

TUGAS AKHIR

**PENGARUH VARIASI MOLARITAS ALKALI AKTIFATOR
TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLYMER
MENGUNAKAN LIMBAH *FLY ASH* PLTU KANCI
CIREBON (*EFFECT OF VARIATION ALKALI ACTIVATOR
MOLARITY ON GEOPOLYMER CONCRETE MECHANICAL
PROPERTIES USING FLY ASH WASTE IN
PLTU KANCI CIREBON*)**

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



FANDIKA AHMAD DWI SAPUTRO

19511274

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL - PROGRAM SARJANA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2024

TUGAS AKHIR

PENGARUH VARIASI MOLARITAS ALKALI AKTIFATOR TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLYMER MENGUNAKAN LIMBAH *FLY ASH* PLTU KANCI CIREBON (*EFFECT OF VARIATION ALKALI ACTIVATOR MOLARITY ON GEOPOLYMER CONCRETE MECHANICAL PROPERTIES USING FLY ASH WASTE IN PLTU KANCI CIREBON*)


Disusun Oleh
Fandika Ahmad Dwi Saputro
19511274

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

Diuji pada tanggal

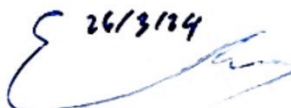
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

26/03
2024. 

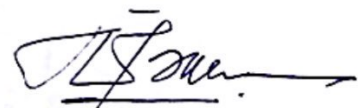
Jafar, S.T., M.T., MURP.
NIK : 185111305

Penguji I

26/3/24


Elvis Saputra, S.T., M.T
NIK : 205111302

Penguji II




Ir. Helmy Akbar Bale, M.T.
NIK : 885110105

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil



 - 28/3/2024
Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D(Eng).IPM.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk memenuhi salah satu persyaratan pada program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan 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 dikemudian hari ditemukan seluruh atau Sebagian laporan Proposal Tugas Akhir ini bukan hasil karya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 25 Maret 2024

Yang membuat pernyataan,



Fandika Ahmad Dwi Saputro

(19511274)

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmannirrahiim.

Assalamu 'alaikum Warrohmatullahi wabarokaatuh

Segala puji bagi Allah atas rahmatNya yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk dapat melaksanakan dan menyelesaikan proses Proposal Tugas Akhir dengan baik. Selawat serta salam kita haturkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW beserta keluarga. Proposal Laporan Tugas Akhir ini bertujuan untuk memenuhi syarat untuk mencapai program Strata 1 teknik sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Selama melaksanakan dan menyusun laporan, penyusun telah banyak mendapat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, untuk itu dalam kesempatan ini penyusun menyampaikan terimakasih kepada:

1. Allah SWT,
2. Ibu Ir Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng), selaku Ketua Prodi Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta,
3. Bapak Jafar, S.T., M.T., MURP. selaku dosen Pembimbing proposal tugas akhir yang telah memberikan bimbingan, pembelajaran, dan nasihat baik serta motivasi yang membangkitkan semangat penulis dalam menyelesaikan proposal tugas akhir ini,
4. Elvis Saputra, S.T.,M.T selaku Dosen Penguji 1 dalam Sidang Tugas Akhir saya yang telah memberikan banyak masukan, kritik dan saran kepada penulis untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.
5. Ir. Helmy Akbar Bale, M.T . selaku Dosen Penguji 2 dalam Sidang Tugas Akhir saya yang telah memberikan banyak masukan, kritik dan saran kepada penulis untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh Dosen, yang telah memberikan banyak ilmu kepada penulis selama menempuh studi di Program Studi Teknik Sipil, FTSP UII.

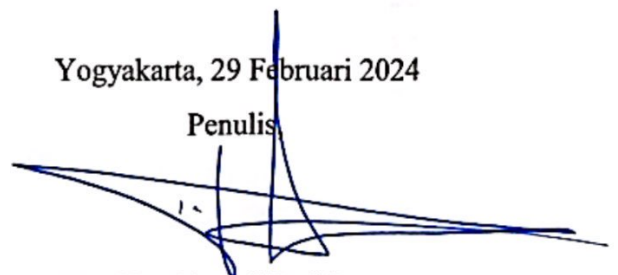
7. Ayah dan Ibu selaku orang tua penulis yang senantiasa memberikan dukungan baik moral maupun material, serta selalu memberikan doa untuk kelancaran dalam menyelesaikan pendidikan sarjana bagi penulis. Terimakasih kepada Ayah dan ibu yang senantiasa memberikan kasih sayang dan perhatian yang begitu besar dan belum bisa terbalaskan. Semoga Tugas Akhir ini menjadi langkah awal untuk bisa membanggakan Ayah dan Ibu.
8. Pemilik Nim 19511113, sosok yang senantiasa hadir memberikan dorongan motivasi dengan segala keunikanya sehingga penulis bisa berproses dan terus berkembang. Semoga semua niat baik yang sudah kita rencanakan dapat berjalan sesuai rencana dan mendapat Ridho Allah.
9. Trio Gati P, Rayhan prasetya, Whisnu Wikan, M Kevin, Sallya Shabrina dan Dina R selaku pengurus harian HMTS, yang senantiasa membantu dan selalu sabar serta menerima segala kekurangan penulis, terimakasih atas semua hal baik yang sudah di berikan, semoga hal yang sudah kalian cita-citakan dapat terwujud.
10. Kepala Departemen HMTS terimakasih sudah memberikan segala dorongan dan kerjasamanya sehingga kita semua bisa melewati masa pendewasaan kita semua dengan hal yang berbeda, semoga kalian semua senantiasa mendapatkan tempat yang baik di masa depan.

Akhir kata Penulis berharap agar Proposal Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Yogyakarta, 29 Februari 2024

Penulis



Fandika Ahmad Dwi Saputro

(19511274)

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
ABSTRAK	xii
ABSTRACT	xiii
BAB I	
PENDAHULUAN	1
BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pengertian Umum	5
2.2 Penelitian Terdahulu	6
2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang	9
2.4 Keaslian Penelitian	18
BAB III	
LANDASAN TEORI	19
3.1 Pengertian Umum	19
3.2 Beton Geopolimer	20
3.2.1 Proses Pembentukan Geopolimer	21
3.2.2 Perhitungan Molaritas	23
3.3 Material Penyusun Beton Geopolimer	24
3.2.3 Fly Ash	25
3.2.4 Alkali aktifator	27
3.2.5 Agregat Halus	29
3.2.6 Agregat Kasar	32
3.4 Kuat Tekan	33
3.5 Modulus Elastisitas Beton	34
3.6 Pengujian Kuat Tarik Belah	36
BAB IV	

