulangan:

- Korosi besi tulangan adalah proses degradasi besi tulangan dalam beton akibat reaksi dengan air dan ion klorida. Ini adalah salah satu bentuk kerusakan beton yang paling umum dan berbahaya.
- Air dan ion klorida menembus beton melalui pori-pori kapiler dan gel. Ketika air mencapai besi tulangan, ia dapat menyebabkan pembentukan produk korosi (seperti rust) yang mengembang dan menyebabkan retakan pada beton.
- Beton geopolimer dengan struktur pori yang baik dapat mengurangi penetrasi ion klorida, sehingga mengurangi risiko korosi besi tulangan. Namun, efektivitasnya tergantung pada desain campuran dan penambahan bahan seperti serat PET.

2. Pembekuan-Pencairan:

- Kerusakan akibat pembekuan-pencairan terjadi ketika air yang meresap ke dalam beton membeku dan mencair selama siklus suhu ekstrem, menyebabkan ekspansi dan kontraksi yang merusak struktur beton.
- Air yang terperangkap dalam pori-pori beton membeku pada suhu rendah, menyebabkan peningkatan volume yang dapat memecah struktur beton. Saat air mencair, proses ini dapat terulang dan menyebabkan kerusakan lebih lanjut.
- Beton geopolimer cenderung memiliki struktur pori yang lebih padat, yang dapat meningkatkan ketahanannya terhadap pembekuan-pencairan jika dirancang dengan benar. Penambahan serat PET dapat membantu mengurangi kerusakan akibat

pembekuan-pencairan dengan mengisi pori-pori dan mengurangi konektivitasnya.

3. Reaksi Alkali-Silika (ASR):

- ASR adalah reaksi kimia antara alkali dalam semen dan silika reaktif dalam agregat, menghasilkan gel yang menyerap air dan menyebabkan ekspansi dan retakan pada beton.
- Gel yang terbentuk dari reaksi ASR menyerap air dan mengembang, menyebabkan stres internal pada beton yang dapat menghasilkan retakan.
- Beton geopolimer mungkin memiliki potensi lebih rendah untuk ASR karena komposisi kimianya yang berbeda dari beton portland konvensional. Namun, masih penting untuk menguji ketahanan terhadap ASR, terutama jika menggunakan agregat yang mungkin mengandung silika reaktif.

4. Serangan Bahan Kimia:

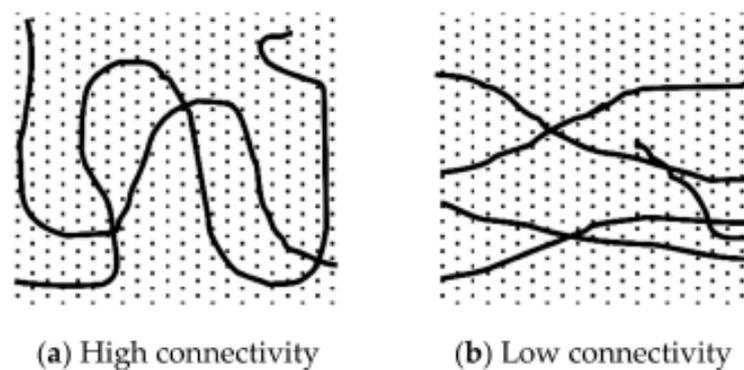
- Serangan bahan kimia, seperti asam atau garam, dapat merusak beton dengan menyebabkan reaksi kimia yang mengubah komposisi dan struktur beton.
- Bahan kimia agresif dapat meresap melalui pori-pori beton dan bereaksi dengan komponen kimia dalam semen, mengurangi kekuatan dan ketahanan beton.
- Beton geopolimer dapat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap serangan bahan kimia dibandingkan dengan beton portland karena struktur kimianya yang berbeda. Penambahan serat PET dapat mempengaruhi ketahanan terhadap serangan bahan kimia tergantung pada bagaimana serat berinteraksi dengan bahan kimia agresif.

Deterioration pada beton melibatkan berbagai jenis kerusakan yang dapat mempengaruhi kekuatan, durabilitas, dan performa beton. Memahami jenis-jenis kerusakan ini dan bagaimana mereka mempengaruhi beton geopolimer adalah kunci untuk mengembangkan material yang lebih tahan lama dan efektif dalam aplikasi konstruksi. Penelitian lebih lanjut dan desain campuran yang cermat dapat membantu memitigasi dampak deteriorasi pada beton geopolimer.

2.5 Pore Connectivity (Konektivitas Pori)

Pore connectivity atau konektivitas pori merujuk pada sejauh mana pori-pori dalam suatu material, seperti beton, saling terhubung satu sama lain. Konektivitas ini mempengaruhi bagaimana fluida seperti air dan ion dapat bergerak melalui material.

