

TUGAS AKHIR

**PENGARUH PENGGUNAAN SERBUK KACA PADA
CAMPURAN BETON MUTU TINGGI
(*EFFECT OF GLASS POWDER ON HIGH STRENGTH
CONCRETE*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



ILHAM NURUDDIN

18511084

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

2022

TUGAS AKHIR

**PENGARUH PENGGUNAAN SERBUK KACA PADA
CAMPURAN BETON MUTU TINGGI
(*EFFECT OF GLASS POWDER ON HIGH STRENGTH
CONCRETE*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



ILHAM NURUDDIN

18511084

Disetujui:

Pembimbing

Mochamad Teguh, Prof. Ir., MSCE., Ph.D.

Tanggal: 18 November 2022

TUGAS AKHIR

**PENGARUH PENGGUNAAN SERBUK KACA PADA
CAMPURAN BETON MUTU TINGGI
(EFFECT OF GLASS POWDER ON HIGH STRENGTH
CONCRETE)**

Disusun Oleh

**Ilham Nuruddin
18511084**

Telah diterima sebagai salah satu syarat persyaratan
Untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal
18 November 2022

Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing

Mochamad Teguh, Prof. Ir., MSCE., Ph.D.
NIK: 855110201

Penguji I

Novi Rahmavanti, S.T., M.Eng.
NIK: 155111306

Penguji II

Malik Mushthofa, S.T., M.Eng.
NIK: 185111302

Mengesahkan,

Ketua Prodi Studi Teknik Sipil



Muntaha Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di 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 saya 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 2022

Yang membuat pernyataan,



Ilham Nuruddin

(18511084)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Puji syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena Tugas Akhir yang berjudul *Pengaruh Penggunaan Serbuk Kaca pada Campuran Beton Mutu Tinggi* ini dapat diselesaikan. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, terima kasih yang sedalam-dalamnya diberikan kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan banyak saran dan kritik selama proses pembuatan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Novi Rahmayanti, S.T., M. Eng. selaku Dosen Penguji I.
3. Bapak Malik Mushthofa, S.T., M. Eng. selaku Dosen Penguji II.
4. Bapak Darussalam, Bapak Suwarno, dan Mas Zakki beserta staf laboratorium selaku Laboran di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia yang telah membantu selama proses penelitian berlangsung.
5. Bapak Suryanto Hari Purnomo dan Ibu Nina Nuraini selaku orang tua penulis yang senantiasa memberi doa dan semangat selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Farrah Sofhi A. dan Kisna Hafizh J. yang senantiasa membantu dalam proses

penyusunan Tugas Akhir ini serta Haris Ihsan S., Bang Raditya Pradhipta, Fariza Aulia R, Hauzan Rafi A., Adlu Rizal S., Irfan Fadhlurrohman, Ardya Rifqi P., M. Fadhil Amr A., M. Riski M., Hadi Wibisono, Adhi Sulaeman, dan Hatta Riau M. yang telah meluangkan waktunya untuk membantu penulis dalam proses pembuatan dan pengujian beton.

7. Teman-teman Teknik Sipil 2018 lainnya yang juga terlibat dalam proses penyusunan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.
8. Pihak-pihak dan orang terdekat lain yang juga membantu proses penyusunan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang diberikan akan sangat membantu untuk kedepannya. Pada akhirnya diharapkan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang membacanya.

Wassalamualaikum warrahmatullahi wabarakatuh.

Yogyakarta,

2022

Penulis,

Ilham Nuruddin

(18511084)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	I
HALAMAN PERSETUJUAN	II
HALAMAN PENGESAHAN	III
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	IV
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR TABEL	X
DAFTAR GAMBAR	XII
ABSTRAK	XIV
<i>ABSTRACT</i>	XV
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tinjauan Umum	7
2.2 Penelitian Terdahulu	7
2.3 Perbandingan Penelitian	9
2.4 Keaslian Penelitian	16
BAB III LANDASAN TEORI	17
3.1 Beton	17
3.2 Material Penyusun Beton	18
3.3 Bahan-tambah	25
3.4 Perencanaan Campuran Beton	27
3.5 Pengujian <i>Slump</i>	31
3.6 Pengujian Beton	32

3.6.1 Kuat tekan	32
3.6.2 Kuat tarik belah	32
3.6.3 Modulus elastisitas	32
3.7 Umur Beton	34
3.8 Perawatan Beton	35
BAB IV METODE PENELITIAN	36
4.1 Umum	36
4.2 Lokasi Penelitian	36
4.3 Sampel Penelitian	36
4.4 Bahan dan Peralatan Penelitian	37
4.5 Tahap Persiapan Penelitian	44
4.6 Tahap Penelitian	49
4.6.1 Uji coba <i>mix design</i> campuran beton	49
4.6.2 Pembuatan sampel benda uji	50
4.6.3 Perawatan sampel benda uji	51
4.6.4 Pengujian beton	51
4.6.5 Analisis pengujian benda uji	52
4.6.6 Kerangka konsep penelitian	53
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	55
5.1 Pengujian Agregat	55
5.1.1 Agregat halus (pasir Sungai Progo)	55
5.1.2 Agregat kasar (kerikil Celereng)	61
5.2 Desain Campuran Beton Mutu Tinggi	66
5.3 Komposisi Campuran Beton Mutu Tinggi	69
5.4 Pengujian Sampel Beton <i>Trial</i>	72
5.5 Pengujian Beton Mutu Tinggi	72
5.5.1 <i>Slump</i>	72
5.5.2 Kuat tekan beton	74
5.5.3 Kuat tarik belah beton	78
5.5.4 Modulus elastisitas	81
5.6 Rekapitulasi	89

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	90
6.1 Kesimpulan	90
6.2 Saran	91
DAFTAR PUSTAKA	95
LAMPIRAN	99



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Rencana Penelitian	10
Tabel 3.1 Jenis Semen Portland	18
Tabel 3.2 Kandungan Semen (Neville & Brooks, 1987)	19
Tabel 3.3 Fraksi Volume Agregat Kasar Optimum (SNI 03-6468-2000)	28
Tabel 3.4 Estimasi Kebutuhan Air dan Kadar Udara Beton Segar (SNI 03-6468-2000)	29
Tabel 3.5 Rasio (w/c) disarankan (Campuran Tanpa <i>Superplasticizer</i>) (SNI 03-6468-2000)	30
Tabel 3.6 Rasio (w/c) disarankan (Campuran dengan <i>Superplasticizer</i>) (SNI 03-6468-2000)	30
Tabel 4.1 Jumlah Sampel Benda Uji Beton	50
Tabel 5.1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus	56
Tabel 5.2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 1	57
Tabel 5.3 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 2	57
Tabel 5.4 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus	60
Tabel 5.5 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus	60
Tabel 5.6 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar	62
Tabel 5.7 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 1	63
Tabel 5.8 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 2	63
Tabel 5.9 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar	66
Tabel 5.10 Hasil <i>Mix Design</i> Campuran Beton Mutu Tinggi	71
Tabel 5.11 Hasil Pengujian Sampel Beton <i>Trial</i>	72
Tabel 5.12 Hasil Pengujian <i>Slump</i>	73
Tabel 5.13 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	75
Tabel 5.14 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	79
Tabel 5.15 Hubungan Tegangan Regangan Benda Uji BK1	82
Tabel 5.16 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton ASTM C-469-94	86
Tabel 5.17 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton SNI-2847-2019	87

Tabel 5.18 Rekapitulasi Perhitungan Modulus Elastisitas

89

Tabel 5.19 Rekapitulasi Seluruh Hasil Pengujian

90



DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Tipe-tipe <i>Slump</i>	31
Gambar 3.2 Grafik Kurva Hubungan Tegangan Regangan Beton	33
Gambar 3.3 Modulus Sekan dan Modulus Tangen Beton	34
Gambar 4.1 Semen Portland (Semen Gresik)	37
Gambar 4.2 Agregat Halus (Pasir) Sungai Progo	38
Gambar 4.3 Agregat Kasar (Kerikil) Celereng	38
Gambar 4.4 Serbuk Kaca	39
Gambar 4.5 <i>Silica Fume</i> (SikaFume)	39
Gambar 4.6 <i>Superplasticizer</i> Viscocrete 3115N	40
Gambar 4.7 Timbangan	40
Gambar 4.8 Piknometer	41
Gambar 4.9 Saringan	41
Gambar 4.10 Mesin Pengguncang (<i>Shieve Shaker</i>)	42
Gambar 4.11 Oven	42
Gambar 4.12 <i>Mixer</i>	43
Gambar 4.13 Kerucut Abrams	43
Gambar 4.14 <i>Compression Testing Machine</i> (CTM)	44
Gambar 4.15 <i>Flowchart</i> Penelitian	54
Gambar 5.1 Gradasi Agregat Halus Sampel 1	58
Gambar 5.2 Gradasi Agregat Halus Sampel 2	59
Gambar 5.3 Gradasi Agregat Kasar Sampel 1	64
Gambar 5.4 Gradasi Agregat Kasar Sampel 2	65
Gambar 5.5 Pengujian <i>Slump</i>	73
Gambar 5.6 Pengujian Kuat Tekan Beton	74
Gambar 5.7 Grafik Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Variasi	76
Gambar 5.8 Contoh Kerusakan Beton Akibat Uji Tekan	78
Gambar 5.9 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	78
Gambar 5.10 Hubungan Kuat Tarik Belah Beton dengan Variasi	80

Gambar 5.11 Perbandingan Nilai Kuat Tarik dan Kuat Tekan Beton	80
Gambar 5.12 Kerusakan Sampel Beton Akibat Uji Kuat Tarik Belah	81
Gambar 5.13 Pengujian Modulus Elastisitas	82
Gambar 5.14 Grafik Tegangan-regangan Benda Uji BK1	85
Gambar 5.15 Grafik Perbandingan Modulus Elastisitas Beton dengan Variasi	88



ABSTRAK

Beton merupakan salah satu elemen yang banyak digunakan dalam dunia konstruksi. Semen adalah salah satu material penyusun beton. Semen mengandung silika yang dapat memengaruhi kuat tekan beton. Material lain yang mengandung silika adalah serbuk kaca. Sebagai dampak pembangunan yang berkembang, jumlah limbah kaca meningkat. Serbuk kaca ini dapat dimanfaatkan untuk mengisi campuran beton sebagai *filler*.

Penelitian ini bertujuan mengetahui kekuatan campuran beton dengan serbuk kaca sebagai *filler*. Campuran beton dibuat berdasarkan SNI-6468-2000 dengan kuat tekan rencana 45 MPa. Variasi kadar serbuk kaca yang digunakan adalah 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen. Dalam campuran beton digunakan *silica fume* sebesar 10% dari berat semen dan *superplasticizer* 0,3% dari berat semen. Umur beton yang digunakan adalah 28 hari. Beton dilakukan perawatan dengan perendaman di dalam air. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan hasil kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas dari sampel silinder beton.

Hasil penelitian ini menunjukkan variasi beton dengan 5% serbuk kaca sebagai *filler* mencapai nilai tertinggi pada kuat tekan dan kuat tarik belah. Kuat tekan variasi tersebut mencapai 47,07 MPa dan kuat tarik belah mencapai 3,91 MPa. Merujuk SNI 03-2847-2019, nilai modulus elastisitas dapat dihitung dengan berdasarkan kuat tekan terbesar atau optimum dan berat volume beton. Hasil modulus elastisitas penelitian ini dan berdasarkan kuat tekan maksimum pada variasi 5% serbuk kaca sebagai *filler* dengan nilai 36165 MPa dan 32244,01 MPa. Sedangkan modulus elastisitas berdasarkan berat volume maksimum pada beton kontrol dengan nilai 34834,8 MPa. Persentase serbuk kaca optimum pada kadar penambahan 5% dari berat semen.

Kata kunci : serbuk kaca, beton mutu tinggi

ABSTRACT

Concrete is one of the most element being used in construction. Several materials is needed to form concrete mixture. Cement is one of them. Cement contains silica that is essential for the concrete strength. Other material that contains silica is glass. As the infrastructure growth, the amount of glass waste increase. This glass waste can be used as filler in the concrete mixture.

This research shown the concrete strength using glass powder as filler. SikaFume's silica fume and Sika Viscocrete 3115N's superplasticizer was added. Concrete job mix is designed using SNI-6468-2000 of 45 MPa. Variations of glass powder composition were 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, and 10% of the weight of cement. The research experiment was conducted until the age of the concrete reached 28 days. Before the concrete reach 28 days, samples were soaked in the water for the curing purpose. This research aim was to determine the compressive strength, tensile strength, and modulus elasticity of concrete with cylindrical specimens.

Research showed that in compressive and tensile strength, specimen with 5% glass powder as filler reached the highest value. The compressive strength was 47,07 MPa and tensile strength was 3,91 MPa. According to SNI 03-2847-2019, modulus elasticity can be calculated based on optimum compressive strength and volume weight. The modulus elasticity analysis based on laboratory test and compressive strength shown the highest value on the 5% glass powder variation, for 36165 MPa and 32244,01 MPa. However, the modulus elasticity based on volume weight showed the highest value on the 0% glass powder, for 34834,8 MPa. The optimum amount of glass powder was 5% of the weight of cement.

Key words : glass powder, high strength concrete

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur di Indonesia mengalami peningkatan yang begitu pesat beberapa tahun terakhir. Proyek-proyek konstruksi terus berjalan sepanjang tahun. Beton merupakan salah satu bahan utama dalam proyek konstruksi. Beton harus mempunyai mutu yang baik agar konstruksi yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik. Menurut SNI-03-2834-2000, beton merupakan campuran antara semen portland (PC) atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan-tambah membentuk massa padat. Beton secara struktural kuat dalam menahan gaya tekan, namun lemah dalam menahan gaya tarik. Dalam penggunaannya di lapangan, beton dikombinasikan dengan baja tulangan agar lebih kuat dalam menahan gaya tarik.

Seiring dengan pesatnya pembangunan di Indonesia, penanganan limbah atau sampah masih menjadi salah satu permasalahan yang serius dan harus bisa ditangani dengan inovasi serta dimanfaatkan dengan baik. Menurut data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) pada tahun 2020, Indonesia menghasilkan sampah sebanyak 67,8 juta ton sampah. Sebanyak 55,87% sampah berhasil dikelola sepanjang tahun 2020, namun sisanya sebanyak 44,13% masih tersisa karena belum dikelola. Pendekatan yang dilakukan untuk penanganan sampah ini adalah melakukan pembatasan sampah plastik dan mendaur ulang sampah anorganik. Sampah atau limbah anorganik yang dapat didaur ulang dan diinovasikan salah satunya adalah limbah kaca. Menurut data KLHK pada tahun 2020, terdapat 2,29% sampah kaca. Kaca dapat dengan mudah dijumpai di lingkungan sekitar. Kaca dapat diolah menjadi serbuk kaca. Serbuk kaca memiliki ukuran berkisar 0,075 mm - 0,15 mm yang bersifat pozzolanik dan tidak porous. Kandungan serbuk kaca antara lain SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , dan CaO yang memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan pengganti semen (Hanafiah, 2011). Kandungan silika yang terdapat dalam kaca cukup tinggi, sehingga akan

memberikan pengaruh terhadap semen, karena semakin banyak silika yang terdapat dalam semen, maka nilai kuat tekan beton akan semakin tinggi (Darmawan dkk., 2007).

Proses penerapan beton dalam proyek konstruksi harus diperhatikan dengan saksama. Untuk menghasilkan kuat tekan yang sesuai dengan mutu rencana, beton yang dituang ke dalam acuan/cetakan elemen struktur perlu dilakukan pemadatan dengan baik sesuai acuan SNI agar tidak terjadi rongga-rongga di dalam beton (*honey comb*) akibat udara yang terjebak, sehingga beton menjadi homogen dan memenuhi standar kebutuhan.

Pengerjaan beton dapat dilakukan dengan lebih mudah dan kekuatan beton dapat meningkat antara lain dengan menambahkan *superplasticizer* (Afif, 2019). *Superplasticizer* berfungsi untuk meningkatkan *workability* dari campuran beton. *Superplasticizer* menyebabkan campuran beton mudah mengalir. Dengan penambahan *superplasticizer* yang sesuai dengan takaran menyebabkan nilai *slump* lebih tinggi selain kemudahan dalam pengerjaan (*workability*) meningkat juga menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Selain itu, penggunaan *silica fume* juga dapat meningkatkan kekuatan beton. *Silica fume* memiliki kandungan *amorphous silica* yang tinggi sehingga dapat meningkatkan kekuatan beton. *Silica fume* juga bereaksi baik dengan semen sehingga dapat mengakibatkan struktur beton yang lebih padat (Gražulytė dkk. 2020).

Superplasticizer yang digunakan merupakan produk dari PT. Sika Indonesia dengan jenis Viscocrete 3115N. Viscocrete 3115N adalah *superplasticizer* generasi ketiga untuk campuran beton dari PT. Sika Indonesia. Produk ini dapat digunakan untuk berbagai macam campuran beton, seperti *high flow concrete*, beton memadat sendiri (*self compacting concrete*), dan beton mutu tinggi (*high strength concrete*). Keunggulan produk ini adalah dapat mengurangi kadar penggunaan air, kemampuan mengalir yang baik, dan menghasilkan mutu beton yang tinggi. *Superplasticizer* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 0,3% berdasarkan anjuran dari PT. Sika Indonesia, yang merekomendasikan bahwa kadar *superplasticizer* untuk beton dengan rentang 0,3% - 0,8% dari berat semen. Selain itu, penelitian oleh Hadori dkk. (2015)

membandingkan penggunaan *superplasticizer* produk PT. Sika, PT. BASF, dan PT. Normet dengan variasi 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,2%, dan 1,5% pada campuran beton. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *superplasticizer* produk PT. Sika Indonesia menghasilkan kuat tekan beton paling optimum dengan kadar 0,3%.

Silica fume yang digunakan merupakan produk PT. Sika Indonesia dengan nama produk SikaFume. Produk ini adalah generasi terbaru dari bahan-tambah bubuk halus berdasarkan *silica fume technology*. Produk ini digunakan untuk meningkatkan kepadatan, ketahanan, dan kuat tekan dari beton. Keunggulan dari produk SikaFume ini adalah meningkatkan *workability* pada waktu yang lebih panjang, meningkatkan kohesi dan stabilitas dari *green concrete*, meningkatkan ketahanan, menurunkan permeabilitas, dan memiliki kekuatan awal yang tinggi. PT. Sika Indonesia menyarankan penggunaan SikaFume sebesar 3-10% dari berat semen. Penelitian oleh Nst (2017) menggunakan SikaFume sebesar 10% dari berat semen. Dalam penelitian ini, digunakan SikaFume sebesar 10% dari berat semen berdasarkan anjuran PT. Sika Indonesia dan penelitian terdahulu.

Penelitian ini menggunakan bahan-tambah serbuk kaca sebagai *filler* untuk menambah kepadatan beton. Serbuk kaca yang digunakan berukuran lebih halus dari 74 μm (lolos saringan no. 200). *Silica fume* dan *superplasticizer* digunakan untuk menambah kekuatan serta *workability*. Komposisi serbuk kaca bervariasi, sehingga akan diketahui kadar serbuk kaca yang optimum untuk menghasilkan campuran beton mutu tinggi. Kandungan silika yang terdapat pada serbuk kaca akan memengaruhi semen dalam campuran beton, sehingga mutu beton juga akan terpengaruhi. Sampel akan dibuat sebanyak 6 buah untuk masing-masing 5 variasi kadar serbuk kaca, yaitu 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen, sehingga total terdapat 30 sampel. Kadar *superplasticizer* yang digunakan adalah mengadopsi hasil penelitian Hadori dkk. (2015) yaitu sebesar 0,3% dari berat semen untuk masing-masing variasi. Kadar *silica fume* yang digunakan adalah 10% dari berat semen. Setiap sampel akan dilakukan pengujian pada umur 28 hari dengan uji tekan, uji tarik belah, dan modulus elastisitas. Mutu beton rencana adalah 45 MPa. Mutu beton rencana ini sudah termasuk syarat kelompok beton

mutu tinggi. Menurut SNI-03-6468-2000, beton mutu tinggi adalah beton yang memiliki kuat tekan $\geq 41,4$ MPa. Dalam penelitian ini, digunakan portland *cement* tipe I merek Semen Gresik, agregat halus berasal dari Sungai Progo, dan agregat kasar dari Celereng untuk membuat campuran beton mutu tinggi. Campuran beton mutu tinggi menggunakan *silica fume* dan *superplasticizer*. Lalu, berdasarkan komposisi campuran beton mutu tinggi tersebut, dibuat beton variasi dengan serbuk kaca sebagai *filler*. Komposisi serbuk kaca bervariasi sesuai yang telah disebutkan. Berdasarkan penggunaan serbuk kaca sebagai *filler* pada beton variasi tersebut, akan diketahui pengaruh penggunaan serbuk kaca pada campuran beton mutu tinggi dengan *silica fume* dan *superplasticizer*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang dapat dicakup dalam penelitian ini dirinci dalam 3 hal.

1. Bagaimana komposisi campuran beton dan pengaruh penggunaan bahan-tambah berupa serbuk kaca pada campuran beton mutu tinggi?
2. Bagaimana hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton pada umur 28 hari?
3. Berapa komposisi serbuk kaca optimum pada campuran beton mutu tinggi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian berdasarkan rumusan masalah di atas dapat digunakan untuk menentukan:

1. komposisi campuran beton dan pengaruh penggunaan bahan-tambah berupa serbuk kaca pada campuran beton mutu tinggi,
2. hasil pengujian kuat tekan beton, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton pada umur 28 hari, dan
3. komposisi serbuk kaca optimum pada campuran beton mutu tinggi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang bisa diperoleh adalah:

1. mengetahui komposisi campuran beton dan pengaruh penggunaan bahan-tambah berupa serbuk kaca pada campuran beton mutu tinggi,
2. memperoleh hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton pada umur 28 hari, dan
3. menentukan komposisi serbuk kaca optimum pada campuran beton mutu tinggi.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan pembuatan benda uji di dalam laboratorium. Untuk memperjelas ruang lingkup dalam penelitian ini, batasan masalah adalah sebagai berikut ini.

1. Kuat tekan beton rencana adalah $f'_c = 45$ MPa.
2. Umur pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas yaitu 28 hari.
3. Benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.
4. Serbuk kaca berasal dari limbah kaca botol dan kaca bening yang lolos saringan no. 200.
5. Agregat halus berasal dari Sungai Progo, Kulon Progo, DIY.
6. Agregat kasar berasal dari Celereng, Kulon Progo, DIY dengan diameter maksimum 20 mm.
7. Air berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.
8. *Silica fume* menggunakan produk PT. Sika Indonesia, yaitu produk SikaFume.
9. *Superplasticizer* menggunakan produk dari PT. Sika Indonesia yaitu Viscocrete 3115N.
10. Semen menggunakan Produk *Portland Composite Cement* (PCC) tipe I, yaitu produk Semen Gresik.
11. *Mix design* menggunakan metode SNI 03-6468-2000.
12. Variabel tetap adalah pasir, kerikil, air, semen, kadar *silica fume* (10% dari

berat semen), dan kadar *superplasticizer* (0,3% dari berat semen).

13. Variabel berubah adalah serbuk kaca (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen).
14. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Menurut SNI-03-2834-2000, beton merupakan campuran antara semen portland (PC) atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan-tambah membentuk massa padat. Semen merupakan bahan yang digunakan untuk merekatkan butir-butir agregat. Semen akan bereaksi ketika dicampur dengan air. Sebagai pengisi dalam campuran beton, digunakan agregat. Agregat halus umumnya adalah pasir dan agregat kasar umumnya adalah batu kerikil. Bahan-tambah merupakan bahan selain unsur utama beton yang ditambahkan ke dalam campuran beton. Tujuan penggunaan bahan-tambah ini beragam sesuai dengan rencana dalam pembuatan campuran beton tersebut.

2.2 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian mengenai penggunaan serbuk kaca, *silica fume*, *superplasticizer*, dan bahan-tambah lain pada campuran beton pernah dilakukan. Beberapa penelitian terdahulu tersebut dapat dilihat pada uraian berikut ini.

2.2.1 Penggunaan serbuk kaca sebagai bahan pengisi (*filler*)

Penelitian oleh Aliabdo dkk. (2016) menambahkan serbuk kaca sebagai bahan-tambah semen pada campuran beton dengan mutu rencana 33 MPa dan 45 MPa. Campuran beton dibuat dengan nilai faktor air semen 0,35. Serbuk kaca yang digunakan berukuran lebih kecil dari 75 μm dan memiliki berat jenis 2,62. Variasi penambahan serbuk kaca adalah sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat semen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton pada usia 7, 28, dan 56 hari. Hasilnya, nilai kuat tekan beton untuk *mix design* 33 MPa optimum pada kadar 15% dengan kekuatan 34,20 MPa, 37,90 MPa, dan 41 MPa untuk umur 7, 28, dan 56 hari. Untuk *mix design* 45 MPa optimum pada kadar 20% dengan kekuatan 41,80 MPa, 49,21 MPa, dan

54,84 MPa untuk umur 7, 28, dan 56 hari. Nilai *slump* menurun seiring dengan penambahan serbuk kaca. Nilai kuat tarik belah beton untuk *mix design* 33 MPa optimum pada kadar 15% dengan kekuatan 3,26 MPa untuk umur 7 hari dan kadar 10% dengan kekuatan 3,91 MPa dan 4,44 MPa untuk umur 28 dan 56 hari. Untuk *mix design* 45 MPa optimum pada kadar 20% dengan kekuatan 4,22 MPa, 4,66 MPa, dan 5,16 MPa untuk umur 7, 28 dan 56 hari.

Penelitian oleh Apriwelni & Wirawan (2020) menggunakan bubuk kaca sebagai bahan pengisi pada campuran beton mutu tinggi. Selain bubuk kaca, pada campuran beton juga digunakan *fly ash*. Penggunaan *fly ash* mensubstitusi kadar semen yang digunakan. Komposisi *fly ash* yang digunakan adalah 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen, sedangkan bubuk kaca yang digunakan terdiri dari 2 variasi, yaitu 5% dan 10% dari berat semen. Bubuk kaca yang digunakan berukuran lolos saringan no. 50, no. 100, dan no. 200. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tekan beton mutu tinggi pada umur 28 hari. Mutu beton rencana adalah 45 MPa. Hasil pengujian didapatkan nilai kuat tekan beton variasi 0% *fly ash* + 10% bubuk kaca pada umur benda uji 28 hari paling optimum, yaitu sebesar 46,77 MPa. Nilai kuat tekan beton terendah berada pada variasi 20% *fly ash* + 5% bubuk kaca dengan nilai 38,56 MPa. Nilai *slump* rata-rata tiap benda uji adalah 4 cm.

2.2.2 Penggunaan *silica fume*, *superplasticizer*, dan bahan-tambah lain

Penelitian oleh Hadori dkk. (2015) memvariasikan jenis dan kadar *superplasticizer* untuk campuran beton dengan bahan-tambah *fly ash* sebesar 10%. *Superplasticizer* yang digunakan merupakan produk dari PT. Sika, PT. BASF, dan PT. Normet. Kadar *superplasticizer* untuk masing-masing jenis adalah 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,2%, dan 1,5 % dari berat semen. Pengujian dilakukan dengan uji kuat tekan beton pada umur 28 hari. Hasilnya beton dengan mutu optimum diperoleh dari jenis *superplasticizer* produk PT. Sika dengan kadar 0,3% dengan kekuatan 42,81 MPa. Nilai ini meningkat sebesar 17,84% dari beton normal. Sedangkan untuk campuran beton dengan *superplasticizer* dari PT. BASF, optimum pada kadar 0,6% dengan kekuatan 40,76 MPa dan *superplasticizer* dari

PT. Normet optimum pada kadar 0,6% dengan kekuatan 40,76 MPa.

Penelitian oleh Nst (2017) memvariasikan kadar *superplasticizer* pada campuran beton *Self Compacting Concrete* (SCC). Kadar *superplasticizer* yang digunakan adalah 0,8%, 1%, 1,2%, 1,4%, dan 1,6% dari berat semen. Dalam campuran beton SCC tersebut juga digunakan *silica fume* sebesar 10% dari berat semen. Penggunaan *silica fume* mengurangi penggunaan semen. Mutu beton rencana adalah 41,4 MPa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas beton pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari. Produk *silica fume* dan *superplasticizer* yang digunakan berasal dari PT. Sika Indonesia. Hasil pengujian didapatkan nilai kuat tekan beton normal sebesar 42,112 pada usia 28 hari. Untuk nilai kuat tekan beton SCC pada umur 28 hari optimum pada variasi SCC-3 sebesar 43,063 MPa. Nilai kuat tarik belah beton normal pada usia 28 hari sebesar 9,52 MPa, sedangkan untuk beton SCC optimum pada variasi SCC-3 dengan nilai 11,172 MPa pada usia 28 hari. Nilai modulus elastisitas beton SCC paling tinggi terdapat pada variasi SCC-3 dengan 30839,636 MPa.

Penelitian oleh Gražulytė dkk. (2020) memvariasikan kadar *silica fume* sebagai bahan-tambah campuran beton mutu tinggi. Kadar *silica fume* yang digunakan adalah 0%, 7%, dan 10% dari berat semen. Kadar air semen yang digunakan adalah 0,4. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan *cyclic loading* pada beton. Hasil pengujian didapatkan kuat tekan beton optimum sebesar 60,4 MPa dengan pada kadar penambahan *silica fume* 7%. Pada beton dengan *silica fume* 0% dan 10%, nilai kuat tekan beton yang dihasilkan adalah 43,9 MPa dan 58,8 MPa. Nilai kuat tarik dan kuat lentur optimum dihasilkan pada variasi *silica fume* 7% dengan nilai 3,3 MPa dan 7,3 MPa. Penambahan *silica fume* menaikkan ketahanan beton terhadap beban siklik sebesar 21-45%. Beton dengan *silica fume* sebesar 7% menunjukkan perilaku yang lebih baik.

2.3 Perbandingan Penelitian

Perbandingan penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Rencana Penelitian

No	Peneliti	Judul Penelitian	Batasan	Parameter yang Diuji	Hasil Penelitian
1.	Hadori dkk. (2015)	Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Penambahan <i>Fly Ash</i> dan <i>Admixture Superplasticizer</i>	<p>1. Penggunaan <i>fly ash</i> sebesar 10% dari berat semen dan digunakan sebagai pengganti sebagian semen.</p> <p>2. Variasi <i>superplasticizer</i> adalah 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,2% dan 1,5%.</p> <p>3. Jenis <i>superplasticizer</i> adalah produk Sika (Viscocrete 10), BASF (Glanium 8370), dan Normet (60 RW).</p> <p>4. Usia beton adalah 28 hari.</p> <p>5. Tidak disebutkan mutu beton rencana.</p>	1. Kuat tekan beton.	Hasil pengujian kuat tekan beton diperoleh nilai optimum pada variasi 0,3% <i>superplasticizer</i> produk Sika dan <i>fly ash</i> 10% dengan nilai 42,81 MPa. Nilai ini meningkat 17,84% dibanding dengan variasi beton normal, yaitu 36,33 MPa. Sedangkan untuk produk BASF dan Normet, optimum pada kadar 0,6% dengan nilai kuat tekan beton 40,93 MPa dan 40,76 MPa. Nilai ini meningkat sebesar 9,09% dan 2,13% dari variasi beton normal, yaitu 37,52 MPa dan 39,91 MPa.

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Rencana Penelitian

2.	Aliabdo dkk. (2016)	<i>Utilization of Waste Glass Powder in The Production of Cement and Concrete</i>	<p>1. <i>Mix design</i> beton dilakukan dengan kekuatan 33 MPa dan 45 MPa.</p> <p>2. Variasi penambahan serbuk kaca adalah 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat semen.</p> <p>3. Serbuk kaca yang digunakan adalah sisa-sisa potongan kaca yang lolos saringan no. 200 dan memiliki berat jenis 2,62.</p> <p>4. Pengujian dilakukan pada umur 7, 28, dan 56 hari.</p>	<p>1. Kuat tekan beton.</p> <p>2. Kuat tarik belah beton.</p>	<p>Nilai kuat tekan beton untuk <i>mix design</i> 33 MPa optimum pada kadar 15% dengan kekuatan 34,20 MPa, 37,90 MPa, dan 41 MPa untuk umur 7, 28, dan 56 hari. Untuk <i>mix design</i> 45 MPa optimum pada kadar 20% dengan kekuatan 41,80 MPa, 49,21 MPa, dan 54,84 MPa untuk umur 7,28, dan 56 hari. Nilai <i>slump</i> menurun seiring dengan penambahan serbuk kaca.</p> <p>Nilai kuat tarik belah beton untuk <i>mix design</i> 33 MPa optimum pada kadar 15% dengan kekuatan 3,26 MPa untuk umur 7 hari dan kadar 10% dengan kekuatan 3,91 MPa dan 4,44 MPa untuk umur 28 dan 56 hari. Untuk <i>mix design</i> 45 MPa optimum pada kadar 20% dengan kekuatan 4,22 MPa, 4,66 MPa, dan 5,16 MPa untuk umur 7, 28 dan 56 hari.</p>
----	------------------------	---	--	---	--

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Rencana Penelitian

3.	Nst (2017)	Pengaruh Penambahan <i>Silica Fume</i> dan <i>Superplasticizer</i> pada <i>Self Compacting Concrete</i>	<p>1. Mutu beton rencana adalah 41,4 MPa.</p> <p>2. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari.</p> <p>3. <i>Mix design</i> menggunakan SNI 03-6468-2000.</p> <p>4. <i>Silica fume</i> dan <i>superplasticizer</i> menggunakan produk PT. Sika Indonesia.</p> <p>5. Kadar <i>silica fume</i> adalah 10% dari berat semen.</p> <p>6. Kadar <i>superplasticizer</i> adalah 0,8%, 1%, 1,2%, 1,4%, dan 1,6% dari berat semen.</p> <p>7. Ukuran maksimal agregat kasar adalah 10 mm.</p> <p>8. Nilai w/c maksimum 0,3.</p>	<p>1. Kuat tekan beton.</p> <p>2. Kuat tarik belah beton.</p> <p>3. Modulus elastisitas beton.</p>	Hasil pengujian didapatkan nilai kuat tekan beton normal sebesar 42,112 pada usia 28 hari. Untuk nilai kuat tekan beton SCC pada umur 28 hari optimum pada variasi SCC-3 sebesar 43,063 MPa. Nilai kuat tarik belah beton normal pada usia 28 hari sebesar 9,52 MPa, sedangkan untuk beton SCC optimum pada variasi SCC-3 dengan nilai 11,172 MPa pada usia 28 hari Nilai modulus elastisitas beton SCC paling tinggi terdapat pada variasi SCC-3 dengan 30839,636 MPa.
----	------------	---	---	--	---

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Rencana Penelitian

4.	Apriwelni & Wirawan (2020)	Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Memanfaatkan <i>Fly Ash</i> dan Bubuk Kaca sebagai Bahan Pengisi	<p>1. Variasi serbuk kaca 5% dan 10% dari berat semen dan digunakan sebagai bahan pengisi.</p> <p>2. Serbuk kaca berasal dari kaca limbah tidak terpakai dan botol kaca yang lolos saringan no. 50, no. 100, dan no. 200.</p> <p>3. Variasi <i>fly ash</i> adalah 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen.</p> <p>4. Mutu beton rencana adalah 45 MPa dengan nilai <i>slump</i> rencana 30-60 mm dan usia beton 28 hari.</p> <p>5. Ukuran maksimal batu pecah adalah 20 mm.</p> <p>6. <i>Mix design</i> menggunakan SNI 03-2834-2000 yang dimodifikasi.</p>	1. Kuat tekan beton.	Hasil pengujian didapatkan nilai kuat tekan beton variasi 0% <i>fly ash</i> + 10% serbuk kaca pada umur benda uji 28 hari paling optimum, yaitu sebesar 46,77 MPa. Nilai kuat tekan beton terendah berada pada variasi 20% <i>fly ash</i> + 5% serbuk kaca dengan nilai 38,56 MPa. Nilai <i>slump</i> rata-rata tiap benda uji adalah 4 cm.
----	----------------------------	--	--	----------------------	---

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Rencana Penelitian

5.	Gražulytė dkk. (2020)	<i>Effect of Silica Fume on High-strength Concrete Performance</i>	<p>1. Variasi <i>silica fume</i> adalah 0%, 7%, dan 10% dari berat semen dan digunakan sebagai bahan pengisi.</p> <p>2. Digunakan <i>superplasticizer</i> sebesar 0,5% dari berat semen dan <i>air-entraining agent</i> sebesar 0,2% dari berat semen.</p> <p>3. Nilai w/c adalah 0,4.</p> <p>4. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari.</p> <p>5. Tidak disebutkan mutu beton rencana.</p>	<p>1. Kuat tekan beton.</p> <p>2. Kuat tarik belah beton.</p> <p>3. Kuat lentur beton.</p> <p>4. <i>Cyclic loading</i>.</p>	<p>Hasil pengujian didapatkan kuat tekan beton optimum sebesar 60,4 MPa pada kadar penambahan <i>silica fume</i> 7%. Pada beton dengan <i>silica fume</i> 0% dan 10%, nilai kuat tekan beton yang dihasilkan adalah 43,9 MPa dan 58,8 MPa. Nilai kuat tarik dan kuat lentur optimum dihasilkan pada variasi <i>silica fume</i> 7% dengan nilai 3,3 MPa dan 7,3 MPa. Penambahan <i>silica fume</i> menaikkan ketahanan beton terhadap beban siklik sebesar 21-45%. Beton dengan <i>silica fume</i> sebesar 7% menunjukkan perilaku yang lebih baik.</p> <p><i>Silica fume</i> mengandung silika yang tinggi sehingga bereaksi baik dengan semen sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih padat.</p>
----	-----------------------	--	--	---	---

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu dan Rencana Penelitian

6.	Nuruddin (2022)	Pengaruh Penggunaan Serbuk Kaca pada Campuran Beton Mutu Tinggi	<ol style="list-style-type: none"> 1. $f'_c = 45$ MPa. 2. Variasi serbuk kaca 0%, 2,5% 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen dan digunakan sebagai bahan pengisi 3. Kadar <i>superplasticizer</i> sebesar 0,3% menggunakan Viscocrete 3115N produk PT. Sika Indonesia. 4. Kadar <i>silica fume</i> adalah 10% dari berat semen dan menggunakan produk PT. Sika Indonesia. 5. Pengujian akan dilakukan pada umur 28 hari. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kuat tekan beton. 2. Kuat tarik belah beton. 3. Modulus elastisitas beton. 	
----	--------------------	--	---	---	--

2.4 Keaslian Penelitian

Penelitian yang dilakukan berbeda dengan penelitian sebelumnya seperti pada Tabel 2.1 di atas. Pengujian dilakukan dengan menambahkan serbuk kaca sebagai *filler*. Benda uji yang digunakan menggunakan variasi serbuk kaca 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen. *Silica fume* ditambahkan ke dalam campuran beton dengan kadar 10% dari berat semen. Penggunaan *silica fume* mengurangi kadar semen. Selain itu, digunakan bahan-tambah *superplasticizer* tipe Viscocrete 3115N untuk meningkatkan *workability* campuran beton. Kadar *superplasticizer* yang digunakan adalah sebesar 0,3% dari berat semen sesuai rekomendasi yang dianjurkan PT. Sika Indonesia dan hasil penelitian sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton mutu tinggi $f'_c \geq 45$ MPa pada umur 28 hari dengan benda uji berupa silinder ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Beton

Menurut SNI-03-2834-2000, beton merupakan campuran antara semen portland (PC) atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan-tambah membentuk massa padat. Menurut (Neville & Brooks, 1987) beton dapat dibuat dari beberapa tipe semen dan bisa juga mengandung pozzolan, *fly ash*, mikro silika, *admixture*, dan bahan-tambah lainnya. Beton yang baik dapat dilihat dari campurannya saat dibuat, seperti memiliki *workability* yang cukup, padat dan tidak berongga saat dicetak, dan homogen. Campuran material dalam pembuatan beton memengaruhi mutu beton nantinya.

