TUGAS AKHIR

PENGARUH PEMANFAATAN LIMBAH MARMER SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI *FLY ASH* PADA CAMPURAN BETON GEOPOLIMER TERHADAP SIFAT MEKANIK

(THE EFFECT OF UTILIZING MARBLE WASTE AS A SUBSTITUTE FOR FLY ASH IN GEOPOLYMER CONCRETE MIXTURES ON MECHANICAL PROPERTIES)

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil



Kurniawan Nur Razaq

20 511 274

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

PROGRAM SARJANA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENANAAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2025

TUGAS AKHIR

PENGARUH PEMANFAATAN LIMBAH MARMER SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI *FLY ASH* PADA CAMPURAN BETON GEOPOLIMER TERHADAP SIFAT MEKANIK

(THE EFFECT OF UTILIZING MARBLE WASTE AS A SUBSTITUTE FOR FLY ASH IN GEOPOLYMER CONCRETE MIXTURES ON MECHANICAL PROPERTIES)

Disusun Oleh

Kurniawan Nur Razaq
20 511 274

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal
Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
2.7-25	2/7 2025	3/7 2025
Astriana Hardawati S.T., M.Eng	**Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D.**	**Elvis Saputra S.T., M.T.**
NIK: 16511301	**NIK: 855110201**	**NIK: 205111302**

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
YOGYAKARTA

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

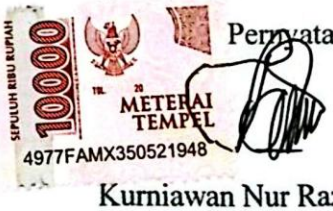
Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa laporan Tugas Akhir ini saya susun sendiri sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana Teknik Sipil di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Seluruh isi laporan ini merupakan hasil karya saya pribadi. Apabila terdapat kutipan atau penggunaan karya milik pihak lain, telah saya cantumkan secara jelas sumbernya sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa sebagian atau seluruh isi laporan ini bukan hasil karya saya sendiri atau terbukti mengandung unsur plagiarisme, maka saya bersedia menerima segala bentuk sanksi akademik, termasuk pencabutan gelar yang telah saya peroleh, sesuai dengan ketentuan hukum dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 22 Mei 2025

Pernyataan,



Kurniawan Nur Razaq

(20511274)

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah Subhanahu wa Ta'ala atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul "Pengaruh Pemanfaatan Limbah Marmer sebagai Bahan Substitusi Fly Ash pada Campuran Beton Geopolimer terhadap Sifat Mekanik (*The Effect Of Utilizing Marble Waste As A Substitute For Fly Ash In Geopolymer Concrete Mixtures On Mechanical Properties)*" dengan baik. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wasallam, beserta keluarga dan para sahabatnya.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini membahas pemanfaatan limbah marmer sebagai alternatif bahan ramah lingkungan dalam pengembangan beton geopolimer.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menerima banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Astriana Hardawati S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing utama yang dengan sabar dan penuh dedikasi membimbing penulis dari awal hingga akhir penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D. selaku Dosen Penguji I, dan Elvis Saputra S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II, atas masukan, kritik, serta arahan yang sangat berharga dalam penyempurnaan skripsi ini.
3. Bapak Rutono dan Ibu Amiratun, kedua orang tua tercinta, serta keluarga besar yang senantiasa memberikan dukungan moril, doa, dan cinta yang tak ternilai sepanjang perjalanan hidup dan studi penulis.

4. Himpunan Mahasiswa Islam (HMI) Komisariat FTSP FMIPA UII yang menjadi wadah pembelajaran nilai-nilai keislaman, kepemimpinan, dan perjuangan.
5. Keluarga Pelajar Mahasiswa Balikpapan (KPMB) Yogyakarta atas kebersamaan, semangat kekeluargaan, dan dukungan yang selalu menguatkan di tanah rantau.
6. Beasiswa Pemprov Kalimantan Timur (Stimulan) yang telah memberikan bantuan pendidikan yang sangat berarti dalam menunjang proses studi penulis.
7. Sahabat dan rekan seperjuangan Teknik Sipil 2020, terima kasih atas kebersamaan dan semangat yang telah kita bagi sepanjang masa studi ini. Ucapan khusus saya sampaikan kepada Nandha, Ikhsan, Luthfi, Isa, Ganjar, Raka, Nabil, dan Rizal atas bantuan langsungnya selama proses pengujian di laboratorium, serta kepada Sholika yang selalu setia menemani dan menjadi sumber semangat.

Penulis menyadari bahwa karya ini jauh dari sempurna. Segala kebaikan yang ada semata-mata berasal dari Allah Ta'ala, dan segala kekurangan adalah dari diri penulis sendiri. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik sipil yang berwawasan lingkungan.

Wabillāhi taufīq wal-hidāyah, was-salāmu 'alaikum warahmatullāhi wa barakātuh.

Yogyakarta, 22 Mei 2025

Penulis,

Kurniawan Nur Razaq

(20511274)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL		i
HALAMAN PENGESAHAN		ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI		iii
KATA PENGANTAR		iv
DAFTAR ISI		vi
DAFTAR GAMBAR		x
DAFTAR TABEL		xii
DAFTAR LAMPIRAN		xiv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN		xv
ABSTRAK		xvii
ABSTRACT		xviii
BAB I		1
PENDAHULUAN		1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Penelitian	3
1.3	Tujuan Penelitian	3
1.4	Manfaat Penelitian	4
1.5	Batasan Penelitian	4
BAB II		6
TINJAUAN PUSTAKA		6

2.1 Penelitian Terdahulu 6
2.1.1. *Sustainable Development and Performance Evaluation of Marble-Waste-Based Geopolymer Concrete* 6
2.1.2. Pengaruh Substitusi Limbah Marmer terhadap Nilai Kuat Tekan *Dry Geopolymer* Mortar Metode *Wet Mixing* Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 12 M 6
2.1.3. *Developing A Geopolymer Pastes Using Marble Dust* 7
2.1.4. *The Development of A Low-Calcium Geopolymer Concrete Made From Fly Ash And Marble Powder* 8
2.1.5. *The Influence of Substitution of Fly Ash with Marble Dust or Blast Furnace Slag on the Properties of the Alkali-Activated Geopolymer Paste* 8
2.2 Keaslian Penelitian 9
BAB III 13
LANDASAN TEORI 13
3.1 Beton 13
3.2 Beton Geopolimer 13
3.2.1. Proses Pembentukan Geopolimer 14
3.3 Bahan Penyusun Beton Geopolimer 16
3.3.1. Agregat 16
3.3.2. Alkali Aktivator 19
3.3.3. Air 21
3.3.4. *Aquades* 21
3.3.5. *Fly Ash* 22
3.3.6. Limbah Marmer sebagai Bahan Pengisi 24
3.4 Proses *Mix Design* Beton Geopolimer 26
3.5 Sifat dan Karakteristik Beton 39

3.5.1. Kuat Tekan Beton (f'c) 39
3.5.2. Kuat Tarik Belah 40
3.5.3. Modulus Elastisitas 41
BAB IV 44
METODE PENELITIAN 44
4.1 Tinjauan Umum 44
4.2 Variabel Penelitian 44
4.3 Bahan yang Digunakan 45
4.4 Peralatan Penelitian 46
4.5 Benda Uji Penelitian 47
4.6 Lokasi Penelitian 48
4.7 Persiapan Penelitian 48
4.8 Pengujian Material 49
4.8.1 Pengujian *Fly Ash* 49
4.8.2 Pengujian Limbah Marmer 49
4.8.3 Pengujian Agregat Halus 49
4.8.4 Pengujian Agregat Kasar 50
4.9 Perencanaan Campuran Beton (Mix Design) 51
4.10 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji 51
4.11 Pengujian Benda Uji 53
4.12 Pengolahan Data 55
4.13 Analisis Data Pengujian 55
4.14 Flow Chart Penelitian 55
BAB V 58
DATA, ANALISIS, DAN PEMBAHASAN 58

5.1 Pengujian Material 58
5.2 Hasil Pengujian Agregat 58
5.2.1 Pengujian Agregat Halus 58
5.3 Perancangan Campuran Beton (*Mix Design*) 77
5.3.1 Perencanaan Campuran Beton Normal 77
5.3.2 Perencanaan Campuran Beton Geopolimer 89
5.4 Hasil Pengujian *Slump* Beton 92
5.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton 94
5.6 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Beton 99
5.7 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton 111
BAB VI 118
KESIMPULAN DAN SARAN 118
6.1 Kesimpulan 118
6.2 Saran 119
DAFTAR PUSTAKA 120
LAMPIRAN 123

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Fly Ash 23
Gambar 3. 2 Limbah Marmer 26
Gambar 3. 3 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen (Benda Uji silinder 15 x 30 cm) 31
Gambar 3. 4 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 10 mm 35
Gambar 3. 5 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 20 mm 35
Gambar 3. 6 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 40 mm 36
Gambar 3. 7 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan 36
Gambar 3. 8 Tabel Periodik Unsur 38
Gambar 3. 9 Sketsa Pengujian Kuat Tekan 40
Gambar 3. 10 Sketsa Pengujian Kuat Tarik Belah 41
Gambar 3. 11 Grafik Kurva Hubungan tegangan Regangan Beton 42
Gambar 3. 12 Modulus Sekan dan Modulus Tangen Beton 43
Gambar 4. 1 Flowchart Penelitian 57
Gambar 5. 1 Grafik Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 1 64
Gambar 5. 2 Grafik Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 1 65
Gambar 5. 3 Kurva Gradasi Agregat Kasar Maksimum 20 mm Sampel 1 74
Gambar 5. 4 Grafik Gradasi Agregat Kasar Maksimum 20 mm Sampel 2 75
Gambar 5. 5 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen (Benda Uji silinder 15 x 30 cm) 80
Gambar 5. 6 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 20 mm 84
Gambar 5. 7 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan 85
Gambar 5. 8 Grafik Nilai Slump 93

Gambar 5. 9 Contoh Uji Slump..... 94
Gambar 5. 10 Grafik Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer..... 97
Gambar 5. 11 Contoh Pengujian Kuat Tekan Beton..... 97
Gambar 5. 12 Grafik Tegangan-Regangan BGLM15 Sampel 1..... 104
Gambar 5. 13 Contoh Pengujian Modulus Elastisitas Beton..... 104
Gambar 5. 14 Grafik Nilai Modulus Elastisitas Beton 107
Gambar 5. 15 Grafik Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer..... 113
Gambar 5. 16 Contoh Pengujian Kuat Tarik Belah Beton..... 113
Gambar 5. 17 Contoh Hasil Uji Tarik Belah Beton Geopolimer..... 115

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Sekarang 10
Tabel 3. 1 Persyaratan Kimia Fly Ash 23
Tabel 3. 2 Faktor Pengali Deviasi Standar..... 28
Tabel 3. 3 Perkiraan Kuat Tekan beton dengan fas, dan Agregat kasar yang umumnya digunakan di Indonesia..... 30
Tabel 3. 4 Persyaratan Jumlah Semen Minimum Dan Fas Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus..... 32
Tabel 3. 5 Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m3) yang dibutuhkan untuk kemudahaan dalam adukan beton..... 33
Tabel 4. 1 Rincian Benda Uji..... 47
Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus 60
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 1..... 62
Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 2..... 63
Tabel 5. 4 Gradasi Agregat Halus..... 64
Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Halus 66
Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus..... 67
Tabel 5. 7 Hasil Pengujian Lolos Saringan No. 200 (Pasir) 68
Tabel 5. 8 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar..... 69
Tabel 5. 9 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 1..... 72
Tabel 5. 10 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 2..... 72
Tabel 5. 11 Gradasi Agregat Kasar..... 74
Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Kasar 76
Tabel 5. 13 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar..... 77
Tabel 5. 14 Faktor Pengali Deviasi Standar..... 78
Tabel 5. 15 Perkiraan Kuat Tekan Beton (MPa) dengan Jenis Semen dan Agregat yang Digunakan di Indonesia..... 79

Tabel 5. 16 Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m^3) yang dibutuhkan untuk kemudahaan dalam adukan beton 81
Tabel 5. 17 Persyaratan Jumlah Semen Minimum Dan Fas Maksimum Untuk Berbgai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus 82
Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Mix Design Beton Normal 87
Tabel 5. 19 Proporsi Campuran Beton Normal dan Beton Geopolimer 91
Tabel 5. 20 Hasil Pengujian Slump 92
Tabel 5. 21 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton 96
Tabel 5. 22 Nilai Tegangan dan Regangan Beton Geopolimer Limbah Marmer 15% Sampel 1 100
Tabel 5. 23 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton 106
Tabel 5. 24 Rekapitulasi Persamaan Regresi Grafik Nilai Modulus Elastisitas Beton 108
Tabel 5. 25 Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas pada Beton Geopolimer ... 109
Tabel 5. 26 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah pada Beton 112
Tabel 5. 27 Persentase Kuat Tarik Belah dari Kuat Tekan Beton 116

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Laboratorium 1
Lampiran 2 Rekapitulasi Data dari Hasil Pemeriksaan Agregat 2
Lampiran 3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Campuran Beton 13
Lampiran 4 Rangkaian Proses dalam Pengolahan Beton Geopolimer 15
Lampiran 5 Rekapitulasi Pengujian Workability pada Beton Geopolimer 22
Lampiran 6 Rekapitulasi Pengujian Kuat Tekan pada Beton Geopolimer 23
Lampiran 7 Rekapitulasi Pengujian Modulus Elastisitas pada Beton Geopolimer 24
Lampiran 8 Rekapitulasi Pengujian Tarik Belah pada Beton Geopolimer 99

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

$f'c$	= Kuat tekan beton (MPa)
fct	= Kuat tarik belah beton (MPa)
E	= Modulus elastisitas beton (MPa)
P	= Beban maksimum pada benda uji (N)
A	= Luas penampang sampel uji (mm^2)
L	= Panjang benda uji (mm)
D	= Diameter benda uji (mm)
ΔL	= Deformasi longitudinal
δ	= Tegangan
ε	= Regangan beton
S_1, S_2	= Tegangan beton pada titik tertentu (MPa)
Ec	= Modulus elastisitas berdasarkan SNI
fas	= Faktor air semen
NaOH	= Natrium Hidroksida (aktivator alkali)
Na_2SiO_3	= Natrium Silikat (aktivator alkali)
SSD	= Saturated Surface Dry (Kondisi jenuh kering permukaan)
FA	= *Fly Ash* (Abu terbang)
LM	= Limbah Marmer
BN	= Beton Normal
BGLM	= Beton Geopolimer Limbah Marmer

SNI	= Standar Nasional Indonesia
ASTM	= American Society for Testing and Materials
SSD	= Saturated Surface Dry (Agregat dalam kondisi jenuh kering permukaan)
PLTU	= Pembangkit Listrik Tenaga Uap
MHB	= Modulus Halus Butir

ABSTRAK

Kebutuhan akan material konstruksi yang ramah lingkungan semakin mendesak seiring meningkatnya emisi karbon dari industri semen. Beton geopolimer hadir sebagai alternatif tanpa menggunakan semen Portland, dengan bahan pengikat berupa fly ash dan larutan alkali. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi limbah marmer terhadap sifat mekanik beton geopolimer, meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas, serta menentukan proporsi optimal dari substitusi limbah marmer dalam rentang 15% hingga 30%.

Metode penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Variasi limbah marmer yang digunakan adalah 0%, 15%, 20%, 25%, dan 30% dari massa binder, dengan kombinasi larutan aktivator Na_2SiO_3 dan NaOH 10 M dalam rasio 4:2. Seluruh pengujian dilakukan pada umur 28 hari sesuai standar SNI dan ASTM, meliputi uji kuat tekan, tarik belah, dan modulus elastisitas. Analisis dilakukan secara deskriptif dan komparatif untuk menilai performa antarvariasi.

Hasil menunjukkan bahwa substitusi limbah marmer berpengaruh signifikan terhadap peningkatan sifat mekanik beton geopolimer. Variasi 15% menghasilkan performa terbaik, dengan kuat tekan mencapai 44,3 MPa dibandingkan beton normal 26,2 MPa, kuat tarik belah 3,252 MPa dibandingkan 2,817 MPa, dan modulus elastisitas 24.881 MPa yang mendekati nilai prediksi berdasarkan ASTM C-469-94 dan model Tempest (2010). Proporsi di atas 15% menunjukkan penurunan performa akibat peningkatan porositas dan terganggunya ikatan antarpartikel. Dengan demikian, substitusi limbah marmer sebesar 15% merupakan komposisi optimal untuk meningkatkan kinerja mekanik beton geopolimer sekaligus mendukung konstruksi berkelanjutan.

Kata kunci: Beton geopolimer, Limbah marmer, Fly ash, Kuat tekan, Kuat tarik belah, Modulus elastisitas

ABSTRACT

The demand for environmentally friendly construction materials is becoming increasingly urgent in line with the rising carbon emissions from the cement industry. Geopolymer concrete emerges as an alternative that eliminates the use of Portland cement, utilizing fly ash and alkaline solutions as binders. This study aims to analyze the effect of marble waste substitution on the mechanical properties of geopolymer concrete, including compressive strength, split tensile strength, and modulus of elasticity, as well as to determine the optimal proportion of marble waste substitution within the range of 15% to 30%.

The research was conducted experimentally in a laboratory using cylindrical specimens with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm. The marble waste substitution levels were 0%, 15%, 20%, 25%, and 30% by binder mass, with an activator solution combination of Na_2SiO_3 and 10 M NaOH in a 4:2 ratio. All tests were performed at 28 days of age in accordance with SNI and ASTM standards, including tests for compressive strength, split tensile strength, and modulus of elasticity. The analysis was conducted descriptively and comparatively to assess the performance across different variations.

The results show that marble waste substitution significantly affects the improvement of geopolymer concrete's mechanical properties. The 15% substitution yielded the best performance, with a compressive strength of 44.3 MPa compared to 26.2 MPa in normal concrete, a split tensile strength of 3.252 MPa compared to 2.817 MPa, and a modulus of elasticity of 24,881 MPa, which closely aligns with predictions based on ASTM C-469-94 and the Tempest (2010) model. Substitution levels above 15% showed a decline in performance due to increased porosity and disrupted interparticle bonding. Therefore, a 15% marble waste substitution is considered the optimal composition to enhance the mechanical performance of geopolymer concrete while supporting sustainable construction.

***Keywords**: Geopolymer concrete, Marble waste, Fly ash, Compressive strength, Split tensile strength, Modulus of elasticity*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era modern, kebutuhan akan material konstruksi yang efisien dan ramah lingkungan semakin mendesak. Beton adalah salah satu bahan konstruksi yang paling banyak digunakan di seluruh dunia karena kekuatannya yang tinggi dan biaya yang relatif rendah. Namun, produksi semen, komponen utama dalam beton konvensional, menyumbang sekitar 8% dari total emisi karbon dioksida global setiap tahunnya (Global Carbon Project, 2020). Hal ini menimbulkan kebutuhan mendesak untuk mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Salah satu solusi yang potensial adalah penggunaan beton geopolimer. Beton geopolimer tidak menggunakan semen Portland dan dapat secara signifikan mengurangi emisi CO_2. Beton geopolimer terbuat dari bahan-bahan pozzolan seperti fly ash, yang merupakan produk sampingan dari pembakaran batubara di PLTU. Fly ash memiliki potensi besar sebagai bahan pengganti semen karena sifat pozzolannya yang baik, yang dapat meningkatkan kekuatan mekanik beton seperti kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur. Namun, harga fly ash yang relatif tinggi dibandingkan dengan bahan substitusi lainnya, serta keterbatasan pasokan dari PLTU di beberapa daerah, menjadi tantangan tersendiri dalam penggunaannya secara luas.

Di sisi lain, industri marmer menghasilkan limbah dalam jumlah besar, termasuk pecahan dan serbuk marmer. Limbah ini sering kali dibuang tanpa diolah, menimbulkan masalah lingkungan yang serius. Penggunaan limbah marmer sebagai substitusi dalam beton tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga meningkatkan nilai ekonomis dan fungsi teknis dari limbah yang sebelumnya tidak termanfaatkan secara optimal dalam industri konstruksi.

Dalam pengembangan beton geopolimer, pemilihan komposisi larutan aktivator juga sangat memengaruhi kualitas hasil akhir, terutama dalam hal kekuatan tekan dan kestabilan struktur. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah kombinasi larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH) dengan rasio 4:2 atau setara dengan perbandingan 2:1. Rasio ini dianggap optimal karena mampu menghasilkan workability yang baik, waktu ikat yang terkendali, serta kuat tekan yang kompetitif, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian oleh Loekito dan Wardhono (2019) yang menemukan rasio 3,5:1 sebagai nilai tertinggi namun berisiko mempercepat reaksi secara berlebihan. Sementara itu, pemilihan konsentrasi NaOH sebesar 10 molar juga bukan tanpa alasan; beberapa studi menunjukkan bahwa molaritas tersebut memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan tekan, stabilitas larutan, dan kemudahan pencampuran, dibandingkan molaritas yang lebih tinggi seperti 12–14 M yang justru dapat menurunkan kualitas mikrostruktur akibat reaksi yang terlalu agresif (Putra, dkk. 2018; Singh dan Middendorf, 2020). Oleh karena itu, pemilihan rasio aktivator 4:2 dan molaritas NaOH 10 M dalam penelitian ini dilakukan sebagai upaya untuk memperoleh sifat mekanik beton geopolimer yang optimal berdasarkan temuan empiris dan kajian teoritis yang telah ada.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dalam beton geopolimer dapat meningkatkan sifat mekanik beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan 70% fly ash dan 30% debu marmer pada w/b 0,28 menghasilkan kekuatan mekanis tertinggi, dengan peningkatan kekuatan tekan hingga 237,8 kg/cm², atau 40% lebih tinggi dibandingkan campuran kontrol yang mengandung 50% fly ash dan 50% debu marmer. Penggunaan debu marmer sebesar 30% terbukti optimal dalam meningkatkan kekuatan pasta geopolimer. Selain itu, penambahan silica fume cenderung menurunkan kekuatan tekan karena pembentukan pori-pori besar yang melemahkan sampel (Alharthy, dkk. 2022).

Selain itu, penggunaan limbah marmer sebagai bahan substitusi dalam beton juga menunjukkan hasil yang positif. Berdasarkan penelitian dari Wijayanti dan Wardhono (2022), kuat tekan tertinggi sebesar 8,881 MPa pada umur 28 hari, serta berat jenis

volume tertinggi sebesar 2,028 g/cm³ diperoleh pada variasi limbah marmer sebesar 10%. Substitusi 10% direkomendasikan sebagai komposisi optimum untuk mencapai kuat tekan maksimal dan porositas minimal, memberikan solusi material konstruksi yang lebih ramah lingkungan

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi limbah marmer terhadap sifat mekanik beton geopolimer, termasuk kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas. Variasi limbah marmer yang digunakan berkisar antara 15% hingga 30%. Dengan mengetahui kombinasi yang optimal, diharapkan dapat dihasilkan alternatif bahan bangunan yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis, serta mampu mengurangi dampak negatif dari limbah industri marmer dan fly ash.

1.2 Rumusan Penelitian

Penulis telah menyiapkan beberapa isu yang akan dijelaskan dalam penelitian ini. Beberapa aspek yang akan dibahas dalam karya tulis ini meliputi:

1. Bagaimana pengaruh substitusi limbah marmer pada beton geopolimer terhadap kuat tekan, kuat Tarik, dan modulus elastisitas?
2. Berapakah nilai optimal substitusi limbah marmer pada beton geopolimer dalam rentang variasi 15% - 30%?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan penelitian yang telah dijelaskan, maka tujuan dari peneltian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis bagaimana substitusi limbah marmer pada beton geopolimer mempengaruhi kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas.
2. Untuk menentukan proporsi optimal substitusi limbah marmer pada beton geopolimer dalam rentang variasi 15% - 30% yang menghasilkan peningkatan optimal pada kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian yang telah dijelaskan, maka manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan alternatif material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah marmer, sehingga mengurangi dampak negatif limbah terhadap lingkungan.
2. Mengurangi biaya produksi beton dengan memanfaatkan bahan limbah yang relatif murah dan tersedia melimpah.
3. Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang beton geopolimer, khususnya dalam aplikasi material limbah untuk peningkatan sifat mekanis beton.
4. Hasil penelitian ini diharapkan dapat diaplikasikan pada industri konstruksi untuk menghasilkan beton dengan performa yang baik serta ramah lingkungan.

1.5 Batasan Penelitian

Dengan mempertimbangkan luasnya cakupan penyusunan tugas akhir, penulis menetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dibatasi pada variasi substitusi limbah marmer dalam beton geopolimer dengan proporsi 0%, 15%, 20%, 25%, 30%.
2. Pengujian difokuskan pada pengukuran kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas beton geopolimer dengan variasi substitusi limbah marmer.
3. Penelitian ini tidak melakukan pengujian terhadap material prekursor *fly ash* dan limbah marmer
4. Beton yang direncanakan dengan kuat tekan (f'c) sebesar 25 MPa pada usia 28 hari.

5. Metode mix design menggunakan rasio larutan aktivator 4:2, yaitu 4 bagian *Natrium Silikat* (Na_2SiO_3) dan 2 bagian *Natrium Hidroksida* (NaOH), dengan pendekatan berdasarkan SNI 03-2834-2000.
6. Aktivator yang digunakan adalah larutan alkali berupa *Natrium Silikat* (Na_2SiO_3) dan *Natrium Hidroksida* (NaOH) dengan molaritas 10M.
7. Agregat kasar diperoleh dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas islam Indonesia.
8. Agregat halus juga diambil dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas islam Indonesia.
9. Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
10. *Fly ash* digunakan berasal dari PT Suradi Sejahtera Raya, Bantul.
11. Pengujian beton dilakukan pada usia 28 hari.
12. Sampel uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1. *Sustainable Development and Performance Evaluation of Marble-Waste-Based Geopolymer Concrete*

Lee, dkk, (2020), penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan beton geopolimer berbahan dasar limbah marmer dan mengevaluasi kelayakannya sebagai bahan konstruksi yang berkelanjutan. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan melibatkan pengumpulan bubuk marmer dari limbah tambang, penggilingan menggunakan hammer mill, dan pencampuran dengan larutan alkali serta bahan tambahan lainnya seperti *GGBFS* dan *wollastonite*. Campuran ini kemudian dicetak dalam cetakan silinder dan dibiarkan mengeras pada suhu ruangan sebelum diuji sifat fisik dan mekaniknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer berbahan dasar marmer memiliki kekuatan tekan yang baik, mencapai hingga 50 MPa setelah 365 hari, dan menunjukkan sifat fisik yang stabil seperti penyerapan air yang rendah dan ketahanan terhadap lingkungan luar. Beton ini juga menunjukkan potensi untuk digunakan dalam aplikasi rekayasa di masa depan, dengan keuntungan tambahan berupa pengurangan emisi karbon dan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan dengan produksi semen portland konvensional.

2.1.2. Pengaruh Substitusi Limbah Marmer terhadap Nilai Kuat Tekan *Dry Geopolymer* Mortar Metode *Wet Mixing* Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 12 M

Wijayanti dan Wardhono, (2022), penelitian ini dilatarbelakangi oleh masalah lingkungan yang disebabkan oleh produksi semen yang menghasilkan emisi CO2,

yang berkontribusi pada pemanasan global. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material yang lebih ramah lingkungan seperti geopolimer yang menggunakan *fly ash* sebagai bahan utama. *Fly ash* tipe C, yang mengandung silika tinggi, dicampur dengan larutan NaOH 12M dan kapur untuk menghasilkan *dry geopolymer mortar*. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh substitusi limbah marmer terhadap kuat tekan *dry geopolymer mortar* dengan metode *wet mixing*. Pengujian dilakukan pada mortar kubus ukuran 5x5x5 cm dengan variasi limbah marmer sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%, dan pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari menggunakan *Universal Testing Machine*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi limbah marmer sebesar 15% menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 8,881 MPa pada umur 28 hari, sedangkan berat jenis volume tertinggi sebesar 2,028 g/cm3 diperoleh pada variasi limbah marmer sebesar 10%.

2.1.3. *Developing A Geopolymer Pastes Using Marble Dust*

Alharthy, dkk, (2022), penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pasta *geopolymer* dengan menggunakan limbah debu marmer, *fly ash*, dan *silica fume* sebagai bahan baku. Latar belakang penelitian ini adalah perlunya alternatif ramah lingkungan dan biaya yang efektif dalam industri konstruksi, mengingat tingginya emisi CO2 dari produksi semen konvensional. Metode yang digunakan mencakup analisis kimia (XRF) dan analisis mineralogi (XRD) terhadap bahan baku, serta uji eksperimental pada tiga kelompok campuran dengan rasio air terhadap bahan pengikat (w/b) yang berbeda (0,28, 0,30, 0,33). Setiap kelompok dibagi lagi menjadi lima subkelompok berdasarkan persentase debu marmer, *fly ash,* dan *silica fume*. Campuran ini diuji setelah curing pada suhu 60°C selama tiga hari untuk menentukan sifat mekanisnya, termasuk kekuatan tekan, tarik, lentur, dan penyerapan air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan 70% *fly ash* dan 30% debu marmer pada w/b 0,28 menghasilkan kekuatan mekanis tertinggi, dengan peningkatan kekuatan tekan hingga 237,8 kg/cm2, atau 40% lebih tinggi dibandingkan campuran kontrol yang mengandung 50% fly ash dan 50% debu marmer. Penggunaan debu marmer

sebesar 30% terbukti optimal dalam meningkatkan kekuatan pasta *geopolymer*. Selain itu, penambahan *silica fume* cenderung menurunkan kekuatan tekan karena pembentukan pori-pori besar yang melemahkan sampel. Studi ini mengkonfirmasi bahwa debu marmer dapat meningkatkan sifat mekanis pasta geopolimer, dan penggunaannya dalam aplikasi konstruksi akan memberikan manfaat lingkungan yang signifikan sambil meningkatkan sifat kekuatan material.

2.1.4. *The Development of A Low-Calcium Geopolymer Concrete Made From Fly Ash And Marble Powder*

Kumar dan Neelima, (2022), penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan beton geopolimer rendah kalsium menggunakan abu terbang dan bubuk marmer sebagai bahan utama, yang diharapkan dapat menjadi alternatif yang ramah lingkungan terhadap beton semen konvensional. Metode penelitian melibatkan penggunaan abu terbang kelas F dan bubuk marmer dengan variasi persentase dari 0% hingga 25%, di mana rasio larutan alkali menggunakan natrium hidroksida (NaOH) dengan molaritas 12 dan rasio cairan alkali 2,5. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis seperti kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur dari beton geopolimer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bubuk marmer hingga 20% sebagai pengganti semen memberikan kekuatan optimal sebesar 40 N/mm^2. Selain itu, peningkatan konsentrasi NaOH berkontribusi pada peningkatan kekuatan tekan dan lentur. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa beton geopolimer dengan campuran abu terbang dan bubuk marmer menunjukkan potensi tinggi sebagai bahan konstruksi yang berkelanjutan dengan ketahanan mekanis yang baik dan pengurangan dampak lingkungan dibandingkan beton konvensional.

2.1.5. *The Influence of Substitution of Fly Ash with Marble Dust or Blast Furnace Slag on the Properties of the Alkali-Activated Geopolymer Paste*

Ionescu, dkk, (2023), penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi abu terbang dengan debu marmer atau terak tanur tinggi pada sifat pasta *geopolymer* yang diaktifkan alkali. Metode penelitian melibatkan penggunaan abu

terbang rendah kalsium dari Pembangkit Listrik Rovinari di Rumania, yang disubstitusi sebagian dengan debu marmer atau terak tanur tinggi dengan persentase 10%, 25%, dan 50%. Pengikat geopolimer yang dihasilkan diuji sifat fisik-mekaniknya, termasuk densitas, kekuatan lentur, dan kekuatan tekan setelah perlakuan panas pada suhu 70°C selama 24 jam dan kondisi laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi abu terbang dengan debu marmer atau terak tanur tinggi meningkatkan densitas segar dan densitas setelah perlakuan panas, namun mengurangi sifat mekanis seperti kekuatan lentur dan kekuatan tekan. Analisis FTIR dan mikroskopis menunjukkan bahwa substitusi ini mempengaruhi mikrostruktur pasta geopolimer, dengan penurunan intensitas ikatan Al-O dan Si-O serta peningkatan ukuran dan jumlah pori. Penelitian ini menyimpulkan bahwa perlakuan panas membantu proses geopolimerisasi dan homogenitas sampel, namun substitusi abu terbang dengan bahan lain harus mempertimbangkan kontribusi masing-masing bahan dalam menyediakan Si dan Al untuk mencapai kinerja mekanis yang optimal.

2.2 Keaslian Penelitian

Dari penelitian sebelumnya, terlihat adanya perbedaan dengan studi yang dilakukan oleh penulis. Perbandingan perbedaan antara penelitian sebelumnya mengenai pembuatan beton mutu tinggi dengan penggunaan terak nikel dan bahan tambahan lainnya dapat dirujuk pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Peneliti	**Lee, dkk**	**Wijayanti dan Wardhono**	**Alharthy, dkk**	**Kumar dan Neelima**	**Ionescu, dkk**	**Razaq**
Tahun	**2020**	**2022**	**2022**	**2022**	**2023**	**2025**
Judul Penelitian	Pengembangan Berkelanjutan dan Evaluasi Kinerja Beton Geopolimer Berbasis Limbah Marmer	Pengaruh Subtitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan *Dry Geopolymer Mortar* Metode *Wet Mixing* Berbahan Dasar Abu Terbang Dan Naoh 12 M	*Developing A Geopolymer Pastes Using Marble Dust*	*The Development of A Low-Calcium Geopolymer Concrete Made From Fly Ash And Marble Powder*	*The Influence of Substitution of Fly Ash with Marble Dust or Blast Furnace Slag on the Properties of the Alkali-Activated Geopolymer Paste*	Pemanfaatan Limbah Marmer Sebagai Bahan Pengisi Dalam Beton Geopolimer Ramah Lingkungan
Tujuan Penelitian	Mengembangkan beton geopolimer berbasis limbah marmer dan menguji kelayakan aplikasinya sebagai material struktural yang berkelanjutan untuk industri konstruksi.	Untuk mendapatkan nilai kuat tekan dari bahan-bahan substitusi pengganti semen dengan penambahan NaOH 12 M dan Untuk mengetahui nilai standar optimum komposisi penambahan NaOH 12 M terhadap kuat tekan pada pembuatan dry geopolymer mortar.	Menyelidiki penggunaan limbah debu marmer, fly ash, dan silica fume sebagai bahan baku untuk pembuatan pasta geopolymer dan Menentukan sifat-sifat pasta geopolymer dengan melakukan uji kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, dan penyerapan air.	Menilai kemampuan kerja beton geopolimer dengan abu terbang rendah kalsium dan serbuk marmer dan Menilai kekuatan tekan dan kekuatan tarik belah beton geopolimer.	Menilai pengaruh substitusi fly ash dengan debu marmer atau terak tanur tinggi pada kinerja pasta geopolimer alkali-aktivasi.	Untuk menganalisis pengaruh substitusi limbah marmer terhadap kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas beton geopolimer, serta menentukan proporsi optimal dalam rentang 15%–30% yang menghasilkan peningkatan sifat mekanik secara maksimal.

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang

Peneliti	**Lee, dkk**	**Wijayanti dan Wardhono**	**Alharthy, dkk**	**Kumar dan Neelima**	**Ionescu, dkk**	**Razaq**
Tahun	**2020**	**2022**	**2022**	**2022**	**2023**	**2025**
Parameter Pengujian	Parameter yang diuji adalah Kuat Tekan, Rasio Molar SiO2/Na2O dan Rasio Bubuk, Konsentrasi Molar NaOH, Lingkungan Penyembuhan, dan Sifat Fisik (Porositas, Kepadatan Massa, Tingkat Penyerapan Air)	Parameter yang diuji adalah Variasi limbah marmer (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%), Kuat tekan diuji pada 7, 14, dan 28 hari, dan Berat jenis volume.	Pengujian yang diuji adalah Variasi rasio air terhadap binder (w/b) yaitu 0.28, 0.30, dan 0.33 dan Variasi proporsi debu marmer, *fly ash*, dan *silica fume* dalam campuran.	Pengujian yang diuji adalah Kemampuan Kerja (*Workability*), Kekuatan Tekan (*Compressive Strength*), Kekuatan Tarik Belah (*Split Tensile Strength*), Kekuatan Lentur (*Flexural Strength*)	Parameter yang diuji adalah Kepadatan, Kekuatan lentur, Kekuatan tekan, Analisis mikroskopis, dan Analisis FTIR	Parameter yang diuji adalah Kuat Tekan,kuat Tarik belah, dan modulus elastisitas
Metode Pengujian	Beton geopolimer dibuat dari serbuk marmer limbah tambang, GGBFS, dan wollastonit, diaktifkan dengan larutan alkali (Natrium silikat, Natrium hidroksida, Natrium aluminat), lalu dicetak silinder dan disembuhkan 3 hari pada suhu ruang. Pengujian meliputi kekuatan	Pengujian dilakukan dengan metode wet mixing, Pengujian kuat tekan menggunakan mesin *Universal Testing Machine*, Pengujian Vicat untuk mengetahui waktu pengikatan awal dan akhir dari pasta *geopolymer*, dan Analisis kuantitatif dengan analisis kuantitatif	Pengujian dilakukan dengan Analisis kimia menggunakan XRF dan XRD, Uji kuat tekan, tarik, lentur, dan penyerapan air, dan Pengamatan menggunakan SEM.	Pengujian beton geopolimer menggunakan abu terbang kelas F, serbuk marmer, agregat halus dan kasar, larutan NaOH, air, dan superplastisizer. Uji kemampuan kerja dilakukan dengan uji slump, sementara kekuatan tekan, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur	Beton geopolimer diuji menggunakan fly ash (Rovinari), debu marmer (Rus), dan GGBFS (ArcelorMittal, Romania). Uji kepadatan mengikuti EN 12350-6:2019 dan EN 12390-7:2019. Kekuatan lentur diuji	Penelitian ini mengkaji pengaruh substitusi limbah marmer pada beton geopolimer dengan variasi 0–30%. Bahan yang digunakan meliputi agregat, air, aquades, abu terbang, limbah marmer, dan aktivator (Na_2SiO_3 dan NaOH). Benda uji berbentuk silinder (Ø15 cm, tinggi 30 cm). Tahapan meliputi persiapan, pengujian

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang

Peneliti	Lee, dkk	Wijayanti dan Wardhono	Alharthy, dkk	Kumar dan Neelima	Ionescu, dkk	Razaq
Tahun	**2020**	**2022**	**2022**	**2022**	**2023**	**2025**
	tekan, analisis XRD dan NMR, serta uji porositas, massa jenis, dan penyerapan air.	statistika inferensial.		diuji sesuai standar IS 516:1959.	dengan metode 3PB (EN 196-1:2016), dan kekuatan tekan pada spesimen hasil 3PB. Analisis FTIR dilakukan dengan Jasco FT/IR-6200, dan mikroskopi menggunakan Leica DNC2900.	bahan, pembuatan dan pengujian campuran, analisis data, serta pembahasan dan kesimpulan.
Hasil Pengujian	Penambahan GGBFS meningkatkan kuat tekan beton geopolimer. Rasio SiO_2/Na_2O 1,28 memberi hasil terbaik (40–50 MPa), dan penyembuhan air kapur mencapai 54 MPa (365 hari). NaOH 4 M >30 MPa, 6 M lebih padat dan kuat. Agregat daur ulang menaikkan penyerapan air dan menurunkan kepadatan. Uji skala besar: sifat segar baik, kuat tekan 43 MPa (28 hari).	Kuat tekan terbesar adalah 8,881 MPa pada variasi limbah marmer 15% pada 28 hari dan Berat jenis volume terbesar adalah 2,028 g/cm^3 dengan variasi limbah marmer 10%.	Kuat tekan tertinggi: 237.8 kg/cm^2 pada w/b 0.28 dan 30% debu marmer, Kuat lentur tertinggi: campuran dengan 90% fly ash dan 10% debu marmer, Kuat tarik tertinggi: 14.9 kg/cm^2 pada 45% fly ash, 45% debu marmer, dan 10% silica fume, dan Penyerapan air terendah: 8% pada w/b 0.28	Hasil pengujian menunjukkan beton geopolimer memiliki viskositas dan kohesivitas tinggi dengan slump sedang hingga tinggi, namun kemampuan kerja berkurang seiring peningkatan kelas beton. Kekuatan tekan dan lentur meningkat dengan penambahan serbuk marmer, terutama pada 28 hari. Kekuatan tarik belah proporsional dengan kekuatan tekan.	Substitusi debu marmer dan terak meningkatkan kepadatan (~16%) namun menurunkan kekuatan tekan dan lentur. Di laboratorium, marmer menaikkan lentur, terak sedikit menaikkan tekan (25%). Perlakuan panas meningkatkan kekuatan. FTIR menunjukkan perubahan struktur, mikroskopi: pori meningkat.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi 15% limbah marmer menghasilkan sifat mekanik terbaik pada beton geopolimer, dengan nilai kuat tekan 44,3 MPa, kuat tarik 3,252 MPa, dan modulus elastisitas 24.881 MPa. Variasi di atas 15% menurunkan performa akibat porositas.

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Beton

Beton adalah bahan komposit yang terdiri dari agregat (kasar dan halus), semen, dan air. Proses pembentukan beton melibatkan pencampuran bahan-bahan ini hingga membentuk campuran yang homogen, kemudian dituangkan ke dalam cetakan dan dibiarkan mengeras. Beton memiliki kelebihan seperti kekuatan tekan tinggi, daya tahan terhadap api, dan kemampuan untuk dibentuk sesuai keinginan. Agregat merupakan komponen utama dalam beton yang mencakup sekitar 60-75% dari total volume beton. Agregat berfungsi untuk mengurangi penyusutan dan pergerakan beton serta meningkatkan kekuatan tekan beton. Agregat terdiri dari agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil atau batu pecah). Kualitas agregat sangat mempengaruhi kualitas dan kekuatan beton.

3.2 Beton Geopolimer

Beton geopolimer merupakan salah satu inovasi dalam teknologi bahan konstruksi yang bertujuan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dari penggunaan semen Portland. Beton geopolimer menggunakan bahan ikat anorganik yang berasal dari sisa industri seperti *fly ash*, slag, atau material *pozzolan* lainnya. Reaksi kimia antara bahan sisa industri ini dengan larutan alkali menghasilkan struktur polimerik aluminosilikat yang kuat dan tahan lama. Beton geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Davidovits pada tahun 1970-an

sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan beton konvensional.

Menurut Davidovits (2013), geopolimer adalah bahan yang terbentuk melalui polimerisasi aluminosilikat dalam larutan alkali. Bahan ini memiliki struktur tiga dimensi yang mirip dengan zeolit, tetapi dengan sifat mekanis yang lebih unggul. Beton geopolimer tidak hanya memiliki kekuatan tekan yang tinggi, tetapi juga ketahanan terhadap serangan kimia, suhu tinggi, dan kondisi lingkungan yang agresif.

Berbeda dengan beton konvensional yang menggunakan semen Portland sebagai bahan pengikat utama, beton geopolimer menggunakan bahan pozzolan yang bereaksi dengan larutan alkali. Larutan alkali yang digunakan biasanya terdiri dari natrium silikat dan natrium hidroksida. Proses geopolimerisasi menghasilkan ikatan kuat antara partikel-partikel aluminosilikat, memberikan beton geopolimer sifat mekanis yang superior dan durabilitas yang tinggi.

Selain itu, beton geopolimer memiliki keuntungan lingkungan yang signifikan. Proses produksi semen Portland merupakan sumber utama emisi CO2 dalam industri konstruksi. Dengan mengurangi atau menggantikan penggunaan semen Portland, beton geopolimer dapat mengurangi emisi karbon secara drastis. Menurut *Global Carbon Project* (2020), industri semen bertanggung jawab atas sekitar 8% dari total emisi karbon dioksida global setiap tahunnya. Penggunaan beton geopolimer yang menggunakan bahan sisa industri dapat membantu mengurangi jejak karbon dan mendukung pembangunan berkelanjutan.

3.2.1. Proses Pembentukan Geopolimer

Proses pembentukan geopolimer melibatkan reaksi kimia antara bahan kaya aluminosilikat dan larutan alkali, yang menghasilkan struktur tiga dimensi polimerik aluminosilikat. Proses ini dikenal sebagai geopolimerisasi dan terdiri dari beberapa tahap utama, yaitu pelarutan, polikondensasi, dan kristalisasi. Berikut ini adalah penjelasan mendetail mengenai masing-masing tahap tersebut.