METEDOLOGI PENELITIAN	38
4.1 Tinjauan Umum	38
4.2 Bahan yang Digunakan	38
4.3 Benda Uji	40
4.4 Lokasi pengujian	41
4.5 Komposisi Campuran Beton Dan Jumlah Benda Uji	41
4.5.1 Persiapan Penelitian	45
4.5.2 Perencanaan campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	45
4.5.3 Pembuatan dan pengujian Benda Uji <i>Trial</i> dengan umur 7 Hari	45
4.5.4 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji	45
4.5.5 Olah Data	46
4.5.6 Analisis Data	46
4.5.7 Kesimpulan dan Saran	46
4.5.8 Diagram Alir Penelitian	46
BAB V	
HASIL DAN PEMBAHASAN	49
5.1 Pengujian Agregat Halus	49
5.2 Pengujian Agregat Kasar	58
5.2.1 Berat Jenis dan Penyerapan Air	58
5.2.2 Pengujian Analisa Saringan Agregat kasar	60
5.2.3 Berat Volume	64
5.2.4 Pengujian Abu Terbang	67
5.3 Pengujian Slump	68
5.4 Kuat Tekan	70
5.4.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer	70
5.5 Modulus Elastisitas Beton	73
5.6 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton	78
BAB VI	
KESIMPULAN DAN SARAN	82
6.1 Kesimpulan	82
6.2 Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian Sebelumnya	10
Tabel 3.1 Persyaratan Susunan Gradasi Agregat Halus	27
Tabel 3.2 Persyaratan Susunan Gradasi Agregat Kasar	28
Tabel 4.1 Jumlah Komposisi Bahan Untuk Satu Silinder	40
Tabel 4.2 Jumlah Komposisi Bahan Total	41
Tabel 5. 1 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus	50
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 1	52
Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus Sampel 2	53
Tabel 5. 4 Gradasi Agregat Halus	54
Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Halus Sampel 1	57
Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus Sampel 2	57
Tabel 5. 7 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus	58
Tabel 5. 8 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar	59
Tabel 5. 9 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 1	62
Tabel 5. 10 Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar Sampel 2	62
Tabel 5. 11 Gradasi Agregat Kasar	63
Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Kasar	65
Tabel 5. 13 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar	66
Tabel 5. 14 Hasil Uji X-Ray Fluorescence	67
Tabel 5. 15 Hasil Pengujian Nilai Slump	68
Tabel 5. 16 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer	71
Tabel 5. 17 Hasil Pengujian Modulus elastisitas Beton Geopolimer	73
Tabel 5. 18 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton ASTM C-469-94	75
Tabel 5. 19 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton SNI-2847-2019	76
Tabel 5. 20 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Konsep Dasar Produksi Beton Geopolimer	21
Gambar 3. 2 Alkali dan Pembentukan Aluminat Tetravalen	21
Gambar 3. 3 Permodelan Molekul Reaksi Kimia	22
Gambar 3. 4 Pembentukan Silanol Si - OH	22
Gambar 3. 5 Pembentukan Gugus Silanol Si - OH	22
Gambar 3. 6 Pembentukan Ikatan Si - O - OH	23
Gambar 3. 7 Tabel Periodik	24
Gambar 3. 8 Perbandingan Ukuran Partikel Semen, Fly Ash, dan Sillica Fume	26
Gambar 3. 9 NaOH (flakses)	28
Gambar 3. 10 Na_2SiO_3	28
Gambar 3. 11 Persyaratan Susunan Gradasi Agregat Kasar	32
Gambar 3. 12 Sketsa Benda Uji Kuat Beton	34
Gambar 3. 13 Grafik Kurva Hubungan tegangan Regangan Beton	35
Gambar 3. 14 Modulus Sekan dan Modulus Tangen Beton	36
Gambar 3. 15 Kuat Tarik Belah Beton	37
Gambar 4.1 Flow Chart	41
Gambar 5. 1 Gradasi Agregat Halus Sampel 1	55
Gambar 5. 2 Gradasi Agregat Halus Sampel 2	55
Gambar 5. 3 Kurva Gradasi Agregat Kasar Asli Maksimum 20 mm Sampel 1	64
Gambar 5. 4 Kurva Gradasi Agegat Kasar Asli Maksimum 20 mm Sampel 2	64
Gambar 5. 5 Hubungan Nilai Slump dengan Perbandingan Molaritas	68
Gambar 5.6 Pengujian Slump Sampel 8M	69
Gambar 5.7 Pengujian Slump Sampel 12M	69
Gambar 5.8 Pengujian Kuat Tekan	70
Gambar 5. 9 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer Dengan Variasi Molaritas	72
Gambar 5.10 Pengujian Modulus Elastisitas Beton Geopolimer	73
Gambar 5. 11 Kurva Tegangan Regangan Beton Geopolimer	74

Gambar 5. 12 Kurva Tegangan-Regangan Variasi molaritas 8M sampai 12M	78
Gambar 5. 13 Grafik Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Dengan Variasi Molaritas 8M sampai 12M	80
Gambar 5. 14 Grafik Hubungan Kuat Tarik belah dan Kuat tekan Beton Geopolimer	81

ABSTRAK

Peningkatan pekerjaan konstruksi berdampak kepada kebutuhan semen untuk menjadi bahan utama pembuatan beton. Tercatat industri semen menyumbang 3 miliar ton gas rumah kaca atau sekitar 9% emisi CO₂. Pembuatan beton semen dapat diganti menggunakan beton geopolimer, beton geopolimer adalah beton yang tersusun dari bahan yang mengandung sifat *pozzolan (fly ash)* dan dikombinasikan dengan alkali aktifator. Kekuatan beton geopolimer dipengaruhi oleh jenis *fly ash* yang digunakan dan tingkat molaritas alkali aktifator. Molaritas adalah ukuran yang mengemukakan konsentrasi suatu larutan. Penelitian ini menggunakan molaritas 8M sampai 12M bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi molaritas terhadap kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah dengan bahan dasar *fly ash* PLTU Kanci Cirebon dan akan di uji pada umur beton 28 hari dan diuji kuat tekan, modulus elastisitas, kuat tarik belah beton geopolimer.

Hasil penelitian menunjukkan data kuat tekan dengan komposisi 8M mendapatkan rerata kuat tekan sebesar 13.541 Mpa . Variasi 9M kuat tekan rerata sebesar 17.785 Mpa . Variasi 10 M kuat tekan rerata sebesar 19.838 Mpa . Variasi 11 M kuat tekan rerata sebesar 23.999 Mpa dan 12M mendapatkan hasil rerata sebesar 25.674 Mpa. Nilai modulus elastisitas tertinggi dari komposisi beton 12M dengan nilai rerata 23346,496 MPa, Nilai modulus elastisitas beton geopolimer komposisi 8M, 9M, 10M dan 11M berturut-urut rata-rata sebesar 17251,766 MPa, 19955,959 Mpa, 20916,821 MPa, 22964,713 MPa. Nilai tertinggi kuat Tarik belah beton geopolimer berada pada variasi 12M dengan rata – rata sebesar 2,393 MPa. Nilai kuat Tarik belah terendah pada variasi molaritas 8M dengan rata -rata sebesar 1,122 MPa.

