TUGAS AKHIR

ANALISIS KEKUATAN BETON NORMAL DENGAN *FLY ASH* DARI PLTU SUMSEL – 8 SEBAGAI PENGGANTI PARSIAL TERHADAP SEMEN (*ANALYSIS OF NORMAL CONCRETE STRENGTH USING FLY ASH FROM PLTU SUMSEL - 8 AS A PARTIAL REPLACEMENT FOR CEMENT*)

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

M. Dzaki Abiyantara
21511196

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2025

TUGAS AKHIR

ANALISIS KEKUATAN BETON NORMAL DENGAN *FLY ASH* DARI PLTU SUMSEL – 8 SEBAGAI PENGGANTI PARSIAL TERHADAP SEMEN (*ANALYSIS OF NORMAL CONCRETE STRENGTH USING FLY ASH FROM PLTU SUMSEL - 8 AS A PARTIAL REPLACEMENT FOR CEMENT*)

Disusun Oleh

M. Dzaki Abiyantara
21511196

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

Diuji tanggal 12 November 2025

Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
18/11 '25	18.11.25	19/11 25
Jafar,S.T., MURP., M.T.	**Astriana Hadidawati S. T., M. Eng.**	**Elvis Saputra S. T., M. T,**
NIK: 185111305	**NIK: 165111301**	**NIK: 205111302**

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

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

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk memenuhi salah satu persyaratan pada program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya Saya sendiri. Adapun bagian – bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian – bagian tertentu, Saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang – undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 18 November 2025

Yang membuat pernyataan,

M. Dzaki Abiyantara

(21511196)

HALAMAN DEDIKASI

Tugas Akhir ini penulis persembahkan dengan rasa suka cita dan rasa cinta kepada:

Bapak Drs. Zulkopli dan Ibu Nursuhada S. KM. yaitu Kedua Orang Tua penulis, penulis sangat berterimakasih kepada Orang Tua yang sudah sangat banyak membantu dari segala sisi dan bentuk untuk penulis hingga dapat tercapai di titik penulis dapat menyelasi Tugas Akhir ini dan juga doa yang tiada henti agar penulis dapat menyelasaikan kuliah hingga waktu yang tepat.

Kedua saudara penulis yaitu Nadylla Anzulda dan Regita Dwanti Amalia, penulis banyak berterimakasih atas bimbingan yang selalu diberikan kepada penulis agar dapat menyelasaikan kuliah dengan baik dan selalu memberikan motivasi terhadap penulis agar tetap sabar dalam menyelesaikan seluruh kegiatan selama kuliah yang dilakukan.

Dosen pembimbing penulis Bapak Jafar, S.T., MURP., M.T., penulis banyak berterimakasih kepada beliau yang dimana sering penulis repotkan atas keluhan penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini dan juga dalam meluangkan waktunya dalam membimbing serta memberikan saran agar penulis dapat menyusun Tugas Akhir ini dengan baik.

Kepada teman – teman Warga Lape, Pasukan Drama, TERSERAH, Pejuang Lab TBK, Budak Cawa serta banyak teman-teman yang tidak bisa disebutkan semua dan Seeorang dengan NIM 23611113, Penulis banyak berterimakasih serta bersyukur atas mempunyai orang – orang yang sangat suportif dan membantu selama penulis berkuliah hingga Penyusun Tugas Akhir ini.

KATA PENGANTAR

Alhamdullilah dengan puji dan rasa syukur yang senantiasa tercurahkan, sehingga Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Kekuatan Beton Normal Dengan *Fly Ash* Dari PLTU Sumsel – 8 Sebagai Pengganti Parsial Terhadap Semen". Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil Program Sarjana, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, Penulis menghadapi berbagai hambatan, namun berkat saran, kritik, bimbingan, dukungan positif, serta bantuan dari berbagai pihak, Alhamdullilah Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu, Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam – dalamnya kepada:

1. Bapak Jafar, S.T., M.T., MURP. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir,
2. Ibu Astriana Hardawati, S. T., M. Eng. selaku Dosen Penguji I,
3. Bapak Elvis Saputra S. T., M. T. selaku Dosen Penguji II
4. Keluarga, kepada orang tua saya yang sudah banyak membantu dan mendukung hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.

Akhirnya Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat memberikan banyak manfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 18 November 2025

Penulis,

M. Dzaki Abiyantara

(21511196)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL **i**
LEMBAR PENGESAHAN **ii**
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI **iii**
HALAMAN DEDIKASI **iv**
KATA PENGANTAR **v**
DAFTAR ISI **vi**
DAFTAR TABEL **x**
DAFTAR GAMBAR **xii**
DAFTAR LAMPIRAN **xiv**
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN **xv**
ABSTRAK **1**
ABSTRACT **2**
BAB I PENDAHULUAN **3**
1.1 Latar belakang 3
1.2 Rumusan Masalah 6
1.3 Tujuan Penelitian 6
1.4 Manfaat Penelitian 6
1.5 Batasan Penelitian 7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **8**
2.1 Tinjauan Umum 8
2.2 Penelitian Terdahulu 8
2.2.1 *Compressive strength and workability of concrete containing fly ash as partial replacement for cement content* (Adinna, 2020) 8
2.2.2 Pengaruh Penambahan Abu Terbang (*Fly ash*) Sebagai Subtitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Normal 30 Mpa (Anggarini, 2023) 9

2.2.3 *Experimental Investigation of Effect of Partial Replacement of Cement with Fly ash on the Workability and Mechanical Properties of Concrete* (Nkomo, 2023) 9
2.2.4 Kinerja Beton Mengandung *Fly ash* Sebagai Substitusi Parsial Semen (Augusta, 2024) 10
2.2.5 Pemanfaatan Limbah *Fly ash* Dan *Bottom ash* Sebagai Campuran Beton (Hestianita, 2024) 10
2.3 Perbandingan Penelitian 11
2.4 Keaslian Penelitian 14
BAB III LANDASAN TEORI **15**
3.1 Umum 15
3.2 Material Penyusun Beton 15
3.2.1 Agregat Halus 15
3.2.2 Agregat Kasar 15
3.2.3 *Fly ash* 16
3.2.4 Air 18
3.3 Pengujian *Properties* Agregat 18
3.3.1 Pengujian Agregat Halus 18
3.3.2 Pengujian Agregat Kasar 21
3.4 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*) 23
3.5 Pengujian *Slump* 32
3.6 Pengujian Kuat Tekan Beton 33
3.7 Pengujian Modulus Elastisitas 33
3.8 Pengujian Kuat Tarik Belah 34
3.9 Pengujian Statistik *Software* SPSS 34
BAB IV METODE PENELITIAN **36**
4.1 Umum 36
4.2 Lokasi Penelitian 36
4.3 Variabel Penelitian 36

4.4 Bahan yang Digunakan 37
4.5 Alat yang Digunakan 38
4.6 Benda Uji 39
4.7 Benda Uji *Trial* 7 hari 38
4.8 Pelaksanaan Penelitian 39
4.8.1 Persiapan Penelitian 39
4.8.2 Pengujian Material 39
4.8.3 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*) 39
4.8.4 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji 40
4.8.5 Prosedur Pengujian 40
4.8.6 Pengolahan Data 45
4.8.7 Analisis Data 45
4.8.8 Pembahasan 45
4.8.9 Kesimpulan dan Saran 45
4.8.10 Diagram Alir Penelitian 45
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 48
5.1 Pengujian Material 48
5.1.1 Hasil Pemeriksaan Pada Agregat Halus 48
5.1.2 Hasil Pemeriksaan Pada Agregat Kasar 56
5.2 Perencanaa Campuran Beton (*Mix Design*) 63
5.2.1 Hasil Perencanaan Proporsi Campuran Beton 63
5.2.2 Campuran Beton *Fly ash* 72
5.2.3 Hasil Pengujian *Slump* Beton 74
5.3 Pembuatan dan Pengujian Sampel Beton *Trial* 7 Hari 75
5.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton 77
5.4.1 Metode *Interquartile Range* (IQR) 83
5.4.2 Metode Normalitas 85

5.4.3 Metode Homogenitas 89
5.4.4 Metode Welch Anova 91
5.5 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Beton 96
5.5.1 Metode *Interquartile Range* (IQR) 105
5.5.2 Metode Normalitas 108
5.5.3 Metode Homogenitas 111
5.5.4 Metode Welch Anova 113
5.6 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah 118
5.6.1 Metode *Interquartile Range* (IQR) 121
5.6.2 Metode Normalitas 124
5.6.3 Metode Homogenitas 127
5.6.4 Metode ANOVA 128
5.7 Pembahasan 129
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN **132**
6.1 Kesimpulan 132
6.2 Saran 133
DAFTAR PUSTAKA **135**
LAMPIRAN **138**

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 2 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang 12
Tabel 3. 1 Kandungan Kimia Fly ash PLTU Sumsel – 8 17
Tabel 3. 2 Klasifikasi Kandungan Kimia Fly ash Berdasarkan Kelasnya 17
Tabel 3. 3 Klasifikasi Kelas Fly ash PLTU Sumsel - 8 17
Tabel 3. 4 Faktor Pengali Deviasi Standar 24
Tabel 3. 5 Perkiraan Kuat Tekan Beton Beton dengan Faktor Air Semen, dan Agregat Kasar yang Biasa Dipakai di Indonesia 25
Tabel 3. 6 Perkiraan Kadar Air Bebas per $m3$ (Kg/$m3$) 27
Tabel 3. 7 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus 28
Tabel 4. 1 Rincian Benda Uji Penelitian 37
Tabel 4. 2 Perbandingan Kekuatan Beton Pada Berbagai Umur 38
Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus 49
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus 52
Tabel 5. 3 Gradasi Agregat Halus 53
Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus 54
Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Halus 55
Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Lolos Saringan No. 200 (Pasir) 56
Tabel 5. 7 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar 57
Tabel 5. 8 Hasil Pengujian Analisis Saringan Agregat Kasar 59
Tabel 5. 9 Gradasi Agregat Kasar 60
Tabel 5. 10 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Kasar 62
Tabel 5. 11 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar 62
Tabel 5. 12 Perkiraan Kuat Tekan Beton (MPa) dengan Jenis Semen dan Agregat yang Digunakan di Indonesia 64
Tabel 5. 13 Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m^3) Yang Dibutuhkan Untuk Kemudahaan Dalam Adukan Beton 65

Tabel 5. 14 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus 66
Tabel 5. 15 Rekapitulasi Hasil Mix Design Beton Normal 70
Tabel 5. 16 Rekapitulasi Campuran Beton Fly ash 74
Tabel 5. 17 Hasil Pengujian Slump 74
Tabel 5. 18 Data Benda Uji 76
Tabel 5. 19 Data Pengujian 76
Tabel 5. 20 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton 79
Tabel 5. 21 Nilai Data Ascending Kuat Tekan Beton 83
Tabel 5. 22 Rekapitulasi Kuartil, IQR, dan Outlier Kuat Tekan 85
Tabel 5. 23 Perbandingan Uji Kolmogorov Smirnov Dan Shapiro Wilk Pada Asumsi Normalitas Ulang 88
Tabel 5. 24 Nilai Homogenitas 90
Tabel 5. 25 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton Setelah Penghapusan Outlier 93
Tabel 5. 26 Nilai TegangandanReganganBeton Fly ash Variasi BV-10 sampel 1 97
Tabel 5. 27 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton 103
Tabel 5. 28 Nilai Data Ascending Modulus Elastisitas Beton 106
Tabel 5. 29 Rekapitulasi Kuartil, IQR, dan Outlier Modulus Elastisitas 107
Tabel 5. 29 Perbandingan Uji Kolmogorov Smirnov Dan Shapiro Wilk Pada Asumsi Normalitas Ulang 110
Tabel 5. 31 Nilai Homogenitas 112
Tabel 5. 32 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton Setelah Pengujian Normalitas Dan Homogen 115
Tabel 5. 33 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton 119
Tabel 5. 28 Nilai Data Ascending Kuat Tarik Belah Beton 122
Tabel 5. 29 Rekapitulasi Kuartil, IQR, dan Outlier Modulus Elastisitas 123
Tabel 5. 34 Hasil Metode Shapiro Wilk Pada Asumsi Normalitas 126
Tabel 5. 35 Nilai Homogenitas 128

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Contoh fly ash 16
Gambar 3. 2 Hubungan antara kuat tekan dan faktor air semen (fas) 26
Gambar 3. 3 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm 29
Gambar 3. 4 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm 29
Gambar 3. 5 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm 30
Gambar 3. 6 Perkiraan Berat Isi Beton Basah Yang Telah Selesai Didapatkan 31
Gambar 4. 1 Sketsa Pengujian Kuat Tekan Beton 41
Gambar 4. 2 Sketsa Pengujian Modulus Elastisitas 42
Gambar 4. 3 Sketsa Pengujian Kuat Tarik Belah Beton 43
Gambar 4. 4 Diagram Alir 46
Gambar 5. 1 Kurva Gradasi Agregat Halus Daerah II 53
Gambar 5. 2 Kurva Gradasi Agregat Kasar Maksimum 10 mm 61
Gambar 5. 3 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen (Benda Uji silinder 15 x 30 cm) 65
Gambar 5. 4 Grafik Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Butir Max 10 Mm 67
Gambar 5. 5 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan 69
Gambar 5. 6 Contoh Uji Slump 75
Gambar 5. 7 Grafik Pengujian Kuat Tekan Beton 81
Gambar 5. 8 Contoh Pengujian Kuat Tekan Beton 81
Gambar 5. 9 Contoh Hasil Kuat Tekan Beton 82
Gambar 5. 10 Tabel Percentiles 84
Gambar 5. 11 Validasi Data Software SPSS Tidak Menggunakan Outlier 86
Gambar 5. 12 Hasil Pengujian Normalitas Tidak Menggunakan Oulier 86
Gambar 5. 13 Visualisasi Boxplot Tidak Menggunakan Outlier 89

Gambar 5. 14 Output Welch Anova Kuat Tekan 91
Gambar 5. 15 Grafik Nilai Kuat Tekan Beton Setelah Pengujian Statistik SPSS 95
Gambar 5. 16 Grafik Tegangan dan Regangan BV-10 Sampel 1 101
Gambar 5. 17 Contoh Pengujian Modulus Elastisitas Beton 101
Gambar 5. 18 Grafk Nilai Modulus Elastisitas Beton 105
Gambar 5. 19 Tabel Percentiles 106
Gambar 5. 20 Validasi Data Software SPSS 108
Gambar 5. 21 Hasil Pengujian Normalitas Tidak Menggunakan Oulier 109
Gambar 5. 22 Visualisasi Boxplot 111
Gambar 5. 23 Output Whelch Anova Modulus Elastisitas Beton 113
Gambar 5. 24 Grafk Nilai Modulus Elastisitas Beton Setelah Pengujian Statistik SPSS 117
Gambar 5. 24 Grafik Pengujian Kuat Tarik Belah Beton 120
Gambar 5. 25 Contoh Pengujian Kuat Tarik Belah Beton 120
Gambar 5. 26 Contoh Hasil Uji Tarik Belah Beton 121
Gambar 5. 27 Tabel Percentiles 122
Gambar 5. 28 Validasi Data Software SPSS 124
Gambar 5. 29 Hasil Pengujian Normalitas 125
Gambar 5. 31 Visualisasi Boxplot 127
Gambar 5. 14 Output ANOVA Kuat Tarik Belah Beton 129

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Keterangan Bebas Tanggungan Laboratorium	139
Lampiran 2 Surat Izin Pengambilan Semen OPC	140
Lampiran 3 Data Hasil Pemeriksaan XRF Fly ash PLTU Sumsel – 8	141
Lampiran 4 Data Hasil Pemeriksaan Agregat Halus	143
Lampiran 5 Data Hasil Perencanaan Campuran Beton	152
Lampiran 6 Data Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	154
Lampiran 7 Data Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Beton	156
Lampiran 8 Data Hasil Pengujian Tarik Belah Beton	255

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Bk	= Berat pasir kering mutlak (gram)
Bt	= Berat piknometer berisi pasir dan air (gram)
B	= Berat piknometer berisi air (gram)
BT	= Berat tertinggal (gram)
% BT	= Persentase berat tertinggal (%)
∑ BT	= Jumlah kumulatif berat tertinggal (gram)
% BT Kumulatif	= Persentase berat tertinggal kumulatif (%)
% BT Lubang Ayakan	= Persentase berat tertinggal lubang ayakan pada nomor saringan tertentu (%)
% Lolos Kumulatif	= Persentase lolos kumulatif
∑ % BT Kumulatif	= Jumlah kumulatif persentase berat tertinggal Kumulatif (%)
W_1	= Berat silinder (gram)
W_2	= Berat silinder dan agregat (gram)
W_3	= Berat agregat (gram)
V_{ol}	= volume bekisiting silinder (cm^3)
D	= Diameter silinder (cm)
T	= Tinggi silinder (cm)
BV	= Berat volume (gram/cm^3)
M	= Nilai tambah
1,64	= Tetapan statistic (nilainya disesuaikan dengan persentase kegagalan hasil uji sebesar maksimum 5%
S_r	= Deviasi standar
f'_{cr}	= Kuat tekan beton rata-rata (MPa)
$F'c$	= Kuat tekan beton rencana (MPa)
M	= Nilai tambah
w	= Kadar air bebas (Kg/m^3)

Wh	= Perkiraan jumlah air untuk agregat halus (Kg/m^3)
Wk	= Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar (Kg/m^3)
c	= Jumlah semen (Kg/m^3)
fas	= Faktor air semen
$\%Ag._{Halus}$	= Persentase agregat halus (%)
$\%Ag._{Kasar}$	= Persentase agregat kasar (%)
Ba	= Batas atas (%)
Bb	= Batas bawah (%)
BJ_{gab}	= Berat jenis relatif/gabungan agregat
$BJ_{Ag.halus}$	= Berat jenis agregat halus
$BJ_{Ag.kasar}$	= Berat jenis agregat kasar
$W._{ag.\ gab}$	= Kadar agregat gabungan (kg/m^3)
W_{beton}	= Berat isi beton (kg/m^3)
W_{semen}	= Kadar semen (kg/m^3)
$W._{ag.halus}$	= Kadar agregat halus (kg/m^3)
$W_{ag.\ kasar}$	= Kadar agregat kasar (kg/m^3)
P	= Beban maksimum (N)
A	= Luas penampang benda uji (mm^2)
Ec	= Modulus elastisitas beton (MPa)
ε_c	= Regangan longitudinal akibat tegangan S_2
S_1	= Tegangan ketika regangan 0,00005 MPa
S_2	= Tegangan pada 40% dari beban maksimum
$f'ct$	= Kuat tarik belah beton (MPa)
L	= Tinggi silinder beton (mm)

ABSTRAK

Beton dengan penambahan fly ash dari PLTU Sumsel–8 digunakan sebagai bahan pengganti parsial semen untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton normal. Pemanfaatan fly ash dari PLTU Sumsel – 8 dilakukan sebagai upaya mengurangi limbah industri semen dan batubara, khususnya pada daerah Muara Enim, Sumatera Selatan limbah fly ash menimbulkan berbagai masalah pada lingkungan sekitar. Fly ash yang digunakan tergolong tipe F berdasarkan ASTM C-618 dengan kandungan $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ sebesar 82,37% dan kadar CaO sebesar 8,71%.

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Campuran beton dirancang menggunakan metode mix design SNI 03-2834-2000 dengan kuat tekan rencana sebesar 25 MPa. Variasi kadar fly ash yang digunakan yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Setiap variasi diuji terhadap lima sampel untuk kuat tekan dan modulus elastisitas, serta tiga sampel untuk kuat tarik belah pada umur 28 hari.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran beton menghasilkan kuat tekan di atas mutu rencana 25 MPa. Nilai kuat tekan meningkat 21,33 % dimana tertinggi diperoleh pada variasi BV-20 sebesar 48,595 MPa, sedangkan terendah pada beton normal (BN) sebesar 40,051 MPa. Nilai modulus elastisitas meningkat 20,39% dimana tertinggi terjadi pada variasi BV-20 sebesar 31936,656 MPa dan terendah pada BN sebesar 26529,957 MPa. Sementara itu, kuat tarik belah meningkat 30,67% dimana tertinggi terdapat pada variasi BV-05 sebesar 3,598 MPa dan terendah pada BN sebesar 2,494 MPa. Peningkatan kadar fly ash hingga 20% memperbaiki kekuatan tekan dan hingga 15% meningkatkan modulus elastisitas akibat efek pengisian (filler effect) dan reaksi pozzolanik, sedangkan kadar optimum untuk kuat tarik belah terjadi pada 5%.

Kata kunci: Fly Ash, Beton Normal, Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Modulus Elastisitas, PLTU Sumsel–8.

ABSTRACT

Concrete incorporating fly ash from PLTU Sumsel–8 was used as a partial replacement for cement to analyze its effect on the compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of elasticity of normal concrete. The utilization of fly ash from PLTU Sumsel–8 is intended to reduce industrial waste generated from cement and coal-based power production, particularly in the Muara Enim region of South Sumatra, where fly ash disposal has caused various environmental problems. The fly ash used is classified as Type F based on ASTM C-618, containing 82.37% of $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ and 8.71% of CaO.

The research was conducted at the Construction Materials Laboratory, Faculty of Civil Engineering and Planning, Islamic University of Indonesia. The concrete mixture was designed using the SNI 03-2834-2000 mix design method with a target compressive strength of 25 MPa. The variations of fly ash used were 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by weight of cement. Each variation was tested on five specimens for compressive strength and modulus of elasticity, and three specimens for splitting tensile strength at the age of 28 days.

The results showed that all concrete variations achieved compressive strength values above the design strength of 25 MPa. The compressive strength increased by 21.33%, with the highest value of 48.595 MPa obtained at the 20% fly ash variation (BV-20), while the lowest value was found in normal concrete (BN) at 40.051 MPa. The elastic modulus increased by 20.39%, with the highest value of 31,936.656 MPa recorded at BV-20 and the lowest of 26,529.957 MPa in BN. Meanwhile, the splitting tensile strength increased by 30.67%, with the highest value of 3.598 MPa at BV-05 and the lowest of 2.494 MPa in BN. Increasing the proportion of fly ash up to 20% improved the compressive strength and up to 15% enhanced the modulus of elasticity due to the filler effect and pozzolanic reaction, while the optimum splitting tensile strength was achieved at 5%.

Keywords: *Fly Ash, Normal Concrete, Compressive Strength, Splitting Tensile Strength, Modulus Of Elasticity, PLTU Sumsel–8.*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Berdasarkan SNI 03-2834-2000, beton merupakan campuran antara semen *portland* atau semen hidrolik lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat. Sesuai dengan SNI 03-2834-2000, beton normal memiliki berat isi antara 2200 hingga 2500 kg/m^3 dan menggunakan agregat alam yang dipecah. Beton normal memiliki kekuatan tekan antara 17 MPa – 40 MPa. Keunggulan beton dalam menopang beban berat dan menghadapi kondisi cuaca yang ekstrem sangat sesuai dengan kebutuhan pembangunan di berbagai wilayah Indonesia, mulai dari perkotaan hingga daerah terpencil.

Pesatnya perkembangan pembangunan dan kemajuan teknologi tidak selalu diikuti dengan pengelolaan limbah yang optimal, limbah yang dihasilkan tersebut berpotensi mencemari lingkungan. Industri semen adalah salah satu industri yang membutuhkan energi dalam jumlah besar. Industri semen memiliki emisi karbon dioksida yang dimana menjadi salah satu komponen terbesar gas rumah kaca. Proses produksi semen menghasilkan limbah kimia berbahaya yang berpotensi mencemari saluran drainase di sekitarnya. Limbah dari industri semen ini dapat menurunkan kualitas lingkungan, terutama dengan menyebabkan pencemaran pada sistem drainase di area permukiman (Sari, 2025).

Masalah limbah batu bara di Indonesia contohnya di Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Dampak negatif yang sering terjadi akibat pertambangan batu bara di Muara Enim antara lain deforetasi, kerusakan ekosistem, pencemaran air dan udara, serta kerusakan tanah (Wiradinata, 2025). Permasalahan ini menjadi perhatian karena produksi batu bara yang masif menghasilkan *fly ash* sebagai limbah sisa pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap. *Fly ash* yang tidak dikelola dengan baik dapat mencemari lingkungan yang cukup membahayakan terutama pada polusi udara.

Berdasarkan PP. No.85 tahun 1999 tentang pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), *fly ash* dan *bottom ash* dikategorikan sebagai limbah B3 karena terdapat kandungan oksida logam berat yang akan mengalami pelindihan secara alami dan mencemari lingkungan. Namun, *Fly ash* saat ini sudah tidak lagi termasuk dalam kategori limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), sebagaimana tercantum dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Penghapusan status B3 ini didasarkan pada hasil uji karakteristik limbah, seperti *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP), yang menunjukkan bahwa *fly ash* dari pembakaran batu bara tidak memiliki sifat beracun, korosif, reaktif, atau mudah menyala. Selain itu, *fly ash* yang berasal dari sistem pembakaran modern seperti *Pulverized Coal Boiler* (PC) dinilai stabil dan aman untuk dimanfaatkan, khususnya dalam industri konstruksi.

Keputusan ini menciptakan kesempatan untuk memanfaatkan *fly ash* sebagai material konstruksi yang lebih luas, sehingga dapat mengurangi limbah industri dan mendukung praktik pembangunan yang berkelanjutan. Dengan statusnya yang tidak lagi dianggap sebagai limbah berbahaya, *fly ash* dapat digunakan lebih efisien dalam campuran beton, yang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada semen konvensional, tetapi juga meningkatkan sifat mekanik dan daya tahan pada beton. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengganti parsial semen dalam campuran beton, untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kekuatan, durabilitas, serta efisiensi penggunaan material ramah lingkungan dalam sektor bangunan.

Secara global pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* masih tergolong rendah, yaitu hanya sekitar 25% dari total abu batu bara yang dihasilkan. Sisanya, sekitar 75% abu tersebut dibuang sebagai limbah yang dimana mencemari lingkungan. Sedangkan, untuk di Indonesia tingkat pemanfaatan *fly ash* berkisar antara 10 – 20% dengan 73% dari jumlah tersebut diolah di Pulau Jawa. Sementara, pemanfaatan *fly ash* di luar Pulau Jawa kurang dari 30% (Permatasari, 2024).

Salah satu solusi inovatif adalah penggunaan *fly ash* sebagai pengganti parsial semen dalam produksi beton. *Fly ash* merupakan sisa pembakaran batu bara di

PLTU yang berbentuk partikel halus dan bersifat pozzolan, sifat dari pozzolan yang mengandung banyak unsur silikat dan aluminat reaktif, sehingga dapat menggantikan kandungan semen *portland* karena adanya kandungan unsur silikat (SiO2) dan aluminat (Al2O3). Selain itu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida untuk membentuk senyawa yang meningkatkan kekuatan serta durabilitas beton. Penggunaannya juga lebih ramah lingkungan karena mengurangi kebutuhan semen dan memanfaatkan limbah industri (Anggarini, 2023).

Fly ash terbagi menjadi dua jenis, yaitu kelas F dan kelas C. *Fly ash* kelas F berasal dari pembakaran batu bara *anthracite* atau *bituminous*, memiliki kadar kapur rendah (CaO < 10%) dan bersifat *pozzolanic* namun memerlukan bahan tambahan seperti kapur atau semen untuk bereaksi. Sedangkan kelas C, dari batu bara *lignite* atau *sub-bituminous*, memiliki sifat *self-cementing* dan dapat mengeras hanya dengan air tanpa tambahan kapur. Biasanya mengandung kapur (CaO > 20%) (Wardani, 2008). Penggunaan *fly ash* kelas F lebih disarankan dibandingkan dengan kelas C, terutama untuk struktur beton yang memerlukan daya tahan tinggi dan berada di lingkungan yang agresif. Hal ini disebabkan oleh *fly ash* kelas F yang memiliki ketahanan terhadap sulfat yang lebih baik, menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah, serta lebih stabil dalam jangka panjang (Sudarsono, 2023).

Pada penelitian ini beton campuran *fly ash* akan dilakukan pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik belah. Pada pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas sampel dibuat sebanyak 5 buah. sedangkan, pengujian kuat tarik belah akan dibuat sebanyak 3 buah. *Fly ash* yang digunakan pada penelitian ini berasal dari PLTU Sumsel – 8. *Fly ash* dengan volume tinggi cenderung meningkatkan durabilitas dan ketangguhan beton, tetapi memperlambat proses hidrasi awal karena sifatnya yang pozzolanik (Purnamasari, 2025). Sehingga, digunakan variasi *fly ash* yang berbeda, yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen agar dapat mengetahui perubahan sifat mekanik beton pada kadar terkecil sampai terbesar dari *fly ash*. Setiap sampel akan dilakukan pengujian setelah berumur 28 hari dengan uji tekan, uji tarik belah, dan modulus elastisitas. Berdasarkan SNI 03-2834-2000, mutu beton rencana adalah 25 MPa. Mutu beton rencana tersebut sudah termasuk syarat kelompok beton mutu normal.

Berdasarkan permasalahan yang dijabarkan diatas dapat diketahui jika pemanfaatan *fly ash* sebagai pengganti parsial semen dalam campuran beton merupakan solusi inovatif yang ramah lingkungan. *Fly ash* dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan durabilitas dan kekuatan jangka panjang pada beton. Maka dari itu, hal ini menjadi pertimbangan latar belakang penulis untuk melakukan penelitian yang berjudul "Analisis Kekuatan Beton Normal Dengan *Fly ash* PLTU Sumsel - 8 Sebagai Pengganti Parsial Terhadap Semen".

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton?
2. Bagaimana pengaruh *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tarik belah beton?
3. Berapa jumlah kadar variasi *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen yang menghasilkan nilai mutu beton tertinggi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang tertera diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton dan modulus elastisitas beton
2. Mengetahui pengaruh *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tarik belah beton
3. Mengetahui jumlah kadar variasi *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen yang menghasilkan nilai mutu beton tertinggi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui pengaruh *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton, kuat tarik belah beton, dan modulus elastisitas beton.

2. Untuk mengetahui besar presentase *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton, kuat tarik belah beton, dan modulus elastisitas beton.

1.5 Batasan Penelitian

Adanya batasan penelitian ini untuk memastikan pada penelitian yang sedang dilakukan tetap sesuai dengan sasaran penelitian. Berikut mengenai batasan penelitian ini.

1. Metode Mix Design digunakan SNI 03-2834-2000.
2. Variabel tetap yaitu dari bentuk sampel, jenis agregat, dimensi benda uji, mutu beton rencana (*f'c*).
3. Variabel bebas yaitu *fly ash* (0%, 5%, 10%, 15%. 20% dari berat semen).
4. Variabel terikat yaitu pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik belah.
5. Kuat tekan beton rencana adalah f'_c = 25 MPa
6. Semen yang digunakan adalah semen OPC Tipe I merek Tiga Roda.
7. *Fly ash* digunakan berasal dari PLTU Sumsel – 8 dengan *fly ash* Tipe F.
8. Air berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
9. Benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.
10. Benda uji untuk pengujian kuat tekan, modulus elastisitas setiap variasi berjumlah 5 buah dan pengujian kuat tarik belah setiap variasi berjumlah 3 buah.
11. Pengujian beton dilakukan ketika beton mencapai 28 hari dan beton trial umur 7 hari.
12. Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Menurut SNI 03-2834-2000, beton merupakan campuran antara semen *Portland* atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air dengan atau tampa bahan tambah membentuk massa padat. Semen berfungsi sebagai perekat antara agregat yang dimana akan bereaksi jika dicampur dengan air. Agregat terbagi menjadi agregat kasar dan agregat halus, agregat kasar adalah kerikil dari batu atau berupa batu pecah berukuran 5 mm – 40 mm, dan agregat halus adalah pasir dengan ukuran butir terbesar 5,0 mm.

2.2 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu mengenai penggunaan serbuk kaca, *fly ash*, *silica fume* dan bahan tambahan lain pada campuran beton yang pernah dilakukan. Dalam penelitian ini, diperlukan jurnal – jurnal sebelumnya sebagai pendukung penelitian ini dapat dilakukan. Berikut beberapa jurnal yang membantu dilakukannya penelitian ini.

2.2.1 *Compressive strength and workability of concrete containing fly ash as partial replacement for cement content* (Adinna, 2020)

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggantian sebagian semen dengan *Fly ash* terhadap sifat mekanik dan *workability* beton. Dalam penelitian ini, variasi kadar *Fly ash* dalam campuran beton digunakan, yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, dan 60%, untuk menentukan dampaknya terhadap kekuatan tekan dan *workability*. Tujuan lainnya adalah untuk meningkatkan pemahaman mengenai potensi *Fly ash* sebagai bahan tambahan dalam beton, serta untuk mendorong penggunaan *Fly ash* sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan dalam industri konstruksi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi mengenai kadar optimal *Fly ash* yang dapat digunakan dalam campuran beton untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan dan

workability, serta untuk mengurangi dampak lingkungan dari limbah industri. Dengan demikian, penelitian ini dapat mendorong para insinyur dan pengambil keputusan untuk mempertimbang.kan penggunaan *Fly ash* sebagai alternatif yang berkelanjutan dalam produksi beton, serta untuk mendukung pengembangan industri konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

2.2.2 Pengaruh Penambahan Abu Terbang (*Fly ash*) Sebagai Subtitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Normal 30 Mpa (Anggarini, 2023)

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis pengaruh penambahan *Fly ash* sebagai substitusi sebagian semen terhadap kekuatan tekan beton mutu normal dengan target kekuatan 30 MPa. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan persentase optimal *Fly ash* yang dapat ditambahkan ke dalam campuran beton, yang diuji pada variasi 0%, 4%, 8%, dan 12%. Dengan menggunakan metode eksperimen, penelitian ini akan mengukur kekuatan tekan beton pada umur 28 hari untuk setiap variasi campuran. Melalui pengujian laboratorium yang sistematis, diharapkan penelitian ini dapat memberikan data yang komprehensif mengenai perubahan kekuatan tekan beton akibat penggunaan *Fly ash*, yang merupakan limbah industri, serta mengeksplorasi potensi *Fly ash* dalam meningkatkan sifat mekanik beton, seperti durabilitas dan ketahanan terhadap lingkungan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengurangi penggunaan semen yang berlebihan, yang dapat berdampak positif terhadap biaya dan keberlanjutan lingkungan.

2.2.3 *Experimental Investigation of Effect of Partial Replacement of Cement with Fly ash on the Workability and Mechanical Properties of Concrete* (Nkomo, 2023)

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis pengaruh penggantian sebagian semen dengan *Fly ash* terhadap sifat kerja dan sifat mekanik beton, dengan variasi kadar *Fly ash* yang digunakan yaitu 15%, 20%, 25%, dan 30%. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengeksplorasi potensi pengurangan biaya produksi beton dan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi semen. Dengan memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana variasi kadar *Fly ash* dalam campuran beton dapat mempengaruhi

berbagai parameter penting, seperti nilai *slump*, kekuatan tekan, kekuatan tarik belah, dan kekuatan lentur beton, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang berguna bagi industri konstruksi dalam upaya mengembangkan beton yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2.2.4 Kinerja Beton Mengandung *Fly ash* Sebagai Substitusi Parsial Semen (Augusta, 2024)

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis kinerja beton yang mengandung *Fly ash* sebagai substitusi parsial semen dalam campuran beton. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh variasi kadar *Fly ash*, yaitu 5%, 10%, dan 15%, terhadap beberapa sifat mekanik beton, termasuk kekuatan tekan, kuat tarik belah, penyerapan, dan modulus elastisitas pada umur 3 hari dan 28 hari. Dengan membandingkan hasil pengujian beton yang menggunakan *Fly ash* dengan beton normal, penelitian ini ingin mengidentifikasi kadar optimal *Fly ash* yang dapat digunakan tanpa mengorbankan kualitas beton. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memahami bagaimana penambahan *Fly ash* dapat mempengaruhi kinerja beton, terutama dalam hal kekuatan dan daya tahan terhadap kondisi lingkungan.

2.2.5 Pemanfaatan Limbah *Fly ash* Dan *Bottom ash* Sebagai Campuran Beton (Hestianita, 2024)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai bahan substitusi dalam campuran beton memiliki dampak signifikan terhadap kekuatan tekan beton. Beton tanpa campuran mencapai kekuatan tekan sekitar 324 kg/cm² pada umur 28 hari. Namun, pada variasi 7,5% *fly ash* dan *bottom ash*, kekuatan tekan menurun menjadi sekitar 281 kg/cm². Penurunan yang lebih besar terlihat pada variasi 15% dan 22,5%, dengan kekuatan tekan masing-masing sebesar 237 kg/cm² dan 212 kg/cm². Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan persentase substitusi *fly ash* dan *bottom ash* berhubungan dengan penurunan kekuatan tekan beton, yang disebabkan oleh berkurangnya proporsi semen dan agregat halus dalam campuran. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun *fly ash* dan *bottom ash* dapat digunakan dalam

campuran beton, penting untuk mempertimbangkan proporsi yang tepat agar kualitas beton tetap terjaga.

2.3 Perbandingan Penelitian

Perbandingan Penenelitian dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2. 1 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang

Peneliti	**B.O Adinna (2020)**	**Anggarini (2023)**	**Nkomo (2023)**
Judul Penelitian	*Compressive strength and workability of concrete containing fly ash as partial replacement for cement content*	Pengaruh Penambahan Abu Terbang (*Fly ash*) Sebagai Subtitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Normal 30 Mpa	*Experimental Investigation of Effect of Partial Replacement of Cement with Fly ash on the Workability and Mechanical Properties of Concrete*
Tujuan Penelitian	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis pengaruh penggantian sebagian semen dengan *Fly ash* terhadap sifat kerja dan sifat mekanik beton. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengeksplorasi potensi pengurangan biaya produksi beton dan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi semen.	Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi penggunaan *fly ash*, yang merupakan limbah hasil pembakaran batubara, dalam mengurangi dampak lingkungan dari produksi semen. Penelitian ini diharapkan dapat mengurangi limbah dari pembangkit listrik dan mendukung keberlanjutan dalam industri konstruksi, serta memberikan kontribusi pada aspek teknis dan lingkungan dalam penggunaan material konstruksi.	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis pengaruh penggantian sebagian semen dengan *Fly ash* terhadap sifat kerja dan sifat mekanik beton. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengeksplorasi potensi pengurangan biaya produksi beton dan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi semen.
Pengujian	Kuat Tekan Beton	Kuat Tekan Beton	Kuat Tekan Beton, Kuat Tarik Belah, Kuat Lentur Beton
Kuat Tekan Rencana	20 MPa	30 MPa	-
Kadar Fly Ash	0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, dan 60%.	0%, 4%, 8%, dan 12%	15%, 20%, 25%, dan 30%
Umur Pengujian	7, 14, 21, dan 28 hari	28 hari	14 dan 28 hari
Hasil Penelitian	Kekuatan beton pada umur 28 hari menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya kandungan *fly ash* dalam campuran, namun peningkatan ini hanya berlangsung hingga kadar *fly ash* mencapai 20%. Setelah titik tersebut, kekuatan beton mulai menurun secara bertahap hingga mencapai setengah dari nilai awal pada tingkat penggantian semen sebesar 60%. Sebagai ilustrasi, kekuatan awal dan akhir beton pada umur 7 hari dan 28 hari untuk beton tanpa penggantian semen (0% *fly ash*), yang juga berfungsi sebagai beton kontrol, masing-masing adalah 11,1 N/mm² dan 21,3 N/mm². Ketika kandungan *fly ash* ditingkatkan menjadi 10%, kekuatan tersebut meningkat menjadi 13,2 N/mm² dan 24,3 N/mm². Namun, pada tingkat penggantian 60%, kekuatan beton menurun signifikan menjadi 6,7 N/mm² pada 7 hari dan 14,4 N/mm² pada 28 hari.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tekan beton pada umur 28 hari untuk campuran beton normal (tanpa penambahan *fly ash*) mencapai 30,36 MPa. Sementara itu, kekuatan tekan untuk campuran dengan penambahan *fly ash* bervariasi, di mana campuran dengan 4% *fly ash* (V4) menghasilkan kekuatan tekan sebesar 13,20 MPa, campuran dengan 8% *fly ash* (V8) mencapai 12,54 MPa, dan campuran dengan 12% *fly ash* (V12) hanya mencapai 11,31 MPa.	Penambahan *fly ash* sebesar 15% menghasilkan peningkatan kuat tekan beton, namun penambahan lebih dari persentase tersebut hingga 30% justru menurunkan kuat tekan, meskipun seluruh campuran dengan *fly ash* tetap menunjukkan kuat tekan yang lebih tinggi dibanding beton kontrol. Kuat tarik belah meningkat seiring penambahan *fly ash*, dengan nilai tertinggi sebesar 2,35 N/mm² pada 20% *fly ash*. Kuat lentur juga meningkat dengan penambahan *fly ash*, mencapai maksimum 5,94 N/mm² pada 15% *fly ash*, hampir dua kali lipat dibanding beton kontrol, namun penambahan lebih dari 15% berdampak negatif terhadap kuat lentur.

Lanjutan, Tabel 2. 2 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang

Peneliti	Augusta (2024)	Hestianita (2024)	M. Dzaki Abiyantara (2025)
Judul Penelitian	Kinerja Beton Mengandung *Fly ash* Sebagai Substitusi Parsial Semen	Pemanfaatan Limbah *Fly ash* Dan *Bottom ash* Sebagai Campuran Beton	Analisis Kekuatan Beton Normal Dengan *Fly ash* Sebagai Pengganti Parsial Terhadap Semen
Tujuan Penelitian	Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja beton yang mengandung *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen, dengan fokus pada pengaruh variasi persentase *fly ash* terhadap sifat mekanik beton, seperti kekuatan tekan dan tarik belah. Metode yang digunakan meliputi pengujian beton dengan substitusi *fly ash* dari total berat semen, untuk menentukan proporsi optimal yang memenuhi standar mutu K-300 dan mendukung praktik konstruksi ramah lingkungan.	Penelitian ini bertujuan untuk menentukan seberapa besar pengaruh penambahan *fly ash* dan *bottom ash* terhadap kualitas beton, serta untuk menemukan proporsi optimal yang dapat digunakan tanpa mengorbankan kekuatan dan daya tahan beton.Penelitian ini menggunakan metode pengujian beton dengan variasi substitusi *fly ash* dan *bottom ash* dari total berat semen.	Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *fly ash* sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik belah dengan menggunakan variasi kadar *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 Tipe F.
Pengujian	Kuat Tekan Beton, Kuat Tarik Belah, Modulus Elastisitas, Penyerapan Beton	Kuat Tekan Beton	Kuat Tekan, Tarik Belah, dan Modulus Elastisitas
Kuat Tekan Rencana	20 MPa	25 MPa	25 Mpa
Kadar Fly Ash	5%, 10%, dan 15%	0%, 7,5%, 15%, dan 22,5%	0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%
Umur Pengujian	3 dan 28 hari	14, 21, dan 28 hari	28 hari
Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja beton yang mengandung *fly ash* sebagai substitusi parsial semen bervariasi tergantung pada persentase *fly ash*. Beton normal (tanpa *fly ash*) mencapai kekuatan tekan sekitar 310 kg/cm² pada umur 28 hari. Kekuatan tekan tertinggi tercatat pada variasi 5% (±340 kg/cm²), diikuti oleh variasi 10% (±300 kg/cm²), dan terendah pada variasi 15% (±225 kg/cm²). Pengujian kekuatan tarik belah juga menunjukkan pola serupa, dengan nilai tertinggi pada variasi 5% (±349 kg/cm²) dan terendah pada variasi 15% (±251 kg/cm²). Semua variasi memenuhi standar maksimal penyerapan 2,5%, dan modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada variasi 5% (±285 kg/cm²).	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai substitusi dalam campuran beton mempengaruhi kekuatan tekan beton secara signifikan. Beton normal (tanpa campuran) mencapai kekuatan tekan sekitar 324 kg/cm² pada umur 28 hari. Pada variasi 7,5% *fly ash* dan *bottom ash*, kekuatan tekan tercatat sekitar 281 kg/cm², yang menunjukkan penurunan dibandingkan beton normal. Sementara itu, pada variasi 15% dan 22,5%, kekuatan tekan masing-masing tercatat sekitar 237 kg/cm² dan 212 kg/cm², yang menunjukkan penurunan yang lebih signifikan.	Penggunaan *fly ash* dari PLTU Sumsel–8 sebagai pengganti parsial semen terbukti meningkatkan kekuatan beton. Kuat tekan tertinggi diperoleh pada BV-20 sebesar 48,595 MPa, sedangkan beton normal (BN) hanya 40,051 MPa. Nilai modulus elastisitas tertinggi terdapat pada BV-15 sebesar 31.936,656 MPa, dan kuat tarik belah tertinggi pada BV-05 sebesar 3,598 MPa. Peningkatan ini dipengaruhi oleh reaksi pozzolanik dan efek pengisian (*filler effect*) partikel halus *fly ash* yang memperpadat struktur beton. Kadar optimum *fly ash* diperoleh sebesar 5% untuk kuat tarik belah dan modulus elastisitas, serta 20% untuk kuat tekan.

2.4 Keaslian Penelitian

Penelitian ini melibatkan tiga pengujian utama, yaitu kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton pada umur 28 hari, untuk menilai performa mekanik beton dengan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen. Variasi *fly ash* yang digunakan sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen, dengan target kuat tekan 25 MPa sesuai mutu beton normal (K-300). Pemilihan rentang variasi ini didasarkan pada hasil penelitian B. O. Adinna (2020) dimana nilai tertinggi kuat tekan pada kadar *fly ash* 20%. Keunikan penelitian ini terletak pada penggunaan *fly ash* dari PLTU Sumsel–8 yang memiliki karakteristik berbeda, serta analisis menyeluruh terhadap sifat mekanik beton. Selain menilai peningkatan kekuatan, penelitian ini juga bertujuan memanfaatkan limbah industri PLTU Sumsel–8 sebagai bahan pengganti semen yang bernilai guna tinggi, sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan melalui penerapan konsep *green concrete* di Indonesia.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fly ash dari PLTU Sumsel–8 sebagai pengganti parsial semen berpengaruh positif terhadap kekuatan mekanik beton. Nilai kuat tekan beton normal (BN) sebesar 40,051 MPa meningkat pada campuran fly ash, dengan nilai tertinggi pada variasi BV-20 sebesar 48,595 MPa. Nilai modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada variasi BV-15 sebesar 31936,656 MPa, sedangkan secara teoritis tertinggi pada BV-20 sebesar 32639,817 MPa. Peningkatan kekuatan ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara fly ash dan kalsium hidroksida yang membentuk senyawa C–S–H serta efek pengisian partikel halus yang memperpadat struktur beton. Untuk kuat tarik belah, nilai tertinggi diperoleh pada variasi BV-05 sebesar 3,598 MPa, kemudian menurun pada kadar lebih tinggi akibat berkurangnya semen aktif dan reaksi pozzolanik yang belum optimal. Berdasarkan hasil tersebut, kadar fly ash optimum berbeda untuk tiap parameter, yaitu 5% untuk kuat tarik belah dan modulus elastisitas, serta 20% untuk kuat tekan, yang menunjukkan bahwa proporsi rendah efektif meningkatkan sifat tarik dan elastisitas, sedangkan proporsi tinggi lebih optimal untuk kekuatan tekan beton.

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Umum

Beton adalah hasil kombinasi dari semen *portland*, agregat halus, agregat kasar, dan air. Pemilihan campuran bahan untuk beton harus mempertimbangkan keberhasilan dalam menghasilkan beton segar yang mudah dikerjakan, memiliki kekuatan tekan yang memadai setelah mengeras, serta bersifat ekonomis. Dalam campuran beton, ditambahkan bahan tambahan (*additif*) kimia atau fisik dalam proporsi tertentu, sehingga membentuk satu kesatuan yang homogen dan mengeras seperti batu yang dimana proses pengerasan ini terjadi melalui reaksi kimia antara semen dan air (Septiani, 2024).

3.2 Material Penyusun Beton

Adapun material yang digunakan dalam pembuatan beton normal berupa agregat halus, agregat kasar, *fly ash*, dan air. Berikut merupakan penjelasan material penyusun beton tersebut.

3.2.1 Agregat Halus

Agregat halus yang sering digunakan yaitu pasir, yang dimana sebagai salah satu material beton. Pasir merupakan material yang fungsinya sebagai bahan pengisi (*filler*) pada campuran beton, yang berfungsi untuk mengikat agregat pasir dengan pasta semen. Menurut SNI 03-2834-2000, agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil desintegrasi secara alami dari batu atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5 mm.

3.2.2 Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan berupa kerikil, yang dimana berfungsi sebagai komponen struktur untuk penguat pada beton. Menurut SNI 03-2834-2000, agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil desintegrasi alami dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm – 40 mm.

3.2.3 *Fly ash*

Fly ash merupakan limbah sampingan yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap dan terbukti efektif sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Penggunaan *fly ash* dapat meningkatkan sifat mekanik dan fisik beton sekaligus mengurangi penggunaan semen *portland*, sehingga menurunkan jejak karbon beton secara keseluruhan (Marpaung, 2025).

Gambar 3. 1 Contoh *fly ash*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan ASTM C-618, *fly ash* merupakan residu berbentuk butiran halus yang dihasilkan dari sisa pembakaran batu bara bubuk. *Fly ash* dikategorikan menjadi 2, yaitu *fly ash* kelas F dan kelas C. *Fly ash* kelas F berasal dari pembakaran batu bara *bituminus* atau *antrasit*, material ini memberikan efek pengisian yang bermanfaat dan dapat meningkatkan daya tahan beton. Sedangkan, *fly ash* kelas C berasal dari pembakaran *lignit* atau batu bara *sub-bituminus*, material ini memberikan reaksi waktu ikat yang relatif lebih cepat.

Pada penelitian ini, *fly ash* yang digunakan berasal dari PLTU Sumsel – 8 dan tergolong sebagai *fly ash* Tipe F. Penyajian komposisi kimia *fly ash* dari PLTU Sumsel – 8 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Kandungan Kimia *Fly ash* PLTU Sumsel – 8

No	Parameter	Hasil Uji *Fly ash*	Satuan
1	Silika (SiO_2)	52,66	%
2	Alumina (AI_2O_3)	21,42	%
3	Besi Oksida (Fe_2O_3)	8,29	%
4	Kalsium Oksida (CaO)	8,71	%
5	Sulfur Trioksida (SO_3)	3,35	%

(Sumber: Dokumen PLTU Sumsel – 8)

Berdasarkan ASTM C-618, klasifikasi kandungan kimia pada *fly ash* Tipe F dan Tipe C dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Klasifikasi Kandungan Kimia *Fly ash* Berdasarkan Kelasnya

Kandungan	Kelas	
	F	C
$SiO_2 + AI_2O_3 + Fe_2O_3$, minimal, %	70,0	50,0
SO_3, Maksimal, %	5,0	5,0
CaO	<10	>20

(Sumber: ASTM C-618)

Berdasarkan Tabel 3.2, klasifikasi *fly ash* dapat ditentukan apakah termasuk dalam kelas F atau kelas C dengan mengacu pada kandungan kimia yang telah disajikan pada Tabel 3.1. Penentuan kelas *fly ash* tersebut disajikan pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3. 3 Klasifikasi Kelas *Fly ash* PLTU Sumsel - 8

Kandungan	Hasil Uji	Kelas	
		F	C
$SIO_2 + AI_2O_3 + Fe_2O_3$, minimal, %	82,37%	✓	
SO3, Maksimal, %	3,55%	✓	
CaO	8,71%	✓	

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Tabel 3.3, dapat disimpulkan bahwa *fly ash* berasal dari PLTU Sumsel–8 memenuhi kriteria sebagai *Fly ash* Tipe F. Hal ini dibuktikan dengan tingginya kandungan gabungan senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) yang mencapai 82,37%, melebihi batas minimum 70% sebagaimana ditetapkan dalam standar ASTM C-618. Selain itu, kandungan sulfur trioksida (SO_3) sebesar 3,55% masih berada di bawah batas maksimum 5,00%, serta kadar kalsium oksida (CaO) sebesar 8,71% yang juga berada di bawah 10%, sesuai dengan karakteristik *Fly ash* Tipe F.

3.2.4 Air

Dalam campuran beton, jumlah air yang dibutuhkan harus dihitung dengan tepat agar mencapai tingkat kelecakan sesuai dengan perencanaan. Air merupakan salah satu bahan penyusun beton, sehingga air yang digunakan tidak boleh mengandung kotoran. Hal ini karena kotoran dapat mengganggu proses hidrasi dan pengikatan semen, menurunkan kekuatan dan daya tahan beton, menyebabkan perubahan volume yang berpotensi menimbulkan retakan, serta menimbulkan bercak pada permukaan beton.

3.3 Pengujian *Properties* Agregat

Agregat merupakan salah satu material penyusun beton yang terdiri dari agregat halus berupa pasir dan agregat kasar berupa kerikil. Agregat tersebut perlu dilakukan pengujian untuk memenuhi persyaratan sebagai material penyusun beton. Berikut merupakan penjelasan mengenai pengujian *properties* agregat.