1. Pelarutan (*Dissolution*)

   Pelarutan merupakan tahap awal dalam proses geopolimerisasi, di mana bahan yang kaya akan aluminosilikat seperti *fly ash* atau *slag* bereaksi dengan larutan alkali. Larutan alkali yang umum digunakan adalah *Natrium Hidroksida* (NaOH) dan *Natrium Silikat* (Na_2SiO_3). Pada tahap ini, ion-ion alkali menyerang ikatan kimia dalam struktur aluminosilikat, sehingga menyebabkan pelarutan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) ke dalam larutan. Reaksi kimia dasar yang terjadi dapat digambarkan sebagai berikut:

   $$Aluminosilikat + NaOH \rightarrow Na^+ + AI(OH)_4^- + Si(OH)_4$$

   Menurut Provis dan van Deventer (2009), pelarutan material *pozzolan* oleh larutan alkali merupakan langkah penting untuk memulai reaksi geopolimerisasi secara efektif.

2. Polikondensasi *(Polycondensation)*

   Setelah proses pelarutan, ion silika dan alumina yang telah terlarut dalam larutan alkali mengalami reaksi polikondensasi, yaitu pembentukan ikatan kimia baru yang membentuk struktur jaringan tiga dimensi dari polimer aluminosilikat. Pada tahap ini terbentuk ikatan siloksan (Si–O–Si) dan aloksan (Al–O–Si), yang memberikan kekuatan mekanik dan durabilitas pada geopolimer. Reaksi kimia sederhana yang menggambarkan proses ini antara lain:

   $$Si(OH)_4 + Si(OH)_4 \rightarrow Si - O - Si + 2H_2O$$
   $$AI(OH)_4^- + Si(OH)_4 \rightarrow Si - O - Si + 2H_2O$$

   Menurut Davidovits (2013), tahap polikondensasi merupakan inti dari proses pembentukan jaringan geopolimer yang bertanggung jawab atas sifat mekanik yang baik dan ketahanan lingkungan dari material ini.

3. Pemadatan Struktur dan Curing

   Tahap akhir dari proses geopolimerisasi bukanlah kristalisasi dalam arti pembentukan kristal mineral seperti pada zeolit, melainkan pemadatan dan pembentukan struktur gel aluminosilikat yang umumnya bersifat amorf atau

semi-kristalin. Pada tahap ini, material geopolimer mengalami proses *curing* (pengawetan) pada suhu tertentu guna mempercepat reaksi pembentukan jaringan polimer dan meningkatkan kekuatan serta durabilitasnya. Proses *curing* umumnya dilakukan pada suhu antara 60–80°C selama beberapa jam hingga beberapa hari, tergantung pada jenis bahan, konsentrasi larutan alkali, dan karakteristik teknis yang diinginkan. Van Deventer et al. (2012) menekankan bahwa suhu curing yang tepat sangat berpengaruh terhadap pembentukan struktur geopolimer yang kuat, padat, dan tahan terhadap pelapukan maupun serangan kimia.

3.3 Bahan Penyusun Beton Geopolimer

Beton geopolimer merupakan inovasi dalam teknologi material yang bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan semen Portland konvensional. Beton geopolimer memanfaatkan reaksi kimia antara bahan sisa industri yang kaya *Aluminosilikat* dengan larutan alkali untuk membentuk bahan pengikat yang kuat dan tahan lama. Berikut adalah komponen utama dari material penyusun beton geopolimer:

3.3.1. Agregat

Agregat adalah material granular yang digunakan dalam campuran beton atau adukan untuk memberikan kekuatan struktural dan mengisi volume. Agregat dapat berupa pasir, kerikil, batu pecah, atau bahan serupa lainnya. Penggunaan agregat dalam beton sangat penting karena menyumbang sekitar 60-75% dari total volume

beton, sehingga mempengaruhi sifat mekanik dan durabilitas beton secara keseluruhan
.

1. Agregat kasar adalah komponen utama dalam campuran beton yang berfungsi untuk memberikan kekuatan dan stabilitas struktural. Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2002 dan ASTM C33, terdapat spesifikasi tertentu yang harus dipenuhi oleh agregat kasar. Menurut SNI 03-2847-2002, agregat kasar harus memiliki ukuran butir yang bervariasi dan distribusi ukuran butir harus mengikuti gradasi yang telah ditentukan. Gradasi ini penting untuk memastikan kepadatan maksimum dan mengurangi rongga-rongga dalam beton. Ukuran maksimum butiran agregat kasar umumnya adalah 40 mm, tetapi dalam kondisi khusus dapat mencapai hingga 100 mm. Selain itu, agregat kasar harus bebas dari bahan-bahan yang dapat mengganggu proses hidrasi semen, seperti bahan organik dan lumpur. Menurut ASTM C33, standar internasional yang juga digunakan untuk spesifikasi agregat beton, agregat kasar harus memenuhi syarat-syarat berikut:
    a. Ukuran partikel harus memenuhi gradasi yang telah ditetapkan untuk memastikan distribusi ukuran yang baik dalam campuran beton.
    b. Agregat kasar harus bebas dari bahan berbahaya seperti kotoran organik, debu, dan bahan lainnya yang dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton.
    c. Kekuatan agregat kasar harus cukup tinggi untuk menahan beban yang akan diterima oleh beton selama pemakaian.

    Persyaratan agregat kasar dalam campuran beton sesuai dengan SNI 03-2847-2002 meliputi:
    a. Gradasi: Agregat kasar harus memiliki gradasi yang baik untuk mencapai kepadatan maksimum dan mengurangi rongga-rongga udara dalam beton.
    b. Kebersihan: Agregat kasar harus bersih dan bebas dari bahan organik, lumpur, dan partikel-partikel halus yang dapat mengganggu proses ikatan semen dan agregat.

c. Kekuatan: Agregat kasar harus memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban yang akan diterima oleh beton, termasuk beban tekan dan geser.
d. Kekerasan: Agregat harus memiliki kekerasan yang cukup untuk mengurangi keausan selama proses pencampuran dan pemadatan.
e. Berat Jenis dan Penyerapan Air: Agregat kasar harus memiliki berat jenis yang sesuai dan kemampuan penyerapan air yang rendah untuk menjaga kekuatan dan durabilitas beton.

Dengan memenuhi spesifikasi dari SNI 03-2847-2002 dan ASTM C33, agregat kasar dapat memberikan performa yang optimal dalam campuran beton, memastikan kekuatan dan durabilitas struktur beton yang dihasilkan.

2. Agregat halus adalah komponen penting dalam campuran beton yang berfungsi untuk mengisi ruang kosong antara agregat kasar, menghasilkan campuran yang lebih padat dan homogen. Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2002 dan ASTM C33, agregat halus harus memiliki ukuran partikel yang bervariasi dengan distribusi ukuran yang terkontrol untuk memastikan kinerja yang optimal dalam campuran beton. Menurut SNI 03-2847-2002, agregat halus adalah butiran mineral yang memiliki ukuran kurang dari 4,75 mm. Agregat halus harus memenuhi gradasi tertentu yang ditetapkan untuk memastikan bahwa partikel-partikel agregat dapat saling mengisi ruang kosong dan memberikan kekompakan pada beton. Gradasi ini membantu dalam mengurangi porositas dan meningkatkan kekuatan beton. Sesuai dengan ASTM C33, agregat halus harus terdiri dari partikel yang lebih kecil dari 4,75 mm dan harus memenuhi persyaratan gradasi yang ketat untuk memastikan kualitas dan konsistensi dalam campuran beton. ASTM C33 mengatur bahwa distribusi ukuran butiran harus sedemikian rupa sehingga dapat meningkatkan *workability* dan kekuatan akhir beton.

Persyaratan agregat halus dalam campuran beton sesuai dengan SNI 03-2847-2002 meliputi:

a. Gradasi: Agregat halus harus memiliki gradasi yang baik untuk memastikan distribusi partikel yang optimal, meningkatkan kepadatan dan mengurangi porositas dalam beton.
b. Kebersihan: Agregat halus harus bebas dari kotoran, bahan organik, lumpur, dan partikel halus lainnya yang dapat mengganggu proses hidrasi semen dan mengurangi kekuatan beton.
c. Kandungan Lumpur: Kandungan lumpur dalam agregat halus harus rendah. SNI menetapkan bahwa kandungan lumpur maksimal adalah 5% dari berat total agregat halus.
d. Kekerasan: Agregat halus harus cukup keras untuk menahan proses pencampuran, pemadatan, dan penggunaan beton tanpa mengalami degradasi.
e. Reaktivitas Alkali-Silika: Agregat halus harus diuji untuk reaktivitas alkali-silika untuk mencegah reaksi yang dapat merusak beton dalam jangka panjang.

Dengan memenuhi spesifikasi dari SNI 03-2847-2002 dan ASTM C33, agregat halus dapat memastikan kualitas dan performa yang optimal dalam campuran beton, memberikan kekuatan dan durabilitas yang dibutuhkan untuk aplikasi konstruksi yang beragam.

3.3.2. Alkali Aktivator

Alkali aktivator adalah bahan kimia yang digunakan untuk memulai dan mempercepat reaksi polimerisasi dalam sistem geopolimer. Geopolimer sendiri merupakan material alternatif pengganti beton konvensional yang lebih ramah lingkungan karena mampu memanfaatkan limbah industri, seperti abu terbang (fly ash), slag, dan limbah marmer sebagai bahan baku utama. Aktivator alkali berperan penting dalam melarutkan kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dari material tersebut, sehingga memungkinkan pembentukan jaringan polimer tiga dimensi yang

menghasilkan struktur keras dan stabil (Provis dan Van Deventer, 2009; Gao dan Yu, 2019).

Alkali aktivator yang umum digunakan terdiri atas natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3), atau kombinasi dari keduanya. Pemilihan jenis, rasio, dan konsentrasi aktivator sangat memengaruhi performa beton geopolimer, baik dari segi kekuatan mekanik, workability, maupun ketahanan terhadap lingkungan ekstrem.

1. Fungsi dan Manfaat
    a. Natrium Hidroksida (NaOH)

        NaOH bertindak sebagai sumber ion hidroksida (OH^-) yang sangat reaktif dan bertugas melarutkan struktur amorf silikat dan aluminat dari material dasar. Proses ini memungkinkan terbentuknya senyawa-senyawa aktif yang kemudian akan berpolimerisasi membentuk gel natrium-alumino-silikat-hidrat (N-A-S-H). NaOH juga berperan dalam mempercepat proses aktivasi awal dan memengaruhi kecepatan pembentukan struktur geopolimer (Davidovits, 1988; Hardjito dan Rangan, 2005).

    b. Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

        Na_2SiO_3 berfungsi sebagai sumber silika tambahan dalam larutan aktivator. Kandungan silika ini memperkuat pembentukan jaringan gel geopolimer, meningkatkan kekuatan tekan, dan mengurangi porositas pada hasil akhir. Na_2SiO_3 juga membantu meningkatkan kepadatan struktur mikro dan kestabilan beton terhadap serangan kimia dan suhu tinggi (Olivia & Nikraz, 2011; Provis & Van Deventer, 2009).

    c. Manfaat Lingkungan dan Kinerja

        Penggunaan alkali aktivator dalam beton geopolimer memberikan sejumlah manfaat signifikan, antara lain:

        1) Membantu mengurangi emisi karbon karena tidak menggunakan semen Portland sebagai bahan utama.
        2) Memanfaatkan limbah industri yang sulit terurai menjadi material konstruksi yang bernilai tambah.

3) Memberikan ketahanan yang baik terhadap serangan kimia, suhu tinggi, serta kekuatan mekanik yang memadai (Fernandez-Jimenez dan Palomo, 2005; Hassan, dkk. 2019; Pacheco-Torgal, dkk. 2008; Guo, dkk. 2010; Hardjito, dkk. 2010).

2. Aplikasi

Alkali aktivator digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi, termasuk pembuatan paving block, batu bata, dan elemen struktural lainnya yang memerlukan kekuatan tinggi dan durabilitas baik. Ini menjadi pilihan yang semakin populer karena keunggulan lingkungan dan performanya (Nunes, dkk. 2019; Aydin dan Baradan, 2012).

3.3.3. Air

Air merupakan komponen dasar dalam pembuatan campuran beton. Mulyono (2004) menyatakan bahwa air yang digunakan dalam campuran beton dapat berasal dari berbagai sumber seperti air tawar (sungai, danau, telaga, dan situ), air laut, atau bahkan air limbah, asalkan memenuhi persyaratan mutu yang telah ditentukan. Air berfungsi sebagai pelarut yang mempermudah pencampuran beton. Dalam beton geopolimer, air digunakan untuk melarutkan alkali aktivator seperti NaOH dan Na_2SiO_3 sehingga dapat dengan mudah tercampur dengan prekursor dan agregat. Berdasarkan SNI 03-2847-2002, air yang digunakan dalam campuran beton harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Air yang digunakan harus bersih dan bebas dari zat-zat yang dapat merusak beton, seperti oli, asam, atau bahan berbahaya lainnya.
2. Air yang tidak layak untuk diminum tidak boleh digunakan, kecuali jika memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan.

Dengan memastikan air yang digunakan memenuhi standar ini, kualitas dan kekuatan beton dapat terjaga.

3.3.4. *Aquades*

Aquades, atau air murni, sering digunakan untuk melarutkan zat kimia seperti NaOH padat. *Aquades* memiliki karakteristik yang tidak berbau, tidak berasa, dan tidak

berwarna, serta hanya mengandung H2O murni. Dalam campuran beton geopolimer, aquades berfungsi sebagai pelarut untuk NaOH padat, yang digunakan dalam pembuatan *binder* geopolimer. *Binder* geopolimer ini kemudian berperan sebagai salah satu komponen aktivator dalam campuran beton geopolimer.

3.3.5. *Fly Ash*

Fly ash merupakan limbah berbentuk butiran halus yang dihasilkan dari pembakaran batubara, terutama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Material ini memiliki sifat pozzolan, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) di lingkungan basa untuk membentuk senyawa yang bersifat sementasi. Sifat pozzolanik fly ash berasal dari kandungan *Silikon Dioksida* (SiO_2) dan *Aluminium Oksida* (Al_2O_3) yang tinggi.

Menurut standar ASTM C618-12, fly ash didefinisikan sebagai residu halus hasil pembakaran batubara bubuk dan diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan kandungan kalsiumnya, yaitu:

1. Fly ash kelas F (Low Calcium) dengan kandungan CaO < 10%
2. Fly ash kelas C (High Calcium) dengan kandungan CaO > 10%

Fly ash kelas F umumnya dihasilkan dari pembakaran batubara jenis antrasit atau bituminous, sedangkan *fly ash* kelas C berasal dari batubara jenis sub-bituminous atau lignit. Dalam aplikasi geopolimer, *fly ash* kelas F lebih sering digunakan karena kandungan silika dan alumina yang lebih tinggi, meskipun memiliki waktu setting yang lebih lambat dibandingkan fly ash kelas C. Hal ini disebabkan oleh sifat semen (*cementitious*) yang dimiliki fly ash kelas C, sedangkan fly ash kelas F murni bersifat pozzolan.

Adapun persyaratan kimia fly ash berdasarkan ASTM C618-12 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3. 1 Persyaratan Kimia *Fly Ash*

Unsur Kimia	*Fly Ash* Kelas F	*Fly Ash* Kelas C
SiO2 + Ai2O3 + Fe2O3, minimal, %	70,0	50,0
SO3, Maksimal, %	5,0	5,0
Kadar Air, Maksimal, %	3,0	3,0
Hilang Pijar / LOI, Maksimal, %	6,0	6,0

Sumber: ASTM C618-12



Gambar 3. 1 *Fly Ash*

Selain itu, berdasarkan literatur, berat jenis (specific gravity) fly ash berkisar antara 1,8 hingga 2,3 g/cm³, tergantung pada sumber batubara dan kondisi pembakarannya (Provis dan van Deventer, 2009). Fly ash juga dapat mengandung logam berat dalam jumlah jejak seperti *Arsen* (As), *Kadmium* (Cd), *Kromium* (Cr), dan *Timbal* (Pb), namun biasanya dalam kadar yang sangat kecil.

Karena kandungan silika dan alumina yang tinggi, serta distribusi partikel yang halus, *fly ash* kelas F sangat sesuai untuk digunakan sebagai bahan utama dalam pembentukan matriks beton geopolimer.

3.3.6. Limbah Marmer sebagai Bahan Pengisi

Limbah marmer merupakan sisa produksi dari industri marmer yang dihasilkan selama proses penambangan, pemotongan, dan pengolahan batu marmer. Limbah ini umumnya berbentuk bubuk atau serpihan halus, dan seringkali dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengelolaan yang memadai, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran air dan tanah. Penggunaan limbah marmer sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam campuran beton geopolimer menjadi salah satu solusi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, sekaligus menawarkan manfaat teknis.

1. Komposisi Kimia dan Sifat Fisik Limbah Marmer

   Secara umum, limbah marmer memiliki komposisi kimia yang mirip dengan batuan asalnya, yaitu batuan karbonat seperti kalsit ($CaCO_3$) dan dolomit. Komponen utama dari limbah marmer adalah kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang dapat terurai menjadi kalsium oksida (CaO) selama pemanasan, dengan kadar yang dilaporkan mencapai 94–98% (Kumar, dkk. 2017). Selain itu, terdapat kandungan magnesium oksida (MgO) sekitar 0,8–1%, serta sejumlah kecil natrium oksida (Na_2O), kalium oksida (K_2O), dan senyawa minor lainnya seperti silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dalam kadar sangat rendah. Limbah marmer memiliki berat jenis yang diperkirakan berada dalam kisaran 2,6 hingga 2,8 g/cm³, setara dengan berat jenis batuan marmer alami. Sifat fisik ini memungkinkan limbah marmer berperan sebagai bahan pengisi padat yang mampu meningkatkan kerapatan matriks beton geopolimer, sehingga memperbaiki sifat mekanis dan durabilitasnya (Rashad, 2012). Selain bersifat padat dan inert secara kimia, limbah marmer juga memiliki sifat abrasif yang rendah, yang menjadikannya bahan yang aman terhadap keausan mekanis dalam campuran beton.

2. Manfaat Penggunaan Limbah Marmer dalam Beton Geopolimer

   a. Meningkatkan kepadatan dan kekuatan tekan

      Struktur kalsium karbonat dalam limbah marmer membantu mengisi rongga-rongga pada matriks beton, sehingga menghasilkan beton yang

lebih padat, kuat, dan homogen. Penelitian oleh Kumar, dkk. (2018) menunjukkan bahwa penambahan limbah marmer dalam campuran beton geopolimer dapat meningkatkan kekuatan tekan hingga 15% dibandingkan beton tanpa limbah marmer.

b. Mengurangi dampak lingkungan

Dengan memanfaatkan limbah marmer sebagai bahan konstruksi, jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan dapat dikurangi secara signifikan. Hal ini berkontribusi terhadap penurunan pencemaran dan mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan.

c. Menghemat biaya produksi

Limbah marmer merupakan material yang murah dan tersedia dalam jumlah melimpah dari industri batuan alam. Pemanfaatannya dapat mengurangi kebutuhan terhadap agregat alam yang lebih mahal serta membantu menurunkan biaya total produksi beton.

d. Meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi

Menurut penelitian Singh dan Suman (2020), beton geopolimer dengan tambahan limbah marmer menunjukkan ketahanan termal yang lebih baik, karena kandungan karbonatnya mampu menstabilkan struktur beton pada suhu tinggi.

e. Meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia

Kalsium karbonat dari limbah marmer dapat bereaksi dengan larutan alkali dan membantu membentuk struktur yang lebih stabil. Studi oleh Ali dan Qureshi (2019) menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan substitusi 20% limbah marmer memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap serangan sulfat dan asam dibandingkan beton konvensional.

2. Proses Pengolahan Limbah Marmer untuk Penggunaan dalam Beton Geopolimer

Sebelum digunakan dalam campuran beton geopolimer, limbah marmer harus melalui beberapa tahapan pengolahan untuk memastikan kualitas dan kemurniannya, yaitu:

a. Limbah dikumpulkan dari lokasi produksi dan disortir untuk memisahkan kontaminan seperti tanah, logam, dan partikel asing lainnya.
b. Limbah marmer diseragamkan dalam bentuk bubuk halus melalui proses penggilingan agar mudah tercampur dan berinteraksi dalam larutan alkali.
c. Bubuk limbah kemudian dicuci dengan air bersih dan dikeringkan untuk menghilangkan kelembapan serta bahan-bahan pengganggu yang dapat mempengaruhi kualitas campuran.
d. Limbah marmer yang telah diolah kemudian dicampurkan dengan bahan pozzolan lain seperti fly ash, serta larutan aktivator alkali, untuk membentuk pasta beton geopolimer yang homogen dan berkinerja tinggi.

Dengan pengolahan yang tepat, limbah marmer dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengisi alternatif yang tidak hanya ekonomis, tetapi juga mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan dalam industri konstruksi.



Gambar 3. 2 Limbah Marmer

3.4 Proses *Mix Design* Beton Geopolimer

Penelitian ini menggunakan beton geopolimer. Hingga saat ini, belum terdapat standar baku yang secara khusus mengatur metode pencampuran beton geopolimer (mix design). Oleh karena itu, perencanaan campuran dalam penelitian ini disusun

berdasarkan pendekatan perbandingan larutan aktivator dan mengacu pada SNI 03-2843-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Dengan kata lain, desain campuran beton geopolimer disusun menyerupai beton konvensional yang disesuaikan dengan kuat tekan yang direncanakan, namun dengan perbedaan utama terletak pada penggantian semen secara penuh oleh material berbasis pozzolan, seperti abu terbang (fly ash) dan abu sekam padi. Bahan-bahan ini direaksikan menggunakan larutan aktivator yang terdiri dari Natrium Silikat (Na_2SiO_3) dan Natrium Hidroksida (NaOH).

Dalam penelitian ini, bahan pengikat (binder) dicampurkan menggunakan metode pencampuran basah (wet mixing). Natrium Silikat (Na_2SiO_3) yang digunakan berbentuk larutan kental berwarna abu-abu dan diperoleh secara komersial. Sedangkan Natrium Hidroksida (NaOH) digunakan dalam bentuk padat, kemudian dilarutkan terlebih dahulu dengan aquades hingga mencapai konsentrasi tertentu.

Setelah menentukan jenis bahan dan metode pencampuran, langkah selanjutnya adalah menentukan komposisi larutan aktivator alkali. Komposisi ini sangat memengaruhi proses polimerisasi, workability, dan kekuatan akhir dari beton geopolimer yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, digunakan perbandingan larutan Na_2SiO_3 terhadap NaOH sebesar 4:2, atau setara dengan rasio 2:1. Pemilihan rasio ini dilakukan berdasarkan pertimbangan keseimbangan antara reaktivitas kimia, kemudahan pengerjaan (workability), serta kekuatan tekan hasil akhir. Rasio 2:1 dinilai optimal karena menghasilkan larutan yang tidak terlalu kental, namun tetap mengandung cukup silika untuk mendukung pembentukan struktur gel geopolimer. Jika rasio Na_2SiO_3 terlalu tinggi, larutan menjadi kental dan sulit dicampur; sementara jika terlalu rendah, proses pembentukan gel menjadi tidak maksimal. Studi oleh Loekito dan Wardhono (2019) menunjukkan bahwa rasio 2:1 mampu menghasilkan beton geopolimer dengan kuat tekan tinggi serta kestabilan struktur mikro yang baik.

Selain rasio larutan, penelitian ini juga menggunakan konsentrasi larutan NaOH sebesar 10 molar (10 M). Pemilihan konsentrasi ini didasarkan pada sejumlah kajian yang menyatakan bahwa molaritas 10 M memberikan reaksi aktivasi yang cukup

efektif dalam melarutkan komponen silikat dan aluminat dari prekursor tanpa menimbulkan efek negatif terhadap struktur mikro beton. Penggunaan molaritas yang lebih tinggi, seperti 12 hingga 14 M, justru dapat memicu reaksi yang terlalu cepat dan eksotermik, sehingga meningkatkan risiko terbentuknya pori-pori berlebih dan menurunnya kekuatan tekan akibat ketidakteraturan mikrostruktur (Putra, dkk. 2018; Singh dan Middendorf, 2020). Oleh karena itu, penggunaan larutan NaOH 10 M dipilih sebagai titik tengah yang aman, efisien, dan mampu memberikan hasil kekuatan tekan yang sesuai dengan target rancangan.

Dengan pemilihan rasio larutan aktivator sebesar 2:1 dan konsentrasi NaOH 10 M ini, diharapkan proses pembentukan beton geopolimer dapat berlangsung secara optimal, baik dari segi reaksi kimia, kekuatan mekanik, maupun kemudahan pengerjaan di laboratorium.

Berikut adalah tahapan pencampuran mix design mengacu pada SNI 03-2843-2000:

1. Menentukan Kuat Tekan Beton yang Direncanakan: Menentukan kuat tekan beton berdasarkan umur dan bentuk sampel. Dalam penelitian ini, kuat tekan yang direncanakan adalah 25 MPa pada umur 28 hari dengan sampel silinder berukuran 15 cm x 30 cm.
2. Menentukan Nilai Deviasi Standar (Sr): Deviasi standar dapat ditentukan berdasarkan tabel faktor pengalinya. Faktor pengali deviasi standar dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Faktor Pengali Deviasi Standar

Jumlah Pengujian	Faktor Pengali Deviasi Standar
Kurang dari 15	Diterangkan lebih lanjut

15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 atau lebih	1,00

Sumber: SNI 03-2834-2000

Catatan: Jika jumlah pengujian di lapangan kurang dari 15, maka nilai rata-rata kuat tekan yang direncanakan (*f'cr*) harus tidak kurang dari (*f'c* + 12 MPa).

3. Menghitung Nilai Tambah: Nilai tambah untuk campuran beton dapat dihitung dengan persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$M = 1{,}64 \times Sr \quad (3.1)$$

Keterangan:

M = Nilai tambah,

1,64 = Tetapan statistic (nilainya disesuaikan dengan persantase kegagaglan hasil uji sebesar maksimum 5%, dan

Sr = Deviasi standar.

Menghitung Kuat Tekan Rata-rata (f'cr):

4. Kuat tekan rata-rata yang direncanakan dapat dihitung menggunakan persamaan 3.2 berikut:

$$f'cr = f'c + M \quad (3.2)$$

Keterangan:

f'cr = Kuat tekan beton rata-rata (MPa)

f'c = Kuat tekan beton rencana (MPa)

M = Nilai tambah

5. Menentukan Jenis Semen:

Memilih jenis semen yang sesuai untuk campuran beton geopolimer.

6. Menentukan Jenis Agregat:

a. Agregat halus berupa pasir.

b. Agregat kasar berupa kerikil.

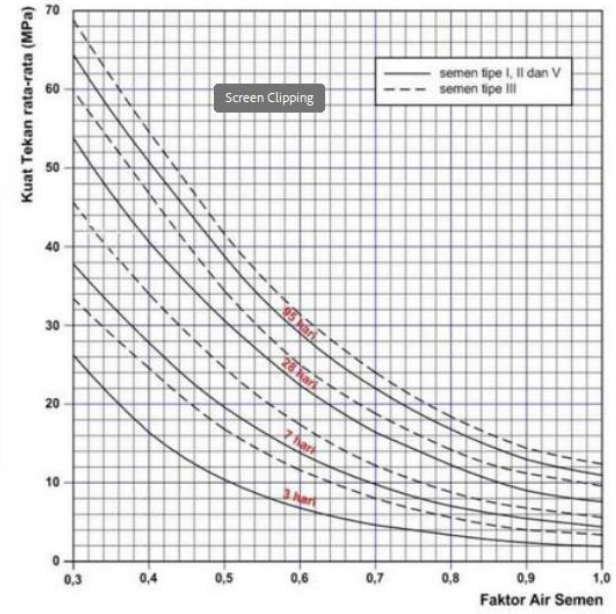
7. Menentukan Faktor Air Semen (fas):

Menentukan faktor air semen (fas) dapat dilakukan dengan merujuk pada tabel perkiraan kuat tekan beton dengan fas dan agregat kasar yang umumnya digunakan di Indonesia. Kemudian, dapat dilihat grafik hubungan antara kuat tekan dengan fas.

Tabel 3. 3 Perkiraan Kuat Tekan beton dengan fas, dan Agregat kasar yang umumnya digunakan di Indonesia

Jenis Semen	Jenis Agregat	Kekuatan Tekan Beton (Mpa)				
		Umur (Hari)				Bentuk benda uji
		3	7	28	29	
Semen Portland Tipe 1	Batu tidak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu Pecah	19	27	37	45	
Semen tahan Sulfat Tipe II, V	Batu tidak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu Pecah	25	32	45	54	
Semen Portland Tipe III	Batu tidak dipecahkan	21	28	38	44	Silinder
	Batu Pecah	25	33	44	48	
	Batu tidak dipecahkan	25	31	46	53	Kubus
	Batu Pecah	30	40	53	60	

Sumber: SNI 03-2834-2000



Gambar 3. 3 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen (Benda Uji silinder 15 x 30 cm)

8. Menetapkan Faktor Air Semen Maksimum (*fas* Maksimum):

   Jika nilai *fas* yang diperoleh pada langkah 7 lebih kecil dari yang diinginkan, maka digunakan nilai *fas* terendah. Tabel persyaratan jumlah semen minimum dan *fas* maksimum dapat dilihat pada Tabel 3.4 di bawah ini.

Tabel 3. 4 Persyaratan Jumlah Semen Minimum Dan Fas Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus

Jenis Pembetonan	Jumlah Semen Minimum Per m^3 beton (kg)	Nilai Faktor Air Semen Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan		
a. Keadaan keliling non korosif	275	0,60
b. Keadaan keliling korosif	325	0,52
Beton di luar ruangan bangunan		
a. Tidak terlindung dari hujan dan Terik matahari langsung	325	0,60
b. Terlindung dari hujan dan Terik matahari langsung	275	0,60
Betonmasuk ke dalam tanah		
a. Mengalami keadaan basah dan kering bergantii-ganti	325	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		Tabel 5
Beton kontinu berhubungan dengan air tawar dan air laut		Tabel 6

Sumber:SNI 03-2834-2000

9. Menetapkan Slump:
   Menetapkan nilai slump yang sesuai untuk campuran beton geopolimer.
10. Menentukan Ukuran Butiran Agregat Maksimum:
    Menentukan ukuran butiran agregat maksimum berdasarkan pengujian properties agregat.
11. Menentukan Kadar Air Bebas:

Menentukan kadar air bebas dengan menggunakan Tabel 3.5 sesuai SNI 03-2843-2000 dan persamaan 3.3 berikut.

Tabel 3. 5 Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m3) yang dibutuhkan untuk kemudahaan dalam adukan beton

Ukuran besar butir agregat maksimum	Jenis Agregat	Slump (mm)			
		0-10	10-30	30-60	60-180
10	Batu tidak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu Pecah	180	205	230	250
20	Batu tidak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu Pecah	170	190	210	225
40	Batu tidak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu Pecah	155	175	190	205

Sumber: SNI 03-2834-2000

$$W = \frac{2}{3}Wh + \frac{1}{3}Wk \quad (3.3)$$

Keterangan

w = Kadar air bebas (kg/m^3),

Wh = Perkiraan jumlah air untuk agregat halus (kg/m^3), dan

Wk = Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar (kg/m^3).

12. Menghitung Kebutuhan Jumlah Semen:

Kebutuhan jumlah semen dapat dihitung dengan persamaan 3.4 berikut:

Keterangan:

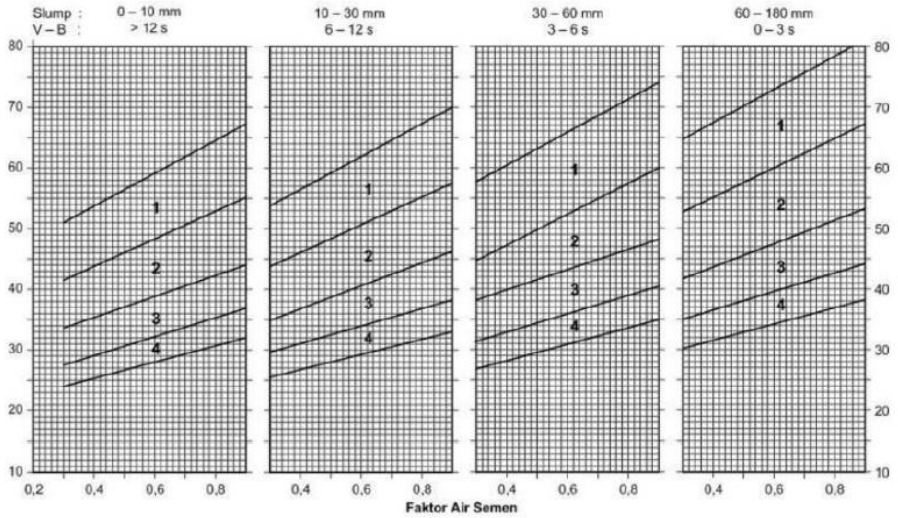
$$c = \frac{w}{fas} \quad (3.4)$$

c = Jumlah semen (kg/m^3)

w = Kadar air bebas (kg/m^3)

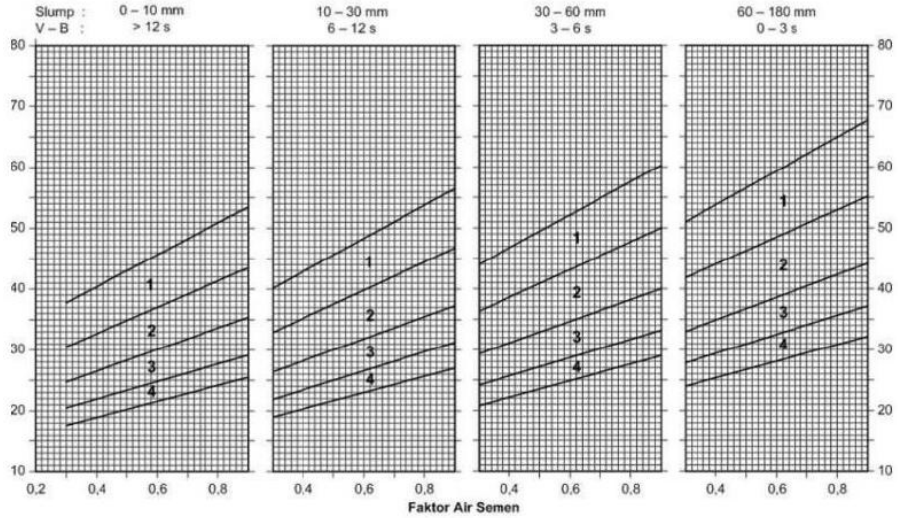
fas = Faktor air semen

13. Menentukan Kebutuhan Semen Maksimum:
    Menentukan jumlah semen maksimum yang dibutuhkan untuk campuran.
14. Menentukan Kebutuhan Semen Minimum:
    Menentukan jumlah semen minimum berdasarkan Tabel 3 pada SNI 03-2843-2000, yang dapat dilihat pada Tabel 3.4.
15. Menyesuaikan Faktor Air Semen:
    Menyesuaikan nilai fas sesuai dengan kebutuhan.
16. Menentukan Susunan Besar Butir Agregat Halus:
    Menentukan distribusi ukuran butir agregat halus.
17. Menentukan Susunan Agregat Kasar atau Gabungan:
    Menentukan distribusi ukuran butir agregat kasar atau campuran agregat kasar dan halus.
18. Menentukan Persen dari Agregat Halus:
    Menentukan persentase agregat halus menggunakan Grafik 13 hingga 15 pada SNI 03-2843-2000, yang dapat dilihat pada Gambar 3.4, Gambar 3.5, dan Gambar 3.6 di bawah ini.



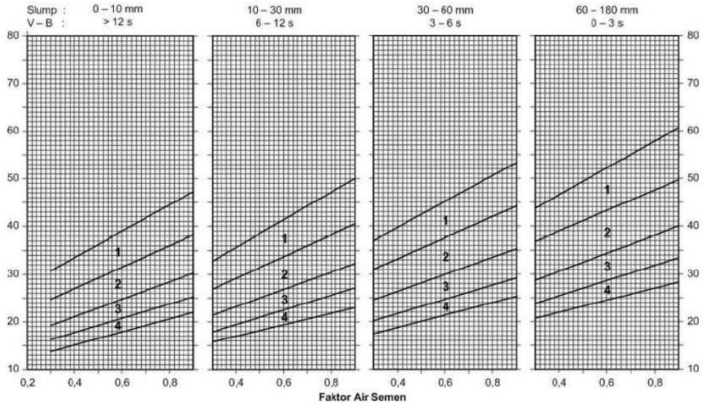
Gambar 3. 4 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 10 mm

(Sumber: SNI 03-2843-2000)



Gambar 3. 5 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 20 mm

(Sumber: SNI 03-2843-2000)



Gambar 3. 6 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 40 mm

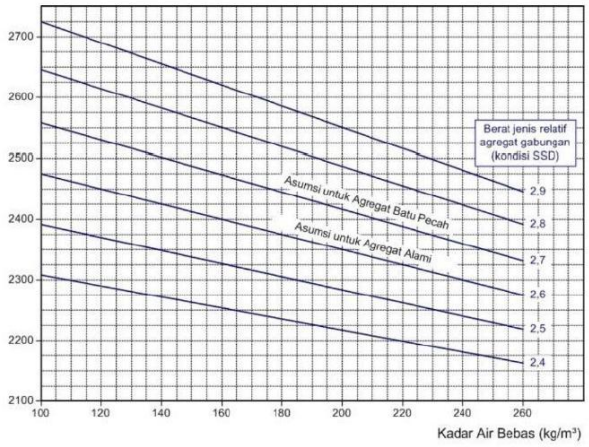
(Sumber: SNI 03-2843-2000)

19. Menghitung Berat Jenis Relatif Agregat:

    Menentukan berat jenis relatif agregat melalui pengujian laboratorium.

20. Menentukan Berat Isi Beton:

    Menentukan berat isi beton berdasarkan Grafik 16 pada SNI 03-2843-2000, yang dapat dilihat pada Gambar 3.7 di bawah ini.



Gambar 3. 7 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan

(Sumber: SNI 03-2843-2000)

21. Menghitung Kadar Agregat Gabungan:
    Menghitung kadar agregat gabungan berdasarkan berat jenis beton dikurangi jumlah kadar semen dan kadar air bebas.
22. Menghitung Kadar Agregat Halus:
    Menghitung kadar agregat halus dari hasil kali persentase agregat halus (langkah 18) dengan agregat gabungan (langkah 21).
23. Menghitung Kadar Agregat Kasar:
    Menghitung kadar agregat kasar dari agregat gabungan (langkah 21) dikurangi kadar agregat halus (langkah 22).
24. Menentukan Proporsi Campuran untuk Tiap m^3:
    Menentukan proporsi campuran untuk tiap m^3 dengan agregat dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD).

Langkah berikut dalam merencanakan campuran beton geopolimer adalah menentukan jumlah aktivator alkali yang diperlukan untuk mereaksikan prekursor. Berikut ini adalah rincian perencanaan aktivator alkali untuk beton geopolimer.

1. Perbandingan Alkali Aktivator:
   Menggunakan perbandingan Na_2SiO_3 dan NaOH sebesar 4:2.
2. Menghitung Molaritas 10M NaOH:
   Molaritas 10M NaOH dihitung menggunakan persamaan 3.5 berikut:

$$M = \frac{massa}{Mr} x \frac{1000}{V} \quad (3.5)$$

Keterangan:

M = Molaritas yang digunakan yaitu 10

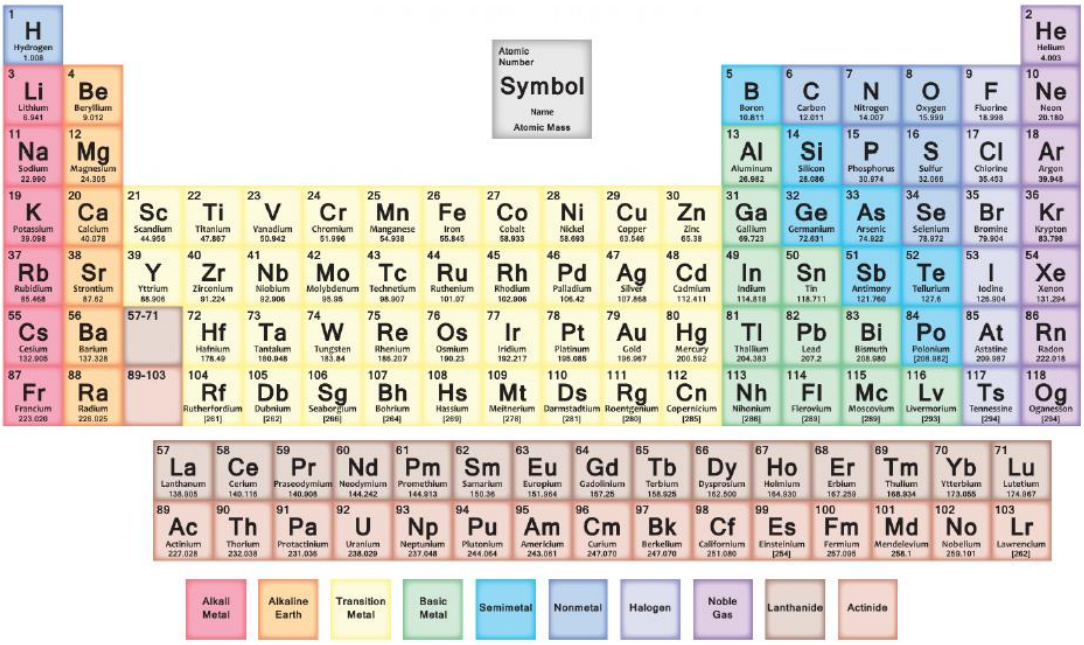
massa = Berat NaOH

v = Volume larutan (liter)

Mr = Massa molekul relatif NaOH

Massa molekul relatif (Mr) NaOH didapatkan dari jumlah massa atom relatif (Ar) unsur dalam senyawa NaOH, yang terdiri atas natrium (Na), oksigen (O), dan

hidrogen (H). Massa atom relatif masing-masing unsur dapat dilihat pada tabel periodik unsur. Tabel periodik unsur-unsur dapat dilihat pada Gambar 3.10 di bawah ini.



Gambar 3. 8 Tabel Periodik Unsur

(Sumber: sciencenotes)

Untuk dapat menghitung molaritas larutan NaOH, langkah awal yang diperlukan adalah menentukan massa molekul relatif (Mr) dari senyawa tersebut. Massa molekul relatif merupakan jumlah dari massa atom relatif (Ar) setiap unsur penyusun senyawa, sesuai dengan rumus kimianya.

a. Natrium (Na) memiliki massa atom relatif 22,990 yang dibulatkan menjadi 23
b. Oksigen (O) memiliki massa atom relatif 15,999 yang dibulatkan menjadi 16

c. Hidrogen (H) memiliki massa atom relatif 1,008 yang dibulatkan menjadi 1

Dengan demikian, massa molekul relatif (Mr) dari senyawa NaOH dapat dihitung dengan cara menjumlahkan massa atom relatif dari ketiga unsur tersebut:

$$\text{Mr NaOH} = Ar_{\text{Na}} + Ar_{\text{O}} + Ar_{\text{H}} = 23 + 16 + 1 = 40$$

Jadi, massa molekul relatif NaOH adalah 40. Nilai ini penting karena digunakan dalam konversi molaritas ke dalam satuan massa (gram) saat menyiapkan larutan NaOH dengan konsentrasi tertentu, misalnya larutan NaOH 10 M.

3.5 Sifat dan Karakteristik Beton

Berikut adalah sifat dan karakteristik dari beton:

1. Beton memiliki kuat tekan yang tinggi namun kuat tarik yang relatif rendah, yaitu sekitar 9% hingga 15% dari kuat tekannya.
2. Karena kuat tarik yang rendah, beton rentan mengalami keretakan yang cenderung membesar seiring berjalannya waktu.
3. Beton mencapai kuat tekan optimalnya pada usia 28 hari.
4. Beton mengalami proses hidrasi, yaitu reaksi kimia antara semen dan air yang menghasilkan panas.

3.5.1. Kuat Tekan Beton (f'c)

Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan sampel beton hancur saat diberi gaya tekan tertentu oleh mesin tekan (SNI 03-1974-1990). Kuat tekan rencana (f'c) mengacu pada kuat tekan yang ditentukan oleh perencana, yang diperoleh dari sampel uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Sementara itu, kuat tekan yang ditargetkan (fcr) adalah kuat tekan rata-rata yang diharapkan dapat melebihi nilai f'c (SNI 03-2834-2000).