Kata kunci : Geopolimer, molaritas

ABSTRACT

The increase in construction work has an impact on the need for cement as the main ingredient for making concrete. It is recorded that the cement industry contributes 3 billion tons of greenhouse gases or around 9% of CO₂ emissions. Making cement concrete can be replaced using geopolymer concrete. Geopolymer concrete is concrete composed of materials containing pozzolanic properties (fly ash) and combined with an alkali activator. The strength of geopolymer concrete is influenced by the type of fly ash used and the molarity level of the activator alkali. Molarity is a measure that expresses the concentration of a solution. This research uses a molarity of 8M to 12M with the aim of determining the effect of variations in molarity on compressive strength, modulus of elasticity and split tensile strength with the fly ash base material of PLTU Kanci Cirebon and will be tested at 28 days of concrete and tested for compressive strength, modulus of elasticity, tensile strength. split geopolymer concrete.

The research results show that the compressive strength data with the 8M composition obtained an average compressive strength of 13,541 Mpa. The average compressive strength of the 9M variation is 17,785 Mpa. The average compressive strength variation of 10 M is 19,838 Mpa. The 11 M variation has an average compressive strength of 23,999 Mpa and 12M produces an average result of 25,674 Mpa. The highest modulus of elasticity value of 12M concrete composition with an average value of 23346.496 MPa, the modulus of elasticity value of geopolymer concrete composition 8M, 9M, 10M and 11M respectively averages 17251.766 MPa, 19955.959 Mpa, 20916.821 MPa , 22964.713 MPa. The highest value of splitting tensile strength of geopolymer concrete is in the 12M variation with an average of 2.393 MPa. The lowest split tensile strength value was at 8M molarity variation with an average of 1.122 MPa.

Keywords: *Geopolymer, molarities*

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan komponen bangunan yang sangat umum digunakan karena beton mempunyai karakteristik mampu menahan gaya tekan yang bagus. Beton tersusun dari beberapa komponen seperti agregat halus (pasir), agregat kasar (krikil), dan semen. Namun dengan banyaknya perkembangan dunia konstruksi penggunaan semen justru memiliki banyak kerugian terhadap lingkungan. Dampak yang ditimbulkan yaitu dimulai dari proses produksi semen. Setiap produksi semen berdampak buruk terhadap lingkungan dikarenakan proses penyediaan bahan baku pembuatan semen yang terus-menerus diambil langsung dari gunung kapur menyebabkan gunung kapur semakin terkikis. Proses produksi pembuatan semen juga menimbulkan debu dan gas beracun, tercatat secara keseluruhan di dunia industri semen menyumbang 3 miliar ton gas rumah kaca atau sekitar 9% emisi CO₂ (Keller an Klute, 2016).

Penggunaan semen dapat diganti menggunakan alternatif yaitu mengubah beton normal dengan bahan semen ke beton geopolimer. Beton geopolimer dianggap lebih ramah terhadap lingkungan dikarenakan bahan penyusunnya tidak lagi menggunakan semen. Pada pembuatan beton geopolimer pengikat yang digunakan untuk menggantikan semen adalah bahan yang juga mengandung sifat *pozzolan* seperti yang terkandung dalam limbah batu bara (*fly ash*) yang dihasilkan oleh PLTU Cirebon. Bahan bakar batu bara pada PLTU Cirebon menghasilkan limbah berupa abu terbang atau *fly ash* sebagai sisa dari pembakaran batu bara yang memiliki kandungan bahan kimia berupa kimia silika dan alumina yang bersifat *pozzolanic*. Abu terbang atau *fly ash* sebagai pengganti semen nantinya akan dikombinasikan dengan alkali aktifator, hal ini dikarenakan abu terbang atau *fly ash* tidak memiliki sifat pengikat agregat, sehingga dibutuhkan bahan tambah yaitu alkali aktifator.

Alkali aktifator yang sering digunakan adalah *sodium hidroksida* dan *sodium silikat*. *Sodium silikat* disini berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan *natrium hidroksida* berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *pozzolan* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimerisasi yang kuat, Hardjito dkk (2004). Menurut Li, Z dkk (2004) didapatkan beberapa kelebihan beton geopolimer dibandingkan dengan beton konvensional, yaitu:

1. Hemat energi dan ramah terhadap lingkungan
2. Tingkat penyusutan pada beton lebih rendah
3. Kekuatan tertinggi mencapai 70% dalam waktu 4 jam
4. Tingkat tinggi ketahanan terhadap lingkungan yang agresif

Pasta geopolimer mampu bertahan pada suhu mencapai 1000°C hingga 1200°C tanpa mengurangi fungsi pada beton geopolimer. Seperti halnya kerja semen, abu terbang yang dicampur dengan alkali aktifator membutuhkan waktu untuk bereaksi hingga menjadi beton yang keras. Pada beton semen pengujian *setting time* dipengaruhi pada jenis semen dan kadar air yang dipakai pada pembuatan beton, sedangkan pada beton geopolimer dipengaruhi oleh jenis kelas abu terbang yang digunakan, jumlah perbandingan campuran abu terbang dan alkali aktifator, dan juga dipengaruhi tingkat molaritas alkali aktifator, molaritas adalah ukuran yang mengemukakan konsentrasi suatu larutan, Harjuno (2005) menyatakan aktifator yang digunakan umumnya adalah sodium hidroksida 8M sampai 14M dan sodium silikat dengan perbandingan 0,5 sampai 2,5.

Berdasarkan penjelasan pada paragraf sebelumnya perlu dilakukan suatu penelitian untuk mengetahui kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* PLTU Kanci Cirebon. Penelitian ini menggunakan variasi molaritas dari angka 8M sampai dengan 12M. Selain mengetahui kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah beton pengujian ini juga melihat nilai *slump* beton geopolimer yang menggunakan bahan dasar *fly ash* PLTU Kanci Cirebon dan akan di uji pada umur beton 28 hari.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang diatas didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi molaritas 8M, 9M, 10M, 11M dan 12M dalam komposisi beton geopolimer terhadap kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi molaritas 8M, 9M, 10M, 11M dan 12M dalam komposisi beton geopolimer terhadap kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat Tarik belah beton.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik beton geopolimer menggunakan limbah abu terbang PLTU Cirebon sebagai alternatif pengganti semen untuk pembuatan beton
2. Sebagai informasi kepada masyarakat dan PLTU Cirebon bahwa limbah abu terbang hasil pembakaran dapat dimanfaatkan sebagai pengganti semen
3. Sebagai acuan penggunaan limbah abu terbang PLTU Cirebon dan mengurangi oenumpukan limbah yang ada dengan cara pemanfaatan alternatif pengganti semen untuk acuan penelitian-penelitian selanjutnya mengenai beton geopolimer.
4. Mengetahui kelas *fly ash* PLTU Kanci Cirebon dan apakah bisa menjadi bahan pembuat beton geopolimer