3.3.1 Pengujian Agregat Halus

Pengujian yang dilakukan berupa pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air, pemeriksaan berat volume gembur dan padat agregat halus, pemeriksaan analisis saringan, serta pemeriksaan lolos saringan nomor 200 atau pemeriksaan kadar lumpur pada pasir.

1. Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

   Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 1970-1990 dengan berat material sebesar 500 gram. Tujuan pengujian ini untuk mendapatkan nilai dari berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu

dan persentase penyerapan air pada agregat halus. Pada pengujian ini diperlukan adanya perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.1 sampai Persamaan 3.4 berikut.

Berat jenis curah $= \frac{B_k}{(B+500-B_t)}$ (3.1)

Berat jenis kering permukaan $= \frac{500}{(B+500-B_t)}$ (3.2)

Berat jenis semu $= \frac{B_k}{(B+Bk-B_t)}$ (3.3)

Persentase penyerapan air $= \frac{500-B_k}{B_k} \times 100\%$ (3.4)

Keterangan:

B_k = Berat pasir kering mutlak (gram)

B_t = Berat piknometer berisi pasir dan air (gram)

B = Berat piknometer berisi air (gram)

2. Pemeriksaan Analisis Saringan Agregat Halus

Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 1968-1990 dengan berat sampel pengujian sebesar 2000 gram pada keadaan kering oven. Tujuan pengujian ini untuk mengetahui kondisi material pasir dan keberagaman dari butiran pasir berdasarkan gradasi yang sesuai dengan ketentuan. Pengujian ini menggunakan saringan dimulai dari lubang ayakan 4,75 mm (No. 4); 2,36 mm (No. 8); 1,18 mm (No. 16); 0,600 mm (No. 30); 0,300 mm (No. 50); 0,150 mm (No. 100); pan dan tutup saringan. Pengujian ini juga diperlukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.5 sampai Persamaan 3.8 berikut.

%BT $= \frac{BT}{\sum BT} \times 100\%$ (3.5)

% BT Kumulatif = % BT sebelumnya + % BT lubang ayakan (3.6)

% Lolos Kumulatif = 100% – % BT kumulatif (3.7)

$$\text{MHB} = \frac{\sum \%BT\ Kumulatif}{100} \quad (3.8)$$

Keterangan:

BT = Berat tertinggal (gram)

% BT = Persentase berat tertinggal (%)

∑ BT = Jumlah kumulatif berat tertinggal (gram)

% BT Kumulatif = Persentase berat tertinggal kumulatif (%)

% BT Lubang Ayakan = Persentase berat tertinggal lubang ayakan pada nomor saringan tertentu (%)

% Lolos Kumulatif = Persentase lolos kumulatif

∑ % BT Kumulatif = Jumlah kumulatif persentase berat tertinggal Kumulatif (%)

MHB = Modulus halus butir

3. Pemeriksaan Berat volume Gembur dan Padat Agregat Halus

Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 4804-1998 dengan tujuan untuk mengetahui klasifikasi agregat halus berdasarkan dari berat volume dan pengaruh pemadatan terhadap berat volume. Berat volume gembur dapat diartikan sebagai rasio antara massa agregat dan volume dalam kondisi gembur, sedangkan berat volume padat didefinisikan sebagai rasio antara massa agregat dan volume dalam kondisi padat. Pengujian ini diperlukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.9 sampai Persamaan 3.11 berikut.

$$W_3 = W_2 - W_1 \quad (3.9)$$

$$V_{ol} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times T \quad (3.10)$$

$$\text{BV} = \frac{W_3}{V} \quad (3.11)$$

Keterangan:

W_1 = Berat silinder (gram)

W_2 = Berat silinder dan agregat (gram)

W_3 = Berat agregat (gram)

V_{ol} = volume bekisiting silinder (cm^3)

D = Diameter silinder (cm)

T = Tinggi silinder (cm)

BV = Berat volume (gram/cm^3)

4. Pemeriksaan Lolos Saringan Nomor 200 (Kadar Lumpur)

Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 4142-1996 dengan tujuan untuk mengetahui nilai kadar lumpur pada agregat. Pada pengujian ini digunakan material sebesar 500 gram dengan kondisi kering oven. Pengujian ini diperlukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.12 berikut.

$$\text{Kadar lumpur dalam pasir} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (3.12)$$

Keterangan:

W_1 = Berat agregat kering oven (gram)

W_2 = Berat agregat kering oven setelah pengujian (gram)

3.3.2 Pengujian Agregat Kasar

1. Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 1969-1990 dengan berat material sebesar 5000 gram. Tujuan pengujian ini untuk mendapatkan nilai dari berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu dan persentase penyerapan air pada agregat kasar. Pada pengujian ini diperlukan adanya perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.13 sampai Persamaan 3.15 berikut.

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{B_k}{(B_j - B_a)} \quad (3.13)$$

$$\text{Berat jenis kering permukaan} = \frac{500}{(B_j - B_a)} \quad (3.12)$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{B_k}{(B_k - B_a)} \quad (3.14)$$

Persentase penyerapan air $= \frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\%$ (3.15)

Keterangan:

B_k = Berat kerikil kering mutlak (gram)

B_j = Berat kerikil jenuh kering muka (gram)

B_a = Berat kerikil dalam air (gram)

2. Pemeriksaan Analisis Saringan Agregat Kasar

Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 1968-1990 dengan berat sampel pengujian sebesar 5000 gram pada keadaan kering oven. Tujuan pengujian ini untuk mengetahui kondisi material kerikil dan keberagaman dari butiran kerikil berdasarkan gradasi yang sesuai dengan ketentuan. Pengujian ini menggunakan saringan dimulai dari lubang ayakan 40 mm (1 ½")); 20 mm (¾"); 10 mm (3/8")); 4,8 mm (No. 4); 2,4 mm (No. 8); 1,2 mm (No. 16); 0,600 mm (No. 30); 0,300 mm (No. 50); 0,150 mm (No. 100); pan dan tutup saringan. Pengujian ini juga diperlukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.16 sampai Persamaan 3.19 berikut.

%BT $= \frac{BT}{\sum BT} \times 100\%$ (3.16)

%BT Kumulatif = %BT sebelumnya + %BT lubang ayakan (3.17)

%Lolos Kumulatif = 100% - %BT kumulatif (3.18)

MHB $= \frac{\sum \%BT\ Kumulatif}{100}$ (3.19)

Keterangan:

BT = Berat tertinggal (gram)

%BT = Persentase berat tertinggal (%)

$\sum$ BT = Jumlah kumulatif berat tertinggal (gram)

%BT Kumulatif = Persentase berat tertinggal kumulatif (%)

%BT Lubang Ayakan = Persentase berat tertinggal lubang ayakan pada nomor saringan tertentu (%)

%Lolos Kumulatif = Persentase lolos kumulatif

∑ %BT Kumulatif = Jumlah kumulatif persentase berat tertinggal Kumulatif (%)

MHB = Modulus halus butir

3. Pemeriksaan Berat volume Gembur dan Padat Agregat Kasar

Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 4804-1998 dengan tujuan untuk mengetahui klasifikasi agregat kasar berdasarkan dari berat volume dan pengaruh pemadatan terhadap berat volume. Berat volume gembur dapat diartikan sebagai rasio antara massa agregat dan volume dalam kondisi gembur, sedangkan berat volume padat didefinisikan sebagai rasio antara massa agregat dan volume dalam kondisi padat. Pengujian ini diperlukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan 3.20 sampai Persamaan 3.22 berikut.

$$W_3 = W_2 - W_1 \quad (3.20)$$

$$V_{ol} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times T \quad (3.21)$$

$$\text{BV} = \frac{W_3}{V} \quad (3.22)$$

Keterangan:

W_1 = Berat silinder (gram)

W_2 = Berat silinder dan agregat (gram)

W_3 = Berat agregat (gram)

V_{ol} = volume bekisiting silinder (cm^3)

D = Diameter silinder (cm)

T = Tinggi silinder (cm)

BV = Berat volume (gram/cm^3)

3.4 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Dalam penelitian ini metode perencanaan campuran beton (*mix design*) yang digunakan berdasarkan SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana

campuran beton normal. Berikut merupakan tahapan – tahapan secara sistematis dan urut.

1. Menentukan Kuat Tekan Beton Rencana

   Pada penelitian ini kuat tekan rencana yang digunakan adalah 25 MPa pada umur 28 hari dengan sampel silinder 15 cm × 30 cm.

2. Menentukan Nilai Deviasi Standar (S_r)

   Deviasi standar dapat ditentukan sesuai dengan tabel faktor pengalinya, Adapun faktor pengali deviasi standar dapat dilihiat pada Tabel 3.4 dibawah ini.

Tabel 3. 4 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 dilapangan 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 3.24 sebagai berikut.

$$M = 1{,}64 \times S_r \qquad (3.24)$$

Keterangan:

M = Nilai tambah

1,64 = Tetapan *statistic* (nilainya disesuaikan dengan persentase kegagalan hasil uji sebesar maksimum 5%

S_r = Deviasi standar

4. Menghitung Kuat Tekan Rata – Rata (f'_{cr})

   Kuat tekan rata-rata yang direncanakan dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.25 berikut ini.

$$f'_{cr} = f'c + M \quad (3.25)$$

   Keterangan:

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

   f'c = Kuat tekan beton rencana (MPa)

   M = Nilai tambah

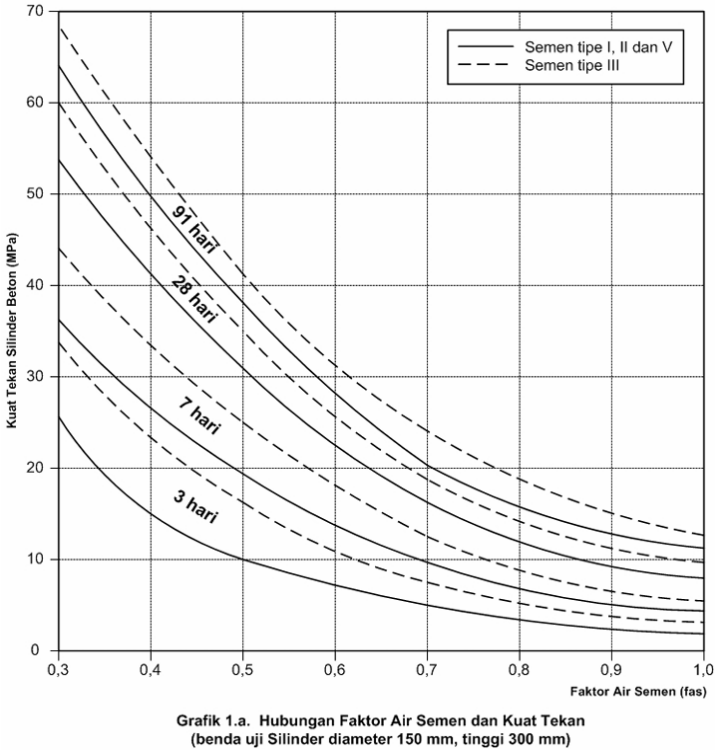
5. Menentukan jenis semen.
6. Menentukan jenis agregat
   a. Agregat halus berupa pasir
   b. Agregat kasar berupa kerikil
7. Menentukan faktor air semen (*fas*)
   a. Menentukan faktor air semen dapat dilihat menggunakan tabel perkiraan kuat tekan beton dan agregat kasar yang digunakan berikut.

Tabel 3. 5 Perkiraan Kuat Tekan Beton Beton dengan Faktor Air Semen, dan Agregat Kasar yang Biasa Dipakai di Indonesia

Jenis Semen	Jenis Agregat	Kekuatan Tekan Beton (MPa)				
		Umur (hari)				Bentuk benda uji
		3	7	28	29	
Semen *Portland* Tipe 1	Batu tak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu pecah	19	27	37	45	
Semen *Portland* Tipe II, V	Batu tak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu pecah	25	32	45	54	
Semen *Portland* Tipe III	Batu tak dipecahkan	25	31	46	53	Silinder
	Batu pecah	30	40	53	60	
	Batu tak dipecahkan	25	31	46	53	Kubus
	Batu pecah	30	40	53	60	

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

   b. Menentukan kurva lengkungan berdasarkan hubungan antara nilai kuat tekan yang diperoleh dari butir 7a diatas dengan faktor air semen.



Gambar 3. 2 Hubungan Antara Kuat Tekan Dan Faktor Air Semen (fas)
(Sumber : SNI 03-2834-2000)

c. Menentukan faktor air semen yang diperlukan dengan menghubungkan kuat tekan beton rencana yang diperoleh pada butir 7a dengan kurva lengkung pada butir 7b.

8. Menetapkan faktor air semen maksimum (*fas maximum*)
   Jika nilai *fas* yang didapat pada langkah 7 di atas lebih kecil dari rencana, maka dapat menggunakan nilai *fas* yang terendah.
9. Menetapkan nilai *slump test.*
10. Menentukan ukuran agregat maksimum dari pengujin material agregat yang dilakukan.
11. Menentukan nilai kadar air bebas dapat menggunakan Persamaan 3.26 dan Tabel 3.6 Berikut

$$W = \frac{2}{3} W_h + \frac{1}{3} W_k \quad (3.26)$$

Keterangan:

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

W_h = Perkiraan jumlah air untuk agregat halus (Kg/m^3)

W_k = Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar (Kg/m^3)

Tabel 3. 6 Perkiraan Kadar Air Bebas per m^3 (Kg/m^3)

Ukuran Maksimum Agregat (mm)	**Jenis Agregat**	***Slump* Test (mm)**			
		0-10	**10-30**	**30-60**	**60-180**
10	Batu tak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

12. Menentukan jumlah kebutuhan semen yang dibutuhkan menggunakan Persamaan 3.27 Berikut.

$$C = \frac{W}{fas} \quad (3.27)$$

Keterangan:

c = Jumlah semen (Kg/m^3)

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

fas = Faktor air semen

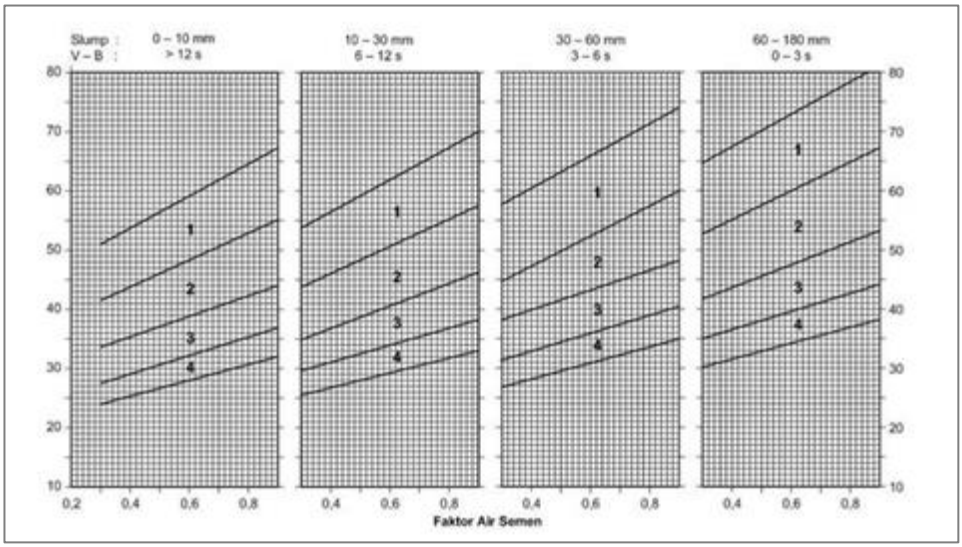
13. Menentukan jumlah semen maksimum dengan mengambil nilai terbesar jumlah semen dari hasil perhitungan.
14. Menentukan jumlah semen minimum berdasarkan lokasi beton rencana sesuai Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3. 7 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus

Jenis Pembetonan	Jumlah Semen Minimum Per m^3 Beton	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. Terlindungi dari 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

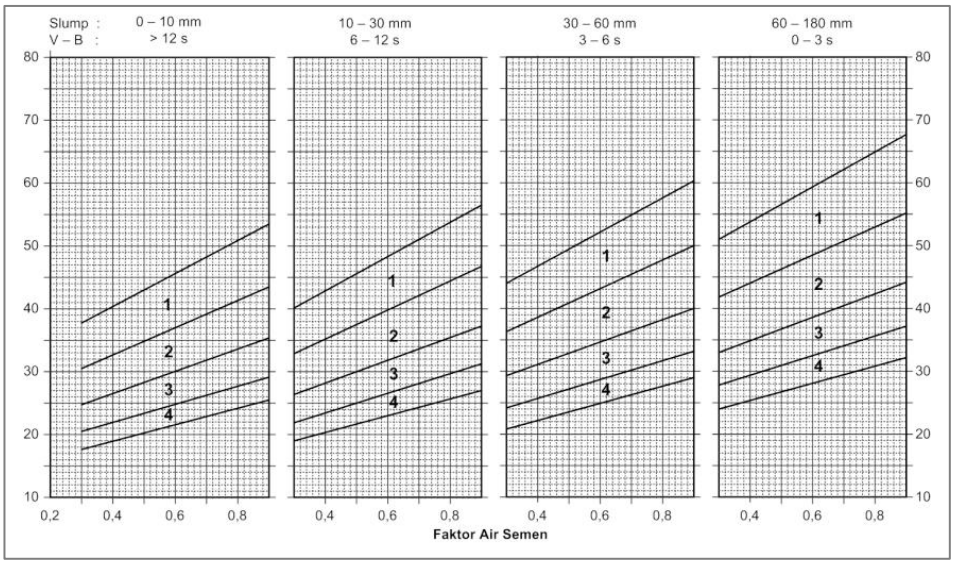
(Sumber : SNI 03-2834-2000)

15. Menghitung faktor air semen yang disesuaikan apabila terjadi perubahan jumlah semen dari hasil perhitungan pada butir 12 menjadi jumlah semen maksimum atau jumlah semen minimum.
16. Menentukan susunan butir agregat halus berdasarkan hasil pengujian analisa saringan agregat.
17. Menentukan susunan agregat kasar berdasarkan hasil pengujian analisa saringan agregat.
18. Menentukan persentase agregat halus menggunakan Gambar 3.3 Sampai dengan Gambar 3.5 Dengan menggunakan parameter pada ukiran butir maksimum agregat kasar, nilai *slump test* rencana dan gradasi agregat halus.



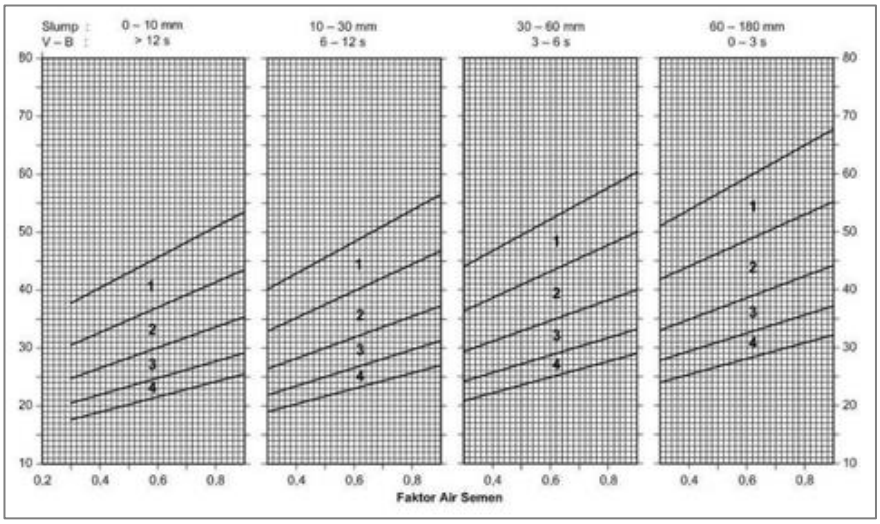
Gambar 3. 3 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm

(Sumber : SNI 03-2834-2000)



Gambar 3. 4 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm

(Sumber : SNI 03-2834-2000)



Gambar 3. 5 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

Berdasarkan grafik diatas, didapatkan nilai persentase untuk agregat halus dan agregat kasar yang diperoleh dari Persamaan 3.28 dan Persamaan 3.29 berikut.

$$\%Ag._{Halus} = \frac{Ba+Bb}{2} \quad (3.28)$$

$$\%Ag._{Kasar} = 100\% - \%Ag._{Halus} \quad (3.29)$$

Keterangan:

$\%Ag._{Halus}$ = Persentase agregat halus (%)

$\%Ag._{Kasar}$ = Persentase agregat kasar (%)

B_a = Batas atas (%)

B_b = Batas bawah (%)

19. Menghitung berat jenis relatif atau gabungan dengan Persamaan 3.30 berikut.

$$BJ_{gab} = \%Ag._{Halus} \times BJ_{Ag.halus} + \%Ag._{Kasar} \times BJ_{Ag.kasar} \quad (3.30)$$

Keterangan:

BJ_{gab} = Berat jenis relatif/gabungan agregat

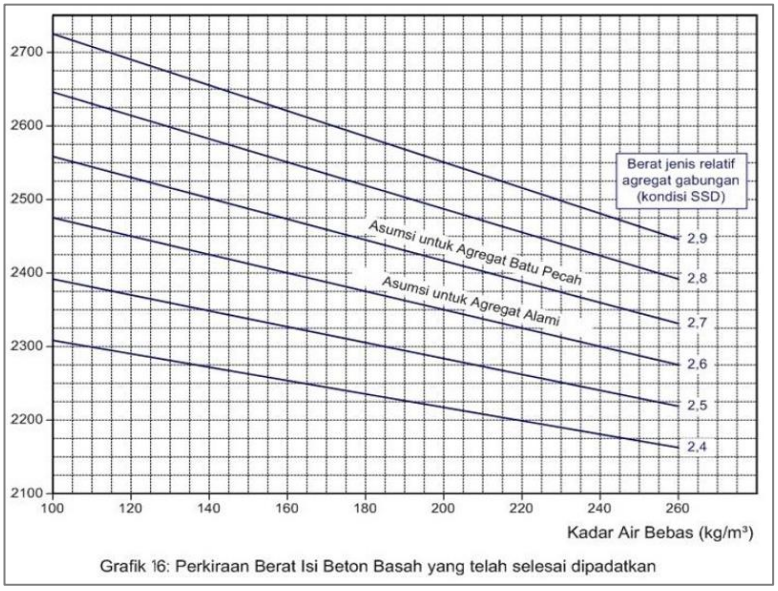
$\%Ag._{Halus}$ = Persentase agregat halus (%)

$\%Ag._{Kasar}$ = Persentase agregat kasar (%)

$BJ_{Ag.halus}$ = Berat jenis agregat halus

$BJ_{Ag.kasar}$ = Berat jenis agregat kasar

20. Menentukan berat isi atau berat volume beton menggunakan Gambar 3.6 Berikut berdasarkan kadar air bebas dan berat jenis relatif atau gabungan agregat.



Gambar 3. 6 Perkiraan Berat Isi Beton Basah Yang Telah Selesai Didapatkan

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

21. Menghitung kadar agregat gabungan dengan Persamaan 3.31 berikut.

$$W_{.ag.\ gab} = W_{beton} - W_{semen} - w \quad (3.31)$$

Keterangan:

$W_{.ag.\ gab}$ = Kadar agregat gabungan (kg/m^3)

W_{beton} = Berat isi beton (kg/m^3)

W_{semen} = Kadar semen (kg/m^3)

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

22. Menghitung kadar agregat halus dengan Persamaan 3.32 berikut.

$$W_{\cdot ag.halus} = \%Ag_{\cdot Halus} \times W_{ag.\ gab} \quad (3.32)$$

Keterangan:

$W_{\cdot ag.halus}$ = Kadar agregat halus (kg/m^3)

$\%Ag_{\cdot Halus}$ = Persentase agregat halus (%)

$W_{ag.\ gab}$ = Kadar agregat gabungan (kg/m^3)

23. Menghitung kadar agregat kasar dengan Persamaan 3.33 berikut.

$$W_{ag.\ kasar} = W_{ag.\ gab} - W_{ag.halus} \quad (3.33)$$

Keterangan:

$W_{ag.\ kasar}$ = Kadar agregat kasar (kg/m^3)

$W_{ag.\ halus}$ = Kadar agregat halus (kg/m^3)

$W_{ag.\ gab}$ = Kadar agregat gabungan (kg/m^3)

24. Diperoleh hasil proporsi campuran untuk setiap m³ beton dengan kondisi agregat dalam keadaan jenuh kering permukaan (SSD) untuk mendapatkan proporsi campuran uji. Selanjutnya, hasil perhitungan proporsi campuran untuk setiap m³ beton dikalikan dengan volume total benda uji.

3.5 Pengujian *Slump*

Pengujian *slump* menurut SNI 1972-2008 yaitu suatu teknik untuk memantau homogenitas dan *workability* adukan beton segar dengan suatu kekentalan tertentu yang dinyatakan dengan suatu nilai *slump*. Tingkat kelancaran berkaitan erat dengan kemudahan dalam pekerjaan beton (*workability*). Oleh karena itu, semakin tinggi nilai *slump*, semakin cair dan mudah adukan beton untuk dikerjakan.

Pengujian *slump* dilakukan dengan menggunakan alat uji berupa kerucut abrams, kemudian campuran beton segar 1/3 dimasukkan kedalam cetakan secara bertahap hingga terisi penuh dengan setiap tahapannya ditusuk sebanyak 25 kali sampai padat. Setelah itu, kerucut abrams diangkat dan penurunan beton dapat diukur. Nilai penurunan tersebut menunjukkan nilai *slump* pada beton.

3.6 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 1974-2011 dengan menguji kemampuan beton silinder dalam menerima beban tekan persatuan luas, yang terus diberi beban tekan hingga beton tersebut hancur. Pengujian ini diperlukan perhitungan menggunakan Persamaan 3.34 berikut.

$$f'c = \frac{P}{A} \tag{3.34}$$

Keterangan:

F'c = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm^2)

3.7 Pengujian Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas, yang juga dikenal sebagai modulus *Young*, adalah perbandingan antara tegangan dan regangan aksial yang terjadi selama deformasi elastis. Ini menggambarkan kemampuan suatu material untuk mengalami perubahan bentuk dan kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan. Berdasarkan SNI 2847-2019 nilai modulus elastisitas empiris dapat dihitung dengan Persamaan 3.35 berikut.

$$Ec = 4700\sqrt{f'c} \tag{3.35}$$

Keterangan:

Ec = Modulus elastisitas empiris beton (MPa)

$f'c$ = Kuat tekan beton rencana (MPa)

Berdasarkan ASTM C-469-94 nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.36 berikut.

$$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_c - 0{,}00005} \tag{3.36}$$

Keterangan:

Ec = Modulus elastisitas beton (MPa)

ε_c = Regangan longitudinal akibat tegangan S_2

S_1 = Tegangan ketika regangan 0,00005 MPa

S_2 = Tegangan pada 40% dari beban maksimum

3.8 Pengujian Kuat Tarik Belah

Pengujian ini dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 2491-2002 untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik belah pada benda uji dengan cara meletakkan benda uji secara horizontal dengan permukaan meja penekan pada mesi uji tekan. Pengujian ini diperlukan perhitungan menggunakan Persamaan 3.37 berikut.

$$f'ct = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \tag{3.37}$$

Keterangan:

$f'ct$ = Kuat tarik belah beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

L = Tinggi silinder beton (mm)

D = Diameter silinder beton (mm)

3.9 Pengujian Statistik *Software* SPSS

Pada pengujian statistic menggunakan software SPSS akan menggunakan metode *interquartile range* (IQR), Normalitas, Homogenitas, dan ANOVA yang dimana merupakan langkah awal penting untuk memastikan data penelitian memenuhi asumsi dasar sebelum dilakukan analisis lebih lanjut. Uji *interquartile range* (IQR) digunakan untuk mendeteksi keberadaan *outlier* dalam suatu kumpulan data. Identifikasi *outlier* menggunakan metode IQR penting dilakukan untuk memastikan distribusi data memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas (Sihombing, 2023). Uji normalitas digunakan untuk mengetahui apakah data berdistribusi normal, yaitu sebaran data berada secara simetris di sekitar nilai rata-rata. Pengujian ini diperlukan agar data tidak menyimpang dari karakteristik distribusi normal yang menjadi dasar sebagian besar metode statistik parametrik (Sari A. P., 2024). Sementara itu, uji homogenitas bertujuan memastikan kesamaan

varians antar kelompok data. Uji homogenitas dilakukan agar penyebaran data antar kelompok bersifat seimbang sebelum dilakukan analisis lanjutan (Usmadi, 2020). Metode ANOVA (*Analysis of Variance*) untuk menilai apakah terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antara tiga kelompok data atau lebih. Metode ini membandingkan variasi antar kelompok dengan variasi di dalam setiap kelompok untuk menentukan apakah variasi kuat tekan yang muncul benar-benar disebabkan oleh perlakuan yang diuji dan bukan sekadar terjadi secara kebetulan (Nasution, 2020). Sedangkan, metode Welch ANOVA merupakan bentuk pengembangan dari ANOVA klasik yang digunakan ketika asumsi homogenitas varians tidak terpenuhi. Berbeda dengan ANOVA biasa yang mengharuskan varians setiap kelompok seragam, Welch ANOVA tetap dapat memberikan hasil analisis yang valid meskipun varians antar kelompok berbeda-beda (Wibowo, 2020).

Dalam penelitian beton campuran *fly ash*, pengujian ini berperan penting untuk menjamin keandalan data hasil uji kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas. Data yang memenuhi pada metode menunjukkan bahwa variasi hasil disebabkan oleh perbedaan komposisi *fly ash*, bukan oleh ketidakteraturan atau kesalahan pengukuran. Dengan demikian, pengujian statistik SPSS memastikan hasil analisis terhadap pengaruh *fly ash* pada sifat mekanik beton bersifat valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara statistik.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Umum

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental, yaitu metode penelitian yang bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan sebab – akibat antara satu atau lebih variabel melalui manipulasi variabel bebas dalam kodisi tertentu. Penelitian ini terdiri dari empat tahap, yakni pengujian agregat, perencanaan desain campuran, pembuatan benda uji, dan pengujian benda uji. Bahan pengganti semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* digunakan dengan variasi kadar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Pembuatan benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan dimensi 150 mm × 300 mm. Benda uji untuk pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas setiap variasi berjumlah 5 buah sedangkan pengujian kuat tarik belah setiap variasi berjumlah 3 buah.

4.2 Lokasi Penelitian

Seluruh rangkaian penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia pada koordinat 7.6869099° LS dan 110.4136129° BT.

4.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Variabel tetap merupakan faktor-faktor yang tetap sama selama penelitian, sehingga perubahan yang terlihat pada variabel lain bisa dihubungkan langsung dengan variabel bebas. Variable tetap pada penelitian ini yaitu dari bentuk sampel, jenis agregat, dimensi benda uji, dan kuat tekan beton rencana (*f'c*).
2. Variabel bebas merupakan faktor yang diubah oleh peneliti untuk melihat bagaimana pengaruhnya terhadap variabel lain. variasi bebas pada penelitian ini yaitu variasi *fly ash* 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen.

3. Variabel terikat merupakan faktor yang diukur untuk melihat dampak dari variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini yaitu pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, dam kuat tarik belah.

4.4 Bahan yang Digunakan

Adapun bahan-bahan yang akan digunakan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Semen *Portland* (PC)

   Semen *Portland* yang digunakan jenis tipe 1 merek tiga roda. Semen yang digunakan harus tetap terjaga kualitasnya dengan disimpan pada tempat yang kering dan terjaga.

2. Agregat Halus

   Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia dengan dilakukan Analisa saringan terlebih dahulu sebelum digunakan.

3. Agregat Kasar

   Agregat Kasar yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia dengan dilakukan Analisa saringan terlebih dahulu sebelum digunakan.

4. Air

   Air yang akan digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

5. *Fly ash*

   Fly ash merupakan bahan limbah abu batubara yang berasal dari pembakaran PLTU Sumsel – 8, *fly ash* akan digunakan sebagai bahan pengganti pada semen dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen.

4.5 Alat yang Digunakan

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Timbangan

   Fungsi dari timbangan ialah untuk menimbang berat dari suatu benda atau material. Timbangan ini akan digunakan untuk menimbang material penyusun beton sebelum dilakukannya pengujian.

2. Saringan Agregat

   Saringan agregat ini berfungsi untuk memisahkan agregat berdasarkan ukuran butirnya, serta berfungsi dalam pengujian analisis persentase lolos saringan pada agregat halus dan kasar.

3. Keranjang kawat

   Digunakan sebagai wadah untuk melakukan pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar.

4. Cetakan Silinder

   Cetakan benda uji beton yang berbentuk balok dengan ukuran panjang 60 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm serta benda uji berbentuk silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

5. Piknometer

   Alat ini berfungsi untuk pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus.

6. Corong

   Digunakan untuk memasukkan agregat halus ke dalam piknometer.

7. Alat Ukur

   Alat ini digunakan untuk mengukur dimensi dari benda yang akan di uji.

8. Ember

   Ember digunakan untuk mengangkut dan menampung material penyusun beton seperti air, semen, agregat dan material-material lainnya.

9. Sekop

   Pada penelitian ini sekop digunakan untuk menuang beton segar ke dalam cetakan silinder.

10. Kerucut Abrams

    Kerucut Abrams digunakan untuk mencari nilai *slump* beton segar yang baru saja keluar dari *mixer*.

11. *Oven*

    Oven digunakan untuk mengeringkan agregat halus dan agregat kasar. *oven* juga digunakan dalam pengujian berat jenis agregat dan penyerapan air pada agregat.

12. *Pan*

    Pan digunakan sebagai wadah untuk meletakkan hasil pengujian saat proses pemanasan atau pengeringan dilakukan dengan menggunakan oven.

13. *Concrete Mixer*

    Alat ini digunakan untuk mengaduk atau pencampur agregat (kasar dan halus), semen, air, *fly ash* dengan kadar masing-masing sesuai dengan rencana.

14. *Dial Gauge* Regangan

    Digunaka untuk menentukan deformasi bentuk beton pada pengujian modulus elastisitas.

15. *Compression Testing Machine* (CTM)

    Alat ini digunakan pada pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik belah pada beton.

4.6 Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini adalah beton normal dengan mengganti sebagian semen menggunakan *fly ash* dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%. 20% dari berat semen. Setiap benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas pada umur 28 hari. Tiap variasi memiliki 5 sampel untuk uji kuat tekan dan modulus elastisitas, serta 3 sampel untuk uji tarik belah. Sesuai SNI 03-2834-2000, jumlah minimal benda uji kuat tekan adalah 3 sampel. Adapun rincian benda uji yang digunakan pada penelitian ini, terdapat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Rincian Benda Uji Penelitian

Kadar *Fly ash* (%)	**Jenis Pengujian dan Jumlah Benda Uji**				**Umur benda Uji (hari)**	**Kode Benda Uji**	**Total Sampel**
	Jenis Pengujian	**Jumlah Sampel**	**Jenis Pengujian**	**Jumlah Sampel**			
0	Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas	5	Kuat Tarik Belah Beton	3	28	BV – 0	8
5		5		3	28	BV – 5	8
10		5		3	28	BV – 10	8
15		5		3	28	BV – 15	8
20		5		3	28	BV – 20	8
Total Keseluruhan Benda Uji (Silinder)							**40**

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

BV – 0 : Beton normal umur 28 hari dengan kadar *fly ash* 0%

BV – 5 : Beton normal umur 28 hari dengan kadar *fly ash* 5%

BV – 10 : Beton normal umur 28 hari dengan kadar *fly ash* 10%

BV – 15 : Beton normal umur 28 hari dengan kadar *fly ash* 15%

BV – 20 : Beton normal umur 28 hari dengan kadar *fly ash* 20%

4.7 Benda Uji *Trial* 7 hari

Pada penelitian ini juga akan dilakukan pengujian beton *trial* pada umur 7 hari, pengujian beton *trial* pada umur 7 hari dilakukan sebagai langkah awal untuk mengevaluasi kekuatan dan performa beton sebelum pengujian akhir pada umur 28 hari. Pada umur 7 hari, beton umumnya mencapai sekitar 60% hingga 70% dari kekuatan akhirnya, sehingga pengujian ini memberikan gambaran awal tentang seberapa baik campuran beton yang digunakan dan apakah memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Jika hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan beton tidak memenuhi standar yang diharapkan, penyesuaian pada campuran beton, seperti proporsi semen, agregat, atau aditif, dapat dilakukan sebelum pengujian akhir. Kekuatan beton pada umur 7 hari dapat dikonversi menjadi kekuatan pada umur 28 hari dengan menggunakan faktor konversi yang terdapat dalam Pedoman Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI 1971). Pada pedoman beton tersebut, ditentukan nilai konversi seperti pada Tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4. 2 Perbandingan Kekuatan Beton Pada Berbagai Umur

Umur Beton (hari)	**3**	**7**	**14**	**21**	**28**	**90**	**365**
Semen *portland* biasa	0.40	0.65	0.88	0.95	1.00	1.20	1.35
Semen *portland* dengan kekuatan awal yang tinggi	0.55	0.75	0.90	0.95	1.00	1.15	1.20

(Sumber : Peraturan Beton Bertulang Indonesia, 1971)

Dari tabel di atas dapat diketahui nilai konversi kekuatan beton pada berbagai umur. Pada pengujian beton *trial* 7 hari diperlukan perhitungan untuk melakukan konversi nilai, berikut adalah perhitungan konversi yang digunakan untuk memperoleh nilai tersebut.

$$f'c_{(konversi)} = f'c_{(aktual)} \times \frac{1}{angka\ konversi} \quad (4.1)$$

Rumus diatas didapatkan faktor konversi nilai kuat tekan beton *f'c* pada umur 7 hari, yang meliputi beton normal dari data pengujian tekan beton dengan sampel beton yang akan diuji sebanyak 5 sampel *trial*.

4.8 Pelaksanaan Penelitian

Untuk memastikan penelitian berjalan lancar dan menghasilkan hasil yang optimal, diperlukan prosedur atau Langkah – langkah persiapan yang dilakukan secara sistematis. Setiap tahapan tersebut harus dilaksanakan agar tetap sesuai dengan batasan masalah yang telah ditetapkan dalam penelitian.

4.8.1 Persiapan Penelitian

Sebelum dilakukan penelitian diperlukan dari studi literatur, menyusum rencana penelitian, menyiapkan material agar mutu beton yang didapatkan sesuai dengan rencana. Peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini juga disiapkan untuk pengujian material maupun benda uji.

4.8.2 Pengujian Material

Pengujian agregat halus dan agregat kasar digunakan untuk memahami sifat dan ciri – ciri agregat yang akan digunakan dalam campuran beton. Berikut ini merupakan acuan pengujian agregat yang digunakan pada penelitian ini.

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat halus menggunakan acuan dari SNI 1970-1990.
2. Pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar menggunakan acuan dari SNI 1969-1990.
3. Pengujian Analisa saringan pada agregat halus menggunakan acuan dari SNI 1968-1990.
4. Pengujian Analisa saringan pada agregat kasar menggunakan acuan dari SNI 1968-1990.
5. Pengujian berat volume padat dan gembur pada agregat menggunakan acuan dari SNI 4804-1998.
6. Pengujian lolos saringan no.200 menggunakan acuan dari SNI 4142-1996.

4.8.3 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Pada perencanaan campuran beton (*mix design*) menggunakan metode yang berdasarkan dengan SNI 03- 2834 – 2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Pada penelitian ini penggunaan semen akan diganti sebagian menggunakan *fly ash* sesuai variasi yang telah direncanakan.

4.8.4 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Pada tahap pembuatan benda uji, beton segar akan dicetak dalam bentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Sebelum pencetakan, beton yang telah dicampur akan diuji *slump* untuk menentukan nilai kerja (*workability*) yang direncanakan. Setelah pengujian *slump*, beton segar dimasukkan ke dalam cetakan silinder yang sebelumnya telah diolesi dengan oli agar beton tidak menempel pada cetakan saat mengeras. Setelah beton mengeras, cetakan dilepas dan proses perawatan benda uji dimulai. Sesuai dengan SNI 2493-2011 tentang tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton, pelepasan benda uji dari cetakan dilakukan paling cepat 24 jam setelah beton dituangkan. Benda uji direndam dalam air selama 27 hari untuk memastikan kekuatan beton. Sebelum dilakukan pengujian, benda uji harus diangkat dari rendaman 1 hari sebelumnya agar berada dalam kondisi kering saat diuji.

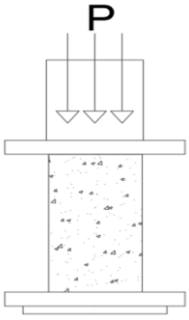
4.8.5 Prosedur Pengujian

Pada penelitian ini terdapat pengujian kuat tekan beton, kuat tarik belah beton, dan modulus elastisitas yang akan dilakukan pada benda uji. Langkah-langkah pengujian yang dilakukan dijelaskan pada berikut.

1. Pengujian Kuat Tekan Beton

   Pada pengujian kuat tekan beton dilakukan berdasarkan SNI 1974-2011 tentang cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. Adapun langkah – langkah pengujian kuat tekan beton sebagai berikut.

   a. Menyiapkan alat dan benda uji yang sudah dilakukan perawatan.
   b. Mengukur dimensi benda uji dan menimbang berat benda uji.
   c. Melapisi permukaan atas dan bawah benda uji dengan mortar belerang (langkah ini bersifat opsional jika permukaan atas dan bawah beton tidak rata).
   d. Benda uji diletakkan pada mesin uji tekan secara sentris dan memastikan bahwa mesin berada dalam kondisi terkalibrasi sebelum pengujian dilakukan.z
   e. Berikan pembebanan pada benda uji hingga hancur dan mencatat nilai pembebanan maksimum yang didapatkan.

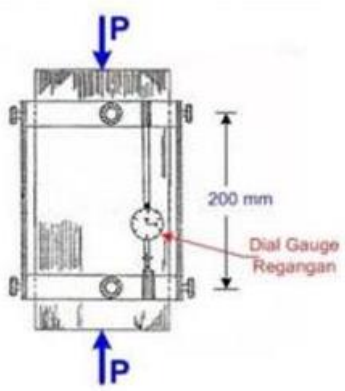


Gambar 4. 1 Sketsa Pengujian Kuat Tekan Beton
(Sumber: Modul Praktikum Ilmu Bahan)

2. Modulus Elastisitas Beton

Pada pengujian modulus elastisitas beton dilakukan berdasarkan SNI 03-4169-1996. Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan bersamaan dengan pengujian kuat tekan beton karena kedua pengujian ini saling terkait. Saat melakukan pengujian kuat tekan, benda uji dipasangi alat berupa *dial gaug*e regangan untuk mengukur regangan atau deformasi yang terjadi pada beton. Adapun langkah – langkah pengujian modulus elastisitas beton sebagai berikut.

a. Menyiapkan alat dan benda uji yang sudah dilakukan perawatan.
b. Mengukur dimensi benda uji dan menimbang berat benda uji.
c. Memasang alat kompresometer-ekstensiometer pada benda uji secara tepat dan kuat, kemudian memastikan alat pengukur deformasi (*dial gauge*) terpasang pada posisi yang sesuai.
d. Meletakkan benda uji yang telah diberi alat ukut deformasi pada mesin uji tekan secara sentris.
e. Memberikan pembebanan secara bertahap pada benda uji dengan kecepatan antara 207 kips/detik hingga 275 kips/detik sampai benda uji mengalami kerusakan atau mesin uji tidak dapat memberikan beban lebih lanjut.
f. Membaca beban setiap kenaikan 10 kN dan mencatat nilai tegangan atau deformasi yang terjadi saat beban meningkat setiap 10 kN.

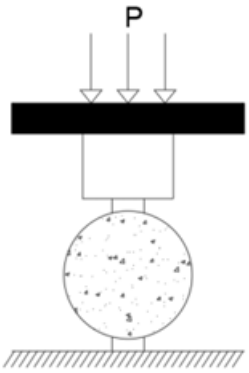


Gambar 4. 2 Sketsa Pengujian Modulus Elastisitas
(Sumber: Modul Praktikum Ilmu Bahan)

3. Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Pada pengujian kuat tarik belah beton dilakukan berdasarkan SNI 03-2491-2002 tentang metode pengujian kuat tarik belah beton. Adapun langkah – langkah pengujian kuat tarik belah beton sebagai berikut.

a. Menyiapkan alat dan benda uji yang sudah dilakukan perawatan.
b. Mengukur dimensi benda uji dan menimbang berat benda uji.
c. Pemberian tanda pada benda uji, gambar garis tengah pada setiap sisi ujung silinder benda uji menggunakan alat bantu, sehingga dapat dipastikan bahwa kedua garis tengah tersebut berada dalam bidang aksial yang sama.
d. Tempatkan benda uji di atas bantalan bantu dari kayu lapis dengan posisi sedemikian rupa sehingga garis tengah benda uji berdiri tegak lurus terhadap titik tengah bantalan pembebanan.
e. Menjalankan mesin uji dengan pembebanan secara konstan sampai benda uji terbelah
f. mencatat nilai pembebanan maksimum dan waktu pengujian yang dilakukan.



Gambar 4. 3 Sketsa Pengujian Kuat Tarik Belah Beton
(Sumber: Modul Praktikum Ilmu Bahan)

4. Pengujian Analisis Statistik *Software* SPSS

Pengujian analisis statistik dilakukan untuk memastikan data valid dan konsisten, mendeteksi outlier, serta menilai keseragaman dan distribusi data sehingga hasil penelitian lebih akurat.

Berikut merupakan tahapan pengujian statistik menggunakan software SPSS.

a. Metode *Interquartile Range* (IQR)

1) Tahap penentuan nilai kuartil dan IQR

Tahap ini dilakukan dengan mengurutkan data dari nilai terkecil hingga terbesar, kemudian menentukan kuartil pertama (Q1) dan kuartil ketiga (Q3) sebagai batas 25% dan 75% dari distribusi data. Selisih antara Q3 dan Q1 menghasilkan nilai IQR yang menggambarkan sebaran 50% data tengah.

2) Tahap penentuan batas *outlier* dan identifikasi

Tahap ini dilakukan dengan menghitung batas bawah dan batas atas, setiap nilai yang berada di luar kedua batas tersebut dikategorikan sebagai outlier.

b. Metode Normalitas

1) Tahap pemeriksaan kelengkapan data (data *checking*)

Tahap *Case Processing Summary* dilakukan untuk mengetahui jumlah data (kasus) yang digunakan dalam proses analisis, baik yang valid maupun yang hilang (*missing*). Tahapan ini bertujuan untuk

memastikan bahwa seluruh data yang dimasukkan ke dalam program SPSS telah lengkap dan dapat diolah tanpa ada nilai yang kosong.

2) Tahap menganalisis hasil output SPSS

Tahap *Tests of Normality* bertujuan untuk mengetahui apakah data hasil penelitian berdistribusi normal atau tidak. Pengujian ini dilakukan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov atau Shapiro-Wilk dengan melihat nilai signifikansi (Sig.). Jika nilai Sig. > 0,05 maka data berdistribusi normal, sedangkan jika < 0,05 maka data tidak normal.

c. Metode Homogenitas

Tahap *Test of Homogeneity of Variances* bertujuan untuk mengetahui apakah data memiliki varians yang sama atau tidak antar kelompok. Uji ini penting dilakukan untuk memastikan bahwa penyebaran data antar kelompok bersifat seragam, sehingga hasil analisis dapat dianggap valid. Pengujian homogenitas biasanya menggunakan metode *Levene's Test* dengan melihat nilai signifikansi (Sig.) pada output SPSS. Jika nilai Sig. > 0,05 maka data dinyatakan memiliki varians yang homogen, sedangkan jika < 0,05 maka data tidak homogen. Hasil dari tahap ini digunakan untuk menilai keseragaman data sebelum dilakukan analisis statistik lebih lanjut.

d. Metode ANOVA dan Welch ANOVA

1) Tahap pra – analisis

Pada tahap ini ditetapkan hipotesis penelitian, kemudian dilakukan uji normalitas dan uji homogenitas varians untuk menilai apakah distribusi data normal dan varians antar kelompok seragam. Selain itu, dihitung pula statistik dasar seperti rata-rata tiap kelompok dan rata-rata keseluruhan sebagai dasar perhitungan analisis.

2) Tahap Analisis

Menghitung variasi antar kelompok dan dalam kelompok, menghitung nilai Mean Square, serta menentukan nilai F dan p-value. Berdasarkan hasil tersebut diputuskan apakah terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antar kelompok.

4.8.6 Pengolahan Data

Pada tahapan pengolahan data, dilakukan analisis data yang telah didapatkan dari hasil pengujian yang kemudian dioalah berdasarkan teori yang telah digunakan untuk mendapat hasil yang sesuai.

4.8.7 Analisis Data

Pada tahapan ini dilakukan analisis terhadap data yang diperoleh untuk mendapatkan perbandingan serta membahas hasil dari seluruh pengujian benda uji. Pada penelitian ini benda uji berupa beton normal dengan mengganti sebagian semen menggunakan *fly ash* dengan beragam variasi persentase dan diuji untuk mengetahui sifat mekanik beton berupa kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas.

4.8.8 Pembahasan

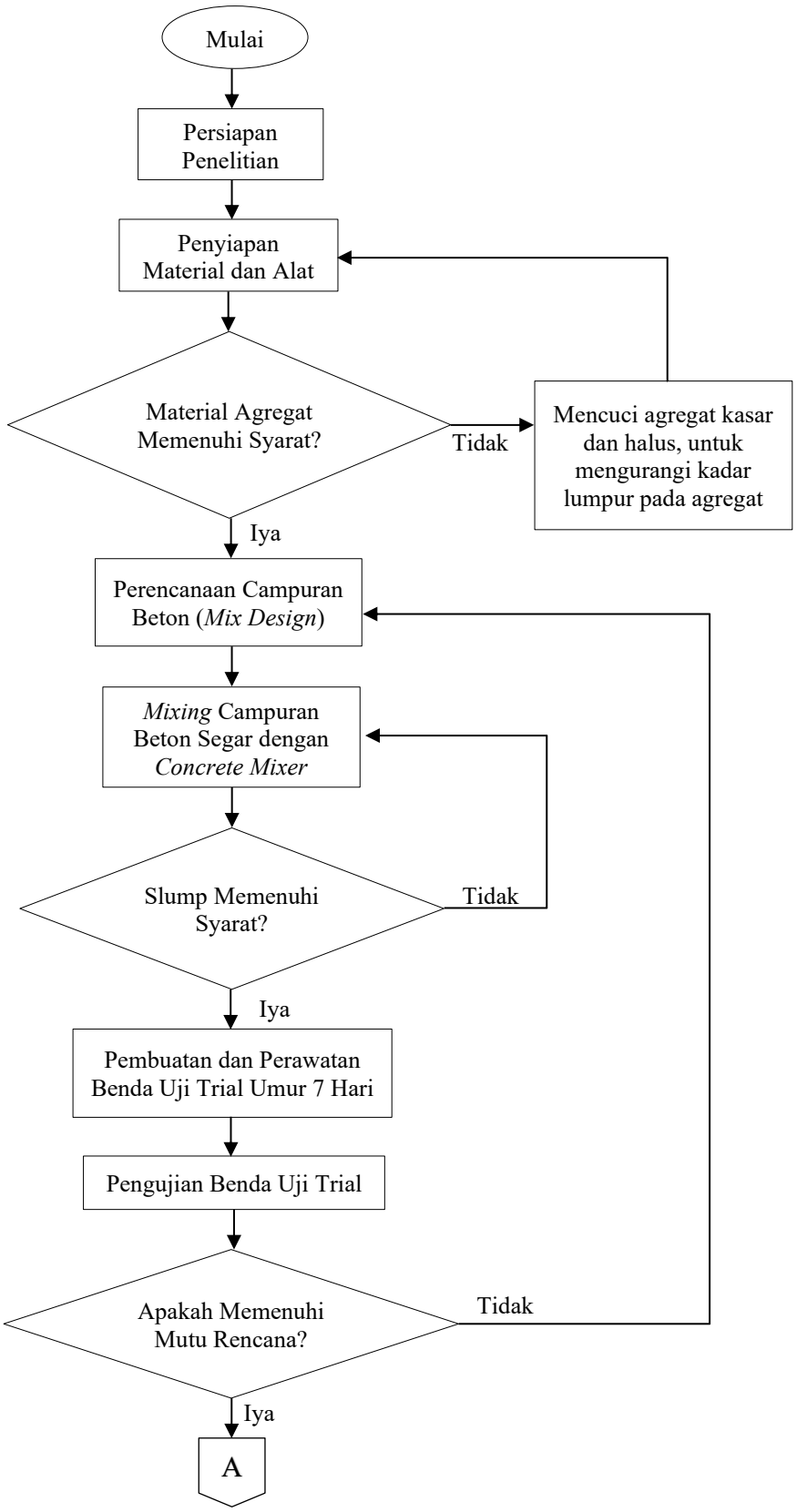
Pada tahap ini, dilakukan pembahasan mengenai hasil analisis untuk memberikan interpretasi terhadap nilai-nilai yang dihasilkan dari analisis data.