Pori-pori dalam beton dapat digolongkan ke dalam berbagai jenis berdasarkan ukuran dan konektivitasnya. Ada pori-pori kapiler, gel, dan pori-pori udara. Dalam beton, konektivitas pori berperan penting dalam menentukan seberapa mudah air atau ion dapat meresap ke dalam struktur beton.



Gambar 5. Skematik dari berbagai probabilitas konektivitas

Sumber: Ding et al.,(2020)

1. Pori Kapiler (*Capillary Pores*)

- Pori kapiler adalah pori yang terbentuk akibat pengendapan air dalam campuran beton yang belum sepenuhnya mengering atau mengeras. Mereka umumnya lebih besar daripada pori gel.
- Biasanya berdiameter antara 10-100 mikrometer.
- **Penetrasi Air dan Ion:** Pori kapiler memungkinkan penetrasi air dan ion yang lebih mudah, mempengaruhi ketahanan terhadap korosi dan kerusakan lainnya.
- **Pengaruh Serat Plastik PET:** Penambahan serat plastik PET dapat memodifikasi struktur pori kapiler, mengurangi konektivitasnya, dan potensi penetrasi bahan berbahaya.

2. Pori Gel (*Gel Pores*)

- Pori gel terbentuk dari proses hidrasi semen dan merupakan pori yang lebih kecil dan lebih halus dibandingkan pori kapiler. Pori ini terhubung dengan matriks gel hidrofobik.

- Biasanya lebih kecil dari 10 mikrometer.
- **Kekuatan dan Kekakuan:** Pori gel mempengaruhi kekuatan dan kekakuan beton. Dalam beton geopolimer, jenis dan distribusi pori gel dapat berbeda dari beton portland, mempengaruhi karakteristik mekanis.
- **Pengaruh Serat Plastik PET:** Penambahan PET mungkin tidak secara langsung mempengaruhi pori gel, tetapi dapat mempengaruhi distribusi dan ukuran pori secara keseluruhan.

3. Pori Udara (*Air Voids*)

- Pori udara adalah ruang kosong yang tersisa dalam beton akibat gelembung udara yang terperangkap selama pencampuran.
- Ukuran pori udara bervariasi, sering kali lebih besar dari pori kapiler.
- **Permeabilitas dan Keseimbangan Termal:** Pori udara mempengaruhi permeabilitas beton dan dapat berfungsi sebagai insulator termal. Namun, dalam beton geopolimer, ukuran dan distribusi pori udara mungkin berbeda dibandingkan dengan beton konvensional.

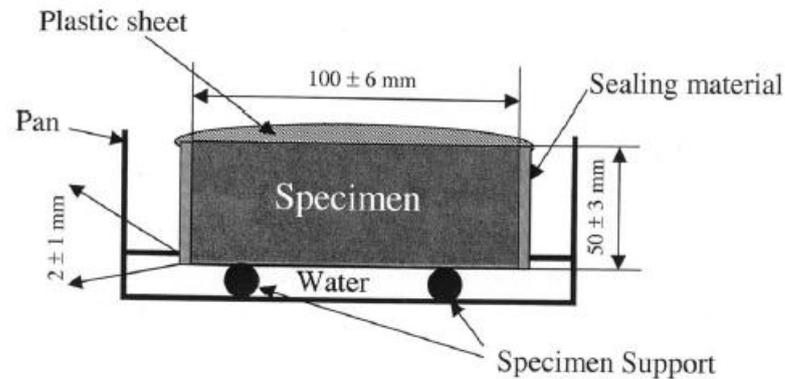
Istilah permeasi digunakan untuk menggambarkan transportasi massa cairan atau gas yang dipicu oleh gradien tekanan dan konsentrasi atau oleh gaya kapiler. Dalam beton, permeasi dipengaruhi oleh volume dan konektivitas pori kapiler dalam matriks pasta semen. Permeabilitas udara pada beton meningkat ketika kelembapan dihilangkan, yang pada gilirannya meningkatkan konektivitas pori. Penyerapan air juga meningkat ketika pori kapiler kosong.

2.6 Tingkat Penyerapan Air (*Sorptivity*)

Sorptivity adalah ukuran kemampuan material berpori seperti beton untuk menyerap air melalui aksi kapiler. Pengujian *sorptivity* bertujuan untuk menentukan seberapa cepat beton dapat menyerap air ketika permukaannya terpapar air. Ini memberikan informasi penting tentang durabilitas beton dalam kondisi basah dan membantu mengevaluasi potensi kerusakan akibat siklus pembekuan-pencairan, serangan sulfat, atau reaksi alkali-silika.