1.5 Batasan Masalah

Batasan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Limbah yang digunakan sebagai pengganti semen diperoleh dari PLTU Cirebon, sebagai produk sampingan pembakaran batu bara.
2. Agregat halus berasal dari Progo, Kab. Kulon Progo, Provinsi DIY.
3. Agregat kasar berasal dari Clereng, Kab. Kulon Progo, Provinsi DIY.
4. Natrium Hidroksida (NaOH), dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3) yang akan digunakan sebagai bahan pembuat *alkali aktifator* didapatkan dari toko Sari Kimia.
5. Molaritas larutan NaOH yang digunakan 8M, 9M, 10M, 11M, 12M.
6. Dalam proses pembuatan larutan NaOH 8M, 9M, 10M, 11M, 12M menggunakan air yang berasal dari laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
7. Dikarenakan belum adanya pedoman campuran beton, maka dari itu perencanaan pembuatan beton geopolimer pada penelitian ini menggunakan acuan perhitungan penelitian Ridwan (2018).
8. Perawatan beton segar menggunakan cara perendaman.
9. Pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik beton dilakukan pada umur beton 28 Hari.
10. Pengujian kandungan zat kimia pada abu terbang PLTU Cirebon dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional Yogyakarta.
11. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Umum

Menurut SNI-2847-2013 beton merupakan campuran dari semen portland (PC) atau semen hidraulis lainnya, agregat kasar, agregat halus dan air. Liyid dan Rangan (2010) menyatakan bahwa, geopolimer adalah produksi beton menggunakan reaksi pengikatnya adalah reaksi polimerisasi. Dalam hal ini menggunakan Alumunium (Al) dan Silika (Si) merupakan peranan penting dalam ikatan polimerisasi karena reaksi alumunium dan silia dengan alkali akan menghasilkan Al_4 dan SiO_4 . Teknologi beton geopolimer pertama kali digunakan oleh professor Davidovits pada taun 1987 untuk menjelaskan reaksi mineral polymer yang dihasilkan melalui *geochemistry*.

Beton geopolimer adalah pembuatan beton yang 100% tidak menggunakan semen, agar terjadi reaksi antara zat polimer yang terkandung dalam suatu mineral, maka dibutuhkan bahan tambahan alkali aktofator, sehingga dapat suatu ikatan silikat dan alumina pada material bersifat *pozzolan*. *Fly ash* merupakan produks sampingan dari pembakaran batu bara yang ada di PLTU sebagai sumber panas tinggi. Untuk menghasilkan panas tinggi PLTU menggunakan batu bara untuk dibakar, sehingga menghasilkan produk sampingan abu terbang / *fly ash*. Daviddovits (1978) menyatakan bahawa proses polimerisasi terjadi dalam beton geopolimer meliputi reaksi antara alkali dengan mineral Si – Al untuk menghasilkan rantai polimerik tiga – dimensi dan ikatan struktur Si – O – Al – O yang konsisten. Daviddovits (1978) menyarankan penggunaan istilah ‘*poly (sialate)*’ sebagai nama kimia dari beton geopolimer yang berbahan dasar *siliko-aluminate*. *Sialate* adalah singkatan dari *silicon-oxoaluminate*.

2.2 Penelitian Terdahulu

2.2.1 Analisis Sifat Mekanik Beton *Geopolymer* Berbahan Dasar *Fly Ash* PLTU Pangkalan Susu

Rozi dkk (2020) melakukan penelitian untuk mengetahui komposisi kandungan campuran material *fly ash* pada PLTU Pangkalan Susu yang nantinya akan diklasifikasikan sesuai kelas menurut ASTM-C618 untuk diketahui kelayakan sebagai campuran beton geopolimer. ang nantinya akan digunakan untuk kuat tekan beton geopolimer dengan umur beton 7, 14, dan 28 hari. Kemudian melakukan pengujian beton geopolimer yaitu pengujian kuat tekan dan pengujian tarik belah.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen di laboratorium. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa *fly ash* PLTU Pangkalan Susu merupakan kelas C yang menurut ASTM-C618 termasuk *fly ash* yang boleh digunakan sebagai campuran pembuatan beton geopolimer yang kandungannya berupa 34,81% SiO₂, 25,39% CaO, 14,92% Al₂O₃, 16,49% Fe₂O₃ dan 4,92%. Nilai kuat tekan maksimum beton geopolimer dengan campuran *fly ash* dari PLTU Pangkalan Susu dan senyawa alkali 8M adalah 28,5 MPa atau dapat dikatakan setara dengan beton K-300 yang dapat digunakan dalam aplikasi konstruksi di lapangan. Sedangkan nilai kuat tarik maksimumnya sebesar 6,83 MPa.

2.2.2 Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* PLTU Tanjungjati B Jepara

Budiningrum dkk pada tahun 2021 melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penggunaan *fly ash* terhadap kuat tekan beton geopolimer dan kemudian menganalisis kuat tekan beton geopolimer pada umur 1 hari dan 28 hari. *Fly ash* yang digunakan merupakan limbah yang berasal dari PLTU Tanjungjati B Jepara. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen di laboratorium.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Hasil nilai kuat tekan beton geopolimer pada umur 14 hari adalah 19,45 MPa dan 28 hari adalah 22,99 MPa.
2. Kuat tekan beton geopolimer mengalami tren peningkatan kuat tekan rata-rata sebesar 3,54 MPa atau 18,2 %.
3. Hasil pemeriksaan berat volume beton geopolymer tidak ada perbedaan yang signifikan dari umur 14 hari ke 28 hari.

2.2.3 Pengaruh Molaritas Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Dengan Campuran Dua Tipe *Fly Ash* yang Berbeda

Aldyan, P dan Liana H (2021) melakukan penelitian untuk mengevaluasi ketahanan geser beton geopolimer dengan pengujian kuat tarik belah. Pengujian kuat tarik belah berguna untuk mengevaluasi ketahanan geser beton dan panjang penyaluran dari tulangan. Konsentrasi molaritas natrium hidroksida yang dipakai yaitu 6M, 10M, 14M. Perbandingan alkali sodium silikat dengan sodium hidroksida adalah 2:1. Campuran yang digunakan adalah dengan pengganti semen 100% fly ash tipe F dengan campuran antara 50% fly ash tipe C dan 50% fly ash tipe F.