4.8.9 Kesimpulan dan Saran

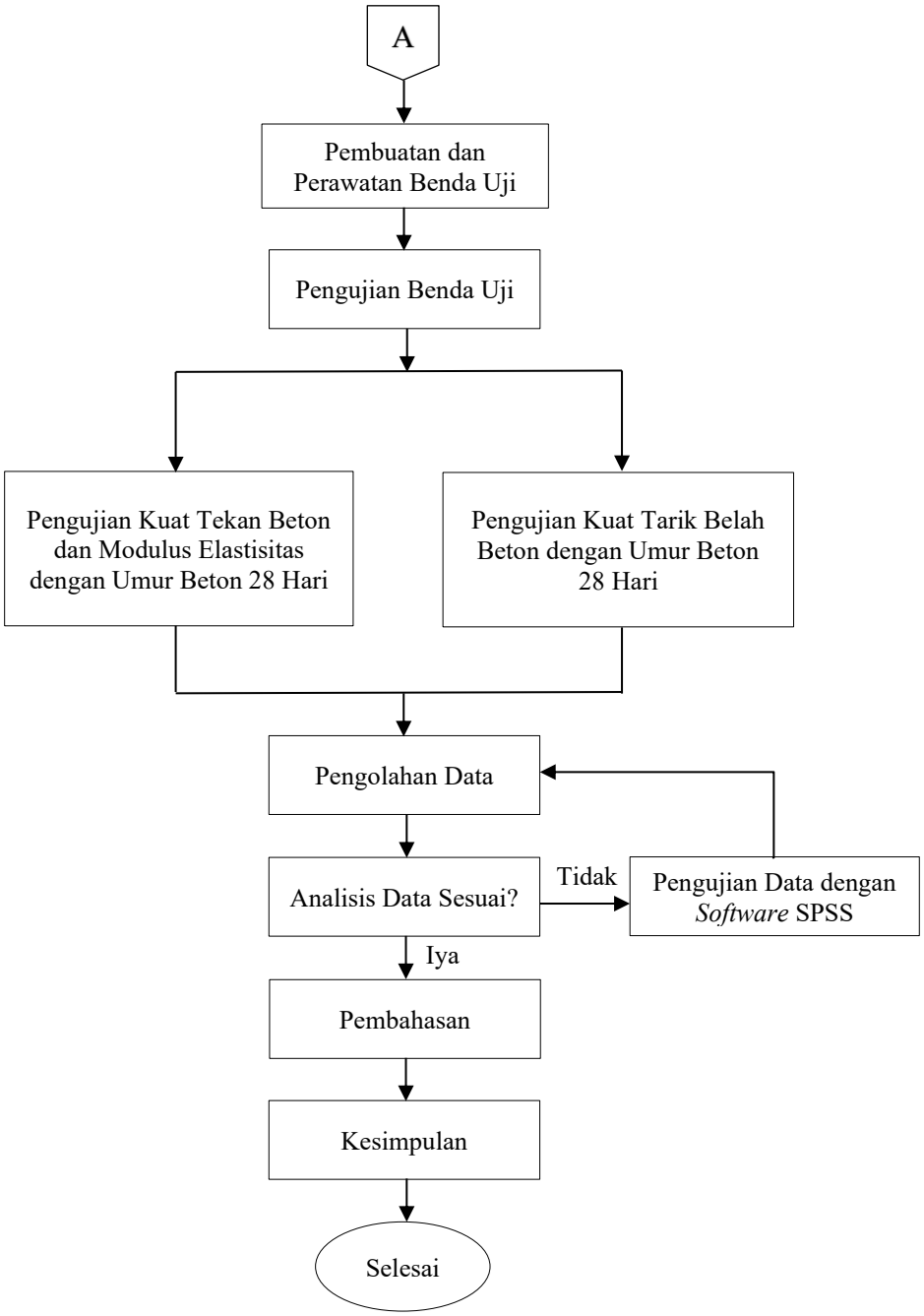
Pada tahap ini, disusun kesimpulan berdasarkan hasil yang telah diperoleh dengan merujuk pada tujuan awal penelitian. Selain itu, tahap ini juga memberikan saran sebagai informasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya berdasarkan kesimpulan yang telah dicapai.

4.8.10 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4. 4 Diagram Alir



Lanjutan Gambar 4. 4 Diagram Alir

BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Pengujian Material

Pengujian material agregat dilakukan menguji dan mengetahui kandungan karakteristik fisik dan sifat – sifat agregat yang digunakan sebagai penyusun beton. Material agregat mempunyai ketentuan atau syarat yang harus dipenuhi sebelum melakukan rencana campuran beton (*mix design*). Pada pengujian material agregat pada beton dibagi menjadi dua jenis, yaitu pengujian pada agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil).

5.1.1 Hasil Pemeriksaan Pada Agregat Halus

Pengujian yang dilakukan pada agregat halus berupa pengujian berat jenis dan penyerapan air, pengujian analisis saringan agregat, pengujian berat volume gembur dan padat, serta pengujian kadar lumpur pada agregat halus (pasir). Berdasarkan pengujian yang dilakukan didapatkan hasil sebagai berikut.

1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

   Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 1970 – 1990. Pada pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai dari berat jenis curah, berat jenis kering permukaan (SSD), berat jenis semu, dan penyerapan air pada pasir. Adapun perhitungan pada sampel 1 seperti dibawah ini.

   a. Berat Jenis Curah

   Berat Jenis Curah $= \frac{B_k}{(B+500-B_t)}$

   $= \frac{490}{(657+500-969)}$

   = 2,606 gram

b. Berat Jenis Jenuh Kering Muka (SSD)

Berat jenis kering muka (SSD) $= \frac{500}{(B+500-B_t)}$

$= \frac{500}{(657+500-969)}$

= 2,660 gram

c. Berat Jenis Semu

Berat jenis semu $= \frac{B_k}{(B+B_k-B_t)}$

$= \frac{490}{(657+490-969)}$

= 2,753 gram

d. Penyerapan Air

Penyerapan air $= \frac{(500-B_k)}{B_k} \times 100\%$

$= \frac{(500-490)}{490} \times 100\%$

= 2,04%

Untuk sampel ke-2, perhitungan dilakukan dengan cara yang sama untuk memperoleh nilai berat jenis dan penyerapan air, yang selanjutnya dirata-ratakan. Adapun tabel rekapitulasi dari hasil nilai pengujian berat jenis serta penyerapan air agregat halus pada sampel 1 dan 2 yang 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 (B_k)	490	495	492,5
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	500	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (B_t)	969	975	972
Berat piknometer berisi air, gram (B)	657	669	663
Berat jenis curah $\frac{B_k}{(B+500-B_t)}$	2,606	2,552	2,58
Berat jenis jenuh kering muka $\frac{500}{(B+500-B_t)}$	2,660	2,577	2,62

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

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – Rata
Berat jenis semu $\frac{B_k}{(B+B_k-B_t)}$	2,753	2,619	2,69
Penyerapan air $\frac{(500-B_k)}{B_k} \times 100\%$	2,04%	1,01%	1,53%

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5.1 didapatkan berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) rata – rata sebesar 2,62 gram.

2. Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus

Pada pengujian analisa saringan agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 1968-1990. Pada pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan klasifikasi agregat halus (pasir) berdasarkan butirannya (MHB) dengan berat benda uji sebanyak 2000 gram yang lolos No. 4 (4,75 mm). perhitungan pengujian analisa saringan agregat sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

Persentase Berat Tertinggal $= \frac{Berat\ Tertinggal}{\sum Berat\ Tertinggal} \times 100\%$

Saringan 4,80 mm (No. 4) $= \frac{8}{2000} \times 100\%$
$= 0{,}40\%$

Saringan 2,40 mm (No. 8) $= \frac{135}{2000} \times 100\%$
$= 6{,}75\%$

Saringan 1,20 mm (No. 16) $= \frac{359}{2000} \times 100\%$
$= 17{,}95\%$

Saringan 0,60 mm (No. 30) $= \frac{634}{2000} \times 100\%$
$= 31{,}70\%$

Saringan 0,30 mm (No. 50) $= \frac{373}{2000} \times 100\%$
$= 18{,}65\%$

Saringan 0,15 mm (No. 100) $= \frac{322}{2000} \times 100\%$
$= 16{,}10\%$

Pan (Sisa) $= \frac{169}{2000} \times 100\%$
$= 8, 45\%$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Saringan 4,80 mm (No. 4)	= 0,40%
Saringan 2,40 mm (No. 8)	= 0,40% + 6,75%
	= 7,15%
Saringan 1,20 mm (No. 16)	= 7,15% + 17,95%
	= 25,10%
Saringan 0,60 mm (No. 30)	= 25,10% + 31,70%
	= 56,80%
Saringan 0,30 mm (No. 50)	= 56,80% + 18,65%
	= 75,45%
Saringan 0,15 mm (No. 100)	= 75,45% + 16,10%
	= 91,55%
Pan (Sisa)	= 91,55% + 8,45%
	= 100%

c. Persentase Lolos Kumulatif

Saringan 4,80 mm (No. 4)	= 100% – 0,40
	= 99,60%
Saringan 2,40 mm (No. 8)	= 100% – 7,15%
	= 92,85%
Saringan 1,20 mm (No. 16)	= 100% – 22,10%
	= 74,90%
Saringan 0,60 mm (No. 30)	= 100% – 56,80%
	= 43,20%
Saringan 0,30 mm (No. 50)	= 100% – 75,45%
	= 24,55%
Saringan 0,15 mm (No. 100)	= 100% – 91,55%
	= 8,45%
Pan (Sisa)	= 100% – 100%
	= 0%

Berikut merupakan rekapitulasi hasil pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 5.2 hingga mengenai pengujian analisis saringan.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persentase Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,80	8	0,40	0,40	99,60
2,40	135	6,75	7,15	92,85
1,20	359	17,95	25,10	74,90
0,60	634	31,70	56,80	43,20
0,30	373	18,65	75,45	24,55
0,15	322	16,10	91,55	8,45
Pan	169	8,45	100	0
Jumlah	2000	100	256,45	

(Sumber: Hasil Analisis)

Dari pengujian analisa saringan agregat halus di atas dapat dihitung nilai modulus halus butir (MHB) yang didapat sebagai berikut.

d. Modulus Halus Butir (MHB)

$$\text{MHB} = \frac{\sum Persentase\ berat\ tertinggal\ kumulatif}{100}$$

$$= \frac{256{,}45}{100}$$

$$= 2{,}565$$

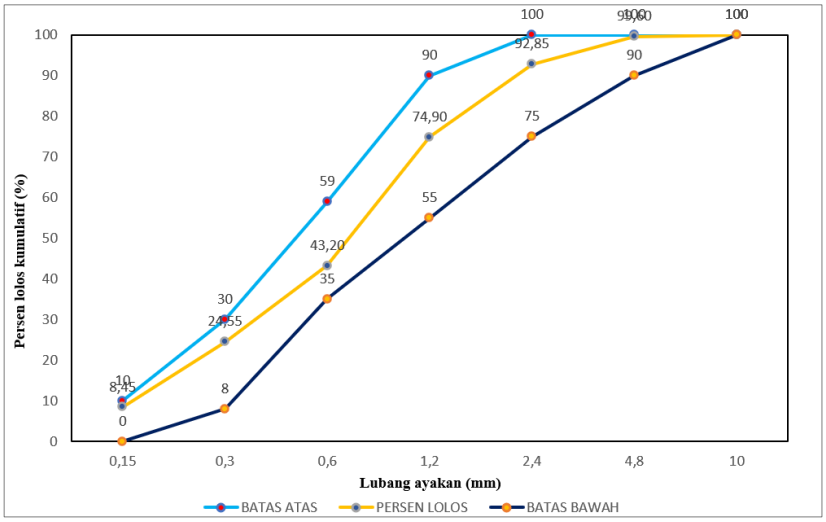
Berdasarkan SK SNI S-04-1989-F, nilai modulus halus butir pada agregat halus disyaratkan sebesar 1,5 – 3,8. Dari perhitungan modulus halus butir (MHB) tersebut diperoleh sebesar 2,565 yang dimana nilai tersebut memenuhi syarat yang ditentukan. Analisis saringan yang dilakukan untuk menentukan gradasi agregat halus yang disyaratkan sesuai dengan Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5. 3 Gradasi Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Ayakan			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	90-100
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)

Berdasarkan Tabel 5.3 agregat halus yang digunakan pada penelitian ini masuk dalam gradasi pasir daerah II dimana agregat tersebut termasuk pasir sedang. Dari Tabel 5.3 kemudian dibuat kurva gradasi agregat halus pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5. 1 Kurva Gradasi Agregat Halus Daerah II
(Sumber: Hasil Analisis)

3. Pemeriksaan Berat Volume Padat dan Gembur Agregat Halus

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

a. Berat Volume Padat

Berat agregat (W_3) $= W_2 - W_1$

$= 8228 - 5248$

$= 2980$ gram

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

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 10{,}5^2 \times 19{,}8$

$= 1714{,}485$ cm^3

Berat Volume Padat $= \frac{W_3}{V}$

$= \frac{2980}{1714{,}485}$

$= 1{,}738$ gram/ cm^3

b. Berat Volume Gembur

Berat agregat (W_3) $= W_2 - W_1$

$= 7822 - 5248$

$= 2574$ gram

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

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 10{,}5^2 \times 19{,}8$

$= 1714{,}485$ cm^3

Berat Volume Gembur $= \frac{W_3}{V}$

$= \frac{2574}{1714{,}485}$

$= 1{,}501$gram/ cm^3

Pada sampel 2 juga dilakukan pengujian berat volume padat dan gembur agregat halus yang sama pada sampel 1. Berikut merupakan rekapitulasi hasil pengujian tersebut pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5 sebagai berikut.

Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – rata
Berat tabung (W_1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W_2), gram	8228	8109	8168,5
Berat Agregat (W_3), gram	2980	2937	2958,5
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9
Volume tabung (V), gram	1714,485	1666,458	1690,471
Berat volume padat (W_3/V), gram/ cm^3	1,738	1,762	1,750

(Sumber: Hasil Analisis)

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata – rata**
Berat tabung (W_1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W_2), gram	7822	7618	7720
Berat Agregat (W_3), gram	2574	2446	2510
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9
Volume tabung (V), gram	1714,485	1666,458	1690,471
Berat volume gembur (W_3/V), gram/cm^3	1,501	1,468	1,485

(Sumber: Hasil Analisis)

Berbagai analisis perhitungan dari pengujian berat volume gembur dan berat volume padat telah dilakukan. Berat volume padat rata – rata yang didapat sebesar 1,750 gram/cm^3. Sedangkan, pada pengujian berat volume gembur rata – rata didapat sebesar 1,485 gram/cm^3. Dari nilai tersebut didapat perbandingan karena pada pengujian berat volume padat setiap $^1/_3$ bagian dilakukan pemadatan dan ditumbuk sebanyak 25 kali tumbukan pada silindernya untuk mengurangi celah udara yang terdapat pada agregat, sedangkan pada pengujian berat volume gembur tidak dilakukan pemadatan.

5. Pengujian Kadar Lumpur (Lolos Saringan No. 200) Agregat Halus

Pengujian lolos saringan No. 200 bertujuan untuk mendapatkan nilai persentase kandungan lumpur yang terdapat pada pasir. Pasir yang digunakan yaitu pasir yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) keadaan kering oven sebanyak 500 gram dengan metode berdasarkan SNI 4142-1996. Adapun perhitungan persentase kadar lumpur dalam pasir untuk sampel 1 sebagai berikut.

Berat agregat kering oven (W_1) = 500 gram

Berat kering oven setelah dicuci (W_2) = 475

Kadar lumpur dalam pasir $= \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%$

$= \frac{500-475}{500} \times 100\%$

$= 5{,}00\%$

Pada sampel 2, dilakukan dengan cara perhitungan dan langkah yang sama sehingga didapat nilai persentase kadar lumpur sebesar 5,00%. Berikut merupakan hasil rekapitulasi uji kadar lumpur dalam pasir yang dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Lolos Saringan No. 200 (Pasir)

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – Rata
Berat agregt kering oven (W_1), gram	500	500	500
Berat agregat kering oven setelah dicuci (W_2), gram	475	477	476
Persentase lolos saringan no. 200 $[(W_1 – W_2)/W_1] \times 100$	5,00%	4,60%	4,80%

(Sumber: Hasil Analisis)

5.1.2 Hasil Pemeriksaan Pada Agregat Kasar

Pengujian yang dilakukan pada agregat kasar berupa pengujian berat jenis dan penyerapan air, pengujian analisis saringan agregat, serta pengujian berat volume gembur dan padat. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, didapatkan hasil sebagai berikut.

1. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

   Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 1969 – 1990. Pada pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai dari berat jenis curah, berat jenis kering permukaan (SSD), berat jenis semu, dan penyerapan air pada kerikil. Adapun perhitungan pada sampel 1 seperti dibawah ini.

   a. Berat Jenis Curah

      Berat Jenis Curah $= \frac{B_k}{(B_j - B_a)}$

      $= \frac{4826}{(5000-3456)}$

      = 3,126 gram

   b. Berat Jenis Jenuh Kering Muka (SSD)

      Berat jenis kering muka (SSD) $= \frac{B_j}{(B_j - B_a)}$

$$= \frac{5000}{(5000-3456)}$$

$$= 3{,}238 \text{ gram}$$

c. Berat Jenis Semu

Berat jenis semu $$= \frac{B_k}{(B_k - B_a)}$$

$$= \frac{4826}{(4826-3456)}$$

$$= 3{,}523 \text{ gram}$$

d. Penyerapan Air

Penyerapan air $$= \frac{(B_j - B_k)}{B_k} \times 100\%$$

$$= \frac{(5000-4826)}{4826} \times 100\%$$

$$= 3{,}61\%$$

Perhitungan pada sampel ke-2 dilakukan dengan metode yang sama untuk menentukan nilai berat jenis dan penyerapan air. Hasil yang diperoleh kemudian dirata-ratakan dengan sampel lainnya. Adapun tabel hasil rekapitulasi dari hasil nilai pengujian berat jenis serta penyerapan air agregat kasar pada sampel 1 dan 2 yang dapat dilihat pada Tabel 5.7 berikut.

Tabel 5. 7 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – Rata
Berat pasir kering mutlak, gram (B_k)	4826	4912	4869
Berat kerikil kondisi jenuh kering muka (SSD), gram (B_j)	5000	5000	5000
Berat kerikil dalam air, gram (B_a)	3456	3389	3422,50
Berat jenis curah ($B_k/(B_j-B_a)$)	3,126	3,049	3,09
Berat jenis jenuh kering muka ($B_j/(B_j-B_a)$)	3,238	3,104	3,17
Berat jenis semu ($B_k/(B_k-B_a)$)	3,523	3,225	3,37
Penyerapan air ($B_j-B_k)/(B_k \times 100\%$)	3,61%	1,79%	2,70%

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5.7 didapatkan berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) rata – rata sebesar 3,17 gram.

2. Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar

Pada pengujian Analisa saringan agregat kasar dilakukan berdasarkan SNI 1968-1990. Pada pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan klasifikasi agregat kasar (kerikil) berdasarkan modulus halus butir (MHB) dengan berat benda uji sebanyak 5000 gram. Perhitungan pengujian analisa saringan agregat halus pada sampel 1 sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

Persentase Berat Tertinggal $= \frac{Berat\ Tertinggal}{\sum Berat\ Tertinggal} \times 100\%$

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

$= 100\%$

Saringan 20 mm $= \frac{0}{5000} \times 100\%$

$= 100\%$

Saringan 10 mm $= \frac{1369}{5000} \times 100\%$

$= 27{,}38\%$

Saringan 4,80 mm $= \frac{3357}{5000} \times 100\%$

$= 67{,}14\%$

Saringan 2,40 mm $= \frac{55}{5000} \times 100\%$

$= 1{,}1\%$

Saringan 1,20 mm $= \frac{36}{5000} \times 100\%$

$= 0{,}72\%$

Pan (Sisa) $= \frac{183}{5000} \times 100\%$

$= 3{,}66\%$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Saringan 40 mm $= 0\%$

Saringan 20 mm $= 0\%$

Saringan 10 mm $= 0\% + 27{,}38\%$

$= 27{,}38\%$

Saringan 4,80 mm $= 27{,}38\% + 67{,}14\%$

$= 94{,}52\%$

Saringan 2,40 mm = 94,52% + 1,1%
= 95,62%
Saringan 1,20 mm = 95,62% + 0,72%
= 96,34%
Pan (Sisa) = 96,34% + 3,66%
= 100%

c. Persentase Lolos Kumulatif

Saringan 40 mm = 100% – 0%
= 100%
Saringan 20 mm = 100% – 0%
= 100%
Saringan 10 mm = 100% – 27,38%
= 76,62%
Saringan 4,80 mm = 100% – 94,52%
= 5,48%
Saringan 2,40 mm = 100% – 95,62%
= 4,38%
Saringan 1,20 mm = 100% – 96,34%
= 3,66%
Pan (Sisa) = 100% – 100%
= 0%

Berikut merupakan rekapitulasi hasil pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 5.8 hingga mengenai pengujian analisis saringan.

Tabel 5. 8 Hasil Pengujian Analisis Saringan Agregat Kasar

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persentase Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	1369	27,38	27,38	76,62
4,80	3357	67,14	94,52	5,48

Lanjutan Tabel 5.8 Hasil Pengujian Analisis Saringan Agregat Kasar

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persentase Lolos Kumulatif (%)
2,40	55	1,1	95,62	4,38
1,20	36	0,72	96,34	3,66
0,60	0	0	96,34	3,66
0,30	0	0	96,34	3,66
0,15	0	0	96,34	3,66
Pan	183	3,66	100	0
Jumlah	5000	100	702,88	

(Sumber: Hasil Analisis)

d. Modulus Halus Butir (MHB)

MHB Sampel $= \frac{702,88}{100}$

$= 7,03$

Berdasarkan SK SNI S-04-1989-F, nilai modulus halus butir pada agregat halus disyaratkan sebesar 5 – 8. Dari perhitungan modulus halus butir (MHB) tersebut diperoleh sebesar 7,03 yang dimana nilai tersebut memenuhi syarat yang ditentukan. Analisis saringan yang dilakukan untuk menentukan gradasi agregat halus yang disyaratkan sesuai dengan Tabel 5.9 berikut.

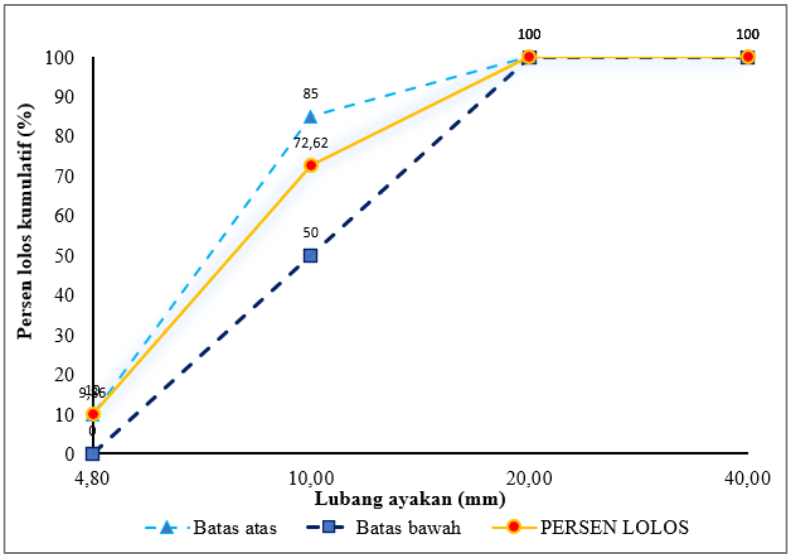
Tabel 5. 9 Gradasi Agregat Kasar

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan		
	40 mm	20 mm	10 mm
40	95 – 100	100	100
20	30 – 70	95 – 100	100
10	10 – 35	25 – 55	50 – 85
4,8	0 – 5	0 – 10	0 – 10

(Sumber : SNI 2834-2000)

Data hasil pengujian analisis saringan menunjukkkan bahwa agregat kasar yang digunakan masuk dalam kategori butiran maksimum sebesar 10 mm

yang dapat dilihat pada Gambar 5.2 untuk grafik gradasi rata-rata dari kedua sampel tersebut.



Gambar 5. 2 Kurva Gradasi Agregat Kasar Maksimum 10 mm
(Sumber: Hasil Analisis)

3. Pemeriksaan Berat Volume Gembur dan Padat Agregat Kasar

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

a. Berat Volume Gembur

Berat agregat (W_3) $= W_2 - W_1$

$= 7595 - 5248$

$= 2347$ gram

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

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 10{,}5^2 \times 19{,}8$

$= 1714{,}485$ cm^3

Berat Volume Gembur $= \frac{W_3}{V}$

$= \frac{2347}{1714{,}485}$

$= 1{,}369$ gram/cm^3

b. Berat Volume Padat

Berat agregat (W_3) $= W_2 - W_1$

$= 8228 - 5248$

$= 2980$ gram

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

$= \frac{1}{4} \times \pi \times 10{,}5^2 \times 19{,}8$

$= 1714{,}485\ cm^3$

Berat Volume Gembur $= \frac{W_3}{V}$

$= \frac{2980}{1714{,}485}$

$= 1{,}738\ gram/cm^3$

Pada sampel 2 juga dilakukan pengujian berat volume gembur dan padat agregat kasar yang sama pada sampel 1. Berikut merupakan rekapitulasi hasil pengujian tersebut pada Tabel 5.10 dan Tabel 5.11 sebagai berikut.

Tabel 5. 10 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – rata
Berat tabung (W_1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W_2), gram	7595	7386	7490,5
Berat Agregat (W_3), gram	2347	2214	2280
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9
Volume tabung (V), gram	1714,485	1666,458	1690,471
Berat volume gembur (W_3/V), gram/cm^3	1,369	1,329	1,349

(Sumber: Hasil Analisis)

Tabel 5. 11 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – rata
Berat tabung (W_1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W_2), gram	8006	7737	7871,5
Berat Agregat (W_3), gram	2758	2565	2661,5
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9

Lanjutan Tabel 5.11 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – rata
Volume tabung (V), gram	1714,485	1666,458	1690,471
Berat volume gembur (W_3/V), gram/cm^3	1,609	1,539	1,574

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan analisis perhitungan dari pengujian berat volume gembur dan berat volume padat telah dilakukan. Berat volume gembur rata – rata yang didapat sebesar 1,349 gram/cm^3. Sedangkan, pada pengujian berat volume padat rata – rata didapat sebesar 1,574 gram/cm^3. Dari nilai tersebut didapat perbandingan karena pada pengujian berat volume padat setiap $^1/_3$ bagian dilakukan pemadatan dan ditumbuk sebanyak 25 kali tumbukan pada silindernya untuk mengurangi celah udara yang terdapat pada agregat. Sedangkan, pada pengujian berat volume gembur tidak dilakukan pemadatan.

5.2 Perencanaa Campuran Beton (*Mix Design*)

5.2.1 Hasil Perencanaan Proporsi Campuran Beton

Pada perencanaan campuran beton dilakukan berdasarkan SNI 2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Metode ini dilakukan agar mendapatkan campuran beton sesuai kuat beton yang sudah direncanakan. Pada penelitian ini kuat tekan rencana sebesar 25 MPa dan pada campuran menggunakan campuran *fly ash* sebagai pengganti parsial pada semen. Berikut merupakan metode campuran beton yang dilakukan agar mendapatkan proporsi campuran sesuai rencana.

1. Kuat tekan rencana yang digunakan sebesar 25 MPa dan menggunakan benda uji silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, pengujian dilakukan pada umur beton 28 hari.
2. Semen yang digunakan adalah semen *Portland* Tipe I *merk* Tiga Roda berjenis OPC (*Ordinary Portland Cement*).
3. Sampel pengujian dibuat sebanyak 5 buah dengan umur beton 7 hari, maka nilai *margin* (M) yang digunakan sebesar 12 MPa berdasarkan Tabel 3.2 yang telah dijelaskan sebelumnya.

4. Kuat tekan beton yang direncanakan sesuai dengan persamaan berikut.

   f'_{cr} = f'c + M

   = 25 + 12

   = 37 MPa

5. berdasarkan pengujian berat jenis agregat kondisi SSD diperoleh jenis agregat halus (BJ_{AH}) sebesar 2,62 gram dan berat jenis agregat kasar (BJ_{AK}) sebesar 3,17 gram.

6. Nilai faktor air semen (fas) yang digunakan sesuai Tabel 5.12 dan Gambar 5.1 berikut.

   a. Faktor air semen (fas) digunakan 0,5 dengan jenis semen *Portland* Tipe I dan agregat batu pecah.

   b. Kuat tekan beton direncanakan umur 28 hari dengan bentuk benda uji silinder.

   c. Berdasarkan Tabel 5.12 didapat kuat tekan beton dengan fas 0,5 dan umur beton 28 hari yaitu 37 MPa.

Tabel 5. 12 Perkiraan Kuat Tekan Beton (MPa) dengan Jenis Semen dan Agregat yang Digunakan di Indonesia

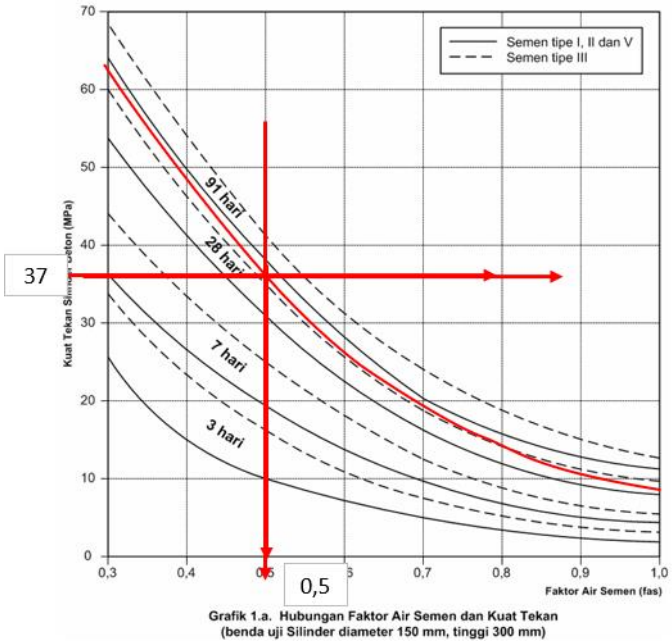
Jenis Semen	Jenis Agregat	Kekuatan Tekan Beton (MPa)				
		Umur (hari)				Bentuk benda uji
		3	7	28	29	
Semen *Portland* Tipe 1	Batu tak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu pecah	19	27	37	45	
Semen *Portland* Tipe II, V	Batu tak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu pecah	25	32	45	54	
Semen *Portland* Tipe III	Batu tak dipecahkan	25	31	46	53	Silinder
	Batu pecah	30	40	53	60	
	Batu tak dipecahkan	25	31	46	53	Kubus
	Batu pecah	30	40	53	60	

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

   d. Berdasarkan Gambar 3.1 dengan menarik garis vertikal ke atas pada nilai faktor air semen (fas) 0,5 dan menarik garis horizontal ke kanan dari nilai kuat tekan beton sebesar 37 MPa hingga garis tersebut berpotongan dengan nilai fas 0,5.

   e. Setelah didapat titik berpotongan kemudian dibuat kurva parabola baru.

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 faktor air semen (fas) yang digunakan, yaitu sebesar 0,5.



Gambar 5. 3 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen (Benda Uji silinder 15 x 30 cm)

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

7. Menentukan kadar air yang diigunakan

Penentuan kadar air yang digunkan dalam campuran beton dapat dilihat berdasarkan Tabel 5.13 berikut.

Tabel 5. 13 Perkiraan Kadar Air Bebas (Kg/m^3) Yang Dibutuhkan Untuk Kemudahaan Dalam Adukan Beton

Ukuran Maksimum Agregat (mm)	Jenis Agregat	*Slump Test* (mm)			
		0 – 10	10 – 30	30 – 60	60 – 180
10	Batu tak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

Kadar air yang dibutuhkan dapat dihitung sebagai berikut.

W $= \frac{2}{3} W_h + \frac{1}{3} W_k$

W $= \frac{2}{3} \times 225 + \frac{1}{3} \times 250$

W $= 233{,}33$ kg/m^3

8. Menetapkan jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum

Jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum ditentukan berdasarkan Tabel 5.14 berikut.

Tabel 5. 14 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Pada Lingkungan Khusus

Jenis Pembetonan	Jumlah Semen Minimum Per M^3 Beton	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. Terlindungi dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
Beton masuk ke dalam tanah		
1. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
2. 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)

Berdasarkan Tabel 5.14 digunakan jenis pembetonan dengan beton di dalam ruangan bangunan dan keadaan keliling non korosif, sehingga didapatkan nilai jumlah semen minimum sebesar 275 kg dan nilai fas maksimum sebesar 0,60.

9. Menentukan kadar semen

Nilai fas yang digunakan yaitu nilai fas terkecil dari nilai fas grafik sebesar 0,5 sehingga perhitungan kadar semen sebagai berikut.

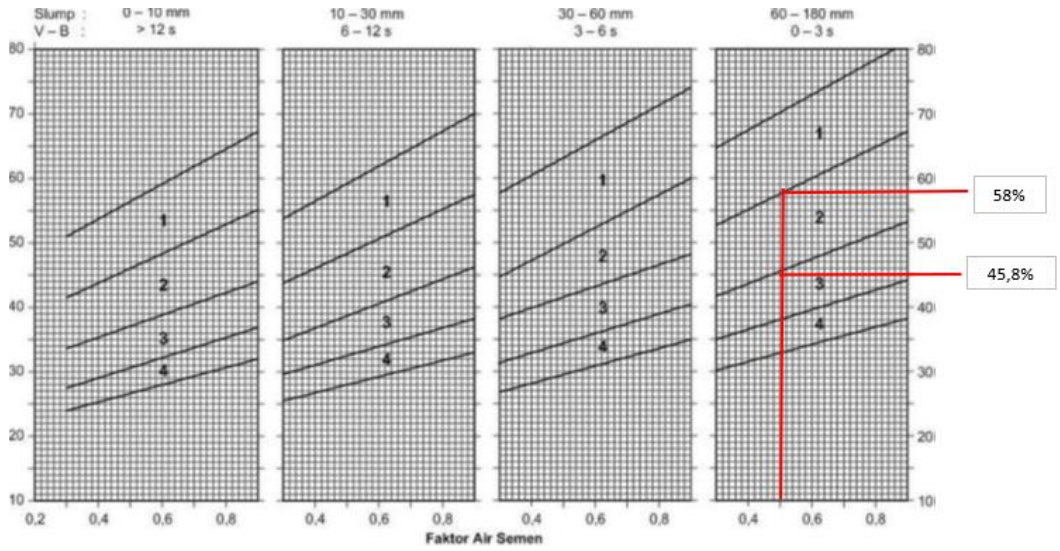
C $= \frac{W}{fas}$

$= \frac{233,33}{0,5}$

$= 466,67 \text{ kg/m}^3$

10. Menentukan persentase agregat halus dan agregat kasar

Persentase agregat halus ditentukan dengan menggunakan grafik yang menunjukkan persentase pasir terhadap total kadar agregat yang dianjurkan, sesuai dengan ukuran butir maksimum yang ditetapkan. Ukuran butir maksimum untuk agregat halus berdasarkan pengujian adalah 10 mm, dengan rencana slump antara 60 – 180 mm, nilai faktor air semen (fas) sebesar 0,5, dan agregat halus yang digunakan termasuk dalam gradasi IV.



Gambar 5. 4 Grafik Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Butir Max 10 Mm

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

Berdasarkan Gambar 5.4 di atas didapatkan persentase agregat halus batas atas sebesar 58% dan batas bawah sebesar 45,8%. Maka nilai rata – rata persentase yang digunakan yaitu 51,9%. Sehingga persentase agregat kasar dapat dihitung dengan perhitungan berikut.

Persentase agregat kasar = 100% – persentase agregat halus
= 100% – 51,9%
= 48,1%

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

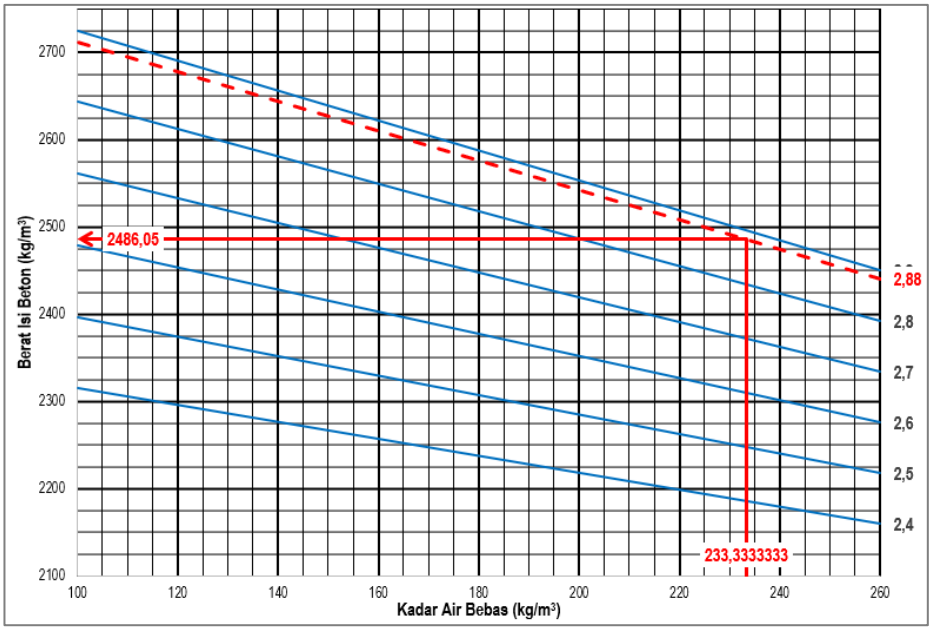
Berat jenis relatif agregat gabungan mengacu pada nilai berat jenis agregat halus (BJ_{AH}) sebesar 2,62 dan agregat kasar (BJ_{AK}) sebesar 3,17, yang masing-masing dikalikan dengan persentase proporsi agregatnya. Adapun perhitungan berat jenis relatif agregat gabungan disajikan sebagai berikut.

Berat jenis relatif gabungan = (%AH × BJ_{AH}) + (%AK × BJ_{AK})
= (51,9% × 2,62) + (48,1% × 3,17)
= 2,88

12. Menentukan Berat Isi Beton

Berat isi beton mengacu pada SNI 03-2843-2000 dan dapat dilihat pada Gambar 5. 5 berikut.

a. Membuat garis (kurva) baru sesuai dengan berat jenis relatif agregat gabungan yaitu sebesar 2,88.
b. Menarik garis secara vertikal ke atas berdasarkan nilai kadar air bebas yang didapatkan yaitu sebesar hingga memotong kurva baru tersebut.
c. Tarik garis baru secara horizontal ke kiri dari titik potong pada butir b, sehingga didapatkan asumsi nilai berat isi beton sebesar 2486,05 kg/m^3.



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

(Sumber : SNI 03-2834-2000)

13. Kadar Agregat Gabungan

Kadar agregat gabungan diperoleh dari berat isi beton dikurangi dengan kadar semen dan kadar air bebas. Adapun perhitungan kadar agregat gabungan sebagai berikut.

Kadar agregat gabungan = Berat isi beton – Kadar semen – Kadar air bebas

= 2486,05 – 466,67 – 233,33

= 1786 kg/m^3

14. Kadar Agregat Halus

Kadar agregat halus diperoleh dari pesen agregat halus dikalikan dengan kadar agregat gabungan. Adapun perhitungan kadar agregat halus sebagai berikut.

Kadar agregat halus = %AH × Kadar agregat gabungan

= 51,9% × 1786

= 926,934 kg/m^3

15. Kadar Agregat Kasar

Kadar agregat kasar diperoleh dari selisih kadar agregat gabungan dan kadar agregat halus. Adapun perhitungan kadar agregat kasar sebagai berikut.

Kadar agregat kasar = Kadar agregat gabungann – Kadar agregat halus
= 1786 – 926,934
= 859,066 kg/m^3

16. Proporsi Campuran Beton Per 1 m^3

Berdasarkan hasil perencanaan dan perhitungan campuran beton di atas, sehingga diperoleh proporsi campuran beton/1 m^3 adalah sebagai berikut.

a. Semen = 466,667 kg
b. Air = 233,333 liter
c. Agregat Halus = 926,934 kg
d. Agregat Kasar = 859,066 kg

17. Proporsi Campuran Beton dengan Angka Penyusutan

Pada penelitian ini angka penyusutan yang digunakan yaitu sebesar 25%, sehingga proporsi campuran beton/1 m^3 adalah sebagai berikut.

a. Semen = 583,333 kg
b. Air = 291,667 liter
c. Agregat Halus = 1158,668 kg
d. Agregat Kasar = 1073,833 kg

18. Rekapitulasi Perencanaan Campuran Beton Normal

Berdasarkan pada hasil perencanaan dan perhitungan campuran beton normal yang telah dilakukan, rekapitulasi campuran (*mix design*) beton normal yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 5.15 sebagai berikut.

Tabel 5. 15 Rekapitulasi Hasil *Mix Design* Beton Normal

No	Uraian	Nilai	Satuan
1	Kuat tekan yang disyaratkan (f'c)	25	MPa
2	Deviasi Standar	-	-
3	Nilai tambah (Margin)	12	MPa
4	Kekuatan rata – rata yang ditargetkan	37	MPa
5	Jenis Semen	Tipe 1 (OPC)	
6	Jenis Agregat Kasar	Batu Pecah	
	Jenis Agregat Halus	Alami	

Lanjutan Tabel 5. 15 Rekapitulasi Hasil *Mix Design* Beton Normal

NO	Uraian	Nilai	Satuan
7	Faktor air semen (fas)	0,5	
	Faktor air semen maksimum	0,6	
8	Faktor air semen (fas) digunakan	0,5	
9	Slump	60 – 180	cm
10	Ukuran agregat maksimum	10	mm
11	Kadar air bebas	233,33	kg/m^3
12	Jumlah semen	466,67	kg/m^3
13	Jumlah semen maksimum	-	
14	Jumlah semen minimum	275	kg/m^3
15	Jumlah semen digunakan	466,67	kg/m^3
16	Fas disesuaikan	0,5	
17	Susunan besar butir agregat halus	Gradasi 2	
18	Berat Jenis agregat halus (SSD)	2,62	
	Berat Jenis agregat kasar (SSD)	3,17	
19	Persen agregat halus	51,9	%
20	Persen agregat kasar	48,1	%
21	Berat Jenis relatif gabungan (SSD)	2,88	
22	Berat isi beton	2486,05	kg/m^3
23	Kadar agregat gabungan	1786	kg/m^3
24	Kadar agregat halus	926,934	kg/m^3
25	Kadar agregat kasar	859,066	kg/m^3
26	Kadar semen dengan angka penyusutan	583,333	kg/m^3
27	Kadar agregat halus dengan angka penyusutan	1158,668	kg/m^3
28	Kadar agregat kasar dengan angka penyususstan	1073,833	kg/m^3
29	Kadar air dengan angka penyusutan	291,667	kg/m^3

(Sumber: Hasil Analisis)

19. Volume Benda Uji

Pada penelitian ini benda uji yang akan dilakukan pada setiap variasi yaitu silinder sebanyak 8 sampel dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Volume campuran 8 silinder $= 8 \times ¼ \times d^2 \times t$

$= 8 \times ¼ \times 0{,}15^2 \times 0{,}30$

$= 0{,}0424\ m^3$

Sehingga proporsi campuran untuk membuat benda uji setiap kali *mixing* adalah sebagai berikut.

a. Semen $= 0{,}0424 \times 583{,}333 = 24{,}740$ kg

b. Air $= 0{,}0424 \times 291{,}667 = 12{,}370$ kg

c. Agregat Halus $= 0{,}0424 \times 1158{,}668 = 49{,}141$ kg

d. Agregat Kasar $= 0{,}0424 \times 1073{,}833 = 45{,}543$ kg

5.2.2 Campuran Beton *Fly ash*

Pada penelitian ini perencanaan beton juga menggunakan campuran *fly ash* sebagai substitusi sebagian semen dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dari berat semen. Adapun perencanaan campuran beton *fly ash* setiap variasinya sebagai berikut.

1. Proporsi campuran beton *fly ash* variasi 0% (8 Sampel)

   Berdasarkan hasil perencanaan dan perhitungan untuk campuran beton *fly ash* variasi 0% adalah sebagai berikut.

   a. *Fly ash* = 0 kg
   b. Semen = 24,740 kg
   c. Air = 12,370 kg
   d. Agregat Halus = 49,141 kg
   e. Agregat Kasar = 45,543 kg

2. Proporsi campuran beton *fly ash* variasi 5% (8 Sampel)

   Berdasarkan hasil perencanaan dan perhitungan untuk campuran beton *fly ash* variasi 5% adalah sebagai berikut.

   a. *Fly ash* = 24,740 kg × $\frac{5}{100}$
      = 1,237 kg
   b. Semen = 24,740 kg – 1,237 kg
      = 23,503 kg
   c. Air = 12,370 kg
   d. Agregat Halus = 49,141 kg
   e. Agregat Kasar = 45,543 kg

3. Proporsi campuran beton *fly ash* variasi 10% (8 Sampel)

   Berdasarkan hasil perencanaan dan perhitungan untuk campuran beton *fly ash* variasi 10% adalah sebagai berikut.

   a. Fly ash = 24,740 kg × $\frac{10}{100}$
      = 2,474 kg
   b. Semen = 24,740 kg – 2,474 kg
      = 22,266 kg

c. Air = 12,370 kg

d. Agregat Halus = 49,141 kg

e. Agregat Kasar = 45,543 kg

4. Proporsi campuran beton *fly ash* variasi 15% (8 Sampel)

Berdasarkan hasil perencanaan dan perhitungan untuk campuran beton *fly ash* variasi 15% adalah sebagai berikut.

a. *Fly ash* = 24,740 kg × $\frac{15}{100}$

= 3,711 kg

b. Semen = 24,740 kg – 3,711 kg

= 21,029 kg

c. Air = 12,370 kg

d. Agregat Halus = 49,141 kg

e. Agregat Kasar = 45,543 kg

5. Proporsi campuran beton *fly ash* variasi 20% (8 Sampel)

Berdasarkan hasil perencanaan dan perhitungan untuk campuran beton *fly ash* variasi 20% adalah sebagai berikut.

a. Fly ash = 24,740 kg × $\frac{20}{100}$

= 4,948 kg

b. Semen = 24,740 kg – 4,948 kg

= 19,792 kg

c. Air = 12,370 kg

d. Agregat Halus = 49,141 kg

e. Agregat Kasar = 45,543 kg

Adapun hasil rekapitulasi perencanaan campuran beton *fly ash* pada penelitian ini dilihat pada Tabel 5.16 sebagai berikut.

Tabel 5. 16 Rekapitulasi Campuran Beton *Fly ash*

Variasi (%)	*Fly ash* (Kg)	Semen (Kg)	Agregat Kasar (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Air (Kg)	Kode Beton	Jumlah Silinder (Buah)
0	0	24,740	45,543	49,141	12,370	BV – 0	8
5	1,237	23,503	45,543	49,141	12,370	BV – 5	8
10	2,474	22,266	45,543	49,141	12,370	BV – 10	8
15	3,711	21,029	45,543	49,141	12,370	BV – 15	8
20	4,948	19,792	45,543	49,141	12,370	BV – 20	8

(Sumber: Hasil Analisis)

5.2.3 Hasil Pengujian *Slump* Beton

Pengujian *slump* pada beton bertujuan untuk menilai tingkat kelecakan (*workability*) dari beton segar. Besar kecilnya nilai *slump* menunjukkan seberapa mudah campuran beton diolah, mulai dari proses pengadukan, penuangan, hingga pemadatan. Semakin tinggi nilai *slump*, semakin mudah beton segar dikerjakan, sedangkan nilai *slump* yang rendah menunjukkan bahwa beton lebih sulit untuk diolah. Hasil pengujian slump dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut.

Tabel 5. 17 Hasil Pengujian *Slump*

Benda Uji	Variasi *Fly Ash* (%)	Tinggi Slump (mm)	Ketetapan Slump (mm)	Keterangan
BN	0	100	60 – 180	Memenuhi
BV-05	5	120	60 – 180	Memenuhi
BV-10	10	130	60 – 180	Memenuhi
BV-15	15	140	60 – 180	Memenuhi
BV-20	20	145	60 – 180	Memenuhi

(Sumber: Hasil Analisis)

Dari Tabel 5.17 didapatkan nilai *slump* yang dimana dengan bertambahnya kadar variasi *fly ash* membuat nilai *slump* menjadi meningkat dibanding beton variasi normal. Peningkatan nilai *slump* dengan bertambahnya kadar *fly ash* dipengaruhi oleh kandungan kimianya, terutama SiO_2 dan Al_2O_3 yang berukuran

sangat halus dan tidak cepat bereaksi, sehingga tidak banyak menyerap air pada awal pencampuran. Kombinasi sifat kimia dan fisik ini menyebabkan *workability* meningkat dan nilai *slump* bertambah. Penelitian ini juga sejalan dengan penelitian. Sofia, A., D., (2020), dimana dengan penambahan kadar *fly ash* yang digunakan pada campuran beton membuat nilai slump meningkat.

Gambar 5. 6 Contoh Uji *Slump*
(Sumber: Hasil Analisis)

5.3 Pembuatan dan Pengujian Sampel Beton *Trial* 7 Hari

Dalam pembuatan sampel beton dengan target umur 28 hari, dilakukan pembuatan sampel tambahan untuk pengujian pada umur 7 hari. Pengujian ini bertujuan sebagai indikator awal untuk menilai apakah mutu beton yang direncanakan akan tercapai. Proses pembuatan sampel beton umur 7 hari dilakukan dengan menggunakan campuran yang sama seperti pada rencana umur 28 hari, termasuk jenis dan proporsi materialnya. Setelah beton dicetak ke dalam cetakan silinder, benda uji dirawat (*curing*) dalam air bersuhu konstan selama 7 hari sebelum dilakukan pengujian kuat tekan.

Nilai kuat tekan pada umur 7 hari yang diharapkan umumnya berada pada kisaran 60 –70% dari target umur 28 hari. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.2 kekuatan beton pada umur 7 hari dapat dikonversi menjadi kekuatan untuk umur 28 hari dengan menggunakan faktor konversi sesuai Pedoman Beton Bertulang

Indonesia 1971 (PBI 1971). Berikut adalah perhitungan konversi yang digunakan untuk memperoleh nilai tersebut.

$$f'c_{(aktual)} = \frac{P}{A}$$
$$= \frac{483{,}070}{17671{,}459}$$
$$= 27{,}336 \text{ MPa}$$

$$f'c_{(konversi)} = f'c_{(aktual)} \times \frac{1}{angka\ konversi}$$
$$= 27{,}336 \times \frac{1}{0{,}65}$$
$$= 42{,}055 \text{ MPa}$$

Berdasarkan perhitungan diatas didapat faktor konversi nilai kuat tekan beton f'c 25 MPa pada umur 7 hari. Berikut merupakan nilai yang didapat dari pengujian beton *trial* pada Tabel 5.18 dan Tabel 5.19.

Tabel 5. 18 Data Benda Uji

Data	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4	Sampel 5
Diameter (cm)	15	15,1	15	14,9	15
Tinggi (cm)	30,1	30,1	30	30	30,1
Berat (gr)	12945	12755	12749	12716	12694

(Sumber: Hasil Analisis)

Tabel 5. 19 Data Pengujian

Sampel	Lama Pengujian (Detik)	Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan *Trial* (MPa)	Angka Konversi Umur Uji	Kuat Tekan Komversi (MPa)	Kuat Tekan Rerata (MPa)
1	68	17671,459	483,070	27,336	0,65	42,055	39,455
2	69	17907,864	496,870	28,117	0,65	43,257	
3	78	17671,459	549,130	31,075	0,65	47,808	
4	57	17436,625	407,450	23,057	0,65	35,472	
5	47	17671,459	329,490	18,645	0,65	28,685	

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan tabel diatas dapat disimpulkan jika nilai kuat tekan sudah memenuhi nilai konversi untuk *trial* umur 7 hari, nilai rata – rata pengujian tekan

trial yang didapat sebesar 39,455 MPa. Sehingga, dapat dilanjutkan pembuatan sampel beton pada umur 28 hari.

5.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan diawali dengan pengeringan beton selama 24 jam pada suhu ruang, kemudian dilakukan proses capping untuk meratakan permukaan sampel. Berikut merupakan contoh perhitungan kuat tekan pada variasi beton normal.