Berikut persamaan 3.6 untuk menghitung nilai kuat tekan beton.

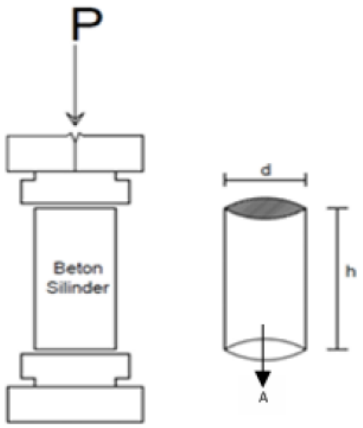
$$f'c = \frac{P}{A} \tag{3.6}$$

Dengan :

f'c = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang sampel uji (mm2)



Gambar 3. 9 Sketsa Pengujian Kuat Tekan

3.5.2. Kuat Tarik Belah

Kuat tarik belah beton adalah nilai beban yang diterapkan pada sampel uji yang diletakkan secara horizontal sejajar dengan permukaan meja mesin uji (SNI 03-2491-2002). Pengujian kuat tarik belah ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan geser komponen struktur yang terbuat dari beton dengan agregat ringan. Pengujian ini menggunakan sampel uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.

Berikut adalah persamaan 3.7 untuk menghitung nilai kuat tarik beton.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \tag{3.7}$$

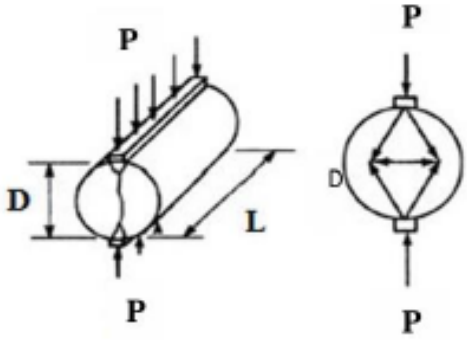
Dengan :

f_{ct} = Kuat Tarik belah (MPa)

P = Beban maksimum (N)

L = Panjang sampel uji (mm)

D = Diameter sampel uji (mm)



Gambar 3. 10 Sketsa Pengujian Kuat Tarik Belah

3.5.3. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas, atau modulus Young, adalah ukuran kekakuan suatu bahan dan merupakan salah satu parameter mekanis yang penting dalam mendesain struktur beton. Modulus elastisitas beton mengukur kemampuan beton untuk mengalami deformasi elastis di bawah beban tekan atau tarik. Parameter ini sangat penting karena berkaitan langsung dengan perilaku struktural dan daya tahan beton dalam berbagai kondisi beban. Menurut ASTM C-469-94, nilai modulus elastisitas beton dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan berikut ini.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0{,}000050} \quad (3.8)$$

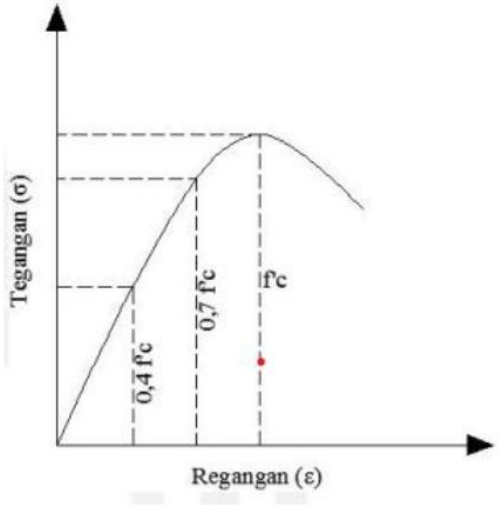
Dengan :

E = Modulus Elastis

S_2 = Tegangan ketika 40 % dari beban *ultimate* (MPa)

S_1 = Tegangan ketika regangan 0,000050 (MPa)

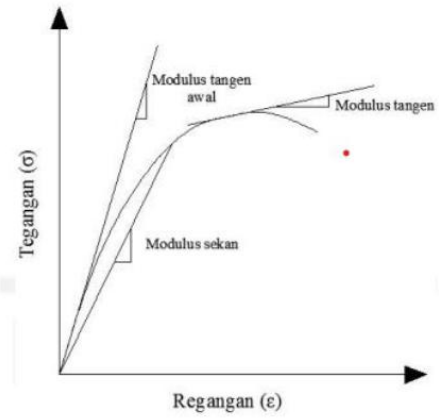
ε_2 = Regangan akibat Tekanan S_2



Gambar 3. 11 Grafik Kurva Hubungan tegangan Regangan Beton

(Sumber : Nawy, 1990)

Dalam konteks analisis material, kurva awal pada diagram tegangan-regangan biasanya bersifat linier. Modulus elastisitas dari kurva ini diidentifikasi melalui gradien garis singgung yang ditarik dari titik asal pada kurva. Gradien ini dikenal sebagai modulus tangen awal. Khususnya, ketika modulus tangen diukur di titik pusat dengan nilai tegangan sekitar 40% dari kekuatan tekan maksimum beton, parameter ini dinamakan modulus elastisitas sekan. Modulus sekan ini merupakan refleksi dari peninjauan terhadap modulus elastisitas. Ilustrasi mengenai modulus tangen dan modulus sekan dapat ditemukan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 12 Modulus Sekan dan Modulus Tangen Beton

(Sumber : Nawy, 1990)

Terkait dengan standar SNI 03-2847 2019, perhitungan modulus elastisitas dapat dilakukan melalui penggunaan formula yang telah ditetapkan dalam standar dan persamaan 3.9 berikut.

$$E_c = 4700 \text{ x } \sqrt{f'c} \tag{3.9}$$

Dengan:

Ec = Modulus elastisitas beton (MPa)

$\sqrt{f'_c}$ = Kuat tekan beton (MPa).

Studi yang dilakukan oleh Tempest (2010) mengusulkan sebuah persamaan empiris terbaru guna memperkirakan nilai modulus elastisitas pada beton geopolimer. Persamaan tersebut tercantum dalam Persamaan 3.10 sebagai berikut.

$$E_c = 3421 \times \sqrt{f'c} \tag{3.10}$$

Dengan:

Ec = Modulus elastisitas beton (MPa)

$\sqrt{f'_c}$ = Kuat tekan beton (MPa).

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini memfokuskan pada substitusi limbah marmer dengan *fly ash* dalam campuran beton geopolimer. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh substitusi limbah marmer terhadap sifat mekanis beton geopolimer.

4.2 Variabel Penelitian

Penelitian ini melibatkan beberapa variabel, yaitu:

1. Variabel Bebas, Persentase substitusi limbah marmer dengan *fly ash* yang bervariasi, yaitu 0%, 15%, 20%, 25%, dan 30%.
2. Variabel terikat, Parameter yang diukur meliputi kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas beton.
3. Variable tetap, Faktor-faktor yang dijaga konstan meliputi bentuk sampel, dimensi benda uji, mutu beton rencana (f'c), konsentrasi alkali aktivator, serta waktu pengujian.

4.3 Bahan yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian sebagai berikut.

1. Abu Terbang (*fly Ash*)

   Penelitian ini menggunakan *fly ash* yang diperoleh dari PT Suradi Sejahtera Raya, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.

2. Limbah Marmer

   Penelitian ini menggunakan limbah marmer yang akan digunakan sebagai bahan substitusi fly ash. Limbah marmer tersebut lolos saringan dengan ukuran 100-200 mm dan diperoleh dari Central Marmer Murah, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.

3. Aktivator

   Aktivator yang digunakan terdiri dari Natrium Silikat (Na_2SiO_3) dalam bentuk larutan dan Natrium Hidroksida (NaOH) dalam bentuk padatan. Campuran larutan aktivator disusun dengan perbandingan 4:2, yaitu 4 bagian Natrium Silikat dan 2 bagian Natrium Hidroksida. Kedua bahan kimia ini diperoleh dari Toko Sari Kimia, Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta

4. Agregat Halus

   Agregat halus diperoleh dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Analisis saringan dilakukan untuk mendapatkan gradasi agregat yang sesuai.

5. Agregat Kasar

   Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini juga berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

6. Air

   Air yang digunakan dalam penelitian ini adalah air bersih yang tidak terkontaminasi, diperoleh dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

7. Aquades

   Aquades digunakan untuk melarutkan NaOH padat agar menjadi larutan NaOH yang diperoleh dari toko Sari Kimia, Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta.

4.4 Peralatan Penelitian

Berikut adalah peralatan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Timbangan - Alat untuk mengukur berat material dan sampel uji.
2. Set Saringan Agregat - Digunakan untuk menyaring agregat agar sesuai dengan ukuran butir yang diperlukan.
3. *Pan* - Wadah untuk material aktivator.
4. Ember - Wadah untuk material agregat dan prekursor.
5. Cetakan Silinder - Digunakan untuk mencetak sampel uji, dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
6. Oven - Digunakan untuk mengeringkan material dan curing beton.
7. Kaliper - Alat untuk mengukur dimensi cetakan sampel uji, sampel uji, dan lainnya.
8. Sekop - Digunakan untuk mengaduk material campuran beton.
9. Gelas Ukur - Digunakan untuk menakar volume material cair seperti bahan tambah air, aktivator, dan lainnya.
10. *Mixer* Beton - Alat untuk mengaduk bahan campuran beton hingga homogen.
11. Kerucut *Abrams* - Digunakan untuk pengujian Slump Test.
12. *Dial Gauge* Regangan - Alat untuk mengukur deformasi bentuk beton pada pengujian modulus elastisitas.
13. *Compression Testing Machine* (CTM) - Alat uji untuk mengetahui kuat tekan dan tarik belah sampel uji silinder beton.

4.5 Benda Uji Penelitian

Dalam penelitian ini, sampel uji yang digunakan adalah beton yang sepenuhnya menggantikan semen dengan abu terbang (*fly ash*) yang disubstitusi dengan limbah marmer. Material ini kemudian direaksikan dengan alkali aktivator berupa *Natrium Silikat* (Na2SiO_3) dan *Natrium Hidroksida* (NaOH). Selain itu, sampel uji lainnya adalah beton normal yang menggunakan semen sebagai bahan pengikat. Aktivator yang digunakan terdiri dari Na_2SiO_3 dan NaOH dengan rasio campuran 4:2. Variasi substitusi limbah marmer yang digunakan adalah 0%, 15%, 20%, 25%, dan 30% dari berat prekursor. Sampel uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm ini diuji untuk mengetahui kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton pada umur 28 hari. Setiap rasio substitusi limbah marmer memiliki 3 sampel uji. Berdasarkan SNI 03-2847-2002, jumlah minimum sampel uji silinder untuk pengujian kuat tekan adalah 3 sampel sesuai dengan umur yang ditentukan. Jumlah rincian sampel uji dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Rincian Benda Uji

<table>
<tr><td rowspan="2">Kadar Limbah Marmer</td><td colspan="4">Jenis Pengujian dan Jumlah Benda Uji</td><td rowspan="2">Umur Benda Uji (hari)</td><td rowspan="2">Kode Benda Uji</td><td rowspan="2">Total Sampel</td></tr>
<tr><td>Jenis Pengujian</td><td>Jumlah Sampel</td><td>Jenis Pengujian</td><td>Jumlah Sampel</td></tr>
<tr><td>-</td><td rowspan="7">Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastis</td><td>3</td><td rowspan="7">Kuat Tarik Belah Beton</td><td>3</td><td>28</td><td>BN</td><td>6</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>0%</td><td>3</td><td>3</td><td>28</td><td>BG0</td><td>6</td></tr>
<tr><td>15%</td><td>3</td><td>3</td><td>28</td><td>BG15</td><td>6</td></tr>
<tr><td>20%</td><td>3</td><td>3</td><td>28</td><td>BG20</td><td>6</td></tr>
<tr><td>25%</td><td>3</td><td>3</td><td>28</td><td>BG25</td><td>6</td></tr>
<tr><td>30%</td><td>3</td><td>3</td><td>28</td><td>BG30</td><td>6</td></tr>
<tr><td colspan="7">Total Keseluruhan Benda Uji (Silinder)</td><td>36</td></tr>
</table>

Keterangan:

BN : Beton normal umur 28 hari.

BG0 : Beton geopolimer dengan umur 28 hari dan kadar limbah marmer 0%.

BG15 : Beton geopolimer dengan umur 28 hari dan kadar limbah marmer 15%.

BG20 : Beton geopolimer dengan umur 28 hari dan kadar limbah marmer 20%.

BG25 : Beton geopolimer dengan umur 28 hari dan kadar limbah marmer 25%.

BG30 : Beton geopolimer dengan umur 28 hari dan kadar limbah marmer 30%.

4.6 Lokasi Penelitian

Pembuatan dan pengujian sampel uji silinder beton geopolimer dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik beton geopolimer yang menggunakan campuran *fly ash* dari limbah PT. Sejahtera Raya, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.

4.7 Persiapan Penelitian

Tahap awal penelitian melibatkan persiapan material yang diperlukan untuk beton normal dan beton geopolimer dengan tambahan admixture. Material yang perlu disiapkan adalah sebagai berikut:

1. Semen Portland (OPC)
2. *Fly ash*
3. Agregat kasar
4. Agregat halus
5. Alkali aktivator terdiri dari natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH)
6. Limbah marmer

4.8 Pengujian Material

4.8.1 Pengujian *Fly Ash*

A. Pengujian Berat Jenis *Fly Ash*

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap material fly ash untuk menentukan berat jenisnya. Pengujian ini bertujuan mendapatkan nilai berat jenis fly ash sesuai dengan standar SNI 15-2531:1991.

B. Berat Isi *Fly Ash*

Berdasarkan SNI 1973:2008, pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat isi fly ash dalam kondisi padat dan gembur.

4.8.2 Pengujian Limbah Marmer

A. Pengujian Berat Jenis Limbah Marmer

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap material limbah marmer untuk menentukan berat jenisnya. Pengujian ini menggunakan metode yang sama seperti pada pengujian semen dan fly ash, bertujuan untuk mendapatkan nilai berat jenis limbah marmer sesuai dengan SNI 1973:2008.

B. Berat Isi Limbah Marmer

Berdasarkan SNI 1973:2008, pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat isi limbah marmer dalam kondisi padat dan gembur.

4.8.3 Pengujian Agregat Halus

A. Kadar Air Agregat Halus

Pengujian kadar air pada agregat halus dilakukan dengan mengukur persentase air yang dapat diuapkan dari sampel agregat melalui proses pengeringan. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengontrol jumlah air yang terkandung dalam beton dengan menentukan total kadar air dalam agregat. Pengujian ini mengacu pada SNI 03-1971:1990.

B. Kadar Kotor Agregat Halus

Pengujian kadar kotor atau lumpur pada agregat halus dilakukan karena keberadaan lumpur dapat mempengaruhi kualitas campuran beton. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa kandungan lumpur dalam agregat halus

berada dalam batas yang diperbolehkan. Standar yang digunakan untuk pengujian ini adalah SNI 03-4428:1997.

C. Kandungan Zat Organik pada Agregat Halus

Pengujian kandungan zat organik pada agregat halus dilakukan untuk menentukan kadar kotoran organik yang ada dalam agregat tersebut. Pengujian ini mengikuti standar SNI 2816:2014.

D. Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Pengujian berat jenis dan daya serap agregat halus dilakukan dengan mengacu pada standar SNI 1970:2008. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan berat jenis agregat halus serta nilai serapan airnya.

E. Berat Isi Agregat Halus

Berdasarkan SNI 1973:2008, pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat isi agregat halus dalam kondisi padat dan gembur.

F. Analisis Saringan Agregat Halus

Gradasi agregat halus ditentukan melalui pengujian analisis saringan. Pengujian ini mengacu pada SNI 03-2834:2000 sebagai standar yang digunakan dalam analisis pengayakan.

4.8.4 Pengujian Agregat Kasar

A. Pengujian Kadar Air

B. Pengujian Berat Jenis

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis agregat kasar.

C. Berat Isi Agregat Kasar

Berdasarkan SNI 1973:2008, pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat isi agregat kasar dalam kondisi padat dan gembur.

D. Kadar Kotor Agregat Kasar

Seperti pengujian kadar kotor pada agregat halus, pengujian ini bertujuan untuk menentukan kandungan lumpur dalam agregat kasar. Pengujian ini mengacu pada standar SNI 03-4428:1997.

E. Keausan Agregat Kasar

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai keausan agregat kasar, yang dinyatakan sebagai persentase berat material yang aus terhadap berat aslinya. Pengujian ini menggunakan istilah-istilah yang tercantum dalam SNI 2417:2008.

F. Analisis Saringan Agregat Kasar

Gradasi agregat kasar ditentukan melalui pengujian analisis saringan. Pengujian ini mengacu pada standar SNI 03-1968:1990.

4.9 Perencanaan Campuran Beton (Mix Design)

Penelitian ini menggunakan SNI 03-6468:2000 sebagai acuan untuk perancangan campuran beton normal dan beton geopolimer. *Fly ash* yang disubstitusi dengan limbah marmer (LM) digunakan sebagai pengganti semen pada beton geopolimer dengan variasi 15%, 20%, 25%, dan 30%. Beton geopolimer menggunakan aktivator berupa NaOH sebagai pengganti air. Berikut adalah tahapan perencanaan campuran beton geopolimer dalam penelitian ini:

1. Menetapkan nilai slump yang direncanakan.
2. Menetapkan nilai *slump flow.*
3. Menentukan ukuran butir agregat maksimum.
4. Menghitung jumlah *fly ash* yang diperlukan.
5. Menentukan jumlah agregat kasar yang diperlukan.
6. Menentukan jumlah agregat halus yang diperlukan.
7. Melakukan penyesuaian kelembaban agregat.
8. Menghitung kebutuhan 10M NaOH.
9. Menyesuaikan campuran beton sesuai komposisi yang direncanakan.

4.10 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Pada tahap pembuatan, sampel uji dibuat dalam dua jenis yaitu beton normal dan beton geopolimer. Beton normal dibuat sesuai dengan mix design yang telah

direncanakan untuk kuat tekan, dan digunakan sebagai acuan dalam pembuatan beton geopolimer. Sampel uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Metode perawatan untuk beton geopolimer dilakukan dengan dry curing, yaitu beton dimasukkan ke dalam oven bersuhu 90°C selama 8 jam, kemudian didiamkan pada suhu ruangan hingga waktu pengujian. Berikut langkah-langkah dalam pembuatan sampel uji:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan, kemudian menimbangnya sesuai dengan campuran beton (*mix design*) yang telah ditentukan.
2. Memastikan agregat kasar dan halus berada dalam kondisi SSD.
3. Memasukkan bahan penyusun beton ke dalam concrete mixer secara bertahap, mulai dari bahan kering, kemudian air, dan seterusnya.
4. Setelah campuran homogen, letakkan beton segar pada pelat dan lakukan uji slump.
5. Tempatkan beton segar ke dalam cetakan secara bertahap hingga tiga lapisan. Setiap lapisan setinggi 1/3 dari cetakan dan tusuk sebanyak 25 kali secara merata hingga cetakan terisi penuh.
6. Ratakan permukaan atas beton dan biarkan mengeras dengan sempurna.
7. Setelah mengeras, keluarkan beton dari cetakan dan lakukan perawatan hingga waktu pengujian.

Pembuatan sampel uji beton geopolimer dilakukan dengan langkah yang sama seperti beton normal, namun perlu membuat bahan pengikat (binder) terlebih dahulu. Langkah-langkah dalam pembuatan sampel uji beton geopolimer adalah sebagai berikut:

1. Menentukan rasio campuran bahan beton geopolimer.
2. Menyiapkan bahan dan alat yang diperlukan.
3. Membuat bahan pengikat (binder) dengan metode pencampuran terpisah, yaitu:
    a. Membuat larutan NaOH dengan melarutkan NaOH 10M bentuk padat dengan aquades.

b. Menambahkan larutan *Natrium Silikat* (Na2SiO3) dan mencampur selama 1 menit.

4. Memasukkan komponen campuran beton geopolimer ke dalam *mixer*, seperti agregat, pozzolan, dan binder.
5. Mencampur bahan dengan concrete mixer hingga menjadi beton geopolimer segar atau campuran homogen.
6. Tempatkan beton geopolimer segar ke dalam cetakan secara bertahap hingga tiga lapisan. Setiap lapisan setinggi 1/3 dari cetakan dan tusuk sebanyak 25 kali secara merata hingga cetakan terisi penuh.
7. Ratakan permukaan atas beton dan biarkan mengeras dengan sempurna.
8. Setelah mengeras, keluarkan beton dari cetakan dan lakukan perawatan hingga waktu pengujian.

4.11 Pengujian Benda Uji

Pada tahap ini, beton geopolimer diuji untuk mengamati waktu pengikatan, kelecakan, dan sifat mekaniknya.

1. Uji Kuat Tekan Beton

   Pengujian kuat tekan beton dilakukan sesuai SNI 1974-2011 untuk mengetahui nilai kuat tekan yang dihasilkan oleh beton geopolimer. Pengujian ini dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Langkah-langkahnya adalah:

   a. Menyiapkan alat dan sampel uji silinder yang telah dirawat.
   b. Mengukur dimensi pada tiga titik berbeda dan menimbang berat sampel uji.
   c. Meletakkan sampel uji pada mesin uji tekan dengan landasan mortar belerang pada permukaan yang akan menerima beban.
   d. Menjalankan mesin tekan hingga menyentuh bagian atas sampel uji, memastikan posisi yang sentris.
   e. Melakukan pembebanan hingga sampel uji hancur dan mencatat hasil pembebanan maksimum.

f. Mengangkat sampel uji dan membersihkan.

2. Uji Tarik Belah Beton

Pengujian ini dilakukan sesuai dengan SNI 03-2491-2002 pada sampel uji yang berumur 28 hari. Langkah-langkahnya adalah:

a. Menyiapkan alat dan sampel uji silinder yang telah dirawat.
b. Mengukur dimensi dan menimbang berat sampel uji.
c. Menandai garis tengah pada kedua ujung silinder sampel uji menggunakan alat bantu hingga memastikan kedua garis berada di bidang aksial yang sama.
d. Meletakkan batang penekan tambahan secara simetris di atas meja tekan bagian bawah mesin uji.
e. Meletakkan sampel uji di atas bantalan kayu lapis sehingga tanda garis tengah tegak lurus terhadap titik tengah bantalan.
f. Mengatur posisi pengujian hingga proyeksi bidang yang ditandai dengan garis tengah di kedua ujung sampel tepat berpotongan dengan titik tengah meja penekan bagian atas mesin uji.
g. Menjalankan mesin uji dengan pembebanan konstan antara 50 – 100 kN per menit hingga sampel uji terbelah, dan mencatat hasil pembebanan maksimum. h. Mengangkat sampel uji dan membersihkan.

3. Uji Modulus Elastisitas Beton

Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan sesuai SNI 03-4169-1996 untuk mengetahui nilai tegangan dibagi regangan beton pada keadaan elastis, dengan tegangan mencapai 40% dari kuat tekan maksimum. Pengujian ini dilakukan bersamaan dengan uji kuat tekan beton, karena keduanya saling berkaitan. Saat uji kuat tekan beton, sampel uji dipasangkan dial gauge regangan untuk mengukur deformasi yang terjadi. Langkah-langkah pengujiannya adalah:

a. Menyiapkan alat dan sampel uji silinder yang telah dirawat.
b. Mengukur dimensi pada tiga titik berbeda, yaitu di tengah dan kedua ujung sampel, serta menimbang berat sampel uji.

c. Memasang alat kompresometer-ekstensometer dan dial gauge pada posisi yang tepat.
d. Meletakkan sampel uji pada mesin uji tekan dengan landasan mortar belerang pada permukaan yang akan menerima beban secara simetris.
e. Menjalankan mesin tekan hingga menyentuh bagian atas sampel uji.
f. Melakukan pembebanan dan mencatat deformasi setiap peningkatan 10 kN, beban tekan saat regangan 50 x 10^{-6}, dan regangan saat mencapai 40% beban maksimum atau hingga sampel uji hancur.
g. Mengangkat sampel uji dan membersihkan.

4.12 Pengolahan Data

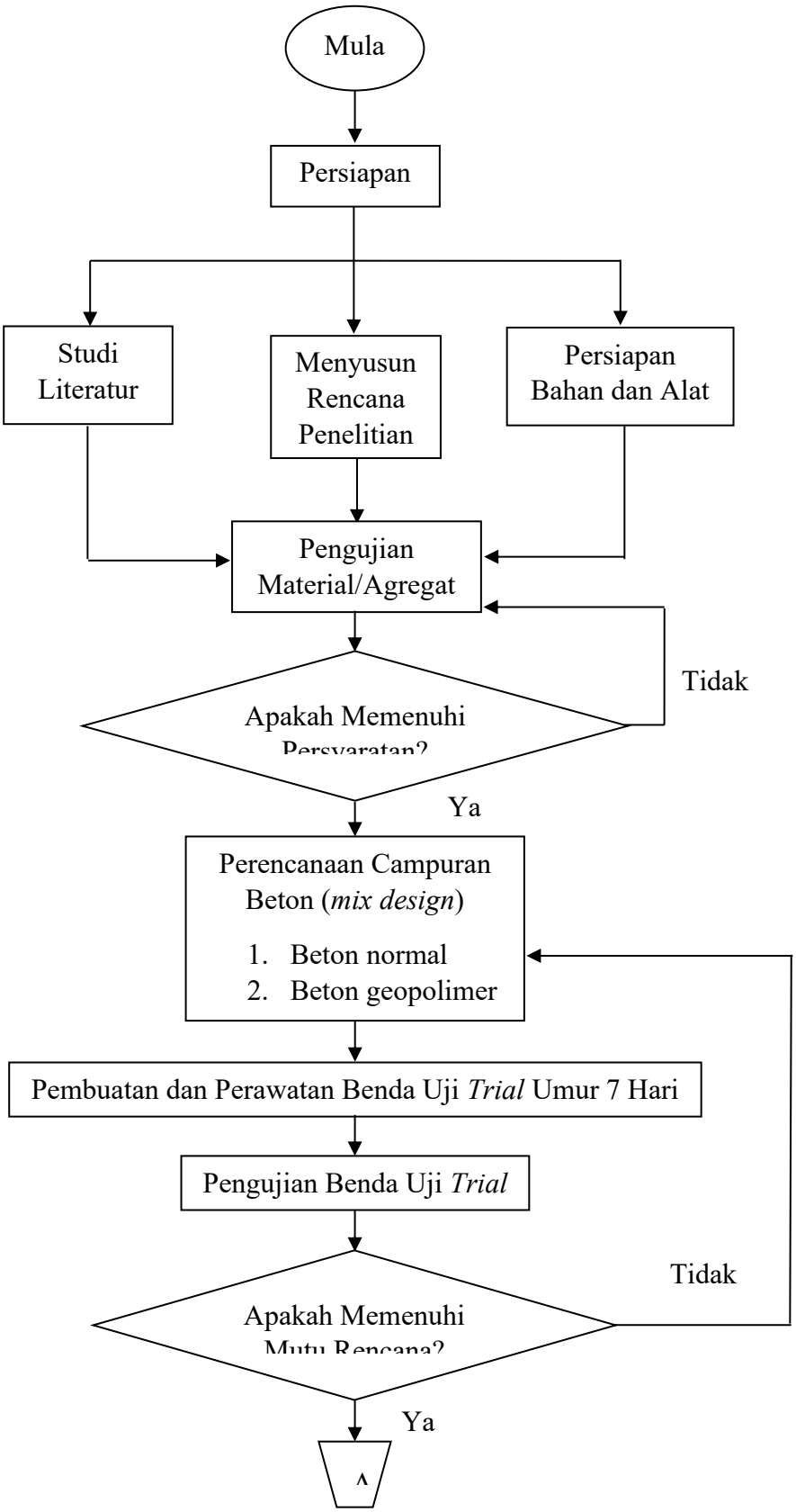
Pada tahap ini, data mentah hasil pengujian diolah berdasarkan teori perhitungan yang digunakan untuk mendapatkan hasil yang bermakna.

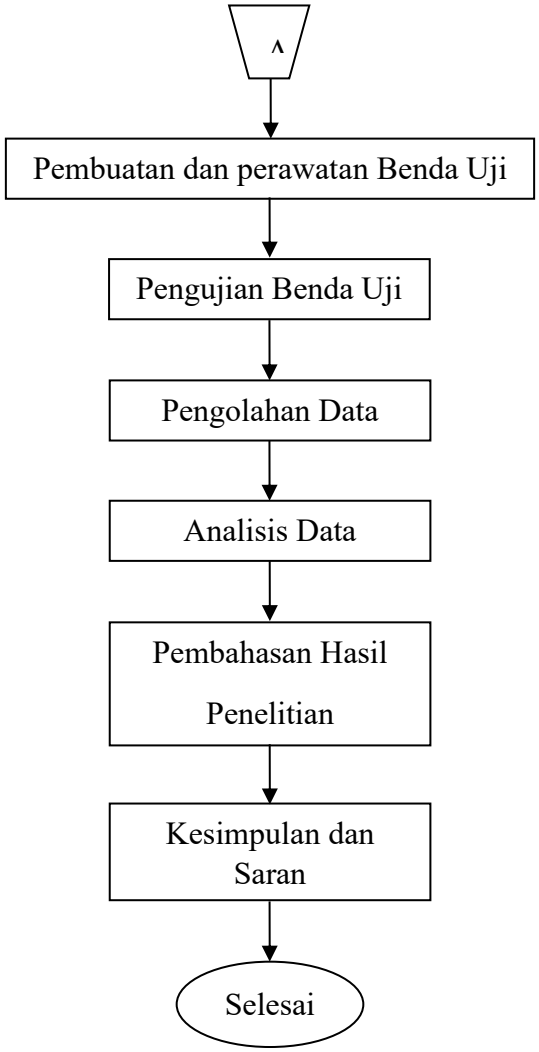
4.13 Analisis Data Pengujian

Tahap ini melibatkan analisis data yang diperoleh untuk melakukan perbandingan dan pembahasan hasil dari seluruh pengujian benda uji. Dalam penelitian ini, benda uji yang dihasilkan berupa beton geopolimer yang diuji untuk mengetahui sifat mekanik beton, termasuk kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas.

4.14 Flow Chart Penelitian

Flow chart penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.


Mula
Persiapan
Studi Literatur
Menyusun Rencana Penelitian
Persiapan Bahan dan Alat
Pengujian Material/Agregat
Apakah Memenuhi Persyaratan?
Tidak
Ya
Perencanaan Campuran Beton (*mix design*)
1. Beton normal
2. Beton geopolimer
Pembuatan dan Perawatan Benda Uji *Trial* Umur 7 Hari
Pengujian Benda Uji *Trial*
Apakah Memenuhi Mutu Rencana?
Tidak
Ya
A



Gambar 4. 1 *Flowchart* Penelitian

BAB V
DATA, ANALISIS, DAN PEMBAHASAN

5.1 Pengujian Material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui kandungan serta karakteristik sifat dari material yang akan digunakan dalam campuran beton. Salah satu pengujian yang dilakukan adalah pengujian agregat, yang mencakup pemeriksaan terhadap agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi sifat fisik dan karakteristik teknis agregat, sehingga dapat memastikan kesesuaiannya dengan spesifikasi campuran beton yang direncanakan

5.2 Hasil Pengujian Agregat

Pengujian terhadap agregat dilakukan untuk menilai kualitas pasir dan kerikil sebagai komponen utama dalam campuran beton, sehingga dapat memenuhi spesifikasi yang ditetapkan dalam perencanaan campuran beton atau mix design. Pengujian ini mencakup dua jenis agregat, yaitu agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil).

5.2.1 Pengujian Agregat Halus

Pasir yang digunakan sebagai agregat halus dalam penelitian ini berasal dari Sungai Progo. Pengujian yang dilakukan pada agregat halus mencakup beberapa aspek, antara lain pengujian berat jenis dan penyerapan air, analisis saringan, pengujian berat volume dalam kondisi gembur dan padat, serta pemeriksaan kadar lumpur. Hasil dari pengujian tersebut disajikan sebagai berikut.

1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

   Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu, serta tingkat penyerapan air pada pasir. Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air untuk agregat halus

mengacu pada standar SNI 1970–1990. Perhitungan untuk sampel 1 dapat dilihat pada bagian berikut.

a. Berat Jenis Curah

$$\text{Berat Jenis Curah} = \frac{Bk}{(B+500-Bt)}$$
$$= \frac{488}{(650+500-948)}$$
$$= 2{,}42 \text{ gram}$$

b. Berat Jenis Jenuh Kering Muka (SSD)

$$\text{Berat Jenis Jenuh Kering Muka (SSD)} = \frac{500}{(B+500-Bt)}$$
$$= \frac{500}{(650+500-948)}$$
$$= 2{,}48 \text{ gram}$$

c. Berat Jenis Semu

$$\text{Berat Jenis Semu} = \frac{Bk}{(B+Bk-Bt)}$$
$$= \frac{488}{(650+488-948)}$$
$$= 2{,}59 \text{ gram}$$

d. Penyerapan Air

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{(500-Bk)}{Bk}\ x\ 100\%$$
$$= \frac{(500-488)}{488}\ x\ 100\%$$
$$= 2{,}46\ \%$$

Dengan menggunakan metode perhitungan yang sama seperti pada sampel sebelumnya, diperoleh nilai berat jenis dan penyerapan air untuk sampel 2. Selanjutnya, dihitung nilai rata-ratanya. Rekapitulasi hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat pasir kering mutlak, gram (Bk)	488	490	489
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	500	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (Bt)	948	948	948
Berat piknometer berisi air, gram (B)	650	650	650
Berat jenis curah, Bk / (B+500-Bt)	2,42	2,43	2,42
Berat jenis jenuh kering kering muda (SSD), 500 / (B+500-Bt)	2,48	2,48	2,48
Berat jenis semu, Bk / (B+Bk-Bt)	2,57	2,55	2,56
Penyerapan air, (500-Bk) / Bk x 100%	2,46	2,04	2,25

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata berat jenis kering permukaan jenuh (SSD) yang diperoleh adalah 2,25 gram.

2. Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus

Pengujian analisis saringan dilakukan untuk menentukan klasifikasi agregat halus (pasir) berdasarkan ukuran butirannya (MHB). Pengujian ini mengacu pada SNI 1968-1990 dengan menggunakan sampel uji seberat 2000 gram yang melewati saringan No.4 (4,75 mm). Perhitungan hasil analisis saringan untuk agregat halus pada sampel 1 disajikan sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

Persentase Berat Tertinggal $= \frac{Berat\ Tertinggal}{\Sigma\ Berat\ Tertinggal}\ x\ 100\%$

Saringan 4,80 mm $= \frac{0}{1998}\ x\ 100\%$

$= 0\%$

Saringan 2,40 mm $= \frac{40}{1998}\ x\ 100\%$

$= 2\%$

Saringan 1,20 mm $= \frac{307}{1998}\ x\ 100\%$

$= 15{,}37\%$

Saringan 0,60 mm $= \frac{680}{1998}\ x\ 100\%$

$= 34{,}03\%$

Saringan 0,30 mm $= \frac{572}{1998}\ x\ 100\%$

$= 28{,}63\%$

Saringan 0,15 mm $= \frac{319}{1998}\ x\ 100\%$

$= 15{,}97\%$

Pan (sisa) $= \frac{80}{1998}\ x\ 100\%$

$= 4\%$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Saringan 4,80 mm = 0%

Saringan 2,40 mm = 0% + 2%

= 2%

Saringan 1,20 mm = 2% + 15,37%

= 17,37%

Saringan 0,60 mm = 17,37% + 34,03%

= 51,40%

Saringan 0,30 mm = 51,40% + 28,63%

= 80,03%

Saringan 0,30 mm = 80,03% + 15,97%

= 96%

Pan = 96% + 4%

= 100%

c. Persentase Lolos Kumulatif

Saringan 4,80 mm = 100% - 0%

= 0%

Saringan 2,40 mm = 100% - 2%
= 98%
Saringan 1,20 mm = 100% - 17,37%
= 82,63%
Saringan 0,60 mm = 100% - 51,40%
= 48,60%
Saringan 0,30 mm = 100% - 80,03%
= 19,47%
Saringan 0,30 mm = 100% - 96%
= 4%
Pan = 100% - 100%
= 0%

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan serta penerapan prosedur yang sama, diperoleh data analisis saringan agregat halus untuk sampel 2. Ringkasan hasil pengujian tersebut tercantum pada Tabel 5.2 dan Tabel 5.3.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 1

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	40	2,00	2,00	98,00
1,2	307	15,37	17,37	82,63
0,6	680	34,03	51,40	48,60
0,3	572	28,63	80,03	19,97
0,15	319	15,97	96,00	4,00
Sisa	80	4,00	100	0
Jumlah	**1998**	**100**		

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	50	2,50	2,50	97,50
1,2	399	19,95	22,45	77,55
0,6	714	35,70	58,15	41,85
0,3	515	25,75	83,9	16,1
0,15	255	12,75	96,65	3,35
Sisa	67	3,35	100	0
Jumlah	**2000**	**100**		

Nilai Modulus Halus Butir (MHB) diperoleh dari hasil pengujian analisis saringan agregat halus yang telah dilakukan, dengan perhitungan sebagai berikut

d. Modulus Halus Butir (MHB)

$$\text{MHB} = \frac{\Sigma\ Persentase\ Berat\ Tertinggal\ Kumulatif}{100}$$

$$\text{MHB Sampel 1} = \frac{246{,}80}{100}$$

$$= 2{,}47$$

$$\text{MHB Sampel 2} = \frac{263{,}65}{100}$$

$$= 2{,}64$$

Dari hasil perhitungan, nilai Modulus Halus Butir (MHB) untuk sampel 1 dan sampel 2 masing-masing adalah 2,47 dan 2,64. Mengacu pada ketentuan SK SNI S-04-1989-F, rentang nilai MHB yang disyaratkan untuk agregat halus adalah antara 1,5 hingga 3,8. Dengan demikian, nilai MHB yang diperoleh telah memenuhi standar tersebut. Selain itu, pengujian

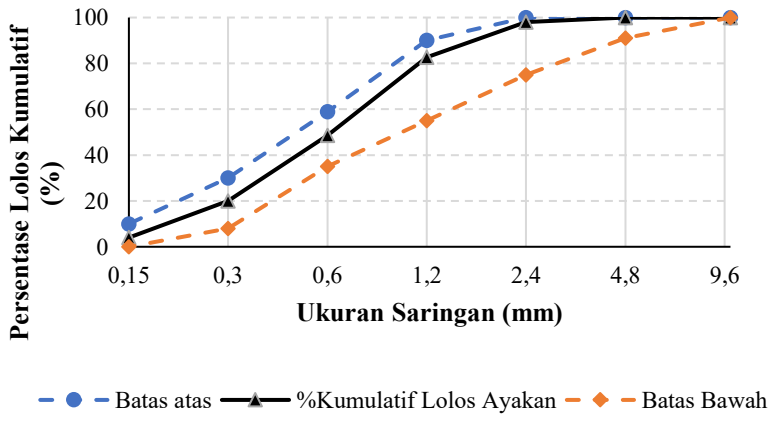
analisis saringan juga dimanfaatkan untuk menentukan gradasi agregat halus (pasir), yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 4 Gradasi Agregat Halus

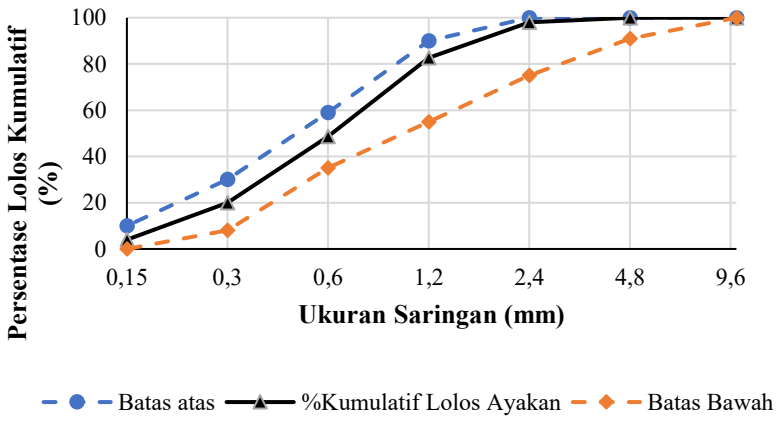
Lubang ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Ayakan			
	Daerah 1	Daerah 2	Daerah 3	Daerah 4
10	100	100	100	100
4,8	90 - 100	91 - 100	92 - 100	95 - 100
2,4	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100
1,2	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100
0,6	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100
0,3	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50
0,15	0 - 10	0 - 10	0 - 10	0 - 15

Sumber: SNI 2834 - 2000

Mengacu pada Tabel 5.4, agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam kategori gradasi pasir zona II, yang mengindikasikan bahwa pasir tersebut tergolong dalam jenis pasir sedang. Selanjutnya, berdasarkan data dalam Tabel 5.4, dibuat kurva gradasi agregat halus yang disajikan pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.2



Gambar 5. 1 Grafik Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 1



Gambar 5. 2 Grafik Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 1

3. Pengujian Berat Volume Gembur dan Padat Agregat Halus

Pengujian ini menggunakan agregat halus (pasir) yang melewati saringan No. 4 berukuran 4,75 mm, sesuai dengan prosedur yang tercantum dalam SNI 4804 – 1998. Adapun hasil perhitungan berat volume dalam kondisi gembur dan padat untuk agregat halus pada sampel 1 disajikan sebagai berikut.

a. Berat Volume Gembur

Berat agregat (W3) = W2 – W1

= 17406 – 10729

= 6677 gram

Volume Tabung (V) $= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t$

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 15^2 \times 30$

= 5301,44 cm^3

Berat Volume Gembur $= \frac{W3}{V}$

$= \frac{6677}{5301,44}$

= 1,259 $gram/cm^3$

b. Berat Volume Padat

Berat agregat (W3) = W2 – W1

= 18778 – 10729

= 8049 gram

Volume Tabung (V) $= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t$

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 15^2 \times 30$

= 5301,44 cm^3

Berat Volume Gembur $= \frac{W3}{V}$

$= \frac{8049}{5301,44}$

= 1,518 $gram/cm^3$

Perhitungan berat volume gembur dan padat untuk sampel 2 dilakukan dengan metode yang serupa, sehingga diperoleh nilai masing-masing serta rata-ratanya. Hasil pengujian secara keseluruhan dapat dilihat dalam Tabel 5.5 dan Tabel 5.6

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	17406	16970	17188
Berat agregat (W3), gram	6677	6893	6785
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,26	1,25	1,25

Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	18778	18489	18633,5
Berat agregat (W3), gram	8049	8412	8230,5
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,52	1,53	1,52

Berdasarkan hasil perhitungan, diketahui bahwa nilai rata-rata berat volume gembur agregat halus adalah 1,25 gram/cm³, sedangkan berat volume padatnya sebesar 1,52 gram/cm³. Nilai berat volume gembur lebih rendah dibandingkan berat volume padat karena dalam pengujian padat dilakukan proses penumbukan sebanyak 25 kali untuk setiap sepertiga bagian silinder. Prosedur ini bertujuan untuk meminimalkan rongga udara antar butir sehingga agregat menjadi lebih rapat.

4. Pengujian Lolos Saringan No. 200 (Uji Kadar Lumpur Pasir)

Pengujian terhadap butiran yang lolos saringan No. 200 dilakukan untuk menentukan persentase kandungan lumpur dalam pasir. Sampel yang digunakan berupa pasir kering oven seberat 500 gram, yang sebelumnya telah lolos saringan No. 4 (4,75 mm), dan pengujian ini mengacu pada metode SNI 4142 – 1996. Perhitungan kadar lumpur pada pasir untuk sampel 1 disajikan sebagai berikut.

Berat Agregat Kering Oven (W1) = 500 gram

Berat kering oven setelah dicuci (W2) = 485 gram

Kadar Lumpur dalam Pasir $= \frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$

$= \frac{500-485}{485} \times 100\%$

$= 3\%$

Melalui prosedur dan metode perhitungan yang sama, diperoleh nilai persentase kadar lumpur pada sampel 2 sebesar 0,4%, dengan rata-rata keseluruhan mencapai 1,7%. Ringkasan hasil pengujian kadar lumpur dalam pasir tersebut ditampilkan pada Tabel 5.7 berikut

Tabel 5. 7 Hasil Pengujian Lolos Saringan No. 200 (Pasir)

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat agregat kering oven (W1)	500	500	500
Berat agregat kering oven setelah di cuci (W2), gram	485	498	491,5
Berat yang lolos Ayakan N0. 200 [(W1 – W2)/W1] x 100	3%	0,4%	1,7%

5.2.2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini berupa kerikil, yang kemudian diuji melalui beberapa tahapan, yaitu pengujian berat jenis dan penyerapan air, analisis saringan, serta pengujian berat volume dalam kondisi gembur dan padat.