Dalam dunia konstruksi, pekerjaan pengecoran beton perlu dilakukan dengan saksama. Saat pengecoran beton tidak boleh terjadi segregasi dan dilakukan pemadatan agar beton memadat dengan sempurna. Setelah beton dicor, beton harus dilakukan perawatan agar kekuatan beton optimum. Kekuatan beton merupakan hal yang bisa diukur dan menunjukkan seberapa baik mutu beton tersebut. Beton sendiri banyak digunakan dalam proyek konstruksi karena memiliki beberapa kelebihan, seperti yang dinyatakan oleh (Mulyono, 2004) yaitu:

1. beton mudah dibentuk sesuai dengan kebutuhan konstruksi,
2. beton mampu memikul beban yang berat,
3. beton memiliki daya tahan terhadap temperatur yang tinggi, dan
4. biaya pemeliharaan beton kecil.

Namun, beton juga memiliki kekurangan, yaitu:

1. jika sudah jadi, bentuk beton sulit untuk diubah,
2. saat pelaksanaan pekerjaan beton, dibutuhkan ketelitian yang tinggi,
3. beton memiliki massa yang berat, dan
4. beton memiliki daya pantul suara yang keras.

3.2 Material Penyusun Beton

Campuran material dalam pembuatan beton memengaruhi mutu dan kekuatan beton nantinya. Untuk itu, pemilihan material beton harus dilakukan dengan baik dan dilakukan pengujian agar material tersebut terbukti layak sesuai standar yang berlaku. Bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan beton adalah semen portland (PC), agregat halus, agregat kasar, air dan bahan-tambah (serbuk kaca, *silica fume*, dan *superplasticizer*)

3.2.1 Semen portland (PC)

Semen portland adalah bahan ikat dalam campuran material beton. Semen akan bereaksi ketika bertemu dengan air, oleh karena itu semen dan air tergolong sebagai kelompok aktif dalam campuran beton. Menurut SNI-15-2049-2004, semen portland dibagi menjadi 5 jenis, rinciannya dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Jenis Semen Portland

Jenis semen portland	Kegunaan
Jenis I	Digunakan untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
Jenis II	Digunakan ketika memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
Jenis III	Digunakan ketika memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
Jenis IV	Digunakan ketika memerlukan kalor hidrasi rendah.
Jenis V	Digunakan ketika memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

(Sumber : SNI 15-2049-2004)

Dalam semen juga terkandung beberapa bahan yang akan bereaksi dengan air dan dengan agregat. Bahan tersebut menurut (Neville & Brooks, 1987) dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Kandungan Semen (Neville & Brooks, 1987)

Kandungan	Presentase (%)
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0,5-6,0
MgO	0,1-4,0
Alkalis	0,2-1,3
SO ₃	1-3

Semen terdiri dari berbagai jenis, diantaranya adalah *Portland Composite Cement* (PCC) dan *Portland Pozzolan Cement* (PPC). Menurut SNI 15-7064-2004), PCC adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik dapat terdiri dari terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silikat, dan batu kapur. Kadar total bahan anorganik 6%-35% dari massa semen portland komposit. PPC menurut SNI 15-0302-2004 adalah semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen portland dengan pozzolan halus yang diproduksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozzolan bersama-sama atau mencampur secara merata bubuk semen portland dengan bubuk pozzolan. Kadar pozzolan 6%-40% massa semen portland pozzolan.

Pozzolan adalah bahan yang mengandung silika dan alumina. Pozzolan dalam bentuknya yang halus apabila bertemu dengan air akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida dan membentuk senyawa dengan sifat seperti semen. Dalam penelitian ini digunakan *Portland Composite Cement* (PCC) tipe I merek Semen Gresik. Penggunaan PCC agar campuran beton tidak terpengaruh pozzolan tambahan yang terkandung dalam PPC. Penggunaan semen tipe I karena campuran beton dibuat tanpa syarat-syarat khusus seperti yang terdapat dalam semen tipe lainnya.

3.2.2 Agregat halus

Agregat halus adalah agregat yang butirannya lolos saringan 4,8 mm. Agregat halus memiliki persyaratan umum sesuai dengan ASTM C.33, sebagaimana dijelaskan berikut ini.

1. Agregat halus memiliki butiran yang kuat dan tajam serta tidak mudah hancur oleh panas atau hujan.
2. Agregat halus harus terdiri dari butiran yang beragam.
3. Kandungan lumpur maksimum adalah 5%, jika lebih maka harus dicuci.

Agregat halus yang digunakan berasal dari Sungai Progo, Kulon Progo. Pengujian agregat halus diperlukan agar kualitas material yang digunakan sesuai standar. Tahapan pengujian yang diuraikan sebagai berikut ini.

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air.

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan berat jenis mutlak, berat jenis kering permukaan (SSD), berat jenis semu, dan angka penyerapan air dalam agregat halus. Pengertiannya adalah sebagai berikut ini.

- a. Berat jenis mutlak (*bulk specific gravity*).

Berat jenis mutlak adalah perbandingan antara berat agregat kering dengan berat air suling yang isinya sama dengan agregat dalam keadaan jenuh pada kondisi suhu tertentu.

- b. Berat jenis kering permukaan (*saturated surface dry*).

Berat jenis kering permukaan adalah berat agregat kering permukaan dengan berat air suling yang isinya sama dengan agregat dalam keadaan jenuh pada kondisi suhu tertentu.

- c. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*).

Berat jenis semu adalah berat agregat kering dengan berat air suling yang isinya sama dengan agregat pada kondisi suhu tertentu.

- d. Penyerapan air.

Penyerapan air adalah perbandingan berat air yang dapat diserap pori terhadap berat agregat kering yang dinyatakan dalam persen.

Perhitungan yang digunakan menggunakan Persamaan 3.1 sampai 3.4 berikut ini.

$$\text{Berat jenis mutlak} = \frac{Bk}{B + 500 - Bt} \quad (3.1)$$

$$\text{Berat jenis SSD} = \frac{500}{B + 500 - Bt} \quad (3.2)$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{Bk}{B + Bk - Bt} \quad (3.3)$$

$$\text{Penyerapan air} = \frac{500 - Bk}{Bk} \times 100\% \quad (3.4)$$

Keterangan:

Bk = berat pasir kering mutlak (gram),

Bt = berat piknometer berisi air dan pasir (gram), dan

B = berat piknometer berisi air (gram).

2. Pengujian berat isi padat.

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan berat isi padat agregat halus dengan membandingkan berat agregat dalam keadaan padat dengan volume silinder yang digunakan saat pengujian. Perhitungan yang digunakan menggunakan Persamaan 3.5 berikut ini.

$$\text{Berat isi padat} = \frac{W}{v} \quad (3.5)$$

Keterangan:

W = berat agregat (gram),

v = volume silinder (cm³).

3. Analisa saringan.

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dengan saringan. Pengujian ini juga dilakukan untuk mengetahui modulus halus butir. Modulus halus butir adalah indeks yang digunakan untuk mengukur kehalusan dari butir-butir agregat, semakin kecil nilai modulus halus butir, maka semakin kecil butir agregat. Perhitungan yang digunakan menggunakan Persamaan 3.6 dan 3.7 berikut ini.

$$\text{Presentase berat hilang} = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (3.6)$$

$$\text{Modulus halus butir} = \frac{\Sigma(\%kumulatif) - 100}{100} \quad (3.7)$$

Keterangan:

- a = berat agregat kering mutlak sebelum diayak (gram),
 b = berat agregat kering mutlak setelah diayak (gram), dan
 $\Sigma(\%kumulatif)$ = berat tertinggal kumulatif (%).

4. Uji lolos saringan No. 200.

Pengujian ini untuk menentukan banyaknya agregat yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm) setelah agregat dicuci hingga jernih. Pengujian ini juga dilakukan untuk mengetahui kadar lumpur yang masih lolos saringan No. 200 dan terkandung dalam agregat halus. Kadar lumpur yang masih diperbolehkan dalam syarat menurut SII 0052-80 maksimum 5% (Mulyono, 2004). Kandungan lumpur yang melebihi batas maksimum dapat menyebabkan gangguan pada ikatan antara semen dengan agregat halus. Perhitungan yang digunakan menggunakan Persamaan 3.8 berikut ini.

$$\text{Kadar lumpur} = \frac{W1 - W2}{W1} \times 100\% \quad (3.8)$$

Keterangan:

- W1 = berat agregat halus kering oven (gram),
 W2 = berat agregat halus kering oven setelah dicuci (gram).

3.2.3 Agregat kasar

Menurut SNI 03-2847-2002, agregat kasar adalah kerikil hasil disintegrasi alami batuan atau pasir. Hasil disintegrasi ini berupa batu pecah yang memiliki butir antara 5 mm sampai 40 mm. Menurut SK SNI S-04-1989-F, agregat kasar memiliki persyaratan sebagai berikut ini.

1. Agregat kasar dapat berupa kerikil hasil disintegrasi alami maupun batu pecah dari pemecahan batu.
2. Agregat kasar harus terdiri dari butiran yang keras dan tidak berpori. Butirannya bersifat kekal, yaitu tidak hancur dan pecah karena pengaruh cuaca. Jika menggunakan butiran pipih, maka maksimum hanya 20% dari

berat agregat seluruhnya.

3. Kandungan lumpur dalam agregat kasar maksimum 1% (lumpur adalah bagian yang melalui ayakan 0,075 mm). Jika melebihi, maka agregat harus dicuci.
4. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat perusak beton, seperti zat reaktif alkali.
5. Besar butiran agregat maksimum adalah $\frac{1}{5}$ jarak terkecil antara bidang-bidang samping cetakan, $\frac{1}{3}$ dari tebal pelat, atau $\frac{3}{4}$ jarak bersih minimum antara tulangan.

Agregat kasar yang digunakan berasal dari Celereng, Kulon Progo. Pengujian agregat kasar diperlukan agar kualitas material yang digunakan sesuai standar. Pengujian-pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut ini.

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air.

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan berat jenis mutlak, berat jenis kering permukaan (SSD), berat jenis semu, dan angka penyerapan air dalam agregat kasar. Pengertiannya adalah sebagai berikut ini.

- a. Berat jenis mutlak (*bulk specific gravity*).

Berat jenis mutlak adalah perbandingan antara berat agregat kering dengan berat air suling yang isinya sama dengan agregat dalam keadaan jenuh pada kondisi suhu tertentu.

- b. Berat jenis kering permukaan (*saturated surface dry*).

Berat jenis kering permukaan adalah berat agregat kering permukaan dengan berat air suling yang isinya sama dengan agregat dalam keadaan jenuh pada kondisi suhu tertentu.

- c. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*).

Berat jenis semu adalah berat agregat kering dengan berat air suling yang isinya sama dengan agregat pada kondisi suhu tertentu.

- d. Penyerapan air.

Penyerapan air adalah perbandingan berat air yang dapat diserap pori terhadap berat agregat kering yang dinyatakan dalam persen.

Perhitungan yang digunakan menggunakan Persamaan 3.9 sampai 3.12

sebagai berikut ini.

$$\text{Berat jenis mutlak} = \frac{Bk}{Bj - Ba} \quad (3.9)$$

$$\text{Berat jenis SSD} = \frac{Bj}{Bj - Ba} \quad (3.10)$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{Bk}{Bk - Ba} \quad (3.11)$$

$$\text{Penyerapan air} = \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\% \quad (3.12)$$

Keterangan:

BK = berat kerikil kering mutlak (gram),

BJ = berat kerikil kondisi jenuh kering muka (gram), dan

Ba = berat kerikil dalam air (gram).

2. Pengujian berat isi padat.

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan berat isi padat agregat kasar dengan membandingkan berat agregat dalam keadaan padat dengan volume silinder yang digunakan saat pengujian. Perhitungan berat isi padat agregat kasar sama dengan perhitungan berat isi padat agregat halus pada Persamaan 3.5.

3. Pengujian analisa saringan.

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat kasar dengan saringan. Pengujian ini juga dilakukan untuk mengetahui modulus halus butir. Modulus halus butir adalah indeks yang digunakan untuk mengukur kehalusan dari butir-butir agregat, semakin kecil nilai modulus halus butir, maka semakin kecil butir agregat. Perhitungan yang digunakan sama seperti perhitungan modulus halus butir agregat halus pada Persamaan 3.6 dan 3.7.

3.2.4 Air

Air adalah bahan yang digunakan untuk membuat semen menjadi pasta. Air membuat beton menjadi lebih lecah, sehingga bisa dikerjakan (*workable*). Syarat air yang dapat digunakan untuk campuran beton menurut Tjokrodimuljo

(1992) adalah sebagai berikut ini.

1. Bersih, tidak mengandung lumpur, minyak, dan benda terapung lainnya yang tampak secara visual.
2. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram.
3. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut seperti asam-asam dan zat organik lainnya yang dapat merusak beton lebih dari 15 gram/liter.
4. Kandungan klorida (Cl) maksimum 0,5 gram/liter dan senyawa sulfur maksimum 1 gram/liter.

Air harus dihitung dengan saksama. Rasio air dengan bahan bersifat semen disebut sebagai *water cement ratio* (w/c). Termasuk jika ada bahan-tambah yang bersifat semen, juga harus dihitung dengan menambahkan ke berat semen. Menurut SNI 03-6468-2000, *water cement ratio* untuk beton berkekuatan tinggi secara tipikal adalah antara 0,2 sampai 0,5.

Kadar air juga akan memengaruhi nilai *slump* campuran beton. *Slump* adalah tingkat kelecakan beton, semakin tinggi nilai *slump* berarti beton semakin mudah mengalir. Tingkat *workability* beton dapat dilihat dari nilai *slump*, semakin tinggi nilai *slump*, maka tingkat *workability*-nya makin tinggi. Menurut SNI 03-6468-2000, nilai *slump* umumnya sebesar 50-100 mm untuk beton berkekuatan tinggi. Sedangkan jika ditambahkan dengan *superplasticizer*, nilai *slump*-nya boleh lebih dari 200 mm.

3.3 Bahan-tambah

Bahan-tambah adalah bahan yang digunakan dalam campuran beton untuk mengubah karakteristik dari beton, seperti menambah kelecakan, mengurangi faktor air semen, dan memperlambat waktu pematangan beton. Bahan-tambah dapat ditambahkan ke dalam campuran beton saat proses pembuatan campuran. Penggunaan bahan-tambah perlu diperhatikan dengan saksama agar bahan tersebut dapat bekerja dengan baik (membuat kombinasi yang baik) dan tidak timbul ketidakcocokan dengan material utama beton. Bahan-tambah yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk kaca, *silica fume*, dan *superplasticizer*.

3.3.1 Serbuk kaca

Kaca merupakan bahan yang mudah ditemui sehari-hari. Selain itu, banyak hasil industri yang menggunakan kaca sebagai bahan utamanya, seperti industri pembuatan kaca dan botol minuman. Kaca mengandung zat-zat seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , dan CaO (Hanafiah, 2011). SiO_2 atau silika merupakan bahan yang dapat memengaruhi kuat tekan beton karena bahan silika ini juga terdapat pada semen. Menurut Darmawan dkk. (2007), semakin banyak silika yang terdapat dalam semen, nilai kuat tekan akan semakin besar. Scholes & Greene (1975) dalam Darmawan dkk. (2007) menyatakan bahwa kandungan silika dalam pembuatan botol sebesar 72,4%. Sedangkan Setiawan (2006) dalam Suwignyo (2015) menyatakan bahwa kandungan silika dalam *clear glass* adalah sebesar 73,2-73,5%.

Dalam penelitian ini akan digunakan serbuk kaca sebagai *filler*. Serbuk kaca yang digunakan merupakan hasil olahan limbah kaca bening dan botol kaca. Kandungan silika yang terdapat dalam serbuk kaca hasil limbah kaca bening dan botol kaca dapat memengaruhi kuat tekan beton. Kadar serbuk kaca yang akan digunakan adalah sebesar 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen. Ukuran serbuk kaca yang digunakan adalah lolos saringan no. 200.

3.3.2 Silica fume

Silica fume yang digunakan merupakan produk PT. Sika Indonesia dengan nama produk SikaFume. Produk ini adalah generasi terbaru dari bahan-tambah bubuk halus berdasarkan *silica fume technology*. Produk ini digunakan untuk meningkatkan kepadatan, ketahanan, dan kuat tekan dari beton. Keunggulan dari produk SikaFume ini adalah meningkatkan *workability* pada waktu yang lebih panjang, meningkatkan kohesi dan stabilitas dari *green concrete*, meningkatkan ketahanan, menurunkan permeabilitas, dan memiliki kekuatan awal yang tinggi. PT. Sika Indonesia menyarankan penggunaan SikaFume sebesar 3-10% dari berat semen. Penelitian oleh Nst (2017) menggunakan SikaFume sebesar 10% dari berat semen. Dalam penelitian ini, digunakan SikaFume sebesar 10% dari berat semen berdasarkan anjuran PT. Sika Indonesia dan penelitian terdahulu.

3.3.3 Superplasticizer

Superplasticizer yang digunakan adalah produk milik PT. Sika Indonesia, yaitu Viscocrete 3115N. Viscocrete 3115N adalah produk *superplasticizer* generasi ketiga untuk campuran beton dari PT. Sika Indonesia. Viscocrete 3115N ini tidak mengandung klorida atau bahan lain yang dapat menyebabkan korosi. *Superplasticizer* jenis Viscocrete 3115N ini berfungsi untuk meningkatkan kemampuan mengalir beton sehingga mudah dikerjakan, mengurangi kadar air, dan membuat beton memiliki sifat memadat sendiri. *Superplasticizer* ini cocok untuk digunakan pada beton jenis mutu tinggi. PT. Sika Indonesia merekomendasikan kadar penggunaan *superplasticizer* sebesar 0,3%-0,8% dari berat semen. Penelitian oleh Hadori dkk. (2015) menunjukkan hasil kuat tekan beton optimum jika menggunakan *superplasticizer* produk PT. Sika dengan kadar 0,3%. Berdasarkan rekomendasi PT. Sika Indonesia dan hasil penelitian sebelumnya tersebut, dalam penelitian ini digunakan kadar *superplasticizer* sebesar 0,3%.

3.4 Perencanaan Campuran Beton

Perencanaan campuran beton digunakan sesuai standar SNI 03-6468-2000. Penggunaan SNI 03-6468-2000 agar campuran beton menghasilkan mutu yang tinggi. Tata cara perencanaan pembuatan beton sesuai SNI 03-6468-2000 adalah sebagai berikut ini.

1. Menentukan kuat desak (f'_c) beton pada umur 28 hari.
2. Menentukan kuat desak beton yang ditargetkan.

Kuat desak beton yang ditargetkan diperlukan agar nilai kuat desak yang dicapai nantinya melebihi nilai kuat desak beton yang disyaratkan. Ada dua cara untuk menghitung nilai kuat desak yang ditargetkan. Jika sampel akan dibuat berdasarkan campuran coba di laboratorium, maka digunakan Persamaan 3.13 di bawah. Namun, jika sampel dibuat berdasarkan pengalaman di lapangan, maka digunakan Persamaan 3.14 berikut ini.

$$f'_{cr} = \frac{f'_c + 9,66MPa}{0,90} \quad (3.13)$$

$$f'_{cr} = f'_c + 1,34 \times s \quad (3.14)$$

Keterangan:

f'_{cr} = kuat desak rata-rata yang ditargetkan (MPa),
 f'_c = kuat desak rata-rata yang disyaratkan (MPa), dan
 s = deviasi standar.

3. Menentukan nilai *slump*.

Nilai *slump* untuk beton berkekuatan tinggi tanpa *superplasticizer* adalah sebesar 50-100 mm. Untuk beton berkekuatan tinggi dengan *superplasticizer*, nilai *slump*-nya boleh melebihi 200 mm.

4. Menentukan ukuran agregat kasar maksimum.

Ukuran agregat kasar maksimum untuk kuat tekan rata-rata <62,1 MPa adalah 20-25 mm. Ukuran agregat kasar maksimum untuk kuat tekan rata-rata >62,1 MPa adalah 10-15 mm. Ukuran agregat kasar maksimum ini mengacu pada SNI 03-2947-1992 yaitu:

- 1/5 lebar minimum acuan,
- 1/3 tebal pelat beton, dan
- 3/4 jarak bersih minimum antar tulangan.

5. Menentukan kadar agregat kasar optimum.

Kadar agregat kasar optimum digunakan bersama dengan agregat halus yang memiliki modulus halus butir 2,5-3,2. Berat agregat kasar padat kering oven per- m^3 beton adalah besarnya fraksi volume padat kering oven dikali berat isi padat kering oven (kg/m^3). Tabel fraksi volume agregat kasar optimum dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.3 Fraksi Volume Agregat Kasar Optimum (SNI 03-6468-2000)

Ukuran (mm)	10	15	20	25
Fraksi volume padat kering oven	0,65	0,68	0,72	0,75

6. Menentukan estimasi kadar air dan kadar udara.

Estimasi kadar air dan kadar udara dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3.4 Estimasi Kebutuhan Air dan Kadar Udara Beton Segar (SNI 03-6468-2000)

Air Pencampur (liter/m ³)					Keterangan
<i>Slump</i>	Ukuran Agregat Kasar Maksimum (mm)				
(mm)	10	15	20	25	
25-50	184	175	169	166	
50-75	190	184	175	172	
75-100	196	190	181	178	
Kadar udara (%)	3,0	2,5	2,0	1,5	Tanpa <i>Superplasticizer</i>
	2,5	2,0	1,5	1,0	Dengan <i>Superplasticizer</i>

Kadar rongga udara dan koreksi kadar air dapat dihitung dengan Persamaan 3.15 dan 3.16 berikut ini.

$$V = \frac{[1 - \text{Berat isi kering oven}]}{\text{berat jenis relatif (kering)}} \times 100 \quad (3.15)$$

$$\text{koreksi} = [v - 35] \times 4,75 \quad (3.16)$$

Keterangan:

V = kadar rongga udara.

Sehingga kebutuhan air total dapat dihitung dengan Persamaan 3.17 berikut.

$$\text{Kebutuhan air total} = \text{estimasi kebutuhan air} + \text{koreksi kadar air} \quad (3.17)$$

7. Menentukan nilai Faktor Air Semen (FAS).

Nilai FAS bisa ditentukan dengan interpolasi berdasarkan kuat desak rata-rata rencana, umur rencana, dan ukuran butiran agregat kasar maksimum. Jika menggunakan *superplasticizer*, maka nilai FAS akan berbeda karena penggunaan *superplasticizer* memengaruhi kadar air yang digunakan. Perbandingan antara berat air dan berat semen yang digunakan disebut rasio (w/c). Berikut merupakan nilai rasio (w/c) maksimum yang disarankan untuk campuran beton tanpa *superplasticizer* yang dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3.5 Rasio (w/c) disarankan (Campuran Tanpa *Superplasticizer*) (SNI 03-6468-2000)

Kekuatan Lapangan f'_{cr} (MPa)		(w/c)			
		Ukuran Agregat Kasar Maksimum (mm)			
		10	15	20	25
48,3	28 hari	0,42	0,41	0,4	0,39
	56 hari	0,46	0,45	0,44	0,43
55,2	28 hari	0,35	0,34	0,33	0,33
	56 hari	0,38	0,37	0,36	0,35
62,1	28 hari	0,3	0,29	0,29	0,28
	56 hari	0,33	0,32	0,32	0,3
69	28 hari	0,26	0,26	0,25	0,25
	56 hari	0,29	0,28	0,27	0,26

Sedangkan jika campuran beton menggunakan bahan-tambah *superplasticizer*, nilai (w/c) dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6 Rasio (w/c) disarankan (Campuran dengan *Superplasticizer*) (SNI 03-6468-2000)

Kekuatan Lapangan f'_{cr} (MPa)		(w/c)			
		Ukuran Agregat Kasar Maksimum (mm)			
		10	15	20	25
48,3	28 hari	0,5	0,48	0,45	0,43
	56 hari	0,55	0,52	0,48	0,46
55,2	28 hari	0,44	0,42	0,4	0,38
	56 hari	0,48	0,45	0,42	0,4
62,1	28 hari	0,38	0,36	0,35	0,34
	56 hari	0,42	0,39	0,37	0,36
69	28 hari	0,33	0,32	0,31	0,3
	56 hari	0,37	0,35	0,33	0,32
75,9	28 hari	0,3	0,29	0,27	0,27
	56 hari	0,33	0,31	0,29	0,29
82,8	28 hari	0,27	0,26	0,25	0,25
	56 hari	0,3	0,28	0,27	0,26

8. Menghitung kadar bahan bersifat semen.

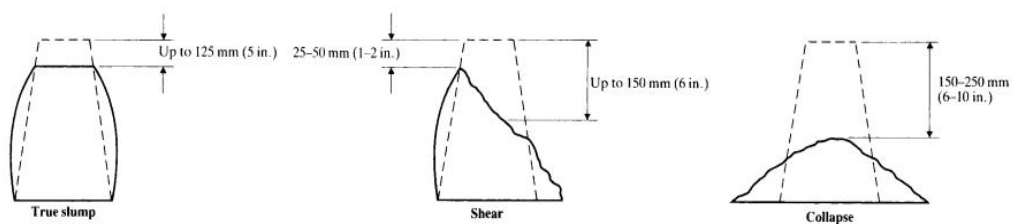
Kadar bahan bersifat semen untuk setiap m^3 dapat dihitung dengan Persamaan 3.18 berikut ini.

$$\text{kadar bahan bersifat semen} = \frac{\text{kebutuhan air total}}{\text{rasio (w/c)}} \quad (3.18)$$

3.5 Pengujian *Slump*

Pengujian *slump* dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan campuran beton. *Workability* campuran beton dapat dilihat dari nilai *slump* yang dihasilkan. Nilai *slump* yang tinggi berarti campuran beton lebih mudah mengalir sehingga *workability*-nya tinggi. Menurut Neville & Brooks (1987) terdapat 4 kategori nilai *slump*, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, dan tinggi. *Slump* sangat rendah memiliki rentang nilai 0-25 mm, rendah memiliki rentang nilai 25-50 mm, sedang memiliki rentang nilai 50-100 mm, dan tinggi memiliki rentang nilai 100-175 mm.

Pengujian *slump* dilakukan dengan kerucut abrams. Campuran beton segar dimasukkan kedalam kerucut abrams dan setiap 1/3 bagian ditumbuk sebanyak 25 kali. Kerucut abrams harus dipastikan tertahan rapat pada permukaan lantai kerja dan tidak terdapat celah pada bagian bawah kerucut. Jika sudah penuh, maka kerucut abrams diangkat secara tegak dan perlahan. Campuran beton akan runtuh secara perlahan sesuai dengan kelecakan yang dimiliki. Selisih ketinggian antara permukaan campuran beton awal dengan permukaan campuran beton setelah runtuh adalah nilai *slump*. Dalam Neville & Brooks (1987), terdapat 3 tipe *slump*, yaitu *true slump*, *shear slump*, dan *collapse slump*. *True slump* terjadi apabila permukaan campuran beton menurun semua. Hal ini menandakan campuran beton sudah homogen. *Shear slump* terjadi apabila permukaan beton runtuh pada satu sisinya saja. Hal ini menandakan campuran beton belum teraduk sempurna dan perlu diulang. *Collapse slump* umumnya terjadi pada campuran beton yang memiliki nilai *slump* yang tinggi atau terdapat bahan-tambah pengencer campuran beton. Gambar tipe-tipe *slump* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Tipe-tipe *Slump*

3.6 Pengujian Beton

Dalam penelitian ini, dilakukan 3 pengujian beton, yaitu pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas.

3.6.1 Kuat tekan

Kuat tekan beton adalah perbandingan beban yang diberikan per satuan luas. Kuat tekan beton menunjukkan mutu dari sebuah campuran beton. Semakin tinggi nilai kuat tekan, maka semakin tinggi mutu beton tersebut. Untuk menghitung nilai kuat tekan beton dapat digunakan Persamaan 3.19 berikut ini.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (3.19)$$

Keterangan:

- f'_c = kuat tekan beton (MPa),
- P = beban maksimum (N), dan
- A = luas penampang benda uji (mm²).

3.6.2 Kuat tarik belah

Kekuatan tarik belah beton berkisar antara 8-12% dari nilai kuat tekan beton (Kosmatka dkk. 2002). Perhitungan yang digunakan untuk kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Persamaan 3.20 berikut ini.

$$f_{ct} = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times L} \quad (3.20)$$

Keterangan:

- F_{ct} = kuat tarik belah (MPa),
- P = beban pada waktu belah (N),
- D = diameter benda uji silinder (mm), dan
- L = panjang benda uji silinder (mm).

3.6.3 Modulus elastisitas

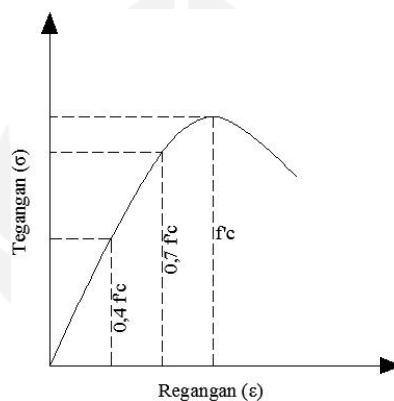
Modulus elastisitas beton adalah perbandingan antara tegangan dan regangan aksial dalam deformasi yang elastis. Modulus elastisitas beton

dinyatakan dalam satuan MPa. Menurut ASTM C-469-94, nilai modulus elastisitas beton dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.21 berikut ini.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (3.21)$$

Keterangan:

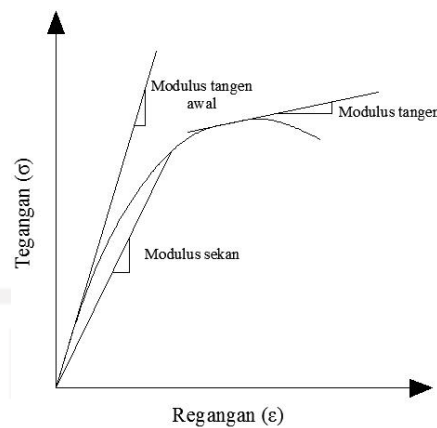
- E = modulus elastisitas,
- S_2 = tegangan ketika 40% dari beban *ultimate* (MPa),
- S_1 = tegangan ketika regangan 0,000050 (MPa), dan
- ε_2 = regangan akibat Tekanan S_2 .



Gambar 3.2 Grafik Kurva Hubungan Tegangan Regangan Beton

(Sumber : Nawy, 1990)

Kurva tersebut merupakan kurva linier pada taraf pembebanan awal, sehingga modulus elastisitas pada kurva tersebut yaitu garis singgung pada kurva tegangan-regangan dari titik pusat. Kemiringan garis singgung tersebut didefinisikan sebagai modulus tangen awal. Jika dibuat modulus tangen pada titik pusat dengan tegangan sekitar $0,4 \times f'_c$ maksimum, maka disebut modulus elastisitas sekan beton. Modulus sekan ini merupakan hasil dari modulus elastisitas yang ditinjau. Modulus tangen dan modulus sekan dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3.3 Modulus Sekan dan Modulus Tangen Beton

(Sumber : Nawy, 1990)

Selain itu, menurut SNI 03-2847-2019 modulus elastisitas juga dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.22 jika diketahui berat volumenya dan Persamaan 3.23 jika tidak diketahui berat volumenya.

$$E_c = W_c^{1,5} \times 0,043 \times \sqrt{f'_c} \quad (3.22)$$

Keterangan:

Untuk W_c dengan rentang 1400-2560 kg/m³.

E_c = modulus elastisitas beton (MPa),

W_c = berat volume beton normal (kg/m³), dan

f'_c = kuat tekan beton (MPa).