1. Kuat tekan beton pada sampel 1 variasi beton normal.

   Diketahui:

   P = 593,920

   A = 17907,864

   Perhitungan:

   A $= \frac{P}{A}$

   $= \frac{593,920}{17907,864}$

   = 33,609 MPa

2. Kuat tekan beton pada sampel 2 variasi beton normal.

   Diketahui:

   P = 631,750

   A = 17907,864

   Perhitungan:

   A $= \frac{P}{A}$

   $= \frac{631,750}{17907,864}$

   = 38,750 MPa

3. Kuat tekan beton pada sampel 3 variasi beton normal.

   Diketahui:

   P = 720,940

   A = 17671,459

Perhitungan:

A $= \frac{P}{A}$

$= \frac{720,940}{17671,459}$

= 40,797 MPa

4. Kuat tekan beton pada sampel 4 variasi beton normal.

Diketahui:

P = 843,670

A = 17671,459

Perhitungan:

A $= \frac{P}{A}$

$= \frac{843,670}{17671,459}$

= 47,742 MPa

5. Kuat tekan beton pada sampel 5 variasi beton normal.

Diketahui:

P = 748,550

A = 18145,839

Perhitungan:

A $= \frac{P}{A}$

$= \frac{748,550}{18145,839}$

= 42,359 MPa

6. Kuat tekan rata – rata variasi beton normal.

Diketahui:

f'c $_{(\text{rata – rata})}$ $= \frac{33,609+35,750+40,797+47,742+42,359}{5}$

= 40,051 MPa

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, kuat tekan beton dengan variasi lainnya dapat dilihat pada Tabel 5. 20 berikut.

Tabel 5. 20 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton

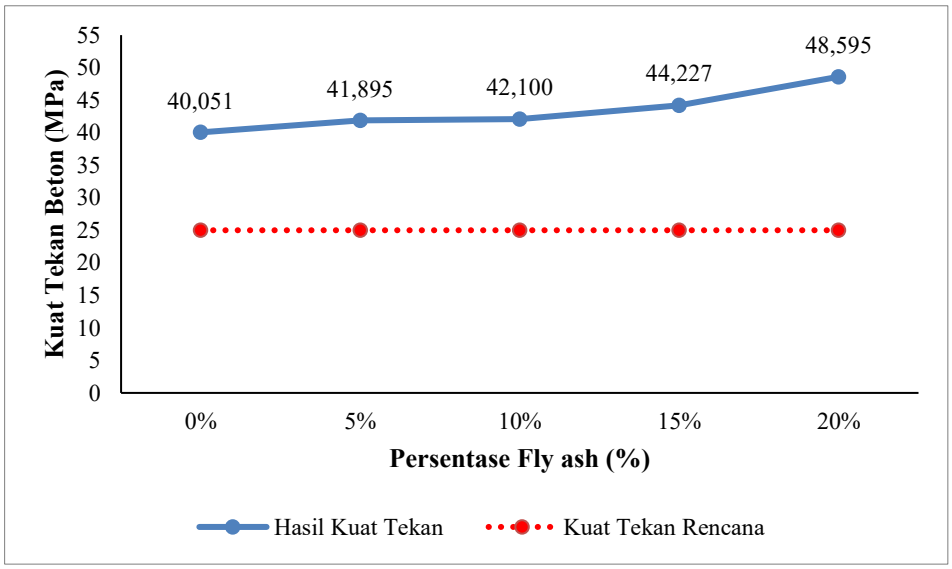
Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BN	1	15,10	30,10	17907,864	593,920	33,609	40,051
	2	15,10	29,90	17907,864	631,750	35,750	
	3	15,00	30	17671,459	720,940	40,797	
	4	15,00	30	17671,459	843,670	47,742	
	5	15,20	30	18145,839	748,550	42,359	
BV-05	1	15,00	30,10	17671,459	478,100	27,055	41,895
	2	15,10	30,00	17907,864	827,890	46,849	
	3	15,00	29,00	17671,459	778,270	44,041	
	4	15,00	29,00	17671,459	803,690	45,479	
	5	15,10	30,20	17907,864	809,000	45,780	
BV-10	1	15,10	30,00	17907,864	735,150	44,576	42,100
	2	15,00	30,10	17671,459	719,030	41,982	
	3	15,05	30,00	17789,465	626,390	39,589	
	4	14,90	29,90	17436,625	630,690	41,569	
	5	15,00	30,00	17671,459	695,260	42,785	

Lanjutan Tabel 5. 20 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton

Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BV-15	1	14,90	30,10	17436,625	852,720	48,254	
	2	15,10	30,10	17671,459	888,840	50,298	
	3	15,00	29,90	17907,864	646,080	36,561	44,227
	4	15,00	30,00	17671,459	883,880	50,017	
	5	15,05	30,05	17907,864	636,290	36,007	
BV-20	1	14,90	30,00	17436,625	649,570	36,758	
	2	15,01	30,01	17695,028	1034,590	58,546	
	3	15,00	30,00	17671,459	834,750	47,237	48,595
	4	15,00	29,8	17671,459	1015,280	57,453	
	5	15,05	30,00	17789,465	759,580	42,983	

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Tabel 5.20 didapatkan grafik hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari. Adapun grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut.



Gambar 5. 7 Grafik Pengujian Kuat Tekan Beton
(Sumber: Hasil Analisis)

Gambar 5. 8 Contoh Pengujian Kuat Tekan Beton
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Gambar 5. 9 Contoh Hasil Kuat Tekan Beton
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan penelitian ini diperoleh hasil kuat tekan beton rata – rata untuk BN, BV-05, BV-10, BV-15, dan BV-20 berturut – turut sebesar 40,051 MPa, 41,895 MPa, 42,100 MPa, 44,227 MPa, 48,595 MPa. Diperoleh bahwa kuat tekan rata-rata terendah terdapat pada variasi BN sebesar 40,051 MPa, sedangkan kuat tekan rata-rata tertinggi terdapat pada variasi BV-20 sebesar 48,595 MPa. Metode proporsi campuran berdasarkan SNI 2843-2000 pada pembuatan beton normal. Hasil kuat tekan beton normal digunakan sebagai acuan dalam proses pembuatan beton campuran *fly ash*.

Hasil kuat tekan yang didapat lebih tinggi dari kuat tekan rencana yaitu 25 MPa, penggunaan semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan *fly ash* Tipe F menjadi salah satu faktor utama meningkatnya kuat tekan beton jauh di atas kuat tekan rencana 25 MPa. Semen OPC memiliki kandungan trikalsium silikat (C_3S) yang tinggi, yang berperan utama dalam pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C–S–H) dan portlandit selama proses hidrasi awal hingga umur 28 hari. Mekanisme ini dijelaskan oleh John. (2023), yang menyatakan bahwa C_3S berkontribusi besar terhadap perkembangan kekuatan awal melalui pembentukan C–S–H dan $Ca(OH)_2$. Temuan ini sejalan dengan penelitian Kanto., R. (2021), yang dimana penelitiannya menggunakan Semen Tipe OPC dan *fly ash* Tipe F yang menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi pada variasi 30% sebesar 56,8 Mpa pada umur 28 hari.

Peningkatan kuat tekan pada beton dengan campuran *fly ash* disebabkan oleh sifat pozzolan *fly ash* yang mengandung senyawa silikat (SiO_2) dan aluminat (Al_2O_3) reaktif. Senyawa tersebut bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C–S–H), yang berperan dalam meningkatkan kekuatan tekan, kepadatan, dan durabilitas beton (Agus, 2020). Hasil data yang didapat dilakukan perhitungan statistik menggunakan *software* SPSS untuk memastikan bahwa data penelitian memenuhi asumsi dasar uji parametrik.

5.4.1 Metode *Interquartile Range* (IQR)

Perhitungan metode *Interquartile Range* (IQR) dijelaskan pada tahapan berikut.

1. Tahap penentuan nilai kuartil dan IQR

   Sebelum menentukan nilai kuartil dan IQR, dilakukan pengurutan data dari nilai terkecil hingga terbesar dari distribusi data yang digunakan yang dapat dilihat pada Tabel 5.21 berikut.

Tabel 5. 21 Nilai Data *Ascending* Kuat Tekan Beton

BN (MPa)	BV-05 (MPa)	BV-10 (MPa)	BV-15 (MPa)	BV-20 (MPa)
33,609	27,055	39,589	36,007	36,758
35,750	44,041	41,569	36,561	42,983
40,797	45,479	41,982	48,254	47,237
42,359	45,780	42,785	50,017	57,453
47,742	46,849	44,576	50,298	58,546

(Sumber: Hasil Analisis)

Dari Tabel 5.20 didapatkan urutan data dari nilai terkecil hingga terbesar, dimana dari tabel tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai Q1 (25%), Q2 (50%), dan Q3 (75%). Nilai kuartil dari seluruh variasi dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.

Percentiles

		Jenis Perlakuan	Percentiles 25	50	75
Weighted Average (Definition 1)	Kuat Tekan	BN	34.67950	40.79700	45.05050
		BV-05	35.54800	45.47900	46.31450
		BV-10	40.57900	41.98200	43.68050
		BV-15	36.28400	48.25400	50.15750
		BV-20	39.87050	47.23700	57.99950
Tukey's Hinges	Kuat Tekan	BN	35.75000	40.79700	42.35900
		BV-05	44.04100	45.47900	45.78000
		BV-10	41.56900	41.98200	42.78500
		BV-15	36.56100	48.25400	50.01700
		BV-20	42.98300	47.23700	57.45300

Gambar 5. 10 Tabel *Percentiles*
(Sumber: Hasil Analisis)

Dari Gambar 5.10 data yang digunakan dari metode *Tukey's Hinges* karena data yang digunakan pada pengujian ini kurang dari 30 data. Pada gambar tersebut juga didapat untuk nilai kuartil pada seluruh variasi beton.
Setelah itu dilakukan perhitungan untuk mencari nilai IQR, batas bawah, dan batas atas. Nilai tersebut dapat dicari dengan contoh perhitungan pada variasi BN sebagai berikut.

$$
\begin{aligned}
\text{IQR} &= Q3 - Q1 \\
&= 42{,}359 - 35{,}750 \\
&= 6{,}609 \\
\text{Batas Bawah} &= Q1 - (1{,}5 \times \text{IQR}) \\
&= 35{,}750 - (1{,}5 \times 6{,}609) \\
&= 25{,}837 \\
\text{Batas Atas} &= Q3 + (1{,}5 \times \text{IQR}) \\
&= 42{,}359 + (1{,}5 \times 6{,}609) \\
&= 52{,}273
\end{aligned}
$$

Dari cari perhitungan yang sama juga dilakukan pada variasi yang lain, sehingga didapat nilai rekapitulasi dan juga nilai outlier yang didapat pada Tabel 5.22 berikut.

Tabel 5. 22 Rekapitulasi Kuartil, IQR, dan *Outlier* Kuat Tekan

Perlakuan	Q1	Q3	IQR	Batas Bawah	Batas Atas	*Outlier*
BN	35,750	42,359	6,609	25,837	52,273	–
BV-05	44,041	45,780	1,739	41,432	48,288	27,055 (Sampel 1)
BV-10	41,569	42,785	1,216	39,745	44,609	39,589 (Sampel 3)
BV-15	36,561	50,017	13,456	16,377	70,201	–
BV-20	42,983	57,453	14,470	21,278	79,158	–

(Sumber: Hasil Analisis)

Ketentuan klasifikasi terdapat nilai outlier:

a. Nilai data < Q1 – (1,5 × IQR)
b. Nilai data > Q3 + (1,5 × IQR)

Dari Tabel 5.22, Pada BV-05 terdapat nilai data 27,055 MPa dimana nilai tersebut < batas bawah, yaitu sebesar 41,432. Sehingga data tersebut dapat diasumsikan menjadi *outlier* pada BV-05. Dan pada BV-10 terdapat nilai data 39,589 MPa dimana nilai tersebut < batas bawah, yaitu sebesar 39,745. Sehingga data tersebut diasumsikan *outlier* pada BV-10. *Outlier* tersebut dihapus untuk membersihkan data dari nilai yang terlalu ekstrem agar analisis statistik yang dilakukan menjadi lebih akurat, stabil, dan mewakili kondisi sebenernya. Selanjutnya dilakukan metode normalitas sebagai berikut.

5.4.2 Metode Normalitas

Perhitungan metode normalitas dijelaskan pada tahapan sebagai berikut.

1. Tahap pemeriksaan kelengkapan data (*data checking*)

   Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh data yang dimasukkan ke dalam program SPSS telah lengkap dan dapat diolah tanpa ada nilai yang kosong. Hasil kelengkapan data dapat dilihat pada Gambar 5.11 sebagai berikut.

Case Processing Summary

		Cases					
		Valid		Missing		Total	
	Jenis Perlakuan	N	Percent	N	Percent	N	Percent
Kuat Tekan	BN	5	100.0%	0	0.0%	5	100.0%
	BV-05	4	80.0%	1	20.0%	5	100.0%
	BV-10	4	80.0%	1	20.0%	5	100.0%
	BV-15	5	100.0%	0	0.0%	5	100.0%
	BV-20	5	100.0%	0	0.0%	5	100.0%

Gambar 5. 11 Validasi Data Software SPSS
(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Valid (N) = Jumlah data yang digunakan dalam analisis

Missing (N) = Jumlah data yang tidak dapat digunakan karena tidak memiliki nilai (kosong)

Percent (%) = Persentase data valid dan data hilang dari keseluruhan data

Berdasarkan Gambar 5.11, terlihat bahwa persentase kelengkapan data pada variasi BV-05 dan BV-10 sebesar 80%. Hal ini mengindikasikan adanya data yang hilang (*missing data*), karena pada percobaan ini nilai *outlier* tidak diikutsertakan dalam proses analisis.

2. Tahap pengujian asumsi normalitas dari data

Hasil uji normalitas dapat dilihat pada Gambar 5.12 *Tests of Normality* yang menampilkan nilai statistic uji dan signifikansi (Sig.) sebagai berikut.

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Jenis Perlakuan	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Kuat Tekan	BN	.179	5	.200*	.966	5	.847
	BV-05	.230	4	.	.975	4	.870
	BV-10	.233	4	.	.910	4	.484
	BV-15	.309	5	.132	.763	5	.039
	BV-20	.228	5	.200*	.921	5	.533

Gambar 5. 12 Hasil Pengujian Normalitas
(Sumber : Hasil Analisis)

Keterangan:

Statictic = besarnya nilai uji kolmogrov – Smirnov atau Shapiro – Wilk.

df (*degree of freedom*) = jumlah data yang digunakan dalam pengujian.
Sig. (*Significance*) = nilai probabilitas atau p – value yang digunakan untuk menentukan apakah data berdistribusi normal.

Berdasarkan Gambar 5.12, didapatkan nilai statistik, derajat kebebasan (df), *p – value* (sig) dengan menggunakan 2 cara, yaitu cara Kolmogorov Smirnov dan Shapiro – Wilk. Interpretasi dari metode normalitas dapat dilihat pada Tabel 5.23 berikut.

Tabel 5. 23 Perbandingan Uji Kolmogorov Smirnov Dan Shapiro Wilk Pada Asumsi Normalitas

Jenis Perlakuan	Kolmogorov Smirnov (D)	Shapiro Wilk (W)	P Value (Kolmogorov Smirnov)	P Value (Shapiro Wilk)	Keputusan (Kolmogorov Smirnov)	Keputusan (Shapiro Wilk)	Hasil	Interpretasi
BN	0,179	0,966	0,200	0,847	0,200 > 0.05	0,847 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-05	0,230	0,975	-	0,870	-	0,870 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-10	0,233	0,910	-	0,484	-	0,484 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-15	0,309	0,763	0,132	0,039	0,132 > 0.05	0,039 < 0,05	H_0	Tidak berdistribusi normal
BV-20	0,228	0,921	0,200	0,533	0,200 > 0,05	0,200 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal

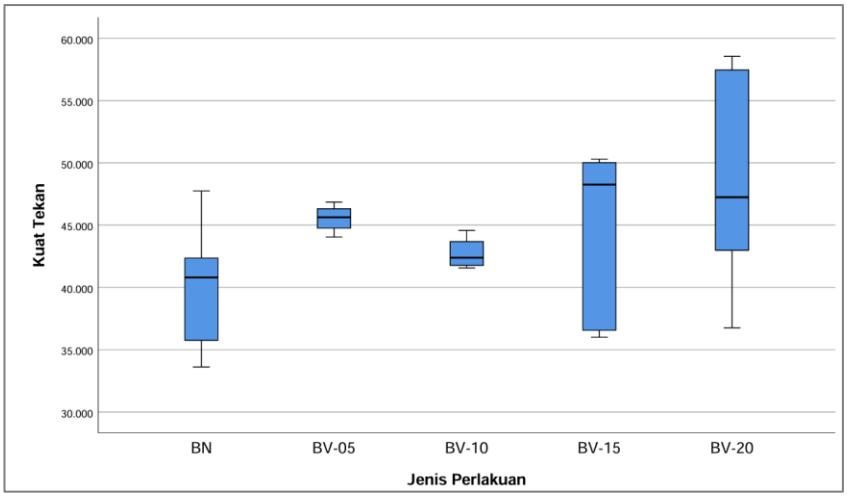
(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

H_0 = Galat percobaan berdistribusi normal

H_1 = Galat percobaan tidak berdistribusi normal

Berdasarkan Tabel 2.23, dapat diketahui jika setiap variasi memiliki hasil interpretasi berdistribusi normal kecuali variasi BV-15 berdistribusi tidak normal. Ketidakteraturan distribusi pada variasi BV-15 disebabkan oleh sebaran data yang terlalu luas, yang menunjukkan adanya perbedaan nilai antar sampel cukup besar. Kondisi ini menyebabkan distribusi data menjadi tidak simetris meskipun tidak ditemukan adanya *outlier*. Hal ini juga di validasikan dengan tidak ada *outlier* pada *boxplot* yang dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5. 13 Visualisasi *Boxplot*

(Sumber: Hasil Analisis)

Setelah dilakukan uji normalitas, diperoleh bahwa data berdistribusi normal karena tidak terdapat nilai *outlier* yang memengaruhi sebaran data. Oleh karena itu, dilakukan penghapusan *outlier* untuk memperoleh distribusi data yang lebih sesuai dengan asumsi normalitas. Setelah itu, pengujian dilanjutkan dengan uji homogenitas untuk memastikan bahwa varians antar kelompok perlakuan memiliki keseragaman atau tidak.

5.4.3 Metode Homogenitas

Uji homogenitas untuk mengetahui apakah sebaran atau keragaman nilai kuat tekan beton antar kelompok perlakuan BN, BV-05, BV-10, BV-15, dan BV-20 memiliki varians yang seragam (homogen). Pengujian homogenitas pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *Levene's Test of Equality of Error Variances*

dengan menggunakan taraf signifikansi 5% (α = 0.05). Berikut merupakan nilai homogenitas yang dapat dilihat pada Tabel 5.24 berikut.

Tabel 5. 24 Nilai Homogenitas

Statistik	*Levene Statistic*	df1	df2	Sig.	Keputusan
Based on Mean	6,556	4	18	0,002	Tidak Homogen
Based on Median	2,286	4	18	0,100	Homogen
Based on Median and with adjusted df	2,286	4	10,383	0,129	Homogen
Based on Trimmed Mean	6,593	4	18	0,002	Tidak Homogen

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Levene Statistic = nilai statistik uji yang menunjukkan besar kecilnya perbedaan varians antar kelompok.

df1 dan df2 = Derajat kebebasan untuk uji Levene.

Sig. (*Significance*) = Nilai probabilitas atau p-value yang digunakan untuk menentukan apakah data homogen atau tidak.

Keputusan diambil berdasarkan nilai signifikansi (*p-value*) dengan ketentuan sebagai berikut:

a. Jika nilai Sig. > 0.05 → varians antar kelompok homogen
b. Jika nilai Sig. < 0.05 → varians antar kelompok tidak homogen

Berdasarkan hasil uji pada Tabel 5.24, diperoleh nilai signifikansi 0,002 < 0,05 pada *Based on Mean* dan *Based on Trimmed Mean*, yang menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak homogen. Namun, jika dilihat pada kriteria lain seperti "*Based on Median*" dan "*Based on Median and with adjusted df*", nilai signifikansi adalah 0,100 dan 0,129, yang masih lebih besar dari 0,05 atau homogen.

Hasil uji homogenitas memperlihatkan bahwa tidak semua kelompok perlakuan memiliki varians yang homogen. Kondisi ini mengindikasikan bahwa

penghapusan *outlier* dapat meningkatkan kenormalan data tanpa selalu menjamin keseragaman varians antar kelompok. Temuan ini sejalan dengan penelitian, Sari A. Q., (2021) yang menyatakan bahwa pemenuhan asumsi normalitas dan homogenitas bergantung pada karakteristik masing-masing variabel.

5.4.4 Metode Welch Anova

Pada pengujian ini digunakan Welch ANOVA, karena hasil uji homogenitas sebelumnya menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak seragam. Metode ini lebih cocok untuk situasi dengan ketidakseragaman varians, sebagaimana direkomendasikan dalam literatur statistik modern (Wibowo, 2020). Berikut merupakan hasil analisis dari Welch ANOVA yang dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut.

ANOVA

Kuat Tekan

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	198.446	4	49.611	1.279	.315
Within Groups	698.246	18	38.791		
Total	896.692	22			

Gambar 5. 14 *Output Welch* Anova Kuat Tekan

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Sum of squares = Jumlah variasi perbedaan antar kelompok perlakuan

df = Derajat bebas

Mean Square = Nilai variasi antar kelompok yang sudah dirata – ratakan.

F = Rasio antara mean square antar kelompok dan mean square dalam kelompok

Sig. = Nilai p – value yang menunjukkan signifikansi perbedaan

Berdasarkan hasil uji Welch ANOVA pada data kuat tekan, terlihat bahwa nilai *Between Groups* memiliki *Mean Square* sebesar 49,611, sedangkan *Within Groups* memiliki *Mean Square* sebesar 38,791. Perbandingan kedua nilai tersebut menghasilkan nilai F sebesar 1,279. Nilai F yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa variasi antar kelompok tidak jauh berbeda dibandingkan variasi dalam

kelompok. Hal tersebut semakin diperkuat oleh nilai signifikansi (Sig.) sebesar 0,315 yang berada di atas batas α = 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata kuat tekan yang signifikan antar kelompok perlakuan. Dengan demikian, variasi kuat tekan yang muncul lebih disebabkan oleh variasi alami data dalam kelompok, bukan oleh pengaruh perlakuan atau variasi campuran yang diuji.

Berdasarkan pengujian IQR, normalitas, homogenitas, dan Welch ANOVA yang sudah dilakukan, beton variasi BV-05 sampel 1 dan BV-10 sampel 3 dapat dihapuskan dari data penelitian ini. Keberadaan *outlier* dapat menyebabkan penyimpangan distribusi yang berdampak pada penurunan validitas hasil analisis (Sihombing, 2022). Sedangkan BV-15 tetap dipertahankan karena sebarannya masih merepresentasikan kondisi aktual, hal ini sejalan dengan penelitian Wulandari, (2021) yang tetap mempertahankan data yang tidak berdistribusi normal akibat luasan data yang luas.

Sehingga rekapitulasi data untuk pengujian kuat tekan beton pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.25 berikut.

Tabel 5. 25 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton Setelah Pengujian Statistik

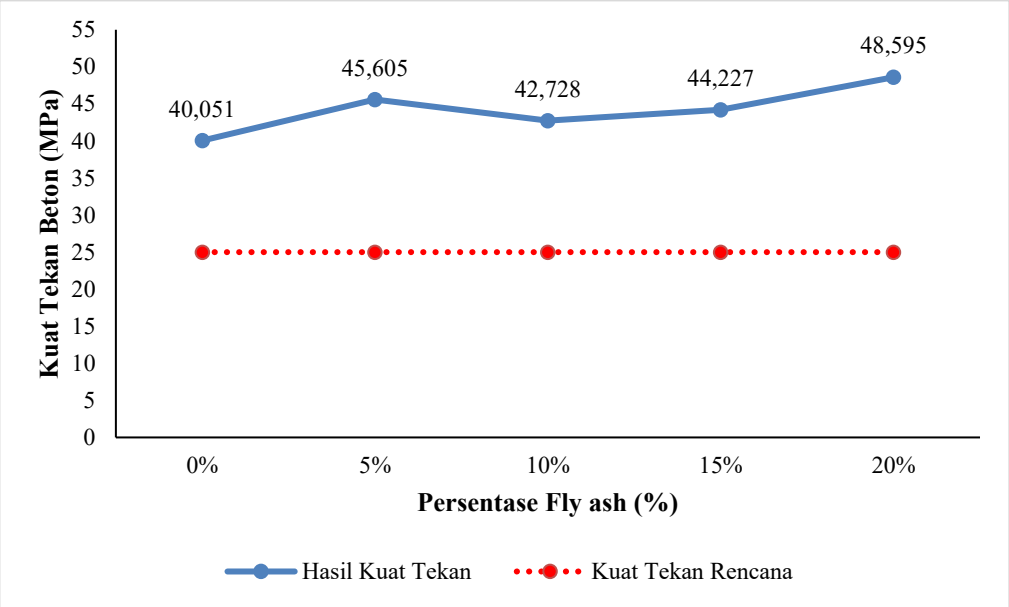
Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BN	1	15,10	30,10	17907,864	593,920	33,609	40,051
	2	15,10	29,90	17907,864	631,750	35,750	
	3	15,00	30	17671,459	720,940	40,797	
	4	15,00	30	17671,459	843,670	47,742	
	5	15,20	30	18145,839	748,550	42,359	
BV-05	1	15,00	30,10	17671,459	478,100	-	45,605
	2	15,10	30,00	17907,864	827,890	46,849	
	3	15,00	29,00	17671,459	778,270	44,041	
	4	15,00	29,00	17671,459	803,690	45,479	
	5	15,10	30,20	17907,864	809,000	45,780	
BV-10	1	15,10	30,00	17907,864	735,150	44,576	42,728
	2	15,00	30,10	17671,459	719,030	41,982	
	3	15,05	30,00	17789,465	626,390	-	
	4	14,90	29,90	17436,625	630,690	41,569	
	5	15,00	30,00	17671,459	695,260	42,785	

Lanjutan Tabel 5. 25 Rekapitulasi Hasil Uji Tekan Beton Setelah Pengujian Statistik

Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BV-15	1	14,90	30,10	17436,625	852,720	48,254	
	2	15,10	30,10	17671,459	888,840	50,298	
	3	15,00	29,90	17907,864	646,080	36,561	44,227
	4	15,00	30,00	17671,459	883,880	50,017	
	5	15,05	30,05	17907,864	636,290	36,007	
BV-20	1	14,90	30,00	17436,625	649,570	36,758	
	2	15,01	30,01	17695,028	1034,590	58,546	
	3	15,00	30,00	17671,459	834,750	47,237	48,595
	4	15,00	29,8	17671,459	1015,280	57,453	
	5	15,05	30,00	17789,465	759,580	42,983	

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Tabel 5.25, nilai rata – rata kuat tekan beton pada variasi BV-05 menjadi 45,605 MPa dan BV-10 menjadi 42,728 MPa setelah dilakukan pengujian statistik dengan penghapusan data *outlier*. Dari Tabel 5.25 diperoleh grafik hasil nilai kuat tekan beton *fly ash* setelah penghapusan *outlier* yang dapat dilihat pada Gambar 5.15 sebagai berikut.



Gambar 5. 15 Grafik Nilai Kuat Tekan Beton Setelah Pengujian Statistik
(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.15 menunjukkan bahwa hasil kuat tekan beton pada setiap variasi, diketahui bahwa seluruh variasi campuran masih menunjukkan nilai kuat tekan di atas kuat tekan rencana sebesar 25 MPa. Hal ini menandakan bahwa seluruh campuran, baik beton normal maupun beton dengan penambahan *fly ash*, telah memenuhi standar mutu yang direncanakan.

Berdasarkan hasil pengujian statistik menggunakan metode IQR, normalitas, homogenitas, dan ANOVA hasil akhir tetap konsisten menunjukkan peningkatan kekuatan. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi BV-20 sebesar 48,595 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada beton normal (BN) sebesar 40,051 MPa. Sehingga, kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* hingga 20% masih memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kuat tekan beton, yang disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara senyawa aktif dalam *fly ash* dengan

kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, sehingga membentuk struktur beton yang lebih padat dan kuat.

5.5 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Pada pengujian modulus elastisitas beton dilakukan bersamaan dengan pengujian kuat tekan beton dengan umur 28 hari. Untuk pengujian ini benda uji diberikan alat tambahan berupa *dial gauge* untuk mendapatkan nilai perubahan Panjang (ΔL) yang dicatat setiap kenaikan tekanan sebesar 10 kN. Dari pembacaan *dial gauge* didapatkan juga nilai tegangan dan regangan pada benda uji. Berikut perhitungan nilai tegangan dan regangan dari benda uji Ketika menerima beban 10 kN pada pengujian modulus elastisitas beton dengan contoh beton variasi BV-10 sampel 1 sebagai berikut.

1. Perhitungan Nilai ΔL

$$\Delta L = \frac{\Delta L}{2} \times 10^{-3}$$
$$= \frac{5}{2} \times 10^{-3}$$
$$= 0{,}0025 \text{ mm}$$

2. Perhitungan Nilai Regangan (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$$
$$= \frac{0{,}0025}{200}$$
$$= 0{,}0000125$$

3. Nilai Tegangan (σ)

$$\sigma = \frac{P}{A}$$
$$= \frac{10000}{17907{,}864}$$
$$= 0{,}562 \text{ MPa}$$

Dengan langkah dan perhitungan yang sama didapatkan nilai tegangan dan regangan setiap penambahan beban 10 kN. Berikut rekapitulasi hasil perhitungan tegangan dan regangan modulus elatisitas pada beton BV-10 sampel 1 pada Tabel 5.26 sebagai berikut.

Tabel 5. 26 Nilai Tegangan dan Regangan Beton *Fly ash* Variasi BV-10 sampel 1

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi (ΔL)	Regangan (ε')	Tegangan (σ)
kN	N	... x 10^3 mm	mm	%	MPa
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,56
20	20000	11	0,0055	0,0000275	1,12
30	30000	17	0,0085	0,0000425	1,68
40	40000	23	0,0115	0,0000575	2,23
50	50000	30	0,015	0,000075	2,79
60	60000	36	0,018	0,00009	3,35
70	70000	43	0,0215	0,0001075	3,91
80	80000	49	0,0245	0,0001225	4,47
90	90000	55	0,0275	0,0001375	5,03
100	100000	64	0,032	0,00016	5,58
110	110000	71	0,0355	0,0001775	6,14
120	120000	78	0,039	0,000195	6,70
130	130000	86	0,043	0,000215	7,26
140	140000	93	0,0465	0,0002325	7,82
150	150000	101	0,0505	0,0002525	8,38
160	160000	109	0,0545	0,0002725	8,93
170	170000	116	0,058	0,00029	9,49
180	180000	124	0,062	0,00031	10,05
190	190000	133	0,0665	0,0003325	10,61
200	200000	142	0,071	0,000355	11,17
210	210000	149	0,0745	0,0003725	11,73
220	220000	157	0,0785	0,0003925	12,29
230	230000	166	0,083	0,000415	12,84

Lanjutan Tabel 5. 26 Nilai Tegangan dan Regangan Beton *Fly ash* Variasi BV-10 sampel 1

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi (ΔL)	Regangan (ε')	Tegangan (σ)
kN	N	... x 10^3 mm	mm	%	MPa
240	240000	175	0,0875	0,0004375	13,40
250	250000	183	0,0915	0,0004575	13,96
260	260000	192	0,096	0,00048	14,52
270	270000	201	0,1005	0,0005025	15,08
280	280000	210	0,105	0,000525	15,64
290	290000	218	0,109	0,000545	16,19
300	300000	229	0,1145	0,0005725	16,75
310	310000	239	0,1195	0,0005975	17,31
320	320000	248	0,124	0,00062	17,87
330	330000	257	0,1285	0,0006425	18,43
340	340000	268	0,134	0,00067	18,99
350	350000	276	0,138	0,00069	19,54
360	360000	286	0,143	0,000715	20,10
370	370000	297	0,1485	0,0007425	20,66
380	380000	305	0,1525	0,0007625	21,22
390	390000	318	0,159	0,000795	21,78
400	400000	327	0,1635	0,0008175	22,34
410	410000	338	0,169	0,000845	22,89
420	420000	348	0,174	0,00087	23,45
430	430000	359	0,1795	0,0008975	24,01
440	440000	369	0,1845	0,0009225	24,57
450	450000	380	0,19	0,00095	25,13
460	460000	392	0,196	0,00098	25,69

Lanjutan Tabel 5. 26 Nilai Tegangan dan Regangan Beton *Fly ash* Variasi BV-10 sampel 1

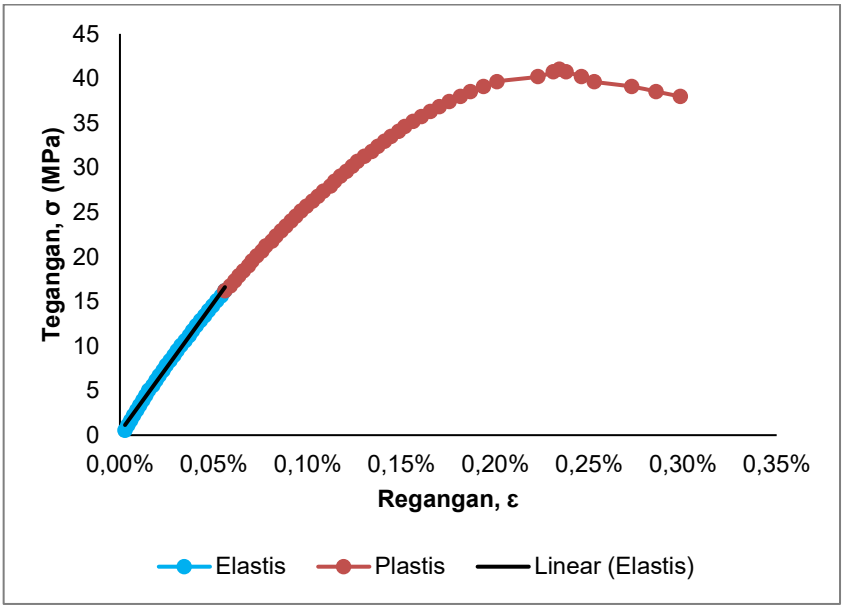
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi (ΔL)	Regangan (ε')	Tegangan (σ)
kN	N	... x 10^3 mm	mm	%	MPa
470	470000	405	0,2025	0,0010125	26,25
480	480000	416	0,208	0,00104	26,80
490	490000	428	0,214	0,00107	27,36
500	500000	443	0,2215	0,0011075	27,92
510	510000	452	0,226	0,00113	28,48
520	520000	464	0,232	0,00116	29,04
530	530000	477	0,2385	0,0011925	29,60
540	540000	489	0,2445	0,0012225	30,15
550	550000	500	0,25	0,00125	30,71
560	560000	515	0,2575	0,0012875	31,27
570	570000	531	0,2655	0,0013275	31,83
580	580000	544	0,272	0,00136	32,39
590	590000	558	0,279	0,001395	32,95
600	600000	572	0,286	0,00143	33,50
610	610000	588	0,294	0,00147	34,06
620	620000	601	0,3005	0,0015025	34,62
630	630000	619	0,3095	0,0015475	35,18
640	640000	637	0,3185	0,0015925	35,74
650	650000	656	0,328	0,00164	36,30
660	660000	675	0,3375	0,0016875	36,86
670	670000	696	0,348	0,00174	37,41
680	680000	720	0,36	0,0018	37,97
690	690000	741	0,3705	0,0018525	38,53

Lanjutan Tabel 5. 26 Nilai Tegangan dan Regangan Beton *Fly ash* Variasi BV-10 sampel 1

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi (ΔL)	Regangan (ε')	Tegangan (σ)
kN	N	... x 10^3 mm	mm	%	MPa
700	700000	769	0,3845	0,0019225	39,09
710	710000	798	0,399	0,001995	39,65
720	720000	885	0,4425	0,0022125	40,21
730	730000	918	0,459	0,002295	40,76
735,15	735150	931	0,4655	0,0023275	41,05
730	730000	945	0,4725	0,0023625	40,76
720	720000	978	0,489	0,002445	40,21
710	710000	1005	0,5025	0,0025125	39,65
700	700000	1085	0,5425	0,0027125	39,09
690	690000	1137	0,5685	0,0028425	38,53

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Tabel 5.26, untuk tabel berwarna biru menunjukkan nilai beban, regangan, dan tegangan pada saat beton mencapai 40% dari kuat tekan maksimumnya, sedangkan tabel berwarna kuning menampilkan nilai-nilai tersebut pada saat beton mencapai kuat tekan maksimum. Grafik hubungan antara tegangan dan regangan terbagi menjadi dua zona, yaitu zona elastis dan zona plastis. Zona elastis menggambarkan kondisi linier hingga mencapai 40% dari nilai f'c maksimum, sedangkan zona plastis menunjukkan kondisi dari 40% f'c maksimum hingga tercapainya kuat tekan maksimum beton. Adapun grafik hubungan tegangan dan regangan dapat dilihat pada Gambar 5.16.



Gambar 5. 16 Grafik Tegangan dan Regangan BV-10 Sampel 1
(Sumber: Hasil Analisis)

Gambar 5. 17 Contoh Pengujian Modulus Elastisitas Beton
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Nilai modulus elastisitas dapat didapatkan secara perhitungan teoritis menggunakan rumus dari SNI 2847-2019 pada persamaan berikut.

$$Ec = 4700 \times \sqrt{f'c}$$

$$= 4700 \times \sqrt{44{,}576}$$

$$= 31379{,}67 \text{ MPa}$$

Selain itu, mencari nilai modulus elastisitas dapat secara perhitungan pengujian berdasarkan ASTM C-469-94 pada persamaan berikut.

$$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_c - 0{,}00005}$$

$$= \frac{16{,}19 - 2{,}23}{0{,}00055 - 0{,}00005}$$

$$= 28636{,}61 \text{ MPa}$$

Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh rekapitulasi nilai modulus elastisitas beton yang dihasilkan pada perhitungan teoritis dan pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 5.27 sebagai berikut.

Tabel 5. 27 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton

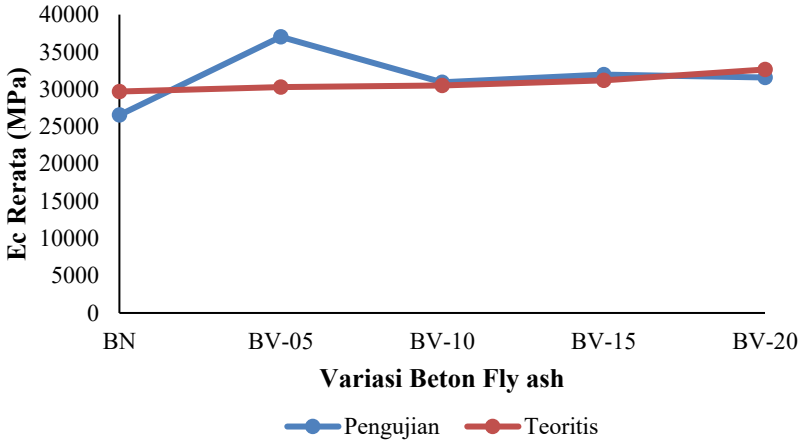
Kode Benda Uji		f'c (MPa)	Modulus Elastisitas, E (MPa)			
			$Ec = 4700 \times \sqrt{f'c}$ (SNI 2847-2019)		$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_c - 0{,}00005}$ (ASTM C-469-94)	
			Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)
BN	1	33,609	27247,437	29686,749	27271,377	28471,183
	2	35,750	28101,913		25863,381	
	3	40,797	30020,089		26996,312	
	4	47,742	32474,925		25988,758	
	5	42,359	30589,382		36236,089	
BV-05	1	27,055	24446,778	30279,569	57904,434	37017,661
	2	46,849	32169,775		35268,247	
	3	44,041	31190,795		30037,457	
	4	45,749	31789,863		30916,602	
	5	45,780	31800,632		30961,563	
BV-10	1	44,576	31379,672	30490,107	28636,611	30932,188
	2	41,982	30452,954		33062,900	
	3	39,589	29572,301		28106,523	
	4	41,569	30302,792		34100,327	
	5	42,785	30742,815		30754,578	
BV-15	1	48,254	32648,597	31168,558	29145,361	31936,656
	2	50,298	33332,909		28517,001	
	3	36,561	28418,876		36645,913	
	4	50,017	33239,668		26926,834	
	5	36,007	28202,742		38448,171	

Lanjutan Tabel 5. 27 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton

Kode Benda Uji		f'c (MPa)	Modulus Elastisitas, E (MPa)			
			$Ec = 4700 \times \sqrt{f'c}$ (SNI 2847-2019)		$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_c - 0{,}00005}$ (ASTM C-469-94)	
			Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)
BV-20	1	36,758	28495,337	32639,82	29922,026	31550,229
	2	58,546	35962,218		27973,014	
	3	47,237	32302,714		29045,386	
	4	57,453	35624,946		34238,374	
	5	42,983	30813,868		36572,343	

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Tabel 5.27, dapat dilihat rekapitulasi nilai modulus elastisitas dari setiap variasi sampel beton. Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan nilai modulus yang cukup signifikan antar sampel pada variasinya, sehingga memengaruhi nilai rata-rata modulus variasinya. Perbedaan tersebut terlihat, misalnya, pada sampel ke-5 variasi beton BN dengan nilai modulus sebesar 36236,089 MPa, dan sampel ke-1 variasi beton BV-05 dengan nilai sebesar 57904,434 MPa. Dari data tersebut didapatkan grafik pada gambar 5.18 sebagai berikut.



Gambar 5. 18 Grafk Nilai Modulus Elastisitas Beton
(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Gambar 5.18, nilai modulus elastisitas berdasarkan hasil pengujian pada beton variasi BV-05 memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding variasi yang lain. Sehingga, perlu dilakukannya perhitungan statistik menggunakan *software* SPSS untuk memastikan bahwa data penelitian memenuhi asumsi dasar uji parametrik. Berikut merupakan perhitungan statistik menggunakan *software* SPSS.

5.5.1 Metode *Interquartile Range* (IQR)

Perhitungan metode *Interquartile Range* (IQR) dijelaskan pada tahapan berikut.

1. Tahap penentuan nilai kuartil dan IQR

Sebelum menentukan nilai kuartil dan IQR, dilakukan pengurutan data dari nilai terkecil hingga terbesar dari distribusi data yang digunakan yang dapat dilihat pada Tabel 5.28 berikut.

Tabel 5. 28 Nilai Data *Ascending* Modulus Elastisitas Beton

BN (MPa)	BV-05 (MPa)	BV-10 (MPa)	BV-15 (MPa)	BV-20 (MPa)
25863,381	30037,457	28106,523	26926,834	27973,014
25988,758	30916,602	28636,611	28517,001	29045,386
26996,312	30961,563	30754,578	29145,361	29922,026
27271,377	35268,247	33062,900	36645,913	34238,374
36236,089	57904,434	34100,327	38448,171	36572,343

(Sumber: Hasil Analisis)

Dari Tabel 5.28 didapatkan urutan data dari nilai terkecil hingga terbesar, dimana dari tabel tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai Q1 (25%), Q2 (50%), dan Q3 (75%). Nilai kuartil dari seluruh variasi dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.

Percentiles

			Percentiles		
		Jenis Perlakuan	25	50	75
Weighted Average (Definition 1)	Nilai Modulus Elastisitas (MPa)	BN	25926.06950	26996.31200	31753.73300
		BV-05	30477.02950	30961.56300	46586.34050
		BV-10	28371.56700	30754.57800	33581.61350
		BV-15	27721.91750	29145.36100	37547.04200
		BV-20	28509.20000	29922.02600	35405.35850
Tukey's Hinges	Nilai Modulus Elastisitas (MPa)	BN	25988.75800	26996.31200	27271.37700
		BV-05	30916.60200	30961.56300	35268.24700
		BV-10	28636.61100	30754.57800	33062.90000
		BV-15	28517.00100	29145.36100	36645.91300
		BV-20	29045.38600	29922.02600	34238.37400

Gambar 5. 19 Tabel *Percentiles*

(Sumber: Hasil Analisis)

Dari Gambar 5.19 data yang digunakan dari metode *Tukey's Hinges* karena data yang digunakan pada pengujian ini kurang dari 30 data. Pada gambar tersebut juga didapat untuk nilai kuartil pada seluruh variasi beton.

Setelah itu dilakukan perhitungan untuk mencari nilai IQR, batas bawah, dan batas atas. Nilai tersebut dapat dicari dengan contoh perhitungan pada variasi BN sebagai berikut.

IQR = Q3 – Q1
= 27271,377 – 25988,758
= 1282,619

Batas Bawah = Q1 – (1,5 × IQR)
= 25988,758 – (1,5 × 1282,619)
= 24064,830

Batas Atas = Q3 + (1,5 × IQR)
= 27271,377 + (1,5 × 1282,619)
= 29195,306

Dari cari perhitungan yang sama juga dilakukan pada variasi yang lain, sehingga didapat nilai rekapitulasi dan juga nilai outlier yang didapat pada Tabel 5.29 berikut.

Tabel 5. 29 Rekapitulasi Kuartil, IQR, dan *Outlier* Modulus Elastisitas

Perlakuan	Q1	Q3	IQR	Batas Bawah	Batas Atas	*Outlier*
BN	25988,758	27271,377	1282,619	24064,830	29195,306	36236,089 (Sampel 5)
BV-05	30916,602	35268,247	4351,645	24389,135	41795,715	57904,334 (Sampel 1)
BV-10	28636,611	33062,900	4426,289	21997,178	38702,334	–
BV-15	28517,001	36645,913	8128,912	16323,633	48839,281	–
BV-20	29045,386	34238,374	5192,988	21255,904	42027,844	–

(Sumber: Hasil Analisis)

Ketentuan klasifikasi terdapat nilai outlier:

a. Nilai data < Q1 – (1,5 × IQR)
b. Nilai data > Q3 + (1,5 × IQR)

Dari Tabel 5.29, Pada BN terdapat nilai data 36236,089 MPa dimana nilai tersebut > batas atas, yaitu sebesar 29195,306. Sehingga data tersebut dapat diasumsikan menjadi *outlier* pada BN. Dan pada BV-05 terdapat nilai data 57904,334 MPa dimana nilai tersebut > batas atas, yaitu sebesar 41795,715. Sehingga data tersebut diasumsikan *outlier* pada BV-05. *Outlier* tersebut dihapus untuk membersihkan data dari nilai yang terlalu ekstrem agar analisis statistik yang dilakukan menjadi lebih akurat, stabil, dan mewakili kondisi sebenernya. Selanjutnya dilakukan metode normalitas sebagai berikut.

5.5.2 Metode Normalitas

Perhitungan metode normalitas dijelaskan pada tahapan sebagai berikut.

1. Tahap pemeriksaan kelengkapan data (*data checking*)

   Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh data yang dimasukkan ke dalam program SPSS telah lengkap dan dapat diolah tanpa ada nilai yang kosong.

Case Processing Summary

		Cases				
		Valid		Missing		Total
	Jenis Perlakuan	N	Percent	N	Percent	N
Nilai Modulus Elastisitas (MPa)	BN	4	80.0%	1	20.0%	5
	BV-05	4	80.0%	1	20.0%	5
	BV-10	5	100.0%	0	0.0%	5
	BV-15	5	100.0%	0	0.0%	5
	BV-20	5	100.0%	0	0.0%	5

Gambar 5. 20 Validasi Data Software SPSS

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Valid (N) = Jumlah data yang digunakan dalam analisis

Missing (N) = Jumlah data yang tidak dapat digunakan karena tidak memiliki nilai (kosong)

Percent (%) = Persentase data valid dan data hilang dari keseluruhan data

Berdasarkan Gambar 5.20, terlihat bahwa persentase kelengkapan data pada variasi BN dan BV-05 sebesar 80%. Hal ini mengindikasikan adanya data

yang hilang (*missing data*), karena pada percobaan ini nilai *outlier* tidak diikutsertakan dalam proses analisis.

2. Tahap pengujian asumsi normalitas dari data

Hasil uji normalitas dapat dilihat pada Gambar 5.21 *Tests of Normality* yang menampilkan nilai statistic uji dan signifikansi (Sig.) sebagai berikut.

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk	
	Jenis Perlakuan	Statistic	df	Sig.	Statistic	df
Nilai Modulus Elastisitas (MPa)	BN	.278	4	.	.857	4
	BV-05	.389	4	.	.781	4
	BV-10	.208	5	.200*	.916	5
	BV-15	.303	5	.149	.848	5
	BV-20	.271	5	.200*	.897	5

Tests of Normality

		Shapiro-...
	Jenis Perlakuan	Sig.
Nilai Modulus Elastisitas (MPa)	BN	.249
	BV-05	.072
	BV-10	.505
	BV-15	.187
	BV-20	.391

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Gambar 5. 21 Hasil Pengujian Normalitas
(Sumber : Hasil Analisis)

Keterangan:

Statictic = besarnya nilai uji kolmogrov – Smirnov atau Shapiro – Wilk.

df (*degree of freedom*) = jumlah data yang digunakan dalam pengujian.

Sig. (*Significance*) = nilai probabilitas atau p – value yang digunakan untuk menentukan apakah data berdistribusi normal.

Berdasarkan Gambar 5.21, didapatkan nilai statistik, derajat kebebasan (df), *p – value* (sig) dengan menggunakan 2 cara, yaitu cara Kolmogorov Smirnov dan Shapiro – Wilk. Interpretasi dari metode normalitas dapat dilihat pada Tabel 5.29 sebagai berikut.

Tabel 5. 30 Perbandingan Uji Kolmogorov Smirnov Dan Shapiro Wilk Pada Asumsi Normalitas

Jenis Perlakuan	Kolmogorov Smirnov (D)	Shapiro Wilk (W)	P Value (Kolmogorov Smirnov)	P Value (Shapiro Wilk)	Keputusan (Kolmogorov Smirnov)	Keputusan (Shapiro Wilk)	Hasil	Interpretasi
BN	0,278	0,867	-	0,249	-	0,249 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-05	0,389	0,781	-	0,072	-	0,072 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-10	0,208	0,916	0,200	0,505	0,208 > 0,05	0,505 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-15	0,303	0,848	0,149	0,187	0,303 > 0,05	0,187 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-20	0,271	0,897	0,200	0,391	0,271 > 0,05	0,391 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal

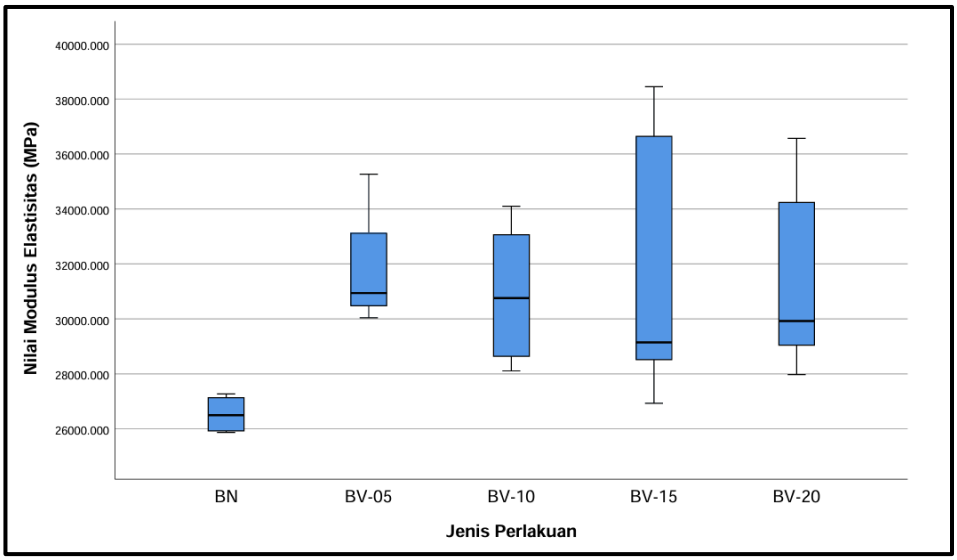
(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

H_0 = Galat percobaan berdistribusi normal

H_1 = Galat percobaan tidak berdistribusi normal

Berdasarkan Tabel 2.29, dapat diketahui jika setiap variasi memiliki hasil interpretasi berdistribusi normal. Hal ini juga divalidasikan dengan tidak adanya *outlier* pada *boxplot* yang dapat dilihat pada Gambar 5.22 berikut.



Gambar 5. 22 Visualisasi *Boxplot*
(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Gambar 5.22, dapat dilihat bahwa tidak ada *outlier* pada diagram *boxplot*. Setelah dilakukan uji normalitas, diperoleh bahwa data berdistribusi normal karena tidak terdapat nilai *outlier* yang memengaruhi sebaran data. Oleh karena itu, dilakukan penghapusan *outlier* untuk memperoleh distribusi data yang lebih sesuai dengan asumsi normalitas. Setelah itu, pengujian dilanjutkan dengan uji homogenitas untuk memastikan bahwa varians antar kelompok perlakuan memiliki keseragaman atau tidak.