1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu, serta tingkat penyerapan air pada kerikil. Prosedur pengujian berat jenis dan penyerapan air untuk agregat kasar mengacu pada standar SNI 1969 – 1990. Perhitungan hasil pengujian untuk sampel 1 disajikan pada penjelasan berikut.

a. Berat Jenis Curah

Berat Jenis Curah $= \frac{Bk}{(Bj - Ba)}$

$$= \frac{4963}{(5000-3073)}$$

$$= 2{,}58 \text{ gram}$$

b. Berat Jenis Jenuh Kering Muka (SSD)

Berat Jenis Jenuh Kering Muka (SSD) $= \frac{Bj}{(Bj-Ba)}$

$$= \frac{5000}{(5000-3073)}$$

$$= 2{,}59 \text{ gram}$$

c. Berat Jenis Semu

Berat Jenis Semu $= \frac{Bk}{(Bk-Ba)}$

$$= \frac{4963}{(4963-3073)}$$

$$= 2{,}63 \text{ gram}$$

d. Penyerapan Air

Penyerapan Air $= \frac{(Bj-Bk)}{Bk}\ x\ 100\%$

$$= \frac{(5000-4963)}{4963}\ x\ 100\%$$

$$= 0{,}75\ \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya dan menggunakan metode yang sama, diperoleh nilai berat jenis dan penyerapan air untuk sampel 2. Selanjutnya, dihitung nilai rata-rata dari kedua sampel. Rekapitulasi hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar disajikan pada Tabel 5.8 berikut ini.

Tabel 5. 8 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat kerikil kering mutlak (Bk)	4963	4953	4958
Berat kerikil jenuh kering muka (SSD), (Bj)	5000	5000	5000
Berat piknometer berisi pasir dan air (Ba)	3073	3069	3071
Berat jenis curah, Bk / (Bj-Ba)	2,58	2,56	2,57
Berat jenis jenuh kering kering muda (SSD), Bj / (Bj-Ba)	2,59	2,59	2,59
Berat jenis semu, Bk / (Bk-Ba)	2,63	2,63	2,63
Penyerapan air (Bj-Bk) / Bk x 100%	0,75	0,95	0,85

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai rata-rata berat jenis dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD) yang diperoleh adalah sebesar 2,59 gram.

2. Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar

Pengujian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan agregat kasar (kerikil) berdasarkan distribusi ukuran butirannya (Modulus Halus Butir/MHB). Proses pengujian dilakukan sesuai dengan SNI 1968–1990, dengan menggunakan sampel uji seberat 5000 gram. Adapun hasil perhitungan analisis saringan untuk agregat kasar pada sampel 1 disajikan sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

Persentase Berat Tertinggal $= \frac{Berat\ Tertinggal}{\Sigma\ Berat\ Tertinggal}\ x\ 100\%$

Saringan 40 mm $= \frac{0}{5000}\ x\ 100\%$

$= 0\%$

Saringan 20 mm $= \frac{124}{5000}\ x\ 100\%$

$= 2{,}48\%$

Saringan 10 mm $= \frac{2700}{5000}\ x\ 100\%$

$= 54\%$

Saringan 4,8 mm $= \frac{2061}{5000}\ x\ 100\%$

$= 41{,}22\%$

Saringan 2,4 mm $= \frac{68}{5000}\ x\ 100\%$

$= 1{,}36\%$

Saringan 1,2 mm $= \frac{2}{5000}\ x\ 100\%$

$= 0{,}04\%$

Pan (sisa) $= \frac{45}{5000}\ x\ 100\%$

$= 0{,}9\%$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Saringan 40 mm $= 0\%$

Saringan 20 mm $= 0\% + 2{,}48\%$

$= 2{,}48\%$

Saringan 10 mm $= 2{,}48\% + 54\%$

$= 56{,}48\%$

Saringan 4,8 mm $= 56{,}48\% + 41{,}22\%$

$= 97{,}7\%$

Saringan 2,4 mm $= 97{,}7\% + 1{,}36\%$

$= 99{,}06\%$

Saringan 1,2 mm $= 99{,}06\% + 0{,}04\%$

$= 99{,}1\%\%$

Pan $= 99{,}1\% + 0{,}9\%$

$= 100\%$

c. Persentase Lolos Kumulatif

Saringan 40 mm $= 100\% - 0\%$

$= 0\%$

Saringan 20 mm $= 100\% - 2{,}48\%$

$= 97{,}52\%$

Saringan 10 mm = 100% - 56,48%
= 43,52%
Saringan 4,8 mm = 100% - 97,7%
= 2,3%
Saringan 2,4 mm = 100% - 99,06%
= 0,94%
Saringan 1,2 mm = 100% - 99,1%
= 0,9%
Pan = 100% - 100%
= 0%

Dengan menggunakan prosedur perhitungan yang sama, diperoleh hasil analisis saringan agregat kasar untuk sampel 2. Ringkasan hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.9 dan Tabel 5.10 berikut ini.

Tabel 5. 9 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 1

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	124	2,48	2,48	97,52
10	2700	54	56,48	43,52
4,8	2061	41,22	97,7	2,3
2,4	68	1,36	99,06	0,94
1,2	2	0,04	99,1	0,9
0,6	0	0	99,1	0,9
0,3	0	0	99,1	0,9
0,15	0	0	99,1	0,9
Sisa	45	0,9	100	0
Jumlah	**5000**	**100**		

Tabel 5. 10 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	175	3,50	3,50	96,50
10	2716	54,33	57,83	42,17
4,8	2011	40,23	98,06	1,94
2,4	54	1,08	99,14	0,86
1,2	3	0,06	99,20	0,80
0,6	0	0	99,20	0,80
0,3	0	0	99,20	0,80
0,15	0	0	99,20	0,80
Sisa	40	0,80	100	0
Jumlah	**4999**	**100**		

Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan agregat kasar, nilai Modulus Halus Butir (MHB) dapat dihitung dengan hasil sebagai berikut

d. Modulus Halus Butir (MHB)

$$\text{MHB} = \frac{\Sigma\ Persentase\ Berat\ Tertinggal\ Kumulatif}{100}$$

$$\text{MHB Sampel 1} = \frac{652{,}12}{100}$$

$$= 6{,}52$$

$$\text{MHB Sampel 2} = \frac{655{,}331}{100}$$

$$= 6{,}55$$

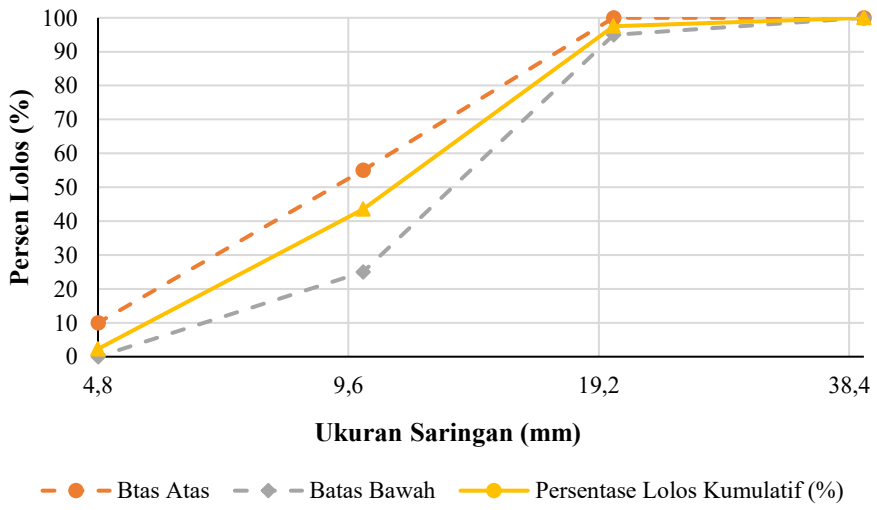
Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, nilai Modulus Halus Butir (MHB) untuk sampel 1 dan sampel 2 masing-masing diperoleh sebesar 6,52 dan 6,55. Mengacu pada SK SNI S-04-1989-F, nilai MHB yang disyaratkan untuk agregat kasar adalah antara 5 hingga 8. Oleh karena itu, hasil pengujian agregat kasar yang diperoleh sudah memenuhi ketentuan yang berlaku. Pengujian analisis saringan juga berfungsi untuk

menentukan gradasi agregat kasar (kerikil), yang dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut.

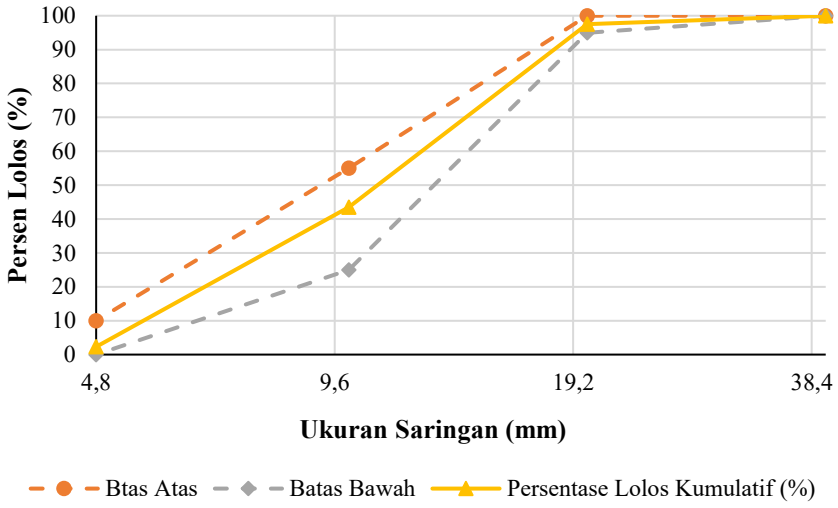
Tabel 5. 11 Gradasi Agregat Kasar

Lolos Saringan (mm)	Persen Butiran Agregat Lolos Saringan	
	40 mm	20 mm
40	95 - 100	100
20	30 - 70	95 - 100
10	10 - 35	25 - 55
4,8	0 - 5	0 - 10

Mengacu pada Tabel 5.11, agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam kategori dengan ukuran butiran maksimum 20 mm. Berdasarkan data pada Tabel 5.11, dibuatlah kurva gradasi agregat kasar yang dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4 berikut ini.



Gambar 5. 3 Kurva Gradasi Agregat Kasar Maksimum 20 mm Sampel 1



Gambar 5. 4 Grafik Gradasi Agregat Kasar Maksimum 20 mm Sampel 2

3. Pengujian Berat Vokume Gembur dan Padat Agregat Kasar

Pengujian ini dilakukan pada agregat kasar (kerikil) yang tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm), dengan menggunakan metode yang sesuai dengan SNI 4804 – 1998. Perhitungan berat volume gembur dan padat untuk agregat halus pada sampel 1 disajikan sebagai berikut.

a. Berat Volume Gembur

Berat agregat (W3) = W2 – W1

= 17618 – 10729

= 6889 gram

Volume Tabung (V) $= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t$

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 15^2 \times 30$

= 5301,44 cm^3

Berat Volume Gembur $= \frac{W3}{V}$

$= \frac{6889}{5301,44}$

= 1,299 $gram/cm^3$

b. Berat Volume Padat

Berat agregat (W3) = W2 – W1

= 18334 – 10729

= 7605 gram

Volume Tabung (V) $= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t$

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 15^2 \times 30$

= 5301,44 cm^3

Berat Volume Gembur $= \frac{W3}{V}$

$= \frac{7605}{5301,44}$

= 1,435 $gram/cm^3$

Dengan menggunakan metode perhitungan yang serupa, diperoleh nilai berat volume gembur dan padat untuk sampel 2, serta nilai rata-ratanya. Ringkasan hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.12 dan Tabel 5.13 berikut ini.

Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	17618	17215	17416,5
Berat agregat (W3), gram	6889	7138	7013,5
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,30	1,29	1,30

Tabel 5. 13 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	18334	17850	18092
Berat agregat (W3), gram	7605	7773	7689
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,43	1,41	1,42

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai rata-rata berat volume gembur agregat kasar sebesar 1,30 gram/cm³ dan volume padat agregat kasar sebesar 1,42 gram/cm³. Perbedaan ini terjadi karena dalam pengujian berat volume padat, agregat kasar mengalami penumbukan sebanyak 25 kali untuk setiap sepertiga bagian silinder. Prosedur ini bertujuan untuk meminimalkan rongga udara dan meningkatkan kepadatan agregat.

5.3 Perancangan Campuran Beton (*Mix Design*)

5.3.1 Perencanaan Campuran Beton Normal

Perencanaan campuran beton (*mix design*) dalam penelitian ini mengacu pada SNI 2834 – 2000, yang digunakan sebagai metode untuk menentukan proporsi campuran yang sesuai dengan kuat tekan beton yang direncanakan. Kuat tekan beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah 25 MPa. Perencanaan campuran beton dilakukan untuk dua jenis beton, yaitu beton normal dan beton geopolimer. Pada beton geopolimer, penggunaan semen digantikan dengan fly ash dan limbah marmer yang

diaktifkan oleh aktivator. Adapun perencanaan campuran beton (mix design) adalah sebagai berikut:

1. Kuat tekan yang direncanakan (f'c) sebesar 25 MPa dengan benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm, yang diuji pada umur 28 hari.
2. Semen yang digunakan adalah semen Portland tipe I merek Semen Tiga Roda jenis PCC.
3. Jumlah sampel pengujian sebanyak 3 buah, dengan nilai margin (M) yang digunakan sebesar 12 MPa, sesuai dengan yang tercantum pada Tabel 5.14

Tabel 5. 14 Faktor Pengali Deviasi Standar

Jumlah Pengujian	Faktor Pengali Deviasi Standar
Kurang dari 15	Diterangkan lebih lanjut
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 atau lebih	1,00

Sumber: SNI 03-2834-2000

Catatan:

Jika jumlah pengujian di lapangan kurang dari 15, maka nilai rata-rata kuat tekan yang direncanakan (f'cr) tidak boleh lebih rendah dari (f'c + 12 MPa)

4. Kuat tekan beton yang ditargetkan rata-rata adalah 37 MPa, yang diperoleh melalui perhitungan berikut ini.

   f'cr = f'c + M
   = 25+12
   = 37 Mpa

5. Berdasarkan pengujian berat jenis agregat kondisi SSD diperoleh berat jenis agregat halus (BJAH) sebesar 2,53 dan berat jenis agregat kasar (BJAK) sebesar 2,54

6. Nilai faktor air-semen (fas) yang digunakan merujuk pada Tabel 5.15 dan Gambar 5.5 berikut ini.
   a. Faktor air-semen (fas) yang diterapkan adalah 0,5, dengan menggunakan semen Portland tipe 1 dan agregat batu pecah.
   b. Kuat tekan beton direncanakan untuk umur 28 hari dengan benda uji berbentuk silinder (15 cm x 30 cm).

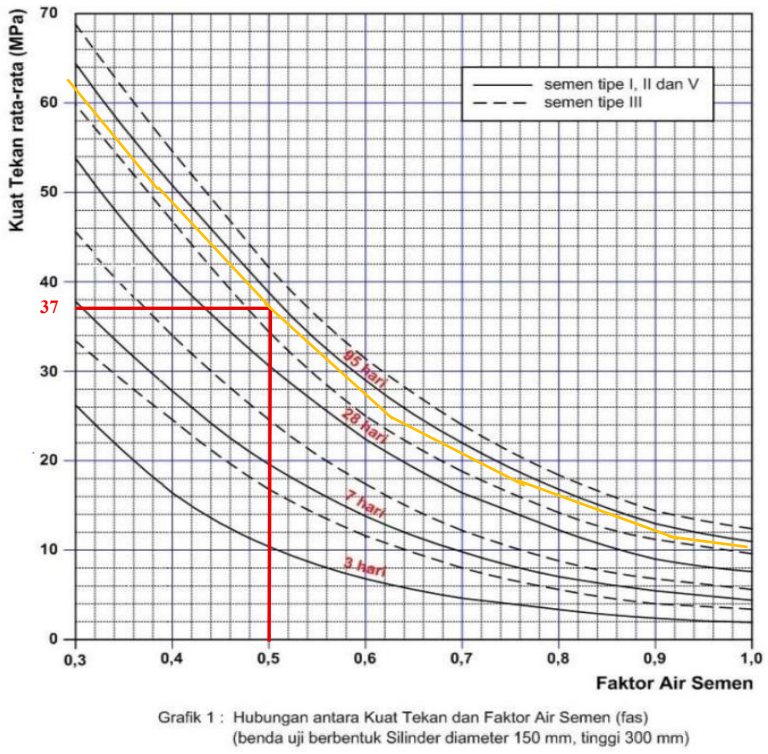
Tabel 5. 15 Perkiraan Kuat Tekan Beton (MPa) dengan Jenis Semen dan Agregat yang Digunakan di Indonesia

Jenis Semen	Jenis Agregat	Kekuatan tekan Beton (Mpa)				
		Umur (Hari)				Bentuk benda uji
		3	7	28	29	
Semen Portland Tipe 1	Batu Tidak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu Pecah	19	27	37	45	
Semen tahan Sulfat Tipe II, V	Batu Tidak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu Pecah	25	32	45	54	
Semen tahan Sulfat Tipe III	Batu Tidak dipecahkan	21	28	38	44	Silinder
	Batu Pecah	25	33	44	48	
	Batu Tidak dipecahkan	25	31	46	53	Kubus
	Batu Pecah	30	40	53	60	

   c. Mengacu pada Tabel 5.15, diperoleh kuat tekan beton untuk faktor air-semen (fas) sebesar 0,5 pada umur 28 hari, yaitu 37 MPa.
   d. Selanjutnya, berdasarkan Gambar 5.5 di bawah ini, tarik garis vertikal ke atas pada nilai fas 0,5, dan tarik garis horizontal ke kanan dari nilai kuat tekan beton sebesar 37 MPa hingga garis tersebut berpotongan dengan nilai fas 0,5.

e. Setelah titik perpotongan diperoleh, buatlah kurva parabola baru berdasarkan titik tersebut.

f. Tarik garis horizontal ke kanan dari f'cr sebesar 37 MPa hingga garis tersebut menyentuh kurva parabola yang baru. Kemudian, tarik garis vertikal ke bawah secara tegak lurus untuk mendapatkan nilai fas yang digunakan, yaitu 0,5.



Gambar 5. 5 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen (Benda Uji silinder 15 x 30 cm)

(Sumber: SNI 03-2843-2000)

7. Menentukan Kadar Air yang digunakan

   Kadar air yang digunakan dalam campuran beton ini ditentukan berdasarkan Tabel 5.16 berikut.

Tabel 5. 16 Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m^3) yang dibutuhkan untuk kemudahaan dalam adukan beton

Ukuran agregat maksimum (mm)	Jenis agregat	Slump (mm)			
		0 - 10	10 - 30	30 - 60	60 - 180
10	Batu Tidak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu Pecah	180	205	230	250
20	Batu Tidak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu Pecah	170	190	210	225
30	Batu Tidak dipecahkan	115	140	160	185
	Batu Pecah	155	175	190	205

Sumber: SNI 03-2834-2000

Berdasarkan data pada tabel 5.16, diperoleh nilai Kadar Air Bebas sebesar 225 kg/m^3 untuk rentang slump antara 60 hingga 180 mm.

8. Menentukan jumlah semen minimum dan batas maksimum faktor air-semen.

   Jumlah semen minimum dan batas maksimum faktor air-semen ditentukan berdasarkan Tabel 5.17 berikut ini.

Tabel 5. 17 Persyaratan Jumlah Semen Minimum Dan Fas Maksimum Untuk Berbgai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus

Jenis Pembetonan	Jumlah Semen Minimum Per m3 beton (kg)	Nilai Faktor Air Semen Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan		
a. Keadaan keliling non korosif	275	0,60
b. Keadaan keliling korosif	325	0,52
Beton di luar ruangan bangunan		
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60
b. Terlindung dari hujan dan hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
Beton masuk ke dalam tanah		
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti - ganti	325	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		Tabel 5
Beton kontinu berhubungan dengan air tawar dan air laut.		Tabel 6

Sumber: SNI 03-2834-2000

Mengacu pada Tabel 5.17, jenis pembetonan yang digunakan adalah untuk beton yang berada di dalam ruangan dengan kondisi keliling non-korosif, yang menghasilkan jumlah semen minimum sebesar 275 kg dan faktor air-semen maksimum sebesar 0,60

9. Menentukan kadar semen

Faktor air-semen (fas) yang digunakan adalah nilai fas terkecil dari grafik, yaitu 0,5. Oleh karena itu, perhitungan kadar semen dilakukan berdasarkan kadar air dan nilai fas yang telah ditentukan. Adapun perhitungan kadar semen disajikan sebagai berikut.

c $= \frac{w}{fas}$

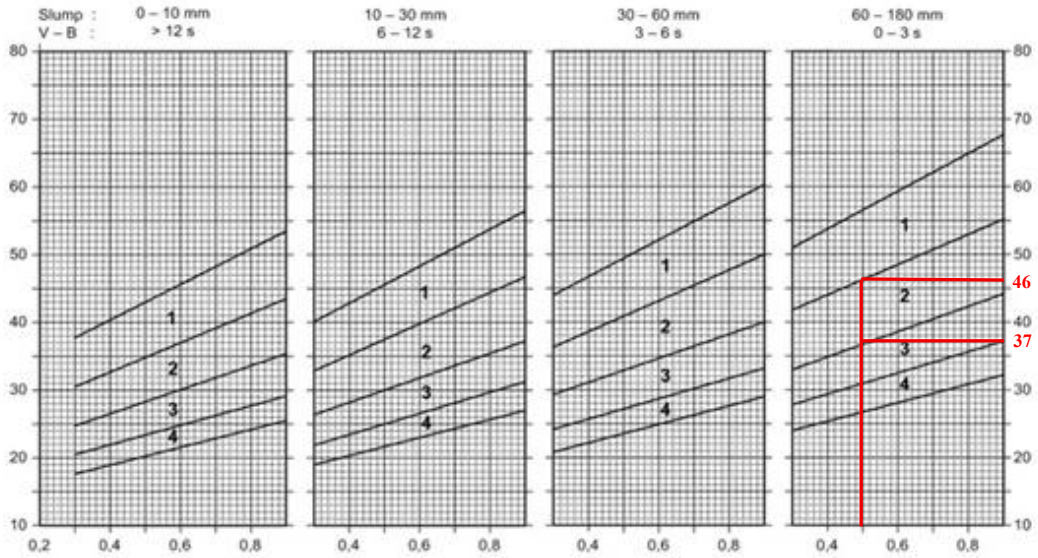
$= \frac{225}{0,5}$

$= 450$ kg/m^3

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai kadar semen yang digunakan sebesar 450 kg/m^3

10. Menentukan persentase agregat halus dan agregat kasar

Persentase agregat halus ditentukan dengan menggunakan grafik yang menunjukkan hubungan antara persen pasir dan kadar total agregat, sesuai dengan ukuran butir maksimum yang dianjurkan. Ukuran butir maksimum agregat halus yang digunakan dalam pengujian ini adalah 20 mm, dengan slump yang direncanakan antara 60 – 180 mm, nilai fas sebesar 0,5, dan agregat halus yang digunakan termasuk dalam gradasi IV. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut.



Gambar 5. 6 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk ukuran Butir Max 20 mm

(Sumber: SNI 03-2843-2000)

Mengacu pada Gambar 5.6, persentase agregat halus diperoleh dengan batas atas sebesar 46% dan batas bawah sebesar 37%. Nilai rata-rata persentase agregat halus yang dihitung adalah 41,5%. Oleh karena itu, persentase yang digunakan adalah 41,5%. Dengan demikian, persentase agregat kasar dapat dihitung melalui perhitungan berikut.

Persentase agregat kasar = 100% - Persentase agregat halus
= 100% - 41,5%
= 58,5%

11. Menentukan berat jenis relatif agregat gabungan (Kondisi SSD)

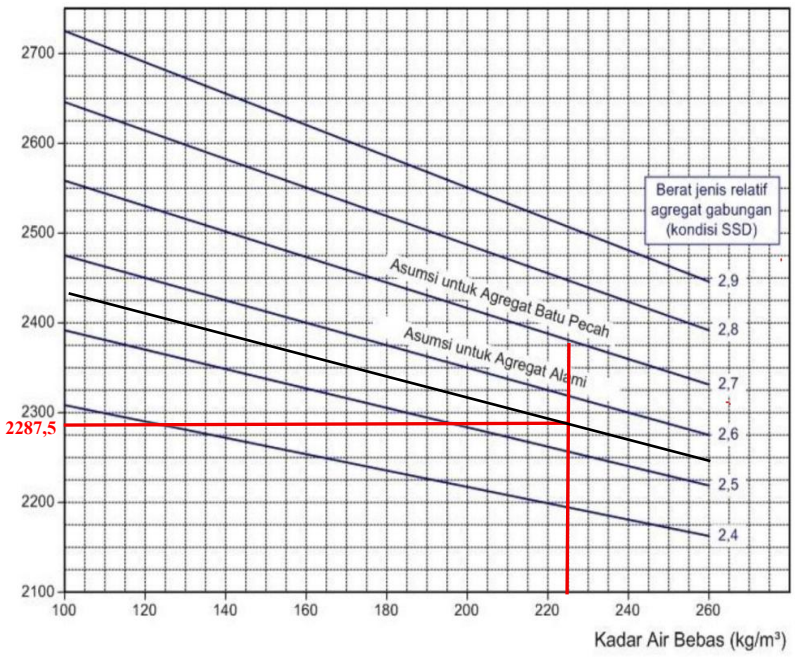
Berat jenis relatif agregat gabungan dihitung dengan mengalikan berat jenis agregat halus (BJ_{AH}) sebesar 2,48 dan berat jenis agregat kasar (BJ_{AK}) sebesar 2,59 dengan persentase masing-masing agregatnya. Perhitungan berat jenis relatif gabungan adalah sebagai berikut.

Berat jenis relatif gabungan = (% AH x BJ_{AH}) + (% AK x BJ_{AK})
= (41,5% x 2,48) + (58,5% x 2,59)
= 2,54

12. Menentukan Berat Isi Beton.

Berat isi beton dihitung berdasarkan Grafik 16 yang terdapat dalam SNI 03-2843-2000 dan dapat dilihat pada Gambar 5.7 di bawah ini.

a. Membuat kurva baru sesuai dengan berat jenis relatif agregat gabungan yang sebesar 2,54.
b. Menarik garis vertikal ke atas berdasarkan nilai kadar air bebas yang diperoleh, yaitu sebesar 225 kg/m³, hingga garis tersebut memotong kurva yang baru dibuat.
c. Tarik garis horizontal ke kiri dari titik potong pada langkah b untuk memperoleh nilai asumsi berat isi beton sebesar 2287,5 kg/m³



Gambar 5. 7 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan

(Sumber: SNI 03-2843-2000)

13. Kadar Agregat gabungan

Kadar agregat gabungan diperoleh dengan mengurangkan kadar semen dan kadar air bebas dari berat isi beton. Perhitungan kadar agregat gabungan disajikan sebagai berikut.

Kadar agregat gabungan = berat isi beton – kadar semen – kadar air bebas
= 2287,5 – 450 – 225
= 1612,50 kg/m^3

14. Kadar Agregat Halus

Kadar agregat halus dihitung dengan mengalikan persentase agregat halus dengan kadar agregat gabungan. Perhitungan kadar agregat halus disajikan sebagai berikut

Kadar agregat halus = % AH x Kadar agregat gabungan
= 41,5% x 1612,50
= 669,19 kg/m^3

15. Kadar Agregat Kasar

Kadar agregat kasar dihitung dengan mengurangi kadar agregat halus dari kadar agregat gabungan. Perhitungan kadar agregat kasar disajikan sebagai berikut.

Kadar Agregat Kasar = Kadar agregat gabungan – Kadar agregat halus
= 1612,50 - 669,19
= 943,31 kg/m^3

16. Proporsi campuran beton per 1 m^3

Berdasarkan perencanaan dan perhitungan campuran beton yang telah dilakukan, diperoleh proporsi campuran beton untuk setiap 1 m^3 sebagai berikut.

a. Semen = 450 kg
b. Air = 225 kg
c. Agregat Halus = 669,19 kg
d. Agregat Kasar = 943,31 kg

17. Proporsi campuran beton dengan angka penyusutan

Dalam penelitian ini, angka penyusutan yang diterapkan adalah 25%, sehingga proporsi campuran beton untuk setiap 1 m³ dapat dihitung sebagai berikut.

a. Semen = 562,5 kg
b. Air = 281,25 kg
c. Agregat Halus = 836,48 kg
d. Agregat Kasar = 1179,14 kg

18. Rekapitulasi Perencanaan Campuran Beton Normal

Berdasarkan perencanaan dan perhitungan campuran beton normal yang telah dilakukan, rekapitulasi campuran beton normal yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut

Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil *Mix Design* Beton Normal

No	Uraian	Nilai	Satuan
1	Kuat tekan beton yang disyaratkan	25	Mpa
2	Standar Deviasi	-	-
3	Nilai Tambah / Margin (M)	12	Mpa
4	Kuat tekan beton rerata yang ditargetkan	37	
5	Jenis Semen	Tipe I	
6	Jenis Agregat Kasar	Batu Pecah	
	Jenis Agregat Halus	Pasir	
7	Faktor air semen bebas (Fas)	0,5	
	Faktor air semen maksimum	0,6	
8	FAS digunakan	0,5	
9	Slump	60-180	mm
10	Ukuran agregat maksimum	20	mm
11	Kadar air bebas	225	Kg/m^3

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil *Mix Design* Beton Normal

No	Uraian	Nilai	Satuan
12	kadar semen	450,00	
13	kadar semen maksimum	-	
14	Kadar semen minimum	275	Kg/m3
15	Kadar semen digunakan	450,00	Kg/m3
16	Fas disesuaikan	0,5	
17	Susunan besar butir agregat halus	Gradasi II	
18	Berat jenis agregat kasar (SSD)	2,59	
	Berat jenis agregat halus (SSD)	2,48	
19	Persen Agregat Halus	41,5	%
20	Persen Agregat Kasar	58,5	%
21	Berat jenis relatif agregat gabungan (SSD)	2,54	
22	Berat isi Beton	2287,5	Kg/m3
23	Kadar agregat gabungan	1612,50	Kg/m3
24	Kadar agregat halus	669,19	Kg/m3
25	Kadar agregat kasar	943,31	Kg/m3
26	kadar semen dengan angka penyususstan	562,50	Kg/m3
27	kadar agregat halus dengan angka penyususstan	836,48	Kg/m3
28	Kadar agregat kasar dengan angka penyusutan	1179,14	Kg/m3
29	kadar air dengan angka penyusutan	281,25	Kg/m3

19. Volume Benda Uji

Dalam penelitian ini, digunakan 6 buah benda uji silinder pada setiap variasi, masing-masing dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Volume *mixing* 6 silinder $= 6 \times \frac{1}{4} \pi \times d^2 \times t$

$= 6 \times \frac{1}{4} \pi \times 0{,}15^2 \times 0{,}30$

$= 0{,}0318\ m^3$

Dengan demikian, proporsi campuran yang digunakan untuk pembuatan benda uji sebanyak 6 silinder pada setiap proses pencampuran adalah sebagai berikut.

a. Semen = 0,0318 x 562,5 = 17,89 kg
b. Air = 0,0318 x 281,25 = 8,95 kg
c. Agregat Halus = 0,0318 x 836,48 = 26,61 kg
d. Agregat Kasar = 0,0318 x 1179,14 = 37,51 kg

5.3.2 Perencanaan Campuran Beton Geopolimer

Dalam penelitian ini, perencanaan campuran beton geopolimer dilakukan dengan menggunakan metode perbandingan campuran aktivator Na_2SiO_3 : NaOH sebesar 4 : 2, serta pendekatan berdasarkan SNI 03-2843-2000 yang mengatur tata cara pembuatan campuran beton normal. Hal ini berarti bahwa campuran beton geopolimer dirancang menyerupai beton konvensional sesuai dengan kuat tekan yang direncanakan, namun dengan menggantikan penggunaan semen dengan prekursor seperti fly ash dan abu sekam padi, serta mengganti air dengan alkali aktivator. Berikut adalah hasil perencanaan campuran beton geopolimer.

1. Proporsi campuran beton geopolymer per 1 m^3

   Berdasarkan perencanaan dan perhitungan campuran beton yang telah dilakukan, proporsi campuran beton geopolimer untuk setiap 1 m^3 adalah sebagai berikut.

   a. Fly Ash = 450 kg
   b. Alkali Aktivator = 225 kg
   c. Agregat Halus = 669,19 kg
   d. Agregat Kasar = 943,31 kg

2. Proporsi campuran beton geopolymer dengan angka penyusutan

   Dalam penelitian ini, angka penyusutan yang diterapkan pada beton geopolimer adalah sebesar 25%, sehingga proporsi campuran beton geopolimer untuk setiap 1 m^3 dihitung sebagai berikut.

   a. Fly Ash = 562,5 kg

b. Alkali Aktivator = 281,25 kg

c. Agregat Halus = 836,48 kg

d. Agregat Kasar = 1179,14 kg

Dengan demikian, proporsi campuran yang digunakan untuk membuat 6 buah benda uji silinder pada setiap proses pencampuran adalah sebagai berikut.

a. Fly Ash = 0,0318 x 562,5 = 17,89 kg

b. Alkali Aktivator = 0,0318 x 281,25 = 8,95 kg

Perbandingan massa antara Na_2SiO_3 dan NaOH yang digunakan adalah 4 : 2 (dalam satuan kilogram). Rasio ini menjadi dasar dalam menghitung kebutuhan masing-masing komponen aktivator

Na_2SiO_3 $= \frac{4}{6} \times 8{,}95 = 5{,}96$ kg

NaOH $= \frac{2}{6} \times 8{,}95 = 2{,}98$ kg

Berdasarkan perbandingan massa 4 : 2, dari total 8,95 kg aktivator diperoleh 5,96 kg Na_2SiO_3 dan 2,98 kg NaOH

c. Agregat Halus = 0,0318 x 836,48 = 26,61 kg

d. Agregat Kasar = 0,0318 x 1179,14 = 37,51 kg

3. Kadar konsentrasi molaritas *Natrium Hidroksida* (NaOH)

Molaritas larutan Natrium Hidroksida (NaOH) yang digunakan adalah 10M. Massa molekul relatif (Mr) NaOH adalah 40, dan dilarutkan menggunakan aquades sebanyak 2,982 kg. Perhitungan untuk membuat larutan NaOH 10M adalah sebagai berikut.

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

$$= \frac{massa}{40} \times \frac{1000}{2983{,}06}$$

$$massa = \frac{10 \times 40 \times 2983{,}06}{1000}$$

$$= 1192{,}82 \text{ gram}$$

$$= 1{,}19 \text{ kg}$$

Dari hasil perhitungan di atas, diperoleh bahwa massa NaOH yang diperlukan untuk campuran beton geopolimer adalah 1,19 kg, yang kemudian dilarutkan dalam 2,98 kg aquades.

Rekapitulasi perencanaan campuran beton normal dan beton geopolimer dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 5.21 berikut.

Tabel 5. 19 Proporsi Campuran Beton Normal dan Beton Geopolimer

Komponen	BN	BGLM0	BGLM15	BGLM20	BGLM25	BGLM30
Jumlah Silinder (Buah)	6	6	6	6	6	6
Limbah Marmer (%)	-	0	15	20	25	30
Semen (kg)	17,892	-	-	-	-	-
Fly Ash (kg)	-	17,892	15,208	14,314	13,419	12,525
Limbah Marmer (kg)	-	0	2,684	3,578	4,473	5,368
Air (kg)	8,946	-	-	-	-	
Na_2SiO_3 (kg)	-	5,964	5,964	5,964	5,964	5,964
NaOH (kg)	-	2,982	2,982	2,982	2,982	2,982
Agregat Halus (Pasir) (kg)	26,607	26,607	26,607	26,607	26,607	26,607
Agregat Kasar (Kerikil) (kg)	37,507	37,507	37,507	37,507	37,507	37,507

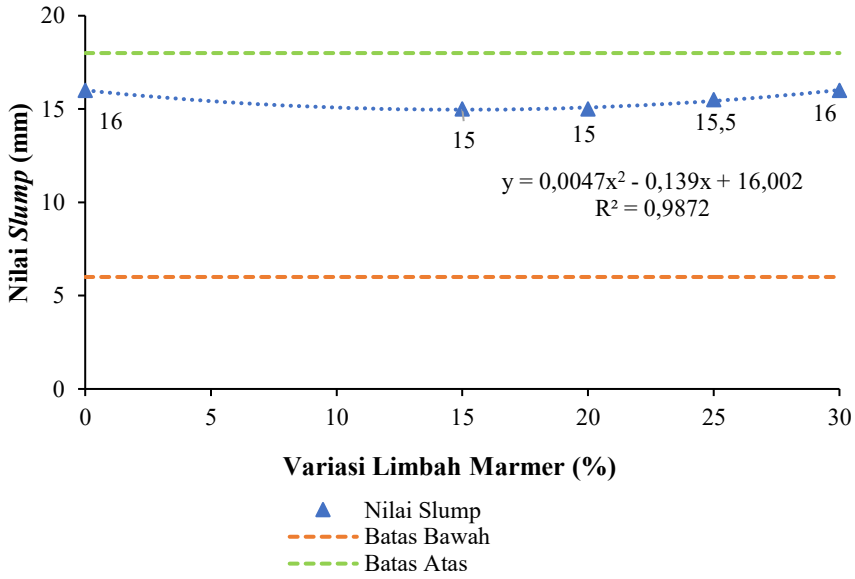
5.4 Hasil Pengujian *Slump* Beton

Pengujian slump pada beton bertujuan untuk mengukur tingkat kelecakan (*workability*) beton segar. Tinggi atau rendahnya nilai *slump* mempengaruhi kemudahan dalam mengolah campuran beton, seperti saat diaduk, dituangkan, dan dipadatkan. Nilai *slump* yang tinggi menunjukkan bahwa beton segar mudah untuk dikerjakan, sementara nilai *slump* yang rendah menunjukkan bahwa beton segar sulit untuk diproses. Hasil dari pengujian *slump* dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut.

Tabel 5. 20 Hasil Pengujian *Slump*

Benda Uji	Variasi Limbah Marmer (%)	Tinggi *Slump* (cm)	Keterangan Slump (cm)	Keterangan
BN	-	13,5	6 - 18	Memenuhi
BGLM0	0%	16	6 - 18	Memenuhi
BGLM15	15%	15	6 - 18	Memenuhi
BGLM20	20%	15	6 - 18	Memenuhi
BGLM25	25%	15,6	6 - 18	Memenuhi
BGLM30	30%	16	6 - 18	Memenuhi

Mengacu pada Tabel 5.20 di atas, diperoleh grafik hasil pengujian slump pada beton geopolimer, yang dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



Gambar 5. 8 Grafik Nilai *Slump*

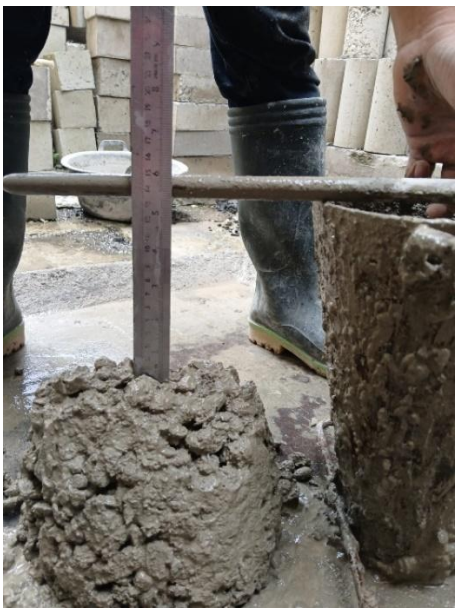
Nilai slump merupakan indikator penting untuk mengevaluasi tingkat kelecakan (workability) beton segar. Dalam penelitian ini, beton geopolimer tanpa substitusi limbah marmer (BGLM0) menunjukkan nilai slump sebesar 16 mm, lebih tinggi dibandingkan beton normal (BN) yang hanya mencapai 13,5 mm. Hasil ini mengindikasikan bahwa beton geopolimer memiliki kelecakan awal yang lebih baik. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh komposisi larutan alkali aktivator (Na_2SiO_3 dan NaOH) yang secara kimiawi mampu meningkatkan pelumasan antar partikel, meskipun viskositas larutannya lebih tinggi daripada air biasa yang digunakan dalam beton konvensional.

Namun, ketika limbah marmer ditambahkan sebesar 15% hingga 20%, nilai slump menurun menjadi 15 mm. Penurunan ini dapat dikaitkan dengan sifat partikel halus limbah marmer yang bersifat menyerap sebagian larutan pencampur dan meningkatkan luas permukaan total, sehingga memperkaku campuran. Menariknya, pada substitusi limbah marmer sebesar 25% dan 30%, nilai slump kembali meningkat menjadi 15,5 mm dan 16 mm. Kenaikan ini mengindikasikan bahwa pada kadar yang lebih tinggi, limbah marmer mulai berperan sebagai filler aktif yang mengisi celah

antar partikel agregat dan meningkatkan kemampuan alir campuran secara keseluruhan.

Penemuan ini didukung oleh Desimaliana, dkk. (2024), yang melaporkan bahwa limbah marmer sebagai material tambahan dapat mempengaruhi sifat reologi dan mikrostruktur pada mortar geopolimer. Meskipun fokus utama penelitian ini adalah nilai slump, data kuat tekan juga menunjukkan bahwa campuran dengan 15–20% limbah marmer memberikan kekuatan tertinggi, mendukung bahwa pada kadar tersebut terjadi perpaduan optimum antara workability dan kekuatan.

Dengan seluruh nilai slump yang tetap berada dalam rentang yang disyaratkan (6–18 mm), maka dapat disimpulkan bahwa substitusi limbah marmer dalam beton geopolimer hingga 30% tetap menghasilkan workability yang baik, dengan kinerja optimum pada variasi 15–20%.



Gambar 5. 9 Contoh Uji Slump

5.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Dalam penelitian ini, pengujian beton geopolimer dilakukan pada umur beton 28 hari setelah proses perawatan (curing). Selanjutnya, pengujian kuat tekan dilakukan

menggunakan mesin kompresi. Benda uji berbentuk silinder diproses dengan capping menggunakan belerang untuk meratakan permukaan atas beton, sehingga dapat menerima tekanan secara merata. Perhitungan kuat tekan beton geopolimer adalah sebagai berikut.

1. Luas Penampang beton geopolimer variasi limbah marmer 15% sampel 1

   A $= \frac{\pi}{4} \times d^2$

   $= \frac{\pi}{4} \times 151{,}233^2$

   = 17963,251 mm

2. Kuat tekan beton geopolimer variasi limbah marmer 15% sampel 1

   f'c $= \frac{P}{A}$

   $= \frac{825 \times 10^3}{18225{,}513}$

   = 45,266 Mpa

3. Kuat tekan beton geopolimer variasi limbah marmer 15% sampel 2

   f'c $= \frac{P}{A}$

   $= \frac{798{,}2 \times 10^3}{17828{,}887}$

   = 44,770 Mpa

4. Kuat tekan beton geopolimer variasi limbah marmer 15% sampel 3

   f'c $= \frac{P}{A}$

   $= \frac{782{,}5 \times 10^3}{18313{,}357}$

   = 42,728 Mpa

5. Kuat tekan beton rata – rata adalah sebagai berikut.

   F'c rata rata $= \frac{f'c_1 + f'c_2 + f'c_3}{3}$

   $= \frac{45{,}266 + 43{,}020 + 42{,}728}{3}$

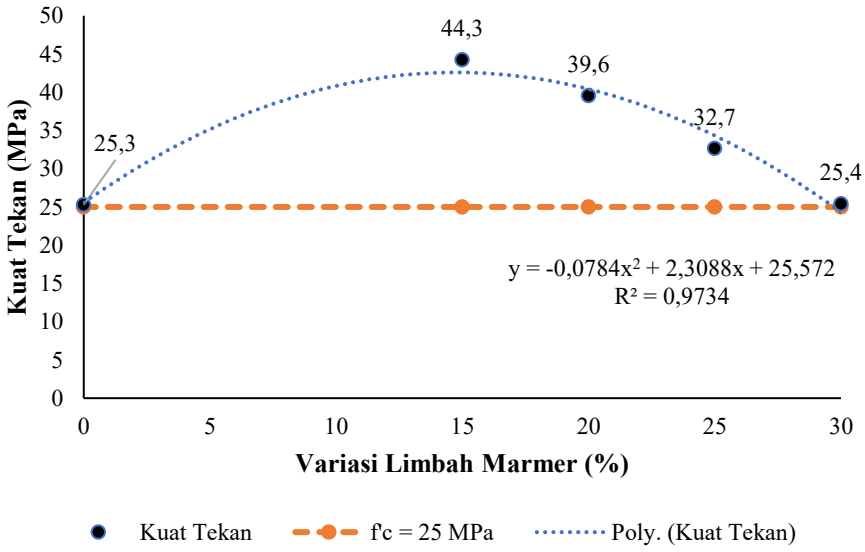
   = 43,7 Mpa

Dengan menggunakan metode perhitungan yang serupa, hasil pengujian kuat tekan pada beton geopolimer dapat dilihat pada Tabel 5.21 berikut ini.