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c} \quad (3.23)$$

Keterangan:

E_c = modulus elastisitas beton (MPa),

f'_c = kuat tekan beton (MPa).

3.7 Umur Beton

Kuat tekan beton akan bertambah seiring dengan umur beton yang bertambah. Menurut Mulyono (2004), kekuatan beton meningkat secara cepat hingga umur 7 hari, setelah itu kenaikannya kecil. Umumnya kekuatan tekan rencana beton dihitung dalam 28 hari.

3.8 Perawatan Beton

Perawatan beton ditujukan agar beton mendapatkan kualitas yang optimum. Perawatan beton yang digunakan adalah dengan *water curing*. Perawatan ini bertujuan untuk menghambat penguapan air pada adukan beton. Langkah yang dilakukan adalah dengan menaruh beton segar di dalam air. Cara lainnya adalah menyelimuti beton dengan plastik hitam untuk menjaga kelembaban, menyelimuti permukaan beton dengan karung goni basah, dan membasahi permukaan beton (Mulyati & Arkis, 2020).

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Umum

Metode penelitian adalah cara yang digunakan untuk mengambil, menganalisis, dan mengidentifikasi variabel atau suatu pokok permasalahan yang dilakukan untuk mencari jawaban atau hasil dengan tujuan dapat ditemukan pengetahuan dari permasalahan tersebut. Secara umum tahapan-tahapan penelitian adalah sebagai berikut ini.

1. Tahapan persiapan, meliputi persiapan pengadaan bahan dan material campuran beton, pemeriksaan material dan alat sesuai standar yang berlaku, dan persiapan lokasi penelitian.
2. Tahapan pelaksanaan, meliputi pembuatan benda uji dan pengecekan *slump* pada campuran beton segar.
3. Tahapan pengujian, dilakukan setelah beton segar dicetak dan dilakukan proses perawatan selama 28 hari, lalu dilakukan pengujian berupa kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas.
4. Tahapan pengumpulan data, dilakukan setelah pengujian dilakukan di laboratorium.
5. Tahapan pengolahan data, meliputi analisis data hasil pengujian sesuai dengan standar yang digunakan.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.

4.3 Sampel Penelitian

Sampel penelitian berupa beton berbentuk silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Sampel diuji dengan pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas. Mutu beton rencana yang digunakan adalah 45 MPa.

Rincian benda uji tiap variasi adalah 3 sampel untuk uji tekan dan modulus elastisitas dan 3 sampel untuk uji tarik belah beton. Total benda uji berjumlah 30 buah.

4.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

4.4.1 Bahan yang digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Semen portland.

Semen yang digunakan untuk pembuatan campuran beton menggunakan semen *Portland Composite Cement* (PCC) merek Semen Gresik. Semen ini merupakan jenis semen tipe I yang ditujukan untuk penggunaan umum tanpa syarat khusus. Gambar semen portland yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Semen Portland (Semen Gresik)

2. Agregat halus.

Agregat halus yang digunakan berasal dari Sungai Progo, Kulon Progo, DIY. Gambar agregat halus Sungai Progo dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Agregat Halus (Pasir) Sungai Progo

3. Agregat kasar.

Agregat kasar yang digunakan berasal dari Celereng, Kulon Progo, DIY. Agregat kasar yang digunakan berukuran maksimal 20 mm. Gambar agregat kasar yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Agregat Kasar (Kerikil) Celereng

4. Air.

Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.

5. Serbuk kaca.

Serbuk kaca merupakan bahan-tambah yang digunakan sebagai substitusi parsial semen. Serbuk kaca yang digunakan berasal dari limbah kaca botol dan kaca bening berukuran 200 *mesh*. Serbuk kaca yang digunakan adalah sebesar 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen. Gambar serbuk kaca yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Serbuk Kaca

6. *Silica fume.*

Silica fume adalah bahan-tambah untuk meningkatkan kuat tekan dan ketahanan beton. *Silica fume* yang digunakan merupakan produk PT. Sika Indonesia dengan nama produk SikaFume. Kadar *silica fume* yang digunakan adalah 10% dari berat semen. Gambar *silica fume* dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 *Silica Fume* (SikaFume)

7. *Superplasticizer*.

Superplasticizer merupakan bahan-tambah yang digunakan untuk meningkatkan *workability* beton. Campuran beton akan lebih mudah mengalir dan lebih mudah untuk dikerjakan. *Superplasticizer* yang digunakan merupakan produk dari PT. Sika Indonesia bernama Viscocrete 3115N. Kadar *superplasticizer* yang digunakan adalah sebesar 0,3% dari berat semen. Gambar *superplasticizer* dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 *Superplasticizer* Viscocrete 3115N

4.4.2 Peralatan yang digunakan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Timbangan, berkapasitas 30 kg untuk menimbang material dan benda uji yang digunakan. Gambar timbangan dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Timbangan

2. Piknometer, merupakan alat yang digunakan untuk mengukur massa jenis atau densitas fluida. Gambar piknometer dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Piknometer

3. Gelas ukur, digunakan untuk menakar atau mengukur material cair seperti air dan *superplasticizer*.
4. Ayakan, berfungsi untuk memisahkan agregat sesuai ukuran ayakan.
5. Saringan, berfungsi untuk memisahkan ukuran agregat kasar dan halus berdasarkan ukuran butiran saat pengujian analisa saringan. Gambar saringan dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4.9 Saringan

6. Mesin pengguncang (*shieve shaker*), digunakan untuk mengguncangkan agregat dalam saringan saat pengujian analisa saringan. Gambar mesin pengguncang dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10 Mesin Pengguncang (*Shieve Shaker*)

7. Cetakan beton silinder, digunakan untuk mencetak sampel uji beton. Silinder ini berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
8. Alat ukur, digunakan untuk mengukur dimensi benda uji sebelum dilakukan pengujian. Alat ukur yang digunakan berupa penggaris dan jangka sorong.
9. Oven, digunakan untuk mengeringkan agregat saat pengujian sifat. Oven yang digunakan harus dapat mencapai suhu 110°C. Gambar oven dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Oven

10. Ember, digunakan untuk menampung material campuran beton saat tahap pembuatan benda uji.
11. *Mixer* atau mesin pengaduk beton digunakan untuk membuat campuran beton. Gambar *mixer* dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.12 Mixer

12. Kerucut abrams, merupakan alat yang digunakan untuk mengukur nilai *slump* campuran beton. Gambar kerucut abrams dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 Kerucut Abrams

13. *Compression Testing Machine* (CTM), mesin ini digunakan untuk menguji kuat tekan, kuat tarik belah, dan digunakan saat pengujian modulus elastisitas.

Saat pengujian modulus elastisitas, diperlukan alat tambahan kompressometer untuk dipasang pada sampel benda uji. Gambar *Compression Testing Machine* (CTM) dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4.14 *Compression Testing Machine* (CTM)

4.5 Tahap Persiapan Penelitian

Tahapan persiapan penelitian dilakukan agar penelitian berjalan sesuai dengan standar yang berlaku dan mutu yang dihasilkan dapat terjaga.

4.5.1 Persiapan material

Material merupakan bahan penting dalam penelitian, untuk itu harus dipersiapkan dengan baik agar memiliki mutu yang baik. Material harus dalam kondisi yang baik agar hasil sampel benda uji yang dihasilkan juga baik. Material yang disiapkan dalam penelitian ini adalah semen portland, agregat halus, agregat kasar, serbuk kaca, *silica fume*, dan *superplasticizer*. Semen portland harus dalam keadaan kering saat penyimpanan. Agregat halus dan kasar diuji terlebih dahulu agar sesuai dengan standar yang berlaku. Serbuk kaca diayak menggunakan saringan No. 200. Alat juga dipersiapkan dengan baik agar penelitian berjalan dengan baik.

4.5.2 Pengujian material

1. Agregat halus.

Agregat halus perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui standar kelayakan materialnya. Pengujian yang dilakukan ada pengujian berat jenis dan penyerapan air, pengujian berat isi padat, pengujian analisa saringan, dan pengujian lolos saringan No. 200. Tahapan masing-masing pengujian dapat dilihat sebagai berikut.

a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air.

- 1) Agregat dikeringkan dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sampai agregat dalam keadaan berat tetap (3 kali proses penimbangan hasilnya tetap), selanjutnya didinginkan pada suhu ruangan, kemudian direndam dalam air selama 24 jam.
- 2) Lalu buang air perendam dengan hati-hati agar tidak ada butiran yang hilang, tebarkan agregat di atas talam/nampan, keringkan di udara panas dengan cara membalik-balik benda uji. Pengeringan dilakukan hingga mencapai keadaan kering permukaan jenuh.
- 3) Setelah itu pemeriksaan dilakukan dalam keadaan kering permukaan jenuh dengan mengisikan agregat ke dalam kerucut terpancung, lalu padatkan dengan batang penumbuk sebanyak 25 kali dan ratakan permukaannya. Keadaan kering permukaan jenuh tercapai bila kerucut diangkat lalu benda uji runtuh akan tetapi masih dalam keadaan bentuk cetakan.
- 4) Langkah 1,2, dan 3 merupakan pengecekan agregat dalam keadaan jenuh kering permukaan (SSD). Apabila telah tercapai SSD, maka masukkan benda uji sebanyak 500 gram ke dalam piknometer, selanjutnya masukkan air suling hingga 90% isi piknometer, lalu putar piknometer sambil diguncangkan sampai tidak terlihat gelembung udara di dalamnya.
- 5) Rendam piknometer dalam air dan ukur suhu air (suhu standar 25°C).
- 6) Tambahkan air suling sampai tanda batas.
- 7) Timbang piknometer yang berisi air dan benda uji.

- 8) Keluarkan benda uji, dan keringkan dalam oven dengan suhu (110 ± 5) °C sampai berat tetap, lalu dinginkan benda uji dalam desikator.
 - 9) Setelah dingin, timbang kembali.
 - 10) Timbang berat piknometer dengan penuh air dan ukur suhu airnya.
 - 11) Lakukan perhitungan dengan Persamaan 3.1 hingga 3.4.
- b. Pengujian berat isi padat.
- 1) Pengujian berat isi padat dilakukan dengan benda uji dalam keadaan jenuh atau kering permukaan (SSD).
 - 2) Timbang cetakan berupa silinder dan balok yang akan digunakan dalam penelitian ini. Gunakan cetakan silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
 - 3) Letakkan silinder dalam posisi yang datar.
 - 4) Masukkan benda uji ke dalam cetakan silinder. Saat memasukkan benda uji ke dalam cetakan silinder ada beberapa tahap, yaitu masukkan benda uji sebanyak $\frac{1}{3}$ dari volume isi cetakan silinder, setelah itu tumbuk benda uji yang telah dimasukkan ke dalam cetakan silinder sebanyak 25 kali, lakukan tahap tersebut sampai cetakan silinder penuh dengan benda uji lalu timbang cetakan silinder.
 - 5) Setelah itu, berat isi padat pada agregat sudah bisa dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.5.
- c. Pengujian analisa saringan.
- 1) Pada tahap pertama, yaitu keringkan benda uji dalam oven pada suhu (110 ± 5)°C sampai berat tetap. Untuk mendapatkan hasil dengan ketelitian yang tinggi, sebaiknya dilakukan pengujian minimal 2 kali.
 - 2) Keluarkan benda uji dari oven, kemudian dinginkan benda uji pada suhu ruang selama 1-3 jam.
 - 3) Pada langkah 1 dan 2 adalah proses dalam membuat benda uji agar menjadi kering mutlak. Setelah benda uji kering oven, selanjutnya menimbang benda uji sebanyak 2000 gram.
 - 4) Setelah itu, lakukan penyusunan saringan dari lubang yang paling

besar (atas) ke lubang yang kecil (bawah) sesuai urutan lubang ayakan yang dianjurkan pada rencana penelitian. Masukkan benda uji ke dalam ayakan, selanjutnya letakkan ayakan pada mesin pengguncang.

- 5) Jalankan mesin pengguncang selama 10-15 menit.
- 6) Keluarkan benda uji dari masing-masing saringan dan letakkan dalam cawan.
- 7) Lalu timbang masing-masing benda uji yang tertahan di masing-masing saringan.
- 8) Setelah itu dapat dilakukan analisis.

d. Pengujian lolos saringan No. 200.

- 1) Pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan benda uji dalam keadaan kering oven.
- 2) Timbang benda uji dalam keadaan kering oven.
- 3) Letakkan benda uji dalam saringan dan alirkan air di atasnya.
- 4) Gerakkan benda uji dalam saringan dengan aliran air yang cukup deras, aliri air secukupnya, sehingga bagian yang halus menembus saringan No. 200 dan bagian yang kasar tertinggal di atasnya.
- 5) Ulangi langkah nomor 3 hingga air menjadi jernih.
- 6) Kemudian keringkan benda uji dalam oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Setelah kering, lakukan penimbangan benda uji yang sudah dicuci.
- 7) Setelah data berat didapatkan, bisa dilakukan analisis dengan Persamaan 3.8.

2. Agregat kasar.

Agregat kasar perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui standar kelayakan materialnya. Pengujian yang dilakukan ada pengujian berat jenis dan penyerapan air, pengujian berat isi padat, dan pengujian analisa saringan. Tahapan masing-masing pengujian dapat dilihat sebagai berikut ini.

a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air.

- 1) Cuci benda uji untuk menghilangkan debu atau bahan lain yang merekat pada permukaan.

- 2) Keringkan benda uji dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sampai agregat dalam keadaan berat tetap (3 kali proses penimbangan hasilnya tetap).
 - 3) Keluarkan benda uji dalam suhu ruangan selama 1-3 jam, lalu timbang.
 - 4) Rendam benda uji dalam suhu kamar selama kurang lebih 24 jam.
 - 5) Keluarkan benda uji dari air dan lap permukaannya dengan kain.
 - 6) Langkah 1-5 adalah pengkondisian agar agregat dalam kondisi SSD.
 - 7) Taruh benda uji dalam keranjang air, lalu guncangkan agar udara yang terperangkap keluar, hitung beratnya dalam air.
 - 8) Letakkan benda uji ke dalam pan untuk dimasukkan ke dalam oven dengan suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ selama 24 jam, lalu timbang.
- b. Pengujian berat isi padat.
- 1) Pengujian berat isi padat dilakukan dengan benda uji dalam keadaan jenuh atau kering permukaan (SSD).
 - 2) Timbang cetakan berupa silinder dan balok yang akan digunakan dalam penelitian ini. Gunakan cetakan silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
 - 3) Letakkan silinder dalam posisi yang datar.
 - 4) Masukkan benda uji kedalam cetakan silinder. Saat memasukkan benda uji ke dalam cetakan silinder ada beberapa tahap, yaitu masukkan benda uji sebanyak $\frac{1}{3}$ dari volume isi cetakan silinder, setelah itu tumbuk benda uji yang telah dimasukkan ke dalam cetakan silinder sebanyak 25 kali, lakukan tahap tersebut sampai cetakan silinder penuh dengan benda uji lalu timbang cetakan silinder.
- c. Pengujian analisa saringan.
- 1) Pada tahap pertama yaitu keringkan benda uji dalam oven pada suhu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sampai berat tetap. Untuk mendapatkan hasil dengan ketelitian yang tinggi, sebaiknya dilakukan pengujian minimal 2 kali.
 - 2) Selanjutnya keluarkan benda uji dari oven, kemudian dinginkan

benda uji pada suhu ruang selama 1-3 jam.

- 3) Pada tahapan 1 dan 2 adalah proses dalam membuat benda uji agar menjadi kering mutlak. Setelah benda uji kering oven, selanjutnya timbang benda uji sebanyak 5000 gram.
- 4) Setelah itu lakukan penyusunan saringan dari lubang yang paling besar (atas) ke lubang yang kecil (bawah) sesuai urutan lubang ayakan yang dianjurkan pada rencana penelitian. Masukkan benda uji ke dalam ayakan, selanjutnya letakkan ayakan pada mesin penguncang dan guncangkan mesin.
- 5) Jalankan proses pengguncangan mesin ayakan sekitar 10-15 menit.
- 6) Selanjutnya keluarkan benda uji dari masing-masing saringan dan letakkan masing-masing pada cawan dengan hati-hati.
- 7) Lalu tahap selanjutnya timbang serta catat berat benda uji yang tertahan di masing-masing saringan. Dalam pembersihan saringan, gunakan sikat kawat untuk saringan yang lubang besar dan kuas untuk lubang yang kecil/halus.

4.6 Tahap Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari pembuatan sampel benda uji hingga pengujian sampel benda uji.

4.6.1 Uji coba *mix design* campuran beton

Mix design dilakukan sesuai dengan SNI 03-6468-2000. Beton rencana akan dibuat dengan mutu 45 MPa. Sebelum pembuatan benda uji secara keseluruhan, diperlukan *trial mix design* untuk mengetahui mutu beton yang dihasilkan berdasarkan *mix design* yang telah dibuat. *Trial mix design* dilakukan dengan membuat sampel benda uji sebanyak 3 buah. Benda uji yang dibuat berupa sampel silinder beton dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Umur sampel benda uji *trial* adalah 3 hari. Sampel benda uji akan diuji kuat tekan kemudian hasilnya akan dikonversi pada umur beton 28 hari. Jika sudah memenuhi mutu rencana, maka *mix design* sudah sesuai.

4.6.2 Pembuatan sampel benda uji

Benda uji yang digunakan berupa silinder beton dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Mutu beton yang digunakan adalah 45 MPa. Pembuatan sampel benda uji akan dilakukan sesuai dengan SNI 03-6468-2000. Sampel akan dibuat dengan 5 variasi (1 beton kontrol mutu tinggi dengan *silica fume* dan *superplasticizer* dan 4 beton rencana mutu tinggi dengan bahan-tambah serbuk kaca). Beton kontrol mutu tinggi akan dibuat dengan mengikuti langkah-langkah *mix design* dalam SNI 03-6468-2000. Setelah itu, untuk beton dengan bahan-tambah, komposisi serbuk kaca akan didasarkan pada komposisi beton kontrol. Serbuk kaca akan ditambahkan dalam campuran beton dengan kadar yang telah ditentukan. *Silica fume* dan *superplasticizer* juga akan ditambahkan sesuai dengan kadar yang telah ditentukan. Kadar *silica fume* dan *superplasticizer* didasarkan pada berat semen. Kadar semen akan berkurang sejumlah *silica fume* yang digunakan, Kebutuhan air pada beton akan berkurang dari komposisi kebutuhan air acuan pada hasil *mix design* beton mutu tinggi setelah dilakukan penambahan *superplasticizer*. Sesuai dengan SNI 03-2493-2011, untuk pengujian beton harus diambil paling sedikit 3 (tiga) buah untuk setiap jenis pengujian. Berdasarkan hal tersebut, jumlah benda uji yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Jumlah Sampel Benda Uji Beton

Kode Sampel	Uji Kuat Tekan dan Modulus elastisitas	Uji Kuat Tarik Belah	Kadar Serbuk Kaca	Kadar SikaFume	Kadar Viscocrete 3115N	Jumlah
BK	3	3	0%	10%	0,3%	6
BSK1	3	3	2,5%	10%	0,3%	6
BSK2	3	3	5%	10%	0,3%	6
BSK3	3	3	7,5%	10%	0,3%	6
BSK4	3	3	10%	10%	0,3%	6
Jumlah Total Benda Uji						30

4.6.2 Pengujian *slump* campuran beton

Tahapan ini dilakukan saat campuran beton sudah siap untuk dicetak

dalam cetakan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *workability* dari campuran beton yang telah dibuat. Pengujian ini menggunakan kerucut abrams dan alat ukur penggaris. Beton segar akan dimasukkan ke dalam kerucut abrams dan setiap 1/3 volumenya dilakukan penumbukan sebanyak 25 kali. Setelah kerucut abrams penuh, kemudian permukaannya diratakan dan kerucut abrams diangkat perlahan secara vertikal. Nilai *slump* merupakan jarak dari puncak kerucut abrams ke titik tertinggi campuran beton segar.

4.6.3 Perawatan sampel benda uji

Perawatan sampel benda uji dilakukan setelah benda uji selesai dicetak. Sesuai dengan SNI 2493:2011 tentang tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium. Beton harus dilindungi dari sumber air minimal 24 jam setelah silinder beton dicetak. Setelah itu, semua benda uji harus dirawat basah atau direndam sampai saat pengujian. Dalam penelitian ini, perawatan (*curing*) benda uji beton akan dilakukan dengan perendaman dan selama hari. Setelah 28 hari, beton akan dikeluarkan untuk dikeringkan terlebih dahulu lalu dilakukan pengujian.

4.6.4 Pengujian beton

Pengujian yang akan dilakukan dalam penelitian ini ada 3 (tiga), yaitu uji kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas. Untuk penjelasan dari masing-masing penjelasan akan dipaparkan sebagai berikut ini.

1. Kuat tekan beton.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tekan dari beton yang telah dibuat. Adapun tahapannya adalah sebagai berikut ini.

- a. Persiapkan seluruh benda uji yang akan diuji dan peralatannya.
- b. Ukur dimensi benda uji (berat, diameter, dan tinggi) dengan alat ukur.
- c. Gunakan *cap* pada bagian permukaan atas benda uji agar permukaannya rata.
- d. Letakkan benda uji tepat di tengah hidraulik mesin uji.
- e. Jalankan mesin uji, hidraulik akan menekan benda uji secara perlahan,

dan dial beban akan berputar naik.

- f. Setelah beban maksimum, benda uji akan mengalami kerusakan dan dial beban berhenti, catat beban maksimum pada dial beban.

2. Kuat tarik belah beton.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tarik belah dari beton yang telah dibuat. Adapun tahapannya adalah sebagai berikut ini.

- a. Persiapkan seluruh benda uji yang akan diuji dan peralatannya.
- b. Ukur dimensi benda uji (berat, diameter, dan tinggi) dengan alat ukur.
- c. Letakan benda uji dengan posisi berbaring dalam mesin uji.
- d. Letakkan bantalan agar posisi benda uji tidak berubah.
- e. Jalankan mesin uji, hidrolik akan menekan benda uji secara perlahan, dan dial beban akan berputar naik.
- f. Setelah benda uji terbelah, dial akan berhenti, catat beban maksimumnya.

3. Modulus elastisitas.

Tahapan pengujian modulus elastisitas adalah sebagai berikut ini.

- a. Persiapkan seluruh benda uji yang akan diuji dan peralatannya.
- b. Ukur dimensi benda uji (berat, diameter, dan tinggi) dengan alat ukur.
- c. Pasang alat kompresometer ekstensiometer pada benda uji, kemudian alat pengukur deformasi dipasang.
- d. Letakkan benda uji dalam mesin uji tekan, lalu jalankan mesin uji, hidrolik akan menekan benda uji perlahan.
- e. Baca dan catat tegangan atau deformasi yang terpasang pada benda uji setiap peningkatan beban 10 kN.
- f. Pembacaan dilakukan hingga benda uji hancur.
- g. Beban maksimum dibaca.

4.6.5 Analisis pengujian benda uji

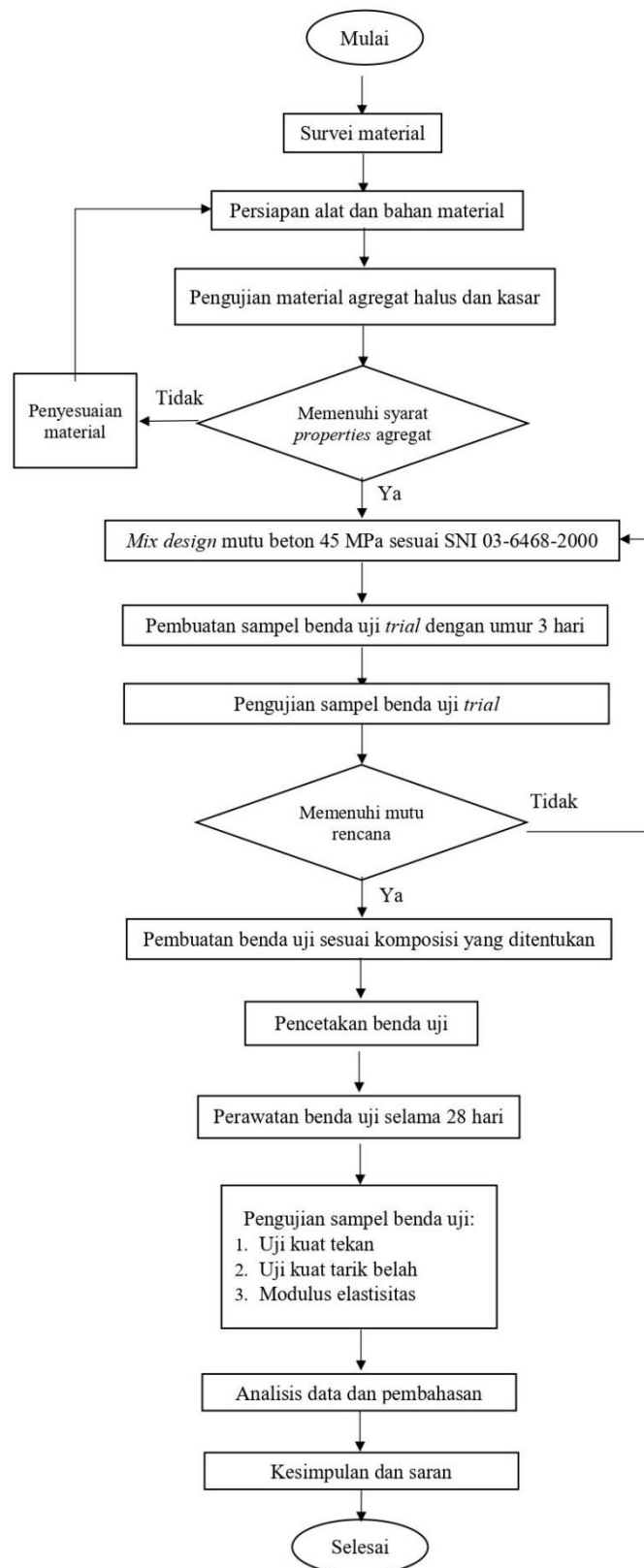
Tahapan ini dilakukan setelah benda uji selesai diuji. Hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas akan dianalisis terkait dengan nilai hasil masing-masing pengujian yang diperoleh. Hasil perhitungan akan dipaparkan dalam bentuk grafik. Hasil analisis akan dipaparkan dalam

pembahasan. Berdasarkan hasil pembahasan, akan didapatkan kesimpulan penelitian yang telah dilakukan. Saran atau perbaikan dapat ditambahkan agar penelitian dapat dikembangkan dengan inovasi dan perbaikan.

4.6.6 Kerangka konsep penelitian

Dari seluruh penjelasan di atas, skema penelitian dapat diikuti dengan *flowchart* atau bagan alir penelitian. *Flowchart* dapat dilihat pada Gambar 4.15 berikut ini.





Gambar 4.15 Flowchart Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Pengujian Agregat

5.1.1 Agregat halus (pasir Sungai Progo)

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian terhadap agregat halus yang meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan air, pengujian analisa saringan, pengujian kadar lumpur, dan pengujian berat volume. Hasil dari pengujian-pengujian tersebut dapat dilihat sebagai berikut.

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air.

Pengujian berat jenis dan penyerapan air dianalisis menggunakan Persamaan 3.1 hingga 3.4. Pengujian dilakukan dengan mengambil sampel sebanyak 2 (dua) buah. Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.1.

$$\text{Berat jenis curah sampel 1} = \frac{488}{715 + 500 - 1033} = 2,6813.$$

$$\text{Berat jenis curah sampel 2} = \frac{488}{735 + 500 - 1054} = 2,6961.$$

$$\text{Berat jenis kering muka sampel 1} = \frac{500}{715 + 500 - 1033} = 2,7473.$$

$$\text{Berat jenis kering muka sampel 2} = \frac{500}{735 + 500 - 1054} = 2,7624.$$

$$\text{Berat jenis semu sampel 1} = \frac{488}{715 + 488 - 1033} = 2,8706.$$

$$\text{Berat jenis semu sampel 2} = \frac{488}{735 + 488 - 1054} = 2,8876.$$

$$\text{Penyerapan air sampel 1} = \frac{500 - 488}{488} \times 100 = 2,46\%.$$

$$\text{Penyerapan air sampel 2} = \frac{500 - 488}{488} \times 100 = 2,46\%.$$

Data dari 2 (dua) sampel untuk masing-masing pengujian di atas kemudian dirata-rata untuk mendapatkan hasil akhir analisa pengujian berat jenis dan

penyerapan air agregat halus.

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{2,6813 + 2,6961}{2} = 2,689.$$

$$\text{Berat jenis kering muka} = \frac{2,7473 + 2,7624}{2} = 2,755.$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{2,8706 + 2,8876}{2} = 2,879.$$

$$\text{Penyerapan air} = \frac{2,46 + 2,46}{2} = 2,46\%.$$

Data hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Uraian	Hasil pengamatan		Rerata
	Sampel 1	Sampel 2	
Berat pasir kering mutlak (Bk), gram	488	488	
Berat pasir jenuh kering muka (SSD), gram	500	500	
Berat piknometer berisi pasir dan air (Bt), gram	1033	1054	
Berat piknometer berisi air (B), gram	715	735	
Berat jenis curah	2,6813	2,6961	2,689
Berat jenis jenuh kering muka (SSD)	2,7473	2,7626	2,755
Berat jenis semu	2,8706	2,8876	2,879
Penyerapan air (%)	2,46	2,46	2,46

Dari Tabel 5.1 di atas, didapatkan nilai berat jenis curah sebesar 2,689 dan penyerapan air sebesar 2.46%. Hasil tersebut merupakan nilai rata-rata dari 2 (dua) sampel yang diuji. Menurut Tjokrodinuljo (2018), nilai berat jenis agregat normal berkisar antara 2,4-2,7.

2. Pengujian analisa saringan.

Pengujian analisa saringan agregat halus Sungai Progo dilakukan dengan menggunakan 2 (dua) sampel. Hasil pengujian dianalisis dengan Persamaan 3.6 dan 3.7. Hasil analisa pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan 5.3 berikut.

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 1

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas (%)	
					Bawah	Atas
40,00		0	0	100		
20,00		0	0	100		
10,00		0	0	100	100	100
4,80	9	0,45	0,45	99,55	90	100
2,40	94	4,7	5,16	94,84	75	100
1,20	181	9,06	14,21	85,79	55	90
0,60	541	27,08	41,29	58,71	30	59
0,30	576	28,83	70,12	29,88	8	30
0,15	513	25,68	95,80	4,2	0	10
Sisa	84	4,2	100	0	0	0
Jumlah	1998	100	227,03			

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas (%)	
					Bawah	Atas
40,00		0	0	100		
20,00		0	0	100		
10,00		0	0	100	100	100
4,80	15	0,75	0,75	99,25	90	100
2,40	83	4,15	4,90	95,10	75	100
1,20	153	7,65	12,56	87,44	55	90
0,60	584	29,21	41,77	58,23	30	59
0,30	568	28,41	70,19	29,81	8	30
0,15	498	24,91	95,10	4,90	0	10
Sisa	98	4,90	100	0	0	0
Jumlah	1999	100	225,26			

Dari Tabel 5.2 dan 5.3 di atas, dilakukan perhitungan persentase berat yang hilang dan modulus halus butir dengan Persamaan 3.6 dan 3.7.

$$\text{Persentase berat yang hilang sampel 1} = \frac{2000 - 1998}{2000} \times 100 = 0,1\%.$$

$$\text{Persentase berat yang hilang sampel 2} = \frac{2000 - 1999}{1999} \times 100 = 0,05\%.$$

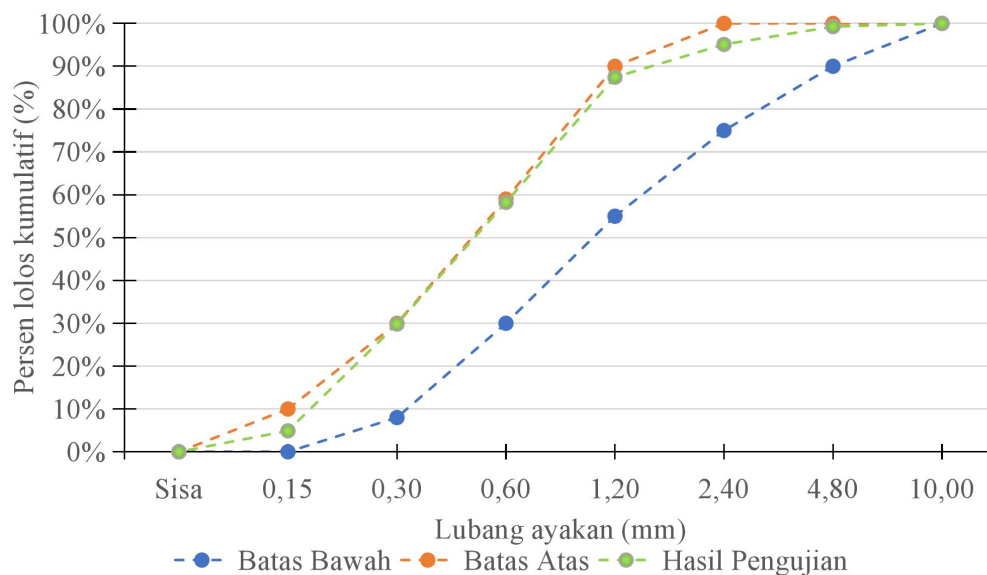
$$\text{Modulus halus butir sampel 1} = \frac{327,03 - 100}{100} = 2,2703.$$

$$\text{Modulus halus butir sampel 2} = \frac{325,26 - 100}{100} = 2,2526.$$

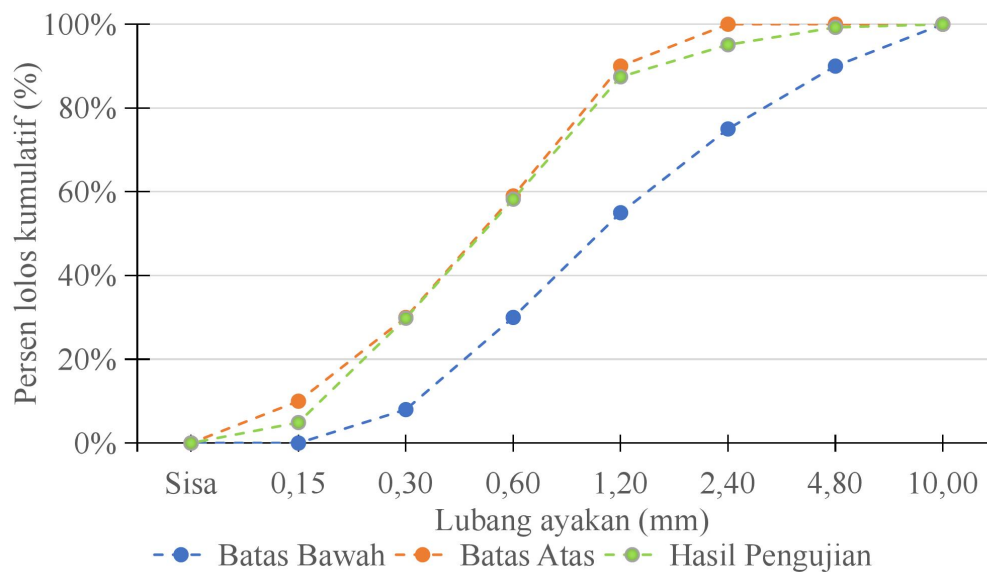
Kemudian, data 2 (dua) sampel tersebut dirata-rata untuk mendapatkan nilai modulus halus butir agregat halus.

$$\text{Modulus halus butir} = \frac{2,2703 + 2,2526}{2} = 2,26.$$

Nilai modulus halus butir tersebut (2,26) sudah sesuai dengan syarat pada SNI 03-1750-1990, yaitu antara 1,5 - 3,8. Hasil yang diperoleh juga menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan masuk dalam kategori pasir agak kasar (daerah gradasi II). Spesifikasi gradasi pasir daerah II dapat dilihat pada Tabel 5.3 di atas dan hasil analisis kategori kelompok pasir tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.1 dan 5.2 berikut.