5.5.3 Metode Homogenitas

Uji homogenitas untuk mengetahui apakah sebaran atau keragaman nilai Modulus Elasitisitas antar kelompok perlakuan BN, BV-05, BV-10, BV-15, dan BV-20 memiliki varians yang seragam (homogen). Pengujian homogenitas pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *Levene's Test of Equality of Error Variances* dengan menggunakan taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0.05$). Berikut merupakan nilai homogenitas yang dapat dilihat pada Tabel 5.31 berikut.

Tabel 5. 31 Nilai Homogenitas

Statistik	*Levene Statistic*	df1	df2	Sig.	Keputusan
Based on Mean	6,988	4	18	0,001	Tidak Homogen
Based on Median	1,127	4	18	0,375	Homogen
Based on Median and with adjusted df	1,127	4	9,260	0,401	Homogen
Based on Trimmed Mean	6,435	4	18	0,002	Tidak Homogen

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Levene Statistic = nilai statistik uji yang menunjukkan besar kecilnya perbedaan varians antar kelompok.

df1 dan df2 = Derajat kebebasan untuk uji Levene.

Sig. (*Significance*) = Nilai probabilitas atau p-value yang digunakan untuk menentukan apakah data homogen atau tidak.

Keputusan diambil berdasarkan nilai signifikansi (*p-value*) dengan ketentuan sebagai berikut:

c. Jika nilai Sig. > 0,05 → varians antar kelompok homogen

d. Jika nilai Sig. < 0,05 → varians antar kelompok tidak homogen

Berdasarkan hasil uji pada Tabel 5.31 diperoleh nilai signifikansi 0,001 < 0,05 pada *Based on Mean* dan 0,002 < 0,05 pada *Based on Trimmed Mean*, yang menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak homogen. Namun, jika dilihat pada kriteria lain seperti "*Based on Median*" dan "*Based on Median and with adjusted df*", nilai signifikansi adalah 0,375 dan 0,401, yang lebih besar dari 0,05 atau homogen.

Pada pengujian variabel modulus elastisitas, data BN sampel 5 dan BV-05 sampel 1 dihapus karena teridentifikasi sebagai *outlier* berdasarkan hasil uji IQR dan normalitas. Penghapusan ini bertujuan memperbaiki distribusi data agar lebih sesuai dengan asumsi analisis statistik. Setelah *outlier* dihapus, data menunjukkan distribusi normal, namun hasil uji homogenitas memperlihatkan bahwa tidak semua

kelompok perlakuan memiliki varians yang homogen. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penghapusan *outlier* dapat meningkatkan kenormalan data tanpa selalu menjamin keseragaman varians antar kelompok. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Sari A. Q., 2021) yang menyatakan bahwa pemenuhan asumsi normalitas dan homogenitas bergantung pada karakteristik masing-masing variabel. Dengan demikian, penghapusan *outlier* dalam penelitian ini tetap dianggap tepat karena meningkatkan validitas analisis meskipun hasil homogenitas tidak sepenuhnya seragam.

5.5.4 Metode *Welch* Anova

Pada pengujian ini digunakan Welch ANOVA, karena hasil uji homogenitas sebelumnya menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak seragam. Metode ini lebih cocok untuk situasi dengan ketidakseragaman varians, sebagaimana direkomendasikan dalam literatur statistik modern (Wibowo, 2020). Berikut merupakan hasil analisis dari Welch ANOVA yang dapat dilihat pada Gambar 5.23 berikut.

ANOVA

Nilai Modulus Elastisitas (MPa)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	85870839.22	4	21467709.81	1.846	.164
Within Groups	209315766.1	18	11628653.67		
Total	295186605.4	22			

Gambar 5. 23 *Output* Welch Anova Modulus Elastisitas Beton

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Sum of squares = Jumlah variasi perbedaan antar kelompok perlakuan

df = Derajat bebas

Mean Square = Nilai variasi antar kelompok yang sudah dirata – ratakan.

F = Rasio antara mean square antar kelompok dan mean square dalam kelompok

Sig. = Nilai p – value yang menunjukkan signifikansi perbedaan

Berdasarkan hasil uji Whelch ANOVA untuk data Modulus Elastisitas, nilai *Between Groups* memiliki *Mean Square* sebesar 21467709,81, sedangkan *Within Groups* memiliki *Mean Square* sebesar 11628653,67. Perbandingan kedua nilai ini menghasilkan nilai F sebesar 1,846 nilainya masih tergolong kecil karena variasi antar kelompok tidak jauh melebihi variasi dalam kelompok. Hal tersebut diperkuat oleh nilai signifikansi sebesar 0,164 yang jauh di atas batas $\alpha = 0,05$. Dengan demikian, hasil Whelch ANOVA menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata Modulus Elastisitas yang signifikan antar kelompok perlakuan.

Berdasarkan pengujian IQR, Normalitas, Homogenitas, dan Whelch ANOVA yang sudah dilakukan, beton variasi BN sampel 5 dan BV-05 sampel 1 dihapuskan dari data penelitian ini. Sehingga rekapitulasi data untuk pengujian modulus elastisitas pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.32 sebagai berikut.

Tabel 5. 32 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton Setelah Pengujian Statistik

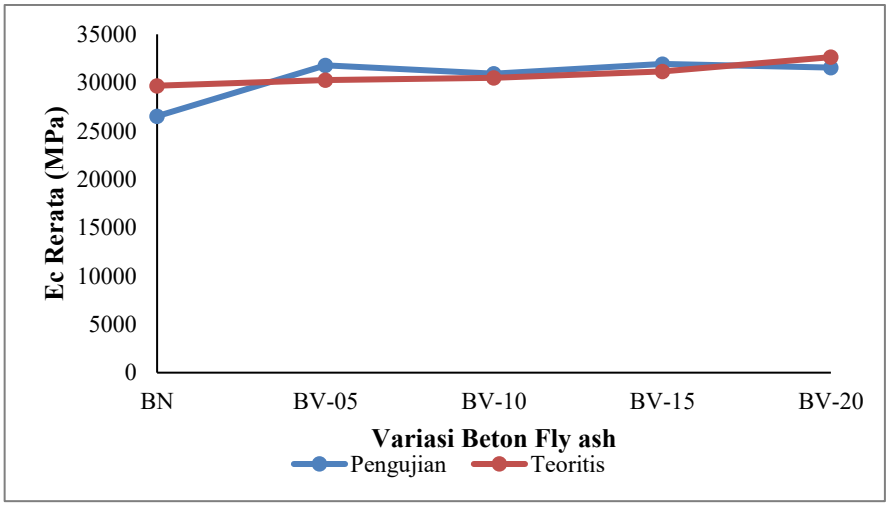
Kode Benda Uji		f'c (MPa)	Modulus Elastisitas, E (MPa)			
			$Ec = 4700 \times \sqrt{f'c}$ (SNI 2847-2019)		$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_c - 0{,}00005}$ (ASTM C-469-94)	
			Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)
BN	1	33,609	27247,437	29686,749	27271,377	26529,957
	2	35,750	28101,913		25863,381	
	3	40,797	30020,089		26996,312	
	4	47,742	32474,925		25988,758	
	5	42,359	30589,382		-	
BV-05	1	27,055	24446,778	30279,569	-	31795,967
	2	46,849	32169,775		35268,247	
	3	44,041	31190,795		30037,457	
	4	45,749	31789,863		30916,602	
	5	45,780	31800,632		30961,563	
BV-10	1	44,576	31379,672	30490,107	28636,611	30932,188
	2	41,982	30452,954		33062,900	
	3	39,589	29572,301		28106,523	
	4	41,569	30302,792		34100,327	
	5	42,785	30742,815		30754,578	
BV-15	1	48,254	32648,597	31168,558	29145,361	31936,656
	2	50,298	33332,909		28517,001	
	3	36,561	28418,876		36645,913	
	4	50,017	33239,668		26926,834	
	5	36,007	28202,742		38448,171	

Lanjutan Tabel 5. 32 Rekapitulasi Nilai Modulus Elastisitas Beton Setelah Pengujian Statistik

Kode Benda Uji		f'c (MPa)	Modulus Elastisitas, E (MPa)			
			$Ec = 4700 \times \sqrt{f'c}$ (SNI 2847-2019)		$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_c - 0{,}00005}$ (ASTM C-469-94)	
			Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Nilai Ec (MPa)	Rerata (MPa)
BV-20	1	36,758	28495,337	32639,82	29922,026	31550,229
	2	58,546	35962,218		27973,014	
	3	47,237	32302,714		29045,386	
	4	57,453	35624,946		34238,374	
	5	42,983	30813,868		36572,343	

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Tabel 5.32, diperoleh grafik hasil nilai modulus elastisitas beton *fly ash* setelah penghapusan *outlier* yang dapat dilihat pada Gambar 5.24 sebagai berikut.



Gambar 5. 24 Grafk Nilai Modulus Elastisitas Beton Setelah Pengujian Statistik SPSS

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Gambar 5.24, hasil perhitungan pengujian menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada beton dengan variasi *fly ash* BV-15 sebesar 31936,656 MPa, sedangkan hasil perhitungan teoritis menunjukkan nilai tertinggi pada variasi BV-20 sebesar 32639,817 MPa. Pada hasil pengujian, peningkatan kadar *fly ash* dari variasi BN hingga BV-15 menyebabkan kenaikan nilai modulus elastisitas hingga mencapai titik optimum pada variasi BV-15, kemudian mengalami penurunan pada kadar yang lebih tinggi. Peningkatan ini disebabkan oleh efek pengisian (*filler effect*) dari partikel halus *fly ash* yang mampu mengisi rongga pori beton sehingga struktur menjadi lebih rapat dan meningkatkan ikatan antar partikel. Namun, penurunan pada kadar *fly ash* yang lebih tinggi terjadi karena berkurangnya jumlah semen aktif dan belum optimalnya reaksi pozzolanik, yang menyebabkan pembentukan senyawa hidrat berkurang dan struktur beton menjadi kurang padat sehingga nilai modulus elastisitas menurun.

Perbedaan antara hasil pengujian dan hasil teoritis juga dipengaruhi oleh metode yang digunakan. Metode SNI 2847:2019 bersifat teoritis dan memberikan estimasi berdasarkan persamaan empiris yang tidak sepenuhnya menggambarkan

kondisi aktual beton di laboratorium. Oleh karena itu, hasil teoritis cenderung menunjukkan peningkatan yang stabil seiring bertambahnya kadar *fly ash*, karena model perhitungannya mengasumsikan hubungan linier antara kekuatan tekan dan modulus elastisitas. Sebaliknya, hasil pengujian langsung di laboratorium lebih bervariasi karena dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti ketidakhomogenan material, distribusi partikel *fly ash*, serta proses pencampuran yang dapat menyebabkan fluktuasi (naik turun) nilai modulus elastisitas antar variasi. Dengan demikian, kondisi ini menunjukkan bahwa perilaku aktual beton lebih kompleks dibandingkan asumsi teoritis, sehingga metode pengujian langsung lebih disarankan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan representatif terhadap kondisi beton sebenarnya.

5.6 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan saat umur beton mencapai 28 hari yang sudah dilakukan perawatan dengan perendaman. Sebelum dilakukan pengujian, beton diukur dimensi dan berat beton tersebut. Pada pengujian ini posisi beton diletakkan terbaring atau horizontal. Berikut merupakan contoh perhitungan kuat tarik belah beton dengan variasi BV-15 sampel 1 sebagai berikut.

$$f'ct = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D}$$

$$= \frac{2 \times 158000}{\pi \times 300 \times 149}$$

$$= 2{,}25 \text{ MPa}$$

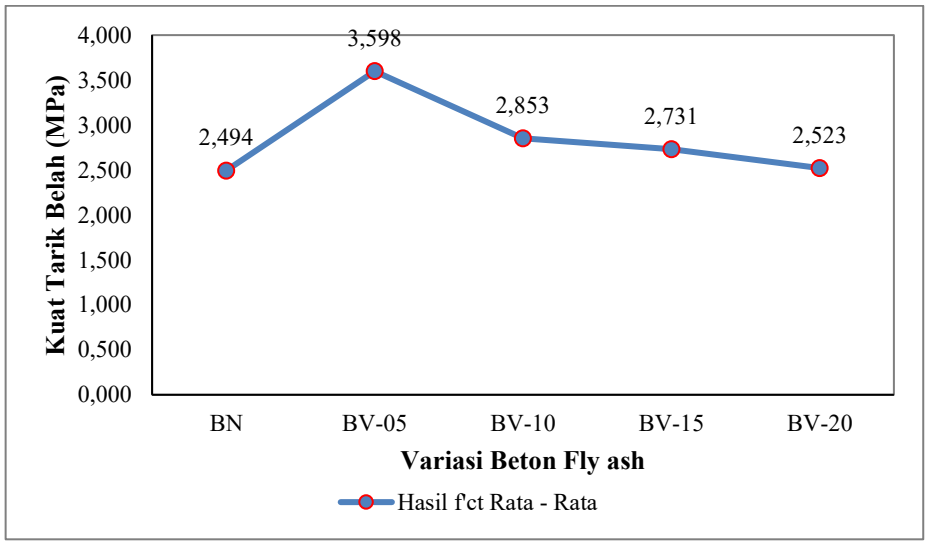
Berdasarkan persamaan tersebut dapat diperoleh hasil rekapitulasi nilai kuat tarik belah beton yang dapat dilihat pada Tabel 5.33 sebagai berikut.

Tabel 5. 33 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Beban Maksimum (kN)	Kuat Tarik Belah (Mpa)	Kuat Tarik Rerata (Mpa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)			
BN	1	149	301	160	2,271	2,494
	2	151	300	181	2,544	
	3	150	301,50	190	2,666	
BV-05	1	150,1	300	233	3,690	3,598
	2	149,45	299	226	3,220	
	3	150,5	300,5	276	3,885	
BV-10	1	150	301	233	3,285	2,853
	2	150	300	206	2,914	
	3	149	300,5	166	2,360	
BV-15	1	149	300	158	2,250	2,731
	2	151,1	301	182	2,548	
	3	150	300	240	3,395	
BV-20	1	150	301	188	2,651	2,523
	2	151	299,5	147	2,069	
	3	149	300	200	2,848	

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan Tabel 5.32, didapatkan grafik hasil pengujian kuat tarik belah beton pada beton *fly ash* pada Gambar 5.26 sebagai berikut.



Gambar 5. 25 Grafik Pengujian Kuat Tarik Belah Beton
(Sumber: Hasil Analisis)

Gambar 5. 26 Contoh Pengujian Kuat Tarik Belah Beton
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Gambar 5. 27 Contoh Hasil Uji Tarik Belah Beton
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan Gambar 5.26 didapatkan nilai kuat tarik belah beton dari variasi BN, BV-05, BV-10, BV-15, BV-20 berturut – turut sebesar 2,494 MPa, 3,598 MPa, 2,853 MPa, 2,731 MPa, 2,523 MPa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kuat tarik belah beton meningkat pada campuran dengan *fly ash* sebesar 5%, namun mulai menurun pada kadar 10%, 15%, dan 20%.

Peningkatan pada kadar 5% terjadi karena butiran halus *fly ash* dapat mengisi rongga antar partikel semen, sehingga beton menjadi lebih padat dan ikatan antar partikel menjadi lebih kuat. Selain itu, sebagian *fly ash* ikut bereaksi dengan hasil hidrasi semen dan membantu membentuk senyawa yang menambah kekuatan beton. Penggunaan *fly ash* dalam jumlah kecil dapat memperbaiki struktur beton dan meningkatkan kuat tarik belahnya (Budi, 2021). Ketika kadar *fly ash* ditingkatkan lebih dari 5%, nilai kuat tarik belah justru menurun karena jumlah semen yang bereaksi menjadi lebih sedikit, sedangkan *fly ash* memiliki reaksi yang lebih lambat. Dari penelitian ini dengan penggunaan *fly ash* pada beton menunjukkan bahwa kuat tarik belah beton semakin menurun seiring bertambahnya kadar *fly ash* pada beton. Hasil data yang didapat dilakukan perhitungan statistik menggunakan *software* SPSS untuk memastikan bahwa data penelitian memenuhi asumsi dasar uji parametrik.

5.6.1 Metode *Interquartile Range* (IQR)

Perhitungan metode *Interquartile Range* (IQR) dijelaskan pada tahapan berikut.

1. Tahap penentuan nilai kuartil dan IQR

   Sebelum menentukan nilai kuartil dan IQR, dilakukan pengurutan data dari nilai terkecil hingga terbesar dari distribusi data yang digunakan yang dapat dilihat pada Tabel 5.28 berikut.

Tabel 5. 34 Nilai Data *Ascending* Kuat Tarik Belah Beton

BN (MPa)	BV-05 (MPa)	BV-10 (MPa)	BV-15 (MPa)	BV-20 (MPa)
2,271	3,220	2,360	2,250	2,069
2,544	3,690	2,914	2,548	2,651
2,666	3,885	3,285	3,395	2,848

(Sumber: Hasil Analisis)

Dari Tabel 5.28 didapatkan urutan data dari nilai terkecil hingga terbesar, dimana dari tabel tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai Q1 (25%), Q2 (50%), dan Q3 (75%). Nilai kuartil dari seluruh variasi dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.

Percentiles

		Jenis Perlakuan	Percentiles 25	50	75
Weighted Average (Definition 1)	Kuat Tarik Belah	BN	2.27100	2.54400	.
		BV-05	3.22000	3.69000	.
		BV-10	2.36000	2.91400	.
		BV-15	2.25000	2.54800	.
		BV-20	2.06900	2.65100	.
Tukey's Hinges	Kuat Tarik Belah	BN	2.40750	2.54400	2.60500
		BV-05	3.45500	3.69000	3.78750
		BV-10	2.63700	2.91400	3.09950
		BV-15	2.39900	2.54800	2.97150
		BV-20	2.36000	2.65100	2.74950

Gambar 5. 28 Tabel *Percentiles*

(Sumber: Hasil Analisis)

Dari Gambar 5.18 data yang digunakan dari metode *Tukey's Hinges* karena data yang digunakan pada pengujian ini kurang dari 30 data. Pada gambar tersebut juga didapat untuk nilai kuartil pada seluruh variasi beton.

Setelah itu dilakukan perhitungan untuk mencari nilai IQR, batas bawah, dan batas atas. Nilai tersebut dapat dicari dengan contoh perhitungan pada variasi BN sebagai berikut.

IQR = Q3 – Q1
= 2,605 – 2,408
= 0,197

Batas Bawah = Q1 – (1,5 × IQR)
= 2,408 – (1,5 × 0,197)
= 2,111

Batas Atas = Q3 + (1,5 × IQR)
= 2,605 + (1,5 × 0,197)
= 2,901

Dari cari perhitungan yang sama juga dilakukan pada variasi yang lain, sehingga didapat nilai rekapitulasi dan juga nilai outlier yang didapat pada Tabel 5.29 berikut.

Tabel 5. 35 Rekapitulasi Kuartil, IQR, dan *Outlier* Modulus Elastisitas

Perlakuan	Q1	Q3	IQR	Batas Bawah	Batas Atas	*Outlier*
BN	2,408	2,408	0,197	2,111	2,901	–
BV-05	3,455	3,788	0,333	2,956	4,286	–
BV-10	2,637	3,010	0,463	1,943	3,793	–
BV-15	2,399	2,972	0,573	1,540	3,830	–
BV-20	2,360	2,750	0,390	1,776	3,334	–

(Sumber: Hasil Analisis)

Ketentuan klasifikasi terdapat nilai outlier:

c. Nilai data < Q1 – (1,5 × IQR)
d. Nilai data > Q3 + (1,5 × IQR)

Dari Tabel 5.29 pada uji IQR untuk pengujian tarik belah tidak terdapat *outlier* yang didapatkan. Sehingga dapat langsung dilakukan metode normalitas sebagai berikut.

5.6.2 Metode Normalitas

Perhitungan metode normalitas dijelaskan pada tahapan sebagai berikut.

1. Pemeriksaan kelengkapan data (*data checking*)

Sebagai langkah awal sebelum dilakukan analisis statistik, dilakukan tahap pemeriksaan kelengkapan data (*data checking*). Adapun hasil pemeriksaan kelengkapan data dapat dilihat pada Gambar 5.29 berikut.

Case Processing Summary

		Cases					
		Valid		Missing		Total	
	Jenis Perlakuan	N	Percent	N	Percent	N	Percent
Kuat Tarik Belah	BN	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%
	BV-05	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%
	BV-10	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%
	BV-15	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%
	BV-20	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%

Gambar 5. 29 Validasi Data Software SPSS

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Valid (N) = Jumlah data yang digunakan dalam analisis

Missing (N) = Jumlah data yang tidak dapat digunakan karena tidak memiliki nilai (kosong)

Percent (%) = Persentase data valid dan data hilang dari keseluruhan data

Berdasarkan Gambar 5.29, diketahui bahwa setiap variasi memiliki tiga data yang valid, dengan persentase kelengkapan mencapai 100%. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat data yang hilang (*missing data*). Jumlah data valid (N) diperoleh dari total sampel pada setiap variasi, yaitu sebanyak lima sampel.

2. Menganalisis hasil output SPSS

Tahap *Tests of Normality* bertujuan untuk mengetahui apakah data hasil penelitian berdistribusi normal atau tidak. Hasil uji normalitas dapat dilihat

pada Gambar 5.30 *Tests of Normality* yang menampilkan nilai statistik uji dan signifikansi (Sig.) sebagai berikut.

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Jenis Perlakuan	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Kuat Tarik Belah	BN	.265	3	.	.954	3	.585
	BV-05	.272	3	.	.946	3	.552
	BV-10	.219	3	.	.987	3	.783
	BV-15	.288	3	.	.929	3	.484
	BV-20	.291	3	.	.925	3	.469

Gambar 5. 30 Hasil Pengujian Normalitas
(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:
Statictic = besarnya nilai uji kolmogrov – Smirnov atau Shapiro – Wilk.
df (*degree of freedom*) = jumlah data yang digunakan dalam pengujian.
Sig. (*Significance*) = nilai probabilitas atau p – value yang digunakan untuk menentukan apakah data berdistribusi normal.

Berdasarkan Gambar 5.30, didapatkan nilai statistik, derajat kebebasan (df), *p – value* (sig) dengan menggunakan metode Shapiro – Wilk. Pada metode Kolmogrov-Smirnov tidak digunakan karena nilai sig. tidak ada hasil akibat dari data yang di input <5.

Kriteria keputusan ditentukan berdasarkan nilai signifikansi (*p-value*) sebagai berikut:

a. Jika Sig. > 0,05, maka H_0 diterima, artinya data berdistribusi normal.
b. Jika Sig. ≤ 0,05, maka H_0 ditolak, artinya data tidak berdistribusi normal.

Sehingga nilai yang dipakai dari metode Shapiro-Wilk, dengan hasil interpretasi dari metode normalitas dapat dilihat pada Tabel 5.33 berikut.

Tabel 5. 36 Hasil Metode Shapiro Wilk Pada Asumsi Normalitas

Jenis Perlakuan	Shapiro Wilk (W)	P Value (Shapiro Wilk)	Keputusan (Shapiro Wilk)	Hasil	Interpretasi
BN	0,954	0,585	0,585 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-05	0,964	0,552	0,552 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-10	0987	0,783	0,783 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-15	0,929	0,484	0,484 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal
BV-20	0,925	0,469	0,469 > 0,05	H_0	Berdistribusi normal

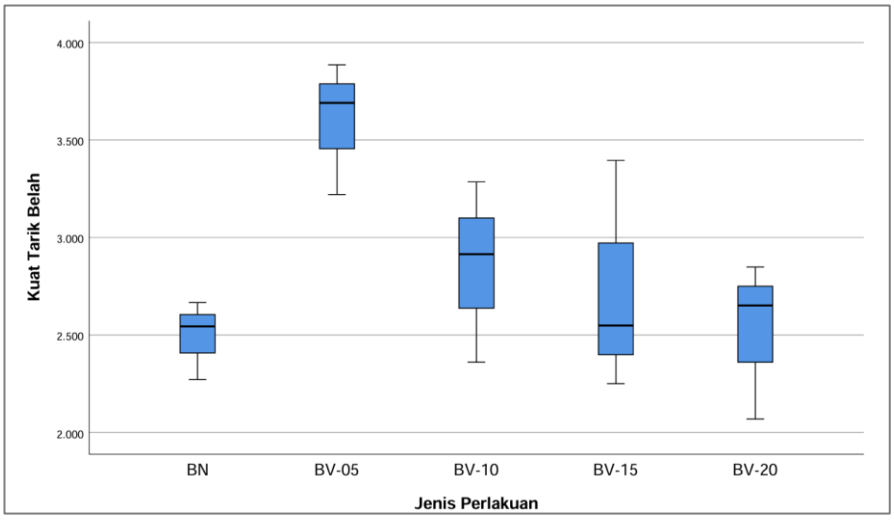
(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

H_0 = Data percobaan berdistribusi normal

H_1 = Data percobaan tidak berdistribusi normal

Berdasarkan Tabel 5.33, dapat diketahui jika setiap variasi memiliki hasil interpretasi berdistribusi normal. Hal ini juga di validasikan dengan tidak adanya *outlier* pada *boxplot* yang dapat dilihat pada Gambar 5.31 berikut.



Gambar 5. 31 Visualisasi *Boxplot*

(Sumber: Hasil Analisis)

Berdasarkan pada Gambar 5.31, visualisasi *boxplot* menunjukkan tidak ada *outlier* dari hasil data pengujian kuat tarik belah beton. Hal ini menandakan bahwa seluruh data berada dalam rentang nilai yang wajar dan konsisten antar sampel, tanpa adanya nilai ekstrem yang menyimpang secara signifikan dari sebaran utama data. Dengan demikian, hasil pengujian dapat dikatakan stabil dan representatif terhadap kondisi sebenarnya dari setiap variasi campuran beton yang diuji.

5.6.3 Metode Homogenitas

Uji homogenitas untuk mengetahui apakah sebaran atau keragaman nilai kuat tarik belah antar kelompok perlakuan BN, BV-05, BV-10, BV-15, dan BV-20 memiliki varians yang seragam (homogen). Pengujian homogenitas pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *Levene's Test of Equality of Error Variances* dengan menggunakan taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0.05$). Berikut merupakan nilai homogenitas sebelum penghapusan data *outlier* yang dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5. 37 Nilai Homogenitas

Statistik	Levene Statistic	df1	df2	Sig.	Keputusan
Based on Mean	1,023	4	10	0,441	Homogen
Based on Median	0,309	4	10	0,866	Homogen
Based on Median and with adjusted df	0,309	4	7,051	0,864	Homogen
Based on Trimmed Mean	0,953	4	10	0,473	Homogen

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Levene Statistic = nilai statistik uji yang menunjukkan besar kecilnya perbedaan varians antar kelompok.

df1 dan df2 = Derajat kebebasan untuk uji Levene.

Sig. (*Significance*) = Nilai probabilitas atau *p-value* yang digunakan untuk menentukan apakah data homogen atau tidak.

Keputusan diambil berdasarkan nilai signifikansi (*p-value*) dengan ketentuan sebagai berikut:

a. Jika nilai Sig. > 0,05 → varians antar kelompok homogen
b. Jika nilai Sig. < 0,05 → varians antar kelompok tidak homogen

Berdasarkan Tabel 5.34, diketahui bahwa nilai signifikansi (Sig.) pada baris *Based on Mean* sebesar 1,023, yang lebih besar dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa varians antar kelompok perlakuan bersifat homogen, sehingga asumsi homogenitas data telah terpenuhi.

5.6.4 Metode ANOVA

Pada pengujian ini digunakan ANOVA, Metode ini membandingkan variasi antar kelompok dengan variasi di dalam setiap kelompok untuk menentukan apakah variasi kuat tekan yang muncul benar-benar disebabkan oleh perlakuan yang diuji dan bukan sekadar terjadi secara kebetulan (Nasution, 2020). Berikut merupakan hasil analisis dari ANOVA yang dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut.

ANOVA

Kuat Tarik Belah

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.423	4	.606	3.398	.053
Within Groups	1.783	10	.178		
Total	4.206	14			

Gambar 5. 32 *Output* ANOVA Kuat Tarik Belah Beton

(Sumber: Hasil Analisis)

Keterangan:

Sum of squares = Jumlah variasi perbedaan antar kelompok perlakuan

df = Derajat bebas

Mean Square = Nilai variasi antar kelompok yang sudah dirata – ratakan.

F = Rasio antara mean square antar kelompok dan mean square dalam kelompok

Sig. = Nilai p – value yang menunjukkan signifikansi perbedaan

Hasil uji ANOVA pada data kuat tarik belah menunjukkan bahwa nilai *Between Groups* memiliki *Mean Square* sebesar 0,606 sedangkan *Within Groups* memiliki *Mean Square* sebesar 0,178. Perbandingan antara kedua nilai tersebut menghasilkan nilai F sebesar 3,398, yang menunjukkan bahwa variasi antar kelompok lebih besar dibandingkan variasi di dalam kelompok. Namun demikian, nilai signifikansi yang diperoleh sebesar 0,053 masih sedikit lebih tinggi daripada batas $\alpha = 0{,}05$. Hal ini berarti bahwa perbedaan rata-rata kuat tarik belah antar kelompok perlakuan belum dapat dinyatakan signifikan secara statistik meskipun nilainya mendekati ambang signifikansi.

5.7 Pembahasan

Berdasarkan penelitian, penggunaan *fly ash* sebagai pengganti parsial semen berpengaruh positif terhadap kuat tekan dan modulus elastisitas beton. Beton normal (BN) memiliki kuat tekan rata-rata 40,051 MPa, sedangkan beton dengan campuran *fly ash* meningkat, dengan nilai tertinggi pada BV-20 sebesar 48,595

MPa. Sebelum pengujian statistik, BV-05 menunjukkan nilai rendah pada sampel 1 sebesar 27,055 MPa akibat ketidak homogenan campuran. Setelah pengujian statistik, nilai rata-rata BV-05 meningkat menjadi 45,605 MPa dan BV-10 menjadi 42,728 MPa, sehingga distribusi data lebih representatif dan akurat. Peningkatan kuat tekan disebabkan reaksi pozzolanik *fly ash* dengan kalsium hidroksida membentuk C–S–H yang memperkuat struktur beton (Agus, 2020). Hasil modulus elastisitas menunjukkan nilai tertinggi pada BV-15 sebesar 31936,656 MPa, sedangkan terkecil pada BN 26529,957 MPa berdasarkan nilai pengujian. Peningkatan modulus hingga BV-15 terjadi karena efek filler dari partikel halus *fly ash* yang meningkatkan kepadatan beton, sedangkan penurunan pada kadar lebih tinggi disebabkan berkurangnya semen aktif dan reaksi pozzolanik yang belum optimal (Janah, 2021). Perbedaan hasil laboratorium dan teoritis menunjukkan bahwa pengujian langsung lebih representatif karena menangkap ketidakhomogenan material dan proses pencampuran.

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh nilai kuat tarik belah beton terbesar pada variasi BV-05 sebesar 3,598 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* sebesar 5% mampu meningkatkan kuat tarik belah beton secara optimal, sedangkan peningkatan kadar di atas 5% justru menurunkan kekuatan. Peningkatan kekuatan tersebut disebabkan oleh efek pengisian (*filler effect*) partikel halus *fly ash* yang mengisi rongga antar partikel semen, sehingga struktur beton menjadi lebih rapat dan ikatan antar partikel semakin kuat. Selain itu, sebagian *fly ash* bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen membentuk kalsium silikat hidrat (C–S–H) yang memperkuat matriks beton. Namun, pada kadar *fly ash* yang lebih tinggi, jumlah semen aktif berkurang dan reaksi pozzolanik belum optimal sehingga pembentukan C–S–H menurun dan kekuatan tarik belah ikut melemah. Hasil ini sejalan dengan penelitian Arafah (2023), yang menyatakan bahwa penggunaan *fly ash* dengan kadar 5–10% meningkatkan kuat tarik belah sebelum menurun pada kadar lebih tinggi akibat reaksi kimia yang tidak seimbang. Penelitian serupa oleh Budi (2021) menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* sebesar 15–30% menurunkan kuat tarik belah karena berkurangnya ketersediaan semen aktif yang berperan dalam pembentukan senyawa C–S–H.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kadar optimum *fly ash* sebagai pengganti parsial semen berbeda untuk setiap jenis pengujian. Pada pengujian kuat tekan, kadar optimum diperoleh pada variasi 20% (BV-20) dengan nilai tertinggi sebesar 48,595 MPa, karena reaksi pozzolanik antara kandungan silika (SiO_2) dan aluminat (Al_2O_3) dalam *fly ash* dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H) yang memperkuat struktur mikro beton dan meningkatkan kepadatan. Penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Agus, 2020) yang menyatakan bahwa penambahan *fly ash* hingga 20% mampu meningkatkan kekuatan tekan beton secara signifikan. Sementara itu, pada pengujian kuat tarik belah, kadar optimum ditemukan pada 5% (BV-05) dengan nilai 3,598 MPa, di mana partikel halus *fly ash* berperan sebagai pengisi (*filler effect*) yang menutup rongga mikro dan memperkuat ikatan antar partikel. Namun, kadar di atas 5% menurunkan kekuatan karena reaksi pozzolanik belum optimal. Penelitian ini sejalan dengan temuan (Budi, 2021) yang menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dalam jumlah kecil dapat meningkatkan kuat tarik belah sebelum menurun pada kadar lebih tinggi. Untuk pengujian modulus elastisitas, kadar optimum juga terjadi pada 15% (BV-05) dengan nilai tertinggi 31936,656 MPa, disebabkan oleh efek pengisian *fly ash* yang memperbaiki kerapatan dan kekakuan beton. Penelitian ini sejalan dengan (Janah, 2021) yang menjelaskan bahwa penggunaan *fly ash* dalam proporsi rendah mampu meningkatkan modulus elastisitas beton, namun penambahan berlebih menurunkan kekakuannya. Dengan demikian, kadar *fly ash* optimum berbeda pada setiap pengujian, yaitu 5% untuk kuat tarik belah, 15% untuk modulus elastisitas, serta 20% untuk kuat tekan, menunjukkan bahwa proporsi rendah efektif meningkatkan sifat tarik, sedangkan proporsi tinggi lebih optimal dalam memperkuat kemampuan tekan beton dan modulus elastisitas secara keseluruhan.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan penggunaan *fly ash* sebagai pengganti parsial pada semen dengan `variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dapat mempengaruhi mekanisme pada beton. Apapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai pengganti parsial semen memberikan pengaruh positif terhadap performa mekanik beton. Penambahan *fly ash* hingga proporsi tertentu mampu meningkatkan kuat tekan dan modulus elastisitas beton melalui reaksi pozzolanik yang membentuk senyawa C–S–H, sehingga struktur beton menjadi lebih padat dan kuat. Pengujian statistik dengan normalitas, homogenitas, dan penghapusan data *outlier* terbukti efektif untuk memperoleh nilai yang lebih representatif dan akurat. Selain meningkatkan mutu beton, penggunaan *fly ash* juga mendukung aspek keberlanjutan dengan mengurangi penggunaan semen Portland dan dampak emisi karbon. Dengan demikian, *fly ash* dapat dijadikan alternatif bahan pozzolan yang efektif dalam pembuatan beton berkualitas tinggi dan ramah lingkungan.
2. Berdasarkan hasil pengujian kuat tarik belah beton dan analisis statistik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti parsial semen memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik belah beton. Penambahan *fly ash* sebesar 5% terbukti mampu meningkatkan kuat tarik belah beton secara optimal karena efek pengisian partikel halus dan reaksi pozzolanik yang membentuk senyawa C–S–H, sehingga struktur beton menjadi lebih rapat dan kuat. Namun, peningkatan kadar *fly ash* di atas 5% justru menurunkan kekuatan akibat berkurangnya jumlah semen aktif dan reaksi pozzolanik yang belum optimal. Hasil uji statistik menunjukkan bahwa data kuat tarik belah memenuhi asumsi

homogenitas dengan nilai signifikansi sebesar > 0,05, yang berarti variasi antar kelompok perlakuan bersifat seragam dan hasil penelitian dapat dipercaya secara statistik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kadar optimum *fly ash* sebagai pengganti parsial semen untuk meningkatkan kuat tarik belah beton berada pada persentase 5%.

3. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kadar optimum *fly ash* sebagai pengganti parsial semen berbeda untuk setiap jenis pengujian beton. Pada pengujian kuat tekan, kadar *fly ash* optimum terdapat pada 20% (BV-20) dengan nilai tertinggi sebesar 48,595 MPa dan pada pengujian modulus elastisitas kadar optimum pada 15% sebesar 31936,656 MPa, yang disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara silikat (SiO_2) dan aluminat (Al_2O_3) dalam *fly ash* dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen sehingga membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H) yang memperkuat struktur beton. Sementara itu, pada pengujian kuat tarik belah kadar optimum berada pada 5% (BV-05) dengan nilai sebesar 3,598 MPa. Hal ini terjadi karena pada kadar rendah, partikel halus *fly ash* mampu mengisi rongga antar partikel semen (*filler effect*) dan memperbaiki ikatan mikro antar butiran agregat, sedangkan pada kadar yang lebih tinggi jumlah semen aktif berkurang sehingga reaksi pozzolanik tidak maksimal. Dengan demikian, kadar *fly ash* sebesar 20% paling efektif untuk meningkatkan kuat tekan, sedangkan kadar 5% lebih sesuai untuk meningkatkan kuat tarik belah dan modulus elastisitas beton.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, terdapat beberapa saran yang bisa penulis berikan untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Pada metode *mix design* beton perlu diperhatikan agar dapat dilakukan dengan lebih teliti dan tepat dalam penggunaan material begitupun dalam pemerataan beton segar pada bekisting.
2. Perlu dilakukan pengujian beton lainnya, seperti pengujian *absorbsi* dan pengujian uji kuat lentur yang dapat dijadikan parameter baru.

3. Perlu dilakukan pengujian beton dalam umur beton yang lebih beragam seperti 14 hari dan 21 hari.
4. Dapat melalukan pengujian statistik dengan metode yang lain sebagai parameter baru.

DAFTAR PUSTAKA

Adinna, B. 2020. Compressive Strength And Workability Of Concrete Containing *Fly ash* As Partial Replacement For Cement Content . *International Journal of Scientific & Engineering.* Vol.11 No.2. Hal. 11-13 (ISSN: 2229-5518). Nigeria.

Agus, I. 2020. Pemanfaatan Abu Batu Bara (*Fly ash*) Pada Beton. *Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil Unidayan*. Vol.IX No.2. (ISSN: 2301-5241). Indonesia.

Anggarini, E. 2023. Pengaruh Penambahan Abu Terbang (*Fly ash*) Sebagai Subtitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Normal 30 Mpa. *Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*. Vol.6 No.1. Hal. 51-62 (ISSN: 2656-6001). Indonesia.

Apriwelni, S. 2020. Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Memanfaatkan *Fly ash* dan Bubuk Kaca Sebagai Bahan Pengisi. *Jurnal Saintis*. Vol.20 No.01. Hal. 61-68 (ISSN: 2580-7110). Institut Teknologi Sumatera. Lampung.

Arafah, S. P. 2023. Analisis Kuat Tarik Belah dan Kuat Lentur Beton dengan Limbah Batu Bara (*Fly ash*) Sebagai Subtitusi Parsial Semen. *Jurnal Inersia*. Vol.XV No.1. (ISSN: 2723-6161). Politeknik Negeri Samarinda.

Augusta, R. A. 2024. Kinerja Beton Mengandung *Fly ash* Sebagai Substitusi Parsial Semen. *Sentikuin Teknik*. Vol.7. Hal. B6.1-B6.9 (ISSN: 2622-2744). Universitas Tribhuwana Tunggadewi. Malang. Indonesia.

Budi, A. S. 2021. Kajian Kuat Tarik Langsung Dan Kuat Tarik Belah Beton Dengan *Fly ash* Kadar 15%, 30%, Dan 40% Sebagai Pengganti Semen Terhadap Beton Normal. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*. Vol.9 No.3. (ISSN: 2354-8630). Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Fernando, R. 2024. Evaluasi Kekuatan Beton Mutu Tinggi Dengan Menggunakan Kombinasi *Fly ash* Dan Silica Fume Sebagai Subtitusi Semen. *Jurnal Orbith*. Vol.20 No.3. Hal. 245-255. Politeknik Pekerjaan Umum. Semarang.

Hestianita, D. 2024. Pemanfaatan Limbah *Fly ash* Dan Bottom Ash Sebagai Campuran Beton. *Civil Engineering Scientific Journal*. Vol.3 No.1. (ISSN: 2963-1335). Universitas Borneo Tarakan. Kota Tarakan. Kalimantan Utara.

Janah, I. 2021. Pemanfaatan *Fly ash* Sebagai Bahan Substitusi Parsial Semen Pada Segmen Kolom Struktur Modular Beton Ramah Lingkungan. *IJCEE.* Vol.7 No.1. Hal. 9-14 (ISSN: 2598-2931).

Nkomo, N. Z. 2023. Experimental Investigation of Effect of Partial Replacement of Cement with *Fly ash* on the Workability and Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology.* Vol.71 No.9. Hal. 116-128 (ISNN:2231-5381). Vaal University of Technology. Vanderbijlpark. South Africa.

Permatasari, R. 2024. Studi analisis manfaatlimbah *fly ash*mpada industri bahan baku semen. *Enjuts*. Vol.1 No.1. Hal. 1-10 (ISSN: 3047-9851). Universitas Indonesia. Depok. Jawa Barat.

Purnamasari, E. 2025. Analisis Penggunaan *Fly ash* Tipe F pada Beton Non Pasir sebagai Green Concrete. *Science Tech*. Universitas Islam Sultan Agung. Semarang. Jawa Tengah.

Rahmadona, E. 2024. Analisis Kuat Tekan Beton dengan Pemanfaatan Silica Fume dan *Fly ash* Sebagai Pengganti Semen Sebagian. *Jurnal Talenta Sipil*. Vol.7 No.1. (ISSN: 2615-1634). Politeknik Negeri Sriwijaya. Sumatera Selatan.

Sari, R. N. 2025. Dampak Industri PT. Semen Indonesia Pabrik Tuban terhadap Dampak Industri PT. Semen Indonesia Pabrik Tuban terhadap. *Jurnal Perencanaan Wilayah. Kota. Dan Pemukiman*. Vol.7 No.1. Hal 149-161 (ISSN: 2656-5528). LPPM Universitas Sebelas Maret. Surakarta. Indonesia.

Septiani, V. 2024. Faktor-Faktor yang mempengaruhi Campuran Beton: Rancangan beton. *Journal of Engineering and Transportation.* Politeknik Penerbangan Palembang.

Sudarsono, I. 2023. Durabilitas Beton Dengan Bahan Substitusi Untuk Konstruksi Di Lingkungan Laut. *Disertasi*. (Diterbitkan). Universitas Islam Sultan Agung. Semarang.

Wardani, S. P. 2008. Pemanfaatan Limbah Batubara (*Fly ash*). *Disertasi.* (Diterbitkan). Universitas Diponegoro. Semarang.

Marpaung, D. 2025. Perbandingan Beton Mutu Tinggi Dengan Pengaplikasian High Volume *Fly ash* Tipe C Dan Tipe F. *ViTeks.* Vol.3 No.1. Universitas Negeri Surabaya.

Sari A. Q., 2021. Batasan Prasyarat Uji Normalitas Dan Uji Homogenitas Pada Model Regresi Linear. *Unnes journal Of Mathematics.* Universitas Negeri Semarang. Semarang.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Keterangan Bebas Tanggungan 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 : 48/Ka.Lab/60/LBKT/X/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	: **M Dzaki Abiyantara**
N I M	: 21511196
Program Studi	: S1 Teknik Sipil
Dosen Pembimbing TA	: Jafar, S.T., M.T., MURP
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 **"Analisis Kekuatan Beton Normal dengan *Fly Ash* PLTU Sumsel-8 Sebagai Pengganti Parsial Terhadap Semen"** serta sudah menyelesaikan semua administrasinya*).

Demikian surat keterangan ini dibuat semoga bisa digunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 23 Oktober 2025

Diperiksa oleh :	Di data oleh :
Kepala Laboratorium BKT,	PLP/Teknisi
Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.	Zahwa Imnahosa Puty Pramadi, S.Tr.T.

Dipindai dengan CamScanner

Lampiran 2 Surat Izin Pengambilan Semen OPC

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

Nomor : 508/Sek.Prodi PSTS/20/TA/VII/2025
Hal : **Permohonan Bantuan Material Untuk Tugas Akhir**

Kepada Yth:
Supervisi Beton PT. Pionir Beton Industri Plant Yogyakarta
Jl. Ahmad Yani Jl. Ringroad Timur, Pelem Mulong, Banguntapan, Bantul, Yogyakarta, 55198

Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh,

Dalam rangka mempersiapkan mahasiswa untuk menempuh ujian Tugas akhir/Skripsi maka setiap mahasiswa diwajibkan untuk menyusun Tugas Akhir/skripsi. Sehubungan dengan hal tersebut diatas maka diperlukan bukti pendukung berupa data maupun hasil uji yang diperoleh baik dari instansi Pemerintah BUMN, ataupun dari perusahaan swasta/Proyek.

Berdasarkan alasan-alasan tersebut diatas, maka dengan ini kami mohon bantuannya untuk dapat memberikan bantuan berupa **Semen Tiga Roda Tipe 1/OPC (Ordinary Portland Cement) sebanyak 70 Kg** yang akan digunakan untuk keperluan penyusunan Tugas Akhir bagi mahasiswa Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta berikut:

Nama	:	**M. Dzaki Abiyantara**
NIM	:	**21511196**
CP Mahasiswa	:	**081278604373**
Judul Tugas Akhir	:	**Analisis Kekuatan Beton Normal Dengan Fly Ash sebagai Pengganti Parsial Terhadap Semen**

Demikian permohonan ini kami sampaikan, atas bantuan dan kerjasamanya kami ucapkan banyak terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullah Wabarakatuh.

Yogyakarta, 14 Juli 2025

Sekretaris Prodi Teknik Sipil – Program Internasional,

Ir. Pradipta Nandi Wardhana, S.T., M. Eng

Dosen Pembimbing Tugas Akhir,

Jafar, S.T., MURP., M.T.