Pengujian *sorptivity*, atau "*Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*," menurut ASTM C1585, adalah metode pengujian

untuk menentukan laju penyerapan air pada beton semen hidraulik. Pengujian ini mengukur kemampuan beton untuk menyerap air melalui kapilaritas, yang merupakan indikator penting dari durabilitas beton, terutama dalam hal ketahanannya terhadap penetrasi air dan bahan kimia yang dapat merusak.



Gambar 6. Skema pengujian

Sumber: ASTM C1585 (2007)

2.7 Pengujian Porositas (*Porosity*)

Pengujian porositas sesuai dengan standar ASTM C642, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete," adalah metode yang digunakan untuk menentukan densitas, penyerapan, dan porositas beton yang telah mengeras. Pengujian ini memberikan informasi penting mengenai durabilitas dan kualitas beton, terutama dalam hal ketahanannya terhadap penetrasi air dan bahan kimia.

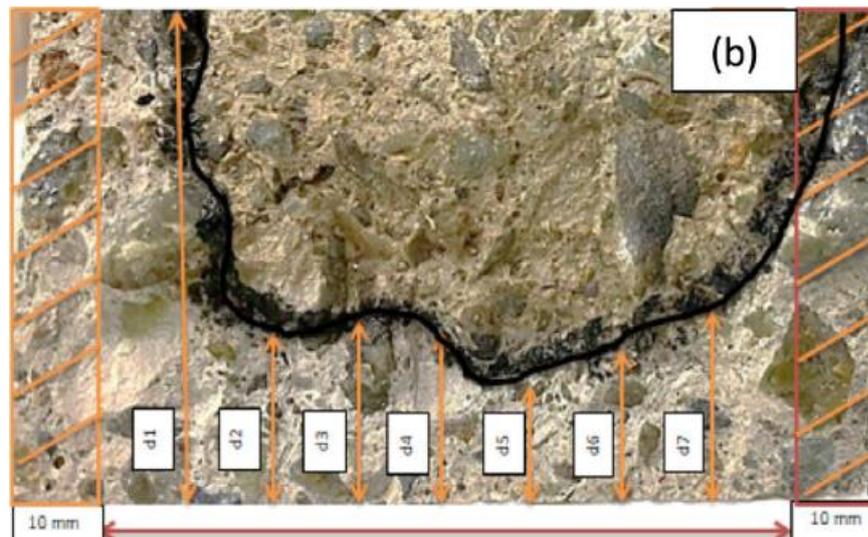
Porositas beton merupakan suatu perbandingan volume *void* (pori) terhadap volume total beton. Porositas beton juga berarti tingkat kepadatan pada konstruksi beton. Porositas berhubungan erat dengan permeabilitas pada beton. Tingginya tingkat kepadatan beton berpengaruh terhadap besar kuat tekannya. Semakin besar nilai porositas beton, maka kuat tekan betonnya semakin kecil. Persentase dari porositas beton berpori sekitar 30%, tingginya nilai persentase beton berpori mengindikasikan beton berpori memiliki ruang kosong yang cukup besar dengan adanya atau tidak digunakan agregat halus pada campurannya (A.Shahab et al., 2020)

2.8 Kedalaman Penetrasi Klorida (*Chloride Penetration Depth*)

Pengujian *chloride penetration test* pada beton, sesuai dengan metode Otsuki, adalah metode untuk menilai kemampuan beton dalam menahan penetrasi ion

klorida. Pengujian ini penting untuk mengevaluasi durabilitas beton terhadap korosi pada baja tulangan yang disebabkan oleh ion klorida, yang merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pada struktur beton bertulang (Mangngi et al., 2024).

Pengujian dilakukan dengan menggunakan larutan natrium klorida (NaCl) dengan konsentrasi tertentu (biasanya 3-5%) selama periode waktu yang telah ditentukan (umumnya 28 hari atau lebih). Setelah itu dilakukan penyemprotan cairan silver nitrate (AgNO_3) dan dilakukan pengukuran pada interval 10 mm.



Gambar 7. Pengukuran kedalaman penetrasi klorida

Sumber: Mangngi dkk (2024)

2.9 Pengujian Abrasi pada Beton

Uji abrasi pada beton adalah metode untuk mengukur ketahanan permukaan beton terhadap keausan yang disebabkan oleh gesekan atau goresan. Pengujian ini penting untuk menentukan daya tahan dan kekuatan permukaan beton terhadap kerusakan yang mungkin terjadi selama masa pakainya.

Adapun fungsi dari pengujian abrasi pada beton meliputi:

1. Menilai Kualitas Beton: Uji abrasi membantu menentukan kualitas dan kekuatan beton, terutama pada permukaan yang akan mengalami lalu lintas atau beban berat, seperti jalan, trotoar, dan lantai industri.
2. Pemilihan Material: Hasil uji abrasi dapat digunakan untuk memilih material beton yang tepat untuk berbagai aplikasi, memastikan bahwa beton yang digunakan memiliki ketahanan abrasi yang cukup untuk penggunaan tertentu.