Tabel 5. 21 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton

Kode Benda Uji		Diameter Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rerata (MPa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BN	1	151,233	304,533	17963,251	484400	26,966	26,234
	2	152,167	304,867	18185,654	474000	26,065	
	3	151,833	304,600	18106,067	464800	25,671	
BGLM0	1	152,400	303,867	18241,469	468800	25,700	25,293
	2	151,600	305,267	18050,460	456100	25,268	
	3	151,167	303,200	17947,417	447100	24,912	
BGLM15	1	152,333	304,200	18225,513	825000	45,266	44,255
	2	150,667	304,367	17828,887	798200	44,770	
	3	152,700	305,700	18313,357	782500	42,728	
BGLM20	1	151,567	302,200	18042,524	730000	40,460	39,555
	2	150,867	304,200	17876,252	710000	39,717	
	3	151,633	303,233	18058,399	695000	38,486	
BGLM25	1	150,633	305,033	17820,999	608000	34,117	32,666
	2	151,500	303,433	18026,655	590000	32,729	
	3	153,300	305,133	18457,556	575000	31,153	
BGLM30	1	150,500	302,300	17789,465	473150	26,597	25,431
	2	151,467	302,300	18018,723	459800	25,518	
	3	153,700	303,133	18554,003	448600	24,178	

Mengacu pada Tabel 5.21 di atas, diperoleh grafik hasil pengujian kuat tekan pada beton geopolimer, yang dapat dilihat pada Gambar 5.17 berikut ini



Gambar 5. 10 Grafik Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer



Gambar 5. 11 Contoh Pengujian Kuat Tekan Beton

Dalam penelitian ini, beton normal (BN) digunakan sebagai geopoly terhadap beton geopolimer. Hal ini disebabkan karena proses pencampuran (mix design) beton

geopolymer mengikuti prosedur pembuatan beton konvensional sesuai dengan SNI 03-2834-2000. Dengan demikian, kuat tekan beton geopolimer dapat mencapai nilai yang setara dengan beton konvensional yang direncanakan.

Tabel 5.21 menyajikan rekapitulasi hasil uji kuat tekan beton untuk berbagai variasi campuran, mulai dari beton normal (BN) hingga beton geopolimer (BGLM) dengan substitusi limbah marmer sebanyak 0% hingga 30%. Hasil uji menunjukkan bahwa substitusi limbah marmer pada beton geopolimer dapat meningkatkan kuat tekan secara signifikan, terutama pada variasi 15% dan 20%, dengan nilai tertinggi sebesar 44,3 Mpa (BGLM15) dan 39,6 Mpa (BGLM20). Sebaliknya, pada kadar 25% dan 30%, kuat tekan mulai menurun, mengindikasikan adanya batas optimal pemanfaatan limbah marmer.

Gambar 5.10 memperjelas pola tersebut, di mana grafik polynomial menunjukkan hubungan kuadratik yang kuat ($R^2 = 0,9734$) antara kadar limbah marmer dan kuat tekan beton. Substitusi limbah marmer hingga 15% memperbaiki struktur mikro beton, kemungkinan karena fungsi filler yang mengisi pori-pori, meningkatkan kepadatan, dan memperkuat ikatan antar partikel dalam pasta geopolimer. Namun, substitusi di atas kadar tersebut justru menyebabkan penurunan performa mekanik, kemungkinan akibat kelebihan filler yang menyebabkan segregasi, meningkatnya porositas, dan pembentukan rongga mikro.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Lee, dkk. (2020) yang mengembangkan beton geopolimer berbasis limbah marmer dengan kombinasi GGBFS dan larutan alkali dengan rasio molar SiO_2/Na_2O sebesar 1,28. Dalam studi tersebut, kuat tekan optimum sebesar 43 Mpa dicapai pada komposisi 50% serbuk marmer, menegaskan bahwa proporsi limbah marmer yang tepat dapat meningkatkan kekuatan beton secara signifikan. Namun, apabila komposisi tidak seimbang atau larutan alkali terlalu tinggi, justru terjadi peningkatan porositas dan terbentuknya rongga mikro yang berakibat pada penurunan kekuatan geopolimer.

Dengan demikian, baik berdasarkan pengujian dalam penelitian ini maupun hasil dari Lee, dkk. (2020), dapat disimpulkan bahwa penambahan limbah marmer dalam jumlah terbatas, khususnya pada kisaran 15%, merupakan komposisi optimum yang memberikan keseimbangan antara kekuatan tekan dan kelecakan beton geopolimer.

5.6 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan bersamaan dengan pengujian kuat tekan pada umur beton 28 hari. Pada benda uji berbentuk silinder, dipasang dial gauge pada kompresometer untuk mengukur perubahan geopoly (ΔL), yang dicatat setiap kali tekanan meningkat sebesar 10 kN. Dari hasil pembacaan dial gauge, diperoleh nilai tegangan dan regangan pada benda uji. Contoh perhitungan tegangan dan regangan pada saat benda uji menerima beban 10 kN dalam pengujian modulus elastisitas beton untuk beton geopolimer dengan variasi limbah marmer 15% pada sampel 1 adalah sebagai berikut.

1. Perhitungan Nilai ΔL

$$\Delta L = \frac{\Delta L}{2} \times 10^{-3}$$
$$= \frac{7}{2} \times 10^{-3}$$
$$= 0{,}0035 \text{ mm}$$

2. Perhitungan Nilai Tegangan (σ)

$$\sigma = \frac{P}{A}$$
$$= \frac{10000}{18225{,}513}$$
$$= 0{,}549 \text{ Mpa}$$

3. Perhitungan Nilai Regangan (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \times 1000$$
$$= \frac{0{,}0035}{200} \times 1000$$
$$= 0{,}0175 \text{ mm}$$

4. Perhitungan Nilai Regangan (ε) %

$$\varepsilon\ \% = \frac{\varepsilon}{1000}$$
$$= \frac{0{,}0175}{1000}$$
$$= 0{,}00002 \text{ mm}$$

Dengan menggunakan geopoly dan perhitungan yang serupa, diperoleh nilai tegangan dan regangan setiap kali beban ditambahkan sebesar 10 kN. Rekapitulasi hasil perhitungan tegangan dan regangan untuk modulus elastisitas pada beton geopolimer dengan variasi limbah marmer 15% pada sampel 1 dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5. 22 Nilai Tegangan dan Regangan Beton Geopolimer Limbah Marmer 15% Sampel 1

Beban (P)		Pembacaan Dial, ΔL' (μm)	ΔL (mm)	Tegangan, σ (Mpa)	Regangan, ε	Regangan, (%)
kN	N					
10	10000	7	0,0035	0,549	0,018	0,00002
20	20000	20	0,010	1,097	0,050	0,00005
30	30000	31	0,016	1,646	0,078	0,00008
40	40000	40	0,020	2,195	0,100	0,00010
50	50000	48	0,024	2,743	0,120	0,00012
60	60000	56	0,028	3,292	0,140	0,00014
70	70000	64	0,032	3,841	0,160	0,00016
80	80000	72	0,036	4,389	0,180	0,00018
90	90000	80	0,040	4,938	0,200	0,00020
100	100000	88	0,044	5,487	0,220	0,00022
110	110000	96	0,048	6,035	0,240	0,00024
120	120000	104	0,052	6,584	0,260	0,00026
130	130000	112	0,056	7,133	0,280	0,00028

Lanjutan Tabel 5. 22 Nilai Tegangan dan Regangan Beton Geopolimer Limbah Marmer 15% Sampel 1

Beban (P)		Pembacaan Dial, ΔL' (μm)	ΔL (mm)	Tegangan, σ (Mpa)	Regangan, ε	Regangan, (%)
kN	N					
140	140000	120	0,060	7,682	0,300	0,00030
150	150000	128	0,064	8,230	0,320	0,00032
160	160000	136	0,068	8,779	0,340	0,00034
170	170000	144	0,072	9,328	0,360	0,00036
180	180000	152	0,076	9,876	0,380	0,00038
190	190000	160	0,080	10,425	0,400	0,00040
200	200000	168	0,084	10,974	0,420	0,00042
210	210000	176	0,088	11,522	0,440	0,00044
220	220000	184	0,092	12,071	0,460	0,00046
230	230000	192	0,096	12,620	0,480	0,00048
240	240000	200	0,100	13,168	0,500	0,00050
250	250000	208	0,104	13,717	0,520	0,00052
260	260000	216	0,108	14,266	0,540	0,00054
270	270000	224	0,112	14,814	0,560	0,00056
280	280000	236	0,118	15,363	0,590	0,00059
290	290000	248	0,124	15,912	0,620	0,00062
300	300000	260	0,130	16,460	0,650	0,00065
310	310000	272	0,136	17,009	0,680	0,00068
320	320000	284	0,142	17,558	0,710	0,00071
330	330000	296	0,148	18,106	0,740	0,00074
340	340000	308	0,154	18,655	0,770	0,00077
350	350000	320	0,160	19,204	0,800	0,00080
360	360000	332	0,166	19,753	0,830	0,00083
370	370000	344	0,172	20,301	0,860	0,00086
380	380000	356	0,178	20,850	0,890	0,00089
390	390000	368	0,184	21,399	0,920	0,00092
400	400000	380	0,190	21,947	0,950	0,00095
410	410000	392	0,196	22,496	0,980	0,00098
420	420000	404	0,202	23,045	1,010	0,00101
430	430000	416	0,208	23,593	1,040	0,00104
440	440000	428	0,214	24,142	1,070	0,00107

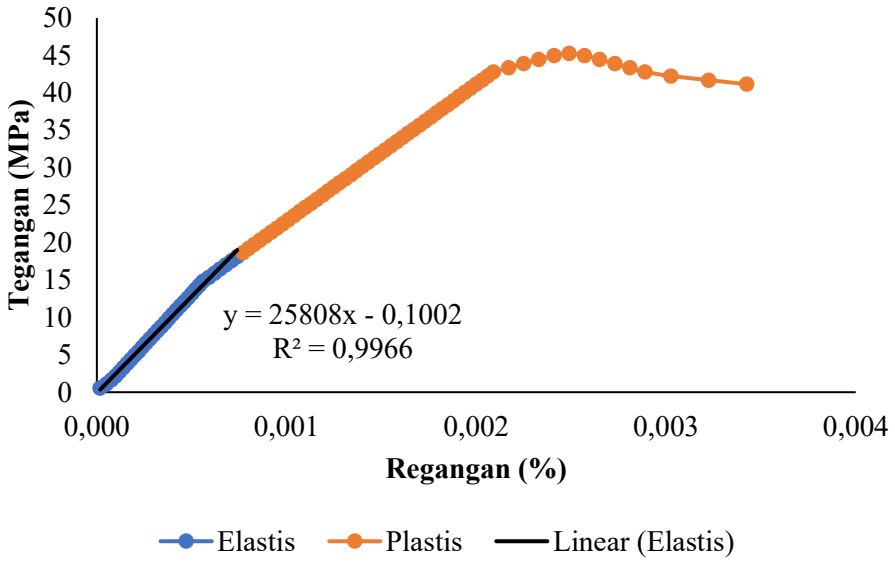
Lanjutan Tabel 5. 22 Nilai Tegangan dan Regangan Beton Geopolimer Limbah Marmer 15% Sampel 1

Beban (P)		Pembacaan Dial, ΔL' (μm)	ΔL (mm)	Tegangan, σ (Mpa)	Regangan, ε	Regangan, (%)
kN	N					
450	450000	440	0,220	24,691	1,100	0,00110
460	460000	452	0,226	25,239	1,130	0,00113
470	470000	464	0,232	25,788	1,160	0,00116
480	480000	476	0,238	26,337	1,190	0,00119
490	490000	488	0,244	26,885	1,220	0,00122
500	500000	500	0,250	27,434	1,250	0,00125
510	510000	512	0,256	27,983	1,280	0,00128
520	520000	524	0,262	28,531	1,310	0,00131
530	530000	536	0,268	29,080	1,340	0,00134
540	540000	548	0,274	29,629	1,370	0,00137
550	550000	560	0,280	30,177	1,400	0,00140
560	560000	572	0,286	30,726	1,430	0,00143
570	570000	584	0,292	31,275	1,460	0,00146
580	580000	596	0,298	31,824	1,490	0,00149
590	590000	608	0,304	32,372	1,520	0,00152
600	600000	620	0,310	32,921	1,550	0,00155
610	610000	632	0,316	33,470	1,580	0,00158
620	620000	644	0,322	34,018	1,610	0,00161
630	630000	656	0,328	34,567	1,640	0,00164
640	640000	668	0,334	35,116	1,670	0,00167
650	650000	680	0,340	35,664	1,700	0,00170
660	660000	692	0,346	36,213	1,730	0,00173
670	670000	704	0,352	36,762	1,760	0,00176
680	680000	716	0,358	37,310	1,790	0,00179
690	690000	728	0,364	37,859	1,820	0,00182
700	700000	740	0,370	38,408	1,850	0,00185
710	710000	752	0,376	38,956	1,880	0,00188
720	720000	764	0,382	39,505	1,910	0,00191
730	730000	776	0,388	40,054	1,940	0,00194
740	740000	788	0,394	40,602	1,970	0,00197
750	750000	800	0,400	41,151	2,000	0,00200

Lanjutan Tabel 5. 22 Nilai Tegangan dan Regangan Beton Geopolimer Limbah Marmer 15% Sampel 1

Beban (P)		Pembacaan Dial, ΔL' (μm)	ΔL (mm)	Tegangan, σ (Mpa)	Regangan, ε	Regangan, (%)
kN	N					
450	450000	440	0,220	24,691	1,100	0,00110
760	760000	812	0,406	41,700	2,030	0,00203
770	770000	824	0,412	42,248	2,060	0,00206
780	780000	836	0,418	42,797	2,090	0,00209
790	790000	868	0,434	43,346	2,170	0,00217
800	800000	900	0,450	43,895	2,250	0,00225
810	810000	932	0,466	44,443	2,330	0,00233
820	820000	964	0,482	44,992	2,410	0,00241
825	825000	996	0,498	45,266	2,490	0,00249
820	820000	1028	0,514	44,992	2,570	0,00257
810	810000	1060	0,530	44,443	2,650	0,00265
800	800000	1092	0,546	43,895	2,730	0,00273
790	790000	1124	0,562	43,346	2,810	0,00281
780	780000	1156	0,578	42,797	2,890	0,00289
770	770000	1210	0,605	42,248	3,025	0,00303
760	760000	1290	0,645	41,700	3,225	0,00323
750	750000	1370	0,685	41,151	3,425	0,00343

Berdasarkan Tabel 5.22, grafik regangan dan tegangan beton 103eopolymer diperoleh dari nilai regangan dan tegangan yang tercatat. Kemiringan kurva regresi linear ditentukan dengan menggunakan *Microsoft Excel*, yang menambahkan *trendline linear* pada area elastis. Batas daerah elastis diambil pada saat beban mencapai 10 kN hingga tegangan mencapai 40% dari kuat tekan maksimum (0,40 f'c maksimum). Pada Tabel 5.22, nilai beban, regangan, dan tegangan pada titik 40% kuat tekan maksimum ditandai dengan warna hijau, sementara nilai yang menunjukkan titik kuat tekan maksimum ditandai dengan warna kuning. Grafik tegangan dan regangan yang diperoleh untuk beton geopolimer dengan variasi limbah marmer 15% pada sampel 1 dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut ini.



Gambar 5. 12 Grafik Tegangan-Regangan BGLM15 Sampel 1



Gambar 5. 13 Contoh Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Mengacu pada Gambar 5.12 di atas, nilai modulus elastisitas dari pengujian beton geopolimer dengan variasi limbah marmer 15% pada sampel 1 diperoleh sebesar

25808 Mpa, dengan kuat tekan maksimum sebesar 45,27 Mpa. Selain itu, nilai modulus elastisitas juga dihitung secara teoritis menggunakan rumus dari ASTM C-469-94 pada persamaan 3.8, serta dari SNI 2847-2019 pada persamaan 3.9. Perhitungan berdasarkan persamaan 3.8 dan persamaan 3.9 adalah sebagai berikut.

$$Ec_{\text{ASTM C-469-94}} = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0{,}00005}$$
$$= \frac{18{,}106 - 1{,}097}{0{,}00074 - 0{,}00005}$$
$$= 24650{,}903 \text{ Mpa}$$

$$Ec_{\text{SNI 2847-2019}} = 4700 \times \sqrt{f'c}$$
$$= 4700 \times \sqrt{45{,}27}$$
$$= 31621{,}680 \text{ Mpa}$$

Dengan menggunakan metode dan perhitungan yang serupa, diperoleh nilai modulus elastisitas beton baik melalui pengujian langsung maupun perhitungan teoritis berdasarkan ASTM C-469-94 dan SNI 2847-2019. Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan dalam nilai modulus elastisitas. Penelitian oleh Tempest (2010) memperkenalkan rumus empiris baru untuk memprediksi nilai modulus elastisitas beton pada beton geopolimer. Perhitungan berdasarkan persamaan 3.10 sebagai berikut.

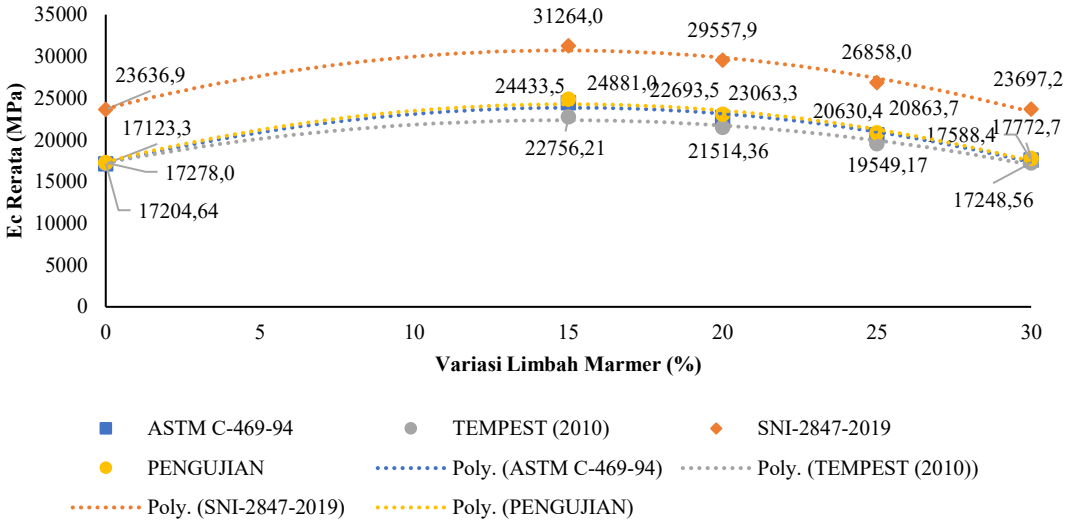
$$Ec_{\text{Tempest (2010)}} = 3421 \times \sqrt{f'c}$$
$$= 3421 \times \sqrt{45{,}27}$$
$$= 23016{,}547 \text{ Mpa}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan di atas, diperoleh rekapitulasi nilai modulus elastisitas beton geopolimer dari setiap percobaan dan perhitungan yang dilakukan. Hasil rekapitulasi nilai modulus elastisitas beton geopolimer dapat dilihat pada Tabel 5.23 berikut ini.

Tabel 5. 23 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton

Variasi	Kode	fc	ASTM C-469-94		SNI-2847-2019		TEMPEST (2010)		PENGUJIAN	
			Ec	Rerata	Ec	Rerata	Ec	Rerata	Ec	Rerata
0	BG0LM	25,7	17097,512	17123,311	23826,582	23636,892	17342,710	17204,640	17346,000	17278,000
	BG0LM2	25,3	16960,645		23625,649		17196,457		17298,000	
	BG0LM3	24,9	17311,775		23458,445		17074,753		17190,000	
15	BG15LM	45,3	24650,903	24433,549	31621,680	31264,014	23016,547	22756,211	25808,000	24881,000
	BG15LM2	44,8	24563,553		31447,896		22890,054		24706,000	
	BG15LM3	42,7	24086,190		30722,465		22362,032		24129,000	
20	BG20LM	40,5	23834,777	22693,506	29895,832	29557,870	21760,349	21514,356	23406,000	23030,000
	BG20LM2	39,7	22166,607		29620,255		21559,765		22891,000	
	BG20LM3	38,5	22079,135		29157,524		21222,955		22793,000	
25	BG25LM	34,1	20669,341	20630,439	27452,609	26857,964	19981,995	19549,169	21063,000	20863,667
	BG25LM2	32,7	20777,313		26888,482		19571,383		20895,000	
	BG25LM3	31,2	20444,662		26232,802		19094,131		20633,000	
30	BG30LM	26,6	18836,243	17588,401	24239,064	23697,231	17642,944	17248,559	18992,000	17772,667
	BG30LM2	25,5	16907,263		23742,166		17281,266		17219,000	
	BG30LM3	24,2	17021,697		23110,465		16821,468		17107,000	
Beton Normal	BN	27,0	17128,988	16888,437	24406,610	24071,657	17764,896	17521,093	17358,000	17218,000
	BN2	26,1	16838,350		23995,100		17465,369		17151,000	
	BN3	25,7	16697,972		23813,260		17333,013		17145,000	

Mengacu pada Tabel 5.23, diperoleh grafik yang menunjukkan nilai modulus elastisitas beton geopolimer dengan substitusi abu sekam padi terhadap fly ash. Grafik nilai modulus elastisitas beton tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.14 di bawah ini.



Gambar 5. 14 Grafik Nilai Modulus Elastisitas Beton

Gambar 5.14 menggambarkan variasi nilai modulus elastisitas rata-rata (E) beton terhadap persentase substitusi limbah marmer, dengan membandingkan antara nilai hasil pengujian aktual dan nilai estimasi berdasarkan tiga pendekatan, yaitu SNI 2847:2019, ASTM C-469-94, dan Tempest (2010). Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai E hasil pengujian mengalami peningkatan hingga variasi substitusi limbah marmer sebesar 15%–20%, kemudian menurun pada kadar di atasnya. Nilai tertinggi tercatat pada campuran BG15LM, yaitu sebesar 24.881 MPa, yang mendekati estimasi dari pendekatan SNI (31.264 MPa), Tempest (22.756 MPa) dan ASTM C-469-94 (24.434 MPa).

Namun demikian, secara umum terlihat bahwa pendekatan SNI 2847:2019 selalu memberikan nilai estimasi yang lebih tinggi dibandingkan hasil pengujian aktual, mengindikasikan adanya kecenderungan overestimasi bila standar ini diterapkan pada beton geopolimer. Sebaliknya, pendekatan ASTM C-469-94 dan

Tempest (2010) memberikan estimasi yang lebih mendekati hasil pengujian, terutama pada rentang substitusi 0%–20% limbah marmer. Hal ini menunjukkan bahwa kedua pendekatan tersebut lebih representatif untuk karakteristik beton geopolimer.

Tabel 5. 24 Rekapitulasi Persamaan Regresi Grafik Nilai Modulus Elastisitas Beton

Sumber	Persamaan	R^2
SNI-2847:2019	$y = -79{,}584x^2 + 3134{,}9x$	0,5036
ASTM C-469-94	$y = -57{,}927x^2 + 2281{,}8x$	0,5036
Tempest (2010)	$y = -63{,}904x^2 + 2471{,}9x$	0,5915
Pengujian	$y = -65{,}348x^2 + 2520x$	0,5947

Tabel 5.24 menampilkan persamaan regresi kuadratik dan nilai koefisien determinasi (R^2) dari hubungan antara variasi limbah marmer dengan nilai modulus elastisitas beton. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana model matematis dari literatur dan standar dapat merepresentasikan perilaku beton geopolimer yang diteliti. Secara statistik, persamaan dari data pengujian memiliki nilai R^2 tertinggi (0,5947), menunjukkan bahwa model tersebut paling cocok terhadap data aktual. Model dari Tempest (2010) juga memiliki R^2 tinggi (0,5915), sedangkan SNI 2847:2019 dan ASTM C469-94 lebih rendah (0,5036).

Namun, jika dilihat secara visual pada Gambar 5.14, tren data hasil pengujian justru tampak lebih mendekati kurva Tempest dan ASTM dibandingkan kurva SNI. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun nilai R^2 dari pengujian lebih tinggi, bentuk kurva hasil pengujian secara pola grafik lebih selaras dengan model Tempest dan ASTM. Secara garis besar, dapat disimpulkan bahwa model Tempest (2010) merupakan model yang paling representatif, karena mendekati baik dari sisi nilai regresi maupun pola grafik. Model dari ASTM juga dapat dijadikan referensi tambahan, sedangkan model dari SNI terlihat kurang sesuai dengan karakteristik beton geopolimer berbahan limbah marmer.

Tabel 5. 25 Perbandingan Nilai Modulus Elastisitas pada Beton Geopolimer

Benda Uji	Modulus Elastis Rerata, E (Mpa)				Rasio $\frac{Ec_{Pengujian}}{Ec_{\text{ASTM C}-469-94}}$	Rasio $\frac{Ec_{Pengujian}}{Ec_{\text{SNI}-2847-2019}}$	Rasio $\frac{Ec_{Pengujian}}{Ec_{\text{E Tempest (2010)}}}$
	Ec Pengujian	Ec ASTM C-469-94	Ec SNI-2847-2019	Ec Tempest (2010)			
BN	17218,000	16888,437	24071,657	17521,093	101,95%	71,53%	98%
BG0LM	17278,000	17123,311	23636,892	17204,640	100,90%	73,10%	100%
BG15LM	24881,000	24433,549	31264,014	22756,211	101,83%	79,58%	109%
BG20LM	23030,000	22693,506	29557,870	21514,356	101,48%	77,91%	107%
BG25LM	20863,667	20630,439	26857,964	19549,169	101,13%	77,68%	107%
BG30LM	17772,667	17588,401	23697,231	17248,559	101,05%	75,00%	103%

Tabel 5.24 menampilkan perbandingan nilai modulus elastisitas rata-rata (E) yang diperoleh dari hasil pengujian langsung terhadap nilai estimasi berdasarkan tiga referensi standar, yaitu ASTM C-469-94, SNI-2847:2019, dan Tempest (2010), pada beton normal (BN) dan berbagai variasi beton geopolimer dengan limbah marmer (BGLM).

Terlihat bahwa nilai modulus elastisitas dari pengujian aktual (Ec pengujian) secara umum lebih tinggi dibandingkan nilai berdasarkan ASTM C-469-94, dengan rasio berada di kisaran 100,90% hingga 101,95%, menunjukkan bahwa perhitungan berdasarkan ASTM C-469-94 cukup konsisten dengan hasil pengujian laboratorium.

Namun jika dibandingkan dengan standar SNI-2847:2019, nilai modulus elastisitas pengujian hanya mencapai sekitar 71%–79% dari nilai estimasi. Hal ini menunjukkan bahwa rumus pada SNI-2847:2019 cenderung melebihkan prediksi kekakuan beton geopolimer, yang kemungkinan besar karena SNI-2847:2019 dikembangkan untuk beton berbasis semen Portland, bukan geopolimer.

Sementara itu, perbandingan dengan model dari E Tempest (2010) menunjukkan rasio yang paling mendekati nilai aktual, berkisar antara 98%–109%, khususnya pada BG15LM dan BG20LM, yang memiliki nilai modulus tertinggi. Hal ini memperkuat temuan bahwa substitusi limbah marmer hingga 15%–20% tidak hanya meningkatkan kuat tekan, tetapi juga meningkatkan kekakuan beton geopolimer secara signifikan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa modulus elastisitas beton geopolimer lebih akurat diperkirakan menggunakan pendekatan model E Tempest (2010) dibanding standar SNI-2847:2019 maupun ASTM C-469-94, dan variasi optimum substitusi limbah marmer berada di kisaran 15%–20%, sejalan dengan hasil uji kuat tekan sebelumnya.

5.7 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Pengujian kuat tarik belah beton pada penelitian ini dilakukan setelah benda uji mencapai umur 28 hari. Sebelum pengujian, benda uji diukur untuk menentukan diameter dan tinggi, sehingga dapat dihitung nilai luas penampangnya. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat uji tekan, di mana benda uji diletakkan secara horizontal hingga tercapai nilai maksimum. Nilai kuat tarik belah beton dihitung menggunakan persamaan 3.7. Berikut adalah contoh perhitungan kuat tarik belah beton untuk beton geopolimer dengan variasi limbah marmer 15% pada sampel 1.

$$f'ct = \frac{2.P}{\pi LD}$$

$$= \frac{2 \times 222000}{\pi \times 302{,}167 \times 150{,}864}$$

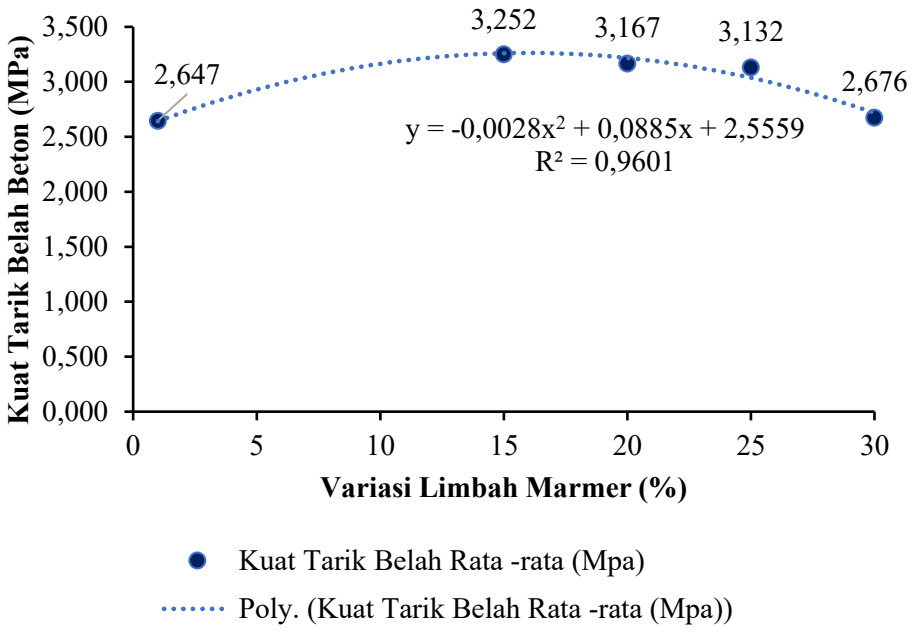
$$= 3{,}1002 \text{ Mpa}$$

Dengan menggunakan metode perhitungan yang serupa, diperoleh hasil nilai kuat tarik belah beton yang dapat dilihat pada Tabel 5.25 berikut.

Tabel 5. 26 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah pada Beton

Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas penampang (mm2)	Beban Maksimum (N)	Kuat Tarik Belah (Mpa)	Kuat Tarik Belah Rata - rata (Mpa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BN	1	151,200	303,667	17955,333	190000	2,6344	2,817
	2	150,233	302,533	17726,479	204000	2,8574	
	3	151,833	304,600	18106,067	215000	2,9595	
BG0LM	1	150,750	304,450	17848,615	220000	3,0516	2,647
	2	150,500	308,000	17789,465	170000	2,3348	
	3	152,567	302,117	18281,389	185000	2,5552	
BG15LM	1	150,867	302,167	17876,252	222000	3,1002	3,252
	2	152,900	305,000	18361,360	257000	3,5084	
	3	151,733	306,733	18082,225	230000	3,1461	
BG20LM	1	149,700	298,500	17600,844	260000	3,7041	3,167
	2	150,900	302,200	17884,152	228000	3,1830	
	3	151,633	305,067	18058,399	190000	2,6148	
BG25LM	1	150,333	305,267	17750,086	180000	2,4970	3,132
	2	150,133	305,200	17702,889	260000	3,6124	
	3	152,833	304,300	18345,352	240000	3,2853	
BG30LM	1	150,600	299,367	17813,113	185000	2,6123	2,676
	2	150,300	300,933	17742,215	195000	2,7446	
	3	149,933	302,200	17655,754	190000	2,6696	

Mengacu pada Tabel 5.25, diperoleh grafik yang menunjukkan hasil pengujian kuat tarik belah beton pada beton geopolimer. Grafik kuat tarik belah beton tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5. 15 Grafik Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer



Gambar 5. 16 Contoh Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Berdasarkan Tabel 5.25, beton geopolimer dengan variasi limbah marmer 15% (BG15LM) menunjukkan nilai kuat tarik belah tertinggi sebesar 3,252 MPa. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan beton normal (BN) yang hanya mencapai rata-rata 2,817 MPa dan beton geopolimer tanpa limbah marmer (BG0LM) yang hanya memperoleh 2,647 MPa. Peningkatan ini dapat dijelaskan oleh efek filler aktif dari partikel marmer yang halus dan mengandung kalsium tinggi. Partikel marmer ini mampu mengisi rongga antar partikel, memperbaiki ikatan antar partikel, dan memperkuat struktur mikro beton secara keseluruhan. Dengan struktur yang lebih rapat dan distribusi pori yang lebih terkendali, beton menjadi lebih tahan terhadap gaya tarik.

Namun, pada variasi lebih dari 20%, seperti pada 30% (BG30LM), kuat tarik belah mulai mengalami penurunan menjadi 2,676 MPa, yang hampir setara dengan beton normal. Penurunan ini kemungkinan besar disebabkan oleh kelebihan partikel halus dari limbah marmer, yang dapat menyebabkan segregasi dalam campuran beton dan meningkatkan porositas. Hal ini mengganggu kestabilan pasta geopolimer dan mengurangi kekuatan tarik beton.

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.15 memperkuat temuan ini, di mana kurva menunjukkan tren peningkatan kuat tarik belah hingga 15%, diikuti dengan penurunan pada variasi 20% dan seterusnya. Model persamaan polinomial yang digunakan untuk menggambarkan hubungan ini menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9573, yang menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara variabel-variabel tersebut.

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa variasi limbah marmer 15% merupakan komposisi yang optimal, yang tidak hanya meningkatkan kuat tekan beton, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan tarik belah beton geopolimer. Dengan demikian, komposisi ini merupakan pilihan yang sangat efektif dalam pengembangan beton geopolimer berbasis limbah marmer.



Gambar 5. 17 Contoh Hasil Uji Tarik Belah Beton Geopolimer

Nilai kuat tarik belah beton tidak berbanding lurus dengan nilai kuat tekan beton. Kenaikan mutu kuat tekan umumnya hanya diikuti peningkatan kecil pada kuat tarik belah, yang secara umum berada pada kisaran 9% hingga 15% dari kuat tekan beton (Setiawan dan Suseno, 2020). Hal ini juga berlaku pada beton geopolimer, di mana karakteristik tariknya tetap relatif rendah meskipun terjadi peningkatan kekuatan tekan. Perhitungan persentase kuat tarik belah beton terhadap kuat tekan beton pada beton geopolimer dapat dihitung sebagai berikut.

$$\text{Persentase (\%)} = \frac{f'c\ rata\ rata}{f'ct\ rata\ rata} \times 100$$

$$= \frac{2{,}82}{26{,}23} \times 100$$

$$= 10{,}74\%$$

Dengan menggunakan metode perhitungan yang serupa, diperoleh persentase kuat tarik belah terhadap kuat tekan beton pada beton geopolimer, yang dapat dilihat pada Tabel 5.26 berikut ini

Tabel 5. 27 Persentase Kuat Tarik Belah dari Kuat Tekan Beton

Kode Benda Uji	Kuat Tekan rata - rata (Mpa)	Kuat Tarik Belah rata - rata (Mpa)	Persentase
BN	26,23	2,817	10,74%
BG0LM	25,29	2,647	10,47%
BG15LM	44,25	3,252	7,35%
BG20LM	39,55	3,167	8,01%
BG25LM	32,67	3,132	9,59%
BG30LM	25,43	2,676	10,52%

Tabel 5. 26 ini menunjukkan hubungan antara kuat tekan rata-rata dan kuat tarik belah rata-rata dari berbagai variasi campuran beton, termasuk beton normal (BN) dan beton geopolimer dengan limbah marmer (BG0LM hingga BG30LM). Dihitung pula persentase kuat tarik belah terhadap kuat tekan, yang berkisar antara 7,35% hingga 10,74%.

Menariknya, variasi BG15LM dan BG20LM, yang sebelumnya terbukti memiliki kuat tekan tertinggi, justru menunjukkan persentase kuat tarik belah yang lebih rendah (7,35% dan 8,01%), meskipun nilai tarik absolutnya tetap tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kuat tekan meningkat signifikan, peningkatan kuat tarik belah tidak selalu proporsional, kemungkinan disebabkan oleh sifat getas beton geopolimer yang dominan pada kekuatan tinggi.

Penelitian oleh Hardjito dan Rangan (2005) menyatakan bahwa kuat tarik belah beton geopolimer umumnya berada pada 8–11% dari kuat tekannya, tergantung pada jenis bahan penyusun dan metode curing. Temuan dalam tabel ini masih berada dalam kisaran tersebut, mengonfirmasi validitas hasil.

Selain itu, dalam penelitian oleh Olivia dan Nikraz (2011), disebutkan bahwa perawatan panas (oven curing) pada suhu 60–80°C selama 24 jam dapat secara signifikan meningkatkan kuat tekan beton geopolimer, tetapi dapat menurunkan sifat daktilitas, yang berdampak pada kuat tarik belah. Dalam konteks penelitian ini, kemungkinan besar beton geopolimer mengalami proses perawatan suhu ruangan

(ambient curing), yang membuat kuat tariknya lebih stabil dan tidak terlalu getas, tetapi dengan konsekuensi penurunan performa pada variasi kadar limbah marmer tinggi (BG30LM).

Secara keseluruhan, substitusi limbah marmer optimal pada 15–20% tidak hanya meningkatkan kekuatan tekan, tetapi juga memberikan nilai kuat tarik belah yang masih kompetitif, meskipun secara persentase sedikit lebih rendah karena dominasi peningkatan kuat tekan.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi limbah marmer terhadap sifat mekanik beton geopolimer yang mencakup kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas, serta menentukan proporsi optimal dari substitusi limbah marmer dalam rentang 15%–30%. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh rangkuman sebagai berikut:

1. Substitusi limbah marmer memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik beton geopolimer.
    a. Variasi 15% limbah marmer menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 44,3 MPa, mengalami peningkatan dibandingkan beton normal yang hanya mencapai 26,2 MPa.
    b. Kuat tarik belah tertinggi juga terjadi pada variasi 15%, yaitu sebesar 3,252 MPa, dibandingkan beton normal yang hanya 2,817 MPa.
    c. Modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada variasi 15% limbah marmer, dengan nilai rata-rata sebesar 24.881 MPa. Nilai ini secara visual mendekati tren yang diprediksi oleh standar ASTM C-469-94 dan model empiris Tempest (2010), serta sejalan dengan peningkatan kuat tekan pada variasi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan limbah marmer sebesar 15% memberikan kontribusi optimal terhadap kekakuan dan kekuatan beton geopolimer.
2. Proporsi optimal substitusi limbah marmer pada beton geopolimer adalah 15%.

a. Komposisi ini memberikan performa paling seimbang dan unggul secara mekanik dibandingkan variasi 20%, 25%, dan 30%, yang justru cenderung mengalami penurunan pada beberapa parameter.
b. Hal ini menunjukkan bahwa substitusi limbah marmer di atas 15% mulai meningkatkan porositas dan mengganggu ikatan antar partikel, sehingga menurunkan kekuatan struktur beton.

6.2 Saran

Berdasarkan pada hasil kesimpulan penelitian mengenai beton geopolimer dengan substitusi limbah marmer sebagai pengganti fly ash, terdapat sejumlah rekomendasi yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan studi di masa mendatang.

1. Disarankan untuk melakukan eksplorasi variasi kadar limbah marmer yang lebih rinci (misalnya 10%, 12,5%, dan 17,5%) untuk mengidentifikasi titik optimum secara lebih presisi.
2. Perlu dilakukan pengujian jangka panjang untuk mengetahui durabilitas beton geopolimer terhadap kondisi ekstrem seperti suhu tinggi, lingkungan sulfat, serta siklus beku-cair.
3. Penelitian selanjutnya sebaiknya melibatkan analisis mikrostruktur menggunakan metode seperti SEM, XRD, dan FTIR untuk memahami mekanisme peningkatan kekuatan akibat substitusi limbah marmer.
4. Untuk keperluan implementasi di lapangan, perlu disusun analisis kelayakan teknis dan ekonomis, termasuk ketersediaan limbah marmer, efisiensi produksi, dan dampak lingkungannya secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

Alharthy, M., Alghamdi, A., & Alzahrani, M. (2022). Developing a geopolymer pastes using marble dust. *Journal of Cleaner Production, 330*, 129724. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129724

ASTM International. (1994). *ASTM C469-94: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.*

ASTM International. (2012). *ASTM C618-12: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.*

Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1968-1990: Analisa saringan agregat kasar dan halus.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1970-1990: Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1971-1990: Kadar air agregat kasar dan halus.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (1991). *SNI 15-2531:1991: Berat jenis fly ash.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-4142-1996: Pengujian kandungan lumpur dalam agregat halus.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-4169-1996: Metode pengujian modulus elastisitas beton.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (1997). *SNI 03-4428-1997: Pengujian kandungan kotoran agregat kasar dan halus.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-2491-2002: Metode pengujian kuat tarik belah beton silinder.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 1973:2008: Berat isi agregat dan fly ash.* Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 03-2847-2019: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan.* Jakarta: BSN.

Davidovits, J. (2013). *Geopolymer chemistry and applications* (4th ed.). Geopolymer Institute.

Ekaputri, J. J., Triwulan, & Damayanti, O. (2007). Sifat mekanik beton geopolimer berbahan dasar fly ash Jawa Power. *Jurnal Pondasi, 13*(2), 124–134.

Gao, X., & Yu, Q. L. (2019). Microstructure and mechanical properties of geopolymers synthesized from blast furnace slag and phosphoric acid. *Construction and Building Materials, 201*, 295–303.

Global Carbon Project. (2020). *Global carbon budget 2020*. https://www.globalcarbonproject.org

Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites, 32*(2), 142–147.

Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete* (Research Report GC 1). Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.

Kumar, R., & Neelima, N. (2022). The development of a low-calcium geopolymer concrete made from fly ash and marble powder. *Construction and Building Materials, 315*, 125754. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125754

Kumar, S., Verma, S. K., & Sharma, N. (2017). Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. *Construction and Building Materials, 154*, 734–742. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.014

Lee, S. J., Park, C., & Cho, H. (2020). Sustainable development and performance evaluation of marble-waste-based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production, 255*, 120290. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120290

Loekito, R., & Wardhono, A. (2019). Pengaruh rasio larutan aktivator terhadap kuat tekan dan struktur mikro beton geopolimer berbasis fly ash. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, 6*(2), 45–52.

Majidi, B. (2009). Geopolymer technology: From fundamentals to advanced applications – A review. *Materials Technology, 24*(2), 79–87.

Mulyono, T. (2004). *Teknologi beton.* Yogyakarta: Andi.

Nawy, E. G. (1990). *Concrete construction engineering handbook.* CRC Press.

Olivia, M., & Nikraz, H. (2011). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design, 32*(11), 6363–6371. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.052

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications.* Woodhead Publishing.

Putra, A. M., Sutanto, M. H., & Susanti, L. (2018). Pengaruh variasi molaritas NaOH terhadap sifat mekanik beton geopolimer berbasis fly ash. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 22*(1), 33–41.

Rashad, A. M. (2012). A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials, 47*, 29–55. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.011

Science Notes. (n.d.). *Periodic table of elements*. https://sciencenotes.org/periodic-table

Singh, B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymer concrete: A review of development and opportunities. *Construction and Building Materials, 241*, 118112. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.118112

Tempest, B. (2010). *Assessing the sustainability of alkali-activated concrete* [Doctoral dissertation, University of Leeds].

Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering, 29*, 89–104.