Lampiran 3 Data Hasil Pemeriksaan XRF *Fly ash* PLTU Sumsel – 8

BukitAsam
HUADIAN BUKIT ASAM POWER

1.4 煤质、灰份分析资料及灰渣量计算结果表

1.4 Analysis data of coal quality and ash, and calculation result table of amount of ash and slag

煤质及灰份分析资料：

Coal quality and ash analysis data:

名称 Name	符号 Symbol	单位 Unit	设计煤种 Design coal	校核煤种 Check coal
收到基碳 Carbon as received	C_{ar}	%	43.85	38.06
收到基氢 Hydrogen as received	H_{ar}	%	3.15	2.77
收到基氮 Nitrogen as received	N_{ar}	%	0.74	0.60
收到基氧 Oxygen as received	O_{ar}	%	10.89	9.44
收到基全硫 Total sulfur as received	$S_{t,ar}$	%	0.50	1.07
全水分 Total moisture	M_t	%	35.2	40.8
收到基灰分 Ash as received	A_{ar}	%	5.67	7.26
空气干燥基水分 Air-dried moisture	M_{ad}	%	7.50	7.24
干燥无灰基挥发分 Dry ash free basis volatile constituent	V_{daf}	%	48.27	49.13
收到基高位发热量 Gross calorific value as received	$Q_{gr,ar}$	MJ/kg	17.55	15.36
收到基低位发热量 Net calorific value as received	$Q_{net,ar}$	MJ/kg	16.09	13.85
哈氏可磨指数 Hardgrove grindability index	HGI	/	58	59
冲刷磨损指数 Impingement abrasion index	Ke		1.20	2.0
煤中游离二氧化硅 Free silica in coal	$SiO_2(F)$	%	1.01	1.75
煤灰熔特征温度/变形温度 Coal ash melting characteristic temperature/deformation temperature	DT	$\times10^3$℃	1.24	1.21
煤灰熔特征温度/软化温度 Coal ash melting characteristic temperature/softening temperature	ST	$\times10^3$℃	1.25	1.24
煤灰熔特征温度/半球温度 Coal ash melting characteristic temperature/hemispheric temperature	HT	$\times10^3$℃	1.26	1.25
煤灰熔特征温度/流动温度 Coal ash melting characteristic temperature/flow temperature	FT	$\times10^3$℃	1.28	1.27
煤灰中二氧化硅 Silica in coal ash	SiO_2	%	50.81	52.66

名称 Name	符号 Symbol	单位 Unit	设计煤种 Design coal	校核煤种 Check coal
煤灰中三氧化二铝 Aluminum oxide in coal ash	Al_2O_3	%	22.58	21.42
煤灰中三氧化二铁 Ferric oxide in coal ash	Fe_2O_3	%	5.90	8.29
煤灰中氧化钙 Calcium oxide in coal ash	CaO	%	11.64	8.71
煤灰中氧化镁 Magnesium oxide in coal ash	MgO	%	0.72	0.86
煤灰中氧化钠 Sodium oxide in coal ash	Na_2O	%	2.74	2.30
煤灰中氧化钾 Potassium oxide in coal ash	K_2O	%	0.65	0.52
煤灰中二氧化钛 Titanium dioxide in coal ash	TiO_2	%	1.21	1.38
煤灰中三氧化硫 Sulfur trioxide in coal ash	SO_3	%	3.15	3.35
煤灰中二氧化锰 Manganese dioxide in coal ash	MnO_2	%	0.103	0.111
测试温度 20℃测试比电阻 Specific resistance tested at test temperature 20℃	ρ_{20}	Ω.cm	3.90×10^{9}	4.80×10^{9}
测试温度 80℃测试比电阻 Specific resistance tested at test temperature 80℃	ρ_{80}	Ω.cm	4.90×10^{10}	4.7×10^{10}
测试温度 100℃测试比电阻 Specific resistance tested at test temperature 100℃	ρ_{100}	Ω.cm	2.30×10^{11}	2.2×10^{11}
测试温度 120℃测试比电阻 Specific resistance tested at test temperature 120℃	ρ_{120}	Ω.cm	6.80×10^{11}	6.2×10^{11}
测试温度 150℃测试比电阻 Specific resistance tested at test temperature 150℃	ρ_{150}	Ω.cm	4.40×10^{11}	5.6×10^{11}
测试温度 180℃测试比电阻 Specific resistance tested at test temperature 180℃	ρ_{180}	Ω.cm	7.50×10^{10}	8.9×10^{10}

Lampiran 4 Data Hasil Pemeriksaan Agregat Halus

PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT HALUS

Asal Pasir	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata – Rata
Berat pasir kering mutlak, gram (Bk)	490	495	492,5
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	500	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (Bt)	969	975	972
Berat piknometer berisi air, gram (B)	657	669	663
Berat jenis curah (Bk/(B+500-Bt))	2,606	2,552	2,58
Berat jenis jenuh kering muka (500/(B+500-Bt))	2,660	2,577	2,62
Berat jenis semu (Bk/(B+Bk-Bt))	2,753	2,619	2,69
Penyerapan air (500-Bk)/(Bk×100%)	2,04%	1,01%	1,53%

PEMERIKSAAN ANALISA SARINGAN
AGREGAT HALUS

Asal Pasir	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	**Berat Tertinggal (gram)**	**Berat Tertinggal (%)**	**Berat Tertinggal Kumulatif (%)**	**Persentase lolos Kumulatif (%)**
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,80	8	0,40	0,40	99,60
2,40	135	6,75	7,15	92,85
1,20	359	17,95	25,10	74,90
0,60	634	31,70	56,80	43,20
0,30	373	18,65	75,45	24,55
0,15	322	16,10	91,55	8,45
Pan	169	8,45	100	0
Jumlah	**2000**	**100**	**256,45**	

$$\text{MHB} = \frac{\sum Persentase\ berat\ tertinggal\ kumulatif}{100}$$

$$= \frac{256,45}{100}$$

$$= 2,565$$

PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT HALUS

Asal Pasir	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Ayakan			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	90-100
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

Keterangan=

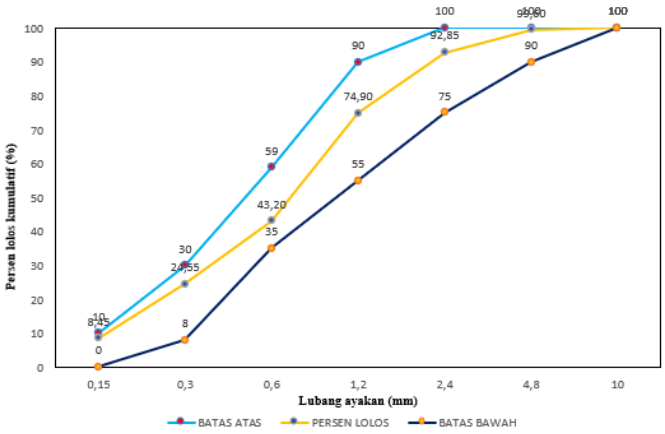
Daerah I = Pasir Kasar

Daerah II = Pasir Agak Kasar

Daerah III = Pasir Agak Halus

Daerah IV = Pasir Halus

GAMBAR ANALISA SARINGAN HALUS



PEMERIKSAAN BERAT VOLUME GEMBUR DAN PADAT AGREGAT HALUS

Asal Pasir	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Pemeriksaan Berat Volume Padat Agregat Halus

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata – rata**
Berat tabung (W1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	8228	8109	8168,5
Berat Agregat (W3), gram	2980	2937	2958,5
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9
Volume tabung (V), gram	1714,485	1666,458	1690,471
Berat volume padat (W3/V), gram/cm^3	1,738	1,762	1,750

Pemeriksaan Berat Volume Gembur Agregat Halus

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata – rata**
Berat tabung (W1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	7822	7618	7720
Berat Agregat (W3), gram	2574	2446	2510
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9
Volume tabung (V), gram	1714,485	1666,458	1690,471
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm^3	1,501	1,468	1,485

PEMERIKSAAN LOLOS SARINGAN NO.200 (UJI KANDUNGAN LUMPUR) AGREGAT HALUS

Asal Pasir	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata – Rata**
Berat agregt kering oven (W1), gram	500	500	500
Berat agregat kering oven setelah dicuci (W2), gram	475	477	476
Persentase lolos saringan no. 200 [(W1 – W2)/W1] × 100	5,00%	4,60%	4,80%

PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT KASAR

Asal Kerikil	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata – Rata**
Berat pasir kering mutlak, gram (Bk)	4826	4912	4869
Berat kerikil kondisi jenuh kering muka (SSD), gram (Bj)	5000	5000	5000
Berat kerikil dalam air, gram (Ba)	3456	3389	3422,50
Berat jenis curah (Bk/(Bj-Ba))	3,126	3,049	3,09
Berat jenis jenuh kering muka (Bj/(Bj-Ba))	3,238	3,104	3,17
Berat jenis semu (Bk/(Bk-Ba))	3,523	3,225	3,37
Penyerapan air (Bj-Bk)/(Bk×100%)	3,61%	1,79%	2,70%

PEMERIKSAAN ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR

Asal Kerikil	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	**Berat Tertinggal (gram)**	**Berat Tertinggal (%)**	**Berat Tertinggal Kumulatif (%)**	**Persentase lolos Kumulatif (%)**
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	1369	27,38	27,38	76,62
4,80	3357	67,14	94,52	5,48
2,40	55	1,1	95,62	4,38
1,20	36	0,72	96,34	3,66
0,60	0	0	96,34	3,66
0,30	0	0	96,34	3,66
0,15	0	0	96,34	3,66
Pan	183	3,66	100	0
Jumlah	**5000**	**100**	**702,88**	

Modulus Halus Butir (MHB)

MHB Sampel $= \frac{702,88}{100}$

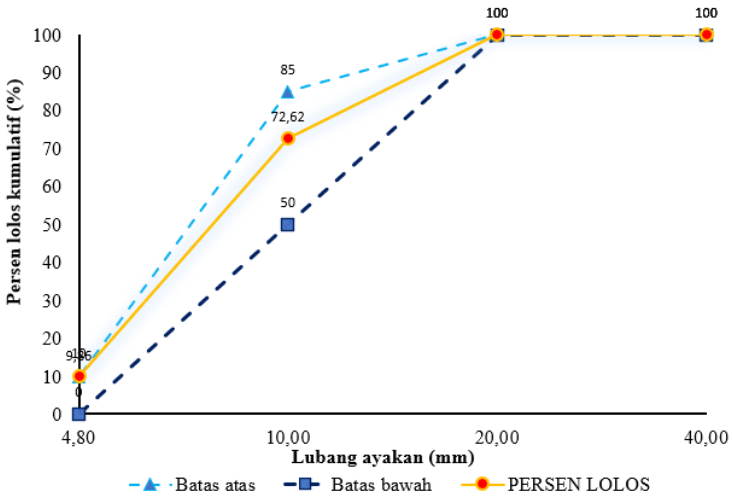
$= 7,03$

GRADASI AGRGAT KASAR

Asal Kerikil	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan	
	Daerah I	Daerah II
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



PEMERIKSAAN BERAT VOLUME GEMBUR DAN PADAT AGREGAT KASAR

Asal Kerikil	Lab. TBK FTSP UII
Keperluan	Tugas Akhir

Pemeriksaan Berat Volume Gembur

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata – rata**
Berat tabung (W1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	7595	7386	7490,5
Berat Agregat (W3), gram	2347	2214	2280
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9
Volume tabung (V), gram	1714,4845	1666,458	1690,471
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm^3	1,369	1,329	1,349

Pemeriksaan Berat Volume Padat

Uraian	**Hasil Pengamatan**		
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata – rata**
Berat tabung (W1), gram	5248	5172	5210
Berat tabung + Agregat SSD (W2), gram	8006	7737	7871,5
Berat Agregat (W3), gram	2758	2565	2661,5
Diameter silinder (d), cm	10,5	10,3	10,4
Tinggi silinder (t), cm	19,8	20	19,9
Volume tabung (V), gram	1714,4845	1666,458	1690,471
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm^3	1,609	1,539	1,574

Lampiran 5 Data Hasil Perencanaan Campuran Beton

Perencanaan Campuran Beton Normal

NO	Uraian	Nilai	Satuan
1	Kuat tekan yang disyaratkan (f'c)	25	MPa
2	Deviasi Standar	-	-
3	Nilai tambah (Margin)	12	MPa
4	Kekuatan rata – rata yang ditargetkan	37	MPa
5	Jenis Semen	Tipe 1 (OPC)	
6	Jenis Agregat Kasar	Batu Pecah	
	Jenis Agregat Halus	Alami	
7	Faktor air semen (fas)	0,5	
	Faktor air semen maksimum	0,6	
8	Faktor air semen (fas) digunakan	0,5	
9	Slump	60 – 180	cm
10	Ukuran agregat maksimum	10	mm
11	Kadar air bebas	233,33	kg/m^3
12	Jumlah semen	466,67	kg/m^3
13	Jumlah semen maksimum	-	
14	Jumlah semen minimum	275	kg/m^3
15	Jumlah semen digunakan	466,67	kg/m^3
16	Fas disesuaikan	0,5	
17	Susunan besar butir agregat halus	Gradasi 2	
18	Berat Jenis agregat halus (SSD)	2,62	
	Berat Jenis agregat kasar (SSD)	3,17	
19	Persen agregat halus	51,9	%
20	Persen agregat kasar	48,1	%
21	Berat Jenis relatif gabungan (SSD)	2,88	
22	Berat isi beton	2486,05	kg/m^3
23	Kadar agregat gabungan	1786	kg/m^3
24	Kadar agregat halus	926,934	kg/m^3
25	Kadar agregat kasar	859,066	kg/m^3
26	Kadar semen dengan angka penyusutan	583,333	kg/m^3
27	Kadar agregat halus dengan angka penyusutan	1158,668	kg/m^3
28	Kadar agregat kasar dengan angka penyususstan	1073,833	kg/m^3
29	Kadar air dengan angka penyusutan	291,667	kg/m^3

Perencanaan Beton Campuran *Fly ash*

Variasi (%)	***Fly ash* (Kg)**	**Semen (Kg)**	**Agregat Kasar (Kg)**	**Agregat Halus (Kg)**	**Air (Kg)**	**Kode Beton**	**Jumlah Silinder (Buah)**
0	0	24,740	45,543	49,141	12,370	BV – 0	8
5	1,237	23,503	45,543	49,141	12,370	BV – 5	8
10	2,474	22,266	45,543	49,141	12,370	BV – 10	8
15	3,711	21,029	45,543	49,141	12,370	BV – 15	8
20	4,948	19,792	45,543	49,141	12,370	BV – 20	8

Lampiran 6 Data Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BN	1	15,10	30,10	17907,864	593,920	33,609	40,051
	2	15,10	29,90	17907,864	631,750	35,750	
	3	15,00	30	17671,459	720,940	40,797	
	4	15,00	30	17671,459	843,670	47,742	
	5	15,20	30	18145,839	748,550	42,359	
BV-05	1	15,00	30,10	17671,459	478,100	27,055	41,895
	2	15,10	30,00	17907,864	827,890	46,849	
	3	15,00	29,00	17671,459	778,270	44,041	
	4	15,00	29,00	17671,459	803,690	45,479	
	5	15,10	30,20	17907,864	809,000	45,780	
BV-10	1	15,10	30,00	17907,864	735,150	44,576	42,100
	2	15,00	30,10	17671,459	719,030	41,982	
	3	15,05	30,00	17789,465	626,390	39,589	
	4	14,90	29,90	17436,625	630,690	41,569	
	5	15,00	30,00	17671,459	695,260	42,785	

Kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BV-15	1	14,90	30,10	17436,625	852,720	48,254	44,227
	2	15,10	30,10	17671,459	888,840	50,298	
	3	15,00	29,90	17907,864	646,080	36,561	
	4	15,00	30,00	17671,459	883,880	50,017	
	5	15,05	30,05	17907,864	636,290	36,007	
BV-20	1	14,90	30,00	17436,625	649,570	36,758	48,595
	2	15,01	30,01	17695,028	1034,590	58,546	
	3	15,00	30,00	17671,459	834,750	47,237	
	4	15,00	29,8	17671,459	1015,280	57,453	
	5	15,05	30,00	17789,465	759,580	42,983	

Lampiran 7 Data Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Variasi BN Sampel 1

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	0	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	33,609	MPa
Diameter	151	mm
Tinggi	301	mm
Luas Penampang	17907,864	mm^2

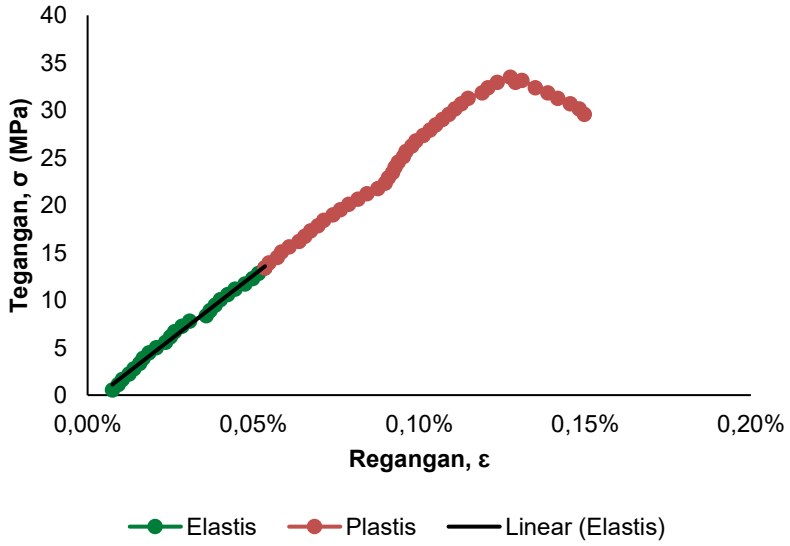
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi (ΔL)	Regangan (ε')	Tegangan (σ)
kN	N	... x 10^3 mm	mm	%	MPa
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,56
20	20000	12	0,006	0,00003	1,12
30	30000	17	0,0085	0,0000425	1,68
40	40000	25	0,0125	0,0000625	2,23
50	50000	31	0,0155	0,0000775	2,79
60	60000	38	0,019	0,000095	3,35
70	70000	42	0,021	0,000105	3,91
80	80000	49	0,0245	0,0001225	4,47
90	90000	58	0,029	0,000145	5,03
100	100000	69	0,0345	0,0001725	5,58
110	110000	75	0,0375	0,0001875	6,14
120	120000	80	0,04	0,0002	6,70
130	130000	89	0,0445	0,0002225	7,26
140	140000	98	0,049	0,000245	7,82
150	150000	118	0,059	0,000295	8,38
160	160000	123	0,0615	0,0003075	8,93
170	170000	129	0,0645	0,0003225	9,49
180	180000	135	0,0675	0,0003375	10,05
190	190000	144	0,072	0,00036	10,61
200	200000	153	0,0765	0,0003825	11,17

210	210000	165	0,0825	0,0004125	11,73
220	220000	174	0,087	0,000435	12,29
230	230000	181	0,0905	0,0004525	12,84
240	240000	189	0,0945	0,0004725	13,40
250	250000	194	0,097	0,000485	13,96
260	260000	204	0,102	0,00051	14,52
270	270000	209	0,1045	0,0005225	15,08
280	280000	218	0,109	0,000545	15,64
290	290000	230	0,115	0,000575	16,19
300	300000	237	0,1185	0,0005925	16,75
310	310000	244	0,122	0,00061	17,31
320	320000	253	0,1265	0,0006325	17,87
330	330000	260	0,13	0,00065	18,43
340	340000	271	0,1355	0,0006775	18,99
350	350000	280	0,14	0,0007	19,54
360	360000	290	0,145	0,000725	20,10
370	370000	301	0,1505	0,0007525	20,66
380	380000	312	0,156	0,00078	21,22
390	390000	325	0,1625	0,0008125	21,78
400	400000	334	0,167	0,000835	22,34
410	410000	338	0,169	0,000845	22,89
420	420000	343	0,1715	0,0008575	23,45
430	430000	346	0,173	0,000865	24,01
440	440000	350	0,175	0,000875	24,57
450	450000	356	0,178	0,00089	25,13
460	460000	359	0,1795	0,0008975	25,69
470	470000	366	0,183	0,000915	26,25
480	480000	371	0,1855	0,0009275	26,80
490	490000	380	0,19	0,00095	27,36
500	500000	388	0,194	0,00097	27,92
510	510000	395	0,1975	0,0009875	28,48
520	520000	403	0,2015	0,0010075	29,04
530	530000	411	0,2055	0,0010275	29,60
540	540000	418	0,209	0,001045	30,15
550	550000	426	0,213	0,001065	30,71
560	560000	434	0,217	0,001085	31,27

570	570000	451	0,2255	0,0011275	31,83
580	580000	458	0,229	0,001145	32,39
590	590000	469	0,2345	0,0011725	32,95
600	600000	485	0,2425	0,0012125	33,50
590	590000	491	0,2455	0,0012275	32,95
593,92	593920	499	0,2495	0,0012475	33,17
580	580000	515	0,2575	0,0012875	32,39
570	570000	530	0,265	0,001325	31,83
560	560000	542	0,271	0,001355	31,27
550	550000	557	0,2785	0,0013925	30,71
540	540000	568	0,284	0,00142	30,15
530	530000	574	0,287	0,001435	29,60

Grafik Modulus Elastisitas BN Sampel 1



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	27271,38 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	27247,44 MPa

Variasi BN Sampel 2

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	0	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	35,750	MPa
Diameter	151	mm
Tinggi	299	mm
Luas Penampang	17907,864	mm^2

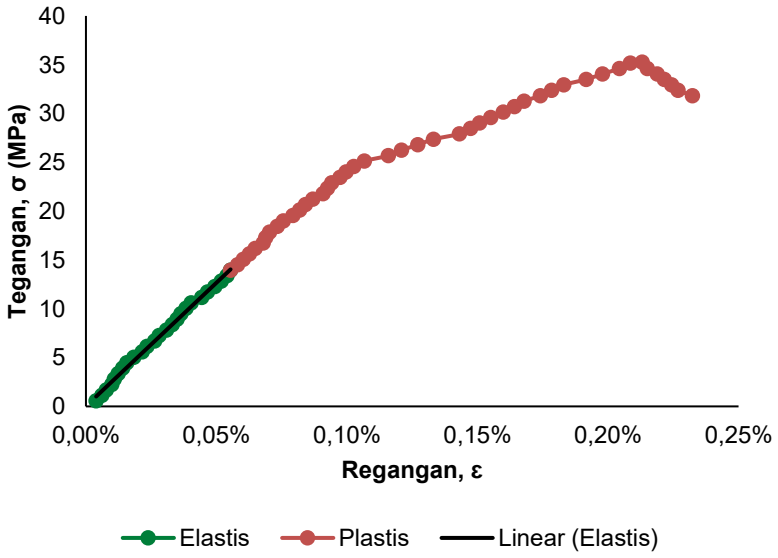
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	7	0,0035	0,0000175	0,56
20	20000	16	0,008	0,00004	1,12
30	30000	23	0,0115	0,0000575	1,68
40	40000	31	0,0155	0,0000775	2,23
50	50000	35	0,0175	0,0000875	2,79
60	60000	41	0,0205	0,0001025	3,35
70	70000	48	0,024	0,00012	3,91
80	80000	54	0,027	0,000135	4,47
90	90000	65	0,0325	0,0001625	5,03
100	100000	78	0,039	0,000195	5,58
110	110000	85	0,0425	0,0002125	6,14
120	120000	97	0,0485	0,0002425	6,70
130	130000	104	0,052	0,00026	7,26
140	140000	115	0,0575	0,0002875	7,82
150	150000	124	0,062	0,00031	8,38
160	160000	131	0,0655	0,0003275	8,93
170	170000	137	0,0685	0,0003425	9,49
180	180000	145	0,0725	0,0003625	10,05
190	190000	153	0,0765	0,0003825	10,61
200	200000	169	0,0845	0,0004225	11,17
210	210000	178	0,089	0,000445	11,73
220	220000	189	0,0945	0,0004725	12,29

230	230000	199	0,0995	0,0004975	12,84
240	240000	208	0,104	0,00052	13,40
250	250000	213	0,1065	0,0005325	13,96
260	260000	224	0,112	0,00056	14,52
270	270000	233	0,1165	0,0005825	15,08
280	280000	242	0,121	0,000605	15,64
290	290000	251	0,1255	0,0006275	16,19
300	300000	263	0,1315	0,0006575	16,75
310	310000	267	0,1335	0,0006675	17,31
320	320000	273	0,1365	0,0006825	17,87
330	330000	285	0,1425	0,0007125	18,43
340	340000	294	0,147	0,000735	18,99
350	350000	309	0,1545	0,0007725	19,54
360	360000	319	0,1595	0,0007975	20,10
370	370000	328	0,164	0,00082	20,66
380	380000	339	0,1695	0,0008475	21,22
390	390000	355	0,1775	0,0008875	21,78
400	400000	362	0,181	0,000905	22,34
410	410000	368	0,184	0,00092	22,89
420	420000	381	0,1905	0,0009525	23,45
430	430000	390	0,195	0,000975	24,01
440	440000	402	0,201	0,001005	24,57
450	450000	418	0,209	0,001045	25,13
460	460000	455	0,2275	0,0011375	25,69
470	470000	475	0,2375	0,0011875	26,25
480	480000	500	0,25	0,00125	26,80
490	490000	524	0,262	0,00131	27,36
500	500000	564	0,282	0,00141	27,92
510	510000	581	0,2905	0,0014525	28,48
520	520000	595	0,2975	0,0014875	29,04
530	530000	612	0,306	0,00153	29,60
540	540000	631	0,3155	0,0015775	30,15
550	550000	648	0,324	0,00162	30,71
560	560000	663	0,3315	0,0016575	31,27
570	570000	688	0,344	0,00172	31,83
580	580000	705	0,3525	0,0017625	32,39

590	590000	724	0,362	0,00181	32,95
600	600000	758	0,379	0,001895	33,50
610	610000	783	0,3915	0,0019575	34,06
620	620000	809	0,4045	0,0020225	34,62
630	630000	826	0,413	0,002065	35,18
631,75	631750	844	0,422	0,00211	35,28
620	620000	852	0,426	0,00213	34,62166211
610	610000	867	0,4335	0,0021675	34,0632482
600	600000	878	0,439	0,002195	33,5048343
590	590000	889	0,4445	0,0022225	32,94642039
580	580000	899	0,4495	0,0022475	32,38800649
570	570000	921	0,4605	0,0023025	31,82959258

Grafik Modulus Elastisitas BN Sampel 2



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	25863,38 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	28101,91 MPa

Variasi BN Sampel 3

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	0	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	40,797	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

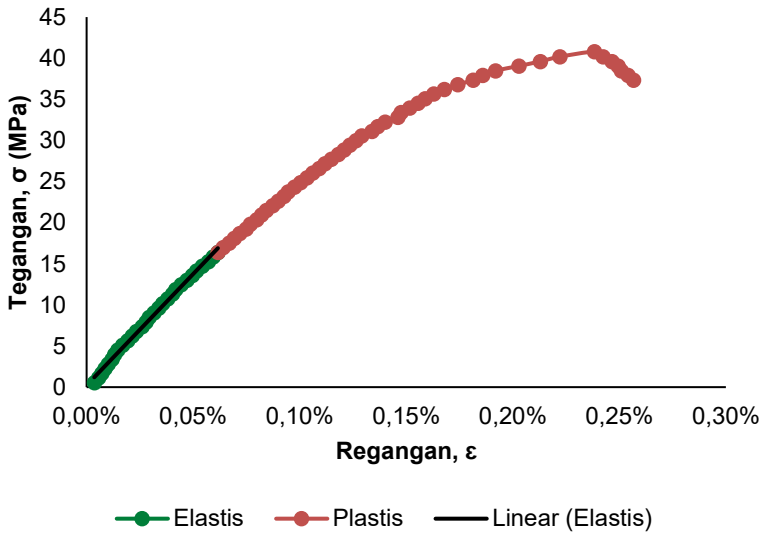
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,57
20	20000	14	0,007	0,000035	1,13
30	30000	20	0,01	0,00005	1,70
40	40000	26	0,013	0,000065	2,26
50	50000	32	0,016	0,00008	2,83
60	60000	39	0,0195	0,0000975	3,40
70	70000	44	0,022	0,00011	3,96
80	80000	50	0,025	0,000125	4,53
90	90000	59	0,0295	0,0001475	5,09
100	100000	69	0,0345	0,0001725	5,66
110	110000	77	0,0385	0,0001925	6,22
120	120000	85	0,0425	0,0002125	6,79
130	130000	96	0,048	0,00024	7,36
140	140000	103	0,0515	0,0002575	7,92
150	150000	109	0,0545	0,0002725	8,49
160	160000	118	0,059	0,000295	9,05
170	170000	127	0,0635	0,0003175	9,62
180	180000	134	0,067	0,000335	10,19
190	190000	144	0,072	0,00036	10,75
200	200000	153	0,0765	0,0003825	11,32
210	210000	159	0,0795	0,0003975	11,88
220	220000	169	0,0845	0,0004225	12,45

230	230000	180	0,09	0,00045	13,02
240	240000	190	0,095	0,000475	13,58
250	250000	198	0,099	0,000495	14,15
260	260000	209	0,1045	0,0005225	14,71
270	270000	220	0,11	0,00055	15,28
280	280000	229	0,1145	0,0005725	15,84
290	290000	238	0,119	0,000595	16,41
300	300000	248	0,124	0,00062	16,98
310	310000	259	0,1295	0,0006475	17,54
320	320000	269	0,1345	0,0006725	18,11
330	330000	279	0,1395	0,0006975	18,67
340	340000	291	0,1455	0,0007275	19,24
350	350000	299	0,1495	0,0007475	19,81
360	360000	311	0,1555	0,0007775	20,37
370	370000	320	0,16	0,0008	20,94
380	380000	329	0,1645	0,0008225	21,50
390	390000	341	0,1705	0,0008525	22,07
400	400000	351	0,1755	0,0008775	22,64
410	410000	362	0,181	0,000905	23,20
420	420000	370	0,185	0,000925	23,77
430	430000	382	0,191	0,000955	24,33
440	440000	393	0,1965	0,0009825	24,90
450	450000	405	0,2025	0,0010125	25,46
460	460000	416	0,208	0,00104	26,03
470	470000	428	0,214	0,00107	26,60
480	480000	439	0,2195	0,0010975	27,16
490	490000	451	0,2255	0,0011275	27,73
500	500000	464	0,232	0,00116	28,29
510	510000	475	0,2375	0,0011875	28,86
520	520000	486	0,243	0,001215	29,43
530	530000	497	0,2485	0,0012425	29,99
540	540000	508	0,254	0,00127	30,56
550	550000	527	0,2635	0,0013175	31,12
560	560000	538	0,269	0,001345	31,69
570	570000	552	0,276	0,00138	32,26
580	580000	576	0,288	0,00144	32,82

590	590000	582	0,291	0,001455	33,39
600	600000	598	0,299	0,001495	33,95
610	610000	614	0,307	0,001535	34,52
620	620000	627	0,3135	0,0015675	35,08
630	630000	643	0,3215	0,0016075	35,65
640	640000	663	0,3315	0,0016575	36,22
650	650000	688	0,344	0,00172	36,78
660	660000	717	0,3585	0,0017925	37,35
670	670000	735	0,3675	0,0018375	37,91
680	680000	759	0,3795	0,0018975	38,48
690	690000	803	0,4015	0,0020075	39,05
700	700000	843	0,4215	0,0021075	39,61
710	710000	880	0,44	0,0022	40,18
720,94	720940	945	0,4725	0,0023625	40,80
710	710000	961	0,4805	0,0024025	40,18
700	700000	978	0,489	0,002445	39,61
690	690000	989	0,4945	0,0024725	39,05
680	680000	995	0,4975	0,0024875	38,48
670	670000	1008	0,504	0,00252	37,91
660	660000	1018	0,509	0,002545	37,35

Grafik Modulus Elastisitas BN Sampel 3



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	25863,38 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	28101,91 MPa

Variasi BN Sampel 4

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	0	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	47,742	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

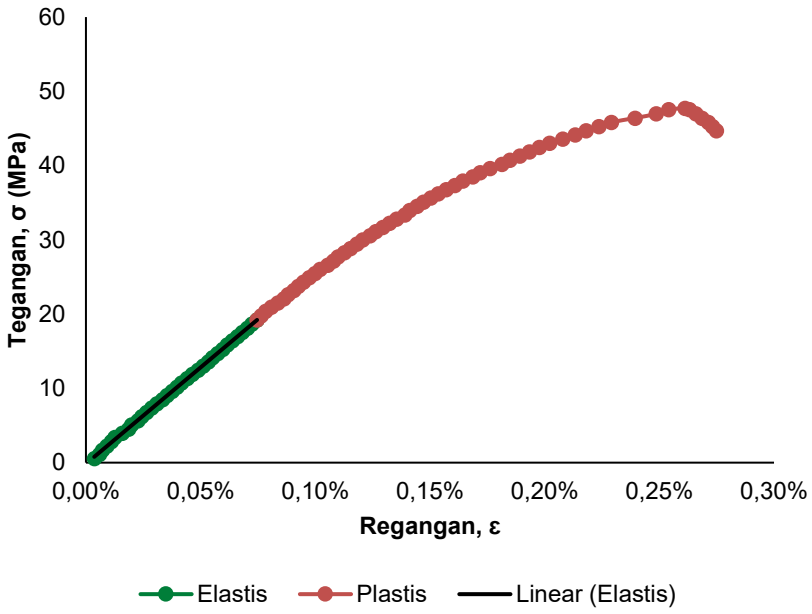
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	7	0,0035	0,0000175	0,57
20	20000	16	0,008	0,00004	1,13
30	30000	21	0,0105	0,00005	1,70
40	40000	29	0,0145	0,0000725	2,26
50	50000	37	0,0185	0,0000925	2,83
60	60000	43	0,0215	0,0001075	3,40
70	70000	56	0,028	0,00014	3,96
80	80000	67	0,0335	0,0001675	4,53
90	90000	72	0,036	0,00018	5,09
100	100000	83	0,0415	0,0002075	5,66
110	110000	90	0,045	0,000225	6,22
120	120000	98	0,049	0,000245	6,79
130	130000	107	0,0535	0,0002675	7,36
140	140000	116	0,058	0,00029	7,92
150	150000	126	0,063	0,000315	8,49
160	160000	134	0,067	0,000335	9,05
170	170000	143	0,0715	0,0003575	9,62
180	180000	151	0,0755	0,0003775	10,19
190	190000	159	0,0795	0,0003975	10,75
200	200000	169	0,0845	0,0004225	11,32
210	210000	178	0,089	0,000445	11,88
220	220000	188	0,094	0,00047	12,45

230	230000	197	0,0985	0,0004925	13,02
240	240000	206	0,103	0,000515	13,58
250	250000	213	0,1065	0,0005325	14,15
260	260000	222	0,111	0,000555	14,71
270	270000	231	0,1155	0,0005775	15,28
280	280000	239	0,1195	0,0005975	15,84
290	290000	248	0,124	0,00062	16,41
300	300000	257	0,1285	0,0006425	16,98
310	310000	265	0,1325	0,0006625	17,54
320	320000	274	0,137	0,000685	18,11
330	330000	282	0,141	0,000705	18,67
340	340000	291	0,1455	0,0007275	19,24
350	350000	298	0,149	0,000745	19,81
360	360000	306	0,153	0,000765	20,37
370	370000	316	0,158	0,00079	20,94
380	380000	327	0,1635	0,0008175	21,50
390	390000	338	0,169	0,000845	22,07
400	400000	345	0,1725	0,0008625	22,64
410	410000	355	0,1775	0,0008875	23,20
420	420000	363	0,1815	0,0009075	23,77
430	430000	372	0,186	0,00093	24,33
440	440000	382	0,191	0,000955	24,90
450	450000	392	0,196	0,00098	25,46
460	460000	401	0,2005	0,0010025	26,03
470	470000	414	0,207	0,001035	26,60
480	480000	424	0,212	0,00106	27,16
490	490000	432	0,216	0,00108	27,73
500	500000	443	0,2215	0,0011075	28,29
510	510000	454	0,227	0,001135	28,86
520	520000	465	0,2325	0,0011625	29,43
530	530000	475	0,2375	0,0011875	29,99
540	540000	488	0,244	0,00122	30,56
550	550000	498	0,249	0,001245	31,12
560	560000	510	0,255	0,001275	31,69
570	570000	522	0,261	0,001305	32,26
580	580000	534	0,267	0,001335	32,82

590	590000	549	0,2745	0,0013725	33,39
600	600000	557	0,2785	0,0013925	33,95
610	610000	570	0,285	0,001425	34,52
620	620000	581	0,2905	0,0014525	35,08
630	630000	594	0,297	0,001485	35,65
640	640000	607	0,3035	0,0015175	36,22
650	650000	621	0,3105	0,0015525	36,78
660	660000	636	0,318	0,00159	37,35
670	670000	650	0,325	0,001625	37,91
680	680000	667	0,3335	0,0016675	38,48
690	690000	680	0,34	0,0017	39,05
700	700000	697	0,3485	0,0017425	39,61
710	710000	718	0,359	0,001795	40,18
720	720000	732	0,366	0,00183	40,74
730	730000	749	0,3745	0,0018725	41,31
740	740000	766	0,383	0,001915	41,88
750	750000	783	0,3915	0,0019575	42,44
760	760000	801	0,4005	0,0020025	43,01
770	770000	824	0,412	0,00206	43,57
780	780000	846	0,423	0,002115	44,14
790	790000	865	0,4325	0,0021625	44,70
800	800000	887	0,4435	0,0022175	45,27
810	810000	909	0,4545	0,0022725	45,84
820	820000	950	0,475	0,002375	46,40
830	830000	987	0,4935	0,0024675	46,97
840	840000	1009	0,5045	0,0025225	47,53
843,67	843670	1037	0,5185	0,0025925	47,74
840	840000	1045	0,5225	0,0026125	47,53
830	830000	1056	0,528	0,00264	46,97
820	820000	1067	0,5335	0,0026675	46,40
810	810000	1078	0,539	0,002695	45,84
800	800000	1085	0,5425	0,0027125	45,27
790	790000	1092	0,546	0,00273	44,70

Grafik Modulus Elastisitas BN Sampel 4



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	25988,76 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	32474,93 MPa

Variasi BN Sampel 5

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	0	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	42,359	MPa
Diameter	152	mm
Tinggi	302	mm
Luas Penampang	18145,839	mm^2

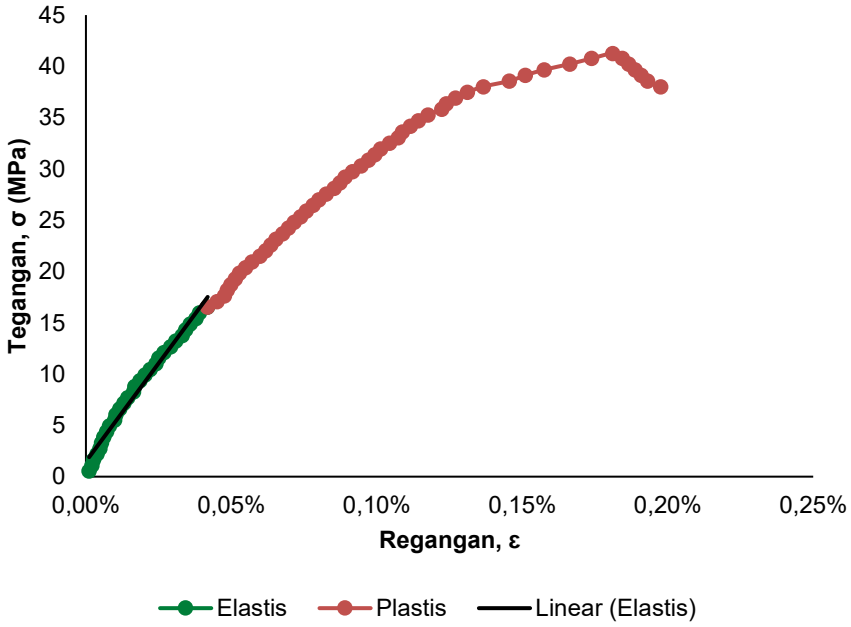
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	3	0,0015	0,0000075	0,55
20	20000	7	0,0035	0,0000175	1,10
30	30000	9	0,0045	0,0000225	1,65
40	40000	14	0,007	0,000035	2,20
50	50000	18	0,009	0,000045	2,76
60	60000	20	0,01	0,00005	3,31
70	70000	23	0,0115	0,0000575	3,86
80	80000	27	0,0135	0,0000675	4,41
90	90000	31	0,0155	0,0000775	4,96
100	100000	38	0,019	0,000095	5,51
110	110000	40	0,02	0,0001	6,06
120	120000	45	0,0225	0,0001125	6,61
130	130000	51	0,0255	0,0001275	7,16
140	140000	56	0,028	0,00014	7,72
150	150000	64	0,032	0,00016	8,27
160	160000	66	0,033	0,000165	8,82
170	170000	73	0,0365	0,0001825	9,37
180	180000	80	0,04	0,0002	9,92
190	190000	87	0,0435	0,0002175	10,47
200	200000	95	0,0475	0,0002375	11,02
210	210000	99	0,0495	0,0002475	11,57
220	220000	106	0,053	0,000265	12,12

230	230000	115	0,0575	0,0002875	12,68
240	240000	122	0,061	0,000305	13,23
250	250000	131	0,0655	0,0003275	13,78
260	260000	136	0,068	0,00034	14,33
270	270000	142	0,071	0,000355	14,88
280	280000	150	0,075	0,000375	15,43
290	290000	155	0,0775	0,0003875	15,98
300	300000	166	0,083	0,000415	16,53
310	310000	179	0,0895	0,0004475	17,08
320	320000	189	0,0945	0,0004725	17,63
330	330000	193	0,0965	0,0004825	18,19
340	340000	198	0,099	0,000495	18,74
350	350000	204	0,102	0,00051	19,29
360	360000	210	0,105	0,000525	19,84
370	370000	218	0,109	0,000545	20,39
380	380000	227	0,1135	0,0005675	20,94
390	390000	238	0,119	0,000595	21,49
400	400000	246	0,123	0,000615	22,04
410	410000	253	0,1265	0,0006325	22,59
420	420000	260	0,13	0,00065	23,15
430	430000	269	0,1345	0,0006725	23,70
440	440000	277	0,1385	0,0006925	24,25
450	450000	285	0,1425	0,0007125	24,80
460	460000	294	0,147	0,000735	25,35
470	470000	302	0,151	0,000755	25,90
480	480000	311	0,1555	0,0007775	26,45
490	490000	319	0,1595	0,0007975	27,00
500	500000	329	0,1645	0,0008225	27,55
510	510000	340	0,17	0,00085	28,11
520	520000	348	0,174	0,00087	28,66
530	530000	355	0,1775	0,0008875	29,21
540	540000	365	0,1825	0,0009125	29,76
550	550000	377	0,1885	0,0009425	30,31
560	560000	387	0,1935	0,0009675	30,86
570	570000	396	0,198	0,00099	31,41
580	580000	404	0,202	0,00101	31,96

590	590000	416	0,208	0,00104	32,51
600	600000	428	0,214	0,00107	33,07
610	610000	434	0,217	0,001085	33,62
620	620000	445	0,2225	0,0011125	34,17
630	630000	456	0,228	0,00114	34,72
640	640000	469	0,2345	0,0011725	35,27
650	650000	488	0,244	0,00122	35,82
660	660000	494	0,247	0,001235	36,37
670	670000	507	0,2535	0,0012675	36,92
680	680000	523	0,2615	0,0013075	37,47
690	690000	545	0,2725	0,0013625	38,03
700	700000	581	0,2905	0,0014525	38,58
710	710000	603	0,3015	0,0015075	39,13
720	720000	629	0,3145	0,0015725	39,68
730	730000	664	0,332	0,00166	40,23
740	740000	694	0,347	0,001735	40,78
748,55	748550	723	0,3615	0,0018075	41,25
740	740000	736	0,368	0,00184	40,78
730	730000	745	0,3725	0,0018625	40,23
720	720000	754	0,377	0,001885	39,68
710	710000	762	0,381	0,001905	39,13
700	700000	771	0,3855	0,0019275	38,58
690	690000	789	0,3945	0,0019725	38,03

Grafik Modulus Elastisitas BN Sampel 5



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	36236,09 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	30589,38 MPa

Variasi BV-05 Sampel 1

I. Data Benda Uji

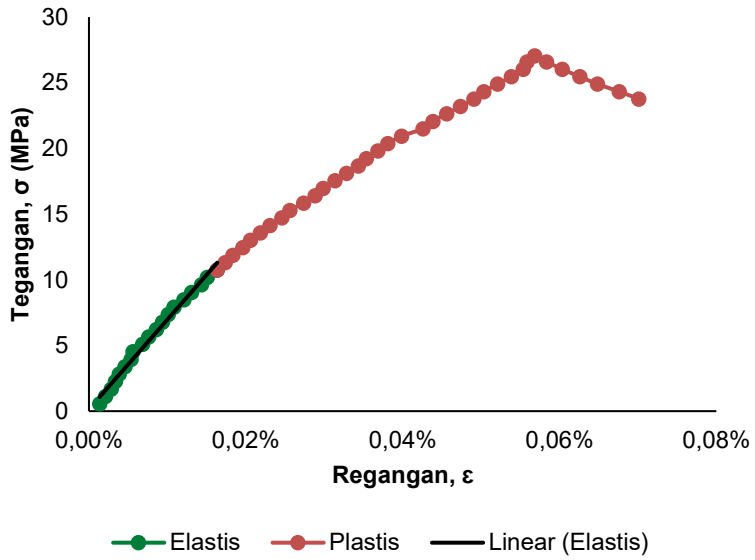
Kadar *Fly ash*	5	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	27,055	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	301	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	3	0,0015	0,0000075	0,57
20	20000	6	0,003	0,000015	1,13
30	30000	9	0	0,0000225	1,70
40	40000	11	0,0055	0,0000275	2,26
50	50000	13	0,0065	0,0000325	2,83
60	60000	16	0,008	0,00004	3,40
70	70000	19	0,0095	0,0000475	3,96
80	80000	20	0,01	0,00005	4,53
90	90000	25	0,0125	0,0000625	5,09
100	100000	28	0,014	0,00007	5,66
110	110000	32	0,016	0,00008	6,22
120	120000	35	0,0175	0,0000875	6,79
130	130000	38	0,019	0,000095	7,36
140	140000	41	0,0205	0,0001025	7,92
150	150000	46	0,023	0,000115	8,49
160	160000	50	0,025	0,000125	9,05
170	170000	55	0,0275	0,0001375	9,62
180	180000	58	0,029	0,000145	10,19
190	190000	63	0,0315	0,0001575	10,75
200	200000	67	0,0335	0,0001675	11,32
210	210000	71	0,0355	0,0001775	11,88
220	220000	76	0,038	0,00019	12,45

230	230000	80	0,04	0,0002	13,02
240	240000	85	0,0425	0,0002125	13,58
250	250000	90	0,045	0,000225	14,15
260	260000	96	0,048	0,00024	14,71
270	270000	100	0,05	0,00025	15,28
280	280000	107	0,0535	0,0002675	15,84
290	290000	113	0,0565	0,0002825	16,41
300	300000	117	0,0585	0,0002925	16,98
310	310000	123	0,0615	0,0003075	17,54
320	320000	129	0,0645	0,0003225	18,11
330	330000	135	0,0675	0,0003375	18,67
340	340000	139	0,0695	0,0003475	19,24
350	350000	145	0,0725	0,0003625	19,81
360	360000	150	0,075	0,000375	20,37
370	370000	157	0,0785	0,0003925	20,94
380	380000	168	0,084	0,00042	21,50
390	390000	173	0,0865	0,0004325	22,07
400	400000	180	0,09	0,00045	22,64
410	410000	187	0,0935	0,0004675	23,20
420	420000	194	0,097	0,000485	23,77
430	430000	199	0,0995	0,0004975	24,33
440	440000	206	0,103	0,000515	24,90
450	450000	213	0,1065	0,0005325	25,46
460	460000	219	0,1095	0,0005475	26,03
470	470000	221	0,1105	0,0005525	26,60
478,1	478100	225	0,1125	0,0005625	27,05
470	470000	231	0,1155	0,0005775	26,60
460	460000	239	0,1195	0,0005975	26,03
450	450000	248	0,124	0,00062	25,46
440	440000	257	0,1285	0,0006425	24,90
430	430000	268	0,134	0,00067	24,33
420	420000	278	0,139	0,000695	23,77

Grafik Modulus Elastisitas BV-05 Sampel 1



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	57904,43 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	24446,78 MPa

Variasi BV-05 Sampel 2

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	5	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	46,849	MPa
Diameter	151	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17907,864	mm^2

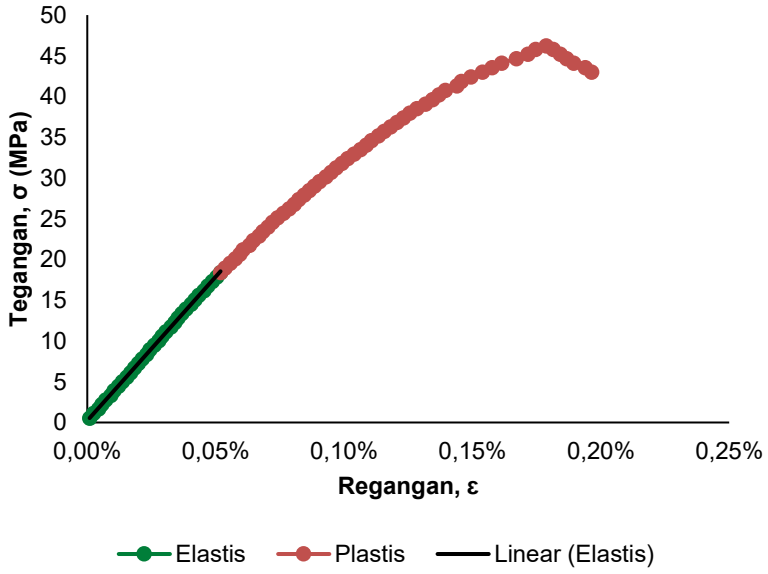
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,56
20	20000	12	0,006	0,00003	1,12
30	30000	20	0,01	0,00005	1,68
40	40000	25	0,0125	0,0000625	2,23
50	50000	31	0,0155	0,0000775	2,79
60	60000	39	0,0195	0,0000975	3,35
70	70000	44	0,022	0,00011	3,91
80	80000	51	0,0255	0,0001275	4,47
90	90000	57	0,0285	0,0001425	5,03
100	100000	64	0,032	0,00016	5,58
110	110000	70	0,035	0,000175	6,14
120	120000	76	0,038	0,00019	6,70
130	130000	82	0,041	0,000205	7,26
140	140000	88	0,044	0,00022	7,82
150	150000	95	0,0475	0,0002375	8,38
160	160000	100	0,05	0,00025	8,93
170	170000	107	0,0535	0,0002675	9,49
180	180000	114	0,057	0,000285	10,05
190	190000	119	0,0595	0,0002975	10,61
200	200000	125	0,0625	0,0003125	11,17
210	210000	133	0,0665	0,0003325	11,73
220	220000	139	0,0695	0,0003475	12,29

230	230000	144	0,072	0,00036	12,84
240	240000	150	0,075	0,000375	13,40
250	250000	156	0,078	0,00039	13,96
260	260000	164	0,082	0,00041	14,52
270	270000	170	0,085	0,000425	15,08
280	280000	176	0,088	0,00044	15,64
290	290000	184	0,092	0,00046	16,19
300	300000	190	0,095	0,000475	16,75
310	310000	197	0,0985	0,0004925	17,31
320	320000	204	0,102	0,00051	17,87
330	330000	210	0,105	0,000525	18,43
340	340000	217	0,1085	0,0005425	18,99
350	350000	225	0,1125	0,0005625	19,54
360	360000	233	0,1165	0,0005825	20,10
370	370000	240	0,12	0,0006	20,66
380	380000	245	0,1225	0,0006125	21,22
390	390000	255	0,1275	0,0006375	21,78
400	400000	261	0,1305	0,0006525	22,34
410	410000	270	0,135	0,000675	22,89
420	420000	276	0,138	0,00069	23,45
430	430000	284	0,142	0,00071	24,01
440	440000	291	0,1455	0,0007275	24,57
450	450000	299	0,1495	0,0007475	25,13
460	460000	308	0,154	0,00077	25,69
470	470000	317	0,1585	0,0007925	26,25
480	480000	325	0,1625	0,0008125	26,80
490	490000	332	0,166	0,00083	27,36
500	500000	340	0,17	0,00085	27,92
510	510000	348	0,174	0,00087	28,48
520	520000	356	0,178	0,00089	29,04
530	530000	364	0,182	0,00091	29,60
540	540000	374	0,187	0,000935	30,15
550	550000	382	0,191	0,000955	30,71
560	560000	390	0,195	0,000975	31,27
570	570000	399	0,1995	0,0009975	31,83
580	580000	408	0,204	0,00102	32,39

590	590000	418	0,209	0,001045	32,95
600	600000	428	0,214	0,00107	33,50
610	610000	437	0,2185	0,0010925	34,06
620	620000	445	0,2225	0,0011125	34,62
630	630000	456	0,228	0,00114	35,18
640	640000	465	0,2325	0,0011625	35,74
650	650000	475	0,2375	0,0011875	36,30
660	660000	485	0,2425	0,0012125	36,86
670	670000	495	0,2475	0,0012375	37,41
680	680000	505	0,2525	0,0012625	37,97
690	690000	516	0,258	0,00129	38,53
700	700000	529	0,2645	0,0013225	39,09
710	710000	540	0,27	0,00135	39,65
720	720000	550	0,275	0,001375	40,21
730	730000	560	0,28	0,0014	40,76
740	740000	578	0,289	0,001445	41,32
750	750000	585	0,2925	0,0014625	41,88
760	760000	600	0,3	0,0015	42,44
770	770000	618	0,309	0,001545	43,00
780	780000	633	0,3165	0,0015825	43,56
790	790000	648	0,324	0,00162	44,11
800	800000	671	0,3355	0,0016775	44,67
810	810000	689	0,3445	0,0017225	45,23
820	820000	701	0,3505	0,0017525	45,79
827,89	827890	717	0,3585	0,0017925	46,23
820	820000	728	0,364	0,00182	45,79
810	810000	739	0,3695	0,0018475	45,23
800	800000	749	0,3745	0,0018725	44,67
790	790000	760	0,38	0,0019	44,11
780	780000	778	0,389	0,001945	43,56
770	770000	788	0,394	0,00197	43,00

Grafik Modulus Elastisitas BV-05 Sampel 2



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	35268,25 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	32169,77 MPa

Variasi BV-05 Sampel 3

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	5	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	44,041	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	290	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

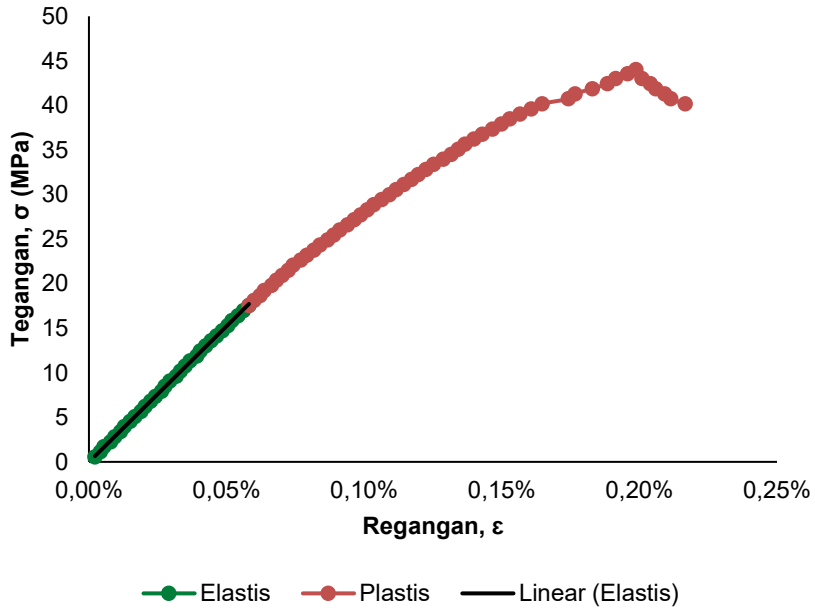
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	7	0,0035	0,0000175	0,57
20	20000	15	0,0075	0,0000375	1,13
30	30000	20	0,01	0,00005	1,70
40	40000	30	0,015	0,000075	2,26
50	50000	36	0,018	0,00009	2,83
60	60000	44	0,022	0,00011	3,40
70	70000	50	0,025	0,000125	3,96
80	80000	58	0,029	0,000145	4,53
90	90000	65	0,0325	0,0001625	5,09
100	100000	74	0,037	0,000185	5,66
110	110000	80	0,04	0,0002	6,22
120	120000	88	0,044	0,00022	6,79
130	130000	95	0,0475	0,0002375	7,36
140	140000	104	0,052	0,00026	7,92
150	150000	109	0,0545	0,0002725	8,49
160	160000	116	0,058	0,00029	9,05
170	170000	125	0,0625	0,0003125	9,62
180	180000	131	0,0655	0,0003275	10,19
190	190000	138	0,069	0,000345	10,75
200	200000	145	0,0725	0,0003625	11,32
210	210000	155	0,0775	0,0003875	11,88
220	220000	160	0,08	0,0004	12,45

230	230000	168	0,084	0,00042	13,02
240	240000	176	0,088	0,00044	13,58
250	250000	184	0,092	0,00046	14,15
260	260000	192	0,096	0,00048	14,71
270	270000	200	0,1	0,0005	15,28
280	280000	206	0,103	0,000515	15,84
290	290000	215	0,1075	0,0005375	16,41
300	300000	223	0,1115	0,0005575	16,98
310	310000	231	0,1155	0,0005775	17,54
320	320000	238	0,119	0,000595	18,11
330	330000	247	0,1235	0,0006175	18,67
340	340000	253	0,1265	0,0006325	19,24
350	350000	264	0,132	0,00066	19,81
360	360000	271	0,1355	0,0006775	20,37
370	370000	279	0,1395	0,0006975	20,94
380	380000	288	0,144	0,00072	21,50
390	390000	295	0,1475	0,0007375	22,07
400	400000	306	0,153	0,000765	22,64
410	410000	315	0,1575	0,0007875	23,20
420	420000	325	0,1625	0,0008125	23,77
430	430000	334	0,167	0,000835	24,33
440	440000	345	0,1725	0,0008625	24,90
450	450000	354	0,177	0,000885	25,46
460	460000	363	0,1815	0,0009075	26,03
470	470000	374	0,187	0,000935	26,60
480	480000	384	0,192	0,00096	27,16
490	490000	393	0,1965	0,0009825	27,73
500	500000	403	0,2015	0,0010075	28,29
510	510000	412	0,206	0,00103	28,86
520	520000	424	0,212	0,00106	29,43
530	530000	435	0,2175	0,0010875	29,99
540	540000	445	0,2225	0,0011125	30,56
550	550000	456	0,228	0,00114	31,12
560	560000	467	0,2335	0,0011675	31,69
570	570000	477	0,2385	0,0011925	32,26
580	580000	488	0,244	0,00122	32,82