Gambar 5.1 Gradasi Agregat Halus Sampel 1



Gambar 5.2 Gradasi Agregat Halus Sampel 2

3. Pengujian kadar lumpur (lolos saringan no. 200).

Pengujian kadar lumpur dalam agregat halus menggunakan saringan no. 200. Pengujian ini dianalisis menggunakan Persamaan 3.8. Pengujian dilakukan dengan mengambil 2 (dua) sampel. Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.4.

$$\text{Kadar lumpur sampel 1} = \frac{500 - 497}{500} \times 100 = 0,6\%.$$

$$\text{Kadar lumpur sampel 2} = \frac{500 - 497}{500} \times 100 = 0,6\%.$$

Data dari 2 (dua) sampel untuk masing-masing pengujian di atas kemudian dirata-rata untuk mendapatkan hasil akhir pengujian kadar lumpur.

$$\text{Kadar lumpur} = \frac{0,6 + 0,6}{2} = 0,6\%.$$

Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Uraian	Hasil	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat agregat kering oven (W1), gram	500	500
Berat agregat kering oven setelah dicuci (W2), gram	497	497
Berat yang lolos saringan no. 200 (%)	0,6	0,6

Kandungan lumpur agregat halus yang didapat yaitu sebesar 0,6% sudah sesuai dengan SNI 03-6821-2002. SNI 03-6821-2002 menyatakan kandungan lumpur harus <5%.

4. Pengujian berat volume padat.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian berat volume padat agregat halus menggunakan 2 (dua) sampel. Perhitungan berat volume padat dilakukan berdasarkan Persamaan 3.5. Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.2.

$$\text{Berat volume padat sampel 1} = \frac{7940}{5442,27} = 1,4589 \text{ gram/cm}^3.$$

$$\text{Berat volume padat sampel 2} = \frac{8135}{5442,27} = 1,4948 \text{ gram/cm}^3.$$

Data dari 2 (dua) sampel untuk masing-masing pengujian di atas kemudian dirata-rata untuk mendapatkan hasil akhir berat volume padat agregat halus dan data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

$$\text{Berat volume padat agregat halus} = \frac{1,4589 + 1,4769}{2} = 1,4769 \text{ gram/cm}^3.$$

Tabel 5.5 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus

Uraian	Hasil	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat tabung (W1), gram	11360	11360
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gram	19300	19495
Berat agregat (W3), gram	7940	8135
Volume tabung (V), cm ³	5442,27	5442,27
Berat volume padat, gram/cm ³	1,4589	1,4948

5.1.2 Agregat kasar (kerikil Celereng)

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian terhadap agregat kasar yang meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan air, pengujian analisa saringan, dan pengujian berat volume. Hasil dari pengujian-pengujian tersebut dapat dilihat sebagai berikut.

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air.

Pengujian berat jenis dianalisis menggunakan Persamaan 3.9 hingga 3.12. Pengujian dilakukan dengan mengambil sampel sebanyak 2 buah. Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.6.

$$\text{Berat jenis curah sampel 1} = \frac{4894}{5000 - 3123} = 2,61.$$

$$\text{Berat jenis curah sampel 2} = \frac{4891}{5000 - 3140} = 2,63.$$

$$\text{Berat jenis kering muka sampel 1} = \frac{5000}{5000 - 3123} = 2,66.$$

$$\text{Berat jenis kering muka sampel 2} = \frac{5000}{5000 - 3140} = 2,69.$$

$$\text{Berat jenis semu sampel 1} = \frac{4894}{4894 - 3123} = 2,76.$$

$$\text{Berat jenis semu sampel 2} = \frac{4891}{4891 - 3140} = 2,79.$$

$$\text{Penyerapan air sampel 1} = \frac{5000 - 4894}{4894} \times 100 = 2,17\%.$$

$$\text{Penyerapan air sampel 2} = \frac{5000 - 4891}{4891} \times 100 = 2,23\%.$$

Data dari 2 (dua) sampel untuk masing-masing pengujian di atas kemudian dirata-rata untuk mendapatkan hasil akhir analisa pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar.

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{2,61 + 2,63}{2} = 2,62.$$

$$\text{Berat jenis kering muka} = \frac{2,66 + 2,69}{2} = 2,68.$$

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{2,76 + 2,79}{2} = 2,78.$$

$$\text{Penyerapan air} = \frac{2,17 + 2,23}{2} = 2,2\%.$$

Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5.6 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Uraian	Hasil pengamatan		Rerata
	Sampel 1	Sampel 2	
Berat kerikil kering mutlak (Bk), gram	4894	4891	
Berat kerikil jenuh kering muka (SSD), gram	5000	5000	
Berat kerikil dalam air (Ba), gram	3123	3140	
Berat jenis curah	2,61	2,63	2,62
Berat jenis jenuh kering muka (SSD)	2,66	2,69	2,68
Berat jenis semu	2,76	2,79	2,78
Penyerapan air (%)	2,17	2,23	2,2

Dari Tabel 5.6 di atas, didapatkan nilai berat jenis curah sebesar 2,62 dan penyerapan air sebesar 2,2%. Hasil tersebut merupakan nilai rata-rata dari 2 (dua) sampel yang diuji. Menurut Tjokrodinuljo (2018), nilai berat jenis agregat normal berkisar antara 2,4-2,7.

2. Pengujian analisa saringan.

Pengujian analisa saringan agregat kasar Celereng dilakukan dengan menggunakan 2 (dua) sampel. Hasil pengujian dianalisis dengan Persamaan 3.6 dan 3.7. Hasil analisa pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.7 dan 5.8 berikut.

Tabel 5.7 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 1

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas (%)	
					Bawah	Atas
40,00	0	0	0	100	100	100
20,00	28	0,56	0,56	99,44	95	100
10,00	3627	72,58	73,14	26,86	25	55
4,80	1323	26,48	99,62	0,38%	0	10
2,40	1	0,02	99,64	0,36		
1,20	0	0	99,64	0,36		
0,60	0	0	99,64	0,36		
0,30	0	0	99,64	0,36		
0,15	0	0	99,64	0,36		
Sisa	18	0,36	100	0		
Jumlah	4997	100	671,52			

Tabel 5.8 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas (%)	
					Bawah	Atas
40,00	0	0	0	100	100	100
20,00	88	1,78	1,76	98,24	95	100
10,00	3566	71,36	73,12	26,88	25	55
4,80	1233	24,67	97,80	2,20	0	10
2,40	72	1,44	99,24	0,76		
1,20	3	0,06	99,30	0,70		
0,60	0	0	99,30	0,70		
0,30	0	0	99,30	0,70		
0,15	0	0	99,30	0,70		
Sisa	37	0,74	100	0		
Jumlah	4999	100	669,12			

Dari Tabel 5.7 dan 5.8 di atas, dilakukan perhitungan persentase berat yang hilang dan modulus halus butir dengan Persamaan 3.6 dan 3.7.

$$\text{Persentase berat yang hilang sampel 1} = \frac{5000 - 4997}{5000} \times 100 = 0,06\%.$$

$$\text{Persentase berat yang hilang sampel 2} = \frac{5000 - 4999}{5000} \times 100 = 0,02\%.$$

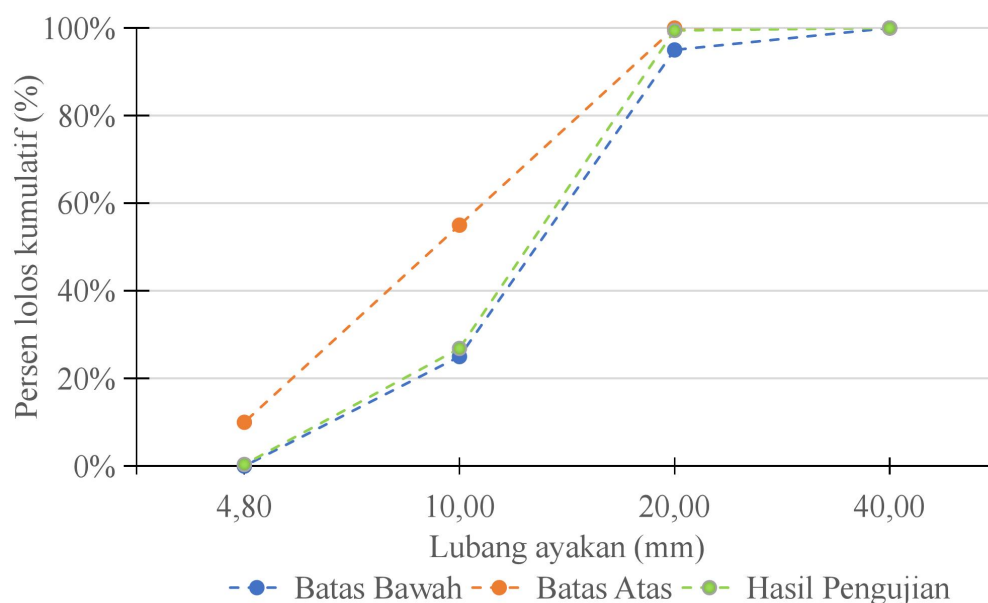
$$\text{Modulus halus butir sampel 1} = \frac{671,52 - 100}{100} = 6,7152.$$

$$\text{Modulus halus butir sampel 2} = \frac{669,12 - 100}{100} = 6,6912.$$

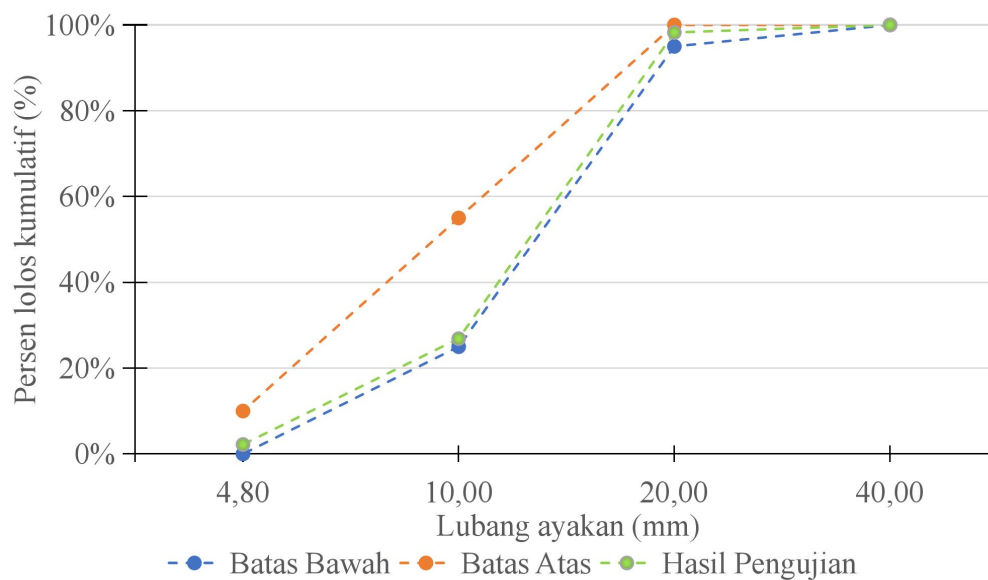
Kemudian, data 2 (dua) sampel tersebut dirata-rata untuk mendapatkan nilai modulus halus butir agregat halus.

$$\text{Modulus halus butir} = \frac{6,7152 + 6,6912}{2} = 6,7.$$

Nilai modulus halus butir tersebut (6,7) sudah sesuai dengan syarat pada SNI 03-1968-1990, yaitu antara 3,8-8. Menurut Tjokrodinuljo (2018), nilai modulus halus butir untuk agregat kasar umumnya berkisar antara 6,0-7,0. Hasil analisis gradasi agregat kasar tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan 5.4 berikut.



Gambar 5.3 Gradasi Agregat Kasar Sampel 1



Gambar 5.4 Gradasi Agregat Kasar Sampel 2

3. Pengujian berat volume.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian berat volume padat agregat kasar menggunakan 2 (dua) sampel. Perhitungan berat volume padat dilakukan berdasarkan Persamaan 3.5. Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.9.

$$\text{Berat volume padat sampel 1} = \frac{7920}{5362,93} = 1,48 \text{ gram/cm}^3.$$

$$\text{Berat volume padat sampel 2} = \frac{8109}{5362,93} = 1,51 \text{ gram/cm}^3.$$

Data dari 2 (dua) sampel untuk masing-masing pengujian di atas kemudian dirata-rata untuk mendapatkan hasil akhir berat volume padat agregat kasar.

$$\text{Berat volume padat agregat kasar} = \frac{1,48 + 1,51}{2} = 1,49 \text{ gram/cm}^3.$$

Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut.

Tabel 5.9 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar

Uraian	Hasil	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat tabung (W1), gram	12160	12160
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gram	20080	20269
Berat agregat (W3), gram	7920	8109
Volume tabung (V), cm ³	5362,93	5362,93
Berat volume padat, gram/cm ³	1,477	1,512

5.2 Desain Campuran Beton Mutu Tinggi

Desain campuran beton mutu tinggi perlu dilakukan dengan cermat agar nantinya kekuatan yang dihasilkan memenuhi rancangan yang dibuat. Proses desain campuran beton mutu tinggi akan menentukan proporsi masing-masing material yang digunakan. Desain campuran beton mutu tinggi dilakukan berdasarkan metode SNI 03-6468-2000. Langkah-langkah desain campuran beton mutu tinggi dapat dilihat sebagai berikut.

1. Data awal untuk proses *mix design*.

Dalam penelitian ini digunakan kuat tekan beton rencana $f'_c = 45$ MPa. Syarat kuat tekan beton mutu tinggi menurut SNI 03-6468-2000 adalah 41,4 MPa pada umur 28 hari. Agregat halus yang digunakan berasal dari Sungai Progo dengan sifat sebagai berikut:

- a. modulus halus butir = 2,3,
- b. berat jenis curah = 2,689,
- c. penyerapan air = 2,46%, dan
- d. berat volume padat = 1,4769.

Sedangkan untuk agregat kasar, digunakan batu pecah berukuran maksimal 20 mm yang berasal dari Celereng, Kulon Progo. Sifat agregat kasar adalah sebagai berikut:

- a. modulus halus butir = 6,7,
- b. berat jenis curah = 2,62,
- c. penyerapan air = 2,2%, dan
- d. berat volume padat = 1,49.

Semen *portland* yang digunakan adalah semen *portland* tipe I bermerek Semen Gresik dengan berat jenis 3,15. Bahan-tambah yang digunakan adalah serbuk kaca dari botol bekas dan kaca bening berukuran 200 *mesh*, *silica fume* berjenis SikaFume dari PT. Sika Indonesia, dan *superplasticizer* berjenis Viscocrete 3115N dari PT. Sika Indonesia.

2. Perhitungan komposisi campuran beton kontrol mutu tinggi.

- a. Menentukan nilai *slump* dan kuat tekan rata-rata yang diinginkan.

Nilai *slump* awal yang digunakan adalah sebesar 25-50 mm. Nilai kuat tekan rata-rata yang diinginkan dihitung menggunakan Persamaan 3.13.

Kuat tekan rencana $f'_c = 45 \text{ MPa}$.

$$f'_{cr} = \frac{45 + 9,66}{0,9} = 60,73 \text{ MPa}.$$

- b. Menentukan ukuran agregat kasar maksimum.

Karena nilai kuat tekan rata-rata sebesar 60,73 MPa, maka ukuran agregat kasar maksimum yang digunakan adalah 20 mm.

- c. Menentukan kadar agregat kasar optimum.

Berdasarkan Tabel 3.2 dan ukuran agregat kasar maksimum sebesar 20 mm, fraksi volume agregat kasar optimum adalah 0,72. Kadar agregat kasar dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.14.

$$\text{Kadar agregat kasar} = 0,72 \times 1490 = 1072,8 \text{ kg/m}^3.$$

- d. Menentukan estimasi kadar air dan kadar udara.

Berdasarkan nilai *slump* rencana sebesar 75-100 mm dan ukuran agregat kasar maksimum sebesar 20 mm, menurut Tabel 3.3, didapatkan estimasi kebutuhan air awal sebesar 181 liter/m³ dan kadar udara 1,5%. Selanjutnya kadar rongga udara dan koreksi kadar air dihitung menggunakan Persamaan 3.15 dan 3.16.

$$V = 1 - \frac{1476,9}{2,689 \times 1000} \times 100 = 45,07\%.$$

$$\text{Koreksi kadar air} = (45,04 - 35) \times 4,75 = 47,862 \text{ liter/m}^3.$$

$$\text{Sehingga kebutuhan air total adalah} = 181 + 47,862 = 228,86 \text{ liter/m}^3.$$

- e. Menentukan faktor air semen (rasio $(W/(c+p))$)).

Berdasarkan kuat tekan rata-rata, kekuatan beton di lapangan dapat dihitung menggunakan sebagai berikut.

$$\text{Kuat tekan lapangan} = 0,9 \times 60,73 = 54,66 \text{ MPa.}$$

Dari hasil kuat tekan lapangan, selanjutnya mencari nilai faktor air semen berdasarkan Tabel 3.4. Nilai faktor air semen dicari dengan interpolasi pada Tabel 3.4 dengan langkah sebagai berikut.

$$Y = 54,66 \text{ MPa.}$$

$$Y_1 = 48,3 \text{ MPa.}$$

$$Y_2 = 55,2 \text{ MPa.}$$

$$X = ?$$

$$X_1 = 0,45.$$

$$X_2 = 0,4.$$

$$Y = Y_1 + \frac{(X - X_1)}{(X_2 - X_1)} \times (Y_2 - Y_1)$$

$$Y = 54,66 + \frac{(X - 0,45)}{(0,4 - 0,45)} \times (55,2 - 48,3)$$

$$Y = 0,4$$

Nilai faktor air semen didapatkan adalah 0,4. Nilai ini kemudian digunakan sebagai acuan untuk membuat sampel beton *trial*. Berdasarkan hasil *trial* pembuatan sampel benda uji dengan faktor air semen 0,4, kuat tekan rencana pada umur 3 hari tidak tercapai. Untuk meningkatkan kuat tekan beton, kadar air dikurangi. Semakin berkurang kadar air, maka nilai faktor air semen akan semakin kecil. Berdasarkan hal tersebut, dibuat sampel *trial* dengan nilai faktor air semen yang lebih kecil hingga memenuhi kuat tekan rencana pada umur 3 hari. Nilai faktor air semen yang memenuhi kuat tekan rencana pada umur 3 hari berdasarkan sampel beton *trial* adalah 0,37. Berdasarkan hasil pembuatan dan pengujian sampel *trial* beton pada umur 3 hari, digunakan nilai faktor air semen sebesar 0,37.

f. Menghitung kadar bahan bersifat semen.

Kadar bahan bersifat semen dihitung menggunakan Persamaan 3.18.

$$\text{Kadar bahan bersifat semen} = \frac{228,86}{0,37} = 618,55 \text{ kg/m}^3.$$

g. Menentukan proporsi campuran beton mutu tinggi.

Proporsi semua bahan campuran beton mutu tinggi per-m³ yang didapatkan adalah sebagai berikut.

$$\text{Semen } portland = \frac{618,55}{3,15} = 196,36 \text{ liter.}$$

$$\text{Agregat kasar} = \frac{1072,8}{2,62} = 405,47 \text{ liter.}$$

$$\text{Air} = 228,86 \text{ liter.}$$

$$\text{Kadar udara} = 15 \text{ liter.}$$

Lalu, semua nilai tersebut dijumlahkan dan didapatkan angka 849,69 liter. Untuk mendapatkan proporsi agregat halus, dilakukan perhitungan berikut.

$$\text{Agregat halus} = 1000 - 849,69 = 150,31 \text{ liter.}$$

Sehingga didapatkan proporsi campuran beton mutu tinggi menurut SNI 03-6468-2000 per-m³ sebagai berikut.

- 1) Semen = 619 kg,
- 2) kerikil = 1073 kg,
- 3) pasir = 405 kg, dan
- 4) air = 229 kg.

5.3 Komposisi Campuran Beton Mutu Tinggi

Dalam penelitian ini, dibuat beton kontrol (dengan *silica fume* dan *superplasticizer*) dan beton variasi dengan bahan-tambah serbuk kaca. Serbuk kaca digunakan sebagai *filler*. Ukuran serbuk kaca yang digunakan adalah 200 *mesh*. Kadar serbuk kaca yang digunakan adalah sebesar 0% (beton kontrol mutu tinggi), 2,5% (variasi 1), 5% (variasi 2), 7,5% (variasi 3), dan 10% (variasi 4). Perhitungan kadar serbuk kaca yang digunakan diambil berdasarkan

berat semen. *Silica fume* digunakan sebanyak 10% dari berat semen. *Superplasticizer* digunakan sebanyak 0,3% dari berat semen. Komposisi campuran beton mutu tinggi (ditambah penyusutan 25%) per- m^3 yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.10 sebagai berikut.



Tabel 5.10 Hasil *Mix Design* Campuran Beton Mutu Tinggi

Kode Sampel	Jumlah sampel (buah)	Volume (m ³)	Semen (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)	Serbuk kaca		<i>Superplasticizer</i>		<i>Silica Fume</i>	
							Berat (kg)	%	Berat (kg)	%	Berat (kg)	%
BK	6	0,032	22,15	16,10	42,66	9,03	0	0	0,074	0,3	2,461	10
BSK1	6	0,032	22,15	16,10	42,66	9,03	0,83	2,5	0,074	0,3	2,461	10
BSK2	6	0,032	22,15	16,10	42,66	9,03	1,66	5	0,074	0,3	2,461	10
BSK2	6	0,032	22,15	16,10	42,66	9,03	2,49	7,5	0,074	0,3	2,461	10
BSK4	6	0,032	22,15	16,10	42,66	9,03	3,32	10	0,074	0,3	2,461	10

5.4 Pengujian Sampel Beton *Trial*

Pada penelitian ini, dibuat sampel beton *trial* sebagai percobaan hasil *mix design* yang telah dibuat. Tujuan dari sampel *trial* adalah mengetahui hasil mutu beton sesuai dengan komposisi *mix design* yang telah dibuat. Umur beton untuk sampel *trial* adalah 3 hari. Berdasarkan hasil kuat tekan beton *trial* pada umur 3 hari tersebut, dapat diperkirakan mutu beton pada umur 28 hari. Hasil pengujian sampel beton *trial* tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5.11 Hasil Pengujian Sampel Beton *Trial*

Benda uji	Beban maksimum (kN)	Luas (mm ²)	Kuat tekan (MPa)	Faktor konversi	Kuat tekan umur 28 hari (MPa)
BK1	420	17813,11	23,58	0,4	58,95
BK2	410	17655,75	23,22	0,4	58,05
BK3	400	17884,15	23,37	0,4	55,92

Pada Tabel 5.10 tersebut, digunakan faktor konversi sebesar 0,4 sesuai dengan PBI 1971 untuk beton normal. Nilai konversi ini kurang relevan jika digunakan untuk beton dengan bahan-tambah. Namun, belum ada penelitian lain yang bisa digunakan sebagai acuan nilai konversi, sehingga digunakan nilai konversi 0,4 sebagai acuan. Perkiraan umur beton pada umur 28 hari diperoleh sebesar 58,95 MPa, 58,05 MPa, dan 55,92 MPa. Nilai ini sudah melebihi kuat tekan rencana, yaitu 45 MPa.

5.5 Pengujian Beton Mutu Tinggi

5.5.1 *Slump*

Sesuai dengan *mix design* menurut SNI 03-6468-2000, nilai *slump* yang direncanakan adalah sebesar 75-100 mm. Hasil pengujian *slump* di lapangan dan contoh pengujian *slump* dapat dilihat pada Tabel 5.12 dan Gambar 5.5 berikut.

Tabel 5.12 Hasil Pengujian *Slump*

No.	Tipe Benda Uji	Nilai <i>Slump</i> (mm)
1	BK	100
2	BSK1	100
3	BSK2	96
4	BSK3	92
5	BSK4	90

**Gambar 5.5 Pengujian *Slump***

Berdasarkan hasil pengujian *slump* di lapangan, didapatkan nilai *slump* terkecil 90 mm dan terbesar 100 mm. Nilai ini telah sesuai dengan nilai rencana yang ditetapkan dalam *mix design* yaitu sebesar 75-100 mm. Nilai *slump* yang dihasilkan dalam penelitian ini tergolong sedang menurut Neville & Brooks (1987). Nilai *slump* menurun seiring dengan penambahan serbuk kaca sebagai *filler*. Serbuk kaca yang digunakan memiliki penyerapan air sebesar 2,46% berdasarkan pengujian di laboratorium. Penurunan nilai *slump* seiring dengan penambahan serbuk kaca ini serupa dengan hasil penelitian oleh Aliabdo dkk. (2016). Pada penelitian oleh Aliabdo dkk. (2016), nilai *slump* terbesar berkisar 90 mm pada beton tanpa penambahan serbuk kaca dan *slump* terkecil berkisar 45 mm pada beton dengan penambahan serbuk kaca terbesar, yaitu 25%

5.5.2 Kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari dengan kuat tekan rencana 45 MPa. Proses pengujian kuat tekan dilakukan dengan mesin CTM dan penambahan *capping* pada permukaan atas beton agar bidang tekan rata. Beton diletakkan berdiri pada mesin CTM dan kemudian ditekan. Saat proses penekanan beton, dial beban akan naik hingga mencapai beban maksimum. Nilai kuat tekan beton adalah nilai beban maksimum yang terjadi saat proses pengujian. Gambar pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 5.7. Analisis pengujian kuat tekan beton dihitung menggunakan Persamaan 3.19. Contoh perhitungan kuat tekan beton dapat dilihat berikut. Hasil pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 5.13 dan Gambar 5.6. Benda uji BK1 dengan P maksimum = 810 kN = 810000 N.

$$\text{Luas permukaan benda uji BN1} = 0.25 \times \pi \times 149.63^2 = 17585,17 \text{ mm}^2.$$

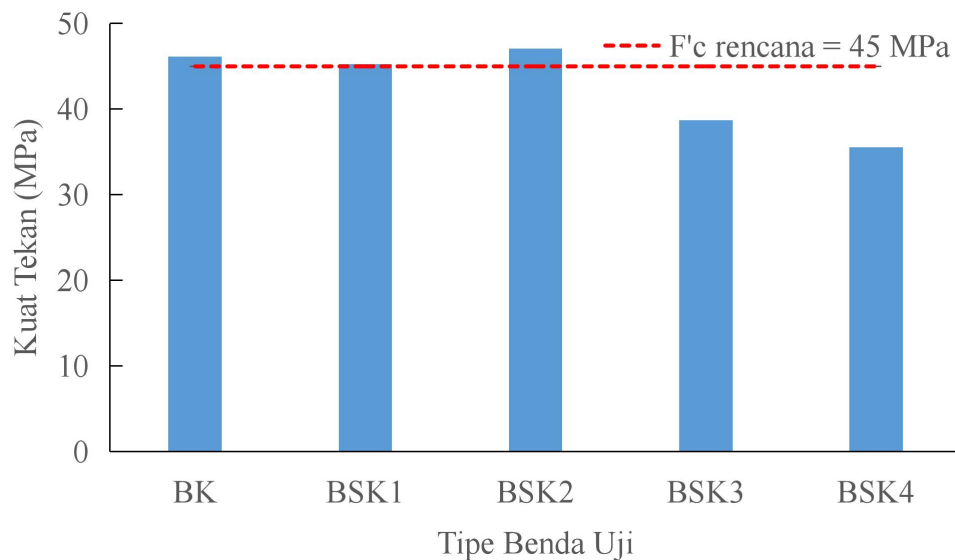
$$\text{Kuat tekan BN1} = \frac{810000}{17585,17} = 46,06 \text{ MPa}.$$



Gambar 5.6 Pengujian Kuat Tekan Beton

Tabel 5.13 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Tipe Benda Uji	Diameter	Tinggi	Variasi Campuran (%)			Beban Maksimum	Luas	Kuat Desak (MPa)	
	(mm)	(mm)	Serbuk Kaca	<i>Silica Fume</i>	<i>Superplasticizer</i>	(kN)	(mm ²)	Unit	Rerata
BK	149,63	302,13	0%	10%	0,3%	810	17585,17	46,06	46,12
	150,20	301,13	0%	10%	0,3%	825	17718,61	46,56	
	150,63	301,97	0%	10%	0,3%	815	17821,00	45,73	
BSK1	152,83	302,67	2,5%	10%	0,3%	825	18345,35	44,97	45,26
	149,73	304,27	2,5%	10%	0,3%	815	17608,68	46,28	
	151,70	304,23	2,5%	10%	0,3%	805	18074,28	44,54	
BSK2	154,10	301,97	5%	10%	0,3%	865	18650,70	46,38	47,07
	151,40	301,70	5%	10%	0,3%	870	18002,87	48,33	
	153,00	304,53	5%	10%	0,3%	855	18385,39	46,50	
BSK3	152,07	305,03	7,5%	10%	0,3%	710	18161,76	39,09	38,70
	151,13	304,27	7,5%	10%	0,3%	685	17939,50	38,18	
	151,53	305,57	7,5%	10%	0,3%	700	18034,59	38,81	
BSK4	155,70	309,57	10%	10%	0,3%	650	19040,01	34,14	35,55
	153,57	309,30	10%	10%	0,3%	675	18521,83	36,44	
	153,80	309,73	10%	10%	0,3%	670	18578,15	36,06	



Gambar 5.7 Grafik Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Variasi

Pada Tabel 5.13 dan Gambar 5.7, nilai kuat tekan beton rata-rata bervariasi. Beton kontrol yang digunakan sebagai acuan memiliki nilai kuat tekan rata-rata 46,12 MPa. Nilai ini sudah melebihi mutu beton rencana, yaitu 45 MPa. Beton dengan bahan-tambah serbuk kaca sebagai *filler*, mencapai nilai kuat tekan rata-rata tertinggi pada variasi BSK 2 (5% serbuk kaca) dengan nilai 47,07 MPa. Nilai ini meningkat 2,06% dari kuat tekan beton kontrol mutu tinggi. Nilai kuat tekan rata-rata beton dengan bahan-tambah terendah berada pada variasi BSK4 (10% serbuk kaca) dengan nilai 35,55 MPa. Nilai ini menurun sebesar 22,92% dari kuat tekan beton normal mutu tinggi.

Pada variasi BSK1 (2,5% serbuk kaca), terjadi penurunan mutu beton. Nilai kuat tekan rata-rata beton BSK1 adalah 45,26 MPa. Nilai ini menurun sebesar 1,86% dari nilai kuat tekan beton kontrol mutu tinggi. Penurunan mutu ini serupa dengan penelitian oleh Sejati & Gunawan (2019). Pada penelitian Sejati & Gunawan (2019), beton normal mencapai mutu 22,54 MPa. Mutu beton kemudian meningkat pada variasi 15% (27 MPa) dengan kekuatan 27 MPa, kemudian menurun seiring dengan penambahan serbuk kaca hingga 25%. Pada penelitian tersebut, nilai mutu beton naik kembali pada penambahan serbuk kaca sejumlah 30% dengan nilai kuat tekan 24,99 MPa.

Penelitian oleh Aliabdo dkk. (2016) memvariasikan kadar serbuk kaca dengan kadar 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Pada sampel dengan mutu rencana 45 MPa, kuat tekan beton pada umur 28 hari dengan kadar serbuk kaca 0% adalah 44,32 MPa. Nilai kuat tekan optimum ada pada variasi kadar serbuk kaca 20% dengan kuat tekan 49,21 MPa. Nilai ini meningkat sebesar 11,03% dari kuat tekan beton tanpa serbuk kaca. Pada variasi kadar serbuk kaca 25%, kuat tekan menurun menjadi 48,43 MPa. Nilai ini menurun sebesar 1,59% dari kuat tekan pada kadar serbuk kaca 20%.

Nilai kuat tekan beton yang bervariasi ini terjadi karena sejumlah faktor, seperti proses pembuatan dan penggunaan bahan-tambah serbuk kaca. Serbuk kaca yang digunakan merupakan limbah botol kaca dan kaca bening berukuran 200 mesh atau 74 μm . Serbuk kaca bersifat pozzolan, yang berarti mengandung silika dan alumina yang bisa meningkatkan kekuatan semen dengan membentuk kalsium silikat dan *calcium aluminat hydrate* dari reaksi pozzolan dan kalsium hidroksida dalam semen dan air (Susanti dkk. 2019). Penambahan serbuk kaca 5% meningkatkan mutu beton. Peningkatan mutu beton tidak signifikan. Pada variasi 7,5% dan 10%, mutu beton turun. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal. Proses pemadatan yang kurang sempurna dan juga bahan-tambah serbuk kaca yang digunakan dapat memengaruhi bentuk dan kualitas beton. Bentuk permukaan beton pada variasi BSK4 dan BSK5 cembung ketika campuran beton dilepas dari cetakan. Hal tersebut memengaruhi mutu beton dan juga mengakibatkan mutu beton mengalami penurunan. Penurunan mutu ini dapat disebabkan oleh penggumpalan partikel serbuk kaca pada campuran beton dengan jumlah serbuk kaca yang tinggi (Aliabdo dkk. 2016). Setelah dilakukan pengujian kuat tekan, sampel beton mengalami kerusakan. Kerusakan yang terjadi rata-rata berada di ditengah-tengah benda uji. Contoh kerusakan beton setelah pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut.



Gambar 5.8 Contoh Kerusakan Beton Akibat Uji Tekan

5.5.3 Kuat tarik belah beton

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan pada umur beton 28 hari. Pada masing-masing variasi dilakukan pembacaan kuat tarik belah untuk 3 (tiga) sampel. Proses pengujian kuat tarik belah dilakukan dengan mesin CTM dan benda uji berada dalam posisi berbaring serta diberi bantalan agar beton tidak berubah posisi. Analisis pengujian kuat tekan beton dihitung menggunakan Persamaan 3.20. Contoh perhitungan kuat tekan beton dapat dilihat sebagai berikut dan hasil pengujian kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Tabel 5.14. Gambar pengujian kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut.

Benda uji BK6 dengan $P = 295 \text{ kN} = 295000 \text{ N}$.

Luas selimut silinder BN4 $= \pi \times 150,13 \times 301,3 = 142110,49 \text{ mm}^2$.

Kuat tarik belah BN4 $= \frac{2 \times 295000}{142110,49} = 4,15 \text{ MPa}$.

Berdasarkan contoh perhitungan tersebut, maka sampel beton dengan kode BK6 memiliki nilai kuat tarik belah beton sebesar 4,15 MPa.