Wijayanti, F. D., & Wardhono, A. (2022). Pengaruh substitusi limbah marmer terhadap nilai kuat tekan dry geopolymer mortar. *Jurnal Teknik Sipil, 10*(1), 35–42.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Laboratorium

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN BEBAS TANGGUNGAN LABORATORIUM

Nomor : 009/Ka.Lab/60/LBKT/II/2025

Bismillahirrohmaanirrohiim

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama	: Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK	: 165111301
Jabatan Struktural	: Kepala Laboratorium Bahan Konstruksi Tenik JTS FTSP UII

Dengan ini menerangkan bahwa :

Nama	: **Kurniawan Nur Razaq**
N I M	: 20511274
Program Studi	: S1 Teknik Sipil
Dosen Pembimbing TA	: Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
Instansi	: Universitas Islam Indonesia

Telah melaksanakan penelitian / Tugas Akhir di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia dengan judul Tugas Akhir **"Pengaruh Pemanfaatam Limbah Marmer Sebagai Bahan Subtitusi *Fly Ash* Pada Campuran Beton Geopolimer Terhadap Sifat Mekanik"** serta sudah menyelesaikan semua administrasinya*).

Demikian surat keterangan ini dibuat semoga bisa digunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 15 Mei 2025

Diperiksa oleh : Kepala Laboratorium BKT,	Di data oleh : PLP/Teknisi
Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.	Win Fauzi Ahmadi, S.Tr.T.

Lampiran 2 Rekapitulasi Data dari Hasil Pemeriksaan Agregat

PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT HALUS

(SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Pasir	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata - rata**
Berat pasir kering mutlak, gram (Bk)	488	490	489
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	500	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (Bt)	948	948	948
Berat piknometer berisi air, gram (B)	650	650	650
Berat jenis curah, Bk / (B+500-Bt)	2,42	2,43	2,42
Berat jenis jenuh kering kering muda (SSD), 500 / (B+500-Bt)	2,48	2,48	2,48
Berat jenis semu, Bk / (B+Bk-Bt)	2,57	2,55	2,56
Penyerapan air, (500-Bk) / Bk x 100%	2,46	2,04	2,25

MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS SAMPLE 1

(SNI 03-1968-1990)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Pasir	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	40	2,00	2,00	98,00
1,2	307	15,37	17,37	82,63
0,6	680	34,03	51,40	48,60
0,3	572	28,63	80,03	19,97
0,15	319	15,97	96,00	4,00
Sisa	80	4,00	100	0
Jumlah	**1998**	**100**	**246,80**	

Modulus Halus Butir $= \frac{246,80}{100}$

$= 2,47$

Lubang ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Ayakan			
	Daerah 1	Daerah 2	Daerah 3	Daerah 4
10	100	100	100	100
4,8	90 - 100	91 - 100	92 - 100	95 - 100
2,4	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100
1,2	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100
0,6	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100
0,3	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50
0,15	0 - 10	0 - 10	0 - 10	0 - 15

MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS SAMPLE 2

(SNI 03-1968-1990)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Pasir	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	50	2,50	2,50	97,50
1,2	399	19,95	22,45	77,55
0,6	714	35,70	58,15	41,85
0,3	515	25,75	83,9	16,1
0,15	255	12,75	96,65	3,35
Sisa	67	3,35	100	0
Jumlah	**2000**	**100**	**263,65**	

Modulus Halus Butir $= \frac{263,65}{100}$

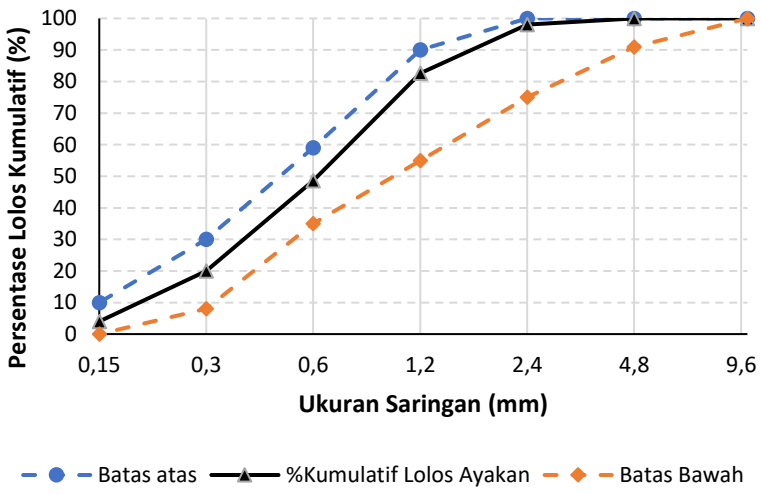
= 2,64

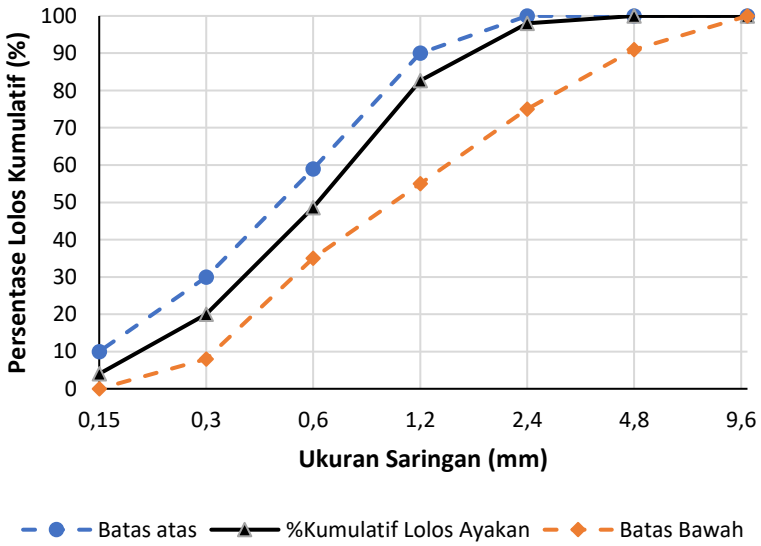
Lubang ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Ayakan			
	Daerah 1	Daerah 2	Daerah 3	Daerah 4
10	100	100	100	100
4,8	90 - 100	91 - 100	92 - 100	95 - 100
2,4	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100
1,2	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100
0,6	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100
0,3	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50
0,15	0 - 10	0 - 10	0 - 10	0 - 15

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS

(SNI 03-1968-1990)

Sampel	Daerah Pasir	Jenis Pasir
1	Daerah II	Pasira gak kasar
2	Daerah II	Pasira gak kasar





PEMERIKSAAN BERAT VOLUME GEMBUR DAN PADAT AGREGAT HALUS

(SNI 03-4804-1998)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Pasir	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Pemeriksaan: Berat Volume Gembur

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	17406	16970	17188
Berat agregat (W3), gram	6677	6893	6785
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,26	1,25	1,25

Pemeriksaan: Berat Volume Padat

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	18778	18489	18633,5
Berat agregat (W3), gram	8049	8412	8230,5
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,52	1,53	1,52

PEMERIKSAAN BUTIRAN YANG LOLOS AYAKAN NO. 200/UJI KANDUNGAN LUMPUR DALAM PASIR

(SNI 03-4142-1996)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Pasir	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat agregat kering oven (W1)	500	500	500
Berat agregat kering oven setelah di cuci (W2), gram	485	498	491,5
Berat yang lolos Ayakan N0. 200 [(W1 – W2)/W1] x 100	3%	0,4%	1,7%

PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT KASAR

(SNI 03-1970-1990)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Kerikil	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata - rata**
Berat kerikil kering mutlak (Bk)	4963	4953	4958
Berat kerikil jenuh kering muka (SSD), (Bj)	5000	5000	5000
Berat piknometer berisi pasir dan air (Ba)	3073	3069	3071
Berat jenis curah, Bk / (Bj-Ba)	2,58	2,56	2,57
Berat jenis jenuh kering kering muda (SSD), Bj / (Bj-Ba)	2,59	2,59	2,59
Berat jenis semu, Bk / (Bk-Ba)	2,63	2,63	2,63
Penyerapan air (Bj-Bk) / Bk x 100%	0,75	0,95	0,85

MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR SAMPLE 1

(SNI 03-1968-1990)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Kerikil	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	124	2,48	2,48	97,52
10	2700	54	56,48	43,52
4,8	2061	41,22	97,7	2,3
2,4	68	1,36	99,06	0,94
1,2	2	0,04	99,1	0,9
0,6	0	0	99,1	0,9
0,3	0	0	99,1	0,9
0,15	0	0	99,1	0,9
Sisa	45	0,9	100	0
Jumlah	**5000**	**100**	**652,12**	

Modulus Halus Butir $= \frac{652,12}{100}$

= 6,52

Lolos Saringan (mm)	Persen Butiran Agregat Lolos Saringan	
	40 mm	20 mm
40	95 - 100	100
20	30 - 70	95 - 100
10	10 - 35	25 - 55
4,8	0 - 5	0 - 10

MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR SAMPLE 2

(SNI 03-1968-1990)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Kerikil	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	175	3,50	3,50	96,50
10	2716	54,33	57,83	42,17
4,8	2011	40,23	98,06	1,94
2,4	54	1,08	99,14	0,86
1,2	3	0,06	99,20	0,80
0,6	0	0	99,20	0,80
0,3	0	0	99,20	0,80
0,15	0	0	99,20	0,80
Sisa	40	0,80	100	0
Jumlah	**4999**	**100**	**655,33**	

Modulus Halus Butir $= \frac{655,33}{100}$

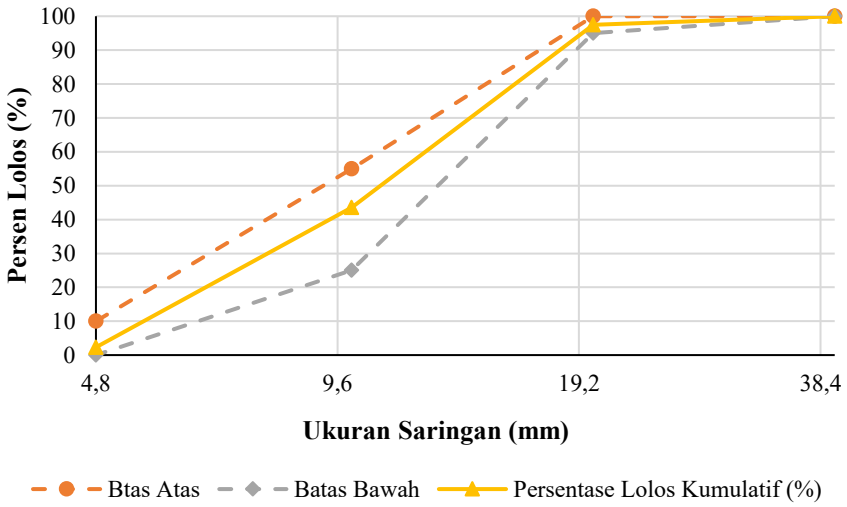
= 6,55

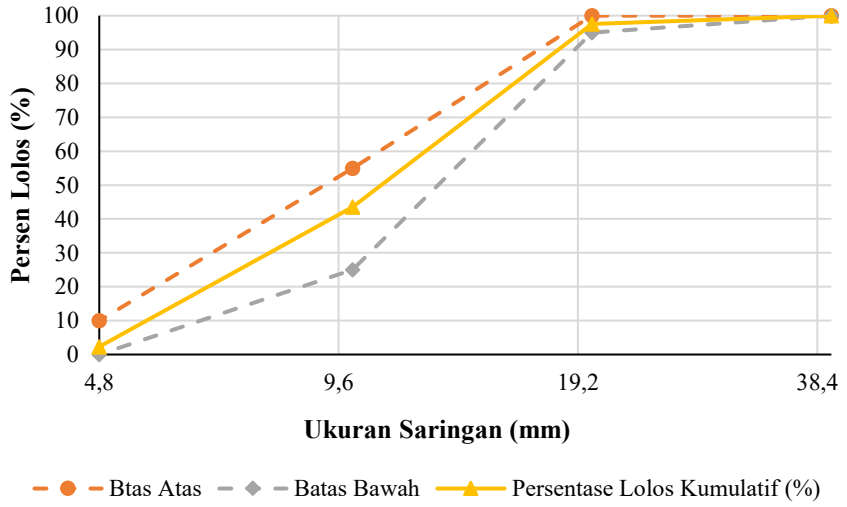
Lolos Saringan (mm)	Persen Butiran Agregat Lolos Saringan	
	40 mm	**20 mm**
40	95 - 100	100
20	30 - 70	95 - 100
10	10 - 35	25 - 55
4,8	0 - 5	0 - 10

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR

(SNI 03-1968-1990)

Sampel	Ukuran Butir Maksimum
1	20 mm
2	20 mm





PEMERIKSAAN BERAT VOLUME GEMBUR DAN PADAT AGREGAT HALUS

(SNI 03-4804-1998)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	5 Desember 2024
Asal Kerikil	Progo
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Pemeriksaan: Berat Volume Gembur

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	17618	17215	17416,5
Berat agregat (W3), gram	6889	7138	7013,5
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,30	1,29	1,30

Pemeriksaan: Berat Volume Padat

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat tabung (W1), gram	10729	10077	10403
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	18334	17850	18092
Berat agregat (W3), gram	7605	7773	7689
Diameter tabung (d), cm	15	15,3	15,15
Tinggi tabung (t), cm	30	30	30
Volume tabung (V), gram	5301,44	5515,62	5408,53
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm3	1,43	1,41	1,42

Lampiran 3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Campuran Beton

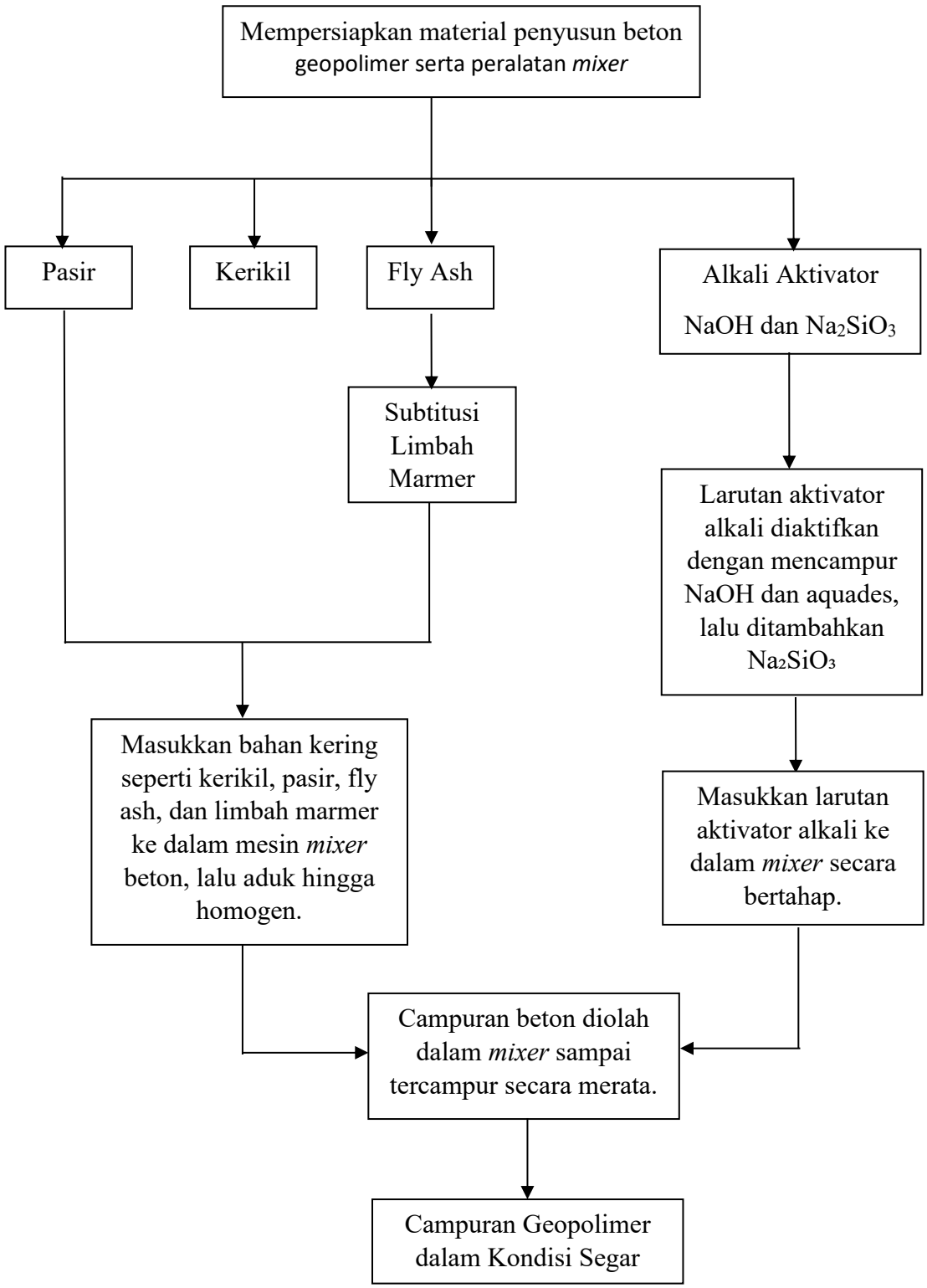
No	Uraian	Nilai	Satuan
1	Kuat tekan beton yang disyaratkan	25	Mpa
2	Standar Deviasi	-	-
3	Nilai Tambah / Margin (M)	12	Mpa
4	Kuat tekan beton rerata yang ditargetkan	37	
5	Jenis Semen	Tipe I	
6	Jenis Agregat Kasar	Batu Pecah	
	Jenis Agregat Halus	Pasir	
7	Faktor air semen bebas (Fas)	0,5	
	Faktor air semen maksimum	0,6	
8	FAS digunakan	0,5	
9	Slump	60-180	mm
10	Ukuran agregat maksimum	20	mm
11	Kadar air bebas	225	Kg/m^3
12	kadar semen	450,00	
13	kadar semen maksimum	-	
14	Kadar semen minimum	275	Kg/m^3
15	Kadar semen digunakan	450,00	Kg/m^3
16	Fas disesuaikan	0,5	
17	Susunan besar butir agregat halus	Gradasi II	
18	Berat jenis agregat kasar (SSD)	2,59	
	Berat jenis agregat halus (SSD)	2,48	
19	Persen Agregat Halus	41,5	%
20	Persen Agregat Kasar	58,5	%
21	Berat jenis relatif agregat gabungan (SSD)	2,54	
22	Berat isi Beton	2287,5	Kg/m^3
23	Kadar agregat gabungan	1612,50	Kg/m^3
24	Kadar agregat halus	669,19	Kg/m^3
25	Kadar agregat kasar	943,31	Kg/m^3
26	kadar semen dengan angka penyususstan	562,50	Kg/m^3
27	kadar agregat halus dengan angka penyususstan	836,48	Kg/m^3
28	Kadar agregat kasar dengan angka penyusutan	1179,14	Kg/m^3
29	kadar air dengan angka penyusutan	281,25	Kg/m^3

Perencanaan Beton Geopolimer

Proporsi Campuran Beton Geopolimer per 1 m^3			
Fly Ash (kg/m^3)	Alkali Aktivator (kg/m^3)	Agregat Halus (kg/m^3)	Agregat Kasar (kg/m^3)
450,00	225	669,1875	943,3125

Proporsi Campuran Beton Geopolimer per 1 m^3 dengan Angka Penyusutan			
Fly Ash (kg/m^3)	Alkali Aktivator (kg/m^3)	Agregat Halus (kg/m^3)	Agregat Kasar (kg/m^3)
562,50	281,25	836,48	1179,14

Lampiran 4 Rangkaian Proses dalam Pengolahan Beton Geopolimer





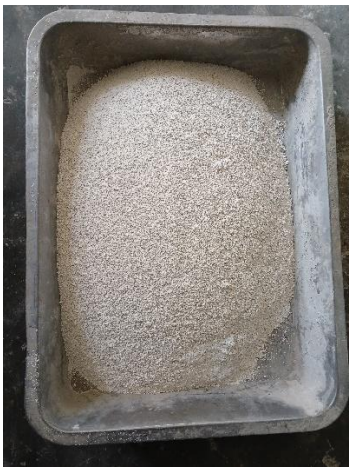
Gambar L-4.1 Pasir



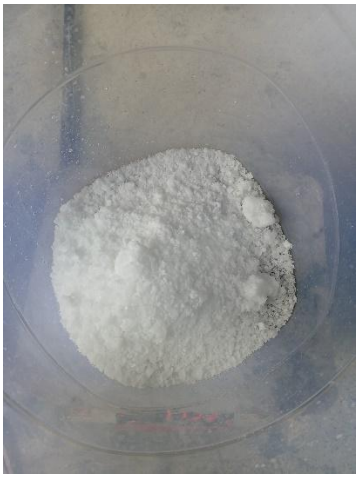
Gambar L-4.2 Kerikil



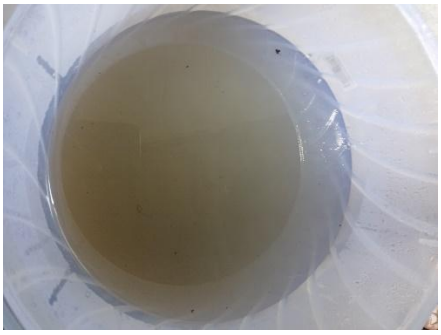
Gambar L-4.3 *Fly Ash*



Gambar L-4.4 Limbah Marmer



Gambar L-4.5 Natrium Hidroksida (NaOH)



Gambar L-4.5 Natrium Silikat (Na_2SiO_3)



Gambar L-4.6 Campuran Alkali Aktivator



Gambar L-4.7 Aquades



Gambar L-4.8 Pencampuran Material Beton Geopolimer



Gambar L-4.9 Uji *Slump*



Gambar L-4.10 Beton Geopolimer dalam Begisting



Gambar L-4.11 Perawatan Beton Geopolimer dalam Oven



Gambar L-4.12 Benda Uji Beton Geopolimer



Gambar L-4.13 Pemasangan Lapisan Caping pada Beton Geopolimer



Gambar L-4.14 Pengujian Modulus Elastisitas dan Kuat Tekan Beton Geopolimer



Gambar L-4.15 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer



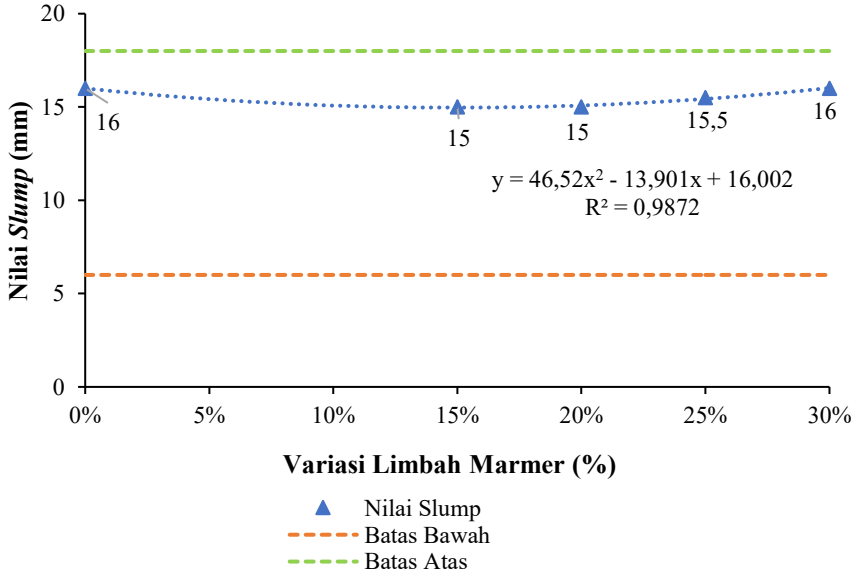
Gambar L-4.15 Hasil Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer

Lampiran 5 Rekapitulasi Pengujian Workability pada Beton Geopolimer

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	3 - 14 Februari 2025
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Benda Uji	Variasi Limbah Marmer (%)	Tinggi *Slump* (cm)	Keterangan Slump (cm)	Keterangan
BN	-	13,5	6 - 18	Memenuhi
BGLM0	0%	16	6 - 18	Memenuhi
BGLM15	15%	15	6 - 18	Memenuhi
BGLM20	20%	15	6 - 18	Memenuhi
BGLM25	25%	15,6	6 - 18	Memenuhi
BGLM30	30%	16	6 - 18	Memenuhi

GRAFIK NILAI SLUMP



Lampiran 6 Rekapitulasi Pengujian Kuat Tekan pada Beton Geopolimer

LAPORAN PENGAMATAN UJI KUAT TEKAN SILINDER BETON

(SNI 1974-2011)

Nama Peneliti	Kurniawan Nur Razaq
NIM	20511274
Tanggal Pengujian	3 - 14 Maret 2025
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Kode Benda Uji		Diameter Benda Uji		Luas Penampang (mm2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (Mpa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)			
BN	1	151,233	304,533	17963,251	484400	26,966
	2	152,167	304,867	18185,654	474000	26,065
	3	151,833	304,600	18106,067	464800	25,671
BGLM0	1	152,400	303,867	18241,469	468800	25,700
	2	151,600	305,267	18050,460	456100	25,268
	3	151,167	303,200	17947,417	447100	24,912
BGLM15	1	152,333	304,200	18225,513	825000	45,266
	2	150,667	304,367	17828,887	798200	44,770
	3	152,700	305,700	18313,357	782500	42,728
BGLM20	1	151,567	302,200	18042,524	730000	40,460
	2	150,867	304,200	17876,252	710000	39,717
	3	151,633	303,233	18058,399	695000	38,486
BGLM25	1	150,633	305,033	17820,999	608000	34,117
	2	152,933	303,433	18369,367	590000	32,119
	3	153,300	305,133	18457,556	575000	31,153
BGLM30	1	150,500	302,300	17789,465	473150	26,597
	2	151,467	302,300	18018,723	459800	25,518
	3	153,700	303,133	18554,003	448600	24,178

Lampiran 7 Rekapitulasi Pengujian Modulus Elastisitas pada Beton Geopolimer

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER

BETON NORMAL SAMPEL 1

(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	1	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	26,966	Mpa
Diameter	151,233	mm
Tinggi	304,533	mm
Luas Penampang	17963,251	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

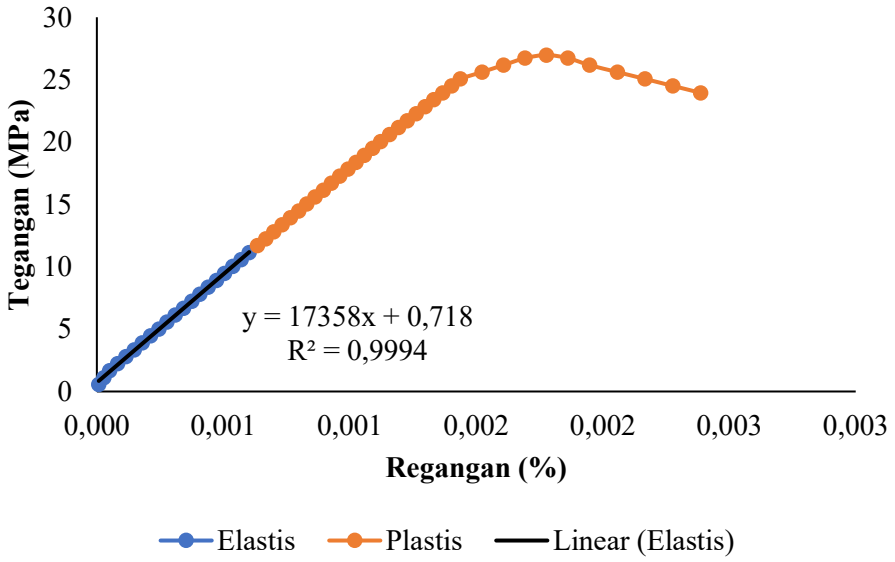
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	3	0,002	0,557	0,008	0,00001
20	20000	11	0,006	1,113	0,028	0,00003
30	30000	20	0,010	1,670	0,050	0,00005
40	40000	33	0,017	2,227	0,083	0,00008
50	50000	46	0,023	2,783	0,115	0,00012
60	60000	59	0,030	3,340	0,148	0,00015
70	70000	72	0,036	3,897	0,180	0,00018
80	80000	85	0,043	4,454	0,213	0,00021
90	90000	98	0,049	5,010	0,245	0,00025
100	100000	111	0,056	5,567	0,278	0,00028
110	110000	124	0,062	6,124	0,310	0,00031
120	120000	137	0,069	6,680	0,343	0,00034
130	130000	150	0,075	7,237	0,375	0,00038
140	140000	163	0,082	7,794	0,408	0,00041
150	150000	176	0,088	8,350	0,440	0,00044

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%) kN
kN	N					
160	160000	189	0,095	8,907	0,473	0,00047
170	170000	202	0,101	9,464	0,505	0,00051
180	180000	215	0,108	10,020	0,538	0,00054
190	190000	228	0,114	10,577	0,570	0,00057
200	200000	241	0,121	11,134	0,603	0,00060
210	210000	254	0,127	11,691	0,635	0,00064
220	220000	267	0,134	12,247	0,668	0,00067
230	230000	280	0,140	12,804	0,700	0,00070
240	240000	293	0,147	13,361	0,733	0,00073
250	250000	306	0,153	13,917	0,765	0,00077
260	260000	319	0,160	14,474	0,798	0,00080
270	270000	332	0,166	15,031	0,830	0,00083
280	280000	345	0,173	15,587	0,863	0,00086
290	290000	358	0,179	16,144	0,895	0,00090
300	300000	371	0,186	16,701	0,928	0,00093
310	310000	384	0,192	17,257	0,960	0,00096
320	320000	397	0,199	17,814	0,993	0,00099
330	330000	410	0,205	18,371	1,025	0,00103
340	340000	423	0,212	18,928	1,058	0,00106
350	350000	436	0,218	19,484	1,090	0,00109
360	360000	449	0,225	20,041	1,123	0,00112
370	370000	463	0,232	20,598	1,158	0,00116
380	380000	477	0,239	21,154	1,193	0,00119
390	390000	491	0,246	21,711	1,228	0,00123
400	400000	505	0,253	22,268	1,263	0,00126
410	410000	519	0,260	22,824	1,298	0,00130
420	420000	533	0,267	23,381	1,333	0,00133
430	430000	547	0,274	23,938	1,368	0,00137
440	440000	561	0,281	24,494	1,403	0,00140
450	450000	575	0,288	25,051	1,438	0,00144
460	460000	609	0,305	25,608	1,523	0,00152
470	470000	643	0,322	26,165	1,608	0,00161
480	480000	677	0,339	26,721	1,693	0,00169
484,4	484400	711	0,356	26,966	1,778	0,00178

Beban (P)		Pembacaan Dial, ΔL'	ΔL (mm)	Tegangan, σ	Regangan, ε	Regangan (%)
kN	N					
480	480000	745	0,373	26,721	1,863	0,00186
470	470000	779	0,390	26,165	1,948	0,00195
460	460000	823	0,412	25,608	2,058	0,00206
450	450000	867	0,434	25,051	2,168	0,00217
440	440000	911	0,456	24,494	2,278	0,00228
430	430000	955	0,478	23,938	2,388	0,00239

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON NORMAL SAMPEL 1

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17358,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	17128,988 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	24406,610 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17764,896 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER

BETON NORMAL SAMPEL 2

(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	2	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	26,065	Mpa
Diameter	152,167	mm
Tinggi	304,867	mm
Luas Penampang	18185,654	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

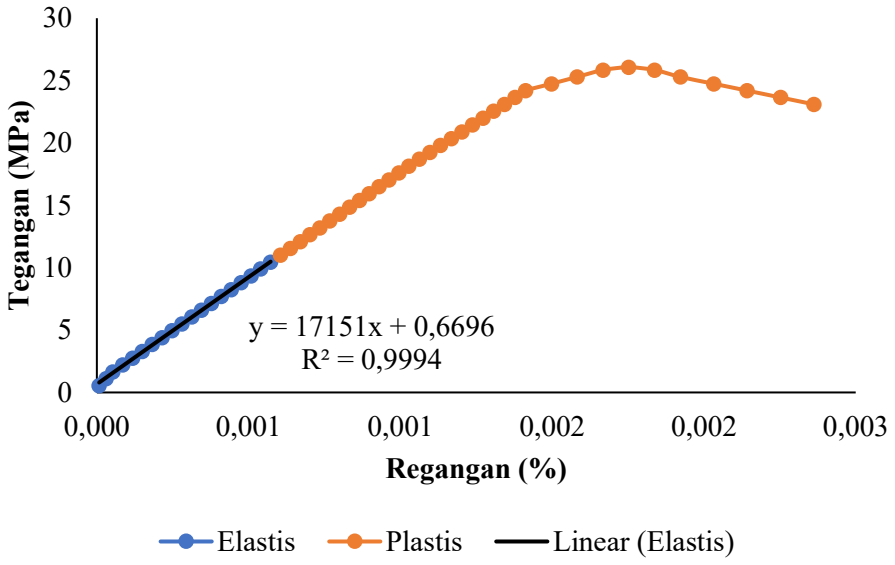
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	3	0,002	0,550	0,008	0,00001
20	20000	12	0,006	1,100	0,030	0,00003
30	30000	21	0,011	1,650	0,053	0,00005
40	40000	34	0,017	2,200	0,085	0,00009
50	50000	47	0,024	2,749	0,118	0,00012
60	60000	60	0,030	3,299	0,150	0,00015
70	70000	73	0,037	3,849	0,183	0,00018
80	80000	86	0,043	4,399	0,215	0,00022
90	90000	99	0,050	4,949	0,248	0,00025
100	100000	112	0,056	5,499	0,280	0,00028
110	110000	125	0,063	6,049	0,313	0,00031
120	120000	138	0,069	6,599	0,345	0,00035
130	130000	151	0,076	7,148	0,378	0,00038
140	140000	164	0,082	7,698	0,410	0,00041
150	150000	177	0,089	8,248	0,443	0,00044
160	160000	190	0,095	8,798	0,475	0,00048
170	170000	203	0,102	9,348	0,508	0,00051

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	216	0,108	9,898	0,540	0,00054
190	190000	229	0,115	10,448	0,573	0,00057
200	200000	242	0,121	10,998	0,605	0,00061
210	210000	255	0,128	11,548	0,638	0,00064
220	220000	268	0,134	12,097	0,670	0,00067
230	230000	281	0,141	12,647	0,703	0,00070
240	240000	294	0,147	13,197	0,735	0,00074
250	250000	307	0,154	13,747	0,768	0,00077
260	260000	320	0,160	14,297	0,800	0,00080
270	270000	333	0,167	14,847	0,833	0,00083
280	280000	346	0,173	15,397	0,865	0,00087
290	290000	359	0,180	15,947	0,898	0,00090
300	300000	372	0,186	16,497	0,930	0,00093
310	310000	385	0,193	17,046	0,963	0,00096
320	320000	398	0,199	17,596	0,995	0,00100
330	330000	411	0,206	18,146	1,028	0,00103
340	340000	425	0,213	18,696	1,063	0,00106
350	350000	439	0,220	19,246	1,098	0,00110
360	360000	453	0,227	19,796	1,133	0,00113
370	370000	467	0,234	20,346	1,168	0,00117
380	380000	481	0,241	20,896	1,203	0,00120
390	390000	495	0,248	21,445	1,238	0,00124
400	400000	509	0,255	21,995	1,273	0,00127
410	410000	523	0,262	22,545	1,308	0,00131
420	420000	537	0,269	23,095	1,343	0,00134
430	430000	551	0,276	23,645	1,378	0,00138
440	440000	565	0,283	24,195	1,413	0,00141
450	450000	599	0,300	24,745	1,498	0,00150
460	460000	633	0,317	25,295	1,583	0,00158
470	470000	667	0,334	25,845	1,668	0,00167
474	474000	701	0,351	26,065	1,753	0,00175
470	470000	735	0,368	25,845	1,838	0,00184
460	460000	769	0,385	25,295	1,923	0,00192

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
450	450000	813	0,407	24,745	2,033	0,00203
440	440000	857	0,429	24,195	2,143	0,00214
430	430000	901	0,451	23,645	2,253	0,00225
420	420000	945	0,473	23,095	2,363	0,00236

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON NORMAL SAMPEL 2

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17151,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	16838,350 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	23995,100 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17465,369 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER

BETON NORMAL SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	3	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	25,671	Mpa
Diameter	151,833	mm
Tinggi	304,600	mm
Luas Penampang	18106,067	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

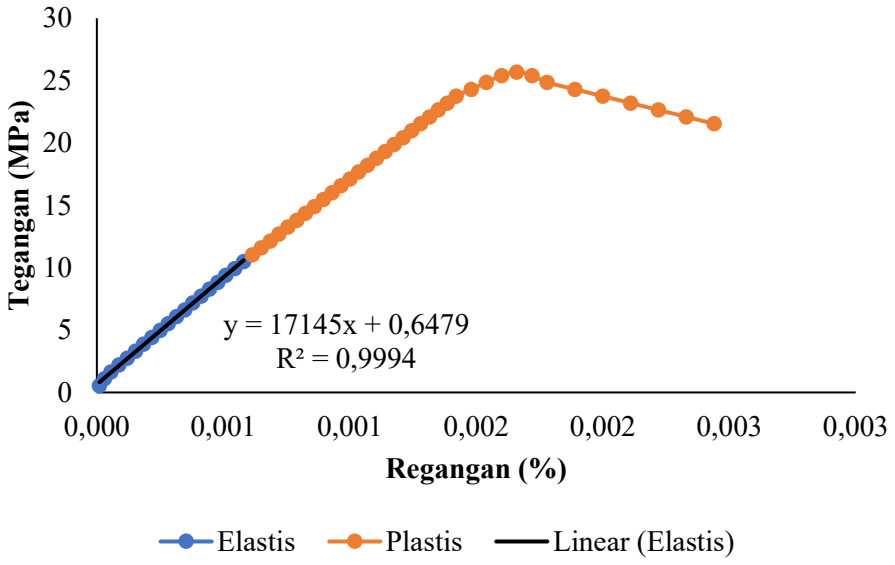
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	4	0,002	0,552	0,010	0,00001
20	20000	12	0,006	1,105	0,030	0,00003
30	30000	22	0,011	1,657	0,055	0,00006
40	40000	35	0,018	2,209	0,088	0,00009
50	50000	48	0,024	2,762	0,120	0,00012
60	60000	61	0,031	3,314	0,153	0,00015
70	70000	74	0,037	3,866	0,185	0,00019
80	80000	87	0,044	4,418	0,218	0,00022
90	90000	100	0,050	4,971	0,250	0,00025
100	100000	113	0,057	5,523	0,283	0,00028
110	110000	126	0,063	6,075	0,315	0,00032
120	120000	139	0,070	6,628	0,348	0,00035
130	130000	152	0,076	7,180	0,380	0,00038
140	140000	165	0,083	7,732	0,413	0,00041
150	150000	178	0,089	8,285	0,445	0,00045
160	160000	191	0,096	8,837	0,478	0,00048
170	170000	204	0,102	9,389	0,510	0,00051

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	218	0,109	9,941	0,545	0,00055
190	190000	232	0,116	10,494	0,580	0,00058
200	200000	246	0,123	11,046	0,615	0,00062
210	210000	260	0,130	11,598	0,650	0,00065
220	220000	274	0,137	12,151	0,685	0,00069
230	230000	288	0,144	12,703	0,720	0,00072
240	240000	302	0,151	13,255	0,755	0,00076
250	250000	316	0,158	13,808	0,790	0,00079
260	260000	330	0,165	14,360	0,825	0,00083
270	270000	344	0,172	14,912	0,860	0,00086
280	280000	358	0,179	15,464	0,895	0,00090
290	290000	372	0,186	16,017	0,930	0,00093
300	300000	386	0,193	16,569	0,965	0,00097
310	310000	400	0,200	17,121	1,000	0,00100
320	320000	414	0,207	17,674	1,035	0,00104
330	330000	428	0,214	18,226	1,070	0,00107
340	340000	442	0,221	18,778	1,105	0,00111
350	350000	456	0,228	19,331	1,140	0,00114
360	360000	470	0,235	19,883	1,175	0,00118
370	370000	484	0,242	20,435	1,210	0,00121
380	380000	498	0,249	20,987	1,245	0,00125
390	390000	512	0,256	21,540	1,280	0,00128
400	400000	526	0,263	22,092	1,315	0,00132
410	410000	540	0,270	22,644	1,350	0,00135
420	420000	554	0,277	23,197	1,385	0,00139
430	430000	568	0,284	23,749	1,420	0,00142
440	440000	592	0,296	24,301	1,480	0,00148
450	450000	616	0,308	24,854	1,540	0,00154
460	460000	640	0,320	25,406	1,600	0,00160
464,8	464800	664	0,332	25,671	1,660	0,00166
460	460000	688	0,344	25,406	1,720	0,00172
450	450000	712	0,356	24,854	1,780	0,00178
440	440000	756	0,378	24,301	1,890	0,00189
430	430000	800	0,400	23,749	2,000	0,00200

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
420	420000	844	0,422	23,197	2,110	0,00211
410	410000	888	0,444	22,644	2,220	0,00222
400	400000	932	0,466	22,092	2,330	0,00233
390	390000	976	0,488	21,540	2,440	0,00244

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON NORMAL SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17145,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	16697,972 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	23813,260 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17333,013 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 0% LIMBAH MARMER SAMPEL 1
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	1	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	25,700	Mpa
Diameter	152,400	mm
Tinggi	303,867	mm
Luas Penampang	18241,469	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

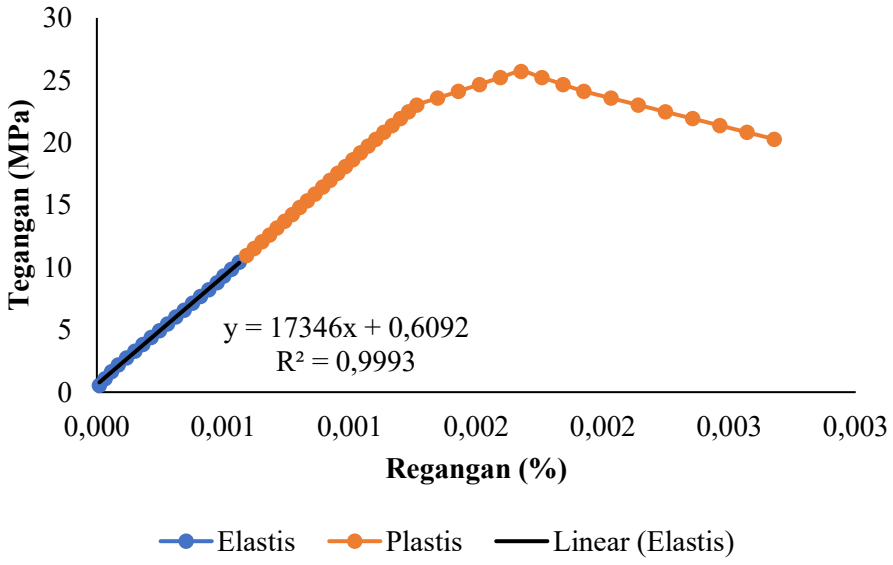
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	4	0,002	0,548	0,010	0,00001
20	20000	13	0,007	1,096	0,033	0,00003
30	30000	23	0,012	1,645	0,058	0,00006
40	40000	34	0,017	2,193	0,085	0,00009
50	50000	47	0,024	2,741	0,118	0,00012
60	60000	60	0,030	3,289	0,150	0,00015
70	70000	73	0,037	3,837	0,183	0,00018
80	80000	86	0,043	4,386	0,215	0,00022
90	90000	99	0,050	4,934	0,248	0,00025
100	100000	112	0,056	5,482	0,280	0,00028
110	110000	125	0,063	6,030	0,313	0,00031
120	120000	138	0,069	6,578	0,345	0,00035
130	130000	151	0,076	7,127	0,378	0,00038
140	140000	164	0,082	7,675	0,410	0,00041
150	150000	177	0,089	8,223	0,443	0,00044
160	160000	190	0,095	8,771	0,475	0,00048
170	170000	201	0,101	9,319	0,503	0,00050