590	590000	499	0,2495	0,0012475	33,39
600	600000	513	0,2565	0,0012825	33,95
610	610000	525	0,2625	0,0013125	34,52
620	620000	535	0,2675	0,0013375	35,08
630	630000	545	0,2725	0,0013625	35,65
640	640000	558	0,279	0,001395	36,22
650	650000	570	0,285	0,001425	36,78
660	660000	585	0,2925	0,0014625	37,35
670	670000	598	0,299	0,001495	37,91
680	680000	610	0,305	0,001525	38,48
690	690000	625	0,3125	0,0015625	39,05
700	700000	641	0,3205	0,0016025	39,61
710	710000	657	0,3285	0,0016425	40,18
720	720000	695	0,3475	0,0017375	40,74
730	730000	705	0,3525	0,0017625	41,31
740	740000	730	0,365	0,001825	41,88
750	750000	752	0,376	0,00188	42,44
760	760000	764	0,382	0,00191	43,01
770	770000	781	0,3905	0,0019525	43,57
778,27	778270	793	0,3965	0,0019825	44,04
760	760000	802	0,401	0,002005	43,01
750	750000	814	0,407	0,002035	42,44
740	740000	822	0,411	0,002055	41,88
730	730000	835	0,4175	0,0020875	41,31
720	720000	844	0,422	0,00211	40,74
710	710000	865	0,4325	0,0021625	40,18

Grafik Modulus Elastisitas BV-05 Sampel 3



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	30037,46 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	31190,79 MPa

Variasi BV-05 Sampel 4

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	5	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	45,749	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	290	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

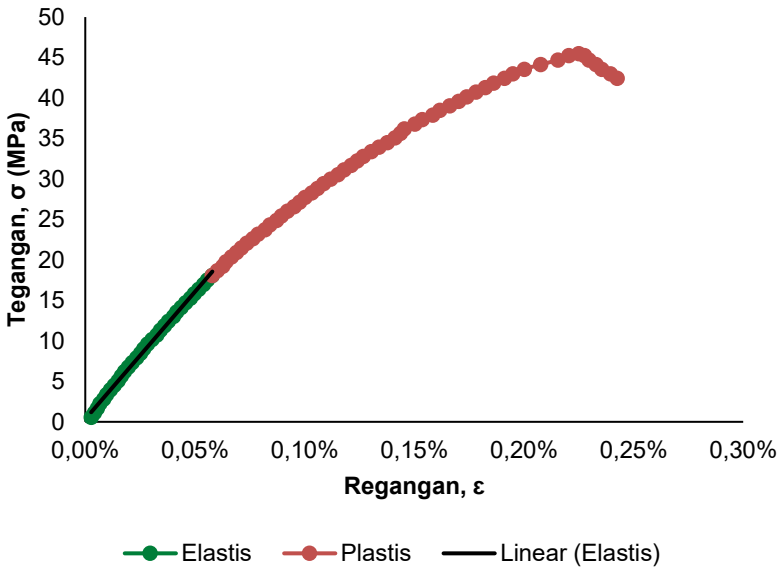
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	4	0,002	0,00001	0,57
20	20000	10	0,005	0,000025	1,13
30	30000	15	0,0075	0,0000375	1,70
40	40000	20	0,01	0,00005	2,26
50	50000	27	0,0135	0,0000675	2,83
60	60000	32	0,016	0,00008	3,40
70	70000	39	0,0195	0,0000975	3,96
80	80000	46	0,023	0,000115	4,53
90	90000	53	0,0265	0,0001325	5,09
100	100000	59	0,0295	0,0001475	5,66
110	110000	65	0,0325	0,0001625	6,22
120	120000	72	0,036	0,00018	6,79
130	130000	79	0,0395	0,0001975	7,36
140	140000	87	0,0435	0,0002175	7,92
150	150000	94	0,047	0,000235	8,49
160	160000	100	0,05	0,00025	9,05
170	170000	107	0,0535	0,0002675	9,62
180	180000	115	0,0575	0,0002875	10,19
190	190000	124	0,062	0,00031	10,75
200	200000	130	0,065	0,000325	11,32
210	210000	138	0,069	0,000345	11,88
220	220000	145	0,0725	0,0003625	12,45

230	230000	154	0,077	0,000385	13,02
240	240000	160	0,08	0,0004	13,58
250	250000	168	0,084	0,00042	14,15
260	260000	176	0,088	0,00044	14,71
270	270000	185	0,0925	0,0004625	15,28
280	280000	192	0,096	0,00048	15,84
290	290000	200	0,1	0,0005	16,41
300	300000	209	0,1045	0,0005225	16,98
310	310000	216	0,108	0,00054	17,54
320	320000	225	0,1125	0,0005625	18,11
330	330000	234	0,117	0,000585	18,67
340	340000	244	0,122	0,00061	19,24
350	350000	250	0,125	0,000625	19,81
360	360000	260	0,13	0,00065	20,37
370	370000	269	0,1345	0,0006725	20,94
380	380000	278	0,139	0,000695	21,50
390	390000	288	0,144	0,00072	22,07
400	400000	299	0,1495	0,0007475	22,64
410	410000	308	0,154	0,00077	23,20
420	420000	321	0,1605	0,0008025	23,77
430	430000	330	0,165	0,000825	24,33
440	440000	342	0,171	0,000855	24,90
450	450000	351	0,1755	0,0008775	25,46
460	460000	362	0,181	0,000905	26,03
470	470000	374	0,187	0,000935	26,60
480	480000	384	0,192	0,00096	27,16
490	490000	394	0,197	0,000985	27,73
500	500000	406	0,203	0,001015	28,29
510	510000	417	0,2085	0,0010425	28,86
520	520000	428	0,214	0,00107	29,43
530	530000	441	0,2205	0,0011025	29,99
540	540000	454	0,227	0,001135	30,56
550	550000	465	0,2325	0,0011625	31,12
560	560000	478	0,239	0,001195	31,69
570	570000	489	0,2445	0,0012225	32,26
580	580000	500	0,25	0,00125	32,82

590	590000	515	0,2575	0,0012875	33,39
600	600000	529	0,2645	0,0013225	33,95
610	610000	544	0,272	0,00136	34,52
620	620000	558	0,279	0,001395	35,08
630	630000	568	0,284	0,00142	35,65
640	640000	575	0,2875	0,0014375	36,22
650	650000	594	0,297	0,001485	36,78
660	660000	608	0,304	0,00152	37,35
670	670000	627	0,3135	0,0015675	37,91
680	680000	640	0,32	0,0016	38,48
690	690000	658	0,329	0,001645	39,05
700	700000	674	0,337	0,001685	39,61
710	710000	689	0,3445	0,0017225	40,18
720	720000	706	0,353	0,001765	40,74
730	730000	723	0,3615	0,0018075	41,31
740	740000	738	0,369	0,001845	41,88
750	750000	758	0,379	0,001895	42,44
760	760000	773	0,3865	0,0019325	43,01
770	770000	794	0,397	0,001985	43,57
780	780000	824	0,412	0,00206	44,14
790	790000	855	0,4275	0,0021375	44,70
800	800000	875	0,4375	0,0021875	45,27
803,69	803690	893	0,4465	0,0022325	45,48
800	800000	904	0,452	0,00226	45,27
790	790000	912	0,456	0,00228	44,70
780	780000	925	0,4625	0,0023125	44,14
770	770000	935	0,4675	0,0023375	43,57
760	760000	951	0,4755	0,0023775	43,01
750	750000	963	0,4815	0,0024075	42,44

Grafik Modulus Elastisitas BV-05 Sampel 4



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	30916,60 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	31789,86 MPa

Variasi BV-05 Sampel 5

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	5	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	45,780	MPa
Diameter	151	mm
Tinggi	302	mm
Luas Penampang	17907,864	mm^2

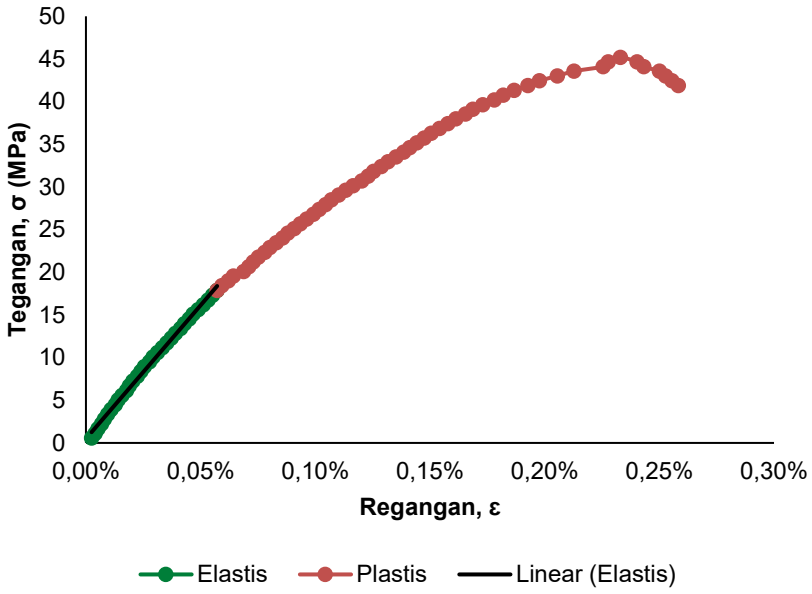
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	3	0,0015	0,0000075	0,56
20	20000	9	0,0045	0,0000225	1,12
30	30000	14	0,007	0,000035	1,68
40	40000	20	0,01	0,00005	2,23
50	50000	25	0,0125	0,0000625	2,79
60	60000	31	0,0155	0,0000775	3,35
70	70000	37	0,0185	0,0000925	3,91
80	80000	44	0,022	0,00011	4,47
90	90000	49	0,0245	0,0001225	5,03
100	100000	56	0,028	0,00014	5,58
110	110000	64	0,032	0,00016	6,14
120	120000	69	0,0345	0,0001725	6,70
130	130000	75	0,0375	0,0001875	7,26
140	140000	83	0,0415	0,0002075	7,82
150	150000	89	0,0445	0,0002225	8,38
160	160000	95	0,0475	0,0002375	8,93
170	170000	104	0,052	0,00026	9,49
180	180000	110	0,055	0,000275	10,05
190	190000	118	0,059	0,000295	10,61
200	200000	126	0,063	0,000315	11,17
210	210000	134	0,067	0,000335	11,73
220	220000	142	0,071	0,000355	12,29

230	230000	149	0,0745	0,0003725	12,84
240	240000	158	0,079	0,000395	13,40
250	250000	165	0,0825	0,0004125	13,96
260	260000	173	0,0865	0,0004325	14,52
270	270000	180	0,09	0,00045	15,08
280	280000	189	0,0945	0,0004725	15,64
290	290000	198	0,099	0,000495	16,19
300	300000	206	0,103	0,000515	16,75
310	310000	214	0,107	0,000535	17,31
320	320000	222	0,111	0,000555	17,87
330	330000	230	0,115	0,000575	18,43
340	340000	241	0,1205	0,0006025	18,99
350	350000	250	0,125	0,000625	19,54
360	360000	268	0,134	0,00067	20,10
370	370000	277	0,1385	0,0006925	20,66
380	380000	285	0,1425	0,0007125	21,22
390	390000	294	0,147	0,000735	21,78
400	400000	305	0,1525	0,0007625	22,34
410	410000	314	0,157	0,000785	22,89
420	420000	325	0,1625	0,0008125	23,45
430	430000	336	0,168	0,00084	24,01
440	440000	345	0,1725	0,0008625	24,57
450	450000	356	0,178	0,00089	25,13
460	460000	367	0,1835	0,0009175	25,69
470	470000	378	0,189	0,000945	26,25
480	480000	390	0,195	0,000975	26,80
490	490000	400	0,2	0,001	27,36
500	500000	411	0,2055	0,0010275	27,92
510	510000	421	0,2105	0,0010525	28,48
520	520000	434	0,217	0,001085	29,04
530	530000	446	0,223	0,001115	29,60
540	540000	459	0,2295	0,0011475	30,15
550	550000	474	0,237	0,001185	30,71
560	560000	485	0,2425	0,0012125	31,27
570	570000	495	0,2475	0,0012375	31,83
580	580000	508	0,254	0,00127	32,39

590	590000	520	0,26	0,0013	32,95
600	600000	534	0,267	0,001335	33,50
610	610000	547	0,2735	0,0013675	34,06
620	620000	558	0,279	0,001395	34,62
630	630000	570	0,285	0,001425	35,18
640	640000	583	0,2915	0,0014575	35,74
650	650000	595	0,2975	0,0014875	36,30
660	660000	610	0,305	0,001525	36,86
670	670000	624	0,312	0,00156	37,41
680	680000	638	0,319	0,001595	37,97
690	690000	655	0,3275	0,0016375	38,53
700	700000	668	0,334	0,00167	39,09
710	710000	685	0,3425	0,0017125	39,65
720	720000	705	0,3525	0,0017625	40,21
730	730000	721	0,3605	0,0018025	40,76
740	740000	740	0,37	0,00185	41,32
750	750000	764	0,382	0,00191	41,88
760	760000	784	0,392	0,00196	42,44
770	770000	815	0,4075	0,0020375	43,00
780	780000	844	0,422	0,00211	43,56
790	790000	895	0,4475	0,0022375	44,11
800	800000	904	0,452	0,00226	44,67
809	809000	925	0,4625	0,0023125	45,18
800	800000	954	0,477	0,002385	44,67
790	790000	966	0,483	0,002415	44,11
780	780000	993	0,4965	0,0024825	43,56
770	770000	1004	0,502	0,00251	43,00
760	760000	1015	0,5075	0,0025375	42,44
750	750000	1026	0,513	0,002565	41,88

Grafik Modulus Elastisitas BV-05 Sampel 5



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	30961,56 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	31800,63 MPa

Variasi BV-10 Sampel 1

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	10	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	44,576	MPa
Diameter	151	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17907,864	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

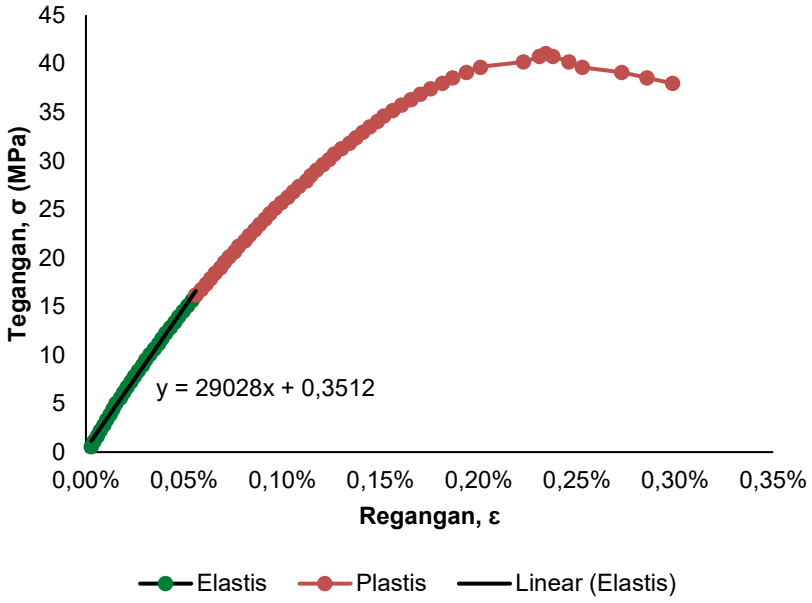
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,56
20	20000	11	0,0055	0,0000275	1,12
30	30000	17	0,0085	0,0000425	1,68
40	40000	23	0,0115	0,0000575	2,23
50	50000	30	0,015	0,000075	2,79
60	60000	36	0,018	0,00009	3,35
70	70000	43	0,0215	0,0001075	3,91
80	80000	49	0,0245	0,0001225	4,47
90	90000	55	0,0275	0,0001375	5,03
100	100000	64	0,032	0,00016	5,58
110	110000	71	0,0355	0,0001775	6,14
120	120000	78	0,039	0,000195	6,70
130	130000	86	0,043	0,000215	7,26
140	140000	93	0,0465	0,0002325	7,82
150	150000	101	0,0505	0,0002525	8,38
160	160000	109	0,0545	0,0002725	8,93
170	170000	116	0,058	0,00029	9,49

180	180000	124	0,062	0,00031	10,05
190	190000	133	0,0665	0,0003325	10,61
200	200000	142	0,071	0,000355	11,17
210	210000	149	0,0745	0,0003725	11,73
220	220000	157	0,0785	0,0003925	12,29
230	230000	166	0,083	0,000415	12,84
240	240000	175	0,0875	0,0004375	13,40
250	250000	183	0,0915	0,0004575	13,96
260	260000	192	0,096	0,00048	14,52
270	270000	201	0,1005	0,0005025	15,08
280	280000	210	0,105	0,000525	15,64
290	290000	218	0,109	0,000545	16,19
300	300000	229	0,1145	0,0005725	16,75
310	310000	239	0,1195	0,0005975	17,31
320	320000	248	0,124	0,00062	17,87
330	330000	257	0,1285	0,0006425	18,43
340	340000	268	0,134	0,00067	18,99
350	350000	276	0,138	0,00069	19,54
360	360000	286	0,143	0,000715	20,10
370	370000	297	0,1485	0,0007425	20,66
380	380000	305	0,1525	0,0007625	21,22
390	390000	318	0,159	0,000795	21,78
400	400000	327	0,1635	0,0008175	22,34
410	410000	338	0,169	0,000845	22,89

420	420000	348	0,174	0,00087	23,45
430	430000	359	0,1795	0,0008975	24,01
440	440000	369	0,1845	0,0009225	24,57
450	450000	380	0,19	0,00095	25,13
460	460000	392	0,196	0,00098	25,69
470	470000	405	0,2025	0,0010125	26,25
480	480000	416	0,208	0,00104	26,80
490	490000	428	0,214	0,00107	27,36
500	500000	443	0,2215	0,0011075	27,92
510	510000	452	0,226	0,00113	28,48
520	520000	464	0,232	0,00116	29,04
530	530000	477	0,2385	0,0011925	29,60
540	540000	489	0,2445	0,0012225	30,15
550	550000	500	0,25	0,00125	30,71
560	560000	515	0,2575	0,0012875	31,27
570	570000	531	0,2655	0,0013275	31,83
580	580000	544	0,272	0,00136	32,39
590	590000	558	0,279	0,001395	32,95
600	600000	572	0,286	0,00143	33,50
610	610000	588	0,294	0,00147	34,06
620	620000	601	0,3005	0,0015025	34,62
630	630000	619	0,3095	0,0015475	35,18
640	640000	637	0,3185	0,0015925	35,74
650	650000	656	0,328	0,00164	36,30

660	660000	675	0,3375	0,0016875	36,86
670	670000	696	0,348	0,00174	37,41
680	680000	720	0,36	0,0018	37,97
690	690000	741	0,3705	0,0018525	38,53
700	700000	769	0,3845	0,0019225	39,09
710	710000	798	0,399	0,001995	39,65
720	720000	885	0,4425	0,0022125	40,21
730	730000	918	0,459	0,002295	40,76
735,15	735150	931	0,4655	0,0023275	41,05
730	730000	945	0,4725	0,0023625	40,76
720	720000	978	0,489	0,002445	40,21
710	710000	1005	0,5025	0,0025125	39,65
700	700000	1085	0,5425	0,0027125	39,09
690	690000	1137	0,5685	0,0028425	38,53
680	680000	1189	0,5945	0,0029725	37,97

Grafik Modulus Elastisitas BV-10 Sampel 1



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	28636,61 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	31379,67 MPa

Variasi BV-10 Sampel 2

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	10	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	41,982	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	301	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

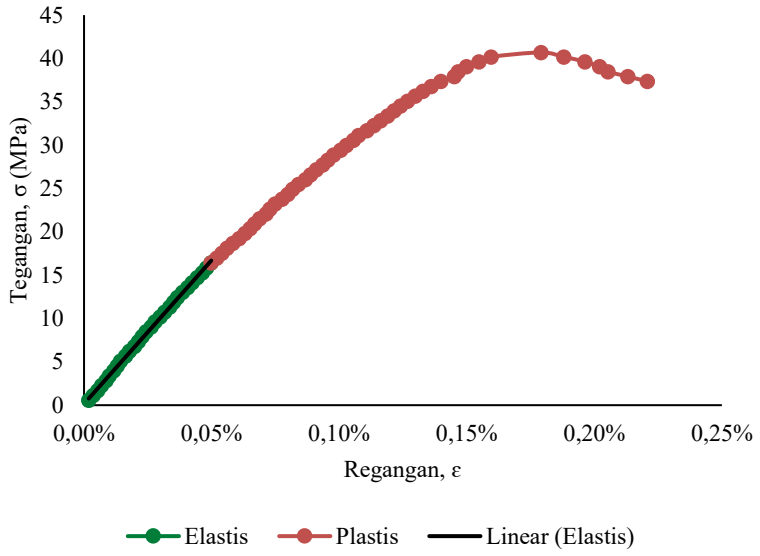
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,57
20	20000	13	0,0065	0,0000325	1,13
30	30000	20	0,01	0,00005	1,70
40	40000	26	0,013	0,000065	2,26
50	50000	33	0,0165	0,0000825	2,83
60	60000	38	0,019	0,000095	3,40
70	70000	45	0,0225	0,0001125	3,96
80	80000	51	0,0255	0,0001275	4,53
90	90000	56	0,028	0,00014	5,09
100	100000	64	0,032	0,00016	5,66
110	110000	70	0,035	0,000175	6,22
120	120000	78	0,039	0,000195	6,79
130	130000	84	0,042	0,00021	7,36
140	140000	90	0,045	0,000225	7,92
150	150000	96	0,048	0,00024	8,49
160	160000	104	0,052	0,00026	9,05
170	170000	110	0,055	0,000275	9,62

180	180000	118	0,059	0,000295	10,19
190	190000	125	0,0625	0,0003125	10,75
200	200000	133	0,0665	0,0003325	11,32
210	210000	139	0,0695	0,0003475	11,88
220	220000	145	0,0725	0,0003625	12,45
230	230000	153	0,0765	0,0003825	13,02
240	240000	161	0,0805	0,0004025	13,58
250	250000	168	0,084	0,00042	14,15
260	260000	176	0,088	0,00044	14,71
270	270000	184	0,092	0,00046	15,28
280	280000	191	0,0955	0,0004775	15,84
290	290000	198	0,099	0,000495	16,41
300	300000	207	0,1035	0,0005175	16,98
310	310000	215	0,1075	0,0005375	17,54
320	320000	223	0,1115	0,0005575	18,11
330	330000	232	0,116	0,00058	18,67
340	340000	242	0,121	0,000605	19,24
350	350000	251	0,1255	0,0006275	19,81
360	360000	259	0,1295	0,0006475	20,37
370	370000	266	0,133	0,000665	20,94
380	380000	274	0,137	0,000685	21,50
390	390000	284	0,142	0,00071	22,07
400	400000	290	0,145	0,000725	22,64
410	410000	298	0,149	0,000745	23,20

420	420000	309	0,1545	0,0007725	23,77
430	430000	318	0,159	0,000795	24,33
440	440000	326	0,163	0,000815	24,90
450	450000	335	0,1675	0,0008375	25,46
460	460000	346	0,173	0,000865	26,03
470	470000	354	0,177	0,000885	26,60
480	480000	363	0,1815	0,0009075	27,16
490	490000	373	0,1865	0,0009325	27,73
500	500000	381	0,1905	0,0009525	28,29
510	510000	390	0,195	0,000975	28,86
520	520000	401	0,2005	0,0010025	29,43
530	530000	410	0,205	0,001025	29,99
540	540000	421	0,2105	0,0010525	30,56
550	550000	429	0,2145	0,0010725	31,12
560	560000	442	0,221	0,001105	31,69
570	570000	453	0,2265	0,0011325	32,26
580	580000	464	0,232	0,00116	32,82
590	590000	475	0,2375	0,0011875	33,39
600	600000	485	0,2425	0,0012125	33,95
610	610000	495	0,2475	0,0012375	34,52
620	620000	506	0,253	0,001265	35,08
630	630000	518	0,259	0,001295	35,65
640	640000	530	0,265	0,001325	36,22
650	650000	543	0,2715	0,0013575	36,78

660	660000	558	0,279	0,001395	37,35
670	670000	579	0,2895	0,0014475	37,91
680	680000	585	0,2925	0,0014625	38,48
690	690000	598	0,299	0,001495	39,05
700	700000	618	0,309	0,001545	39,61
710	710000	637	0,3185	0,0015925	40,18
719,03	719030	715	0,3575	0,0017875	40,69
710	710000	751	0,3755	0,0018775	40,18
700	700000	784	0,392	0,00196	39,61
690	690000	807	0,4035	0,0020175	39,05
680	680000	820	0,41	0,00205	38,48
670	670000	851	0,4255	0,0021275	37,91
660	660000	882	0,441	0,002205	37,35

Grafik Modulus Elastisitas BV-10 Sampel 2



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	33062,90 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	30452,95 MPa

Variasi BV-10 Sampel 3

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	10	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	39,589	MPa
Diameter	150,5	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17789,465	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

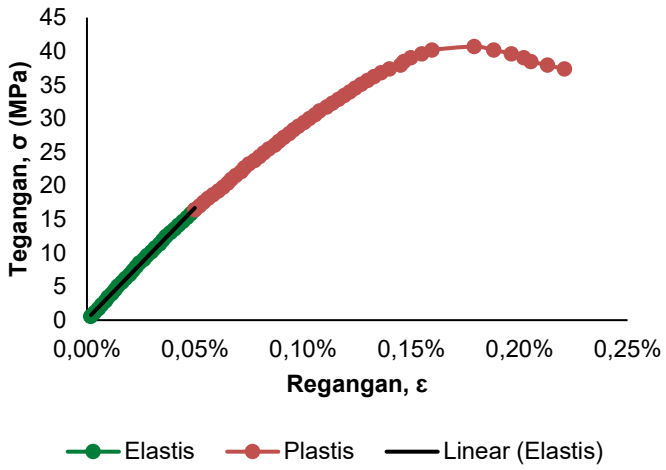
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,56
20	20000	13	0,0065	0,0000325	1,12
30	30000	22	0,011	0,000055	1,69
40	40000	31	0,0155	0,0000775	2,25
50	50000	39	0,0195	0,0000975	2,81
60	60000	48	0,024	0,00012	3,37
70	70000	57	0,0285	0,0001425	3,93
80	80000	65	0,0325	0,0001625	4,50
90	90000	75	0,0375	0,0001875	5,06
100	100000	84	0,042	0,00021	5,62
110	110000	93	0,0465	0,0002325	6,18
120	120000	102	0,051	0,000255	6,75
130	130000	109	0,0545	0,0002725	7,31
140	140000	116	0,058	0,00029	7,87
150	150000	124	0,062	0,00031	8,43
160	160000	131	0,0655	0,0003275	8,99
170	170000	139	0,0695	0,0003475	9,56

180	180000	146	0,073	0,000365	10,12
190	190000	153	0,0765	0,0003825	10,68
200	200000	161	0,0805	0,0004025	11,24
210	210000	168	0,084	0,00042	11,80
220	220000	176	0,088	0,00044	12,37
230	230000	183	0,0915	0,0004575	12,93
240	240000	190	0,095	0,000475	13,49
250	250000	198	0,099	0,000495	14,05
260	260000	205	0,1025	0,0005125	14,62
270	270000	215	0,1075	0,0005375	15,18
280	280000	223	0,1115	0,0005575	15,74
290	290000	234	0,117	0,000585	16,30
300	300000	242	0,121	0,000605	16,86
310	310000	251	0,1255	0,0006275	17,43
320	320000	262	0,131	0,000655	17,99
330	330000	273	0,1365	0,0006825	18,55
340	340000	284	0,142	0,00071	19,11
350	350000	293	0,1465	0,0007325	19,67
360	360000	303	0,1515	0,0007575	20,24
370	370000	312	0,156	0,00078	20,80
380	380000	324	0,162	0,00081	21,36
390	390000	334	0,167	0,000835	21,92
400	400000	345	0,1725	0,0008625	22,49
410	410000	355	0,1775	0,0008875	23,05

420	420000	368	0,184	0,00092	23,61
430	430000	379	0,1895	0,0009475	24,17
440	440000	390	0,195	0,000975	24,73
450	450000	404	0,202	0,00101	25,30
460	460000	418	0,209	0,001045	25,86
470	470000	432	0,216	0,00108	26,42
480	480000	446	0,223	0,001115	26,98
490	490000	461	0,2305	0,0011525	27,54
500	500000	474	0,237	0,001185	28,11
510	510000	488	0,244	0,00122	28,67
520	520000	499	0,2495	0,0012475	29,23
530	530000	516	0,258	0,00129	29,79
540	540000	530	0,265	0,001325	30,36
550	550000	546	0,273	0,001365	30,92
560	560000	561	0,2805	0,0014025	31,48
570	570000	578	0,289	0,001445	32,04
580	580000	598	0,299	0,001495	32,60
590	590000	634	0,317	0,001585	33,17
600	600000	686	0,343	0,001715	33,73
610	610000	755	0,3775	0,0018875	34,29
620	620000	766	0,383	0,001915	34,85
626,39	626390	854	0,427	0,002135	35,21
620	620000	891	0,4455	0,0022275	34,85
610	610000	922	0,461	0,002305	34,29

600	600000	958	0,479	0,002395	33,73
590	590000	984	0,492	0,00246	33,17
580	580000	1007	0,5035	0,0025175	32,60
570	570000	1039	0,5195	0,0025975	32,04

Grafik Modulus Elastisitas BV-10 Sampel 3



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	28106,52 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	29572,30 MPa

Variasi BV-10 Sampel 4

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	10	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	41,569	MPa
Diameter	149	mm
Tinggi	299	mm
Luas Penampang	17436,625	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

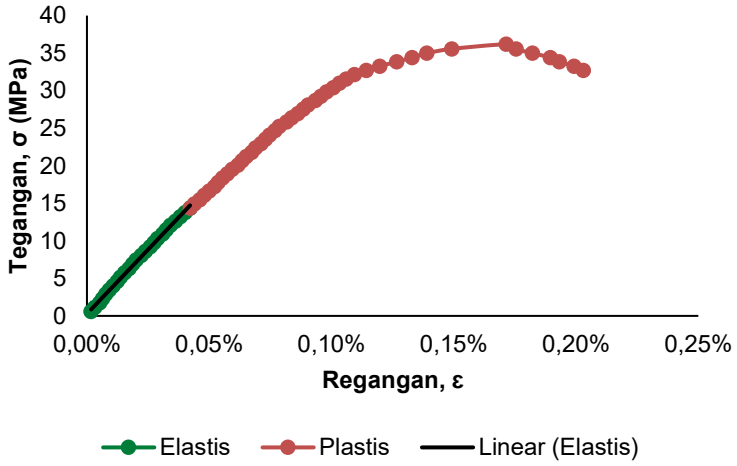
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,57
20	20000	12	0,006	0,00003	1,15
30	30000	20	0,01	0,00005	1,72
40	40000	25	0,0125	0,0000625	2,29
50	50000	30	0,015	0,000075	2,87
60	60000	36	0,018	0,00009	3,44
70	70000	42	0,021	0,000105	4,01
80	80000	49	0,0245	0,0001225	4,59
90	90000	54	0,027	0,000135	5,16
100	100000	61	0,0305	0,0001525	5,74
110	110000	68	0,034	0,00017	6,31
120	120000	74	0,037	0,000185	6,88
130	130000	80	0,04	0,0002	7,46
140	140000	88	0,044	0,00022	8,03
150	150000	95	0,0475	0,0002375	8,60
160	160000	103	0,0515	0,0002575	9,18
170	170000	109	0,0545	0,0002725	9,75

180	180000	115	0,0575	0,0002875	10,32
190	190000	123	0,0615	0,0003075	10,90
200	200000	129	0,0645	0,0003225	11,47
210	210000	136	0,068	0,00034	12,04
220	220000	144	0,072	0,00036	12,62
230	230000	152	0,076	0,00038	13,19
240	240000	160	0,08	0,0004	13,76
250	250000	168	0,084	0,00042	14,34
260	260000	175	0,0875	0,0004375	14,91
270	270000	184	0,092	0,00046	15,48
280	280000	191	0,0955	0,0004775	16,06
290	290000	199	0,0995	0,0004975	16,63
300	300000	208	0,104	0,00052	17,21
310	310000	214	0,107	0,000535	17,78
320	320000	221	0,1105	0,0005525	18,35
330	330000	229	0,1145	0,0005725	18,93
340	340000	237	0,1185	0,0005925	19,50
350	350000	246	0,123	0,000615	20,07
360	360000	253	0,1265	0,0006325	20,65
370	370000	260	0,13	0,00065	21,22
380	380000	269	0,1345	0,0006725	21,79
390	390000	275	0,1375	0,0006875	22,37
400	400000	284	0,142	0,00071	22,94
410	410000	291	0,1455	0,0007275	23,51

420	420000	298	0,149	0,000745	24,09
430	430000	307	0,1535	0,0007675	24,66
440	440000	314	0,157	0,000785	25,23
450	450000	326	0,163	0,000815	25,81
460	460000	334	0,167	0,000835	26,38
470	470000	344	0,172	0,00086	26,95
480	480000	353	0,1765	0,0008825	27,53
490	490000	361	0,1805	0,0009025	28,10
500	500000	373	0,1865	0,0009325	28,68
510	510000	382	0,191	0,000955	29,25
520	520000	391	0,1955	0,0009775	29,82
530	530000	402	0,201	0,001005	30,40
540	540000	412	0,206	0,00103	30,97
550	550000	423	0,2115	0,0010575	31,54
560	560000	437	0,2185	0,0010925	32,12
570	570000	456	0,228	0,00114	32,69
580	580000	478	0,239	0,001195	33,26
590	590000	506	0,253	0,001265	33,84
600	600000	531	0,2655	0,0013275	34,41
610	610000	555	0,2775	0,0013875	34,98
620	620000	596	0,298	0,00149	35,56
630,69	630690	685	0,3425	0,0017125	36,17
620	620000	701	0,3505	0,0017525	35,56
610	610000	728	0,364	0,00182	34,98

600	600000	757	0,3785	0,0018925	34,41
590	590000	772	0,386	0,00193	33,84
580	580000	796	0,398	0,00199	33,26
570	570000	811	0,4055	0,0020275	32,69

Grafik Modulus Elastisitas BV-10 Sampel 4



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	34100,33 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	30302,79 MPa

Variasi BV-10 Sampel 5

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	10	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	42,785	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

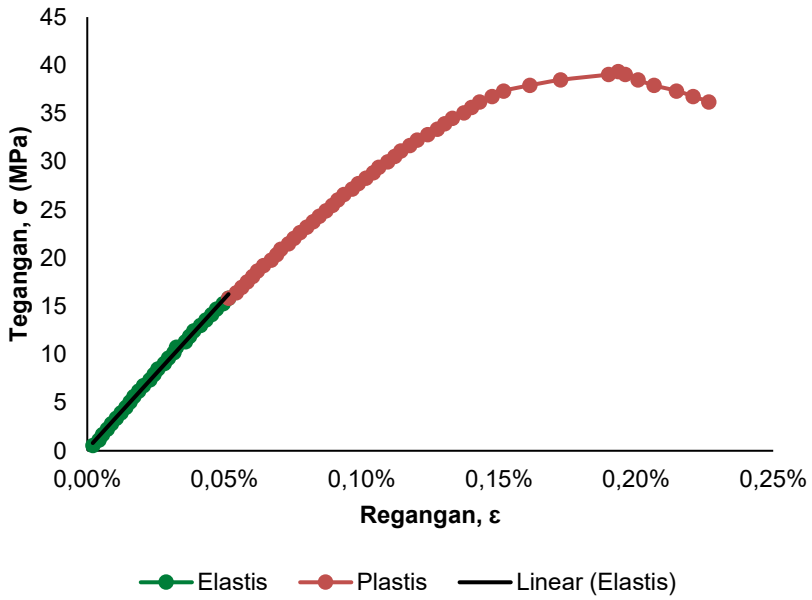
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,57
20	20000	15	0,0075	0,0000375	1,13
30	30000	20	0,01	0,00005	1,70
40	40000	27	0,0135	0,0000675	2,26
50	50000	33	0,0165	0,0000825	2,83
60	60000	40	0,02	0,0001	3,40
70	70000	47	0,0235	0,0001175	3,96
80	80000	54	0,027	0,000135	4,53
90	90000	60	0,03	0,00015	5,09
100	100000	66	0,033	0,000165	5,66
110	110000	73	0,0365	0,0001825	6,22
120	120000	80	0,04	0,0002	6,79
130	130000	89	0,0445	0,0002225	7,36
140	140000	95	0,0475	0,0002375	7,92
150	150000	101	0,0505	0,0002525	8,49
160	160000	110	0,055	0,000275	9,05
170	170000	116	0,058	0,00029	9,62

180	180000	124	0,062	0,00031	10,19
190	190000	128	0,064	0,00032	10,75
200	200000	141	0,0705	0,0003525	11,32
210	210000	147	0,0735	0,0003675	11,88
220	220000	153	0,0765	0,0003825	12,45
230	230000	163	0,0815	0,0004075	13,02
240	240000	171	0,0855	0,0004275	13,58
250	250000	179	0,0895	0,0004475	14,15
260	260000	186	0,093	0,000465	14,71
270	270000	196	0,098	0,00049	15,28
280	280000	204	0,102	0,00051	15,84
290	290000	215	0,1075	0,0005375	16,41
300	300000	223	0,1115	0,0005575	16,98
310	310000	231	0,1155	0,0005775	17,54
320	320000	239	0,1195	0,0005975	18,11
330	330000	246	0,123	0,000615	18,67
340	340000	255	0,1275	0,0006375	19,24
350	350000	266	0,133	0,000665	19,81
360	360000	274	0,137	0,000685	20,37
370	370000	280	0,14	0,0007	20,94
380	380000	291	0,1455	0,0007275	21,50
390	390000	299	0,1495	0,0007475	22,07
400	400000	308	0,154	0,00077	22,64
410	410000	318	0,159	0,000795	23,20

420	420000	327	0,1635	0,0008175	23,77
430	430000	336	0,168	0,00084	24,33
440	440000	346	0,173	0,000865	24,90
450	450000	355	0,1775	0,0008875	25,46
460	460000	363	0,1815	0,0009075	26,03
470	470000	372	0,186	0,00093	26,60
480	480000	384	0,192	0,00096	27,16
490	490000	393	0,1965	0,0009825	27,73
500	500000	404	0,202	0,00101	28,29
510	510000	415	0,2075	0,0010375	28,86
520	520000	423	0,2115	0,0010575	29,43
530	530000	436	0,218	0,00109	29,99
540	540000	446	0,223	0,001115	30,56
550	550000	455	0,2275	0,0011375	31,12
560	560000	468	0,234	0,00117	31,69
570	570000	479	0,2395	0,0011975	32,26
580	580000	494	0,247	0,001235	32,82
590	590000	508	0,254	0,00127	33,39
600	600000	519	0,2595	0,0012975	33,95
610	610000	530	0,265	0,001325	34,52
620	620000	547	0,2735	0,0013675	35,08
630	630000	558	0,279	0,001395	35,65
640	640000	570	0,285	0,001425	36,22
650	650000	588	0,294	0,00147	36,78

660	660000	605	0,3025	0,0015125	37,35
670	670000	643	0,3215	0,0016075	37,91
680	680000	688	0,344	0,00172	38,48
690	690000	758	0,379	0,001895	39,05
695,26	695260	772	0,386	0,00193	39,34
690	690000	782	0,391	0,001955	39,05
680	680000	801	0,4005	0,0020025	38,48
670	670000	824	0,412	0,00206	37,91
660	660000	857	0,4285	0,0021425	37,35
650	650000	881	0,4405	0,0022025	36,78
640	640000	904	0,452	0,00226	36,22

Grafik Modulus Elastisitas BV-10 Sampel 5



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	30754,58 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	30742,81 MPa

Variasi BV-15 Sampel 1

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	15	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	48,254	MPa
Diameter	149	mm
Tinggi	301	mm
Luas Penampang	17436,625	mm^2

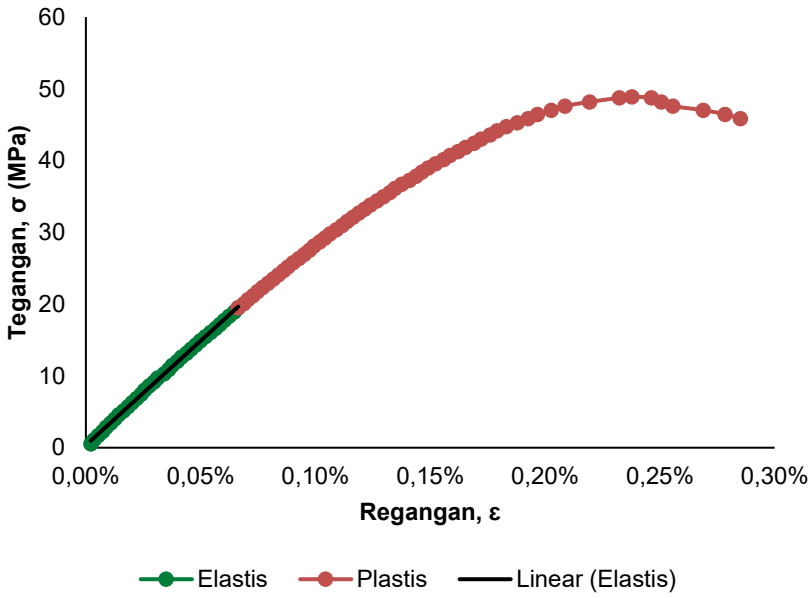
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	7	0,0035	0,0000175	0,57
20	20000	13	0,0065	0,0000325	1,15
30	30000	20	0,01	0,00005	1,72
40	40000	28	0,014	0,00007	2,29
50	50000	34	0,017	0,000085	2,87
60	60000	42	0,021	0,000105	3,44
70	70000	49	0,0245	0,0001225	4,01
80	80000	56	0,028	0,00014	4,59
90	90000	64	0,032	0,00016	5,16
100	100000	72	0,036	0,00018	5,74
110	110000	79	0,0395	0,0001975	6,31
120	120000	87	0,0435	0,0002175	6,88
130	130000	95	0,0475	0,0002375	7,46
140	140000	101	0,0505	0,0002525	8,03
150	150000	109	0,0545	0,0002725	8,60
160	160000	117	0,0585	0,0002925	9,18
170	170000	124	0,062	0,00031	9,75
180	180000	135	0,0675	0,0003375	10,32
190	190000	143	0,0715	0,0003575	10,90
200	200000	149	0,0745	0,0003725	11,47
210	210000	158	0,079	0,000395	12,04
220	220000	165	0,0825	0,0004125	12,62

230	230000	174	0,087	0,000435	13,19
240	240000	182	0,091	0,000455	13,76
250	250000	190	0,095	0,000475	14,34
260	260000	198	0,099	0,000495	14,91
270	270000	207	0,1035	0,0005175	15,48
280	280000	216	0,108	0,00054	16,06
290	290000	225	0,1125	0,0005625	16,63
300	300000	232	0,116	0,00058	17,21
310	310000	240	0,12	0,0006	17,78
320	320000	248	0,124	0,00062	18,35
330	330000	257	0,1285	0,0006425	18,93
340	340000	264	0,132	0,00066	19,50
350	350000	274	0,137	0,000685	20,07
360	360000	281	0,1405	0,0007025	20,65
370	370000	290	0,145	0,000725	21,22
380	380000	298	0,149	0,000745	21,79
390	390000	307	0,1535	0,0007675	22,37
400	400000	316	0,158	0,00079	22,94
410	410000	325	0,1625	0,0008125	23,51
420	420000	334	0,167	0,000835	24,09
430	430000	343	0,1715	0,0008575	24,66
440	440000	351	0,1755	0,0008775	25,23
450	450000	360	0,18	0,0009	25,81
460	460000	370	0,185	0,000925	26,38
470	470000	379	0,1895	0,0009475	26,95
480	480000	388	0,194	0,00097	27,53
490	490000	396	0,198	0,00099	28,10
500	500000	406	0,203	0,001015	28,68
510	510000	415	0,2075	0,0010375	29,25
520	520000	424	0,212	0,00106	29,82
530	530000	435	0,2175	0,0010875	30,40
540	540000	445	0,2225	0,0011125	30,97
550	550000	454	0,227	0,001135	31,54
560	560000	464	0,232	0,00116	32,12
570	570000	474	0,237	0,001185	32,69
580	580000	484	0,242	0,00121	33,26

590	590000	494	0,247	0,001235	33,84
600	600000	506	0,253	0,001265	34,41
610	610000	517	0,2585	0,0012925	34,98
620	620000	528	0,264	0,00132	35,56
630	630000	537	0,2685	0,0013425	36,13
640	640000	549	0,2745	0,0013725	36,70
650	650000	562	0,281	0,001405	37,28
660	660000	574	0,287	0,001435	37,85
670	670000	584	0,292	0,00146	38,42
680	680000	595	0,2975	0,0014875	39,00
690	690000	608	0,304	0,00152	39,57
700	700000	622	0,311	0,001555	40,15
710	710000	633	0,3165	0,0015825	40,72
720	720000	647	0,3235	0,0016175	41,29
730	730000	660	0,33	0,00165	41,87
740	740000	675	0,3375	0,0016875	42,44
750	750000	687	0,3435	0,0017175	43,01
760	760000	703	0,3515	0,0017575	43,59
770	770000	715	0,3575	0,0017875	44,16
780	780000	731	0,3655	0,0018275	44,73
790	790000	750	0,375	0,001875	45,31
800	800000	769	0,3845	0,0019225	45,88
810	810000	785	0,3925	0,0019625	46,45
820	820000	809	0,4045	0,0020225	47,03
830	830000	833	0,4165	0,0020825	47,60
840	840000	876	0,438	0,00219	48,17
850	850000	928	0,464	0,00232	48,75
852,72	852720	950	0,475	0,002375	48,90
850	850000	984	0,492	0,00246	48,75
840	840000	1001	0,5005	0,0025025	48,17
830	830000	1021	0,5105	0,0025525	47,60
820	820000	1074	0,537	0,002685	47,03
810	810000	1112	0,556	0,00278	46,45
800	800000	1139	0,5695	0,0028475	45,88

Grafik Modulus Elastisitas BV-15 Sampel 1



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	29145,36 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	32648,60 MPa

Variasi BV-15 Sampel 2

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	15	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	50,298	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	301	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

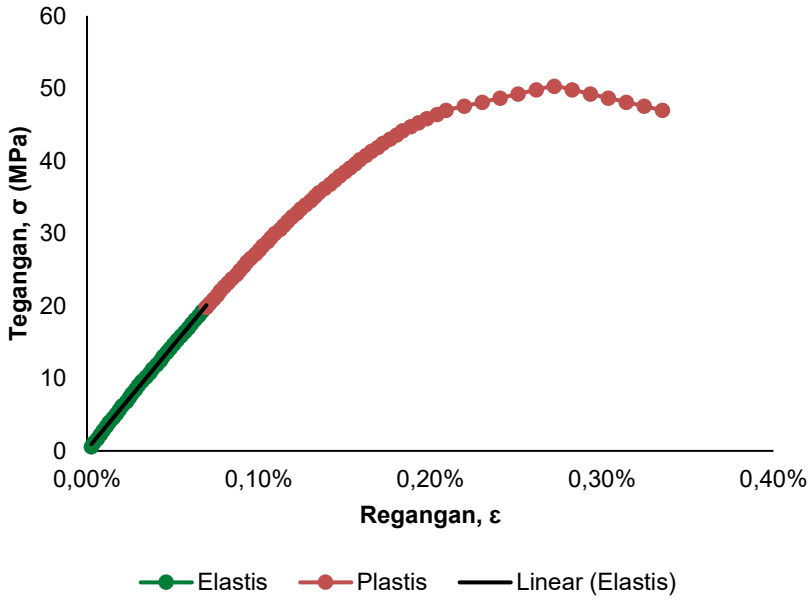
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,57
20	20000	12	0,006	0,00003	1,13
30	30000	20	0,01	0,00005	1,70
40	40000	27	0,0135	0,0000675	2,26
50	50000	34	0,017	0,000085	2,83
60	60000	41	0,0205	0,0001025	3,40
70	70000	48	0,024	0,00012	3,96
80	80000	57	0,0285	0,0001425	4,53
90	90000	64	0,032	0,00016	5,09
100	100000	71	0,0355	0,0001775	5,66
110	110000	78	0,039	0,000195	6,22
120	120000	88	0,044	0,00022	6,79
130	130000	95	0,0475	0,0002375	7,36
140	140000	101	0,0505	0,0002525	7,92
150	150000	109	0,0545	0,0002725	8,49
160	160000	116	0,058	0,00029	9,05
170	170000	124	0,062	0,00031	9,62
180	180000	134	0,067	0,000335	10,19
190	190000	143	0,0715	0,0003575	10,75
200	200000	149	0,0745	0,0003725	11,32
210	210000	158	0,079	0,000395	11,88
220	220000	167	0,0835	0,0004175	12,45

230	230000	173	0,0865	0,0004325	13,02
240	240000	182	0,091	0,000455	13,58
250	250000	190	0,095	0,000475	14,15
260	260000	198	0,099	0,000495	14,71
270	270000	206	0,103	0,000515	15,28
280	280000	215	0,1075	0,0005375	15,84
290	290000	224	0,112	0,00056	16,41
300	300000	232	0,116	0,00058	16,98
310	310000	240	0,12	0,0006	17,54
320	320000	248	0,124	0,00062	18,11
330	330000	257	0,1285	0,0006425	18,67
340	340000	264	0,132	0,00066	19,24
350	350000	274	0,137	0,000685	19,81
360	360000	282	0,141	0,000705	20,37
370	370000	291	0,1455	0,0007275	20,94
380	380000	300	0,15	0,00075	21,50
390	390000	307	0,1535	0,0007675	22,07
400	400000	316	0,158	0,00079	22,64
410	410000	325	0,1625	0,0008125	23,20
420	420000	334	0,167	0,000835	23,77
430	430000	345	0,1725	0,0008625	24,33
440	440000	352	0,176	0,00088	24,90
450	450000	361	0,1805	0,0009025	25,46
460	460000	369	0,1845	0,0009225	26,03
470	470000	378	0,189	0,000945	26,60
480	480000	389	0,1945	0,0009725	27,16
490	490000	398	0,199	0,000995	27,73
500	500000	406	0,203	0,001015	28,29
510	510000	417	0,2085	0,0010425	28,86
520	520000	425	0,2125	0,0010625	29,43
530	530000	434	0,217	0,001085	29,99
540	540000	446	0,223	0,001115	30,56
550	550000	455	0,2275	0,0011375	31,12
560	560000	464	0,232	0,00116	31,69
570	570000	474	0,237	0,001185	32,26
580	580000	485	0,2425	0,0012125	32,82

590	590000	494	0,247	0,001235	33,39
600	600000	506	0,253	0,001265	33,95
610	610000	518	0,259	0,001295	34,52
620	620000	528	0,264	0,00132	35,08
630	630000	537	0,2685	0,0013425	35,65
640	640000	550	0,275	0,001375	36,22
650	650000	563	0,2815	0,0014075	36,78
660	660000	574	0,287	0,001435	37,35
670	670000	585	0,2925	0,0014625	37,91
680	680000	598	0,299	0,001495	38,48
690	690000	609	0,3045	0,0015225	39,05
700	700000	622	0,311	0,001555	39,61
710	710000	632	0,316	0,00158	40,18
720	720000	646	0,323	0,001615	40,74
730	730000	659	0,3295	0,0016475	41,31
740	740000	674	0,337	0,001685	41,88
750	750000	686	0,343	0,001715	42,44
760	760000	702	0,351	0,001755	43,01
770	770000	718	0,359	0,001795	43,57
780	780000	731	0,3655	0,0018275	44,14
790	790000	751	0,3755	0,0018775	44,70
800	800000	769	0,3845	0,0019225	45,27
810	810000	788	0,394	0,00197	45,84
820	820000	812	0,406	0,00203	46,40
830	830000	833	0,4165	0,0020825	46,97
840	840000	875	0,4375	0,0021875	47,53
850	850000	917	0,4585	0,0022925	48,10
860	860000	959	0,4795	0,0023975	48,67
870	870000	1001	0,5005	0,0025025	49,23
880	880000	1043	0,5215	0,0026075	49,80
888,84	888840	1085	0,5425	0,0027125	50,30
880	880000	1127	0,5635	0,0028175	49,80
870	870000	1169	0,5845	0,0029225	49,23
860	860000	1211	0,6055	0,0030275	48,67
850	850000	1253	0,6265	0,0031325	48,10
840	840000	1295	0,6475	0,0032375	47,53

830	830000	1337	0,6685	0,0033425	46,97

Grafik Modulus Elastisitas BV-15 Sampel 2



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	28517,00 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	33332,91 MPa

Variasi BV-15 Sampel 3

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	15	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	36,561	MPa
Diameter	151	mm
Tinggi	299	mm
Luas Penampang	17907,864	mm^2