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada umur beton 28 dan metode curing yang digunakan adalah curing suhu ruangan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi molaritas yang digunakan maka semakin tinggi juga kuat tarik belahnya. Pencampuran 2 jenis *fly ash* pada beton geopolimer memiliki kuat tarik belah yang lebih rendah dibandingkan dengan 100% *fly ash* tipe F. Berat jenis dari kedua jenis beton geopolimer memiliki tidak memiliki perbedaan yang signifikan.

2.2.4 Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi dan Viscocrete 1003 Pada Karakteristik Beton Geopolimer

Muhammad P (2022) melakukan penelitian untuk menganalisis kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan campuran *viscocrete* 1003 sebanyak 0,6% dari berat prekursor dan variasi persentase abu sekam padi, mengetahui variasi persentase optimum penggunaan bahan tambah abu sekam padi

pada beton geopolimer, mengetahui pengaruh penambahan abu sekam padi pada beton geopolimer dengan viscocrete 1003 sebanyak 0,6% dari berat prekursor terhadap nilai modulus elastisitas, mengetahui nilai berat volume beton yang terjadi pada setiap kombinasi campuran dan mengetahui pengaruh penambahan abu sekam padi pada beton geopolimer dengan viscocrete 1003 sebanyak 0,6% dari berat prekursor terhadap kepadatan beton melalui pengujian kecepatan rambat gelombang.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen di laboratorium. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Nilai kuat tekan beton geopolimer tertinggi terdapat pada beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam padi atau BG0 sebesar 4,798 MPa, dan nilai kuat tekan beton geopolimer terendah terdapat pada beton geopolimer dengan penambahan 20% abu sekam padi terhadap berat prekursor sebesar 0,273 MPa.
2. Melihat nilai kuat tekan, beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam atau beton geopolimer dengan penambahan variasi 0% abu sekam padi terhadap prekursor merupakan variasi optimum.
3. Nilai modulus elastisitas tidak dapat ditampilkan akibat nilai kuat tekan yang terlalu kecil.
4. Nilai berat volume beton geopolimer tertinggi terdapat pada beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam padi atau BG0 sebesar 2153,685 kg/m³ dan nilai kuat tekan beton geopolimer terendah terdapat pada beton geopolimer dengan penambahan 20% abu sekam padi terhadap berat prekursor sebesar 2100,550 kg/m³.
5. Nilai kecepatan rambat gelombang beton geopolimer tertinggi terdapat pada beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam padi atau BG0 sebesar 2077,6 m/s, dan kecepatan rambat gelombang geopolimer terendah terdapat pada beton geopolimer dengan penambahan 20% abu sekam padi terhadap berat prekursor sebesar 729,2 m/s.
6. Penggunaan superplasticizer berupa Viscocrete 1003 dengan tujuan agar

7. memberikan kemudahan pada pengerjaan tidak memberikan pengaruh karena campuran adukan beton segar tetap kental.

2.2.5 Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 dan 2,5

Sulistiyorini dkk (2023) melakukan penelitian untuk mengetahui *slump* beton geopolimer, berat satuan, dan kuat tekan beton geopolimer dengan molaritas rendah (2M, 3M, 4M) dengan variasi alkali aktivator atau SS/HH sebesar 1,5 dan 2,5. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen di laboratorium dengan menggunakan benda uji silinder 15/30 sebanyak 18 silinder. Kemudian dilakukan perawatan dengan suhu ruang.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan bahwa larutan alkali aktivator yang terdiri dari sodium hidroksida dan sodium silikat sangat berpengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer dan *workability*. Semakin tinggi rasio maka alkali aktivator semakin kental menyebabkan sulitnya pencampuran dengan material lain. Semakin besar molaritas yang digunakan dan semakin tinggi SS/HH maka dapat membuat kuat tekan beton geopolimer bertambah. Nilai *slump* tertinggi beton geopolimer yaitu sebesar 16 cm pada molaritas 3M rasio SS/SH 1,5 sehingga beton terlihat lebih encer. Berat volume tertinggi sebesar 2352 kg/m³ pada molaritas 4M dengan rasio SS/SH 1,5. Kuat tekan beton yang tinggi dipengaruhi oleh besar molaritas yang digunakan dan rasio SS/SH. Kuat tekan tertinggi adalah beton geopolimer dengan molaritas 4M pada rasio SS/SH 2,5 dengan nilai kuat tekan beton sebesar 33,47 MPa.

2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Perbandingan antara penelitian penulis yang sudah dilaksanakan dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian terdahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Aldyan P dan Liana H	Muhammad P	Sulistiyorini dkk
Tahun	2020	2021	2021	2022	2023
Judul Penelitian	Analisis Sifat Mekanik Beton <i>Geopolymer</i> Berbahan Dasar <i>Fly Ash</i> PLTU Pangkalan Susu	Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar <i>Fly Ash</i> PLTU Tanjungjati B Jepara	Pengaruh Molaritas Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Dengan Campuran Dua Tipe <i>Fly Ash</i> yang Berdeda	Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi dan Viscocrete 1003 Pada Karakteristik Beton Geopolimer	Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 dan 2,5
Tujuan	untuk mengetahui kandungan senyawa kimia dan sifat mekanik beton geopolymer berbahan dasar <i>fly ash</i> PLTU Pangkalan Susu dengan larutan alkalin 8M dan perbandingan agregat dan binder adalah 70%:30%.	Untuk mengetahui pengaruh penggunaan <i>fly ash</i> terhadap kuat tekan beton polimer dan menganalisis kuat tekan beton geopolimer pada umur 14 hari dan 28 hari.	untuk mengevaluasi ketahanan geser beton geopolimer dengan pengujian kuat tarik belah. Pengujian kuat tarik belah berguna untuk mengevaluasi ketahanan geser beton dan panjang	untuk menganalisis kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar <i>fly ash</i> dengan campuran <i>viscocrete</i> 1003 sebanyak 0,6% dari berat prekursor dan variasi persentase abu sekam padi, mengetahui variasi persentase	untuk mengetahui <i>slump</i> beton geopolimer, berat satuan, dan kuat tekan beton geopolimer dengan molaritas rendah (2M, 3M, 4M) dengan variasi alkali aktivator atau SS/HH sebesar 1,5 dan 2,5.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian tedahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Putera Aldyan dan Herlina	Perdana Muhammad T.B	Sulistiyorini dkk
Tujuan			untuk mengevaluasi ketahanan geser beton geopolimer dengan pengujian kuat tarik belah. Pengujian kuat tarik belah berguna untuk mengevaluasi ketahanan geser beton dan panjang penyaluran dari tulangan.	variasi persentase abu sekam padi, mengetahui variasi persentase optimum penggunaan bahan tambah abu sekam padi pada beton geopolimer, mengetahui pengaruh penambahan abu sekam padi pada beton geopolimer dengan viscocrete 1003 sebanyak 0,6%	