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	213	0,107	9,868	0,533	0,00053
190	190000	225	0,113	10,416	0,563	0,00056
200	200000	237	0,119	10,964	0,593	0,00059
210	210000	249	0,125	11,512	0,623	0,00062
220	220000	261	0,131	12,060	0,653	0,00065
230	230000	273	0,137	12,609	0,683	0,00068
240	240000	285	0,143	13,157	0,713	0,00071
250	250000	297	0,149	13,705	0,743	0,00074
260	260000	309	0,155	14,253	0,773	0,00077
270	270000	321	0,161	14,801	0,803	0,00080
280	280000	333	0,167	15,350	0,833	0,00083
290	290000	345	0,173	15,898	0,863	0,00086
300	300000	357	0,179	16,446	0,893	0,00089
310	310000	369	0,185	16,994	0,923	0,00092
320	320000	381	0,191	17,542	0,953	0,00095
330	330000	393	0,197	18,091	0,983	0,00098
340	340000	405	0,203	18,639	1,013	0,00101
350	350000	417	0,209	19,187	1,043	0,00104
360	360000	429	0,215	19,735	1,073	0,00107
370	370000	441	0,221	20,283	1,103	0,00110
380	380000	454	0,227	20,832	1,135	0,00114
390	390000	467	0,234	21,380	1,168	0,00117
400	400000	480	0,240	21,928	1,200	0,00120
410	410000	493	0,247	22,476	1,233	0,00123
420	420000	506	0,253	23,024	1,265	0,00127
430	430000	539	0,270	23,573	1,348	0,00135
440	440000	572	0,286	24,121	1,430	0,00143
450	450000	605	0,303	24,669	1,513	0,00151
460	460000	638	0,319	25,217	1,595	0,00160
468,8	468800	671	0,336	25,700	1,678	0,00168
460	460000	704	0,352	25,217	1,760	0,00176
450	450000	737	0,369	24,669	1,843	0,00184
440	440000	770	0,385	24,121	1,925	0,00193
430	430000	813	0,407	23,573	2,033	0,00203

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
420	420000	856	0,428	23,024	2,140	0,00214
410	410000	899	0,450	22,476	2,248	0,00225
400	400000	942	0,471	21,928	2,355	0,00236
390	390000	985	0,493	21,380	2,463	0,00246
380	380000	1028	0,514	20,832	2,570	0,00257
370	370000	1071	0,536	20,283	2,678	0,00268

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 0% LIMBAH MARMER SAMPEL 1

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17346,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	17097,512 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	23826,582 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17342,710 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 0% LIMBAH MARMER SAMPEL 2
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	2	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	25,268	Mpa
Diameter	151,600	mm
Tinggi	305,267	mm
Luas Penampang	18050,460	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

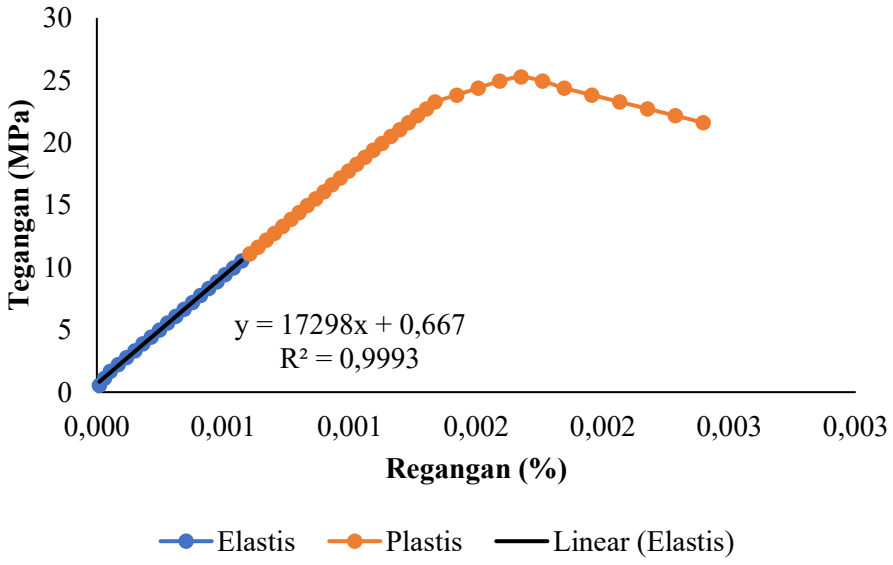
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	4	0,002	0,554	0,010	0,00001
20	20000	12	0,006	1,108	0,030	0,00003
30	30000	21	0,011	1,662	0,053	0,00005
40	40000	34	0,017	2,216	0,085	0,00009
50	50000	47	0,024	2,770	0,118	0,00012
60	60000	60	0,030	3,324	0,150	0,00015
70	70000	73	0,037	3,878	0,183	0,00018
80	80000	86	0,043	4,432	0,215	0,00022
90	90000	99	0,050	4,986	0,248	0,00025
100	100000	112	0,056	5,540	0,280	0,00028
110	110000	125	0,063	6,094	0,313	0,00031
120	120000	138	0,069	6,648	0,345	0,00035
130	130000	151	0,076	7,202	0,378	0,00038
140	140000	164	0,082	7,756	0,410	0,00041
150	150000	177	0,089	8,310	0,443	0,00044
160	160000	190	0,095	8,864	0,475	0,00048
170	170000	203	0,102	9,418	0,508	0,00051

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	216	0,108	9,972	0,540	0,00054
190	190000	229	0,115	10,526	0,573	0,00057
200	200000	242	0,121	11,080	0,605	0,00061
210	210000	255	0,128	11,634	0,638	0,00064
220	220000	268	0,134	12,188	0,670	0,00067
230	230000	281	0,141	12,742	0,703	0,00070
240	240000	294	0,147	13,296	0,735	0,00074
250	250000	307	0,154	13,850	0,768	0,00077
260	260000	320	0,160	14,404	0,800	0,00080
270	270000	333	0,167	14,958	0,833	0,00083
280	280000	346	0,173	15,512	0,865	0,00087
290	290000	359	0,180	16,066	0,898	0,00090
300	300000	372	0,186	16,620	0,930	0,00093
310	310000	385	0,193	17,174	0,963	0,00096
320	320000	398	0,199	17,728	0,995	0,00100
330	330000	411	0,206	18,282	1,028	0,00103
340	340000	424	0,212	18,836	1,060	0,00106
350	350000	437	0,219	19,390	1,093	0,00109
360	360000	451	0,226	19,944	1,128	0,00113
370	370000	465	0,233	20,498	1,163	0,00116
380	380000	479	0,240	21,052	1,198	0,00120
390	390000	493	0,247	21,606	1,233	0,00123
400	400000	507	0,254	22,160	1,268	0,00127
410	410000	521	0,261	22,714	1,303	0,00130
420	420000	535	0,268	23,268	1,338	0,00134
430	430000	569	0,285	23,822	1,423	0,00142
440	440000	603	0,302	24,376	1,508	0,00151
450	450000	637	0,319	24,930	1,593	0,00159
456,1	456100	671	0,336	25,268	1,678	0,00168
450	450000	705	0,353	24,930	1,763	0,00176
440	440000	739	0,370	24,376	1,848	0,00185
430	430000	783	0,392	23,822	1,958	0,00196
420	420000	827	0,414	23,268	2,068	0,00207
410	410000	871	0,436	22,714	2,178	0,00218

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
400	400000	915	0,458	22,160	2,288	0,00229
390	390000	959	0,480	21,606	2,398	0,00240

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 0% LIMBAH MARMER SAMPEL 2

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17298,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	16960,645 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	23625,649 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17196,457 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER

BETON GEOPOLIMER 0% LIMBAH MARMER SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	3	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	24,912	Mpa
Diameter	151,167	mm
Tinggi	303,200	mm
Luas Penampang	17947,417	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

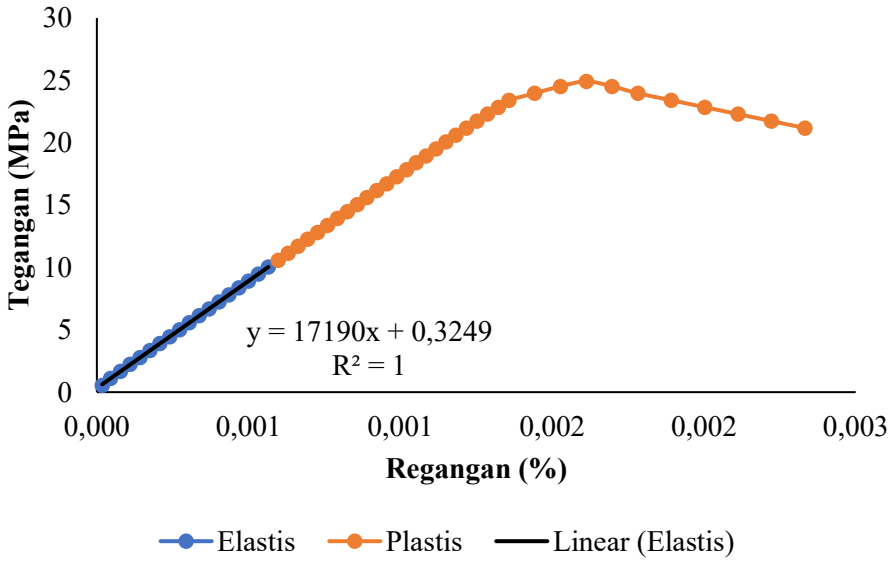
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	7	0,004	0,557	0,018	0,00002
20	20000	18	0,009	1,114	0,045	0,00005
30	30000	31	0,016	1,672	0,078	0,00008
40	40000	44	0,022	2,229	0,110	0,00011
50	50000	57	0,029	2,786	0,143	0,00014
60	60000	70	0,035	3,343	0,175	0,00018
70	70000	83	0,042	3,900	0,208	0,00021
80	80000	96	0,048	4,457	0,240	0,00024
90	90000	109	0,055	5,015	0,273	0,00027
100	100000	122	0,061	5,572	0,305	0,00031
110	110000	135	0,068	6,129	0,338	0,00034
120	120000	148	0,074	6,686	0,370	0,00037
130	130000	161	0,081	7,243	0,403	0,00040
140	140000	174	0,087	7,801	0,435	0,00044
150	150000	187	0,094	8,358	0,468	0,00047
160	160000	200	0,100	8,915	0,500	0,00050
170	170000	213	0,107	9,472	0,533	0,00053

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	226	0,113	10,029	0,565	0,00057
190	190000	239	0,120	10,586	0,598	0,00060
200	200000	252	0,126	11,144	0,630	0,00063
210	210000	265	0,133	11,701	0,663	0,00066
220	220000	278	0,139	12,258	0,695	0,00070
230	230000	291	0,146	12,815	0,728	0,00073
240	240000	304	0,152	13,372	0,760	0,00076
250	250000	317	0,159	13,930	0,793	0,00079
260	260000	330	0,165	14,487	0,825	0,00083
270	270000	343	0,172	15,044	0,858	0,00086
280	280000	356	0,178	15,601	0,890	0,00089
290	290000	369	0,185	16,158	0,923	0,00092
300	300000	382	0,191	16,715	0,955	0,00096
310	310000	395	0,198	17,273	0,988	0,00099
320	320000	408	0,204	17,830	1,020	0,00102
330	330000	421	0,211	18,387	1,053	0,00105
340	340000	434	0,217	18,944	1,085	0,00109
350	350000	447	0,224	19,501	1,118	0,00112
360	360000	460	0,230	20,059	1,150	0,00115
370	370000	473	0,237	20,616	1,183	0,00118
380	380000	487	0,244	21,173	1,218	0,00122
390	390000	501	0,251	21,730	1,253	0,00125
400	400000	515	0,258	22,287	1,288	0,00129
410	410000	529	0,265	22,845	1,323	0,00132
420	420000	543	0,272	23,402	1,358	0,00136
430	430000	577	0,289	23,959	1,443	0,00144
440	440000	611	0,306	24,516	1,528	0,00153
447,1	447100	645	0,323	24,912	1,613	0,00161
440	440000	679	0,340	24,516	1,698	0,00170
430	430000	713	0,357	23,959	1,783	0,00178
420	420000	757	0,379	23,402	1,893	0,00189
410	410000	801	0,401	22,845	2,003	0,00200
400	400000	845	0,423	22,287	2,113	0,00211

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
390	390000	889	0,445	21,730	2,223	0,00222
380	380000	933	0,467	21,173	2,333	0,00233

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 0% LIMBAH MARMER SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17190,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	17311,775 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	23458,445 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17074,753 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 15% LIMBAH MARMER SAMPEL 1
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	1	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	45,266	Mpa
Diameter	152,333	mm
Tinggi	304,200	mm
Luas Penampang	18225,513	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	7	0,0035	0,549	0,018	0,00002
20	20000	20	0,010	1,097	0,050	0,00005
30	30000	31	0,016	1,646	0,078	0,00008
40	40000	40	0,020	2,195	0,100	0,00010
50	50000	48	0,024	2,743	0,120	0,00012
60	60000	56	0,028	3,292	0,140	0,00014
70	70000	64	0,032	3,841	0,160	0,00016
80	80000	72	0,036	4,389	0,180	0,00018
90	90000	80	0,040	4,938	0,200	0,00020
100	100000	88	0,044	5,487	0,220	0,00022
110	110000	96	0,048	6,035	0,240	0,00024
120	120000	104	0,052	6,584	0,260	0,00026
130	130000	112	0,056	7,133	0,280	0,00028
140	140000	120	0,060	7,682	0,300	0,00030
150	150000	128	0,064	8,230	0,320	0,00032
160	160000	136	0,068	8,779	0,340	0,00034
170	170000	144	0,072	9,328	0,360	0,00036

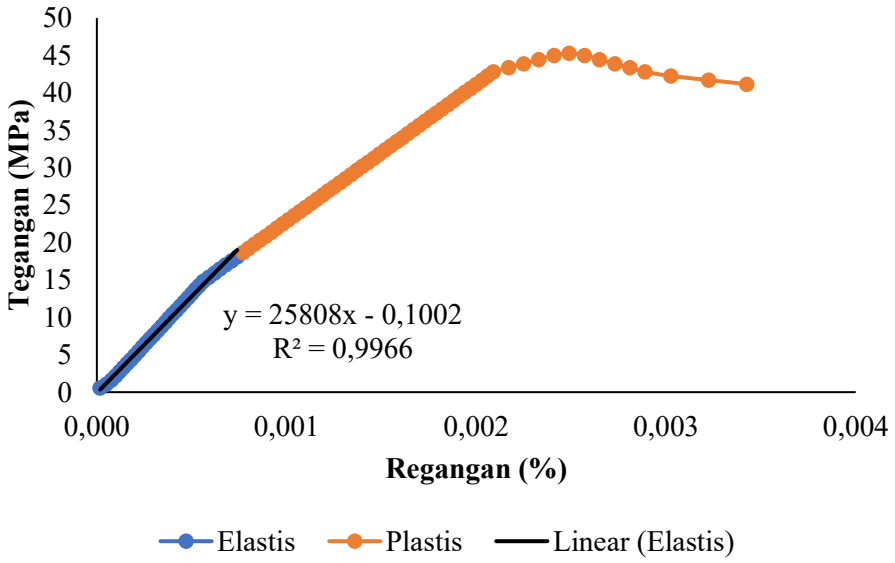
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	152	0,076	9,876	0,380	0,00038
190	190000	160	0,080	10,425	0,400	0,00040
200	200000	168	0,084	10,974	0,420	0,00042
210	210000	176	0,088	11,522	0,440	0,00044
220	220000	184	0,092	12,071	0,460	0,00046
230	230000	192	0,096	12,620	0,480	0,00048
240	240000	200	0,100	13,168	0,500	0,00050
250	250000	208	0,104	13,717	0,520	0,00052
260	260000	216	0,108	14,266	0,540	0,00054
270	270000	224	0,112	14,814	0,560	0,00056
280	280000	236	0,118	15,363	0,590	0,00059
290	290000	248	0,124	15,912	0,620	0,00062
300	300000	260	0,130	16,460	0,650	0,00065
310	310000	272	0,136	17,009	0,680	0,00068
320	320000	284	0,142	17,558	0,710	0,00071
330	330000	296	0,148	18,106	0,740	0,00074
340	340000	308	0,154	18,655	0,770	0,00077
350	350000	320	0,160	19,204	0,800	0,00080
360	360000	332	0,166	19,753	0,830	0,00083
370	370000	344	0,172	20,301	0,860	0,00086
380	380000	356	0,178	20,850	0,890	0,00089
390	390000	368	0,184	21,399	0,920	0,00092
400	400000	380	0,190	21,947	0,950	0,00095
410	410000	392	0,196	22,496	0,980	0,00098
420	420000	404	0,202	23,045	1,010	0,00101
430	430000	416	0,208	23,593	1,040	0,00104
440	440000	428	0,214	24,142	1,070	0,00107
450	450000	440	0,220	24,691	1,100	0,00110
460	460000	452	0,226	25,239	1,130	0,00113
470	470000	464	0,232	25,788	1,160	0,00116
480	480000	476	0,238	26,337	1,190	0,00119
490	490000	488	0,244	26,885	1,220	0,00122
500	500000	500	0,250	27,434	1,250	0,00125
510	510000	512	0,256	27,983	1,280	0,00128

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	524	0,262	28,531	1,310	0,00131
530	530000	536	0,268	29,080	1,340	0,00134
540	540000	548	0,274	29,629	1,370	0,00137
550	550000	560	0,280	30,177	1,400	0,00140
560	560000	572	0,286	30,726	1,430	0,00143
570	570000	584	0,292	31,275	1,460	0,00146
580	580000	596	0,298	31,824	1,490	0,00149
590	590000	608	0,304	32,372	1,520	0,00152
600	600000	620	0,310	32,921	1,550	0,00155
610	610000	632	0,316	33,470	1,580	0,00158
620	620000	644	0,322	34,018	1,610	0,00161
630	630000	656	0,328	34,567	1,640	0,00164
640	640000	668	0,334	35,116	1,670	0,00167
650	650000	680	0,340	35,664	1,700	0,00170
660	660000	692	0,346	36,213	1,730	0,00173
670	670000	704	0,352	36,762	1,760	0,00176
680	680000	716	0,358	37,310	1,790	0,00179
690	690000	728	0,364	37,859	1,820	0,00182
700	700000	740	0,370	38,408	1,850	0,00185
710	710000	752	0,376	38,956	1,880	0,00188
720	720000	764	0,382	39,505	1,910	0,00191
730	730000	776	0,388	40,054	1,940	0,00194
740	740000	788	0,394	40,602	1,970	0,00197
750	750000	800	0,400	41,151	2,000	0,00200
760	760000	812	0,406	41,700	2,030	0,00203
770	770000	824	0,412	42,248	2,060	0,00206
780	780000	836	0,418	42,797	2,090	0,00209
790	790000	868	0,434	43,346	2,170	0,00217
800	800000	900	0,450	43,895	2,250	0,00225
810	810000	932	0,466	44,443	2,330	0,00233
820	820000	964	0,482	44,992	2,410	0,00241
825	825000	996	0,498	45,266	2,490	0,00249
820	820000	1028	0,514	44,992	2,570	0,00257
810	810000	1060	0,530	44,443	2,650	0,00265

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
800	800000	1092	0,546	43,895	2,730	0,00273
790	790000	1124	0,562	43,346	2,810	0,00281
780	780000	1156	0,578	42,797	2,890	0,00289
770	770000	1210	0,605	42,248	3,025	0,00303
760	760000	1290	0,645	41,700	3,225	0,00323
750	750000	1370	0,685	41,151	3,425	0,00343

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 15% LIMBAH MARMER SAMPEL 1

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	25808,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	24650,903 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	31621,680 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	23016,547 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 15% LIMBAH MARMER SAMPEL 2
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	2	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	44,770	Mpa
Diameter	150,667	mm
Tinggi	304,367	mm
Luas Penampang	17828,887	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	6	0,003	0,561	0,015	0,00002
20	20000	19	0,010	1,122	0,048	0,00005
30	30000	33	0,017	1,683	0,083	0,00008
40	40000	42	0,021	2,244	0,105	0,00011
50	50000	51	0,026	2,804	0,128	0,00013
60	60000	60	0,030	3,365	0,150	0,00015
70	70000	69	0,035	3,926	0,173	0,00017
80	80000	78	0,039	4,487	0,195	0,00020
90	90000	87	0,044	5,048	0,218	0,00022
100	100000	96	0,048	5,609	0,240	0,00024
110	110000	105	0,053	6,170	0,263	0,00026
120	120000	114	0,057	6,731	0,285	0,00029
130	130000	123	0,062	7,292	0,308	0,00031
140	140000	132	0,066	7,852	0,330	0,00033
150	150000	141	0,071	8,413	0,353	0,00035
160	160000	150	0,075	8,974	0,375	0,00038
170	170000	159	0,080	9,535	0,398	0,00040

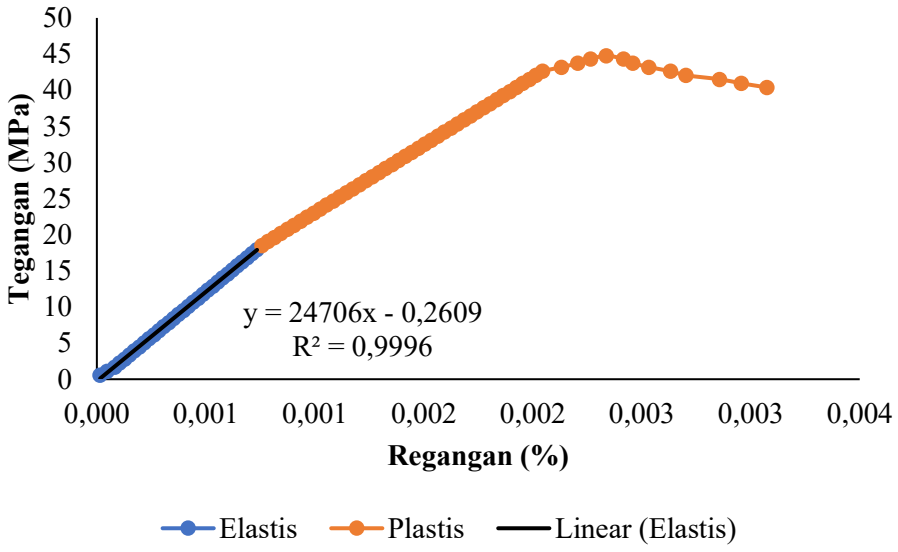
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	168	0,084	10,096	0,420	0,00042
190	190000	177	0,089	10,657	0,443	0,00044
200	200000	186	0,093	11,218	0,465	0,00047
210	210000	195	0,098	11,779	0,488	0,00049
220	220000	204	0,102	12,340	0,510	0,00051
230	230000	213	0,107	12,900	0,533	0,00053
240	240000	222	0,111	13,461	0,555	0,00056
250	250000	231	0,116	14,022	0,578	0,00058
260	260000	240	0,120	14,583	0,600	0,00060
270	270000	249	0,125	15,144	0,623	0,00062
280	280000	258	0,129	15,705	0,645	0,00065
290	290000	267	0,134	16,266	0,668	0,00067
300	300000	276	0,138	16,827	0,690	0,00069
310	310000	285	0,143	17,388	0,713	0,00071
320	320000	294	0,147	17,948	0,735	0,00074
330	330000	303	0,152	18,509	0,758	0,00076
340	340000	314	0,157	19,070	0,785	0,00079
350	350000	326	0,163	19,631	0,815	0,00082
360	360000	338	0,169	20,192	0,845	0,00085
370	370000	350	0,175	20,753	0,875	0,00088
380	380000	362	0,181	21,314	0,905	0,00091
390	390000	374	0,187	21,875	0,935	0,00094
400	400000	386	0,193	22,435	0,965	0,00097
410	410000	398	0,199	22,996	0,995	0,00100
420	420000	410	0,205	23,557	1,025	0,00103
430	430000	422	0,211	24,118	1,055	0,00106
440	440000	434	0,217	24,679	1,085	0,00109
450	450000	446	0,223	25,24	1,115	0,00112
460	460000	458	0,229	25,801	1,145	0,00115
470	470000	470	0,235	26,362	1,175	0,00118
480	480000	482	0,241	26,923	1,205	0,00121
490	490000	494	0,247	27,483	1,235	0,00124
500	500000	506	0,253	28,044	1,265	0,00127
510	510000	518	0,259	28,605	1,295	0,00130

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	530	0,265	29,166	1,325	0,00133
530	530000	542	0,271	29,727	1,355	0,00136
540	540000	554	0,277	30,288	1,385	0,00139
550	550000	566	0,283	30,849	1,415	0,00142
560	560000	578	0,289	31,410	1,445	0,00145
570	570000	590	0,295	31,971	1,475	0,00148
580	580000	602	0,301	32,531	1,505	0,00151
590	590000	614	0,307	33,092	1,535	0,00154
600	600000	626	0,313	33,653	1,565	0,00157
610	610000	638	0,319	34,214	1,595	0,00160
620	620000	650	0,325	34,775	1,625	0,00163
630	630000	662	0,331	35,336	1,655	0,00166
640	640000	674	0,337	35,897	1,685	0,00169
650	650000	686	0,343	36,458	1,715	0,00172
660	660000	698	0,349	37,019	1,745	0,00175
670	670000	710	0,355	37,579	1,775	0,00178
680	680000	722	0,361	38,140	1,805	0,00181
690	690000	734	0,367	38,701	1,835	0,00184
700	700000	746	0,373	39,262	1,865	0,00187
710	710000	758	0,379	39,823	1,895	0,00190
720	720000	770	0,385	40,384	1,925	0,00193
730	730000	782	0,391	40,945	1,955	0,00196
740	740000	794	0,397	41,506	1,985	0,00199
750	750000	806	0,403	42,067	2,015	0,00202
760	760000	818	0,409	42,627	2,045	0,00205
770	770000	853	0,427	43,188	2,133	0,00213
780	780000	883	0,442	43,749	2,208	0,00221
790	790000	906	0,453	44,310	2,265	0,00227
798,2	798200	935	0,468	44,770	2,338	0,00234
790	790000	967	0,484	44,310	2,418	0,00242
780	780000	984	0,492	43,749	2,460	0,00246
770	770000	1013	0,507	43,188	2,533	0,00253
760	760000	1053	0,527	42,627	2,633	0,00263
750	750000	1081	0,541	42,067	2,703	0,00270

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
740	740000	1143	0,572	41,506	2,858	0,00286
730	730000	1183	0,592	40,945	2,958	0,00296
720	720000	1230	0,615	40,384	3,075	0,00308

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 15% LIMBAH MARMER SAMPEL 2

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	24706,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	24563,553 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	31447,896 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	22890,054 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER BETON GEOPOLIMER 15% LIMBAH MARMER SAMPEL 3 (SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	3	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	42,728	Mpa
Diameter	152,700	mm
Tinggi	305,700	mm
Luas Penampang	18313,357	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	6	0,003	0,546	0,015	0,00002
20	20000	20	0,010	1,092	0,050	0,00005
30	30000	31	0,016	1,638	0,078	0,00008
40	40000	40	0,020	2,184	0,100	0,00010
50	50000	49	0,025	2,730	0,123	0,00012
60	60000	58	0,029	3,276	0,145	0,00015
70	70000	67	0,034	3,822	0,168	0,00017
80	80000	76	0,038	4,368	0,190	0,00019
90	90000	85	0,043	4,914	0,213	0,00021
100	100000	94	0,047	5,460	0,235	0,00024
110	110000	103	0,052	6,007	0,258	0,00026
120	120000	112	0,056	6,553	0,280	0,00028
130	130000	121	0,061	7,099	0,303	0,00030
140	140000	130	0,065	7,645	0,325	0,00033
150	150000	139	0,070	8,191	0,348	0,00035
160	160000	148	0,074	8,737	0,370	0,00037
170	170000	157	0,079	9,283	0,393	0,00039

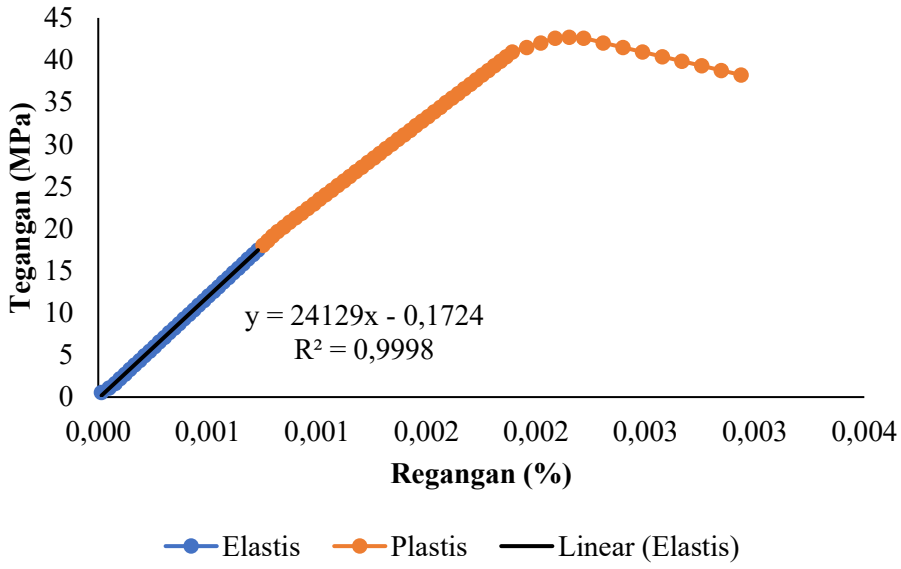
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	166	0,083	9,829	0,415	0,00042
190	190000	175	0,088	10,375	0,438	0,00044
200	200000	184	0,092	10,921	0,460	0,00046
210	210000	193	0,097	11,467	0,483	0,00048
220	220000	202	0,101	12,013	0,505	0,00051
230	230000	211	0,106	12,559	0,528	0,00053
240	240000	220	0,110	13,105	0,550	0,00055
250	250000	229	0,115	13,651	0,573	0,00057
260	260000	238	0,119	14,197	0,595	0,00060
270	270000	247	0,124	14,743	0,618	0,00062
280	280000	256	0,128	15,289	0,640	0,00064
290	290000	265	0,133	15,835	0,663	0,00066
300	300000	274	0,137	16,381	0,685	0,00069
310	310000	283	0,142	16,928	0,708	0,00071
320	320000	292	0,146	17,474	0,730	0,00073
330	330000	301	0,151	18,020	0,753	0,00075
340	340000	310	0,155	18,566	0,775	0,00078
350	350000	319	0,160	19,112	0,798	0,00080
360	360000	328	0,164	19,658	0,820	0,00082
370	370000	339	0,170	20,204	0,848	0,00085
380	380000	350	0,175	20,750	0,875	0,00088
390	390000	361	0,181	21,296	0,903	0,00090
400	400000	372	0,186	21,842	0,930	0,00093
410	410000	383	0,192	22,388	0,958	0,00096
420	420000	394	0,197	22,934	0,985	0,00099
430	430000	405	0,203	23,480	1,013	0,00101
440	440000	416	0,208	24,026	1,040	0,00104
450	450000	427	0,214	24,572	1,068	0,00107
460	460000	438	0,219	25,118	1,095	0,00110
470	470000	449	0,225	25,664	1,123	0,00112
480	480000	460	0,230	26,210	1,150	0,00115
490	490000	471	0,236	26,756	1,178	0,00118
500	500000	482	0,241	27,302	1,205	0,00121
510	510000	493	0,247	27,849	1,233	0,00123

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	504	0,252	28,395	1,260	0,00126
530	530000	515	0,258	28,941	1,288	0,00129
540	540000	526	0,263	29,487	1,315	0,00132
550	550000	537	0,269	30,033	1,343	0,00134
560	560000	548	0,274	30,579	1,370	0,00137
570	570000	559	0,280	31,125	1,398	0,00140
580	580000	570	0,285	31,671	1,425	0,00143
590	590000	581	0,291	32,217	1,453	0,00145
600	600000	592	0,296	32,763	1,480	0,00148
610	610000	603	0,302	33,309	1,508	0,00151
620	620000	614	0,307	33,855	1,535	0,00154
630	630000	625	0,313	34,401	1,563	0,00156
640	640000	636	0,318	34,947	1,590	0,00159
650	650000	647	0,324	35,493	1,618	0,00162
660	660000	658	0,329	36,039	1,645	0,00165
670	670000	669	0,335	36,585	1,673	0,00167
680	680000	680	0,340	37,131	1,700	0,00170
690	690000	691	0,346	37,677	1,728	0,00173
700	700000	702	0,351	38,223	1,755	0,00176
710	710000	713	0,357	38,770	1,783	0,00178
720	720000	724	0,362	39,316	1,810	0,00181
730	730000	735	0,368	39,862	1,838	0,00184
740	740000	746	0,373	40,408	1,865	0,00187
750	750000	757	0,379	40,954	1,893	0,00189
760	760000	783	0,392	41,500	1,958	0,00196
770	770000	809	0,405	42,046	2,023	0,00202
780	780000	835	0,418	42,592	2,088	0,00209
782,5	782500	861	0,431	42,728	2,153	0,00215
780	780000	887	0,444	42,592	2,218	0,00222
770	770000	923	0,462	42,046	2,308	0,00231
760	760000	959	0,480	41,500	2,398	0,00240
750	750000	995	0,498	40,954	2,488	0,00249
740	740000	1031	0,516	40,408	2,578	0,00258
730	730000	1067	0,534	39,862	2,668	0,00267

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
720	720000	1103	0,552	39,316	2,758	0,00276
710	710000	1139	0,570	38,770	2,848	0,00285
700	700000	1175	0,588	38,223	2,938	0,00294

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 15% LIMBAH MARMER SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	24129,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	24086,190 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	30722,465 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	22362,032 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER BETON GEOPOLIMER 20% LIMBAH MARMER SAMPEL 1 (SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	1	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	40,460	Mpa
Diameter	151,567	mm
Tinggi	302,200	mm
Luas Penampang	18042,524	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

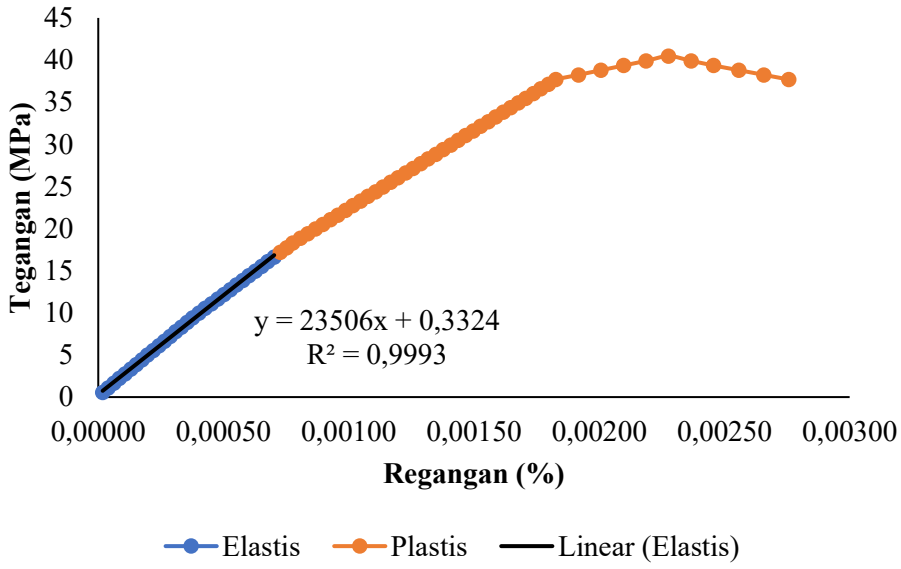
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	7	0,004	0,554	0,018	0,00002
20	20000	16	0,008	1,108	0,040	0,00004
30	30000	25	0,013	1,663	0,063	0,00006
40	40000	34	0,017	2,217	0,085	0,00009
50	50000	43	0,022	2,771	0,108	0,00011
60	60000	52	0,026	3,325	0,130	0,00013
70	70000	61	0,031	3,880	0,153	0,00015
80	80000	70	0,035	4,434	0,175	0,00018
90	90000	79	0,040	4,988	0,198	0,00020
100	100000	88	0,044	5,542	0,220	0,00022
110	110000	97	0,049	6,097	0,243	0,00024
120	120000	106	0,053	6,651	0,265	0,00027
130	130000	115	0,058	7,205	0,288	0,00029
140	140000	124	0,062	7,759	0,310	0,00031
150	150000	133	0,067	8,314	0,333	0,00033
160	160000	142	0,071	8,868	0,355	0,00036
170	170000	151	0,076	9,422	0,378	0,00038

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	161	0,081	9,976	0,403	0,00040
190	190000	171	0,086	10,531	0,428	0,00043
200	200000	181	0,091	11,085	0,453	0,00045
210	210000	191	0,096	11,639	0,478	0,00048
220	220000	201	0,101	12,193	0,503	0,00050
230	230000	211	0,106	12,748	0,528	0,00053
240	240000	221	0,111	13,302	0,553	0,00055
250	250000	231	0,116	13,856	0,578	0,00058
260	260000	241	0,121	14,410	0,603	0,00060
270	270000	251	0,126	14,965	0,628	0,00063
280	280000	261	0,131	15,519	0,653	0,00065
290	290000	271	0,136	16,073	0,678	0,00068
300	300000	281	0,141	16,627	0,703	0,00070
310	310000	291	0,146	17,182	0,728	0,00073
320	320000	301	0,151	17,736	0,753	0,00075
330	330000	311	0,156	18,290	0,778	0,00078
340	340000	323	0,162	18,844	0,808	0,00081
350	350000	335	0,168	19,399	0,838	0,00084
360	360000	347	0,174	19,953	0,868	0,00087
370	370000	359	0,180	20,507	0,898	0,00090
380	380000	371	0,186	21,061	0,928	0,00093
390	390000	383	0,192	21,616	0,958	0,00096
400	400000	395	0,198	22,170	0,988	0,00099
410	410000	407	0,204	22,724	1,018	0,00102
420	420000	419	0,210	23,278	1,048	0,00105
430	430000	431	0,216	23,833	1,078	0,00108
440	440000	443	0,222	24,387	1,108	0,00111
450	450000	455	0,228	24,941	1,138	0,00114
460	460000	467	0,234	25,495	1,168	0,00117
470	470000	479	0,240	26,050	1,198	0,00120
480	480000	491	0,246	26,604	1,228	0,00123
490	490000	503	0,252	27,158	1,258	0,00126
500	500000	515	0,258	27,712	1,288	0,00129
510	510000	527	0,264	28,267	1,318	0,00132

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	539	0,270	28,821	1,348	0,00135
530	530000	551	0,276	29,375	1,378	0,00138
540	540000	563	0,282	29,929	1,408	0,00141
550	550000	575	0,288	30,484	1,438	0,00144
560	560000	587	0,294	31,038	1,468	0,00147
570	570000	599	0,300	31,592	1,498	0,00150
580	580000	611	0,306	32,146	1,528	0,00153
590	590000	623	0,312	32,701	1,558	0,00156
600	600000	635	0,318	33,255	1,588	0,00159
610	610000	647	0,324	33,809	1,618	0,00162
620	620000	659	0,330	34,363	1,648	0,00165
630	630000	671	0,336	34,918	1,678	0,00168
640	640000	683	0,342	35,472	1,708	0,00171
650	650000	695	0,348	36,026	1,738	0,00174
660	660000	707	0,354	36,580	1,768	0,00177
670	670000	719	0,360	37,134	1,798	0,00180
680	680000	731	0,366	37,689	1,828	0,00183
690	690000	767	0,384	38,243	1,918	0,00192
700	700000	803	0,402	38,797	2,008	0,00201
710	710000	839	0,420	39,351	2,098	0,00210
720	720000	875	0,438	39,906	2,188	0,00219
730	730000	911	0,456	40,460	2,278	0,00228
720	720000	947	0,474	39,906	2,368	0,00237
710	710000	983	0,492	39,351	2,458	0,00246
700	700000	1023	0,512	38,797	2,558	0,00256
690	690000	1063	0,532	38,243	2,658	0,00266
680	680000	1103	0,552	37,689	2,758	0,00276

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 20% LIMBAH MARMER SAMPEL 1

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	23506,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	23834,777 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	29895,832 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	21760,349 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 20% LIMBAH MARMER SAMPEL 2
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	2	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	39,717	Mpa
Diameter	150,867	mm
Tinggi	304,200	mm
Luas Penampang	17876,252	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

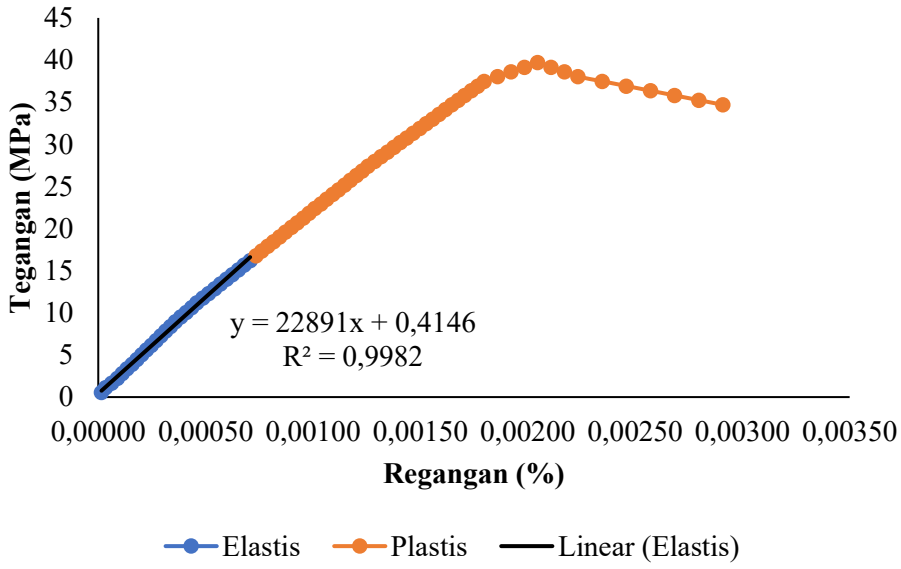
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	6	0,003	0,559	0,015	0,00002
20	20000	14	0,007	1,119	0,035	0,00004
30	30000	25	0,013	1,678	0,063	0,00006
40	40000	36	0,018	2,238	0,090	0,00009
50	50000	45	0,023	2,797	0,113	0,00011
60	60000	54	0,027	3,356	0,135	0,00014
70	70000	63	0,032	3,916	0,158	0,00016
80	80000	72	0,036	4,475	0,180	0,00018
90	90000	81	0,041	5,035	0,203	0,00020
100	100000	90	0,045	5,594	0,225	0,00023
110	110000	99	0,050	6,153	0,248	0,00025
120	120000	108	0,054	6,713	0,270	0,00027
130	130000	117	0,059	7,272	0,293	0,00029
140	140000	126	0,063	7,832	0,315	0,00032
150	150000	135	0,068	8,391	0,338	0,00034
160	160000	144	0,072	8,950	0,360	0,00036
170	170000	154	0,077	9,510	0,385	0,00039

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	164	0,082	10,069	0,410	0,00041
190	190000	174	0,087	10,629	0,435	0,00044
200	200000	184	0,092	11,188	0,460	0,00046
210	210000	195	0,098	11,747	0,488	0,00049
220	220000	206	0,103	12,307	0,515	0,00052
230	230000	217	0,109	12,866	0,543	0,00054
240	240000	228	0,114	13,426	0,570	0,00057
250	250000	239	0,120	13,985	0,598	0,00060
260	260000	250	0,125	14,544	0,625	0,00063
270	270000	261	0,131	15,104	0,653	0,00065
280	280000	272	0,136	15,663	0,680	0,00068
290	290000	283	0,142	16,223	0,708	0,00071
300	300000	294	0,147	16,782	0,735	0,00074
310	310000	305	0,153	17,341	0,763	0,00076
320	320000	316	0,158	17,901	0,790	0,00079
330	330000	327	0,164	18,460	0,818	0,00082
340	340000	338	0,169	19,020	0,845	0,00085
350	350000	349	0,175	19,579	0,873	0,00087
360	360000	360	0,180	20,138	0,900	0,00090
370	370000	371	0,186	20,698	0,928	0,00093
380	380000	382	0,191	21,257	0,955	0,00096
390	390000	393	0,197	21,817	0,983	0,00098
400	400000	404	0,202	22,376	1,010	0,00101
410	410000	415	0,208	22,935	1,038	0,00104
420	420000	426	0,213	23,495	1,065	0,00107
430	430000	437	0,219	24,054	1,093	0,00109
440	440000	448	0,224	24,614	1,120	0,00112
450	450000	459	0,230	25,173	1,148	0,00115
460	460000	470	0,235	25,732	1,175	0,00118
470	470000	481	0,241	26,292	1,203	0,00120
480	480000	492	0,246	26,851	1,230	0,00123
490	490000	503	0,252	27,411	1,258	0,00126
500	500000	515	0,258	27,970	1,288	0,00129
510	510000	527	0,264	28,529	1,318	0,00132