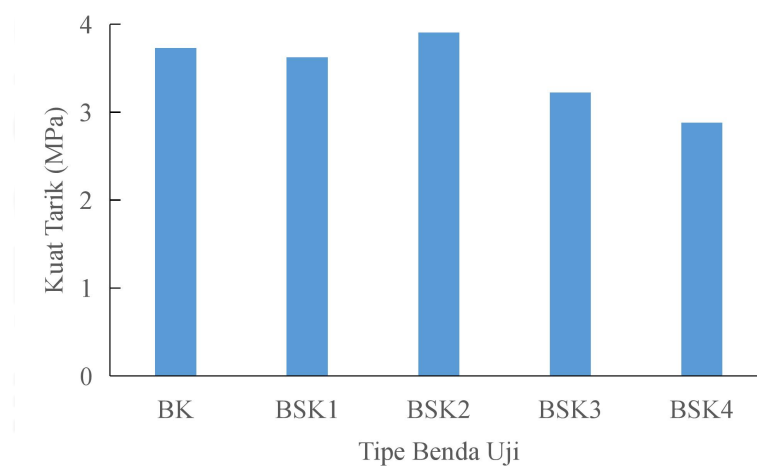


Gambar 5.9 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

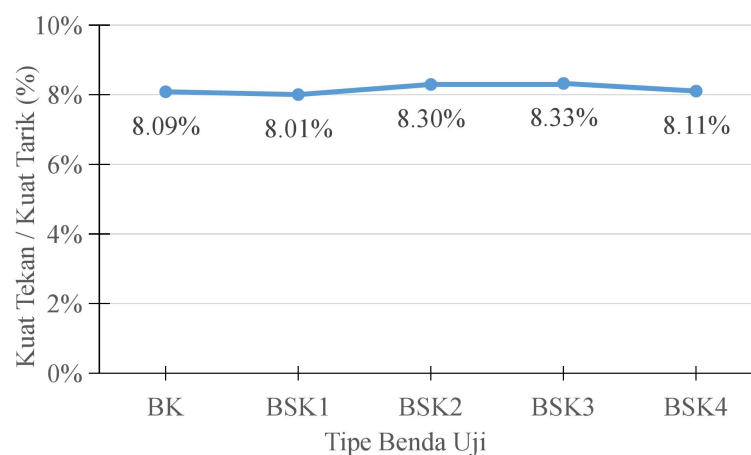
Tabel 5.14 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Tipe Benda Uji	Diameter	Tinggi	Variasi Campuran (%)			Beban Maksimum	Luas	Kuat Tarik (MPa)	
	(mm)	(mm)	Serbuk Kaca	<i>Silica Fume</i>	<i>Superplasticizer</i>	(kN)	(mm ²)	Unit	Rerata
BK	150,33	303,50	0%	10%	0,3%	245	143338,83	3,42	3,73
	150,53	303,90	0%	10%	0,3%	260	143718,6905	3,62	
	150,13	301,30	0%	10%	0,3%	295	142110,4882	4,15	
BSK1	152,83	303,13	2,5%	10%	0,3%	270	145546,4621	3,71	3,62
	149,73	302,67	2,5%	10%	0,3%	255	142374,745	3,58	
	151,70	304,87	2,5%	10%	0,3%	260	145293,2357	3,58	
BSK2	151,63	303,40	5%	10%	0,3%	285	144530,7084	3,94	3,91
	153,20	306,37	5%	10%	0,3%	270	147451,8241	3,66	
	149,73	305,20	5%	10%	0,3%	295	143566,4279	4,11	
BSK3	151,37	304,00	7,5%	10%	0,3%	240	144561,852	3,32	3,22
	153,57	304,00	7,5%	10%	0,3%	225	146662,9492	3,07	
	152,07	304,03	7,5%	10%	0,3%	238	145246,3073	3,28	
BSK4	154,47	309,23	10%	10%	0,3%	210	150062,0757	2,80	2,88
	150,83	309,63	10%	10%	0,3%	195	146721,889	2,66	
	153,30	306,07	10%	10%	0,3%	235	147403,5901	3,19	

Berdasarkan Tabel 5.14, nilai kuat tarik belah untuk beton kontrol mutu tinggi mencapai 3,73 MPa. Untuk beton mutu tinggi dengan bahan-tambah serbuk kaca, nilai kuat tarik belah maksimum pada variasi BSK2 dengan 3,91 MPa, sedangkan untuk nilai kuat tarik belah minimum berada pada variasi BSK4 dengan 2,88 MPa. Nilai kuat tarik belah beton cenderung konstan dan tidak mengalami perubahan ekstrem. Nilai kuat tarik belah beton secara umum berkisar antara 8-12% dari nilai kuat tekannya (Kosmatka dkk. 2002). Grafik hubungan nilai kuat tarik belah beton dengan variasi beton dan grafik perbandingan nilai kuat tarik belah dan kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 5.10 dan 5.11 berikut.



Gambar 5.10 Hubungan Kuat Tarik Belah Beton dengan Variasi



Gambar 5.11 Perbandingan Nilai Kuat Tarik dan Kuat Tekan Beton

Dari Gambar 5.11 di atas, rata-rata perbandingan nilai kuat tarik dengan kuat tekan berkisar pada angka 8%. Pada BSK3, perbandingan nilai kuat tarik dengan kuat tekan paling tinggi karena nilai kuat tekan yang dihasilkan rendah. Nilai kuat tarik ini berada di ambang 8-12%. Pada Gambar 5.10, terlihat kenaikan dan penurunan nilai kuat tarik serupa dengan kenaikan dan penurunan nilai kuat tekan beton. Pada penelitian Aliabdo dkk. (2016), kuat tarik belah beton pada mutu rencana 45 MPa, untuk beton dengan kadar serbuk kaca 0% sebesar 3,86 MPa. Nilai ini mencapai 8,71% dari kuat tekannya. Kuat tarik optimum dicapai pada variasi kadar serbuk kaca 20% sebesar 4,66 MPa. Nilai ini mencapai 9,47% dari kuat tekannya. Pada penelitian oleh Aliabdo dkk. (2016), kuat tarik belah beton berkisar 8% hingga 10% dari kuat tekannya. Contoh kerusakan sampel benda uji akibat pengujian kuat tarik dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut.



Gambar 5.12 Kerusakan Sampel Beton Akibat Uji Kuat Tarik Belah

5.5.4 Modulus elastisitas

Perhitungan modulus elastisitas beton dilakukan sesuai dengan hasil pengujian dan secara teoritis. Pengujian modulus elastisitas dilakukan dengan menekan silinder beton sehingga terjadi perubahan bentuk. Pengujian modulus elastisitas dilakukan dengan cara yang sama dengan pengujian kuat tekan, yaitu dengan menekan silinder beton pada mesin CTM hingga beban maksimum. Pada silinder beton, dipasang alat kompressiometer yang terhubung dengan *dial gauge* digital untuk membaca penurunan beton seiring dengan penambahan beban hingga mencapai beban maksimum. Pembacaan *dial gauge* dilakukan

setiap penambahan beban 10 kN. Pada pengujian modulus elastisitas ini juga dilihat beban maksimum yang diterima oleh silinder beton. Pengujian ini menghasilkan data tegangan dan regangan aksial akibat pembebanan. Gambar pengujian modulus elastisitas dapat dilihat pada Gambar 5.13. Contoh perhitungan modulus elastisitas menggunakan benda uji BK1 dapat dilihat di bawah ini dan hasil pengujian modulus elastisitas BK1 dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut.



Gambar 5.13 Pengujian Modulus Elastisitas

Tabel 5.15 Hubungan Tegangan Regangan Benda Uji BK1

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,5687
20	20000	12	0,006	0,00003	1,1373
30	30000	16	0,008	0,00004	1,7060
40	40000	23	0,0115	0,0000575	2,2746
50	50000	30	0,015	0,000075	2,8433
60	60000	35	0,0175	0,0000875	3,4120
70	70000	41	0,0205	0,0001025	3,9806
80	80000	47	0,0235	0,0001175	4,5493
90	90000	53,5	0,02675	0,00013375	5,1179
100	100000	60	0,03	0,00015	5,6866
110	110000	66,5	0,03325	0,00016625	6,2553
120	120000	70,5	0,03525	0,00017625	6,8239
130	130000	78	0,039	0,000195	7,3926

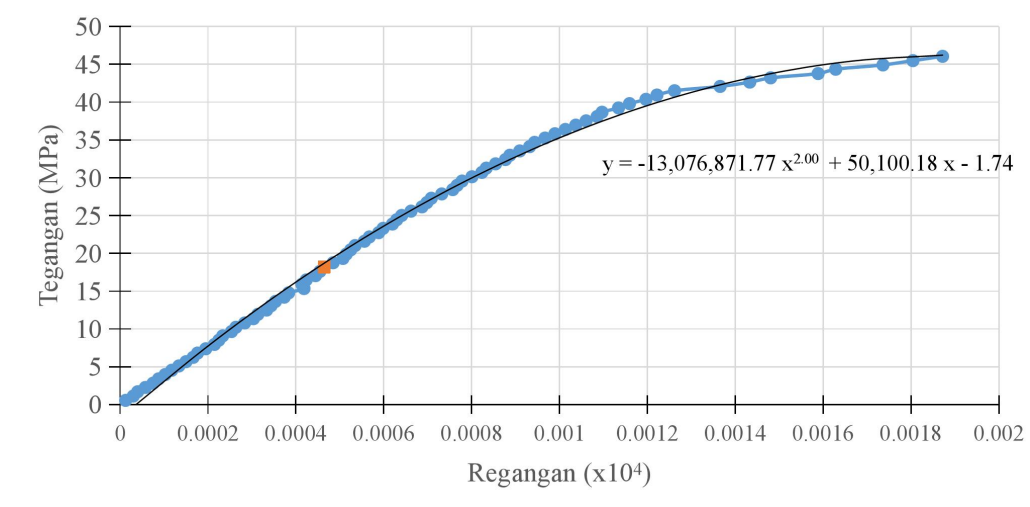
Lanjutan Tabel 5.15 Hubungan Tegangan Regangan Benda Uji BK1

140	140000	85,9	0,04295	0,00021475	7,9613
150	150000	89,9	0,04495	0,00022475	8,5299
160	160000	93,4	0,0467	0,0002335	9,0986
170	170000	101,4	0,0507	0,0002535	9,6672
180	180000	105,4	0,0527	0,0002635	10,2359
190	190000	113,4	0,0567	0,0002835	10,8046
200	200000	121,4	0,0607	0,0003035	11,3732
210	210000	125,4	0,0627	0,0003135	11,9419
220	220000	133,4	0,0667	0,0003335	12,5105
230	230000	137,4	0,0687	0,0003435	13,0792
240	240000	141,4	0,0707	0,0003535	13,6479
250	250000	149,4	0,0747	0,0003735	14,2165
260	260000	153,4	0,0767	0,0003835	14,7852
270	270000	167,4	0,0837	0,0004185	15,3538
280	280000	165,4	0,0827	0,0004135	15,9225
290	290000	169,4	0,0847	0,0004235	16,4912
300	300000	177,9	0,08895	0,00044475	17,0598
310	310000	181,9	0,09095	0,00045475	17,6285
320	320000	185,9	0,09295	0,00046475	18,1972
330	330000	193,9	0,09695	0,00048475	18,7658
340	340000	202,9	0,10145	0,00050725	19,3345
350	350000	205,9	0,10295	0,00051475	19,9031
360	360000	209,9	0,10495	0,00052475	20,4718
370	370000	213,9	0,10695	0,00053475	21,0405
380	380000	222,4	0,1112	0,000556	21,6091
390	390000	226,9	0,11345	0,00056725	22,1778
400	400000	235,4	0,1177	0,0005885	22,7464
410	410000	239,4	0,1197	0,0005985	23,3151
420	420000	247,9	0,12395	0,00061975	23,8838
430	430000	251,8	0,1259	0,0006295	24,4524
440	440000	256,3	0,12815	0,00064075	25,0211
450	450000	264,8	0,1324	0,000662	25,5897
460	460000	274,8	0,1374	0,000687	26,1584
470	470000	279,3	0,13965	0,00069825	26,7271
480	480000	283,3	0,14165	0,00070825	27,2957
490	490000	292,8	0,1464	0,000732	27,8644
500	500000	302,8	0,1514	0,000757	28,4330
510	510000	306,8	0,1534	0,000767	29,0017

Lanjutan Tabel 5.15 Hubungan Tegangan Regangan Benda Uji BK1

520	520000	311,3	0,15565	0,00077825	29,5704
530	530000	320,3	0,16015	0,00080075	30,1390
540	540000	329,3	0,16465	0,00082325	30,7077
550	550000	333,3	0,16665	0,00083325	31,2764
560	560000	341,8	0,1709	0,0008545	31,8450
570	570000	350,8	0,1754	0,000877	32,4137
580	580000	354,8	0,1774	0,000887	32,9823
590	590000	363,8	0,1819	0,0009095	33,5510
600	600000	372,8	0,1864	0,000932	34,1197
610	610000	377,3	0,18865	0,00094325	34,6883
620	620000	386,8	0,1934	0,000967	35,2570
630	630000	395,8	0,1979	0,0009895	35,8256
640	640000	405,3	0,20265	0,00101325	36,3943
650	650000	414,8	0,2074	0,001037	36,9630
660	660000	424,2	0,2121	0,0010605	37,5316
670	670000	434,2	0,2171	0,0010855	38,1003
680	680000	438,7	0,21935	0,00109675	38,6689
690	690000	453,7	0,22685	0,00113425	39,2376
700	700000	463,7	0,23185	0,00115925	39,8063
710	710000	478,7	0,23935	0,00119675	40,3749
720	720000	488,7	0,24435	0,00122175	40,9436
730	730000	504,7	0,25235	0,00126175	41,5123
740	740000	546,2	0,2731	0,0013655	42,0809
750	750000	573,2	0,2866	0,001433	42,6496
760	760000	592,2	0,2961	0,0014805	43,2182
770	770000	635,4	0,3177	0,0015885	43,7869
780	780000	651,4	0,3257	0,0016285	44,3556
790	790000	694,4	0,3472	0,001736	44,9242
800	800000	721,7	0,36085	0,00180425	45,4929
810	810000	748,7	0,37435	0,00187175	46,0615

Dari Tabel 5.15 di atas, berdasarkan hasil yang didapat dari pembacaan dial saat pengujian modulus elastisitas, dapat dibuat grafik hubungan antara tegangan dan regangan dengan bantuan program *Microsoft Excel*. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji BK1 tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5.14 Grafik Tegangan-regangan Benda Uji BK1

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.14 dan data pada Tabel 5.15 di atas, dilakukan perhitungan koreksi regangan dengan bantuan program *AutoCad*. Selanjutnya, dapat dilakukan perhitungan modulus elastisitas menggunakan Persamaan 3.21 (menurut ASTM C-469-94) sebagai berikut.

$$S_2 = 18,1972 \text{ MPa.}$$

$$S_1 = 1,96 \text{ MPa.}$$

$$\varepsilon_2 = 0,000463 \text{ MPa (terkoreksi).}$$

$$\varepsilon_1 = 0,00005.$$

$$E = \frac{18,1972 - 1,96}{0,000463 - 0,00005} = 39315,25 \text{ MPa}.$$

Dengan Persamaan 3.21 tersebut atau menurut cara perhitungan modulus elastisitas berdasarkan ASTM C-469-94, didapatkan hasil nilai modulus elastisitas untuk beton sampel BK1 senilai 39315,25 MPa. Selanjutnya dilakukan pula perhitungan modulus elastisitas untuk benda uji lainnya. Rekapitulasi hasil perhitungan modulus elastisitas berdasarkan ASTM C-469-94 dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut.

Tabel 5.16 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton ASTM C-469-94

Tipe Benda Uji	Ec (MPa)	Ec rerata (MPa)
BK	39315,14	34998
	38382,70	
	27296,38	
BSK1	32856,61	30452
	30440,15	
	28059,42	
BSK2	37816,33	36165
	34931,72	
	35746,77	
BSK3	29907,68	28464
	29765,66	
	25718,45	
BSK4	20601,85	22479
	21875,15	
	24959,62	

Selain dengan menggunakan Persamaan 3.21, nilai modulus elastisitas juga dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.22 dan 3.23. Persamaan 3.22 dan 3.23 mengacu pada SNI-2847-2019 dengan memperhitungkan modulus elastisitas berdasarkan berat volume dan kuat tekan maksimum. Perhitungan berdasarkan berat volume hanya dapat dilakukan jika benda uji memiliki berat volume antara 1400-2560 kg/m³. Contoh perhitungan modulus elastisitas menurut SNI-2847-2019 menggunakan benda uji BN1 dapat dilihat sebagai berikut.

Berat volume = 2419,32 kg/m³.

Kuat tekan maksimum = 46,0615 MPa.

$$E_c = 2419,32^{1,5} \times 0,043 \times 46,0615 = 34727,8 \text{ MPa} \quad (\text{Persamaan 3.22}).$$

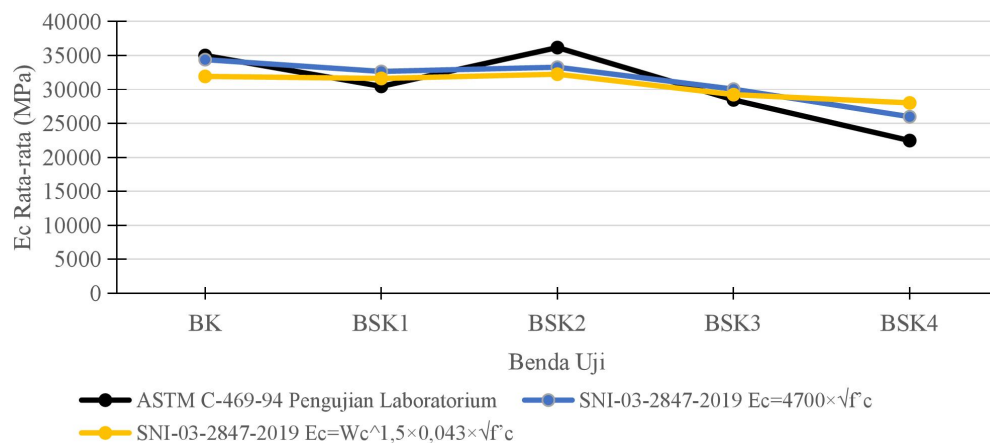
$$E_c = 4700 \times \sqrt{46,06} = 31898,27 \text{ Mpa} \quad (\text{Persamaan 3.23}).$$

Hasil perhitungan keseluruhan untuk perhitungan modulus elastisitas menurut SNI-2847-2019 dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut.

Tabel 5.17 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton SNI-2847-2019

Tipe Benda Uji	W _c (kg/m ³)	f' _c (MPa)	$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c}$		$E_c = W_c^{1,5} \times 0,043 \times \sqrt{f'_c}$	
			Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Ec (MPa)	Rerata (MPa)
BK	2419,32	46,06	31898,27	31917,74357	34727,80	34384,80
	2398,76	46,56	32070,81		34471,62	
	2388,99	45,73	31784,15		33954,98	
BSK1	2297,15	44,97	31518,23	31619,95644	31748,06	32651,24
	2380,30	46,28	31975,20		33972,73	
	2327,96	44,54	31366,44		32232,94	
BSK2	2350,08	46,38	32007,98	32244,00895	33653,29	33271,70
	2332,86	48,33	32672,82		33387,36	
	2312,22	46,50	32051,22		32774,45	
BSK3	2307,79	39,09	29386,51	29236,93569	30629,73	30043,87
	2333,10	38,18	29042,76		29944,00	
	2311,47	38,81	29281,53		29557,89	
BSK4	2134,15	34,14	27461,29	28069,21041	24770,16	25985,88
	2199,76	36,44	28373,17		26781,94	
	2186,72	36,06	28373,17		26405,54	

Data perhitungan modulus elastisitas pada Tabel 5.17 di atas menunjukkan perbedaan antara modulus elastisitas berdasarkan kuat tekan dan berat volume. Nilai modulus elastisitas berdasarkan kuat tekan mencapai nilai paling tinggi pada variasi BSK2 dengan 32244,01 MPa. Nilai modulus elastisitas berdasarkan berat volume mencapai nilai tertinggi pada variasi BK dengan 34384,8 MPa. Untuk nilai modulus elastisitas terendah, baik berdasarkan kuat tekan dan berat volume, ada pada variasi BSK4 dengan nilai 28069,21 MPa dan 25985,88 MPa. Hasil perhitungan modulus elastisitas berdasarkan pengujian dan teori dapat dibuat grafik perbandingan nilai modulus elastisitas. Grafik hubungan nilai modulus elastisitas dengan variasi beton menurut 3 (tiga) perhitungan di atas dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5.15 Grafik Perbandingan Modulus Elastisitas Beton dengan Variasi

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.15, perhitungan nilai modulus elastisitas menggunakan metode ASTM C-469-94 menunjukkan hasil yang berbeda dibandingkan dengan metode SNI-03-2847-2019. Hal ini dikarenakan metode ASTM C-469-94 menggunakan data langsung saat pengujian di laboratorium. Sedangkan metode SNI-03-2847-2019, data modulus elastisitas diperoleh dari pendekatan nilai kuat tekan dan berat volume beton. Berdasarkan metode SNI-03-2847-2019 menggunakan kuat tekan dan metode ASTM C-469-94, nilai modulus elastisitas tertinggi didapatkan pada variasi BSK2. Sedangkan pada metode SNI-03-2847-2019 menggunakan berat volume, nilai modulus elastisitas tertinggi ada pada variasi beton kontrol (BK).

Nilai modulus elastisitas ini juga dipengaruhi oleh kuat tekan dan bentuk beton. Semakin tinggi nilai kuat tekan beton dan semakin sedikit rongga pada beton, maka nilai modulus elastisitas akan semakin besar. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, maka beton akan semakin daktail dan elastis. Rekapitulasi perhitungan modulus elastisitas berdasarkan ASTM C-469-94 dan SNI-2847-2019 dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut.

Tabel 5.18 Rekapitulasi Perhitungan Modulus Elastisitas

Tipe Benda Uji	Wc (kg/m ³)	f _c (MPa)	$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c}$		$E_c = W_c^{1.5} \times 0,043 \times \sqrt{f'_c}$		ASTM C-469-94	
			Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Ec (MPa)	Rerata (MPa)	Ec (MPa)	Rerata (MPa)
BK	2419,32	46,06	31898,27	31917,7	34727,80	34384,80	39315,14	34998,07
	2398,76	46,56	32070,81		34471,62		38382,70	
	2388,99	45,73	31784,15		33954,98		27296,38	
BSK1	2297,15	44,97	31518,23	31620	31748,06	32651,24	32856,61	30452,06
	2380,30	46,28	31975,20		33972,73		30440,15	
	2327,96	44,54	31366,44		32232,94		28059,42	
BSK2	2350,08	46,38	32007,98	32244	33653,29	33271,70	37816,33	36164,95
	2332,86	48,33	32672,82		33387,36		34931,72	
	2312,22	46,50	32051,22		32774,45		35746,77	
BSK3	2307,79	39,09	29386,51	29236,9	30629,73	30043,87	29907,68	28463,93
	2333,10	38,18	29042,76		29944,00		29765,66	
	2311,47	38,81	29281,53		29557,89		25718,45	
BSK4	2134,15	34,14	27461,29	28019,8	24770,16	25985,88	20601,85	22478,87
	2199,76	36,44	28373,17		26781,94		21875,15	
	2186,72	36,06	28373,17		26405,54		24959,62	

5.6 Rekapitulasi

Berdasarkan keseluruhan pengujian dari pembuatan campuran beton hingga pengujian beton didapatkan data hasil pengujian. Data hasil pengujian meliputi hasil uji *slump*, kuat tekan beton, kuat tarik belah beton, dan modulus elastisitas beton untuk masing-masing sampel benda uji tiap variasi. Tabel 5.19 berikut merupakan rekapitulasi hasil untuk berbagai pengujian sampel benda uji pada penelitian ini.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari keseluruhan penelitian yang telah dilaksanakan, mulai dari tahap pengujian sifat agregat, *mix design*, pembuatan benda uji, perawatan benda uji, pengujian, dan analisis hasil, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penelitian ini dilakukan dengan membuat total 30 sampel dengan 5 variasi. Variasi kontrol dengan kode BK merupakan beton mutu tinggi dengan *silica fume* dan *superplasticizer*. Variasi 1-4 dengan kode BSK1, BSK2, BSK3, dan BSK4 merupakan beton dengan rencana mutu tinggi menggunakan bahan-tambah serbuk kaca sebagai *filler*. Kadar serbuk kaca yang digunakan adalah 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen. Kadar *silica fume* adalah 10% dari berat semen dan *superplasticizer* adalah 0,3% dari berat semen.
2. Nilai rata-rata kuat tekan beton kontrol mencapai 46,12 MPa. Nilai ini sudah mencapai kelompok beton mutu tinggi, yaitu >41,4 MPa dan melebihi mutu beton rencana.
3. Nilai kuat tekan maksimum didapatkan pada variasi 2 (BSK2), yaitu dengan bahan-tambah serbuk kaca 5% dengan kekuatan 47,07 MPa.
4. Nilai kuat tekan paling rendah ada pada variasi 4 (BSK4), yaitu dengan bahan-tambah serbuk kaca 10% dengan kekuatan 35,55 MPa.
5. Nilai kuat tarik belah maksimum pada variasi 2 (BSK2) dengan nilai rata-rata 3,91 MPa. Nilai kuat tarik belah terendah ada pada variasi 4 (BSK4) dengan nilai rata-rata 2,88 MPa.
6. Nilai modulus elastisitas mengalami perbedaan antara 2 metode yang digunakan. Hal ini terjadi karena metode ASTM C-469-94 didasarkan pada data pengujian langsung di lapangan, sedangkan metode SNI-03-2847-2019 menggunakan pendekatan dari nilai kuat tekan dan berat volume.
7. Komposisi optimum penggunaan serbuk kaca sebagai *filler* adalah 5% dari berat semen.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang ada dan proses penelitian, terdapat saran yang bisa dilakukan agar kedepannya bisa dilakukan dan dikembangkan penelitian yang lebih baik. Saran yang diberikan adalah sebagai berikut.

1. Beton mutu tinggi memerlukan material yang baik dan proses pembuatan yang teliti. Material yang digunakan harus memiliki sifat yang baik. Dalam proses pembuatan, harus konsisten agar hasilnya baik. Proses pemadatan harus diperhatikan dan dilakukan dengan baik.
2. Perlu dicoba dengan ukuran agregat kasar yang lebih kecil agar beton semakin padat.
3. Untuk pembuatan beton mutu tinggi, kadar *silica fume* tidak mensubstitusi kadar semen.
4. Jenis serbuk kaca dapat dicoba dengan jenis yang lain, seperti kaca *pyrex*. Ukuran serbuk kaca dapat dicoba dengan ukuran yang lebih kecil, seperti dibawah 40 μm .
5. Faktor air semen dapat dicoba dengan angka yang lebih kecil sehingga penggunaan air akan semakin sedikit.
6. Perlu dilakukan pengujian *vicat* pada campuran semen dengan serbuk kaca untuk mengetahui *setting time* semen dengan tambahan serbuk kaca.
7. Perlu dilakukan uji kandungan udara untuk mengetahui kadar udara pada campuran beton.
8. Untuk pembuatan beton mutu tinggi dengan bahan-tambah *superplasticizer*, perlu ditambahkan *retarder* untuk memperlambat *setting time* campuran.
9. Disarankan pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan penambahan sebagai *filler* atau penggantian semen dengan kadar serbuk kaca yang lebih tinggi dari 10% dari berat semen pada beton mutu normal hingga tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

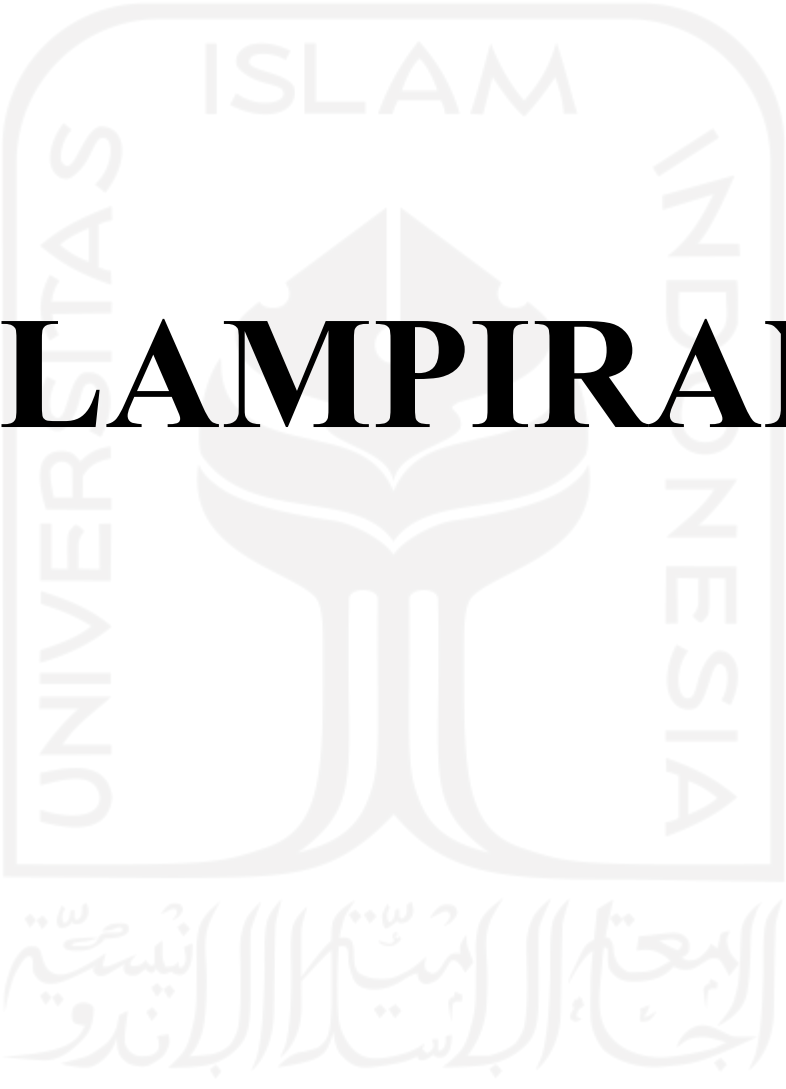
- Afif, A. 2019. *Pengaruh Abu Batu Sebagai Substitusi Agregat Halus dan Penambahan Superplasticizer Terhadap Karakteristik Beton Mutu Tinggi*. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Aliabdo, A., A., Abd Elmoaty, M., & Aboshama, A. Y. 2016. Utilization of Waste Glass Powder in The Production of Cement and Concrete. *Construction and Building Materials*. 124. 866-877.
- American Society for Testing and Materials. 1994. C-469-94. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials. 2003. C33-03. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Annual Book of ASTM Standards.
- Apriwelni, S., dan Wirawan, N. B. 2020. Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Memanfaatkan Fly Ash dan Bubuk Kaca Sebagai Bahan Pengisi. *Jurnal Saintis*. 20(01). 61-68.
- Badan Standardisasi Nasional. 2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal (SNI 03-2834-2000)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2000. *Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu Terbang (SNI 03-6468-2000)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2004. *Semen Portland (SNI 15-2049-2004)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2004. *Semen Portland Komposit (SNI 15-7064-2004)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2004. *Semen Portland Pozolan (SNI 15-0302-2004)*. Jakarta.

- Badan Standardisasi Nasional. 2008. *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus (SNI 1670:2008)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional, 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder (SNI 1974-2011)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2011. *Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium (SNI 2493-2011)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2014. *Metode Uji Kekuatan Tarik Belah Belah Spesimen Beton Silinder (SNI 03-2491-2014)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2019. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI 03-2847-2019)*. Jakarta.
- Darmawan, A., Bestyan., dan Gunawan. 2007. Pengaruh Substitusi Kaca Terhadap Kuat Tekan dan Suhu Reaksi Semen Portland. *J. Kim. Sains & Apl.* 10(3). 86-92
- Du, H., dan Tan, K. H. 2016. Properties of High Volume Glass Powder Concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- Gražulytė, J., Vaitkus, A., Šernas, O., dan Čygas, D. 2020. Effect of Silica Fume on High-strength Concrete Performance. *5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'20)*. 162. 1-6.
- Hadori, A., Pranoto, Y., & Sutarto, T. E. 2015. Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Penambahan Fly Ash dan Admixture Superplasticizer. *Jurnal Inersia*. 7(1). 50-55.
- Hanafiah, N. 2011. *Pengaruh Penambahan Bubuk Kaca Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen dengan Variasi 2%, 4%, 6%, dan 8% Terhadap Kuat Tekan dan Nilai Slump*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- Kosmatka, S. H. et al. 2002. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th ed. Portland Cement Association. Illinois.
- Lukar, S. E. C., Pandaleke, R., dan Wallah, S. 2020. Pengujian Modulus Elastisitas Pada Beton dengan Menggunakan Tras Sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus. *Jurnal Sipil Statik*. 8(1). 33-38.
- Manurung, B. J. O. F., dan Hermawan, O. H. 2006. *Pengaruh Kadar Lumpur*

- pada Agregat Halus dalam Pembuatan Mix Design Beton*. Universitas Diponegoro, Semarang
- Mulyati., dan Arkis, Z. 2020. Pengaruh Metode Perawatan Beton Terhadap Kuat Tekan Beton Normal. *Jurnal Teknik Sipil ITP*. 7(2). 78-84.
- Mulyono, T. 2004. *Teknologi Beton*. Andi. Yogyakarta
- Nawy, E. G., 1990. *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Penerbit Erlangga. Jakarta
- Nevile, A. M., dan Brooks, M. M. 1987. *Concrete Technology*. 2nd ed. Pearson. Essex.
- Nst, M. A. R. 2017. *Pengaruh Penambahan Silica Fume dan Superplasticizer pada Self Compacting Concrete*. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Product Data Sheet Sika Viscocrete-3115N*. 2016. PT. Sika Indonesia. Bekasi
- Rahamudin, R. H., Manalip, H., dan Mondoringin, M. 2016. Pengujian Kuat Tarik Belah dan Kuat Tarik Lentur Beton Ringan Beragregat Kasar (Batu Apung) dan Abu Sekam Padi Sebagai Substitusi Parsial Semen. *Jurnal Sipil Statik*. 4(3). 255-231
- Rizaty, M. A. 2020. Mayoritas Sampah Nasional dari Aktivitas Rumah Tangga pada 2020. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2021/07/29/mayoritas-sampah-nasional-dari-aktivitas-rumah-tangga-pada-2020>. Diakses pada 5 Oktober 2022.
- Samet, B., Khmiri, A., dan Chaabouni., M. 2012. Assessment of The Waste Glass Powder Pozzolanic Activity by Different Methods. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 10. 322.
- Susanti, N., Sari, S. M., dan Maulana, F. 2019. A Study of Strength Activity Index of Pozzolan and Silica Sand with Ordinary Portland Cement Using ASTM C595 / C595M-12 Method. *Journal of Technomaterial Physics*. 1(2). 148-155.
- Suwigno, G. A. L. 2015. *Pengaruh Sebagian Agregat Halus dengan Serbuk Kaca Terhadap Sifat Mekanik Beton*. Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Technical Data Sheet SikaFume*. 2005. PT. Sika Indonesia. Bekasi.
- Tjokrodinuljo, K. 2018. *Teknologi Beton*. Biro Penerbit Teknik Sipil Keluarga

Mahasiswa Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.
Yogyakarta.





LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus

**PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR
AGREGAT HALUS**

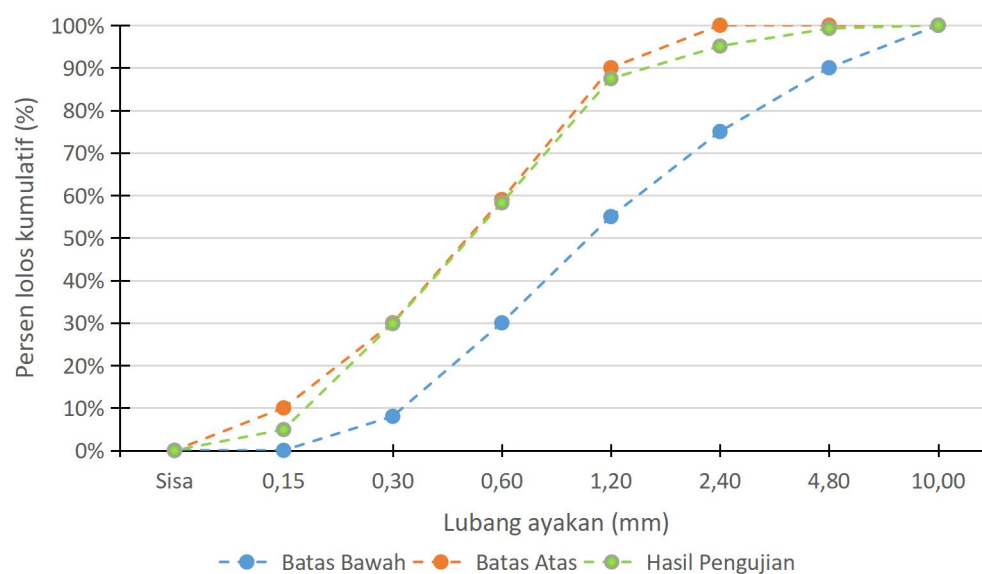
Uraian	Hasil	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat tabung (W1), gram	11360	11360
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gram	19300	19495
Berat agregat (W3), gram	7940	8135
Volume tabung (V), cm ³	5442,27	5442,27
Berat volume padat, gram/cm ³	1,4589	1,4948

Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus

PEMERIKSAAN ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS

1. Sampel 1

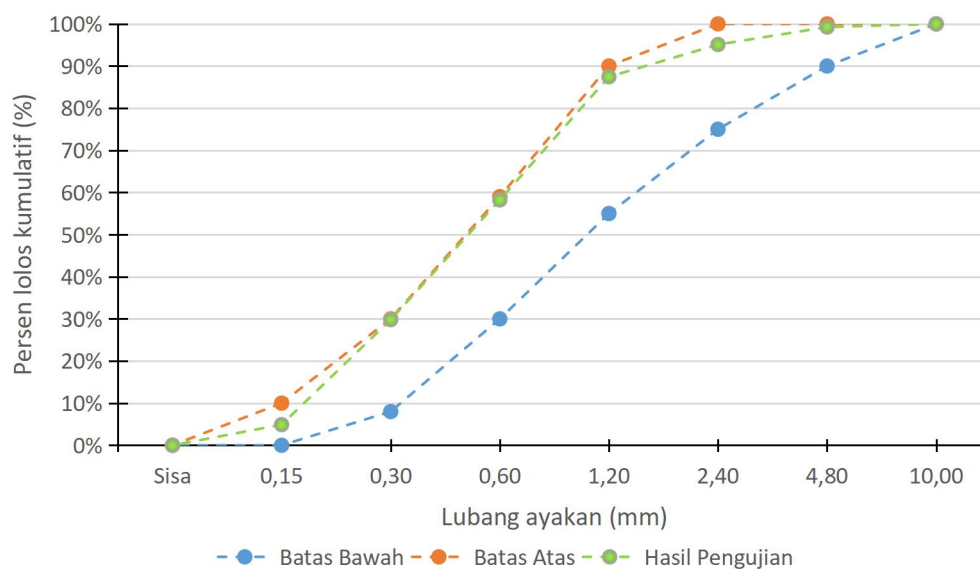
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas Bawah	Batas Atas
40,00		0%	0%	100%		
20,00		0%	0%	100%		
10,00		0%	0%	100%	100	100
4,80	9	0,45%	0,45%	99,55%	90	100
2,40	94	4,7%	5,16%	94,84%	75	100
1,20	181	9,06%	14,21%	85,79%	55	90
0,60	541	27,08%	41,29%	58,71%	30	59
0,30	576	28,83%	70,12%	29,88%	8	30
0,15	513	25,68%	95,80%	4,2%	0	10
Sisa	84	4,2%	100%	0%	0	0
Jumlah	1998	100%	227,03%			



Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus

2. Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas Bawah	Batas Atas
40,00		0%	0%	100%		
20,00		0%	0%	100%		
10,00		0%	0%	100%	100	100
4,80	15	0,75%	0,75%	99,25%	90	100
2,40	83	4,15%	4,90%	95,10%	75	100
1,20	153	7,65%	12,56%	87,44%	55	90
0,60	584	29,21%	41,77%	58,23%	30	59
0,30	568	28,41%	70,19%	29,81%	8	30
0,15	498	24,91%	95,10%	4,90%	0	10
Sisa	98	4,90%	100%	0%	0	0
Jumlah	1999	100%	225,26%			



Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus**PEMERIKSAAN KADAR LUMPUR AGREGAT HALUS**

Uraian	Hasil	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat agregat kering oven (W1), gram	500	500
Berat agregat kering oven setelah dicuci (W2), gram	497	497
Berat yang lolos saringan no. 200	0,6%	0,6%

Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus

**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME PADAT AGREGAT
HALUS**

Uraian	Hasil	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat tabung (W1), gram	11360	11360
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gram	19300	19495
Berat agregat (W3), gram	7940	8135
Volume tabung (V), cm ³	5442,27	5442,27
Berat volume padat, gram/cm ³	1,4589	1,4948

Diperiksa oleh:

Dikerjakan oleh:

.....

.....

Lampiran 2 Hasil Uji Sifat Agregat Kasar

**PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR
AGREGAT KASAR**

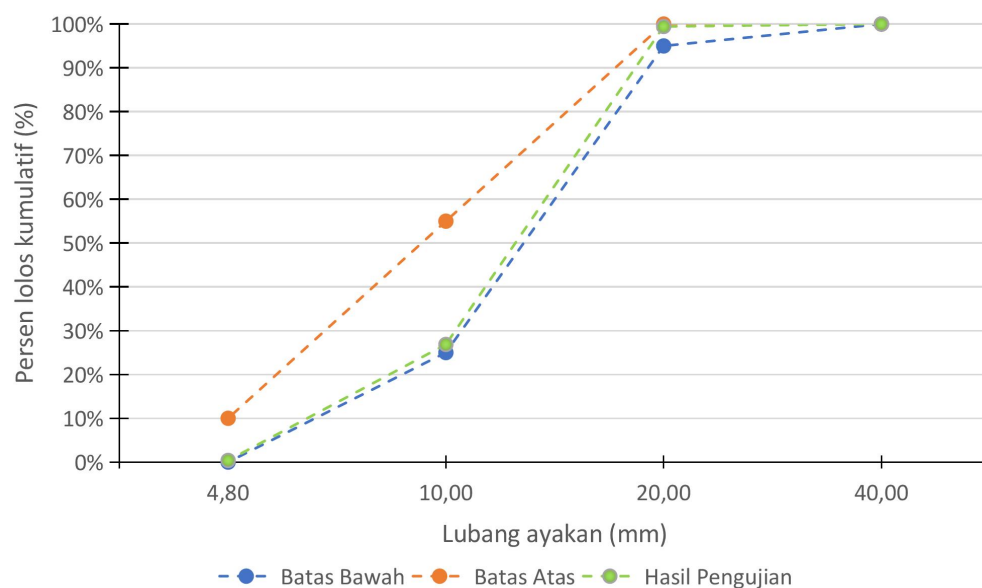
Uraian	Hasil pengamatan		Rata-rata
	Sampel 1	Sampel 2	
Berat kerikil kering mutlak, gram (Bk)	4894	4891	
Berat kerikil jenuh kering muka (SSD), gram	5000	5000	
Berat kerikil dalam air, gram (Ba)	3123	3140	
Berat jenis curah	2,61	2,63	2,62
Berat jenis jenuh kering muka (SSD)	2,66	2,69	2,68
Berat jenis semu	2,76	2,79	2,78
Penyerapan air	2,17%	2,23%	2,2%

Lampiran 2 Hasil Uji Sifat Agregat Kasar

PEMERIKSAAN ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR

1. Sampel 1

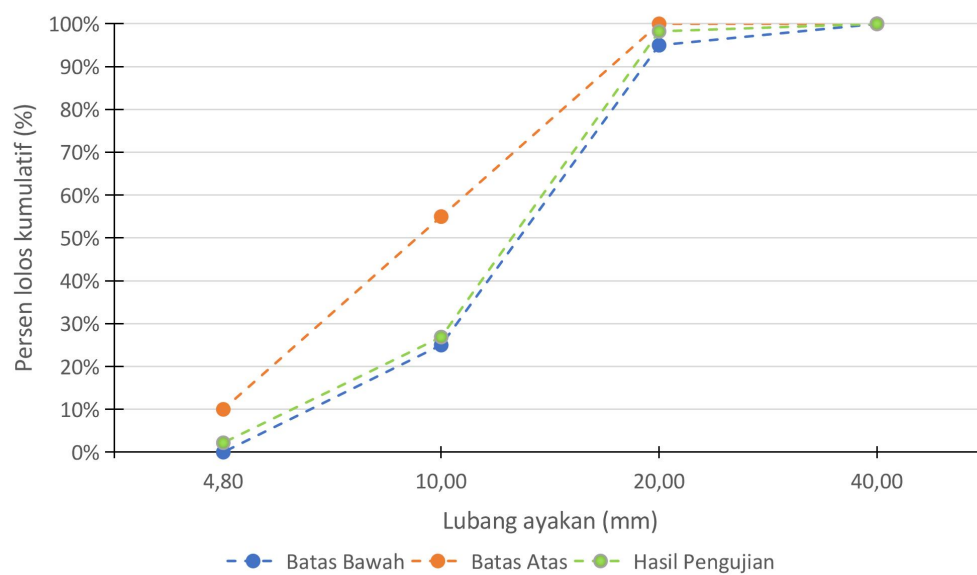
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas Bawah	Batas Atas
40,00	0	0,00%	0%	100%	100%	100%
20,00	28	0,56%	0,56%	99,44%	95%	100%
10,00	3627	72,58%	73,14%	26,86%	25%	55%
4,80	1323	26,48%	99,62%	0,38%	0%	10%
2,40	1	0,02%	99,64%	0,36%		
1,20	0	0%	99,64%	0,36%		
0,60	0	0%	99,64%	0,36%		
0,30	0	0%	99,64%	0,36%		
0,15	0	0%	99,64%	0,36%		
Sisa	18	0,36%	100%	0%		
Jumlah	4997	100%	671,52%			



Lampiran 2 Hasil Uji Sifat Agregat Kasar

2. Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)	Batas Bawah	Batas Atas
40,00	0	0%	0%	100%	100%	100%
20,00	88	1,78%	1,76%	98,24%	95%	100%
10,00	3566	71,36%	73,12%	26,88%	25%	55%
4,80	1233	24,67%	97,80%	2,20%	0%	10%
2,40	72	1,44%	99,24%	0,76%		
1,20	3	0,06%	99,30%	0,70%		
0,60	0	0%	99,30%	0,70%		
0,30	0	0%	99,30%	0,70%		
0,15	0	0%	99,30%	0,70%		
Sisa	37	0,74%	100%	0%		
Jumlah	4999	100%	669,12%			



Lampiran 2 Hasil Uji Sifat Agregat Kasar

**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME PADAT AGREGAT
KASAR**

Uraian	Hasil	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat tabung (W1), gram	12160	12160
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gram	20080	20269
Berat agregat (W3), gram	7920	8109
Volume tabung (V), cm ³	5362,93	5362,93
Berat volume padat, gram/cm ³	1,477	1,512

Diperiksa oleh:

Dikerjakan oleh:

.....

.....

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1.1 Proses Pencucian Agregat Kasar



Gambar L-1.2 Proses SSD Agregat Kasar dan Halus

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian**Gambar L-1.3 Perendaman Agregat Kasar****Gambar L-1.4 Perendaman Agregat Halus**

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1.5 Pengujian Berat Jenis dengan Piknometer



Gambar L-1.6 Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1.7 Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar



Gambar L-1.8 Pengujian Kadar Lumpur (Lolos Saringan No. 200)

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1.9 Persiapan Bekisting Sebelum *Mixing*



Gambar L-1.10 Pengolesan Oli pada Bekisting

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian

Gambar L-1.11 Proses *Mixing*



Gambar L-1.12 Beton Segar Pasca *Mixing*

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1.13 Beton Setelah Lepas Bekisting



Gambar L-1.14 Proses *Curing*

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian**Gambar L-1.15 Uji Kuat Tekan****Gambar L-1.16 Uji Kuat Tarik**

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1.17 Uji Modulus Elastisitas



Gambar L-1.19 Kompresiometer saat Uji Modulus Elastisitas

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian**Gambar L-1.19 Beton Setelah Pengujian**

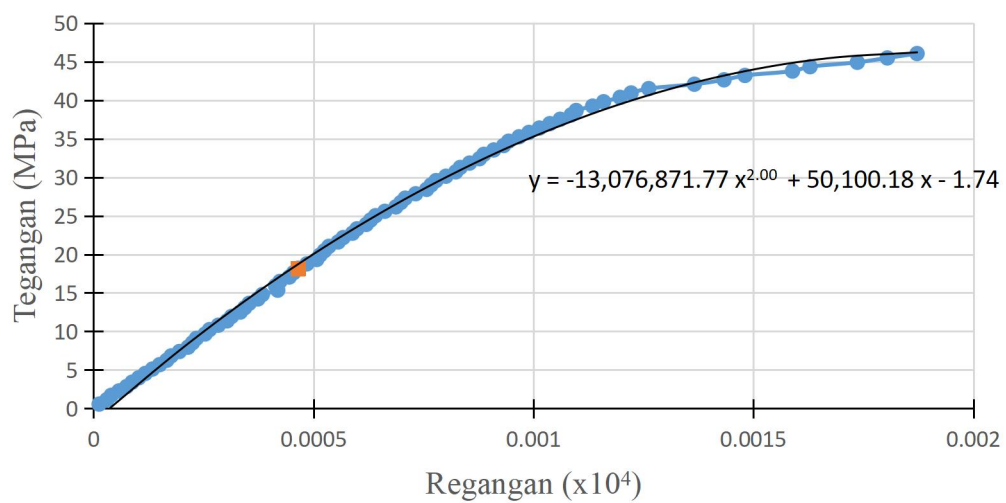
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

1. Modulus elastisitas BK1.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	5	0,0025	0,0000125	0,5687
20	20000	12	0,006	0,00003	1,1373
30	30000	16	0,008	0,00004	1,7060
40	40000	23	0,0115	0,0000575	2,2746
50	50000	30	0,015	0,000075	2,8433
60	60000	35	0,0175	0,0000875	3,4120
70	70000	41	0,0205	0,0001025	3,9806
80	80000	47	0,0235	0,0001175	4,5493
90	90000	53,5	0,02675	0,00013375	5,1179
100	100000	60	0,03	0,00015	5,6866
110	110000	66,5	0,03325	0,00016625	6,2553
120	120000	70,5	0,03525	0,00017625	6,8239
130	130000	78	0,039	0,000195	7,3926
140	140000	85,9	0,04295	0,00021475	7,9613
150	150000	89,9	0,04495	0,00022475	8,5299
160	160000	93,4	0,0467	0,0002335	9,0986
170	170000	101,4	0,0507	0,0002535	9,6672
180	180000	105,4	0,0527	0,0002635	10,2359
190	190000	113,4	0,0567	0,0002835	10,8046
200	200000	121,4	0,0607	0,0003035	11,3732
210	210000	125,4	0,0627	0,0003135	11,9419
220	220000	133,4	0,0667	0,0003335	12,5105
230	230000	137,4	0,0687	0,0003435	13,0792
240	240000	141,4	0,0707	0,0003535	13,6479
250	250000	149,4	0,0747	0,0003735	14,2165
260	260000	153,4	0,0767	0,0003835	14,7852
270	270000	167,4	0,0837	0,0004185	15,3538
280	280000	165,4	0,0827	0,0004135	15,9225
290	290000	169,4	0,0847	0,0004235	16,4912
300	300000	177,9	0,08895	0,00044475	17,0598
310	310000	181,9	0,09095	0,00045475	17,6285
320	320000	185,9	0,09295	0,00046475	18,1972
330	330000	193,9	0,09695	0,00048475	18,7658
340	340000	202,9	0,10145	0,00050725	19,3345

350	350000	205,9	0,10295	0,00051475	19,9031
360	360000	209,9	0,10495	0,00052475	20,4718
370	370000	213,9	0,10695	0,00053475	21,0405
380	380000	222,4	0,1112	0,000556	21,6091
390	390000	226,9	0,11345	0,00056725	22,1778
400	400000	235,4	0,1177	0,0005885	22,7464
410	410000	239,4	0,1197	0,0005985	23,3151
420	420000	247,9	0,12395	0,00061975	23,8838
430	430000	251,8	0,1259	0,0006295	24,4524
440	440000	256,3	0,12815	0,00064075	25,0211
450	450000	264,8	0,1324	0,000662	25,5897
460	460000	274,8	0,1374	0,000687	26,1584
470	470000	279,3	0,13965	0,00069825	26,7271
480	480000	283,3	0,14165	0,00070825	27,2957
490	490000	292,8	0,1464	0,000732	27,8644
500	500000	302,8	0,1514	0,000757	28,4330
510	510000	306,8	0,1534	0,000767	29,0017
520	520000	311,3	0,15565	0,00077825	29,5704
530	530000	320,3	0,16015	0,00080075	30,1390
540	540000	329,3	0,16465	0,00082325	30,7077
550	550000	333,3	0,16665	0,00083325	31,2764
560	560000	341,8	0,1709	0,0008545	31,8450
570	570000	350,8	0,1754	0,000877	32,4137
580	580000	354,8	0,1774	0,000887	32,9823
590	590000	363,8	0,1819	0,0009095	33,5510
600	600000	372,8	0,1864	0,000932	34,1197
610	610000	377,3	0,18865	0,00094325	34,6883
620	620000	386,8	0,1934	0,000967	35,2570
630	630000	395,8	0,1979	0,0009895	35,8256
640	640000	405,3	0,20265	0,00101325	36,3943
650	650000	414,8	0,2074	0,001037	36,9630
660	660000	424,2	0,2121	0,0010605	37,5316
670	670000	434,2	0,2171	0,0010855	38,1003
680	680000	438,7	0,21935	0,00109675	38,6689
690	690000	453,7	0,22685	0,00113425	39,2376
700	700000	463,7	0,23185	0,00115925	39,8063
710	710000	478,7	0,23935	0,00119675	40,3749
720	720000	488,7	0,24435	0,00122175	40,9436
730	730000	504,7	0,25235	0,00126175	41,5123

740	740000	546,2	0,2731	0,0013655	42,0809
750	750000	573,2	0,2866	0,001433	42,6496
760	760000	592,2	0,2961	0,0014805	43,2182
770	770000	635,4	0,3177	0,0015885	43,7869
780	780000	651,4	0,3257	0,0016285	44,3556
790	790000	694,4	0,3472	0,001736	44,9242
800	800000	721,7	0,36085	0,00180425	45,4929
810	810000	748,7	0,37435	0,00187175	46,0615



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	34727.80	Berdasarkan berat volume.
	31898.27	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	39315.14	Berdasarkan pengujian.

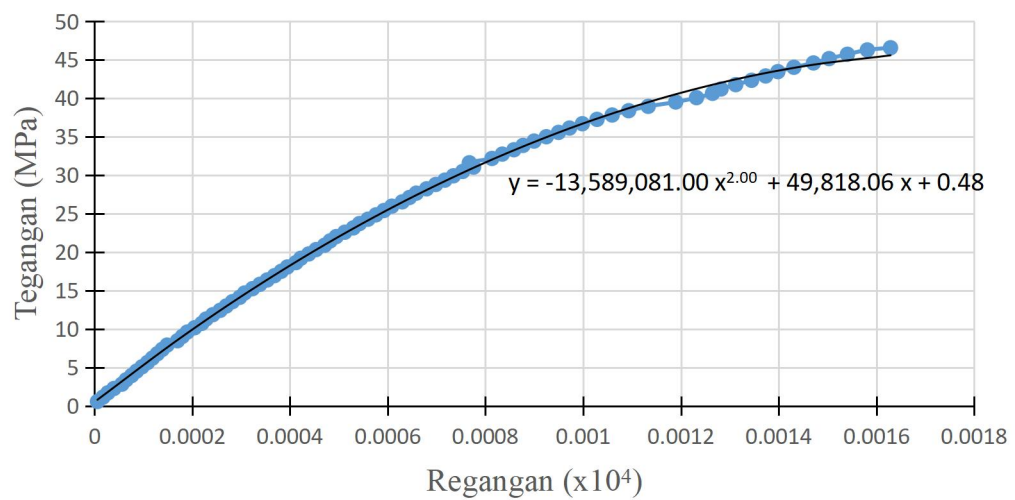
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

2. Modulus elastisitas BK2.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	2,5	0,00125	0,00000625	0,5644
20	20000	7	0,0035	0,0000175	1,1288
30	30000	11	0,0055	0,0000275	1,6931
40	40000	16	0,008	0,00004	2,2575
50	50000	22,5	0,01125	0,00005625	2,8219
60	60000	26	0,013	0,000065	3,3863
70	70000	30,5	0,01525	0,00007625	3,9506
80	80000	34,5	0,01725	0,00008625	4,5150
90	90000	39	0,0195	0,0000975	5,0794
100	100000	43,5	0,02175	0,00010875	5,6438
110	110000	47,5	0,02375	0,00011875	6,2082
120	120000	51,5	0,02575	0,00012875	6,7725
130	130000	55,5	0,02775	0,00013875	7,3369
140	140000	59,5	0,02975	0,00014875	7,9013
150	150000	68	0,034	0,00017	8,4657
160	160000	72	0,036	0,00018	9,0301
170	170000	76	0,038	0,00019	9,5944
180	180000	82	0,041	0,000205	10,1588
190	190000	87,9	0,04395	0,00021975	10,7232
200	200000	91,4	0,0457	0,0002285	11,2876
210	210000	96,9	0,04845	0,00024225	11,8519
220	220000	102,9	0,05145	0,00025725	12,4163
230	230000	107,9	0,05395	0,00026975	12,9807
240	240000	112,9	0,05645	0,00028225	13,5451
250	250000	118,9	0,05945	0,00029725	14,1095
260	260000	122,9	0,06145	0,00030725	14,6738
270	270000	129,4	0,0647	0,0003235	15,2382
280	280000	135,4	0,0677	0,0003385	15,8026
290	290000	141,4	0,0707	0,0003535	16,3670
300	300000	147,4	0,0737	0,0003685	16,9313
310	310000	152,9	0,07645	0,00038225	17,4957
320	320000	157,9	0,07895	0,00039475	18,0601
330	330000	164,9	0,08245	0,00041225	18,6245
340	340000	168,9	0,08445	0,00042225	19,1889

350	350000	175,4	0,0877	0,0004385	19,7532
360	360000	181,4	0,0907	0,0004535	20,3176
370	370000	188,4	0,0942	0,000471	20,8820
380	380000	192,9	0,09645	0,00048225	21,4464
390	390000	197,9	0,09895	0,00049475	22,0108
400	400000	204,9	0,10245	0,00051225	22,5751
410	410000	211,9	0,10595	0,00052975	23,1395
420	420000	216,9	0,10845	0,00054225	23,7039
430	430000	223,9	0,11195	0,00055975	24,2683
440	440000	230,4	0,1152	0,000576	24,8326
450	450000	236,9	0,11845	0,00059225	25,3970
460	460000	243,4	0,1217	0,0006085	25,9614
470	470000	251,9	0,12595	0,00062975	26,5258
480	480000	257,8	0,1289	0,0006445	27,0902
490	490000	263,4	0,1317	0,0006585	27,6545
500	500000	271,8	0,1359	0,0006795	28,2189
510	510000	279,3	0,13965	0,00069825	28,7833
520	520000	286,8	0,1434	0,000717	29,3477
530	530000	293,8	0,1469	0,0007345	29,9120
540	540000	301,3	0,15065	0,00075325	30,4764
550	550000	310,3	0,15515	0,00077575	31,0408
560	560000	306,8	0,1534	0,000767	31,6052
570	570000	325,3	0,16265	0,00081325	32,1696
580	580000	333,8	0,1669	0,0008345	32,7339
590	590000	343,3	0,17165	0,00085825	33,2983
600	600000	350,8	0,1754	0,000877	33,8627
610	610000	359,8	0,1799	0,0008995	34,4271
620	620000	369,8	0,1849	0,0009245	34,9915
630	630000	379,8	0,1899	0,0009495	35,5558
640	640000	388,8	0,1944	0,000972	36,1202
650	650000	399,3	0,19965	0,00099825	36,6846
660	660000	411,3	0,20565	0,00102825	37,2490
670	670000	423,7	0,21185	0,00105925	37,8133
680	680000	437,2	0,2186	0,001093	38,3777
690	690000	453,2	0,2266	0,001133	38,9421
700	700000	475,7	0,23785	0,00118925	39,5065
710	710000	492,7	0,24635	0,00123175	40,0709
720	720000	505,8	0,2529	0,0012645	40,6352
730	730000	512,8	0,2564	0,001282	41,1996

740	740000	524,8	0,2624	0,001312	41,7640
750	750000	537,8	0,2689	0,0013445	42,3284
760	760000	549,3	0,27465	0,00137325	42,8927
770	770000	559,3	0,27965	0,00139825	43,4571
780	780000	572,4	0,2862	0,001431	44,0215
790	790000	588,4	0,2942	0,001471	44,5859
800	800000	601,2	0,3006	0,001503	45,1503
810	810000	616,2	0,3081	0,0015405	45,7146
820	820000	632,5	0,31625	0,00158125	46,2790
825	825000	651,5	0,32575	0,00162875	46,5612



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	34471.62	Berdasarkan berat volume.
	32070.81	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	38382.70	Berdasarkan pengujian.

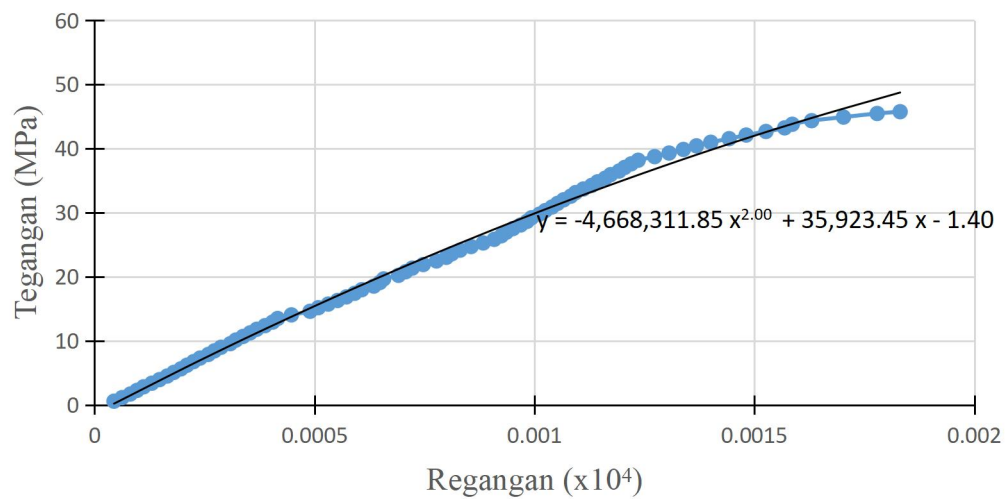
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

3. Modulus elastisitas BK3.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	17,6	0,0088	0,000044	0,5611
20	20000	25	0,0125	0,0000625	1,1223
30	30000	32,5	0,01625	0,00008125	1,6834
40	40000	38,5	0,01925	0,00009625	2,2445
50	50000	44,5	0,02225	0,00011125	2,8057
60	60000	52	0,026	0,00013	3,3668
70	70000	59	0,0295	0,0001475	3,9280
80	80000	66	0,033	0,000165	4,4891
90	90000	72	0,036	0,00018	5,0502
100	100000	78,5	0,03925	0,00019625	5,6114
110	110000	83,9	0,04195	0,00020975	6,1725
120	120000	89,9	0,04495	0,00022475	6,7336
130	130000	95,9	0,04795	0,00023975	7,2948
140	140000	103,4	0,0517	0,0002585	7,8559
150	150000	108,9	0,05445	0,00027225	8,4170
160	160000	114,9	0,05745	0,00028725	8,9782
170	170000	123,4	0,0617	0,0003085	9,5393
180	180000	128,4	0,0642	0,000321	10,1004
190	190000	134,9	0,06745	0,00033725	10,6616
200	200000	141,4	0,0707	0,0003535	11,2227
210	210000	147,4	0,0737	0,0003685	11,7839
220	220000	154,9	0,07745	0,00038725	12,3450
230	230000	161,9	0,08095	0,00040475	12,9061
240	240000	166,4	0,0832	0,000416	13,4673
250	250000	178,9	0,08945	0,00044725	14,0284
260	260000	195,9	0,09795	0,00048975	14,5895
270	270000	203,4	0,1017	0,0005085	15,1507
280	280000	212,4	0,1062	0,000531	15,7118
290	290000	220,9	0,11045	0,00055225	16,2729
300	300000	228,9	0,11445	0,00057225	16,8341
310	310000	236,4	0,1182	0,000591	17,3952
320	320000	242,9	0,12145	0,00060725	17,9563
330	330000	253,8	0,1269	0,0006345	18,5175
340	340000	259,3	0,12965	0,00064825	19,0786

350	350000	262,8	0,1314	0,000657	19,6398
360	360000	276,3	0,13815	0,00069075	20,2009
370	370000	282,8	0,1414	0,000707	20,7620
380	380000	288,8	0,1444	0,000722	21,3232
390	390000	298,8	0,1494	0,000747	21,8843
400	400000	310,8	0,1554	0,000777	22,4454
410	410000	319,8	0,1599	0,0007995	23,0066
420	420000	324,8	0,1624	0,000812	23,5677
430	430000	332,3	0,16615	0,00083075	24,1288
440	440000	342,3	0,17115	0,00085575	24,6900
450	450000	353,3	0,17665	0,00088325	25,2511
460	460000	363,3	0,18165	0,00090825	25,8122
470	470000	369,8	0,1849	0,0009245	26,3734
480	480000	374,4	0,1872	0,000936	26,9345
490	490000	380,4	0,1902	0,000951	27,4957
500	500000	387,4	0,1937	0,0009685	28,0568
510	510000	393,2	0,1966	0,000983	28,6179
520	520000	397,2	0,1986	0,000993	29,1791
530	530000	404,4	0,2022	0,001011	29,7402
540	540000	409,8	0,2049	0,0010245	30,3013
550	550000	415,9	0,20795	0,00103975	30,8625
560	560000	420,9	0,21045	0,00105225	31,4236
570	570000	426,4	0,2132	0,001066	31,9847
580	580000	432,9	0,21645	0,00108225	32,5459
590	590000	437,3	0,21865	0,00109325	33,1070
600	600000	444,3	0,22215	0,00111075	33,6681
610	610000	451,9	0,22595	0,00112975	34,2293
620	620000	457,3	0,22865	0,00114325	34,7904
630	630000	464,2	0,2321	0,0011605	35,3516
640	640000	469,2	0,2346	0,001173	35,9127
650	650000	476,9	0,23845	0,00119225	36,4738
660	660000	481,9	0,24095	0,00120475	37,0350
670	670000	487,9	0,24395	0,00121975	37,5961
680	680000	494,2	0,2471	0,0012355	38,1572
690	690000	509,2	0,2546	0,001273	38,7184
700	700000	522,3	0,26115	0,00130575	39,2795
710	710000	535,3	0,26765	0,00133825	39,8406
720	720000	547,2	0,2736	0,001368	40,4018
730	730000	560,2	0,2801	0,0014005	40,9629

740	740000	576,9	0,28845	0,00144225	41,5240
750	750000	592,4	0,2962	0,001481	42,0852
760	760000	610,4	0,3052	0,001526	42,6463
770	770000	627,4	0,3137	0,0015685	43,2075
780	780000	634,3	0,31715	0,00158575	43,7686
790	790000	651,9	0,32595	0,00162975	44,3297
800	800000	680,9	0,34045	0,00170225	44,8909
810	810000	711,5	0,35575	0,00177875	45,4520
815	815000	732,4	0,3662	0,001831	45,7326



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	33954.98	Berdasarkan berat volume.
	31784.15	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	27296.38	Berdasarkan pengujian.

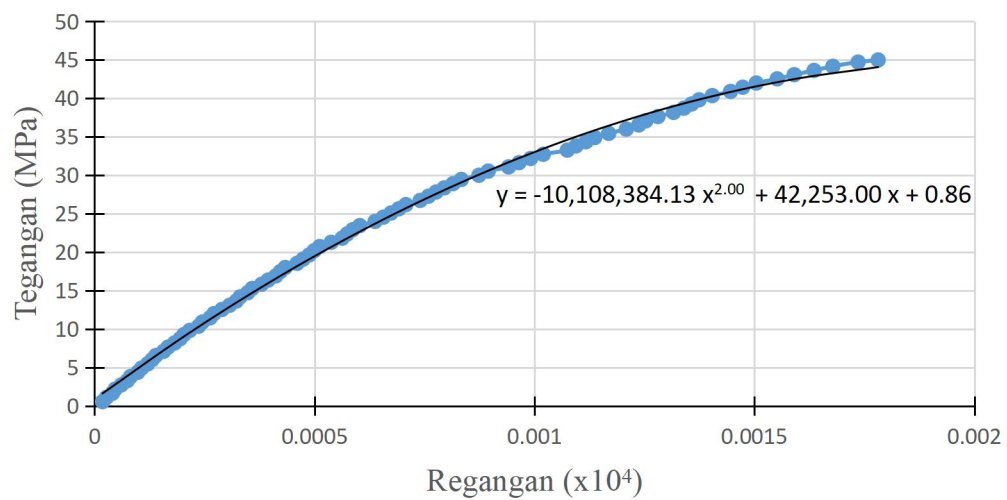
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

4. Modulus elastisitas BSK1-1.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	7,2	0,0036	0,000018	0,5451
20	20000	10,7	0,00535	0,00002675	1,0902
30	30000	16,2	0,0081	0,0000405	1,6353
40	40000	18,7	0,00935	0,00004675	2,1804
50	50000	24,2	0,0121	0,0000605	2,7255
60	60000	29,7	0,01485	0,00007425	3,2706
70	70000	32,7	0,01635	0,00008175	3,8157
80	80000	39,2	0,0196	0,000098	4,3608
90	90000	42,7	0,02135	0,00010675	4,9059
100	100000	48,2	0,0241	0,0001205	5,4510
110	110000	52,2	0,0261	0,0001305	5,9961
120	120000	55,7	0,02785	0,00013925	6,5412
130	130000	62,7	0,03135	0,00015675	7,0863
140	140000	66,7	0,03335	0,00016675	7,6314
150	150000	72,7	0,03635	0,00018175	8,1765
160	160000	77,7	0,03885	0,00019425	8,7216
170	170000	81,2	0,0406	0,000203	9,2667
180	180000	86,5	0,04325	0,00021625	9,8117
190	190000	94,5	0,04725	0,00023625	10,3568
200	200000	98	0,049	0,000245	10,9019
210	210000	105	0,0525	0,0002625	11,4470
220	220000	108,5	0,05425	0,00027125	11,9921
230	230000	115,8	0,0579	0,0002895	12,5372
240	240000	122,8	0,0614	0,000307	13,0823
250	250000	128,8	0,0644	0,000322	13,6274
260	260000	132,3	0,06615	0,00033075	14,1725
270	270000	139,3	0,06965	0,00034825	14,7176
280	280000	143,3	0,07165	0,00035825	15,2627
290	290000	151,8	0,0759	0,0003795	15,8078
300	300000	157,8	0,0789	0,0003945	16,3529
310	310000	164,8	0,0824	0,000412	16,8980
320	320000	168,8	0,0844	0,000422	17,4431
330	330000	173,3	0,08665	0,00043325	17,9882
340	340000	184,1	0,09205	0,00046025	18,5333

350	350000	189,6	0,0948	0,000474	19,0784
360	360000	195,1	0,09755	0,00048775	19,6235
370	370000	199,6	0,0998	0,000499	20,1686
380	380000	204,6	0,1023	0,0005115	20,7137
390	390000	215,1	0,10755	0,00053775	21,2588
400	400000	225,1	0,11255	0,00056275	21,8039
410	410000	229,6	0,1148	0,000574	22,3490
420	420000	234,6	0,1173	0,0005865	22,8941
430	430000	241,1	0,12055	0,00060275	23,4392
440	440000	255	0,1275	0,0006375	23,9843
450	450000	262,5	0,13125	0,00065625	24,5294
460	460000	269,5	0,13475	0,00067375	25,0745
470	470000	276,5	0,13825	0,00069125	25,6196
480	480000	283	0,1415	0,0007075	26,1647
490	490000	296	0,148	0,00074	26,7098
500	500000	303,5	0,15175	0,00075875	27,2549
510	510000	310,4	0,1552	0,000776	27,8000
520	520000	317,9	0,15895	0,00079475	28,3451
530	530000	325,9	0,16295	0,00081475	28,8902
540	540000	333,4	0,1667	0,0008335	29,4352
550	550000	349,4	0,1747	0,0008735	29,9803
560	560000	357,9	0,17895	0,00089475	30,5254
570	570000	376,4	0,1882	0,000941	31,0705
580	580000	385,9	0,19295	0,00096475	31,6156
590	590000	396,4	0,1982	0,000991	32,1607
600	600000	407,9	0,20395	0,00101975	32,7058
610	610000	429,8	0,2149	0,0010745	33,2509
620	620000	437,7	0,21885	0,00109425	33,7960
630	630000	446,7	0,22335	0,00111675	34,3411
640	640000	454,7	0,22735	0,00113675	34,8862
650	650000	467,4	0,2337	0,0011685	35,4313
660	660000	483,4	0,2417	0,0012085	35,9764
670	670000	494,7	0,24735	0,00123675	36,5215
680	680000	501,2	0,2506	0,001253	37,0666
690	690000	512,2	0,2561	0,0012805	37,6117
700	700000	526,4	0,2632	0,001316	38,1568
710	710000	535,8	0,2679	0,0013395	38,7019
720	720000	542,8	0,2714	0,001357	39,2470
730	730000	549,6	0,2748	0,001374	39,7921

740	740000	561,6	0,2808	0,001404	40,3372
750	750000	578,2	0,2891	0,0014455	40,8823
760	760000	589,3	0,29465	0,00147325	41,4274
770	770000	601,6	0,3008	0,001504	41,9725
780	780000	620,6	0,3103	0,0015515	42,5176
790	790000	636,1	0,31805	0,00159025	43,0627
800	800000	654,1	0,32705	0,00163525	43,6078
810	810000	671,2	0,3356	0,001678	44,1529
820	820000	694,2	0,3471	0,0017355	44,6980
825	825000	712,4	0,3562	0,001781	44,9705



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	31748.06	Berdasarkan berat volume.
	31518.23	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	32856.61	Berdasarkan pengujian.