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian tedahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Putera Aldyan dan Herlina	Perdana Muhammad T.B	Sulistiyorini dkk
Tujuan				dari berat prekursor terhadap nilai modulus elastisitas, mengetahui nilai berat volume beton yang terjadi pada setiap kombinasi campuran dan mengetahui pengaruh penambahan abu sekam padi pada beton geopolimer dengan viscocrete 1003 sebanyak 0,6% dari berat prekursor terhadap kepadatan beton melalui pengujian kecepatan rambat gelombang.	
Parameter Yang Diuji	Material <i>fly ash</i> pada PLTU Pangkalan Susu	Material <i>fly ash</i> pada PLTU PLTU Tanjungjati B Jepara	<i>Fly ash</i> tipe F dengan campuran antara 50% fly ash tipe C dan 50% fly ash tipe F.	<i>Fly ash</i> dengan campuran <i>viscocrete</i> 1003 sebanyak 0,6%	Beton geopolimer dengan molaritas rendah (2M, 3M, 4M) dengan variasi alkali aktivator atau SS/HH sebesar 1,5 dan 2,5.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian terdahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Putera Aldyan dan Herlina	Perdana Muhammad T.B	Sulistiyorini dkk
Hasil Penelitian	<p><i>fly ash</i> PLTU Pangkalan Susu merupakan kelas C yang menurut ASTM-C618 termasuk <i>fly ash</i> yang boleh digunakan sebagai campuran pembuatan beton geopolimer yang kandungannya berupa 34,81% SiO₂, 25,39% CaO, 14,92% Al₂O₃, 16,49% Fe₂O₃ dan 4,92%. Nilai kuat tekan maksimum beton geopolimer dengan campuran <i>fly ash</i> dari PLTU</p>	<ol style="list-style-type: none"> Hasil nilai kuat tekan beton geopolimer pada umur 14 hari adalah 19,45 MPa dan 28 hari adalah 22,99 MPa. Kuat tekan beton geopolimer mengalami tren peningkatan kuat tekan rata-rata sebesar 3,54 MPa atau 18,2 %. Hasil pemeriksaan berat volume beton geopolimer tidak ada perbedaan yang signifikan dari umur 14 hari ke 28 hari 	<p>semakin tinggi molaritas yang digunakan maka semakin tinggi juga kuat tarik belahnya. Pencampuran 2 jenis <i>fly ash</i> pada beton geopolimer memiliki kuat tarik belah yang lebih rendah dibandingkan dengan 100% <i>fly ash</i> tipe F. Berat jenis dari kedua jenis beton geopolimer memiliki tidak memiliki perbedaan yang signifikan.</p>	<p>1. Nilai kuat tekan beton geopolimer tertinggi terdapat pada beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam padi atau BG0 sebesar 4,798 MPa, dan nilai kuat tekan beton geopolimer terendah terdapat pada beton geopolimer dengan penambahan 20% abu sekam padi terhadap berat prekursor sebesar 0,273 MPa.</p>	<p>larutan alkali aktivator yang terdiri dari sodium hidroksida dan sodium silikat sangat berpengaruh terhadap kat tekan beton geopolimer dan <i>workability</i>. Semakin tinggi rasio maka alkali aktivator semakin kental menyebabkan sulitnya pencampuran dengan material lain. Semakin besar molaritas yang digunakan dan</p>

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian tedahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Putera Aldyan dan Herlina	Perdana Muhammad T.B	Sulistiyorini dkk
Hasil Penelitian	<p>Pangkalan Susu dan senyawa alkali 8M sadalah 28,5 MPa atau dapat dikatakan setara dengan beton K-300 yang dapat digunakan dalam aplikasi konstruksi di lapangan. Sedangkan nilai kuat tarik maksimumnya sebesar 6,83 MPa.</p>			<p>2. Melihat nilai kuat tekan, beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam atau beton geopolimer dengan penambahan variasi 0% abu sekam padi terhadap prekursor merupakan variasi optimum.</p> <p>3. Nilai modulus elastisitas tidak dapat ditampilkan akibat nilai kuat tekan yang terlalu kecil.</p>	<p>semakin tinggi SS/HH maka dapat membuat kuat tekan beton geopolimer bertambah. Nilai slump tertinggi beton geopolimer yaitu sebesar 16 cm pada molaritas 3M rasio SS/SH 1,5 sehingga beton terlihat lebih encer. Berat volume tertinggi sebesar 2352 kg/m³ pada molaritas 4M dengan rasio SS/SH 1,5. Kuat tekan beton yang tinggi dipengaruhi oleh</p>

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian tedahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Putera Aldyan dan Herlina	Perdana Muhammad T.B	Sulistiyorini dkk
Hasil Penelitian				4. Nilai berat volume beton geopolimer tertinggi terdapat pada beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam padi atau BG0 sebesar 2153,685 kg/m ³ dan nilai kuat tekan beton geopolimer terendah terdapat pada beton geopolimer dengan penambahan 20% abu sekam padi terhadap berat prekursor sebesar 2100,550 kg/m ³ .	besar molaritas yang digunakan dan rasio SS/SH. Kuat tekan tertinggi adalah beton geopolimer dengan molaritas 4M pada rasio SS/SH 2,5 dengan nilai kuat tekan beton sebesar 33,47 MPa.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian tedahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Putera Aldyan dan Herlina	Perdana Muhammad T.B	Sulistyorini dkk
Hasil Penelitian				5. Nilai kecepatan rambat gelombang beton geopolimer tertinggi terdapat pada beton geopolimer tanpa penambahan abu sekam padi atau BG0 sebesar 2077,6 m/s, dan kecepatan rambat gelombang geopolimer terendah terdapat pada beton geopolimer dengan penambahan 20%	

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan antara penelitian tedahulu dengan sekarang

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Rozi dkk	Budiningrum dkk	Putera Aldyan dan Herlina	Perdana Muhammad T.B	Sulistiyorini dkk
Hasil Penelitian				<p>abu sekam padi terhadap berat precursor sebesar 729,2 m/s.</p> <p>6. Penggunaan superplasticizer berupa Viscocrete 1003 dengan tujuan agar</p> <p>7. memberikan kemudahan pada pengerjaan tidak memberikan pengaruh karena campuran adukan beton segar tetap kental.</p>	

2.4 Keaslian Penelitian

Mengacu pada beberapa penelitian yang sudah dilaksanakan di atas, penulis melaksanakan penelitian yang berbeda dengan penelitian terdahulu. Penelitian yang akan dilaksanakan oleh penulis adalah dengan menggunakan bahan baku *fly ash* PLTU Kanci Cirebon, dengan variasi molaritas 8M, 9m, 10M, 11m, dan 12M pada komposisi beton geopolimer serta perbandingan binder 25% dan agregat 75%, lalu di uji kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik belah. Pelaksanaan pengujian yang dilakukan memiliki tujuan untuk melihat pengaruh penggunaan variasi molaritas pada beton geopolimer pada umur 28 hari terhadap kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat tarik belah. Benda uji yang digunakan adalah silinder berdiameter 30 x 15 cm. Berdasarkan penelitian terdahulu variasi yang digunakan. berdasarkan penelitian terdahulu variasi yang biasa digunakan adalah fly ash, perbandingan binder dan agregat, serta molaritas yang ada pada komposisi beton geopolimer. Berdasarkan penjalasan tersebut, keaslian dari penelitian yang dijalankan dapat di jamin dan di tegaskan.