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	539	0,270	29,089	1,348	0,00135
530	530000	551	0,276	29,648	1,378	0,00138
540	540000	563	0,282	30,208	1,408	0,00141
550	550000	575	0,288	30,767	1,438	0,00144
560	560000	587	0,294	31,326	1,468	0,00147
570	570000	599	0,300	31,886	1,498	0,00150
580	580000	611	0,306	32,445	1,528	0,00153
590	590000	623	0,312	33,005	1,558	0,00156
600	600000	635	0,318	33,564	1,588	0,00159
610	610000	647	0,324	34,123	1,618	0,00162
620	620000	659	0,330	34,683	1,648	0,00165
630	630000	671	0,336	35,242	1,678	0,00168
640	640000	683	0,342	35,802	1,708	0,00171
650	650000	695	0,348	36,361	1,738	0,00174
660	660000	707	0,354	36,920	1,768	0,00177
670	670000	719	0,360	37,480	1,798	0,00180
680	680000	744	0,372	38,039	1,860	0,00186
690	690000	769	0,385	38,599	1,923	0,00192
700	700000	794	0,397	39,158	1,985	0,00199
710	710000	819	0,410	39,717	2,048	0,00205
700	700000	844	0,422	39,158	2,110	0,00211
690	690000	869	0,435	38,599	2,173	0,00217
680	680000	894	0,447	38,039	2,235	0,00224
670	670000	939	0,470	37,480	2,348	0,00235
660	660000	984	0,492	36,920	2,460	0,00246
650	650000	1029	0,515	36,361	2,573	0,00257
640	640000	1074	0,537	35,802	2,685	0,00269
630	630000	1119	0,560	35,242	2,798	0,00280
620	620000	1164	0,582	34,683	2,910	0,00291

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 20% LIMBAH MARMER SAMPEL 2

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	22891,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	22166,607 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	29620,255 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	21559,765 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER BETON GEOPOLIMER 20% LIMBAH MARMER SAMPEL 3 (SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	3	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	38,486	Mpa
Diameter	151,633	mm
Tinggi	303,233	mm
Luas Penampang	18058,399	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

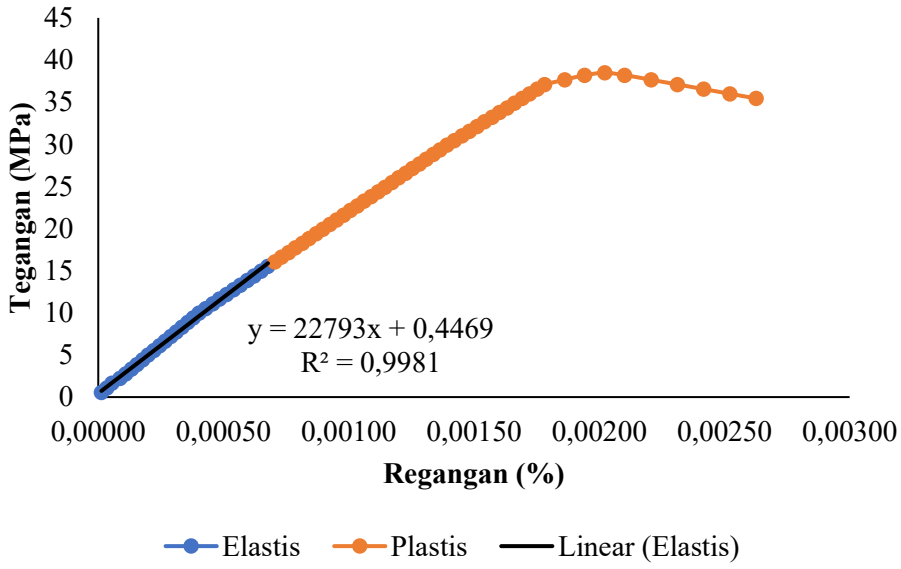
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	5	0,003	0,554	0,013	0,00001
20	20000	14	0,007	1,108	0,035	0,00004
30	30000	22	0,011	1,661	0,055	0,00006
40	40000	35	0,018	2,215	0,088	0,00009
50	50000	44	0,022	2,769	0,110	0,00011
60	60000	53	0,027	3,323	0,133	0,00013
70	70000	62	0,031	3,876	0,155	0,00016
80	80000	71	0,036	4,430	0,178	0,00018
90	90000	80	0,040	4,984	0,200	0,00020
100	100000	89	0,045	5,538	0,223	0,00022
110	110000	98	0,049	6,091	0,245	0,00025
120	120000	107	0,054	6,645	0,268	0,00027
130	130000	116	0,058	7,199	0,290	0,00029
140	140000	125	0,063	7,753	0,313	0,00031
150	150000	134	0,067	8,306	0,335	0,00034
160	160000	143	0,072	8,860	0,358	0,00036
170	170000	152	0,076	9,414	0,380	0,00038

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	161	0,081	9,968	0,403	0,00040
190	190000	172	0,086	10,521	0,430	0,00043
200	200000	183	0,092	11,075	0,458	0,00046
210	210000	194	0,097	11,629	0,485	0,00049
220	220000	205	0,103	12,183	0,513	0,00051
230	230000	216	0,108	12,736	0,540	0,00054
240	240000	227	0,114	13,290	0,568	0,00057
250	250000	238	0,119	13,844	0,595	0,00060
260	260000	249	0,125	14,398	0,623	0,00062
270	270000	260	0,130	14,951	0,650	0,00065
280	280000	271	0,136	15,505	0,678	0,00068
290	290000	282	0,141	16,059	0,705	0,00071
300	300000	293	0,147	16,613	0,733	0,00073
310	310000	304	0,152	17,167	0,760	0,00076
320	320000	315	0,158	17,720	0,788	0,00079
330	330000	326	0,163	18,274	0,815	0,00082
340	340000	337	0,169	18,828	0,843	0,00084
350	350000	348	0,174	19,382	0,870	0,00087
360	360000	359	0,180	19,935	0,898	0,00090
370	370000	370	0,185	20,489	0,925	0,00093
380	380000	381	0,191	21,043	0,953	0,00095
390	390000	392	0,196	21,597	0,980	0,00098
400	400000	403	0,202	22,150	1,008	0,00101
410	410000	414	0,207	22,704	1,035	0,00104
420	420000	425	0,213	23,258	1,063	0,00106
430	430000	436	0,218	23,812	1,090	0,00109
440	440000	447	0,224	24,365	1,118	0,00112
450	450000	458	0,229	24,919	1,145	0,00115
460	460000	469	0,235	25,473	1,173	0,00117
470	470000	480	0,240	26,027	1,200	0,00120
480	480000	491	0,246	26,580	1,228	0,00123
490	490000	502	0,251	27,134	1,255	0,00126
500	500000	513	0,257	27,688	1,283	0,00128
510	510000	524	0,262	28,242	1,310	0,00131

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	535	0,268	28,795	1,338	0,00134
530	530000	546	0,273	29,349	1,365	0,00137
540	540000	557	0,279	29,903	1,393	0,00139
550	550000	569	0,285	30,457	1,423	0,00142
560	560000	581	0,291	31,011	1,453	0,00145
570	570000	593	0,297	31,564	1,483	0,00148
580	580000	605	0,303	32,118	1,513	0,00151
590	590000	617	0,309	32,672	1,543	0,00154
600	600000	629	0,315	33,226	1,573	0,00157
610	610000	641	0,321	33,779	1,603	0,00160
620	620000	653	0,327	34,333	1,633	0,00163
630	630000	665	0,333	34,887	1,663	0,00166
640	640000	677	0,339	35,441	1,693	0,00169
650	650000	689	0,345	35,994	1,723	0,00172
660	660000	701	0,351	36,548	1,753	0,00175
670	670000	713	0,357	37,102	1,783	0,00178
680	680000	745	0,373	37,656	1,863	0,00186
690	690000	777	0,389	38,209	1,943	0,00194
695	695000	809	0,405	38,486	2,023	0,00202
690	690000	841	0,421	38,209	2,103	0,00210
680	680000	883	0,442	37,656	2,208	0,00221
670	670000	925	0,463	37,102	2,313	0,00231
660	660000	967	0,484	36,548	2,418	0,00242
650	650000	1009	0,505	35,994	2,523	0,00252
640	640000	1051	0,526	35,441	2,628	0,00263

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 20% LIMBAH MARMER SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	22793,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	22079,135 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	29157,524 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	21222,955 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 25% LIMBAH MARMER SAMPEL 1
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	1	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	34,117	Mpa
Diameter	150,633	mm
Tinggi	305,033	mm
Luas Penampang	17820,999	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

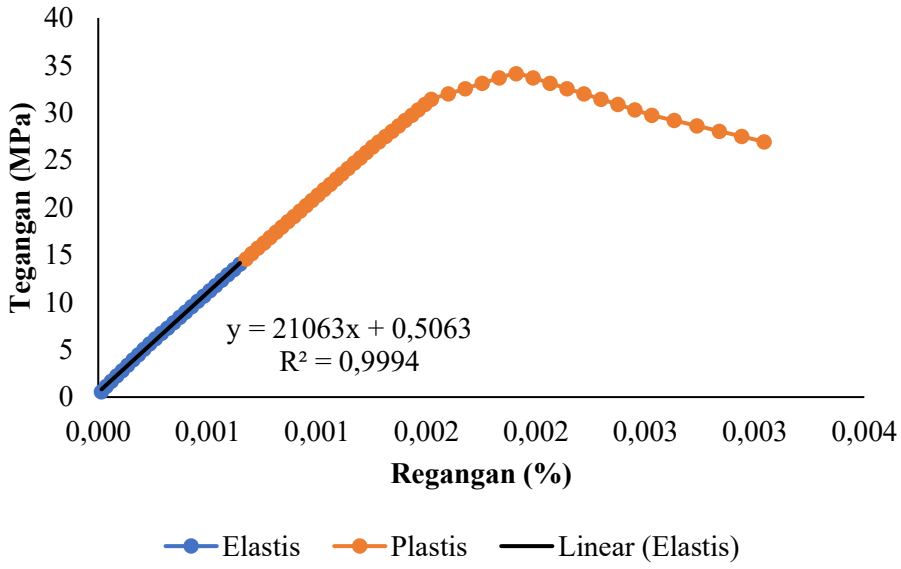
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	6	0,003	0,561	0,015	0,00002
20	20000	15	0,008	1,122	0,038	0,00004
30	30000	24	0,012	1,683	0,060	0,00006
40	40000	34	0,017	2,245	0,085	0,00009
50	50000	44	0,022	2,806	0,110	0,00011
60	60000	54	0,027	3,367	0,135	0,00014
70	70000	64	0,032	3,928	0,160	0,00016
80	80000	74	0,037	4,489	0,185	0,00019
90	90000	84	0,042	5,050	0,210	0,00021
100	100000	94	0,047	5,611	0,235	0,00024
110	110000	105	0,053	6,172	0,263	0,00026
120	120000	116	0,058	6,734	0,290	0,00029
130	130000	127	0,064	7,295	0,318	0,00032
140	140000	138	0,069	7,856	0,345	0,00035
150	150000	149	0,075	8,417	0,373	0,00037
160	160000	160	0,080	8,978	0,400	0,00040
170	170000	171	0,086	9,539	0,428	0,00043

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	182	0,091	10,100	0,455	0,00046
190	190000	193	0,097	10,662	0,483	0,00048
200	200000	204	0,102	11,223	0,510	0,00051
210	210000	215	0,108	11,784	0,538	0,00054
220	220000	226	0,113	12,345	0,565	0,00057
230	230000	237	0,119	12,906	0,593	0,00059
240	240000	248	0,124	13,467	0,620	0,00062
250	250000	259	0,130	14,028	0,648	0,00065
260	260000	270	0,135	14,590	0,675	0,00068
270	270000	281	0,141	15,151	0,703	0,00070
280	280000	292	0,146	15,712	0,730	0,00073
290	290000	303	0,152	16,273	0,758	0,00076
300	300000	314	0,157	16,834	0,785	0,00079
310	310000	325	0,163	17,395	0,813	0,00081
320	320000	336	0,168	17,956	0,840	0,00084
330	330000	347	0,174	18,517	0,868	0,00087
340	340000	358	0,179	19,079	0,895	0,00090
350	350000	369	0,185	19,640	0,923	0,00092
360	360000	380	0,190	20,201	0,950	0,00095
370	370000	391	0,196	20,762	0,978	0,00098
380	380000	402	0,201	21,323	1,005	0,00101
390	390000	413	0,207	21,884	1,033	0,00103
400	400000	424	0,212	22,445	1,060	0,00106
410	410000	435	0,218	23,007	1,088	0,00109
420	420000	446	0,223	23,568	1,115	0,00112
430	430000	457	0,229	24,129	1,143	0,00114
440	440000	468	0,234	24,690	1,170	0,00117
450	450000	479	0,240	25,251	1,198	0,00120
460	460000	490	0,245	25,812	1,225	0,00123
470	470000	501	0,251	26,373	1,253	0,00125
480	480000	513	0,257	26,935	1,283	0,00128
490	490000	525	0,263	27,496	1,313	0,00131
500	500000	537	0,269	28,057	1,343	0,00134
510	510000	549	0,275	28,618	1,373	0,00137

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	561	0,281	29,179	1,403	0,00140
530	530000	573	0,287	29,740	1,433	0,00143
540	540000	585	0,293	30,301	1,463	0,00146
550	550000	597	0,299	30,862	1,493	0,00149
560	560000	609	0,305	31,424	1,523	0,00152
570	570000	640	0,320	31,985	1,600	0,00160
580	580000	671	0,336	32,546	1,678	0,00168
590	590000	702	0,351	33,107	1,755	0,00176
600	600000	733	0,367	33,668	1,833	0,00183
608	608000	764	0,382	34,117	1,910	0,00191
600	600000	795	0,398	33,668	1,988	0,00199
590	590000	826	0,413	33,107	2,065	0,00207
580	580000	857	0,429	32,546	2,143	0,00214
570	570000	888	0,444	31,985	2,220	0,00222
560	560000	919	0,460	31,424	2,298	0,00230
550	550000	950	0,475	30,862	2,375	0,00238
540	540000	981	0,491	30,301	2,453	0,00245
530	530000	1012	0,506	29,740	2,530	0,00253
520	520000	1053	0,527	29,179	2,633	0,00263
510	510000	1094	0,547	28,618	2,735	0,00274
500	500000	1135	0,568	28,057	2,838	0,00284
490	490000	1176	0,588	27,496	2,940	0,00294
480	480000	1217	0,609	26,935	3,043	0,00304

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 25% LIMBAH MARMER SAMPEL 1

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	21063,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	20669,341 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	27452,609 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	19981,995 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER BETON GEOPOLIMER 25% LIMBAH MARMER SAMPEL 2 (SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	2	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	32,729	Mpa
Diameter	151,5	mm
Tinggi	303,433	mm
Luas Penampang	18026,655	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

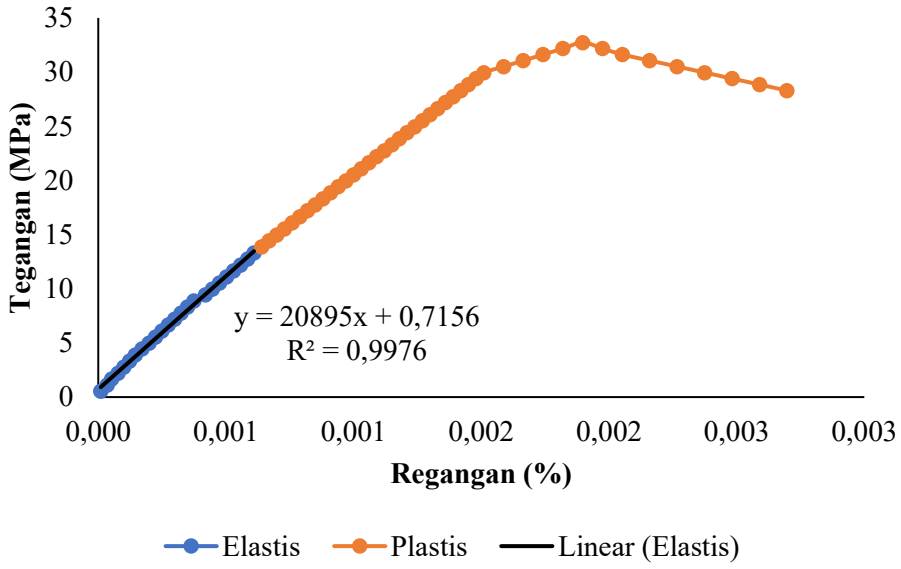
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	4	0,002	0,555	0,010	0,00001
20	20000	14	0,007	1,109	0,035	0,00004
30	30000	21	0,011	1,664	0,053	0,00005
40	40000	31	0,016	2,219	0,078	0,00008
50	50000	40	0,020	2,774	0,100	0,00010
60	60000	49	0,025	3,328	0,123	0,00012
70	70000	58	0,029	3,883	0,145	0,00015
80	80000	69	0,035	4,438	0,173	0,00017
90	90000	80	0,040	4,993	0,200	0,00020
100	100000	90	0,045	5,547	0,225	0,00023
110	110000	100	0,050	6,102	0,250	0,00025
120	120000	110	0,055	6,657	0,275	0,00028
130	130000	120	0,060	7,212	0,300	0,00030
140	140000	130	0,065	7,766	0,325	0,00033
150	150000	140	0,070	8,321	0,350	0,00035
160	160000	150	0,075	8,876	0,375	0,00038
170	170000	168	0,084	9,430	0,420	0,00042

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	179	0,090	9,985	0,448	0,00045
190	190000	190	0,095	10,540	0,475	0,00048
200	200000	201	0,101	11,095	0,503	0,00050
210	210000	212	0,106	11,649	0,530	0,00053
220	220000	223	0,112	12,204	0,558	0,00056
230	230000	234	0,117	12,759	0,585	0,00059
240	240000	244	0,122	13,314	0,610	0,00061
250	250000	256	0,128	13,868	0,640	0,00064
260	260000	268	0,134	14,423	0,670	0,00067
270	270000	280	0,140	14,978	0,700	0,00070
280	280000	292	0,146	15,533	0,730	0,00073
290	290000	304	0,152	16,087	0,760	0,00076
300	300000	316	0,158	16,642	0,790	0,00079
310	310000	328	0,164	17,197	0,820	0,00082
320	320000	340	0,170	17,751	0,850	0,00085
330	330000	352	0,176	18,306	0,880	0,00088
340	340000	364	0,182	18,861	0,910	0,00091
350	350000	376	0,188	19,416	0,940	0,00094
360	360000	388	0,194	19,970	0,970	0,00097
370	370000	400	0,200	20,525	1,000	0,00100
380	380000	412	0,206	21,080	1,030	0,00103
390	390000	424	0,212	21,635	1,060	0,00106
400	400000	436	0,218	22,189	1,090	0,00109
410	410000	448	0,224	22,744	1,120	0,00112
420	420000	460	0,230	23,299	1,150	0,00115
430	430000	472	0,236	23,854	1,180	0,00118
440	440000	484	0,242	24,408	1,210	0,00121
450	450000	496	0,248	24,963	1,240	0,00124
460	460000	508	0,254	25,518	1,270	0,00127
470	470000	520	0,260	26,073	1,300	0,00130
480	480000	532	0,266	26,627	1,330	0,00133
490	490000	544	0,272	27,182	1,360	0,00136
500	500000	556	0,278	27,737	1,390	0,00139
510	510000	568	0,284	28,291	1,420	0,00142

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	580	0,290	28,846	1,450	0,00145
530	530000	592	0,296	29,401	1,480	0,00148
540	540000	604	0,302	29,956	1,510	0,00151
550	550000	635	0,318	30,510	1,588	0,00159
560	560000	666	0,333	31,065	1,665	0,00167
570	570000	697	0,349	31,620	1,743	0,00174
580	580000	728	0,364	32,175	1,820	0,00182
590	590000	759	0,380	32,729	1,898	0,00190
580	580000	790	0,395	32,175	1,975	0,00198
570	570000	821	0,411	31,620	2,053	0,00205
560	560000	864	0,432	31,065	2,160	0,00216
550	550000	907	0,454	30,510	2,268	0,00227
540	540000	950	0,475	29,956	2,375	0,00238
530	530000	993	0,497	29,401	2,483	0,00248
520	520000	1036	0,518	28,846	2,590	0,00259
510	510000	1079	0,540	28,291	2,698	0,00270

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 25% LIMBAH MARMER SAMPEL 2

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	20895,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	20777,313 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	26888,482 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	19571,383 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 25% LIMBAH MARMER SAMPEL 3
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	3	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	31,153	Mpa
Diameter	153,300	mm
Tinggi	305,133	mm
Luas Penampang	18457,556	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

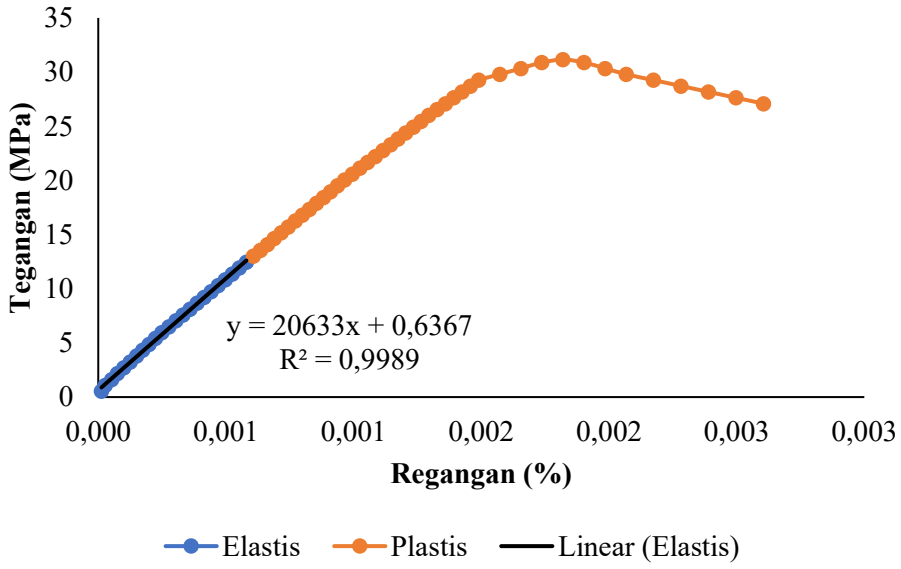
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	5	0,003	0,542	0,013	0,00001
20	20000	11	0,006	1,084	0,028	0,00003
30	30000	21	0,011	1,625	0,053	0,00005
40	40000	30	0,015	2,167	0,075	0,00008
50	50000	40	0,020	2,709	0,100	0,00010
60	60000	50	0,025	3,251	0,125	0,00013
70	70000	60	0,030	3,792	0,150	0,00015
80	80000	70	0,035	4,334	0,175	0,00018
90	90000	80	0,040	4,876	0,200	0,00020
100	100000	90	0,045	5,418	0,225	0,00023
110	110000	100	0,050	5,960	0,250	0,00025
120	120000	111	0,056	6,501	0,278	0,00028
130	130000	122	0,061	7,043	0,305	0,00031
140	140000	133	0,067	7,585	0,333	0,00033
150	150000	144	0,072	8,127	0,360	0,00036
160	160000	155	0,078	8,669	0,388	0,00039
170	170000	166	0,083	9,210	0,415	0,00042

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	177	0,089	9,752	0,443	0,00044
190	190000	188	0,094	10,294	0,470	0,00047
200	200000	199	0,100	10,836	0,498	0,00050
210	210000	210	0,105	11,377	0,525	0,00053
220	220000	221	0,111	11,919	0,553	0,00055
230	230000	232	0,116	12,461	0,580	0,00058
240	240000	243	0,122	13,003	0,608	0,00061
250	250000	254	0,127	13,545	0,635	0,00064
260	260000	265	0,133	14,086	0,663	0,00066
270	270000	276	0,138	14,628	0,690	0,00069
280	280000	287	0,144	15,170	0,718	0,00072
290	290000	298	0,149	15,712	0,745	0,00075
300	300000	309	0,155	16,254	0,773	0,00077
310	310000	320	0,160	16,795	0,800	0,00080
320	320000	331	0,166	17,337	0,828	0,00083
330	330000	342	0,171	17,879	0,855	0,00086
340	340000	353	0,177	18,421	0,883	0,00088
350	350000	364	0,182	18,962	0,910	0,00091
360	360000	375	0,188	19,504	0,938	0,00094
370	370000	386	0,193	20,046	0,965	0,00097
380	380000	398	0,199	20,588	0,995	0,00100
390	390000	410	0,205	21,130	1,025	0,00103
400	400000	422	0,211	21,671	1,055	0,00106
410	410000	434	0,217	22,213	1,085	0,00109
420	420000	446	0,223	22,755	1,115	0,00112
430	430000	458	0,229	23,297	1,145	0,00115
440	440000	470	0,235	23,838	1,175	0,00118
450	450000	482	0,241	24,380	1,205	0,00121
460	460000	494	0,247	24,922	1,235	0,00124
470	470000	506	0,253	25,464	1,265	0,00127
480	480000	518	0,259	26,006	1,295	0,00130
490	490000	531	0,266	26,547	1,328	0,00133
500	500000	544	0,272	27,089	1,360	0,00136
510	510000	557	0,279	27,631	1,393	0,00139

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
520	520000	570	0,285	28,173	1,425	0,00143
530	530000	583	0,292	28,715	1,458	0,00146
540	540000	596	0,298	29,256	1,490	0,00149
550	550000	629	0,315	29,798	1,573	0,00157
560	560000	662	0,331	30,340	1,655	0,00166
570	570000	695	0,348	30,882	1,738	0,00174
575	575000	728	0,364	31,153	1,820	0,00182
570	570000	761	0,381	30,882	1,903	0,00190
560	560000	794	0,397	30,340	1,985	0,00199
550	550000	827	0,414	29,798	2,068	0,00207
540	540000	870	0,435	29,256	2,175	0,00218
530	530000	913	0,457	28,715	2,283	0,00228
520	520000	956	0,478	28,173	2,390	0,00239
510	510000	999	0,500	27,631	2,498	0,00250
500	500000	1042	0,521	27,089	2,605	0,00261

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 25% LIMBAH MARMER SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	20633,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	20444,662 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	26232,802 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	19094,131 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER BETON GEOPOLIMER 30% LIMBAH MARMER SAMPEL 1 (SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	1	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	26,597	Mpa
Diameter	150,500	mm
Tinggi	302,300	mm
Luas Penampang	17789,465	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

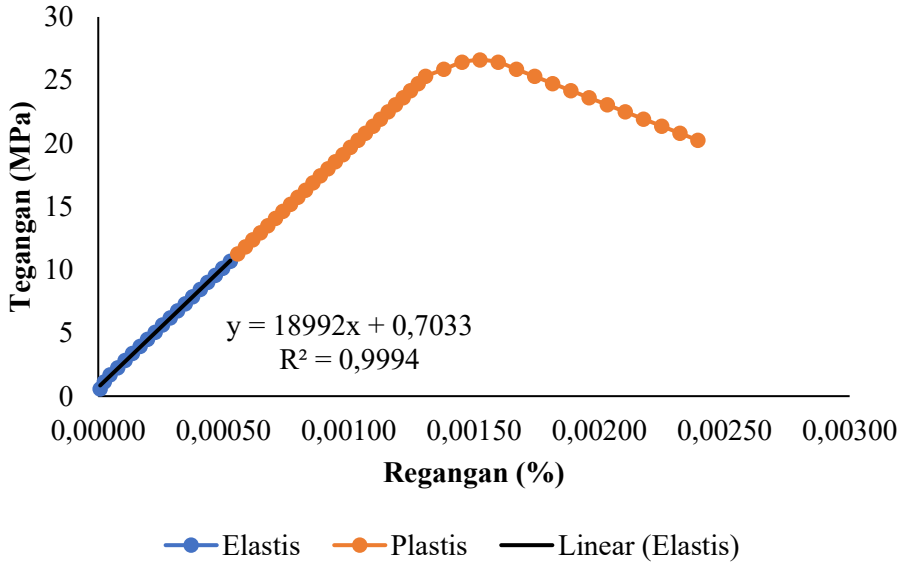
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	3	0,002	0,562	0,008	0,00001
20	20000	10	0,005	1,124	0,025	0,00003
30	30000	19	0,010	1,686	0,048	0,00005
40	40000	31	0,016	2,249	0,078	0,00008
50	50000	43	0,022	2,811	0,108	0,00011
60	60000	55	0,028	3,373	0,138	0,00014
70	70000	67	0,034	3,935	0,168	0,00017
80	80000	79	0,040	4,497	0,198	0,00020
90	90000	91	0,046	5,059	0,228	0,00023
100	100000	103	0,052	5,621	0,258	0,00026
110	110000	115	0,058	6,183	0,288	0,00029
120	120000	127	0,064	6,746	0,318	0,00032
130	130000	139	0,070	7,308	0,348	0,00035
140	140000	151	0,076	7,870	0,378	0,00038
150	150000	163	0,082	8,432	0,408	0,00041
160	160000	175	0,088	8,994	0,438	0,00044
170	170000	187	0,094	9,556	0,468	0,00047

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	199	0,100	10,118	0,498	0,00050
190	190000	211	0,106	10,680	0,528	0,00053
200	200000	223	0,112	11,243	0,558	0,00056
210	210000	235	0,118	11,805	0,588	0,00059
220	220000	247	0,124	12,367	0,618	0,00062
230	230000	259	0,130	12,929	0,648	0,00065
240	240000	271	0,136	13,491	0,678	0,00068
250	250000	283	0,142	14,053	0,708	0,00071
260	260000	295	0,148	14,615	0,738	0,00074
270	270000	307	0,154	15,178	0,768	0,00077
280	280000	319	0,160	15,740	0,798	0,00080
290	290000	331	0,166	16,302	0,828	0,00083
300	300000	343	0,172	16,864	0,858	0,00086
310	310000	355	0,178	17,426	0,888	0,00089
320	320000	367	0,184	17,988	0,918	0,00092
330	330000	379	0,190	18,550	0,948	0,00095
340	340000	391	0,196	19,112	0,978	0,00098
350	350000	403	0,202	19,675	1,008	0,00101
360	360000	415	0,208	20,237	1,038	0,00104
370	370000	427	0,214	20,799	1,068	0,00107
380	380000	439	0,220	21,361	1,098	0,00110
390	390000	451	0,226	21,923	1,128	0,00113
400	400000	463	0,232	22,485	1,158	0,00116
410	410000	475	0,238	23,047	1,188	0,00119
420	420000	487	0,244	23,609	1,218	0,00122
430	430000	499	0,250	24,172	1,248	0,00125
440	440000	511	0,256	24,734	1,278	0,00128
450	450000	523	0,262	25,296	1,308	0,00131
460	460000	552	0,276	25,858	1,380	0,00138
470	470000	581	0,291	26,420	1,453	0,00145
473,15	473150	610	0,305	26,597	1,525	0,00153
470	470000	639	0,320	26,420	1,598	0,00160
460	460000	668	0,334	25,858	1,670	0,00167
450	450000	697	0,349	25,296	1,743	0,00174

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
440	440000	726	0,363	24,734	1,815	0,00182
430	430000	755	0,378	24,172	1,888	0,00189
420	420000	784	0,392	23,609	1,960	0,00196
410	410000	813	0,407	23,047	2,033	0,00203
400	400000	842	0,421	22,485	2,105	0,00211
390	390000	871	0,436	21,923	2,178	0,00218
380	380000	900	0,450	21,361	2,250	0,00225
370	370000	929	0,465	20,799	2,323	0,00232
360	360000	958	0,479	20,237	2,395	0,00240

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 30% LIMBAH MARMER SAMPEL 1

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	18992,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	18836,243 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	24239,064 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17642,944 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 30% LIMBAH MARMER SAMPEL 2
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	2	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	25,518	Mpa
Diameter	151,467	mm
Tinggi	302,300	mm
Luas Penampang	18018,723	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

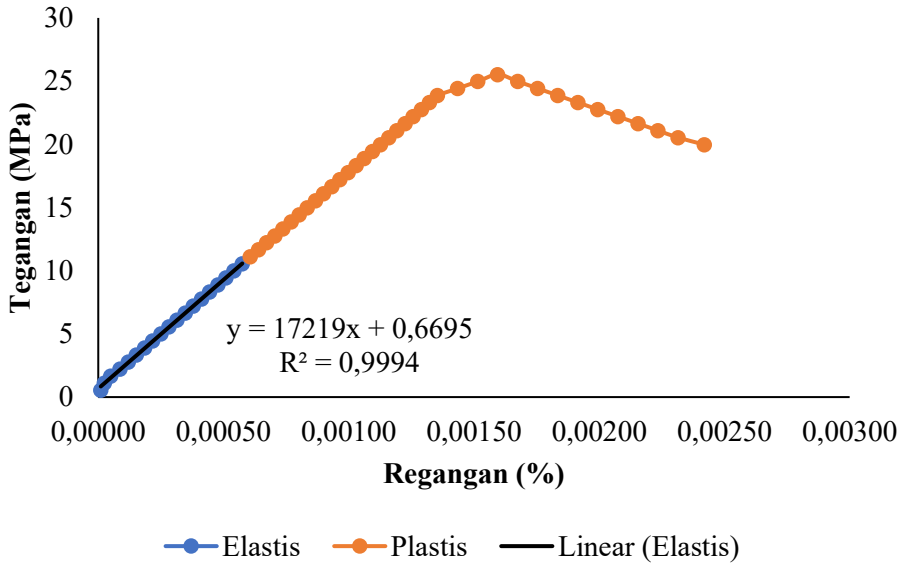
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	4	0,002	0,555	0,0100	0,00001
20	20000	10	0,005	1,110	0,0250	0,00003
30	30000	20	0,010	1,665	0,0500	0,00005
40	40000	35	0,018	2,220	0,0875	0,00009
50	50000	48	0,024	2,775	0,1200	0,00012
60	60000	61	0,031	3,330	0,1525	0,00015
70	70000	74	0,037	3,885	0,1850	0,00019
80	80000	87	0,044	4,440	0,2175	0,00022
90	90000	100	0,050	4,995	0,2500	0,00025
100	100000	113	0,057	5,550	0,2825	0,00028
110	110000	126	0,063	6,105	0,3150	0,00032
120	120000	139	0,070	6,660	0,3475	0,00035
130	130000	152	0,076	7,215	0,3800	0,00038
140	140000	165	0,083	7,770	0,4125	0,00041
150	150000	178	0,089	8,325	0,4450	0,00045
160	160000	191	0,096	8,880	0,4775	0,00048
170	170000	204	0,102	9,435	0,5100	0,00051

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	217	0,109	9,990	0,5425	0,00054
190	190000	230	0,115	10,545	0,5750	0,00058
200	200000	243	0,122	11,100	0,6075	0,00061
210	210000	256	0,128	11,655	0,6400	0,00064
220	220000	269	0,135	12,210	0,6725	0,00067
230	230000	282	0,141	12,765	0,7050	0,00071
240	240000	295	0,148	13,319	0,7375	0,00074
250	250000	308	0,154	13,874	0,7700	0,00077
260	260000	321	0,161	14,429	0,8025	0,00080
270	270000	334	0,167	14,984	0,8350	0,00084
280	280000	347	0,174	15,539	0,8675	0,00087
290	290000	360	0,180	16,094	0,9000	0,00090
300	300000	373	0,187	16,649	0,9325	0,00093
310	310000	386	0,193	17,204	0,9650	0,00097
320	320000	399	0,200	17,759	0,9975	0,00100
330	330000	412	0,206	18,314	1,0300	0,00103
340	340000	425	0,213	18,869	1,0625	0,00106
350	350000	438	0,219	19,424	1,0950	0,00110
360	360000	451	0,226	19,979	1,1275	0,00113
370	370000	464	0,232	20,534	1,1600	0,00116
380	380000	477	0,239	21,089	1,1925	0,00119
390	390000	490	0,245	21,644	1,2250	0,00123
400	400000	503	0,252	22,199	1,2575	0,00126
410	410000	516	0,258	22,754	1,2900	0,00129
420	420000	529	0,265	23,309	1,3225	0,00132
430	430000	542	0,271	23,864	1,3550	0,00136
440	440000	574	0,287	24,419	1,4350	0,00144
450	450000	606	0,303	24,974	1,5150	0,00152
459,8	459800	638	0,319	25,518	1,5950	0,00160
450	450000	670	0,335	24,974	1,6750	0,00168
440	440000	702	0,351	24,419	1,7550	0,00176
430	430000	734	0,367	23,864	1,8350	0,00184
420	420000	766	0,383	23,309	1,9150	0,00192
410	410000	798	0,399	22,754	1,9950	0,00200

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
400	400000	830	0,415	22,199	2,0750	0,00208
390	390000	862	0,431	21,644	2,1550	0,00216
380	380000	894	0,447	21,089	2,2350	0,00224
370	370000	926	0,463	20,534	2,3150	0,00232
360	360000	968	0,484	19,979	2,4200	0,00242

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 30% LIMBAH MARMER SAMPEL 2

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17219,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	16907,263 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	23742,166 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	17281,266 Mpa

LAPORAN PENGAMATAN UJI DESAK DAN REGANGAN SILINDER
BETON GEOPOLIMER 30% LIMBAH MARMER SAMPEL 3
(SNI 03-4169-1996)

I. Data Benda Uji

No Sampel	3	
Umur Uji	28	Hari
Kadar Abu Sekam Padi	-	%
Mutu Beton Rencana	25	Mpa
Mutu Beton Hasil Pengujian	24,973	Mpa
Diameter	153,700	mm
Tinggi	303,133	mm
Luas Penampang	18554,003	mm^2
Lo	200	mm

II. Data Hasil Pengujian

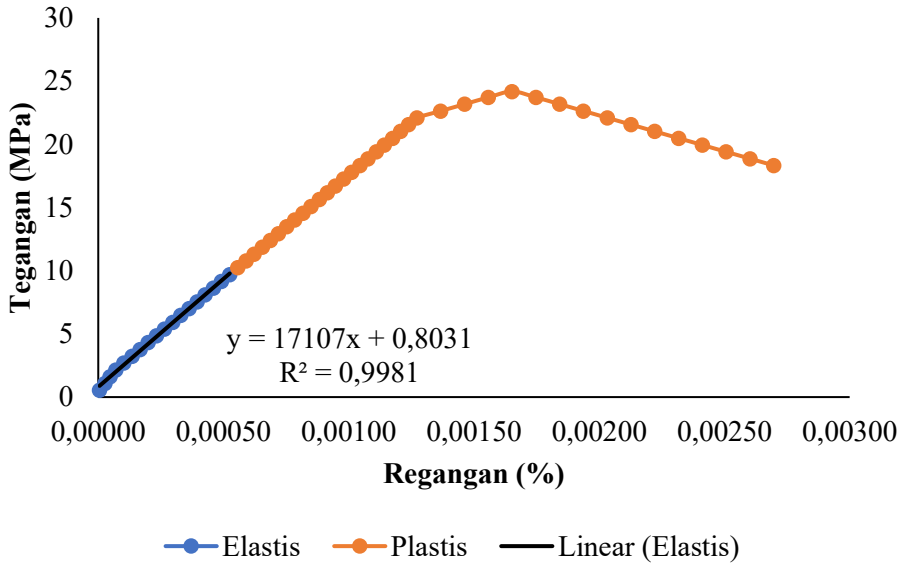
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
10	10000	2	0,001	0,539	0,005	0,00001
20	20000	11	0,006	1,078	0,028	0,00003
30	30000	19	0,010	1,617	0,048	0,00005
40	40000	28	0,014	2,156	0,070	0,00007
50	50000	41	0,021	2,695	0,103	0,00010
60	60000	54	0,027	3,234	0,135	0,00014
70	70000	67	0,034	3,773	0,168	0,00017
80	80000	80	0,040	4,312	0,200	0,00020
90	90000	93	0,047	4,851	0,233	0,00023
100	100000	106	0,053	5,390	0,265	0,00027
110	110000	119	0,060	5,929	0,298	0,00030
120	120000	132	0,066	6,468	0,330	0,00033
130	130000	145	0,073	7,007	0,363	0,00036
140	140000	158	0,079	7,546	0,395	0,00040
150	150000	171	0,086	8,085	0,428	0,00043
160	160000	184	0,092	8,623	0,460	0,00046
170	170000	197	0,099	9,162	0,493	0,00049

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
180	180000	210	0,105	9,701	0,525	0,00053
190	190000	223	0,112	10,240	0,558	0,00056
200	200000	236	0,118	10,779	0,590	0,00059
210	210000	249	0,125	11,318	0,623	0,00062
220	220000	262	0,131	11,857	0,655	0,00066
230	230000	275	0,138	12,396	0,688	0,00069
240	240000	288	0,144	12,935	0,720	0,00072
250	250000	301	0,151	13,474	0,753	0,00075
260	260000	314	0,157	14,013	0,785	0,00079
270	270000	327	0,164	14,552	0,818	0,00082
280	280000	340	0,170	15,091	0,850	0,00085
290	290000	353	0,177	15,630	0,883	0,00088
300	300000	366	0,183	16,169	0,915	0,00092
310	310000	379	0,190	16,708	0,948	0,00095
320	320000	392	0,196	17,247	0,980	0,00098
330	330000	405	0,203	17,786	1,013	0,00101
340	340000	418	0,209	18,325	1,045	0,00105
350	350000	431	0,216	18,864	1,078	0,00108
360	360000	444	0,222	19,403	1,110	0,00111
370	370000	457	0,229	19,942	1,143	0,00114
380	380000	470	0,235	20,481	1,175	0,00118
390	390000	483	0,242	21,020	1,208	0,00121
400	400000	496	0,248	21,559	1,240	0,00124
410	410000	509	0,255	22,098	1,273	0,00127
420	420000	547	0,274	22,637	1,368	0,00137
430	430000	585	0,293	23,176	1,463	0,00146
440	440000	623	0,312	23,715	1,558	0,00156
448,6	448600	661	0,331	24,178	1,653	0,00165
440	440000	699	0,350	23,715	1,748	0,00175
430	430000	737	0,369	23,176	1,843	0,00184
420	420000	775	0,388	22,637	1,938	0,00194
410	410000	813	0,407	22,098	2,033	0,00203
400	400000	851	0,426	21,559	2,128	0,00213
390	390000	889	0,445	21,020	2,223	0,00222

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi	Tegangan	Regangan	Regangan (%)
kN	N					
380	380000	927	0,464	20,481	2,318	0,00232
370	370000	965	0,483	19,942	2,413	0,00241
360	360000	1003	0,502	19,403	2,508	0,00251
350	350000	1041	0,521	18,864	2,603	0,00260
340	340000	1079	0,540	18,325	2,698	0,00270

GRAFIK MODULUS ELASTISITAS BETON GEOPOLIMER 30% LIMBAH MARMER SAMPEL 3

(SNI 03-4169-1996)



Nilai Modulus Elastisitas Ec	
Modulus Elastisitas Pengujian	17107,000 Mpa
Modulus Elastisitas ASTM C-469-94	17021,697 Mpa
Modulus Elastisitas SNI-2847-2019	23110,465 Mpa
Modulus Elastisitas E TEMPEST (2010)	16821,468 Mpa

Lampiran 8 Rekapitulasi Pengujian Tarik Belah pada Beton Geopolimer

LAPORAN PENGAMATAN UJI KUAT TARIK BELAH SILINDER BETON (SNI 03-2491-2002)

Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas penampang (mm2)	Beban Maksimum (N)	Kuat Tarik Belah (Mpa)	Kuat Tarik Belah Rata - rata (Mpa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BN	1	151,200	303,667	17955,333	190000	2,6344	2,817
	2	150,233	302,533	17726,479	204000	2,8574	
	3	151,833	304,600	18106,067	215000	2,9595	
BG0LM	1	150,750	304,450	17848,615	220000	3,0516	2,647
	2	150,500	308,000	17789,465	170000	2,3348	
	3	152,567	302,117	18281,389	185000	2,5552	
BG15LM	1	150,867	302,167	17876,252	222000	3,1002	3,252
	2	152,900	305,000	18361,360	257000	3,5084	
	3	151,733	306,733	18082,225	230000	3,1461	
BG20LM	1	149,700	298,500	17600,844	260000	3,7041	3,167
	2	150,900	302,200	17884,152	228000	3,1830	
	3	151,633	305,067	18058,399	190000	2,6148	
BG25LM	1	150,333	305,267	17750,086	180000	2,4970	3,132
	2	150,133	305,200	17702,889	260000	3,6124	
	3	152,833	304,300	18345,352	240000	3,2853	
BG30LM	1	150,600	299,367	17813,113	185000	2,6123	2,676
	2	150,300	300,933	17742,215	195000	2,7446	
	3	149,933	302,200	17655,754	190000	2,6696	