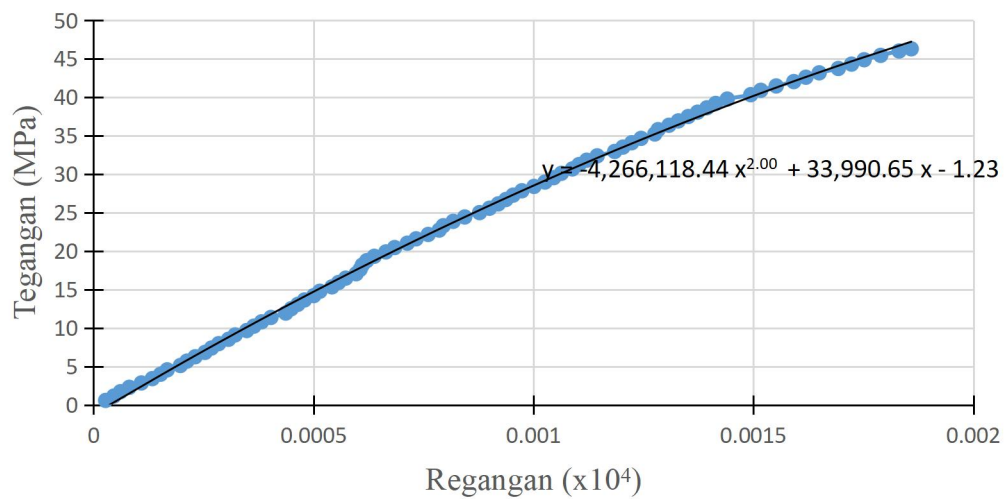
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

5. Modulus elastisitas BSK1-2.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	10,9	0,00545	0,00002725	0,5679
20	20000	18,4	0,0092	0,000046	1,1358
30	30000	24,4	0,0122	0,000061	1,7037
40	40000	32,4	0,0162	0,000081	2,2716
50	50000	43,4	0,0217	0,0001085	2,8395
60	60000	53,4	0,0267	0,0001335	3,4074
70	70000	60,9	0,03045	0,00015225	3,9753
80	80000	66,9	0,03345	0,00016725	4,5432
90	90000	78,9	0,03945	0,00019725	5,1111
100	100000	84,8	0,0424	0,000212	5,6790
110	110000	92,3	0,04615	0,00023075	6,2469
120	120000	101,3	0,05065	0,00025325	6,8148
130	130000	107,2	0,0536	0,000268	7,3827
140	140000	113,7	0,05685	0,00028425	7,9506
150	150000	122,7	0,06135	0,00030675	8,5185
160	160000	128,7	0,06435	0,00032175	9,0864
170	170000	139,2	0,0696	0,000348	9,6543
180	180000	145,7	0,07285	0,00036425	10,2222
190	190000	152,7	0,07635	0,00038175	10,7901
200	200000	161,2	0,0806	0,000403	11,3580
210	210000	174,7	0,08735	0,00043675	11,9259
220	220000	179,7	0,08985	0,00044925	12,4938
230	230000	185,7	0,09285	0,00046425	13,0617
240	240000	191,7	0,09585	0,00047925	13,6296
250	250000	200,2	0,1001	0,0005005	14,1975
260	260000	205,7	0,10285	0,00051425	14,7654
270	270000	216,7	0,10835	0,00054175	15,3333
280	280000	222,7	0,11135	0,00055675	15,9012
290	290000	229,2	0,1146	0,000573	16,4691
300	300000	238,7	0,11935	0,00059675	17,0370
310	310000	242,3	0,12115	0,00060575	17,6050
320	320000	244,3	0,12215	0,00061075	18,1729
330	330000	248,3	0,12415	0,00062075	18,7408
340	340000	255,2	0,1276	0,000638	19,3087

350	350000	265,7	0,13285	0,00066425	19,8766
360	360000	273,7	0,13685	0,00068425	20,4445
370	370000	285,2	0,1426	0,000713	21,0124
380	380000	293,2	0,1466	0,000733	21,5803
390	390000	304,2	0,1521	0,0007605	22,1482
400	400000	314,2	0,1571	0,0007855	22,7161
410	410000	317,9	0,15895	0,00079475	23,2840
420	420000	326,9	0,16345	0,00081725	23,8519
430	430000	337,4	0,1687	0,0008435	24,4198
440	440000	350,9	0,17545	0,00087725	24,9877
450	450000	359,9	0,17995	0,00089975	25,5556
460	460000	367,9	0,18395	0,00091975	26,1235
470	470000	374,9	0,18745	0,00093725	26,6914
480	480000	381,4	0,1907	0,0009535	27,2593
490	490000	389,4	0,1947	0,0009735	27,8272
500	500000	400,4	0,2002	0,001001	28,3951
510	510000	410,4	0,2052	0,001026	28,9630
520	520000	418,3	0,20915	0,00104575	29,5309
530	530000	425,3	0,21265	0,00106325	30,0988
540	540000	435,3	0,21765	0,00108825	30,6667
550	550000	441,3	0,22065	0,00110325	31,2346
560	560000	448,3	0,22415	0,00112075	31,8025
570	570000	457,9	0,22895	0,00114475	32,3704
580	580000	473,8	0,2369	0,0011845	32,9383
590	590000	481,3	0,24065	0,00120325	33,5062
600	600000	489,3	0,24465	0,00122325	34,0741
610	610000	497,8	0,2489	0,0012445	34,6420
620	620000	510,3	0,25515	0,00127575	35,2099
630	630000	513,3	0,25665	0,00128325	35,7778
640	640000	523,1	0,26155	0,00130775	36,3457
650	650000	531,6	0,2658	0,001329	36,9136
660	660000	540,6	0,2703	0,0013515	37,4815
670	670000	549,1	0,27455	0,00137275	38,0494
680	680000	557,6	0,2788	0,001394	38,6173
690	690000	565,6	0,2828	0,001414	39,1852
700	700000	576,1	0,28805	0,00144025	39,7531
710	710000	597,5	0,29875	0,00149375	40,3210
720	720000	606,6	0,3033	0,0015165	40,8889
730	730000	620,6	0,3103	0,0015515	41,4568

740	740000	636,6	0,3183	0,0015915	42,0247
750	750000	647,6	0,3238	0,001619	42,5926
760	760000	659,7	0,32985	0,00164925	43,1605
770	770000	677,1	0,33855	0,00169275	43,7284
780	780000	689,1	0,34455	0,00172275	44,2963
790	790000	700,6	0,3503	0,0017515	44,8642
800	800000	715,6	0,3578	0,001789	45,4321
810	810000	732,4	0,3662	0,001831	46,0000
815	815000	743,4	0,3717	0,0018585	46,2840



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	33972.73	Berdasarkan berat volume.
	31975.20	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	30440.15	Berdasarkan pengujian.

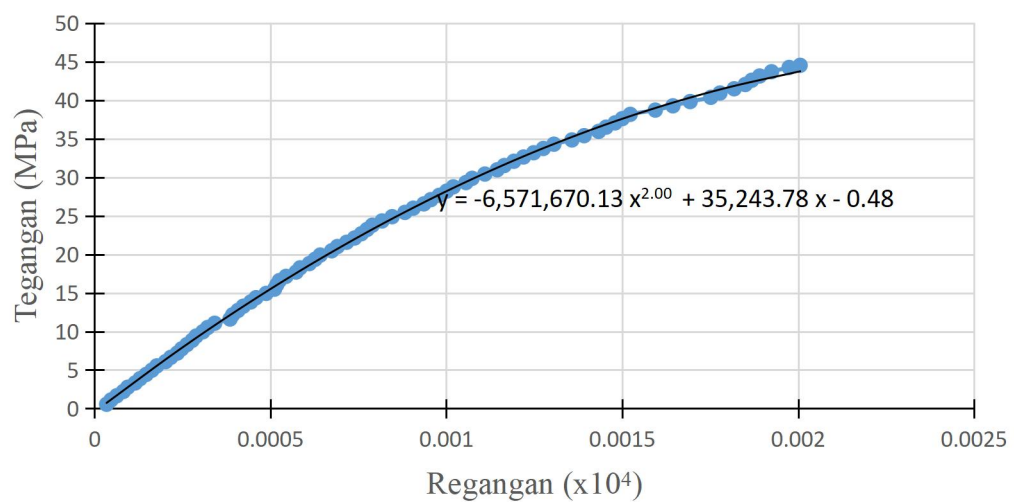
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

6. Modulus elastisitas BSK1-3.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	13,9	0,00695	0,00003475	0,5533
20	20000	18,9	0,00945	0,00004725	1,1065
30	30000	25,4	0,0127	0,0000635	1,6598
40	40000	32,9	0,01645	0,00008225	2,2131
50	50000	37,9	0,01895	0,00009475	2,7664
60	60000	46,4	0,0232	0,000116	3,3196
70	70000	51,9	0,02595	0,00012975	3,8729
80	80000	58,9	0,02945	0,00014725	4,4262
90	90000	65,4	0,0327	0,0001635	4,9795
100	100000	70,9	0,03545	0,00017725	5,5327
110	110000	80,9	0,04045	0,00020225	6,0860
120	120000	86,8	0,0434	0,000217	6,6393
130	130000	94,2	0,0471	0,0002355	7,1925
140	140000	99,2	0,0496	0,000248	7,7458
150	150000	105,2	0,0526	0,000263	8,2991
160	160000	111,2	0,0556	0,000278	8,8524
170	170000	115,7	0,05785	0,00028925	9,4056
180	180000	123,2	0,0616	0,000308	9,9589
190	190000	128,7	0,06435	0,00032175	10,5122
200	200000	136,7	0,06835	0,00034175	11,0654
210	210000	154,2	0,0771	0,0003855	11,6187
220	220000	157,2	0,0786	0,000393	12,1720
230	230000	163,2	0,0816	0,000408	12,7253
240	240000	169,2	0,0846	0,000423	13,2785
250	250000	177,7	0,08885	0,0004425	13,8318
260	260000	183,7	0,09185	0,00045925	14,3851
270	270000	195,2	0,0976	0,000488	14,9384
280	280000	204,7	0,10235	0,00051175	15,4916
290	290000	207,2	0,1036	0,000518	16,0449
300	300000	210,2	0,1051	0,0005255	16,5982
310	310000	217,8	0,1089	0,0005445	17,1514
320	320000	229,3	0,11465	0,00057325	17,7047
330	330000	233,8	0,1169	0,0005845	18,2580
340	340000	244,3	0,12215	0,00061075	18,8113

350	350000	250,8	0,1254	0,000627	19,3645
360	360000	256,7	0,12835	0,00064175	19,9178
370	370000	269,7	0,13485	0,00067425	20,4711
380	380000	276,2	0,1381	0,0006905	21,0243
390	390000	286,7	0,14335	0,00071675	21,5776
400	400000	295,7	0,14785	0,00073925	22,1309
410	410000	303,4	0,1517	0,0007585	22,6842
420	420000	309,9	0,15495	0,00077475	23,2374
430	430000	315,9	0,15795	0,00078975	23,7907
440	440000	326,9	0,16345	0,00081725	24,3440
450	450000	338,4	0,1692	0,000846	24,8973
460	460000	352,9	0,17645	0,00088225	25,4505
470	470000	362,4	0,1812	0,000906	26,0038
480	480000	374,4	0,1872	0,000936	26,5571
490	490000	382,4	0,1912	0,000956	27,1103
500	500000	391,9	0,19595	0,00097975	27,6636
510	510000	400,4	0,2002	0,001001	28,2169
520	520000	407,9	0,20395	0,00101975	28,7702
530	530000	422,3	0,21115	0,00105575	29,3234
540	540000	429,3	0,21465	0,00107325	29,8767
550	550000	443,8	0,2219	0,0011095	30,4300
560	560000	457,8	0,2289	0,0011445	30,9833
570	570000	465,9	0,23295	0,00116475	31,5365
580	580000	476,8	0,2384	0,001192	32,0898
590	590000	487,8	0,2439	0,0012195	32,6431
600	600000	499,3	0,24965	0,00124825	33,1963
610	610000	510,3	0,25515	0,00127575	33,7496
620	620000	522,3	0,26115	0,00130575	34,3029
630	630000	542,8	0,2714	0,001357	34,8562
640	640000	556,6	0,2783	0,0013915	35,4094
650	650000	573,1	0,28655	0,00143275	35,9627
660	660000	581,6	0,2908	0,001454	36,5160
670	670000	591,8	0,2959	0,0014795	37,0692
680	680000	600,0	0,3	0,0015	37,6225
690	690000	609,0	0,3045	0,0015225	38,1758
700	700000	637,5	0,31875	0,00159375	38,7291
710	710000	657,5	0,32875	0,00164375	39,2823
720	720000	677,1	0,33855	0,00169275	39,8356
730	730000	700,6	0,3503	0,0017515	40,3889

740	740000	711,0	0,3555	0,0017775	40,9422
750	750000	727,1	0,36355	0,00181775	41,4954
760	760000	739,7	0,36985	0,00184925	42,0487
770	770000	747,1	0,37355	0,00186775	42,6020
780	780000	756,1	0,37805	0,00189025	43,1552
790	790000	769,6	0,3848	0,001924	43,7085
800	800000	789,6	0,3948	0,001974	44,2618
805	805000	802,1	0,40105	0,00200525	44,5384



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	32232.94	Berdasarkan berat volume.
	31366.44	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	28059.42	Berdasarkan pengujian.

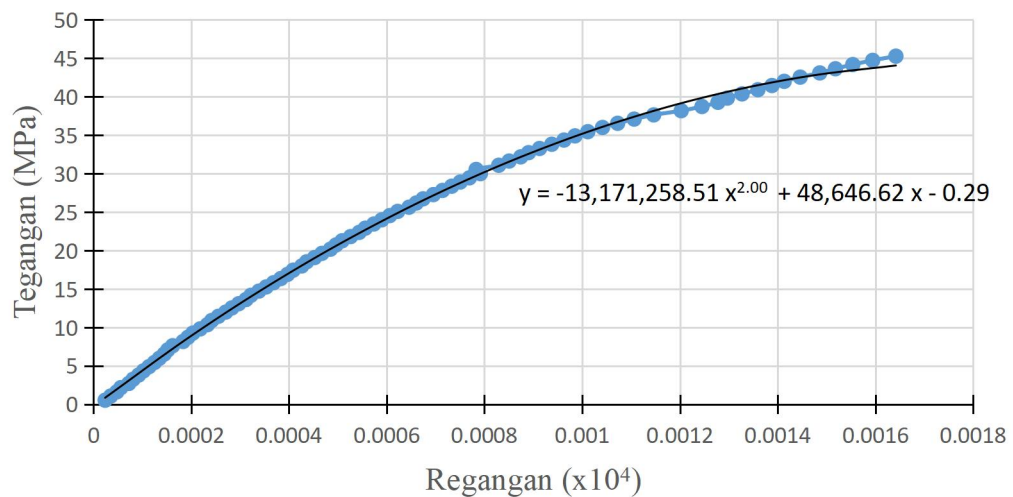
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

7. Modulus elastisitas BS2-1.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	9,6	0,0048	0,000024	0,5456
20	20000	14,2	0,0071	0,0000355	1,0911
30	30000	19,2	0,0096	0,000048	1,6367
40	40000	22,5	0,01125	0,00005625	2,1823
50	50000	29,0	0,0145	0,0000725	2,7279
60	60000	32,5	0,01625	0,00008125	3,2734
70	70000	37,0	0,0185	0,0000925	3,8190
80	80000	41,0	0,0205	0,0001025	4,3646
90	90000	45,5	0,02275	0,00011375	4,9102
100	100000	50,0	0,025	0,000125	5,4557
110	110000	54,0	0,027	0,000135	6,0013
120	120000	58,0	0,029	0,000145	6,5469
130	130000	60,9	0,03045	0,00015225	7,0924
140	140000	64,9	0,03245	0,00016225	7,6380
150	150000	73,4	0,0367	0,0001835	8,1836
160	160000	77,4	0,0387	0,0001935	8,7292
170	170000	81,4	0,0407	0,0002035	9,2747
180	180000	87,4	0,0437	0,0002185	9,8203
190	190000	93,3	0,04665	0,00023325	10,3659
200	200000	96,8	0,0484	0,000242	10,9115
210	210000	102,3	0,05115	0,00025575	11,4570
220	220000	108,3	0,05415	0,00027075	12,0026
230	230000	113,3	0,05665	0,00028325	12,5482
240	240000	118,9	0,05945	0,00029725	13,0938
250	250000	124,9	0,06245	0,00031225	13,6393
260	260000	128,9	0,06445	0,00032225	14,1849
270	270000	135,4	0,0677	0,0003385	14,7305
280	280000	141,4	0,0707	0,0003535	15,2760
290	290000	147,4	0,0737	0,0003685	15,8216
300	300000	153,4	0,0767	0,0003835	16,3672
310	310000	158,9	0,07945	0,00039725	16,9128
320	320000	163,5	0,08175	0,00040875	17,4583
330	330000	170,5	0,08525	0,00042625	18,0039
340	340000	174,5	0,08725	0,00043625	18,5495

350	350000	181,0	0,0905	0,0004525	19,0951
360	360000	187,0	0,0935	0,0004675	19,6406
370	370000	194,0	0,097	0,000485	20,1862
380	380000	198,5	0,09925	0,00049625	20,7318
390	390000	203,5	0,10175	0,00050875	21,2773
400	400000	210,5	0,10525	0,00052625	21,8229
410	410000	217,5	0,10875	0,00054375	22,3685
420	420000	222,5	0,11125	0,00055625	22,9141
430	430000	229,5	0,11475	0,00057375	23,4596
440	440000	236,0	0,118	0,00059	24,0052
450	450000	242,5	0,12125	0,00060625	24,5508
460	460000	249,0	0,1245	0,0006225	25,0964
470	470000	258,3	0,12915	0,00064575	25,6419
480	480000	264,2	0,1321	0,0006605	26,1875
490	490000	269,8	0,1349	0,0006745	26,7331
500	500000	278,2	0,1391	0,0006955	27,2787
510	510000	285,7	0,14285	0,00071425	27,8242
520	520000	293,2	0,1466	0,000733	28,3698
530	530000	300,2	0,1501	0,0007505	28,9154
540	540000	307,7	0,15385	0,00076925	29,4609
550	550000	316,7	0,15835	0,00079175	30,0065
560	560000	313,2	0,1566	0,000783	30,5521
570	570000	331,7	0,16585	0,00082925	31,0977
580	580000	340,2	0,1701	0,0008505	31,6432
590	590000	349,7	0,17485	0,00087425	32,1888
600	600000	356,1	0,17805	0,00089025	32,7344
610	610000	365,1	0,18255	0,00091275	33,2800
620	620000	375,1	0,18755	0,00093775	33,8255
630	630000	385,1	0,19255	0,00096275	34,3711
640	640000	394,1	0,19705	0,00098525	34,9167
650	650000	404,6	0,2023	0,0010115	35,4622
660	660000	416,6	0,2083	0,0010415	36,0078
670	670000	429,0	0,2145	0,0010725	36,5534
680	680000	442,5	0,22125	0,00110625	37,0990
690	690000	458,5	0,22925	0,00114625	37,6445
700	700000	481,0	0,2405	0,0012025	38,1901
710	710000	498,0	0,249	0,001245	38,7357
720	720000	511,1	0,25555	0,00127775	39,2813
730	730000	518,8	0,2594	0,001297	39,8268

740	740000	530,8	0,2654	0,001327	40,3724
750	750000	543,8	0,2719	0,0013595	40,9180
760	760000	555,3	0,27765	0,00138825	41,4636
770	770000	565,3	0,28265	0,00141325	42,0091
780	780000	578,4	0,2892	0,001446	42,5547
790	790000	594,4	0,2972	0,001486	43,1003
800	800000	607,2	0,3036	0,001518	43,6458
810	810000	621,4	0,3107	0,0015535	44,1914
820	820000	637,7	0,31885	0,00159425	44,7370
830	830000	656,7	0,32835	0,00164175	45,2826
840	840000	673,7	0,33685	0,00168425	45,8281
850	850000	692,5	0,34625	0,00173125	46,3737
860	860000	724,5	0,36225	0,00181125	46,9193
865	865000	746,2	0,3731	0,0018655	47,1921



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	33653.29	Berdasarkan berat volume.
	32007.98	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	37816.33	Berdasarkan pengujian.

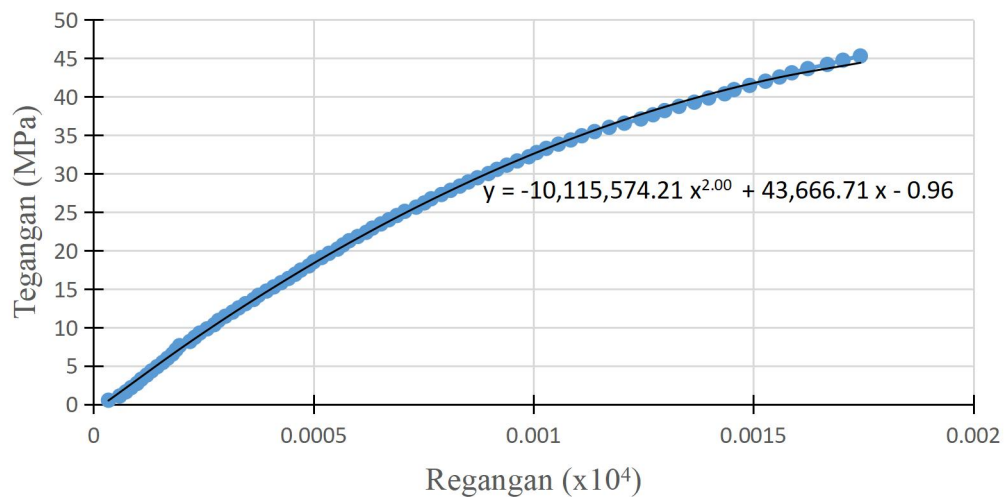
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

8. Modulus elastisitas BSK2-2.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	13,5	0,00675	0,00003375	0,5458
20	20000	23,7	0,01185	0,00005925	1,0916
30	30000	23,3	0,01165	0,00005825	1,6374
40	40000	34,1	0,01705	0,00008525	2,1832
50	50000	39,4	0,0197	0,0000985	2,7291
60	60000	43,3	0,02165	0,00010825	3,2749
70	70000	48,3	0,02415	0,00012075	3,8207
80	80000	52,8	0,0264	0,000132	4,3665
90	90000	57,8	0,0289	0,0001445	4,9123
100	100000	62,8	0,0314	0,000157	5,4581
110	110000	67,2	0,0336	0,000168	6,0039
120	120000	71,7	0,03585	0,00017925	6,5497
130	130000	74,9	0,03745	0,00018725	7,0955
140	140000	78,1	0,03905	0,00019525	7,6414
150	150000	87,6	0,0438	0,000219	8,1872
160	160000	92,0	0,046	0,00023	8,7330
170	170000	96,4	0,0482	0,000241	9,2788
180	180000	103,1	0,05155	0,00025775	9,8246
190	190000	109,7	0,05485	0,00027425	10,3704
200	200000	113,6	0,0568	0,000284	10,9162
210	210000	119,7	0,05985	0,00029925	11,4620
220	220000	126,3	0,06315	0,00031575	12,0078
230	230000	131,9	0,06595	0,00032975	12,5537
240	240000	138,1	0,06905	0,00034525	13,0995
250	250000	145,4	0,0727	0,0003635	13,6453
260	260000	149,9	0,07495	0,00037475	14,1911
270	270000	157,1	0,07855	0,00039275	14,7369
280	280000	163,8	0,0819	0,0004095	15,2827
290	290000	170,4	0,0852	0,000426	15,8285
300	300000	177,1	0,08855	0,00044275	16,3743
310	310000	183,2	0,0916	0,000458	16,9201
320	320000	188,3	0,09415	0,00047075	17,4660
330	330000	195,7	0,09785	0,00048925	18,0118
340	340000	200,1	0,10005	0,00050025	18,5576

350	350000	207,3	0,10365	0,00051825	19,1034
360	360000	214,0	0,107	0,000535	19,6492
370	370000	221,8	0,1109	0,0005545	20,1950
380	380000	226,8	0,1134	0,000567	20,7408
390	390000	232,3	0,11615	0,00058075	21,2866
400	400000	240,1	0,12005	0,00060025	21,8324
410	410000	249,9	0,12495	0,00062475	22,3783
420	420000	253,4	0,1267	0,0006335	22,9241
430	430000	261,2	0,1306	0,000653	23,4699
440	440000	268,4	0,1342	0,000671	24,0157
450	450000	275,7	0,13785	0,00068925	24,5615
460	460000	282,9	0,14145	0,00070725	25,1073
470	470000	293,2	0,1466	0,000733	25,6531
480	480000	300,7	0,15035	0,00075175	26,1989
490	490000	306,9	0,15345	0,00076725	26,7447
500	500000	316,2	0,1581	0,0007905	27,2906
510	510000	324,6	0,1623	0,0008115	27,8364
520	520000	332,9	0,16645	0,00083225	28,3822
530	530000	340,7	0,17035	0,00085175	28,9280
540	540000	349,0	0,1745	0,0008725	29,4738
550	550000	359,0	0,1795	0,0008975	30,0196
560	560000	366,7	0,18335	0,00091675	30,5654
570	570000	375,7	0,18785	0,00093925	31,1112
580	580000	385,1	0,19255	0,00096275	31,6571
590	590000	395,7	0,19785	0,00098925	32,2029
600	600000	402,8	0,2014	0,001007	32,7487
610	610000	411,6	0,2058	0,001029	33,2945
620	620000	422,7	0,21135	0,00105675	33,8403
630	630000	433,8	0,2169	0,0010845	34,3861
640	640000	443,8	0,2219	0,0011095	34,9319
650	650000	455,4	0,2277	0,0011385	35,4777
660	660000	468,8	0,2344	0,001172	36,0235
670	670000	482,6	0,2413	0,0012065	36,5694
680	680000	497,6	0,2488	0,001244	37,1152
690	690000	508,6	0,2543	0,0012715	37,6610
700	700000	519,2	0,2596	0,001298	38,2068
710	710000	532,2	0,2661	0,0013305	38,7526
720	720000	546,2	0,2731	0,0013655	39,2984
730	730000	559,2	0,2796	0,001398	39,8442

740	740000	573,8	0,2869	0,0014345	40,3900
750	750000	582,3	0,29115	0,00145575	40,9358
760	760000	596,4	0,2982	0,001491	41,4817
770	770000	610,9	0,30545	0,00152725	42,0275
780	780000	623,7	0,31185	0,00155925	42,5733
790	790000	634,8	0,3174	0,001587	43,1191
800	800000	649,3	0,32465	0,00162325	43,6649
810	810000	667,1	0,33355	0,00166775	44,2107
820	820000	681,3	0,34065	0,00170325	44,7565
830	830000	697,1	0,34855	0,00174275	45,3023
840	840000	714,3	0,35715	0,00178575	45,8481
850	850000	735,4	0,3677	0,0018385	46,3940
860	860000	754,3	0,37715	0,00188575	46,9398
870	870000	794,3	0,39715	0,00198575	47,4856



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	33387.36	Berdasarkan berat volume.
	32672.82	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	34925.76	Berdasarkan pengujian.

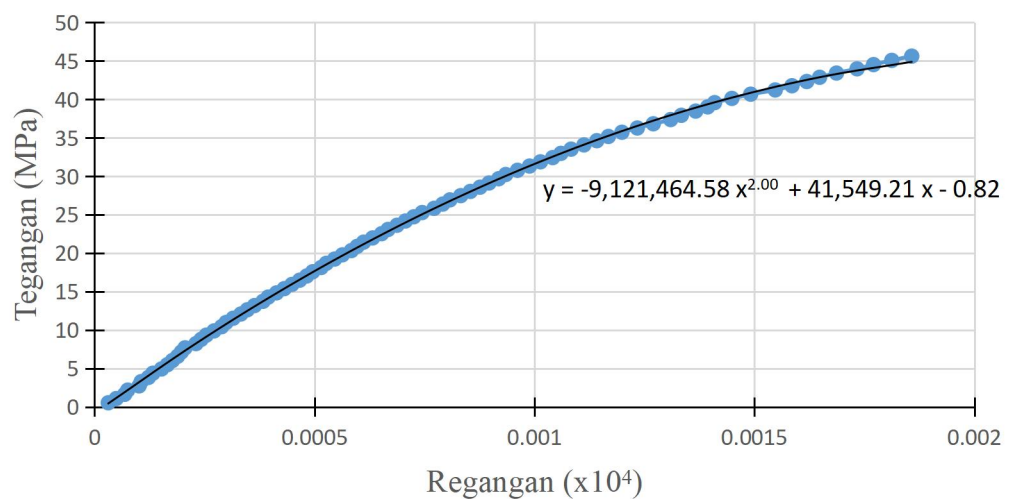
Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

9. Modulus elastisitas BSK2-3.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	12,4	0,0062	0,000031	0,5496
20	20000	19,7	0,00985	0,00004925	1,0993
30	30000	27,3	0,01365	0,00006825	1,6489
40	40000	30,1	0,01505	0,00007525	2,1986
50	50000	40,4	0,0202	0,000101	2,7482
60	60000	42,3	0,02115	0,00010575	3,2979
70	70000	48,9	0,02445	0,00012225	3,8475
80	80000	53,0	0,0265	0,0001325	4,3971
90	90000	60,8	0,0304	0,000152	4,9468
100	100000	66,1	0,03305	0,00016525	5,4964
110	110000	70,8	0,0354	0,000177	6,0461
120	120000	75,4	0,0377	0,0001885	6,5957
130	130000	78,8	0,0394	0,000197	7,1454
140	140000	82,2	0,0411	0,0002055	7,6950
150	150000	92,2	0,0461	0,0002305	8,2446
160	160000	96,8	0,0484	0,000242	8,7943
170	170000	101,5	0,05075	0,00025375	9,3439
180	180000	108,5	0,05425	0,00027125	9,8936
190	190000	115,4	0,0577	0,0002885	10,4432
200	200000	119,5	0,05975	0,00029875	10,9929
210	210000	126,0	0,063	0,000315	11,5425
220	220000	133,0	0,0665	0,0003325	12,0921
230	230000	138,8	0,0694	0,000347	12,6418
240	240000	145,4	0,0727	0,0003635	13,1914
250	250000	153,1	0,07655	0,00038275	13,7411
260	260000	157,8	0,0789	0,0003945	14,2907
270	270000	165,4	0,0827	0,0004135	14,8404
280	280000	172,4	0,0862	0,000431	15,3900
290	290000	179,4	0,0897	0,0004485	15,9397
300	300000	186,4	0,0932	0,000466	16,4893
310	310000	192,9	0,09645	0,00048225	17,0389
320	320000	198,2	0,0991	0,0004955	17,5886
330	330000	206,0	0,103	0,000515	18,1382
340	340000	210,6	0,1053	0,0005265	18,6879

350	350000	218,2	0,1091	0,0005455	19,2375
360	360000	225,3	0,11265	0,00056325	19,7872
370	370000	233,5	0,11675	0,00058375	20,3368
380	380000	238,7	0,11935	0,00059675	20,8864
390	390000	244,6	0,1223	0,0006115	21,4361
400	400000	252,7	0,12635	0,00063175	21,9857
410	410000	260,9	0,13045	0,00065225	22,5354
420	420000	266,8	0,1334	0,000667	23,0850
430	430000	275,0	0,1375	0,0006875	23,6347
440	440000	282,6	0,1413	0,0007065	24,1843
450	450000	290,2	0,1451	0,0007255	24,7339
460	460000	297,8	0,1489	0,0007445	25,2836
470	470000	308,7	0,15435	0,00077175	25,8332
480	480000	316,5	0,15825	0,00079125	26,3829
490	490000	323,0	0,1615	0,0008075	26,9325
500	500000	332,9	0,16645	0,00083225	27,4822
510	510000	341,6	0,1708	0,000854	28,0318
520	520000	350,4	0,1752	0,000876	28,5814
530	530000	358,6	0,1793	0,0008965	29,1311
540	540000	367,4	0,1837	0,0009185	29,6807
550	550000	373,8	0,1869	0,0009345	30,2304
560	560000	384,5	0,19225	0,00096125	30,7800
570	570000	395,4	0,1977	0,0009885	31,3297
580	580000	405,4	0,2027	0,0010135	31,8793
590	590000	416,5	0,20825	0,00104125	32,4289
600	600000	424,0	0,212	0,00106	32,9786
610	610000	433,2	0,2166	0,001083	33,5282
620	620000	444,9	0,22245	0,00111225	34,0779
630	630000	456,6	0,2283	0,0011415	34,6275
640	640000	467,1	0,23355	0,00116775	35,1772
650	650000	479,4	0,2397	0,0011985	35,7268
660	660000	493,5	0,24675	0,00123375	36,2764
670	670000	508,0	0,254	0,00127	36,8261
680	680000	523,7	0,26185	0,00130925	37,3757
690	690000	533,5	0,26675	0,00133375	37,9254
700	700000	546,5	0,27325	0,00136625	38,4750
710	710000	557,4	0,2787	0,0013935	39,0247
720	720000	563,7	0,28185	0,00140925	39,5743
730	730000	579,4	0,2897	0,0014485	40,1239

740	740000	596,5	0,29825	0,00149125	40,6736
750	750000	618,8	0,3094	0,001547	41,2232
760	760000	634,0	0,317	0,001585	41,7729
770	770000	647,5	0,32375	0,00161875	42,3225
780	780000	659,2	0,3296	0,001648	42,8722
790	790000	674,5	0,33725	0,00168625	43,4218
800	800000	693,2	0,3466	0,001733	43,9715
810	810000	708,2	0,3541	0,0017705	44,5211
820	820000	724,8	0,3624	0,001812	45,0707
830	830000	742,9	0,37145	0,00185725	45,6204
840	840000	765,2	0,3826	0,001913	46,1700
850	850000	787,9	0,39395	0,00196975	46,7197
855	855000	802,9	0,40145	0,00200725	46,9945



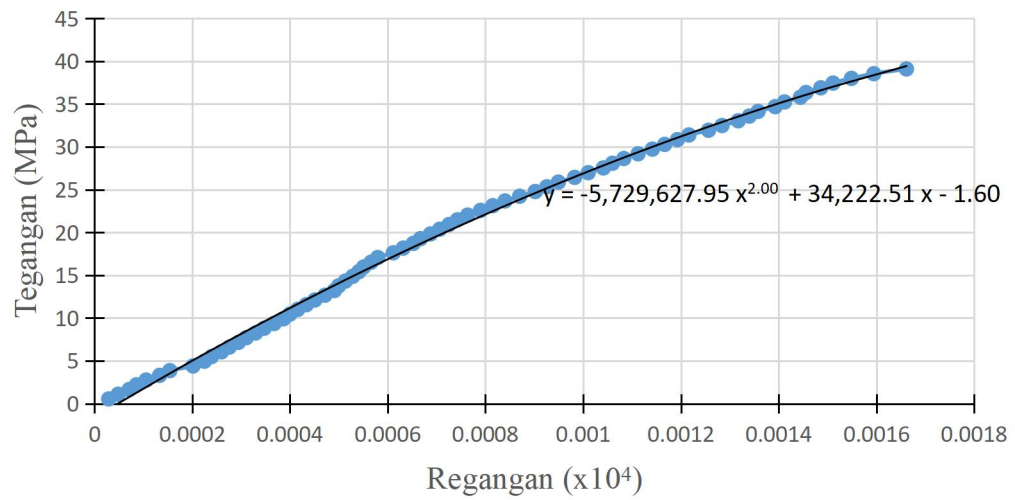
Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	32774.45	Berdasarkan berat volume.
	32051.22	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	35584.40	Berdasarkan pengujian.