BAB III

LANDASAN TEORI

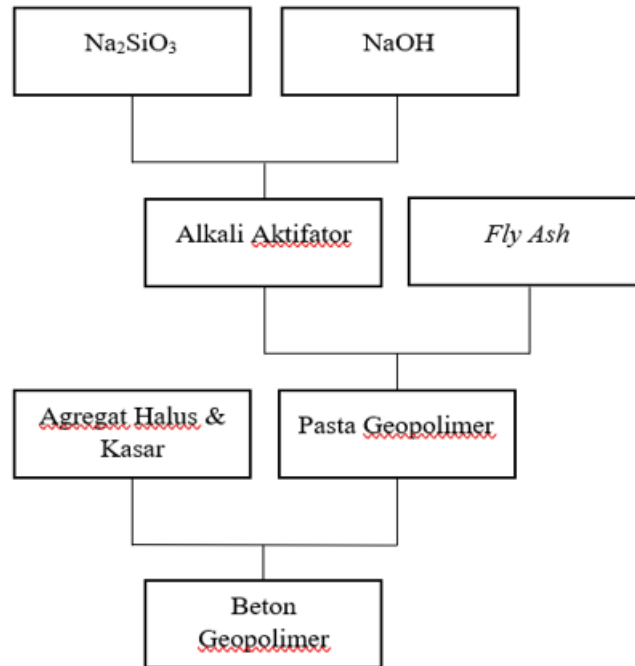
3.1 Pengertian Umum

Beton merupakan material utama yang sering digunakan pada bangunan, beton terdiri dari beberapa campuran seperti agregat halus, agregat kasar dan pasta semen, pada pembuatan beton untuk mencapai mutu tertentu menggunakan presentase pasta yang terkandung didalamnya, dalam proses pembuatan beton bahan utama yang digunakan adalah semen akan tetapi hal tersebut mempunyai karena pada pembuatan semen membutuhkan kapur yang ada pada gunung-gunung kapur, hal tersebut semakin lama akan merusak ekosistem. Davidovits (1994) menyatakan bahan produksi semen menghasilkan gas emisi CO_2 dalam jumlah yang sebanding dengan jumlah produksi semen. Bahkan dalam produksi beton, semen memproduksi karbon dioksida dengan jumlah yang sangat banyak.

Pada proses pelaksanaan pembakaran batu bara di PLTU Cirebon, menghasilkan limbah yang disebut *fly ash* dari sisa proses pembakaran yang ada di PLTU Cirebon. *Fly ash* mengandung bahan kimia silika dan alumina, dengan adanya kandungan kimia tersebut *fly ash* memiliki sifat *pozzolanic* seperti semen. Kualitas *fly ash* dipengaruhi oleh proses pembakaran dan kualitas batu bara yang baik. Pembuatan beton menggunakan semen sangat berdampak pada lingkungan dikarenakan pada proses pembuatan semen sangat berdampak pada lingkungan sekitar, sebagai solusi untuk mengurangi permasalahan lingkungan yang ada beton dengan bahan utama *fly ash* bisa menjadi solusi utama yang ada dan dapat digunakan, guna mengurangi atau bahkan dapat menghentikan penggunaan semen pada beton. Beton dengan bahan ikat *fly ash* biasa disebut dengan beton geopolymer. Semakin banyak penelitian tentang beton geopolymer menunjukkan bahwa *fly ash* semakin terbukti bahwa *fly ash* dapat menjadi bahan pengikat pengganti semen. Dengan solusi ini diharapkan dapat mengatasi permasalahan utama di atas dan geopolimer terbukti sebagai beton yang ramah lingkungan.

3.2 Beton Geopolimer

Beton Geopolimer merupakan jenis beton yang tidak menggunakan semen sebagai pengikat agregatnya. *Fly ash* digunakan menjadi pengganti semen sebagai sumber material binder pada campuran beton geopolimer. Daviddovits (1999) menyebutkan bahwa beton geopolimer terbentuk dari reaksi kimia bukan dari reaksi hidrasi seperti pada beton biasa. Pada proses pembentukan pasta beton geopolimer membutuhkan alkali aktifator yang berfungsi mereaksikan kandungan silika dan alumina yang terkandung dalam *fly ash*. Aktifator yang sering digunakan adalah sodium hidroksida dan sodium silikat. Sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang ada pada *fly ash*. Kekuatan tekan beton geopolimer juga dipengaruhi oleh molaritas yang digunakan, semakin tinggi molaritas yang digunakan maka semakin tinggi juga kuat tekan yang dihasilkan. Pada pemuatan beton konvensional beton membutuhkan waktu untuk *setting time*, pada beton geopolimer yang menggunakan bahan utama *fly ash* dicampur dengan alkali aktifator juga membutuhkan waktu untuk bereaksi sampai jadi mengeras, apabila pada beton menggunakan semen *setting time* dipengaruhi oleh jenis semen yang digunakan dan jumlah air yang digunakan, maka pada beton geopolimer *setting time* dipengaruhi oleh kelas *fly ash* yang digunakan. jumlah perbandingan campuran *fly ash* dengan alkali aktifator yang digunakan. Hardjito (2005) mengatakan bahwa alkali aktifator yang umumnya digunakan adalah sodium hidroksida 8M sampai 14M dan sodium silikat dengan perbandingan antara 0.5 sampai 2.5. berikut gambar konsep dasar pembuatan beton geopolymer dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.

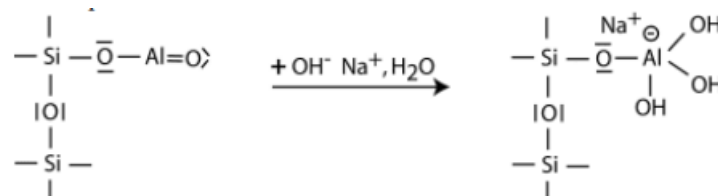


Gambar 3. 1 Konsep Dasar Produksi Beton Geopolimer

3.2.1 Proses Pembentukan Geopolimer

Proses Pembentukan beton geopolimer membutuhkan alkali aktifator untuk meraksikan zat kimia yang ada pada *fly ash*. Daviddovits (1999) menyatakan bahwa proses polimerisasi pada beton geopolimer adalah reaksi kimia antara larutan alkalin dengan Si -Al, dari reaksi yang tersebut menghasilkan rantai polimerik 3 dimensi dan ikatan struktur Si - O - Al - O yang konsisten.