3. Pengembangan Campuran Beton: Data dari uji abrasi membantu dalam merancang campuran beton dengan sifat-sifat yang diinginkan, seperti campuran agregat yang lebih tahan lama dan bahan tambahan yang dapat meningkatkan ketahanan abrasi.
4. Kontrol Kualitas: Uji abrasi digunakan sebagai bagian dari proses kontrol kualitas dalam pembuatan beton, memastikan bahwa produk akhir memenuhi spesifikasi dan standar yang ditetapkan.
5. Keamanan dan Ketahanan Struktur: Dengan memastikan beton memiliki ketahanan abrasi yang baik, struktur yang dibangun akan lebih aman dan tahan lama, mengurangi kebutuhan akan perbaikan dan pemeliharaan.

Pengujian ketahanan terhadap abrasi berdasarkan spesifikasi EN 1097-2:2007 menggunakan 8 buah kubus beton berdimensi 5x5x5 cm diputar bersama 8 buah bola baja dengan mesin abrasi *Los Angeles*. Mesin diputar sebanyak 1000 putaran dimana setiap 100 putaran dilakukan penimbangan terhadap perubahan berat benda uji.

2.10 Implementasi Beton Geopolimer

Institut Perubahan Global (GCI) dari Universitas Queensland, yang dibangun oleh HASSELL bekerja sama dengan Bligh Tanner dan Wagners pada tahun 2013, adalah bangunan pertama di dunia yang menggunakan beton geopolimer (GPC) dalam strukturnya. Di Australia, Rocla telah memproduksi dan berhasil menerapkan pipa saluran pembuangan GPC, bantalan rel kereta api, kripi pemakaman, gorong-gorong kotak, dan panel dinding. Dalam konstruksi jalan perkerasan kaku, GPC digunakan sebagai pengganti yang ramah lingkungan untuk beton OPC dalam paving grade. Tiga campuran digunakan: pasir sungai untuk campuran pertama, pasir M untuk campuran kedua, dan agregat kasar dalam proporsi yang lebih besar bersama dengan pasir M untuk campuran ketiga. Berdasarkan studi, disimpulkan bahwa sifat segar GPC seperti nilai slump dan penyebaran untuk beton segar tampaknya setara dengan pedoman beton. CS dan FS mencapai kekuatan tambahan dibandingkan nilai target. Ubin keramik ekologis yang menggunakan limbah kaca dan metakaolin dengan rasio yang dioptimalkan ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) 4.0 mencapai sifat yang direkomendasikan untuk kegiatan konstruksi sipil dalam periode curing 7 hari. Demikian pula, ubin yang dibuat

dengan metakaolin sebagai prekursor berkinerja baik di bawah kondisi suhu tinggi, ambient, dan saturasi (Srividya et al., 2022).

Banyak kegiatan konstruksi jalan telah dilakukan di seluruh India menggunakan beton geopolimer (GPC). Pada tahun 2017, jalan GPC sepanjang 50 meter dengan lebar 3 meter dibangun di CSIR-CBRI (Council of Scientific and Industrial Research - Central Building Research Institute) Roorkee dan jalan dua jalur sepanjang 100 meter dengan lebar 6,5 meter dibangun di NETRA-NTPC (NTPC Energy Technology Research Alliance), Uttar Pradesh. Jalan angkut untuk mengangkut beban berat dari tambang dibangun di Bhubaneswar pada tahun 2017. Sesa Sterlite Limited, Lanjigarh, bekerja sama dengan IMMT, membangun jalan GPC sepanjang 40 meter. Pada September 2019, jalan GPC berbasis abu terbang sepanjang 500 meter dibangun oleh tim NTPC di Ramagundam (Telangana) bekerja sama dengan NETRA (Srividya et al., 2022).

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

Peluang menggunakan geopolimer sebagai bahan penutup asli untuk melindungi beton pantai telah dianggap baru. Ditemukan bahwa waktu pengaturan penutup geopolimer berbasis metakaolin dapat ditingkatkan dengan memasukkan terak pada nilai selanjutnya untuk menganalisis kondisi. Adhesi lapisan geopolimer 40 ke substrat mortar semen dihargai. Bahan penutup geopolimer baru telah disarankan dengan tujuan menyelamatkan struktur beton yang terbukti ke lingkungan pantai. Percobaan sistematis dari operasi laboratorium dan lapangan telah menunjukkan lapisan memiliki waktu pengaturan yang wajar, kekuatan ikatan yang signifikan dan sifat anti-korosi yang hebat. Keseimbangan kimia dalam kondisi laut memungkinkannya untuk mempertahankan perlindungan yang layak terhadap struktur beton (Almutairi, Tayeh, Adesina, Isleem, & Zeyad, 2021).