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

10. Modulus elastisitas BSK3-1.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	11,7	0,00585	0,00002925	0,5506
20	20000	19,5	0,00975	0,00004875	1,1012
30	30000	28,5	0,01425	0,00007125	1,6518
40	40000	34,5	0,01725	0,00008625	2,2024
50	50000	42,4	0,0212	0,000106	2,7530
60	60000	53,4	0,0267	0,0001335	3,3036
70	70000	61,7	0,03085	0,00015425	3,8543
80	80000	80,7	0,04035	0,00020175	4,4049
90	90000	90,1	0,04505	0,00022525	4,9555
100	100000	95,9	0,04795	0,00023975	5,5061
110	110000	104,1	0,05205	0,00026025	6,0567
120	120000	110,4	0,0552	0,000276	6,6073
130	130000	117,9	0,05895	0,00029475	7,1579
140	140000	124,3	0,06215	0,00031075	7,7085
150	150000	131,9	0,06595	0,00032975	8,2591
160	160000	138,9	0,06945	0,00034725	8,8097
170	170000	147,1	0,07355	0,00036775	9,3603
180	180000	154,7	0,07735	0,00038675	9,9109
190	190000	160,0	0,08	0,0004	10,4615
200	200000	166,4	0,0832	0,000416	11,0121
210	210000	173,5	0,08675	0,00043375	11,5628
220	220000	180,5	0,09025	0,00045125	12,1134
230	230000	188,7	0,09435	0,00047175	12,6640
240	240000	196,4	0,0982	0,000491	13,2146
250	250000	199,9	0,09995	0,00049975	13,7652
260	260000	205,4	0,1027	0,0005135	14,3158
270	270000	211,4	0,1057	0,0005285	14,8664
280	280000	216,4	0,1082	0,000541	15,4170
290	290000	220,4	0,1102	0,000551	15,9676
300	300000	226,4	0,1132	0,000566	16,5182
310	310000	231,9	0,11595	0,00057975	17,0688
320	320000	244,6	0,1223	0,0006115	17,6194
330	330000	252,7	0,12635	0,00063175	18,1700
340	340000	260,9	0,13045	0,00065225	18,7207

350	350000	266,8	0,1334	0,000667	19,2713
360	360000	275,0	0,1375	0,0006875	19,8219
370	370000	282,6	0,1413	0,0007065	20,3725
380	380000	290,2	0,1451	0,0007255	20,9231
390	390000	297,1	0,14855	0,00074275	21,4737
400	400000	305,4	0,1527	0,0007635	22,0243
410	410000	316,0	0,158	0,00079	22,5749
420	420000	326,0	0,163	0,000815	23,1255
430	430000	336,0	0,168	0,00084	23,6761
440	440000	348,0	0,174	0,00087	24,2267
450	450000	360,8	0,1804	0,000902	24,7773
460	460000	370,2	0,1851	0,0009255	25,3279
470	470000	379,7	0,18985	0,00094925	25,8785
480	480000	393,0	0,1965	0,0009825	26,4292
490	490000	404,1	0,20205	0,00101025	26,9798
500	500000	416,5	0,20825	0,00104125	27,5304
510	510000	424,0	0,212	0,00106	28,0810
520	520000	433,2	0,2166	0,001083	28,6316
530	530000	444,9	0,22245	0,00111225	29,1822
540	540000	456,6	0,2283	0,0011415	29,7328
550	550000	466,7	0,23335	0,00116675	30,2834
560	560000	477,1	0,23855	0,00119275	30,8340
570	570000	486,5	0,24325	0,00121625	31,3846
580	580000	502,6	0,2513	0,0012565	31,9352
590	590000	513,6	0,2568	0,001284	32,4858
600	600000	526,9	0,26345	0,00131725	33,0364
610	610000	535,9	0,26795	0,00133975	33,5871
620	620000	543,1	0,27155	0,00135775	34,1377
630	630000	557,1	0,27855	0,00139275	34,6883
640	640000	564,8	0,2824	0,001412	35,2389
650	650000	577,8	0,2889	0,0014445	35,7895
660	660000	582,3	0,29115	0,00145575	36,3401
670	670000	594,4	0,2972	0,001486	36,8907
680	680000	604,4	0,3022	0,001511	37,4413
690	690000	619,5	0,30975	0,00154875	37,9919
700	700000	637,8	0,3189	0,0015945	38,5425
710	710000	664,5	0,33225	0,00166125	39,0931



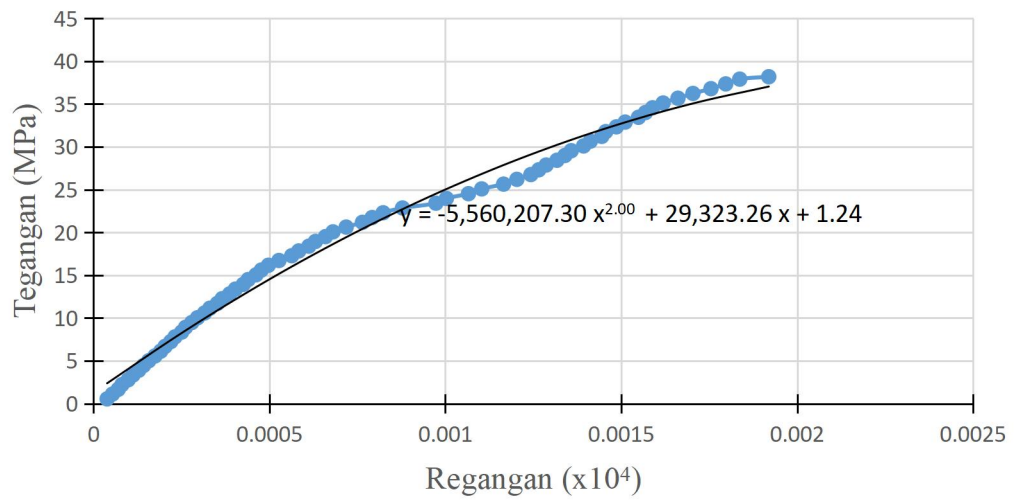
Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	30629.73	Berdasarkan berat volume.
	29386.51	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	29907.68	Berdasarkan pengujian.

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

11. Modulus elastisitas BSK3-2.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	15,6	0,0078	0,000039	0,5574
20	20000	21,7	0,01085	0,00005425	1,1149
30	30000	28,2	0,0141	0,0000705	1,6723
40	40000	32,5	0,01625	0,00008125	2,2297
50	50000	39,5	0,01975	0,00009875	2,7871
60	60000	45	0,0225	0,0001125	3,3446
70	70000	51,5	0,02575	0,00012875	3,9020
80	80000	57,0	0,0285	0,0001425	4,4594
90	90000	63,0	0,0315	0,0001575	5,0169
100	100000	70,0	0,035	0,000175	5,5743
110	110000	76,5	0,03825	0,00019125	6,1317
120	120000	81,5	0,04075	0,00020375	6,6891
130	130000	87,9	0,04395	0,00021975	7,2466
140	140000	92,8	0,0464	0,000232	7,8040
150	150000	100,3	0,05015	0,00025075	8,3614
160	160000	104,8	0,0524	0,000262	8,9189
170	170000	111,8	0,0559	0,0002795	9,4763
180	180000	118,3	0,05915	0,00029575	10,0337
190	190000	126,3	0,06315	0,00031575	10,5912
200	200000	132,4	0,0662	0,000331	11,1486
210	210000	140,9	0,07045	0,00035225	11,7060
220	220000	146,4	0,0732	0,000366	12,2634
230	230000	154,9	0,07745	0,00038725	12,8209
240	240000	161,4	0,0807	0,0004035	13,3783
250	250000	170,4	0,0852	0,000426	13,9357
260	260000	175,9	0,08795	0,00043975	14,4932
270	270000	184,9	0,09245	0,00046225	15,0506
280	280000	190,9	0,09545	0,00047725	15,6080
290	290000	198,9	0,09945	0,00049725	16,1654
300	300000	210,9	0,10545	0,00052725	16,7229
310	310000	225,4	0,1127	0,0005635	17,2803
320	320000	233,4	0,1167	0,0005835	17,8377
330	330000	244,9	0,12245	0,00061225	18,3952
340	340000	252,4	0,1262	0,000631	18,9526

350	350000	263,8	0,1319	0,0006595	19,5100
360	360000	272,3	0,13615	0,00068075	20,0674
370	370000	287,3	0,14365	0,00071825	20,6249
380	380000	305,8	0,1529	0,0007645	21,1823
390	390000	316,8	0,1584	0,000792	21,7397
400	400000	329,3	0,16465	0,00082325	22,2972
410	410000	351,3	0,17565	0,00087825	22,8546
420	420000	389,3	0,19465	0,00097325	23,4120
430	430000	401,2	0,2006	0,001003	23,9694
440	440000	426,3	0,21315	0,00106575	24,5269
450	450000	441,3	0,22065	0,00110325	25,0843
460	460000	466,2	0,2331	0,0011655	25,6417
470	470000	481,3	0,24065	0,00120325	26,1992
480	480000	497,2	0,2486	0,001243	26,7566
490	490000	506,2	0,2531	0,0012655	27,3140
500	500000	514,6	0,2573	0,0012865	27,8715
510	510000	526,9	0,26345	0,00131725	28,4289
520	520000	535,9	0,26795	0,00133975	28,9863
530	530000	543,1	0,27155	0,00135775	29,5437
540	540000	557,1	0,27855	0,00139275	30,1012
550	550000	564,8	0,2824	0,001412	30,6586
560	560000	577,8	0,2889	0,0014445	31,2160
570	570000	582,3	0,29115	0,00145575	31,7735
580	580000	594,4	0,2972	0,001486	32,3309
590	590000	604,4	0,3022	0,001511	32,8883
600	600000	619,5	0,30975	0,00154875	33,4457
610	610000	627,5	0,31375	0,00156875	34,0032
620	620000	635,5	0,31775	0,00158875	34,5606
630	630000	647,5	0,32375	0,00161875	35,1180
640	640000	664,4	0,3322	0,001661	35,6755
650	650000	681,4	0,3407	0,0017035	36,2329
660	660000	701,9	0,35095	0,00175475	36,7903
670	670000	718,7	0,35935	0,00179675	37,3477
680	680000	734,6	0,3673	0,0018365	37,9052
685	685000	767,6	0,3838	0,001919	38,1839



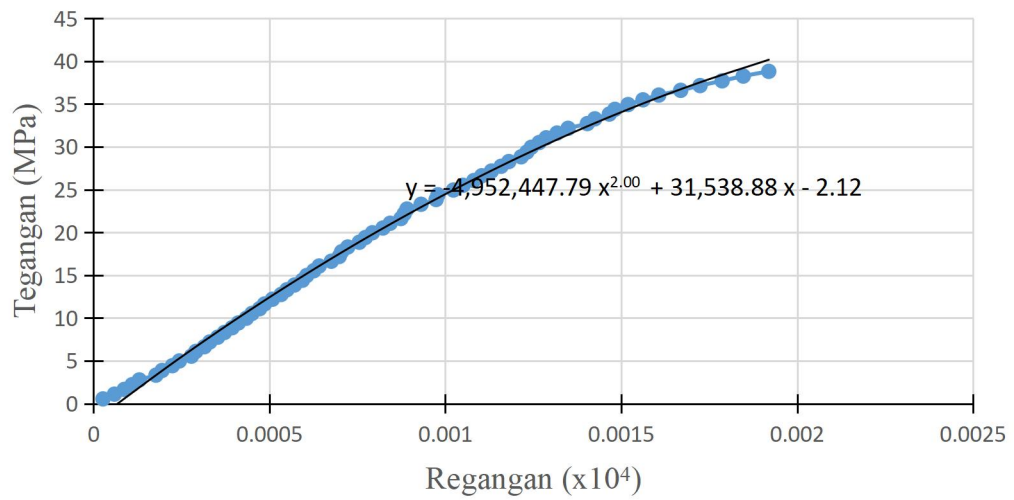
Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	29944.00	Berdasarkan berat volume.
	29042.76	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	29765.66	Berdasarkan pengujian.

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

12. Modulus elastisitas BSK3-3.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	10,9	0,00545	0,00002725	0,5545
20	20000	23,9	0,01195	0,00005975	1,1090
30	30000	35,1	0,01755	0,00008775	1,6635
40	40000	44,0	0,022	0,00011	2,2180
50	50000	52,2	0,0261	0,0001305	2,7725
60	60000	71,1	0,03555	0,00017775	3,3269
70	70000	78,1	0,03905	0,00019525	3,8814
80	80000	89,8	0,0449	0,0002245	4,4359
90	90000	97,7	0,04885	0,00024425	4,9904
100	100000	111,4	0,0557	0,0002785	5,5449
110	110000	116,4	0,0582	0,000291	6,0994
120	120000	126,2	0,0631	0,0003155	6,6539
130	130000	132,3	0,06615	0,00033075	7,2084
140	140000	141,3	0,07065	0,00035325	7,7629
150	150000	149,0	0,0745	0,0003725	8,3174
160	160000	157,7	0,07885	0,00039425	8,8718
170	170000	164,7	0,08235	0,00041175	9,4263
180	180000	173,9	0,08695	0,00043475	9,9808
190	190000	180,2	0,0901	0,0004505	10,5353
200	200000	188,9	0,09445	0,00047225	11,0898
210	210000	194,5	0,09725	0,00048625	11,6443
220	220000	203,5	0,10175	0,00050875	12,1988
230	230000	213,4	0,1067	0,0005335	12,7533
240	240000	220,0	0,11	0,00055	13,3078
250	250000	228,6	0,1143	0,0005715	13,8623
260	260000	237,6	0,1188	0,000594	14,4167
270	270000	242,5	0,12125	0,00060625	14,9712
280	280000	250,5	0,12525	0,00062625	15,5257
290	290000	256,6	0,1283	0,0006415	16,0802
300	300000	270,4	0,1352	0,000676	16,6347
310	310000	279,4	0,1397	0,0006985	17,1892
320	320000	282,1	0,14105	0,00070525	17,7437
330	330000	289,1	0,14455	0,00072275	18,2982
340	340000	302,2	0,1511	0,0007555	18,8527

350	350000	309,2	0,1546	0,000773	19,4072
360	360000	317,1	0,15855	0,00079275	19,9616
370	370000	329,1	0,16455	0,00082275	20,5161
380	380000	337,3	0,16865	0,00084325	21,0706
390	390000	349,5	0,17475	0,00087375	21,6251
400	400000	353,3	0,17665	0,00088325	22,1796
410	410000	356,4	0,1782	0,000891	22,7341
420	420000	372,4	0,1862	0,000931	23,2886
430	430000	389,5	0,19475	0,00097375	23,8431
440	440000	391,6	0,1958	0,000979	24,3976
450	450000	409,2	0,2046	0,001023	24,9521
460	460000	420,2	0,2101	0,0010505	25,5065
470	470000	432,4	0,2162	0,001081	26,0610
480	480000	441,4	0,2207	0,0011035	26,6155
490	490000	452,4	0,2262	0,001131	27,1700
500	500000	463,4	0,2317	0,0011585	27,7245
510	510000	472,2	0,2361	0,0011805	28,2790
520	520000	486,2	0,2431	0,0012155	28,8335
530	530000	492,7	0,24635	0,00123175	29,3880
540	540000	497,7	0,24885	0,00124425	29,9425
550	550000	506,6	0,2533	0,0012665	30,4970
560	560000	514,6	0,2573	0,0012865	31,0514
570	570000	526,9	0,26345	0,00131725	31,6059
580	580000	539,5	0,26975	0,00134875	32,1604
590	590000	561,4	0,2807	0,0014035	32,7149
600	600000	569,9	0,28495	0,00142475	33,2694
610	610000	586,4	0,2932	0,001466	33,8239
620	620000	592,7	0,29635	0,00148175	34,3784
630	630000	607,7	0,30385	0,00151925	34,9329
640	640000	624,6	0,3123	0,0015615	35,4874
650	650000	642,6	0,3213	0,0016065	36,0419
660	660000	667,5	0,33375	0,00166875	36,5963
670	670000	689,5	0,34475	0,00172375	37,1508
680	680000	714,6	0,3573	0,0017865	37,7053
690	690000	738,6	0,3693	0,0018465	38,2598
700	700000	767,6	0,3838	0,001919	38,8143



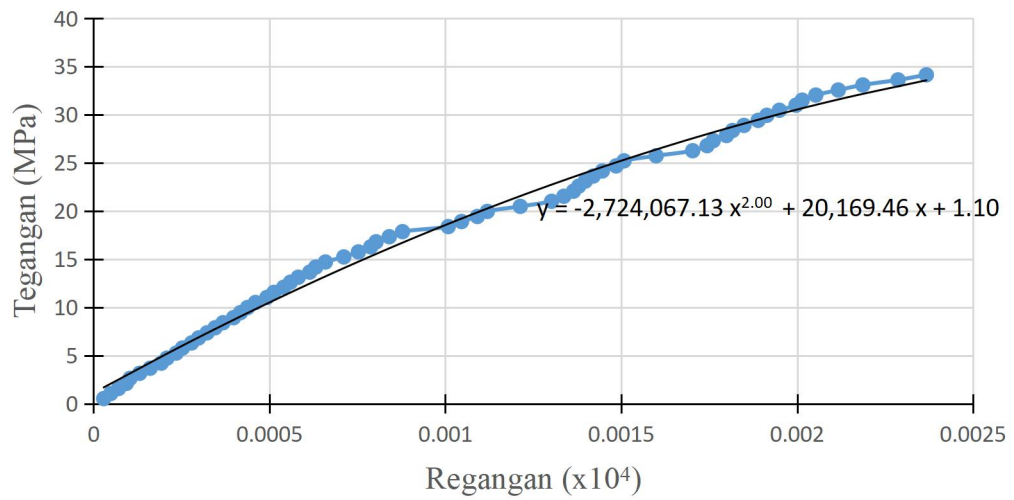
Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	29557.89	Berdasarkan berat volume.
	29281.53	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	25718.45	Berdasarkan pengujian.

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

13. Modulus elastisitas BSK4-1.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	11,7	0,00585	0,00002925	0,5252
20	20000	19,7	0,00985	0,00004925	1,0504
30	30000	28,6	0,0143	0,0000715	1,5756
40	40000	37,4	0,0187	0,0000935	2,1008
50	50000	41,6	0,0208	0,000104	2,6260
60	60000	52,6	0,0263	0,0001315	3,1513
70	70000	64,5	0,03225	0,00016125	3,6765
80	80000	77,1	0,03855	0,00019275	4,2017
90	90000	83,6	0,0418	0,000209	4,7269
100	100000	94,2	0,0471	0,0002355	5,2521
110	110000	101,2	0,0506	0,000253	5,7773
120	120000	111,6	0,0558	0,000279	6,3025
130	130000	119,6	0,0598	0,000299	6,8277
140	140000	129,2	0,0646	0,000323	7,3529
150	150000	138,3	0,06915	0,00034575	7,8781
160	160000	147,3	0,07365	0,00036825	8,4034
170	170000	159,3	0,07965	0,00039825	8,9286
180	180000	167,2	0,0836	0,000418	9,4538
190	190000	175,2	0,0876	0,000438	9,9790
200	200000	184,2	0,0921	0,0004605	10,5042
210	210000	197,2	0,0986	0,000493	11,0294
220	220000	205,2	0,1026	0,000513	11,5546
230	230000	216,3	0,10815	0,00054075	12,0798
240	240000	223,9	0,11195	0,00055975	12,6050
250	250000	232,9	0,11645	0,00058225	13,1302
260	260000	245,9	0,12295	0,00061475	13,6555
270	270000	252,7	0,12635	0,00063175	14,1807
280	280000	263,7	0,13185	0,00065925	14,7059
290	290000	284,6	0,1423	0,0007115	15,2311
300	300000	301,2	0,1506	0,000753	15,7563
310	310000	315,2	0,1576	0,000788	16,2815
320	320000	321,3	0,16065	0,00080325	16,8067
330	330000	336,3	0,16815	0,00084075	17,3319
340	340000	351,3	0,17565	0,00087825	17,8571

350	350000	403,3	0,20165	0,00100825	18,3823
360	360000	418,4	0,2092	0,001046	18,9076
370	370000	436,4	0,2182	0,001091	19,4328
380	380000	447,7	0,22385	0,00111925	19,9580
390	390000	485,2	0,2426	0,001213	20,4832
400	400000	520,7	0,26035	0,00130175	21,0084
410	410000	534,7	0,26735	0,00133675	21,5336
420	420000	545,7	0,27285	0,00136425	22,0588
430	430000	551,6	0,2758	0,001379	22,5840
440	440000	559,1	0,27955	0,00139775	23,1092
450	450000	568,1	0,28405	0,00142025	23,6344
460	460000	578,5	0,28925	0,00144625	24,1597
470	470000	594,1	0,29705	0,00148525	24,6849
480	480000	603,1	0,30155	0,00150775	25,2101
490	490000	639,6	0,3198	0,001599	25,7353
500	500000	681,1	0,34055	0,00170275	26,2605
510	510000	697,5	0,34875	0,00174375	26,7857
520	520000	704,5	0,35225	0,00176125	27,3109
530	530000	719,5	0,35975	0,00179875	27,8361
540	540000	726,4	0,3632	0,001816	28,3613
550	550000	739,4	0,3697	0,0018485	28,8865
560	560000	755,5	0,37775	0,00188875	29,4118
570	570000	765,4	0,3827	0,0019135	29,9370
580	580000	779,6	0,3898	0,001949	30,4622
590	590000	798,6	0,3993	0,0019965	30,9874
600	600000	805,6	0,4028	0,002014	31,5126
610	610000	821,1	0,41055	0,00205275	32,0378
620	620000	846,6	0,4233	0,0021165	32,5630
630	630000	874,5	0,43725	0,00218625	33,0882
640	640000	914,5	0,45725	0,00228625	33,6134
650	650000	946,7	0,47335	0,00236675	34,1386



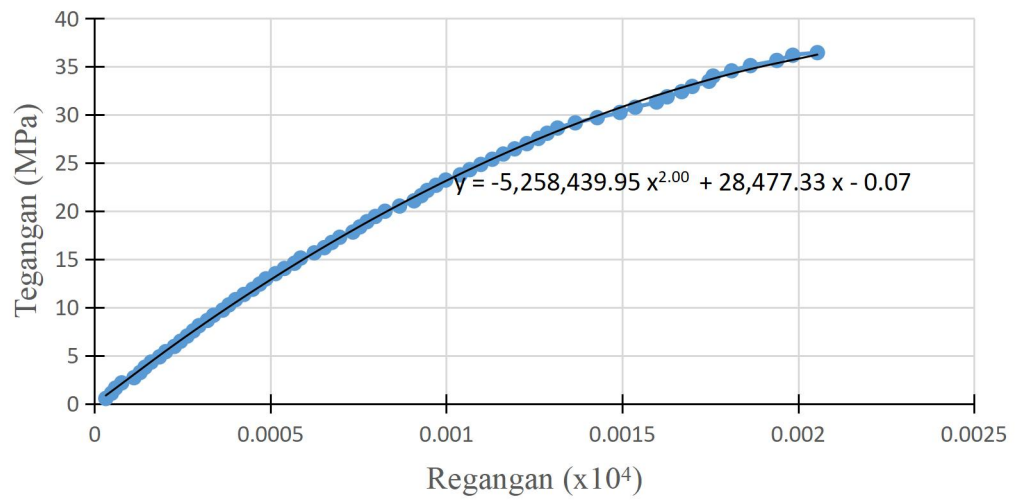
Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	24770.16	Berdasarkan berat volume.
	27461.29	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	20601.85	Berdasarkan pengujian.

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

14. Modulus elastisitas BSK4-2.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	13,0	0,0065	0,0000325	0,5399
20	20000	19,5	0,00975	0,00004875	1,0798
30	30000	24,0	0,012	0,00006	1,6197
40	40000	31,0	0,0155	0,0000775	2,1596
50	50000	45,0	0,0225	0,0001125	2,6995
60	60000	52,0	0,026	0,00013	3,2394
70	70000	57,5	0,02875	0,00014375	3,7793
80	80000	64,5	0,03225	0,00016125	4,3192
90	90000	74,0	0,037	0,000185	4,8591
100	100000	81,0	0,0405	0,0002025	5,3990
110	110000	90,9	0,04545	0,00022725	5,9389
120	120000	97,9	0,04895	0,00024475	6,4788
130	130000	105,4	0,0527	0,0002635	7,0187
140	140000	112,4	0,0562	0,000281	7,5587
150	150000	118,9	0,05945	0,00029725	8,0986
160	160000	128,4	0,0642	0,000321	8,6385
170	170000	135,4	0,0677	0,0003385	9,1784
180	180000	145,9	0,07295	0,00036475	9,7183
190	190000	152,9	0,07645	0,00038225	10,2582
200	200000	160,4	0,0802	0,000401	10,7981
210	210000	169,9	0,08495	0,00042475	11,3380
220	220000	179,9	0,08995	0,00044975	11,8779
230	230000	187,9	0,09395	0,00046975	12,4178
240	240000	194,9	0,09745	0,00048725	12,9577
250	250000	205,9	0,10295	0,00051475	13,4976
260	260000	215,9	0,10795	0,00053975	14,0375
270	270000	227,4	0,1137	0,0005685	14,5774
280	280000	234,4	0,1172	0,000586	15,1173
290	290000	249,9	0,12495	0,00062475	15,6572
300	300000	261,3	0,13065	0,00065325	16,1971
310	310000	269,8	0,1349	0,0006745	16,7370
320	320000	278,8	0,1394	0,000697	17,2769
330	330000	293,8	0,1469	0,0007345	17,8168
340	340000	301,8	0,1509	0,0007545	18,3567

350	350000	309,8	0,1549	0,0007745	18,8966
360	360000	319,3	0,15965	0,00079825	19,4365
370	370000	330,3	0,16515	0,00082575	19,9764
380	380000	346,8	0,1734	0,000867	20,5163
390	390000	363,3	0,18165	0,00090825	21,0562
400	400000	371,5	0,18575	0,00092875	21,5961
410	410000	378,3	0,18915	0,00094575	22,1360
420	420000	388,3	0,19415	0,00097075	22,6760
430	430000	399,3	0,19965	0,00099825	23,2159
440	440000	415,8	0,2079	0,0010395	23,7558
450	450000	426,7	0,21335	0,00106675	24,2957
460	460000	439,2	0,2196	0,001098	24,8356
470	470000	452,2	0,2261	0,0011305	25,3755
480	480000	464,7	0,23235	0,00116175	25,9154
490	490000	477,7	0,23885	0,00119425	26,4553
500	500000	491,5	0,24575	0,00122875	26,9952
510	510000	504,6	0,2523	0,0012615	27,5351
520	520000	514,6	0,2573	0,0012865	28,0750
530	530000	526,4	0,2632	0,001316	28,6149
540	540000	546,5	0,27325	0,00136625	29,1548
550	550000	571,5	0,28575	0,00142875	29,6947
560	560000	597,4	0,2987	0,0014935	30,2346
570	570000	614,7	0,30735	0,00153675	30,7745
580	580000	638,9	0,31945	0,00159725	31,3144
590	590000	650,9	0,32545	0,00162725	31,8543
600	600000	667,5	0,33375	0,00166875	32,3942
610	610000	679,5	0,33975	0,00169875	32,9341
620	620000	698,5	0,34925	0,00174625	33,4740
630	630000	703,2	0,3516	0,001758	34,0139
640	640000	724,2	0,3621	0,0018105	34,5538
650	650000	745,6	0,3728	0,001864	35,0937
660	660000	775,6	0,3878	0,001939	35,6336
670	670000	793,7	0,39685	0,00198425	36,1735
675	675000	821,7	0,41085	0,00205425	36,4435



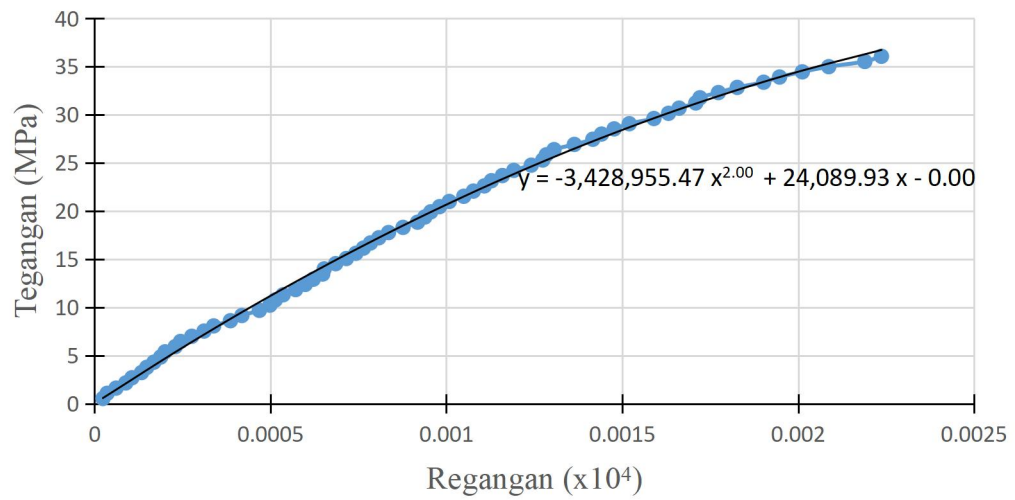
Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	26781.94	Berdasarkan berat volume.
	28373.17	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	21875.15	Berdasarkan pengujian.

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

15. Modulus elastisitas BSK4-3.

Beban		Pembacaan dial	ΔL sebenarnya ($1/2\Delta L$)	Regangan	Tegangan (P/A)
kN	N	$\times 10^{-3}$	mm	($\Delta L/L_0$)	(MPa)
10	10000	9,7	0,00485	0,00002425	0,5383
20	20000	14,5	0,00725	0,00003625	1,0765
30	30000	24,6	0,0123	0,0000615	1,6148
40	40000	35,7	0,01785	0,00008925	2,1531
50	50000	42,7	0,02135	0,00010675	2,6913
60	60000	53,6	0,0268	0,000134	3,2296
70	70000	59,5	0,02975	0,00014875	3,7679
80	80000	67,6	0,0338	0,000169	4,3061
90	90000	75,3	0,03765	0,00018825	4,8444
100	100000	80,3	0,04015	0,00020075	5,3827
110	110000	91,9	0,04595	0,00022975	5,9209
120	120000	97,9	0,04895	0,00024475	6,4592
130	130000	110,7	0,05535	0,00027675	6,9975
140	140000	124,6	0,0623	0,0003115	7,5357
150	150000	135,6	0,0678	0,000339	8,0740
160	160000	154,6	0,0773	0,0003865	8,6123
170	170000	167,6	0,0838	0,000419	9,1505
180	180000	187,5	0,09375	0,00046875	9,6888
190	190000	199,5	0,09975	0,00049875	10,2271
200	200000	205,6	0,1028	0,000514	10,7653
210	210000	214,5	0,10725	0,00053625	11,3036
220	220000	228,7	0,11435	0,00057175	11,8419
230	230000	239,7	0,11985	0,00059925	12,3801
240	240000	248,7	0,12435	0,00062175	12,9184
250	250000	259,5	0,12975	0,00064875	13,4567
260	260000	261,2	0,1306	0,000653	13,9949
270	270000	274,2	0,1371	0,0006855	14,5332
280	280000	286,4	0,1432	0,000716	15,0715
290	290000	297,2	0,1486	0,000743	15,6097
300	300000	305,8	0,1529	0,0007645	16,1480
310	310000	313,8	0,1569	0,0007845	16,6863
320	320000	323,3	0,16165	0,00080825	17,2245
330	330000	334,3	0,16715	0,00083575	17,7628
340	340000	350,8	0,1754	0,000877	18,3011

350	350000	367,3	0,18365	0,00091825	18,8393
360	360000	375,5	0,18775	0,00093875	19,3776
370	370000	382,3	0,19115	0,00095575	19,9159
380	380000	392,3	0,19615	0,00098075	20,4541
390	390000	403,3	0,20165	0,00100825	20,9924
400	400000	419,8	0,2099	0,0010495	21,5307
410	410000	430,7	0,21535	0,00107675	22,0689
420	420000	443,2	0,2216	0,001108	22,6072
430	430000	451,2	0,2256	0,001128	23,1455
440	440000	463,7	0,23185	0,00115925	23,6837
450	450000	476,7	0,23835	0,00119175	24,2220
460	460000	496,5	0,24825	0,00124125	24,7603
470	470000	509,6	0,2548	0,001274	25,2985
480	480000	513,6	0,2568	0,001284	25,8368
490	490000	522,4	0,2612	0,001306	26,3751
500	500000	545,5	0,27275	0,00136375	26,9133
510	510000	566,5	0,28325	0,00141625	27,4516
520	520000	576,4	0,2882	0,001441	27,9899
530	530000	590,7	0,29535	0,00147675	28,5281
540	540000	607,9	0,30395	0,00151975	29,0664
550	550000	635,9	0,31795	0,00158975	29,6047
560	560000	652,5	0,32625	0,00163125	30,1429
570	570000	664,5	0,33225	0,00166125	30,6812
580	580000	683,5	0,34175	0,00170875	31,2195
590	590000	688,2	0,3441	0,0017205	31,7577
600	600000	709,2	0,3546	0,001773	32,2960
610	610000	730,6	0,3653	0,0018265	32,8343
620	620000	760,6	0,3803	0,0019015	33,3725
630	630000	778,7	0,38935	0,00194675	33,9108
640	640000	804,6	0,4023	0,0020115	34,4491
650	650000	834,6	0,4173	0,0020865	34,9873
660	660000	875,6	0,4378	0,002189	35,5256
670	670000	894,5	0,44725	0,00223625	36,0639



Modulus Elastisitas (MPa)		Keterangan
SNI-2847-2019	26405.54	Berdasarkan berat volume.
	28373.17	Berdasarkan kuat tekan.
ASTM C-496-46	24959.62	Berdasarkan pengujian.