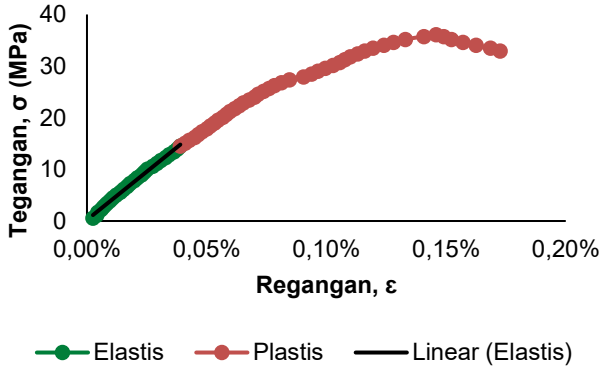
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	3	0,0015	0,0000075	0,56
20	20000	9	0,0045	0,0000225	1,12
30	30000	11	0,0055	0,0000275	1,68
40	40000	17	0,0085	0,0000425	2,23
50	50000	21	0,0105	0,0000525	2,79
60	60000	26	0,013	0,000065	3,35
70	70000	31	0,0155	0,0000775	3,91
80	80000	36	0,018	0,00009	4,47
90	90000	42	0,021	0,000105	5,03
100	100000	49	0,0245	0,0001225	5,58
110	110000	54	0,027	0,000135	6,14
120	120000	60	0,03	0,00015	6,70
130	130000	65	0,0325	0,0001625	7,26
140	140000	72	0,036	0,00018	7,82
150	150000	77	0,0385	0,0001925	8,38
160	160000	84	0,042	0,00021	8,93
170	170000	89	0,0445	0,0002225	9,49
180	180000	94	0,047	0,000235	10,05
190	190000	103	0,0515	0,0002575	10,61
200	200000	110	0,055	0,000275	11,17
210	210000	116	0,058	0,00029	11,73
220	220000	124	0,062	0,00031	12,29

230	230000	130	0,065	0,000325	12,84
240	240000	138	0,069	0,000345	13,40
250	250000	144	0,072	0,00036	13,96
260	260000	149	0,0745	0,0003725	14,52
270	270000	157	0,0785	0,0003925	15,08
280	280000	164	0,082	0,00041	15,64
290	290000	173	0,0865	0,0004325	16,19
300	300000	179	0,0895	0,0004475	16,75
310	310000	185	0,0925	0,0004625	17,31
320	320000	193	0,0965	0,0004825	17,87
330	330000	199	0,0995	0,0004975	18,43
340	340000	206	0,103	0,000515	18,99
350	350000	212	0,106	0,00053	19,54
360	360000	220	0,11	0,00055	20,10
370	370000	226	0,113	0,000565	20,66
380	380000	232	0,116	0,00058	21,22
390	390000	240	0,12	0,0006	21,78
400	400000	247	0,1235	0,0006175	22,34
410	410000	254	0,127	0,000635	22,89
420	420000	264	0,132	0,00066	23,45
430	430000	273	0,1365	0,0006825	24,01
440	440000	279	0,1395	0,0006975	24,57
450	450000	288	0,144	0,00072	25,13
460	460000	297	0,1485	0,0007425	25,69
470	470000	306	0,153	0,000765	26,25
480	480000	318	0,159	0,000795	26,80
490	490000	331	0,1655	0,0008275	27,36
500	500000	355	0,1775	0,0008875	27,92
510	510000	368	0,184	0,00092	28,48
520	520000	379	0,1895	0,0009475	29,04
530	530000	391	0,1955	0,0009775	29,60
540	540000	404	0,202	0,00101	30,15
550	550000	415	0,2075	0,0010375	30,71
560	560000	424	0,212	0,00106	31,27
570	570000	433	0,2165	0,0010825	31,83
580	580000	445	0,2225	0,0011125	32,39

590	590000	457	0,2285	0,0011425	32,95
600	600000	471	0,2355	0,0011775	33,50
610	610000	489	0,2445	0,0012225	34,06
620	620000	505	0,2525	0,0012625	34,62
630	630000	525	0,2625	0,0013125	35,18
640	640000	556	0,278	0,00139	35,74
646,08	646080	576	0,288	0,00144	36,08
640	640000	589	0,2945	0,0014725	35,74
630	630000	602	0,301	0,001505	35,18
620	620000	621	0,3105	0,0015525	34,62
610	610000	643	0,3215	0,0016075	34,06
600	600000	667	0,3335	0,0016675	33,50
590	590000	683	0,3415	0,0017075	32,95

Grafik Modulus Elastisitas BV-15 Sampel 3



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	36645,91 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	28418,88 MPa

Variasi BV-15 Sampel 4

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	15	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	50,017	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

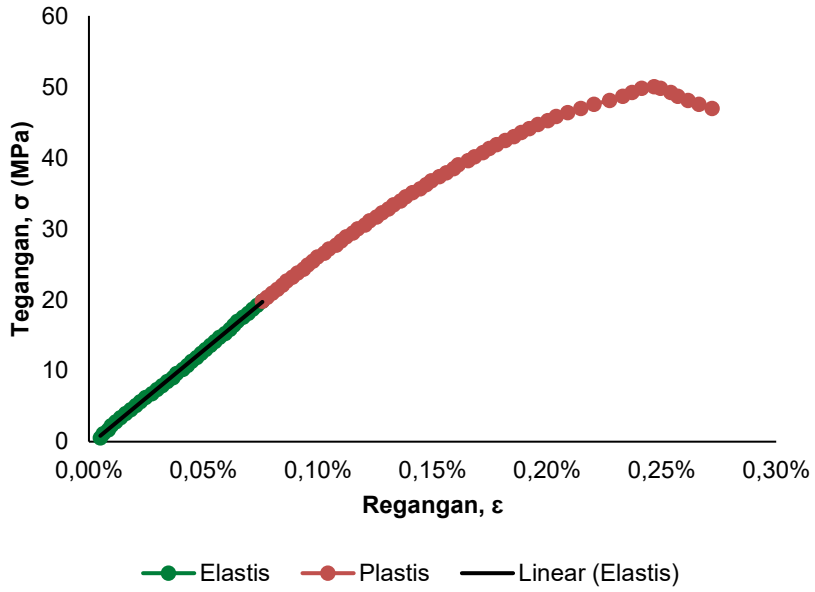
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,57
20	20000	11	0,0055	0,0000275	1,13
30	30000	20	0,01	0,00005	1,70
40	40000	25	0,0125	0,0000625	2,26
50	50000	33	0,0165	0,0000825	2,83
60	60000	41	0,0205	0,0001025	3,40
70	70000	50	0,025	0,000125	3,96
80	80000	59	0,0295	0,0001475	4,53
90	90000	68	0,034	0,00017	5,09
100	100000	76	0,038	0,00019	5,66
110	110000	85	0,0425	0,0002125	6,22
120	120000	96	0,048	0,00024	6,79
130	130000	105	0,0525	0,0002625	7,36
140	140000	114	0,057	0,000285	7,92
150	150000	123	0,0615	0,0003075	8,49
160	160000	133	0,0665	0,0003325	9,05
170	170000	139	0,0695	0,0003475	9,62
180	180000	150	0,075	0,000375	10,19
190	190000	158	0,079	0,000395	10,75
200	200000	165	0,0825	0,0004125	11,32
210	210000	174	0,087	0,000435	11,88
220	220000	182	0,091	0,000455	12,45

230	230000	190	0,095	0,000475	13,02
240	240000	198	0,099	0,000495	13,58
250	250000	206	0,103	0,000515	14,15
260	260000	214	0,107	0,000535	14,71
270	270000	224	0,112	0,00056	15,28
280	280000	232	0,116	0,00058	15,84
290	290000	239	0,1195	0,0005975	16,41
300	300000	245	0,1225	0,0006125	16,98
310	310000	255	0,1275	0,0006375	17,54
320	320000	264	0,132	0,00066	18,11
330	330000	272	0,136	0,00068	18,67
340	340000	280	0,14	0,0007	19,24
350	350000	289	0,1445	0,0007225	19,81
360	360000	297	0,1485	0,0007425	20,37
370	370000	306	0,153	0,000765	20,94
380	380000	315	0,1575	0,0007875	21,50
390	390000	324	0,162	0,00081	22,07
400	400000	331	0,1655	0,0008275	22,64
410	410000	341	0,1705	0,0008525	23,20
420	420000	350	0,175	0,000875	23,77
430	430000	361	0,1805	0,0009025	24,33
440	440000	368	0,184	0,00092	24,90
450	450000	377	0,1885	0,0009425	25,46
460	460000	385	0,1925	0,0009625	26,03
470	470000	397	0,1985	0,0009925	26,60
480	480000	405	0,2025	0,0010125	27,16
490	490000	418	0,209	0,001045	27,73
500	500000	426	0,213	0,001065	28,29
510	510000	435	0,2175	0,0010875	28,86
520	520000	447	0,2235	0,0011175	29,43
530	530000	455	0,2275	0,0011375	29,99
540	540000	468	0,234	0,00117	30,56
550	550000	476	0,238	0,00119	31,12
560	560000	488	0,244	0,00122	31,69
570	570000	498	0,249	0,001245	32,26
580	580000	509	0,2545	0,0012725	32,82

590	590000	518	0,259	0,001295	33,39
600	600000	530	0,265	0,001325	33,95
610	610000	539	0,2695	0,0013475	34,52
620	620000	551	0,2755	0,0013775	35,08
630	630000	564	0,282	0,00141	35,65
640	640000	575	0,2875	0,0014375	36,22
650	650000	584	0,292	0,00146	36,78
660	660000	598	0,299	0,001495	37,35
670	670000	610	0,305	0,001525	37,91
680	680000	623	0,3115	0,0015575	38,48
690	690000	631	0,3155	0,0015775	39,05
700	700000	648	0,324	0,00162	39,61
710	710000	659	0,3295	0,0016475	40,18
720	720000	674	0,337	0,001685	40,74
730	730000	685	0,3425	0,0017125	41,31
740	740000	698	0,349	0,001745	41,88
750	750000	713	0,3565	0,0017825	42,44
760	760000	728	0,364	0,00182	43,01
770	770000	741	0,3705	0,0018525	43,57
780	780000	755	0,3775	0,0018875	44,14
790	790000	770	0,385	0,001925	44,70
800	800000	787	0,3935	0,0019675	45,27
810	810000	802	0,401	0,002005	45,84
820	820000	822	0,411	0,002055	46,40
830	830000	845	0,4225	0,0021125	46,97
840	840000	868	0,434	0,00217	47,53
850	850000	895	0,4475	0,0022375	48,10
860	860000	918	0,459	0,002295	48,67
870	870000	934	0,467	0,002335	49,23
880	880000	951	0,4755	0,0023775	49,80
883,88	883880	973	0,4865	0,0024325	50,02
880	880000	984	0,492	0,00246	49,80
870	870000	1002	0,501	0,002505	49,23
860	860000	1014	0,507	0,002535	48,67
850	850000	1032	0,516	0,00258	48,10
840	840000	1051	0,5255	0,0026275	47,53

830	830000	1074	0,537	0,002685	46,97

Grafik Modulus Elastisitas BV-15 Sampel 4



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	26926,83 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	33239,67 MPa

Variasi BV-15 Sampel 5

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	15	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	36,007	MPa
Diameter	151	mm
Tinggi	300,5	mm
Luas Penampang	17907,864	mm^2

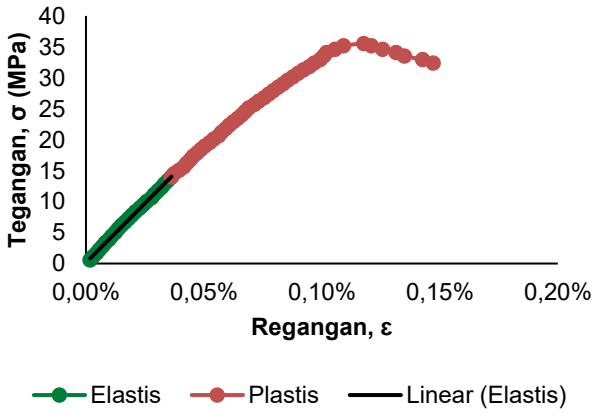
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,56
20	20000	10	0,005	0,000025	1,12
30	30000	16	0,008	0,00004	1,68
40	40000	21	0,0105	0,0000525	2,23
50	50000	26	0,013	0,000065	2,79
60	60000	31	0,0155	0,0000775	3,35
70	70000	37	0,0185	0,0000925	3,91
80	80000	42	0,021	0,000105	4,47
90	90000	48	0,024	0,00012	5,03
100	100000	53	0,0265	0,0001325	5,58
110	110000	58	0,029	0,000145	6,14
120	120000	64	0,032	0,00016	6,70
130	130000	70	0,035	0,000175	7,26
140	140000	76	0,038	0,00019	7,82
150	150000	82	0,041	0,000205	8,38
160	160000	89	0,0445	0,0002225	8,93
170	170000	95	0,0475	0,0002375	9,49
180	180000	101	0,0505	0,0002525	10,05
190	190000	109	0,0545	0,0002725	10,61
200	200000	114	0,057	0,000285	11,17
210	210000	120	0,06	0,0003	11,73
220	220000	126	0,063	0,000315	12,29

230	230000	131	0,0655	0,0003275	12,84
240	240000	137	0,0685	0,0003425	13,40
250	250000	143	0,0715	0,0003575	13,96
260	260000	148	0,074	0,00037	14,52
270	270000	156	0,078	0,00039	15,08
280	280000	164	0,082	0,00041	15,64
290	290000	169	0,0845	0,0004225	16,19
300	300000	175	0,0875	0,0004375	16,75
310	310000	180	0,09	0,00045	17,31
320	320000	186	0,093	0,000465	17,87
330	330000	193	0,0965	0,0004825	18,43
340	340000	200	0,1	0,0005	18,99
350	350000	208	0,104	0,00052	19,54
360	360000	215	0,1075	0,0005375	20,10
370	370000	223	0,1115	0,0005575	20,66
380	380000	228	0,114	0,00057	21,22
390	390000	235	0,1175	0,0005875	21,78
400	400000	241	0,1205	0,0006025	22,34
410	410000	248	0,124	0,00062	22,89
420	420000	255	0,1275	0,0006375	23,45
430	430000	262	0,131	0,000655	24,01
440	440000	268	0,134	0,00067	24,57
450	450000	274	0,137	0,000685	25,13
460	460000	284	0,142	0,00071	25,69
470	470000	291	0,1455	0,0007275	26,25
480	480000	300	0,15	0,00075	26,80
490	490000	308	0,154	0,00077	27,36
500	500000	316	0,158	0,00079	27,92
510	510000	324	0,162	0,00081	28,48
520	520000	332	0,166	0,00083	29,04
530	530000	340	0,17	0,00085	29,60
540	540000	349	0,1745	0,0008725	30,15
550	550000	358	0,179	0,000895	30,71
560	560000	367	0,1835	0,0009175	31,27
570	570000	377	0,1885	0,0009425	31,83
580	580000	385	0,1925	0,0009625	32,39

590	590000	395	0,1975	0,0009875	32,95
600	600000	401	0,2005	0,0010025	33,50
610	610000	406	0,203	0,001015	34,06
620	620000	420	0,21	0,00105	34,62
630	630000	435	0,2175	0,0010875	35,18
636,29	636290	469	0,2345	0,0011725	35,53
630	630000	482	0,241	0,001205	35,18
620	620000	501	0,2505	0,0012525	34,62
610	610000	524	0,262	0,00131	34,06
600	600000	538	0,269	0,001345	33,50
590	590000	569	0,2845	0,0014225	32,95
580	580000	587	0,2935	0,0014675	32,39

Grafik Modulus Elastisitas BV-15 Sampel 5



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	38448,17 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	28202,74 MPa

Variasi BV-20 Sampel 1

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	20	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	36,758	MPa
Diameter	149	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17436,625	mm^2

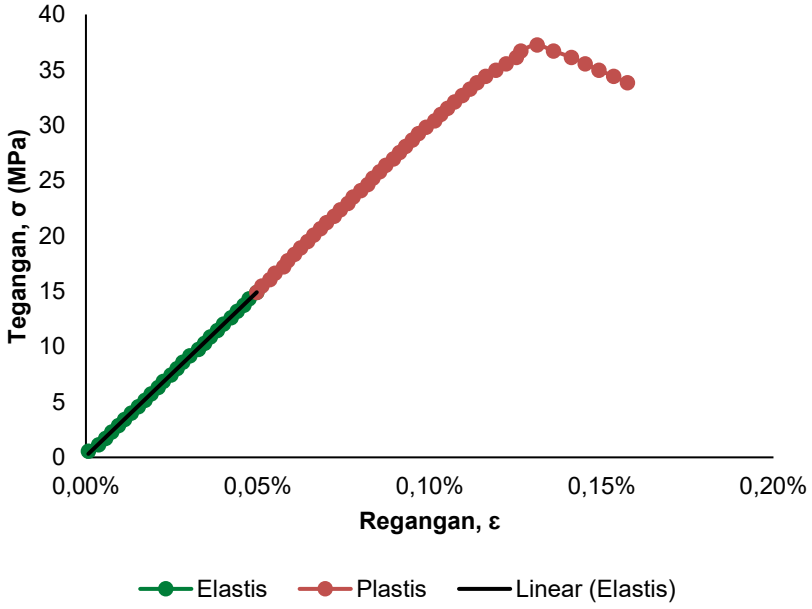
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi (ΔL)	Regangan (ε')	Tegangan (σ)
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	8	0,004	0,00002	0,57
20	20000	20	0,01	0,00005	1,15
30	30000	28	0,014	0,00007	1,72
40	40000	35	0,0175	0,0000875	2,29
50	50000	43	0,0215	0,0001075	2,87
60	60000	50	0,025	0,000125	3,44
70	70000	58	0,029	0,000145	4,01
80	80000	66	0,033	0,000165	4,59
90	90000	74	0,037	0,000185	5,16
100	100000	81	0,0405	0,0002025	5,74
110	110000	89	0,0445	0,0002225	6,31
120	120000	95	0,0475	0,0002375	6,88
130	130000	104	0,052	0,00026	7,46
140	140000	111	0,0555	0,0002775	8,03
150	150000	118	0,059	0,000295	8,60
160	160000	126	0,063	0,000315	9,18
170	170000	136	0,068	0,00034	9,75
180	180000	143	0,0715	0,0003575	10,32
190	190000	150	0,075	0,000375	10,90
200	200000	158	0,079	0,000395	11,47
210	210000	165	0,0825	0,0004125	12,04
220	220000	174	0,087	0,000435	12,62

230	230000	181	0,0905	0,0004525	13,19
240	240000	189	0,0945	0,0004725	13,76
250	250000	195	0,0975	0,0004875	14,34
260	260000	204	0,102	0,00051	14,91
270	270000	210	0,105	0,000525	15,48
280	280000	219	0,1095	0,0005475	16,06
290	290000	225	0,1125	0,0005625	16,63
300	300000	235	0,1175	0,0005875	17,21
310	310000	240	0,12	0,0006	17,78
320	320000	248	0,124	0,00062	18,35
330	330000	255	0,1275	0,0006375	18,93
340	340000	263	0,1315	0,0006575	19,50
350	350000	270	0,135	0,000675	20,07
360	360000	278	0,139	0,000695	20,65
370	370000	285	0,1425	0,0007125	21,22
380	380000	294	0,147	0,000735	21,79
390	390000	301	0,1505	0,0007525	22,37
400	400000	310	0,155	0,000775	22,94
410	410000	316	0,158	0,00079	23,51
420	420000	325	0,1625	0,0008125	24,09
430	430000	333	0,1665	0,0008325	24,66
440	440000	339	0,1695	0,0008475	25,23
450	450000	347	0,1735	0,0008675	25,81
460	460000	354	0,177	0,000885	26,38
470	470000	363	0,1815	0,0009075	26,95
480	480000	370	0,185	0,000925	27,53
490	490000	377	0,1885	0,0009425	28,10
500	500000	385	0,1925	0,0009625	28,68
510	510000	392	0,196	0,00098	29,25
520	520000	401	0,2005	0,0010025	29,82
530	530000	411	0,2055	0,0010275	30,40
540	540000	418	0,209	0,001045	30,97
550	550000	426	0,213	0,001065	31,54
560	560000	434	0,217	0,001085	32,12
570	570000	443	0,2215	0,0011075	32,69
580	580000	452	0,226	0,00113	33,26

590	590000	460	0,23	0,00115	33,84
600	600000	470	0,235	0,001175	34,41
610	610000	482	0,241	0,001205	34,98
620	620000	494	0,247	0,001235	35,56
630	630000	506	0,253	0,001265	36,13
640	640000	511	0,2555	0,0012775	36,70
649,57	649570	530	0,265	0,001325	37,25
640	640000	549	0,2745	0,0013725	36,70
630	630000	570	0,285	0,001425	36,13
620	620000	586	0,293	0,001465	35,56
610	610000	602	0,301	0,001505	34,98
600	600000	619	0,3095	0,0015475	34,41
590	590000	635	0,3175	0,0015875	33,84

Grafik Modulus Elastisitas BV-20 Sampel 1



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	29922,03 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	28495,34 MPa

Variasi BV-20 Sampel 2

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	20	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	58,546	MPa
Diameter	150,1	mm
Tinggi	301	mm
Luas Penampang	17695,028	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

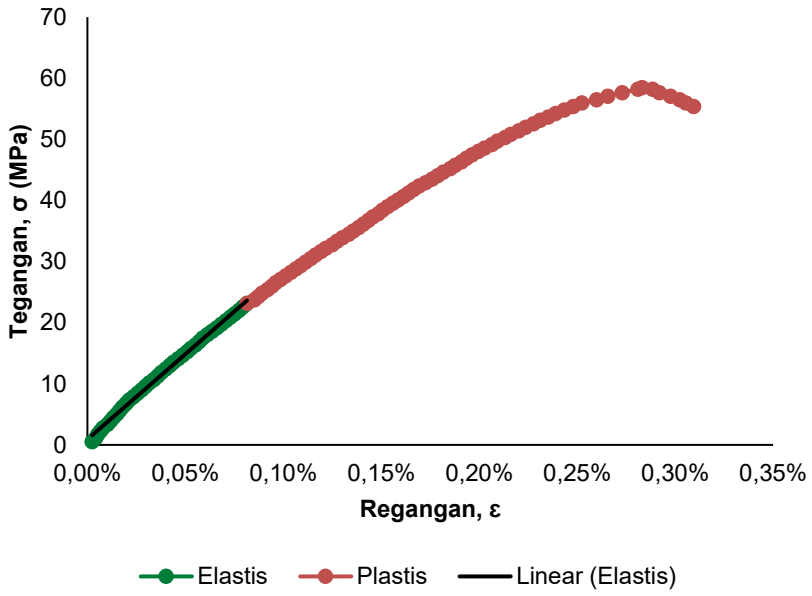
Beban (P)		Ekstensiometer	Deformasi (ΔL)	Regangan (ε')	Tegangan (σ)
kN	N	... x 10^3 mm	mm	%	MPa
10	10000	4	0,002	0,00001	0,57
20	20000	11	0,0055	0,0000275	1,13
30	30000	15	0,0075	0,0000375	1,70
40	40000	21	0,0105	0,0000525	2,26
50	50000	26	0,013	0,000065	2,83
60	60000	35	0,0175	0,0000875	3,39
70	70000	42	0,021	0,000105	3,96
80	80000	48	0,024	0,00012	4,52
90	90000	54	0,027	0,000135	5,09
100	100000	60	0,03	0,00015	5,65
110	110000	66	0,033	0,000165	6,22
120	120000	73	0,0365	0,0001825	6,78
130	130000	80	0,04	0,0002	7,35
140	140000	88	0,044	0,00022	7,91
150	150000	97	0,0485	0,0002425	8,48
160	160000	105	0,0525	0,0002625	9,04
170	170000	113	0,0565	0,0002825	9,61
180	180000	121	0,0605	0,0003025	10,17
190	190000	130	0,065	0,000325	10,74
200	200000	138	0,069	0,000345	11,30
210	210000	145	0,0725	0,0003625	11,87
220	220000	154	0,077	0,000385	12,43

230	230000	163	0,0815	0,0004075	13,00
240	240000	170	0,085	0,000425	13,56
250	250000	180	0,09	0,00045	14,13
260	260000	189	0,0945	0,0004725	14,69
270	270000	198	0,099	0,000495	15,26
280	280000	205	0,1025	0,0005125	15,82
290	290000	215	0,1075	0,0005375	16,39
300	300000	223	0,1115	0,0005575	16,95
310	310000	230	0,115	0,000575	17,52
320	320000	240	0,12	0,0006	18,08
330	330000	249	0,1245	0,0006225	18,65
340	340000	259	0,1295	0,0006475	19,21
350	350000	268	0,134	0,00067	19,78
360	360000	277	0,1385	0,0006925	20,34
370	370000	286	0,143	0,000715	20,91
380	380000	295	0,1475	0,0007375	21,47
390	390000	304	0,152	0,00076	22,04
400	400000	312	0,156	0,00078	22,61
410	410000	320	0,16	0,0008	23,17
420	420000	335	0,1675	0,0008375	23,74
430	430000	343	0,1715	0,0008575	24,30
440	440000	351	0,1755	0,0008775	24,87
450	450000	362	0,181	0,000905	25,43
460	460000	371	0,1855	0,0009275	26,00
470	470000	379	0,1895	0,0009475	26,56
480	480000	389	0,1945	0,0009725	27,13
490	490000	399	0,1995	0,0009975	27,69
500	500000	410	0,205	0,001025	28,26
510	510000	420	0,21	0,00105	28,82
520	520000	430	0,215	0,001075	29,39
530	530000	440	0,22	0,0011	29,95
540	540000	450	0,225	0,001125	30,52
550	550000	460	0,23	0,00115	31,08
560	560000	471	0,2355	0,0011775	31,65
570	570000	481	0,2405	0,0012025	32,21
580	580000	494	0,247	0,001235	32,78

590	590000	504	0,252	0,00126	33,34
600	600000	515	0,2575	0,0012875	33,91
610	610000	528	0,264	0,00132	34,47
620	620000	537	0,2685	0,0013425	35,04
630	630000	548	0,274	0,00137	35,60
640	640000	558	0,279	0,001395	36,17
650	650000	568	0,284	0,00142	36,73
660	660000	577	0,2885	0,0014425	37,30
670	670000	588	0,294	0,00147	37,86
680	680000	597	0,2985	0,0014925	38,43
690	690000	607	0,3035	0,0015175	38,99
700	700000	618	0,309	0,001545	39,56
710	710000	629	0,3145	0,0015725	40,12
720	720000	640	0,32	0,0016	40,69
730	730000	650	0,325	0,001625	41,25
740	740000	661	0,3305	0,0016525	41,82
750	750000	672	0,336	0,00168	42,38
760	760000	685	0,3425	0,0017125	42,95
770	770000	698	0,349	0,001745	43,52
780	780000	710	0,355	0,001775	44,08
790	790000	721	0,3605	0,0018025	44,65
800	800000	735	0,3675	0,0018375	45,21
810	810000	745	0,3725	0,0018625	45,78
820	820000	758	0,379	0,001895	46,34
830	830000	768	0,384	0,00192	46,91
840	840000	780	0,39	0,00195	47,47
850	850000	793	0,3965	0,0019825	48,04
860	860000	805	0,4025	0,0020125	48,60
870	870000	820	0,41	0,00205	49,17
880	880000	831	0,4155	0,0020775	49,73
890	890000	847	0,4235	0,0021175	50,30
900	900000	859	0,4295	0,0021475	50,86
910	910000	875	0,4375	0,0021875	51,43
920	920000	889	0,4445	0,0022225	51,99
930	930000	905	0,4525	0,0022625	52,56
940	940000	919	0,4595	0,0022975	53,12

950	950000	935	0,4675	0,0023375	53,69
960	960000	950	0,475	0,002375	54,25
970	970000	968	0,484	0,00242	54,82
980	980000	986	0,493	0,002465	55,38
990	990000	1004	0,502	0,00251	55,95
1000	1000000	1034	0,517	0,002585	56,51
1010	1010000	1057	0,5285	0,0026425	57,08
1020	1020000	1086	0,543	0,002715	57,64
1030	1030000	1118	0,559	0,002795	58,21
1034,59	1034590	1127	0,5635	0,0028175	58,47
1030	1030000	1148	0,574	0,00287	58,21
1020	1020000	1162	0,581	0,002905	57,64
1010	1010000	1185	0,5925	0,0029625	57,08
1000	1000000	1204	0,602	0,00301	56,51
990	990000	1216	0,608	0,00304	55,95
980	980000	1232	0,616	0,00308	55,38

Grafik Modulus Elastisitas BV-20 Sampel 2



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	27973,01 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	35962,22 MPa

Variasi BV-20 Sampel 3

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	20	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	47,237	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	300	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

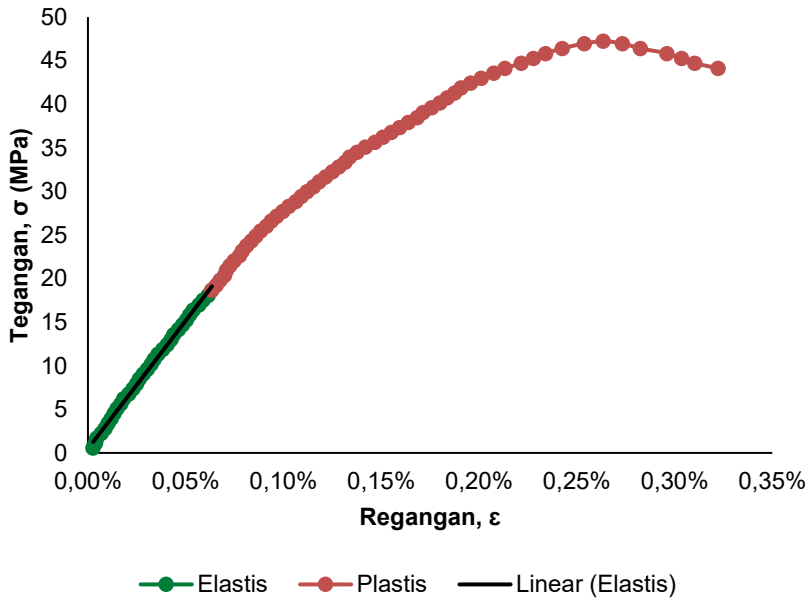
II. Data Hasil Pengujian

Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,57
20	20000	10	0,005	0,000025	1,13
30	30000	13	0,0065	0,0000325	1,70
40	40000	22	0,011	0,000055	2,26
50	50000	30	0,015	0,000075	2,83
60	60000	36	0,018	0,00009	3,40
70	70000	42	0,021	0,000105	3,96
80	80000	48	0,024	0,00012	4,53
90	90000	54	0,027	0,000135	5,09
100	100000	62	0,031	0,000155	5,66
110	110000	68	0,034	0,00017	6,22
120	120000	78	0,039	0,000195	6,79
130	130000	87	0,0435	0,0002175	7,36
140	140000	94	0,047	0,000235	7,92
150	150000	100	0,05	0,00025	8,49
160	160000	108	0,054	0,00027	9,05
170	170000	116	0,058	0,00029	9,62
180	180000	124	0,062	0,00031	10,19
190	190000	130	0,065	0,000325	10,75
200	200000	138	0,069	0,000345	11,32
210	210000	148	0,074	0,00037	11,88
220	220000	157	0,0785	0,0003925	12,45

230	230000	165	0,0825	0,0004125	13,02
240	240000	170	0,085	0,000425	13,58
250	250000	180	0,09	0,00045	14,15
260	260000	188	0,094	0,00047	14,71
270	270000	196	0,098	0,00049	15,28
280	280000	203	0,1015	0,0005075	15,84
290	290000	210	0,105	0,000525	16,41
300	300000	222	0,111	0,000555	16,98
310	310000	230	0,115	0,000575	17,54
320	320000	241	0,1205	0,0006025	18,11
330	330000	248	0,124	0,00062	18,67
340	340000	257	0,1285	0,0006425	19,24
350	350000	265	0,1325	0,0006625	19,81
360	360000	274	0,137	0,000685	20,37
370	370000	278	0,139	0,000695	20,94
380	380000	285	0,1425	0,0007125	21,50
390	390000	294	0,147	0,000735	22,07
400	400000	305	0,1525	0,0007625	22,64
410	410000	311	0,1555	0,0007775	23,20
420	420000	319	0,1595	0,0007975	23,77
430	430000	329	0,1645	0,0008225	24,33
440	440000	338	0,169	0,000845	24,90
450	450000	348	0,174	0,00087	25,46
460	460000	360	0,18	0,0009	26,03
470	470000	370	0,185	0,000925	26,60
480	480000	381	0,1905	0,0009525	27,16
490	490000	393	0,1965	0,0009825	27,73
500	500000	406	0,203	0,001015	28,29
510	510000	420	0,21	0,00105	28,86
520	520000	431	0,2155	0,0010775	29,43
530	530000	443	0,2215	0,0011075	29,99
540	540000	456	0,228	0,00114	30,56
550	550000	468	0,234	0,00117	31,12
560	560000	481	0,2405	0,0012025	31,69
570	570000	495	0,2475	0,0012375	32,26
580	580000	508	0,254	0,00127	32,82

590	590000	521	0,2605	0,0013025	33,39
600	600000	530	0,265	0,001325	33,95
610	610000	545	0,2725	0,0013625	34,52
620	620000	562	0,281	0,001405	35,08
630	630000	582	0,291	0,001455	35,65
640	640000	598	0,299	0,001495	36,22
650	650000	615	0,3075	0,0015375	36,78
660	660000	632	0,316	0,00158	37,35
670	670000	650	0,325	0,001625	37,91
680	680000	668	0,334	0,00167	38,48
690	690000	680	0,34	0,0017	39,05
700	700000	698	0,349	0,001745	39,61
710	710000	715	0,3575	0,0017875	40,18
720	720000	730	0,365	0,001825	40,74
730	730000	745	0,3725	0,0018625	41,31
740	740000	758	0,379	0,001895	41,88
750	750000	778	0,389	0,001945	42,44
760	760000	799	0,3995	0,0019975	43,01
770	770000	825	0,4125	0,0020625	43,57
780	780000	848	0,424	0,00212	44,14
790	790000	881	0,4405	0,0022025	44,70
800	800000	906	0,453	0,002265	45,27
810	810000	931	0,4655	0,0023275	45,84
820	820000	965	0,4825	0,0024125	46,40
830	830000	1010	0,505	0,002525	46,97
834,75	834750	1049	0,5245	0,0026225	47,24
830	830000	1088	0,544	0,00272	46,97
820	820000	1125	0,5625	0,0028125	46,40
810	810000	1179	0,5895	0,0029475	45,84
800	800000	1209	0,6045	0,0030225	45,27
790	790000	1236	0,618	0,00309	44,70
780	780000	1284	0,642	0,00321	44,14

Grafik Modulus Elastisitas BV-20 Sampel 3



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	29045,39 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	32302,71 MPa

Variasi BV-20 Sampel 4

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	20	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	57,453	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	298	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

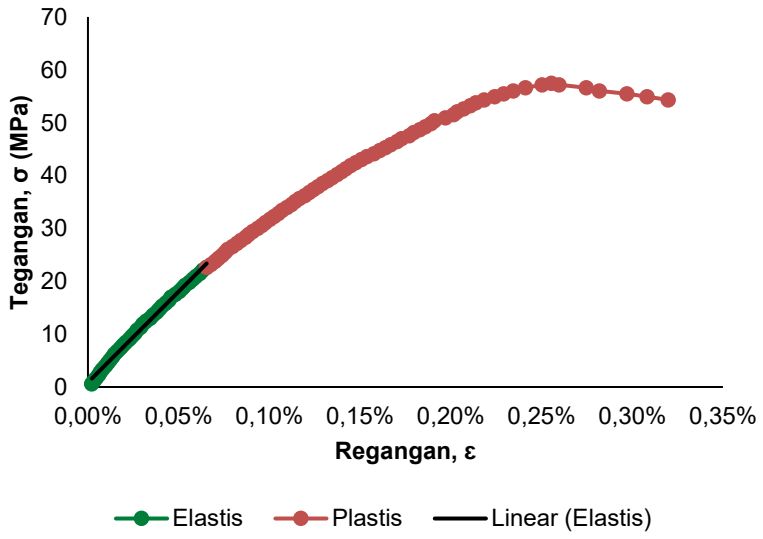
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,57
20	20000	10	0,005	0,000025	1,13
30	30000	15	0,0075	0,0000375	1,70
40	40000	20	0,01	0,00005	2,26
50	50000	24	0,012	0,00006	2,83
60	60000	29	0,0145	0,0000725	3,40
70	70000	35	0,0175	0,0000875	3,96
80	80000	40	0,02	0,0001	4,53
90	90000	45	0,0225	0,0001125	5,09
100	100000	51	0,0255	0,0001275	5,66
110	110000	55	0,0275	0,0001375	6,22
120	120000	61	0,0305	0,0001525	6,79
130	130000	68	0,034	0,00017	7,36
140	140000	74	0,037	0,000185	7,92
150	150000	80	0,04	0,0002	8,49
160	160000	88	0,044	0,00022	9,05
170	170000	94	0,047	0,000235	9,62
180	180000	100	0,05	0,00025	10,19
190	190000	105	0,0525	0,0002625	10,75
200	200000	113	0,0565	0,0002825	11,32
210	210000	118	0,059	0,000295	11,88

220	220000	125	0,0625	0,0003125	12,45
230	230000	134	0,067	0,000335	13,02
240	240000	140	0,07	0,00035	13,58
250	250000	148	0,074	0,00037	14,15
260	260000	154	0,077	0,000385	14,71
270	270000	160	0,08	0,0004	15,28
280	280000	168	0,084	0,00042	15,84
290	290000	175	0,0875	0,0004375	16,41
300	300000	180	0,09	0,00045	16,98
310	310000	190	0,095	0,000475	17,54
320	320000	198	0,099	0,000495	18,11
330	330000	205	0,1025	0,0005125	18,67
340	340000	211	0,1055	0,0005275	19,24
350	350000	220	0,11	0,00055	19,81
360	360000	228	0,114	0,00057	20,37
370	370000	235	0,1175	0,0005875	20,94
380	380000	243	0,1215	0,0006075	21,50
390	390000	250	0,125	0,000625	22,07
400	400000	258	0,129	0,000645	22,64
410	410000	268	0,134	0,00067	23,20
420	420000	277	0,1385	0,0006925	23,77
430	430000	284	0,142	0,00071	24,33
440	440000	292	0,146	0,00073	24,90
450	450000	299	0,1495	0,0007475	25,46
460	460000	305	0,1525	0,0007625	26,03
470	470000	315	0,1575	0,0007875	26,60
480	480000	325	0,1625	0,0008125	27,16
490	490000	334	0,167	0,000835	27,73
500	500000	344	0,172	0,00086	28,29
510	510000	351	0,1755	0,0008775	28,86
520	520000	360	0,18	0,0009	29,43
530	530000	371	0,1855	0,0009275	29,99
540	540000	380	0,19	0,00095	30,56
550	550000	388	0,194	0,00097	31,12
560	560000	398	0,199	0,000995	31,69
570	570000	407	0,2035	0,0010175	32,26

580	580000	416	0,208	0,00104	32,82
590	590000	425	0,2125	0,0010625	33,39
600	600000	435	0,2175	0,0010875	33,95
610	610000	445	0,2225	0,0011125	34,52
620	620000	454	0,227	0,001135	35,08
630	630000	463	0,2315	0,0011575	35,65
640	640000	475	0,2375	0,0011875	36,22
650	650000	485	0,2425	0,0012125	36,78
660	660000	494	0,247	0,001235	37,35
670	670000	504	0,252	0,00126	37,91
680	680000	514	0,257	0,001285	38,48
690	690000	525	0,2625	0,0013125	39,05
700	700000	535	0,2675	0,0013375	39,61
710	710000	546	0,273	0,001365	40,18
720	720000	556	0,278	0,00139	40,74
730	730000	565	0,2825	0,0014125	41,31
740	740000	576	0,288	0,00144	41,88
750	750000	587	0,2935	0,0014675	42,44
760	760000	600	0,3	0,0015	43,01
770	770000	612	0,306	0,00153	43,57
780	780000	627	0,3135	0,0015675	44,14
790	790000	640	0,32	0,0016	44,70
800	800000	653	0,3265	0,0016325	45,27
810	810000	664	0,332	0,00166	45,84
820	820000	678	0,339	0,001695	46,40
830	830000	688	0,344	0,00172	46,97
840	840000	705	0,3525	0,0017625	47,53
850	850000	715	0,3575	0,0017875	48,10
860	860000	728	0,364	0,00182	48,67
870	870000	740	0,37	0,00185	49,23
880	880000	753	0,3765	0,0018825	49,80
890	890000	761	0,3805	0,0019025	50,36
900	900000	785	0,3925	0,0019625	50,93
910	910000	803	0,4015	0,0020075	51,50
920	920000	811	0,4055	0,0020275	52,06
930	930000	825	0,4125	0,0020625	52,63

940	940000	840	0,42	0,0021	53,19
950	950000	852	0,426	0,00213	53,76
960	960000	870	0,435	0,002175	54,32
970	970000	893	0,4465	0,0022325	54,89
980	980000	913	0,4565	0,0022825	55,46
990	990000	934	0,467	0,002335	56,02
1000	1000000	961	0,4805	0,0024025	56,59
1010	1010000	998	0,499	0,002495	57,15
1015	1015000	1018	0,509	0,002545	57,44
1010	1010000	1035	0,5175	0,0025875	57,15
1000	1000000	1095	0,5475	0,0027375	56,59
990	990000	1124	0,562	0,00281	56,02
980	980000	1185	0,5925	0,0029625	55,46
970	970000	1229	0,6145	0,0030725	54,89
960	960000	1276	0,638	0,00319	54,32

Grafik Modulus Elastisitas BV-20 Sampel 4



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	34238,37 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	35624,95 MPa

Variasi BV-20 Sampel 5

I. Data Benda Uji

Kadar *Fly ash*	20	%
Mutu Beton Rencana	25	MPa
Mutu Beton Hasil Uji	42,983	MPa
Diameter	150	mm
Tinggi	298	mm
Luas Penampang	17671,459	mm^2

II. Data Hasil Pengujian

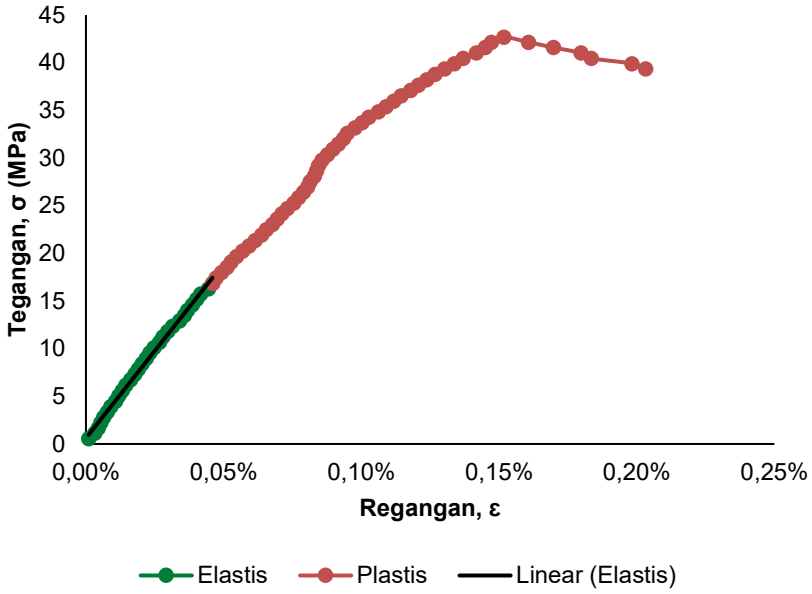
Beban (P)		**Ekstensiometer**	**Deformasi (ΔL)**	**Regangan (ε')**	**Tegangan (σ)**
kN	**N**	**... x 10^3 mm**	**mm**	**%**	**MPa**
10	10000	6	0,003	0,000015	0,562
20	20000	15	0,0075	0,0000375	1,124
30	30000	20	0,01	0,00005	1,686
40	40000	24	0,012	0,00006	2,249
50	50000	28	0,014	0,00007	2,811
60	60000	33	0,0165	0,0000825	3,373
70	70000	38	0,019	0,000095	3,935
80	80000	45	0,0225	0,0001125	4,497
90	90000	50	0,025	0,000125	5,059
100	100000	55	0,0275	0,0001375	5,621
110	110000	60	0,03	0,00015	6,183
120	120000	67	0,0335	0,0001675	6,746
130	130000	73	0,0365	0,0001825	7,308
140	140000	78	0,039	0,000195	7,870
150	150000	84	0,042	0,00021	8,432
160	160000	90	0,045	0,000225	8,994
170	170000	95	0,0475	0,0002375	9,556

180	180000	101	0,0505	0,0002525	10,118
190	190000	109	0,0545	0,0002725	10,680
200	200000	114	0,057	0,000285	11,243
210	210000	121	0,0605	0,0003025	11,805
220	220000	128	0,064	0,00032	12,367
230	230000	138	0,069	0,000345	12,929
240	240000	145	0,0725	0,0003625	13,491
250	250000	150	0,075	0,000375	14,053
260	260000	157	0,0785	0,0003925	14,615
270	270000	163	0,0815	0,0004075	15,178
280	280000	169	0,0845	0,0004225	15,740
290	290000	180	0,09	0,00045	16,302
300	300000	186	0,093	0,000465	16,864
310	310000	191	0,0955	0,0004775	17,426
320	320000	199	0,0995	0,0004975	17,988
330	330000	207	0,1035	0,0005175	18,550
340	340000	213	0,1065	0,0005325	19,112
350	350000	221	0,1105	0,0005525	19,675
360	360000	230	0,115	0,000575	20,237
370	370000	239	0,1195	0,0005975	20,799
380	380000	248	0,124	0,00062	21,361
390	390000	257	0,1285	0,0006425	21,923
400	400000	264	0,132	0,00066	22,485
410	410000	273	0,1365	0,0006825	23,047

420	420000	280	0,14	0,0007	23,609
430	430000	287	0,1435	0,0007175	24,172
440	440000	295	0,1475	0,0007375	24,734
450	450000	304	0,152	0,00076	25,296
460	460000	311	0,1555	0,0007775	25,858
470	470000	318	0,159	0,000795	26,420
480	480000	324	0,162	0,00081	26,982
490	490000	328	0,164	0,00082	27,544
500	500000	334	0,167	0,000835	28,107
510	510000	337	0,1685	0,0008425	28,669
520	520000	340	0,17	0,00085	29,231
530	530000	345	0,1725	0,0008625	29,793
540	540000	353	0,1765	0,0008825	30,355
550	550000	361	0,1805	0,0009025	30,917
560	560000	369	0,1845	0,0009225	31,479
570	570000	376	0,188	0,00094	32,041
580	580000	382	0,191	0,000955	32,604
590	590000	393	0,1965	0,0009825	33,166
600	600000	403	0,2015	0,0010075	33,728
610	610000	413	0,2065	0,0010325	34,290
620	620000	427	0,2135	0,0010675	34,852
630	630000	438	0,219	0,001095	35,414
640	640000	449	0,2245	0,0011225	35,976
650	650000	460	0,23	0,00115	36,538

660	660000	474	0,237	0,001185	37,101
670	670000	485	0,2425	0,0012125	37,663
680	680000	497	0,2485	0,0012425	38,225
690	690000	509	0,2545	0,0012725	38,787
700	700000	523	0,2615	0,0013075	39,349
710	710000	537	0,2685	0,0013425	39,911
720	720000	550	0,275	0,001375	40,473
730	730000	569	0,2845	0,0014225	41,036
740	740000	582	0,291	0,001455	41,598
750	750000	591	0,2955	0,0014775	42,160
759,58	759580	609	0,3045	0,0015225	42,698
750	750000	645	0,3225	0,0016125	42,160
740	740000	681	0,3405	0,0017025	41,598
730	730000	721	0,3605	0,0018025	41,036
720	720000	736	0,368	0,00184	40,473
710	710000	795	0,3975	0,0019875	39,911
700	700000	815	0,4075	0,0020375	39,349

Grafik Modulus Elastisitas BV-20 Sampel 5



Nilai Modulus Elastisitas, E	
Modulus Elastisitas Pengujian, E uji	36572,34 MPa
Modulus Elastisitas Teoritis, E teoritis	30813,87 MPa

Lampiran 8 Data Hasil Pengujian Tarik Belah Beton

kode Benda Uji		Dimensi Benda Uji		Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tarik Belah (Mpa)	Kuat Tarik Rerata (Mpa)
		Diameter (mm)	Tinggi (mm)				
BN	1	149	301	17436,62463	160	2,271	2,494
	2	151	300	17907,86352	181	2,544	
	3	150	301,50	17789,46475	190	2,666	
BV-05	1	150,1	300	17695,02848	233	3,690	3,598
	2	149,45	299	17542,10556	226	3,220	
	3	150,5	300,5	17789,46475	276	3,885	
BV-10	1	150	301	17671,45868	233	3,285	2,853
	2	150	300	17671,45868	206	2,914	
	3	149	300,5	17436,62463	166	2,360	
BV-15	1	149	300	17436,62463	158	2,250	2,731
	2	151,1	301	17931,5904	182	2,548	
	3	150	300	17671,45868	240	3,395	
BV-20	1	150	301	17671,45868	188	2,651	2,523
	2	151	299,5	17907,86352	147	2,069	
	3	149	300	17436,62463	200	2,848	

Gambar L-9. 1 Pasir

Gambar L-9. 2 Kerikil

Gambar L-9. 3 Semen OPC

Gambar L-9. 4 Timbangan

Gambar L-9. 5 Gerobak Dongkrak

Gambar L-9. 6 Alat Uji Slump

Gambar L-9. 7 Ember

Gambar L-9. 8 Bekisting Silinder

Gambar L-9. 9 Gelas Ukur

Gambar L-9. 10 Alat Mixer

Gambar L-9. 11 Mesing Ayakan

Gambar L-9. 12 Saringan Agregat Kasar

Gambar L-9. 13 Saringan Agregat Halus

Gambar L-9. 14 Piknometer

Gambar L-9. 15 Alat Capping

Gambar L-9. 16 Mesin Uji Tekan

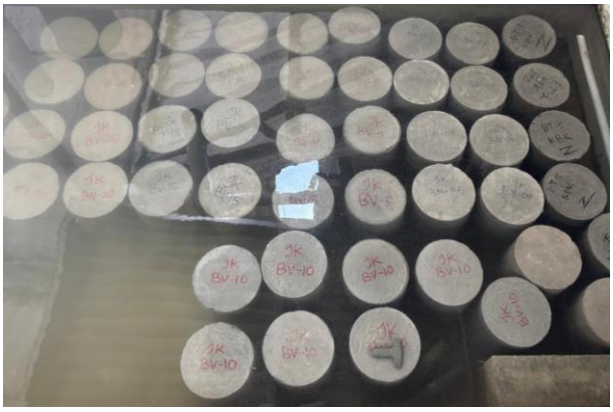
Gambar L-9. 17 Mesin Tarik Belah

Gambar L-9. 18 Mesin Oven

Gambar L-9. 19 Ekstensiometer

Gambar L-9. 20 Alat Uji Berat Jenis Agregat Kasar

Gambar L-9. 21 Pan



Gambar L-9. 22 Perendaman Beton Silinder

Gambar L-9. 23 Beton Siap Uji

Gambar L-9. 24 Beton Setelah Capping

Gambar L-9. 25 Pengujian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas

Gambar L-9. 26 Pengujian Kuat Tarik Belah

Gambar L-9. 27 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BN Sampel 1

Gambar L-9. 28 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BN Sampel 2

Gambar L-9. 29 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BN Sampel 3

Gambar L-9. 30 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BN Sampel 4

Gambar L-9. 31 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BN Sampel 5

Gambar L-9. 32 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-05 Sampel 1

Gambar L-9. 33 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-05 Sampel 2

Gambar L-9. 34 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-05 Sampel 3

Gambar L-9. 35 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-05 Sampel 4

Gambar L-9. 36 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-05 Sampel 5

Gambar L-9. 37 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-10 Sampel 1

Gambar L-9. 38 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-10 Sampel 2

Gambar L-9. 39 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-10 Sampel 3

Gambar L-9. 40 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-10 Sampel 4

Gambar L-9. 41 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-10 Sampel 5

Gambar L-9. 42 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-15 Sampel 1

Gambar L-9. 43 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-15 Sampel 2

Gambar L-9. 44 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-15 Sampel 3

Gambar L-9. 45 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-15 Sampel 4

Gambar L-9. 46 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-15 Sampel 5

Gambar L-9. 47 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-20 Sampel 1

Gambar L-9. 48 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-20 Sampel 2

Gambar L-9. 49 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-20 Sampel 3

Gambar L-9. 50 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-20 Sampel 4

Gambar L-9. 51 Benda Uji setelah Pengujian Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas Beton variasi BV-20 Sampel 5