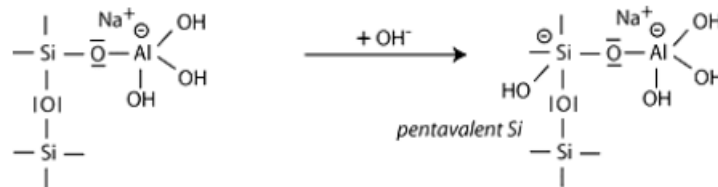
1. Alkalinasi dan pembentukan aluminat tetravalent pada salah satu sisi senyawa sialat $-Si-O-Al-(OH)_3-Na^+$. Pemodelan molekul reaksi kimia tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Alkali dan Pembentukan Aluminat Tetravalen

2. Peleburan alkali dimulai dengan mereaksikan bahan dasar OH pada atom silikon, yang dengan demikian dapat memperpanjang rantai valensi dari tetravalent

3. menjadi penta-kovalen. Permodelan molekul reaksi kimia tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.3.



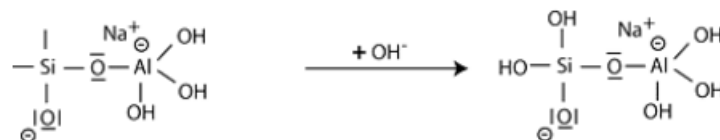
Gambar 3. 3 Permodelan Molekul Reaksi Kimia

4. Proses reaksi berikutnya dapat dijelaskan dengan pembelahan oksigen siloksan dalam Si-O-Si melalui transfer elektron dari Si ke O, pembentukan silanol Si-OH menengah pada satu sisi, dan siloxo dasar Si-O- di sisi lain. Permodelan molekul reaksi kimia tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4.



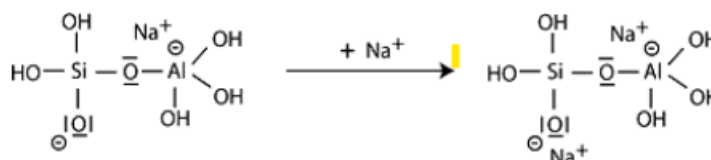
Gambar 3. 4 Pembentukan Silanol Si - OH

5. Membentuk gugus silanol Si-OH lebih lanjut, serta mengisolasi molekul ortosialat sebagai bahan utama geopolimer. Permodelan molekul reaksi kimia tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Pembentukan Gugus Silanol Si - OH

6. Siloxo Si-O- bereaksi dengan ion Na⁺ membentuk ikatan Si-O-Na. Permodelan molekul reaksi kimia tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.6



Gambar 3. 6 Pembentukan Ikatan Si - O - OH

3.2.2 Perhitungan Molaritas

Molaritas adalah satuan konsentrasi larutan yang menyatakan jumlah mol zat terlarut dalam satu liter larutan, larutan merupakan campuran homogen antara dua atau lebih zat yang terdiri dari zat pelarut dan zat terlarut. Molaritas juga dapat didefinisikan sebagai satuan konsentrasi larutan yang menyatakan jumlah mol zat terlarut dalam satu liter larutan. Istilah molaritas ini ditandai dengan huruf M besar dengan satuan mol/liter atau mmol/mL, berikut penulisan rumus molaritas jika volume larutan dalam bentuk liter dengan satuan mol/L menurut Untoro (2010).

$$\text{Mola} = \frac{W_{(gr)}}{Mr} \times \frac{1000}{v_{(ml)}}$$

$$w_{NaOH} M = \frac{\text{Molar} \times Mr \times V_{(ml)}}{1000}$$

Keterangan:

M = Molaritas (M)

n = Banyaknya mol zat terlarut (mol atau mmol)

V = Volume larutan (L atau mL)

g = massa zat terlarut (g)

Mr = massa molar zat terlarut (g/mol)

Masa NaOH diambil dari tabel periodik yang dapat dilihat pada gambar 3.7 berikut ini.

Periodic Table of the Elements

The periodic table displays elements from Hydrogen (1) to Oganesson (118). It is organized into groups (1A to 8A) and periods (1 to 7). The Lanthanide Series (57-71) and Actinide Series (89-103) are shown below the main table. A legend at the bottom identifies the following categories: Alkali Metal, Alkaline Earth, Transition Metal, Basic Metal, Semimetal, Nonmetal, Halogen, Noble Gas, Lanthanide, and Actinide.

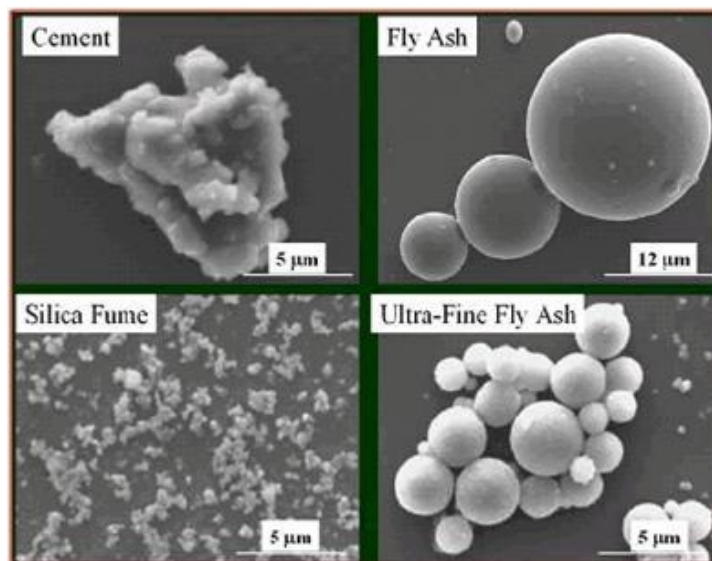
Gambar 3. 7 Tabel Periodik

3.3 Material Penyusun Beton Geopolimer

Material Penyusun dalam pembuatan beton geopolimer dengan bahan dasar *fly ash* dan alkali aktifator ini tidak berbeda dengan material penyusun beton pada umumnya. Beton geopolimer terdiri dari agregat kasar, agregat halus dan air. NaOH dilarutkan dengan aquades lalu dicampur dengan N_aSiO_3 . Li, Ding dan Zhan (2004) menyatakan “secara umum beton geopolimer merupakan varian yang memiliki nilai *slump* tinggi namun cepat mengeras sehingga menurunkan *workability*. Namun disamping itu beton dapat mencapai kuat tekan 70% dalam waktu 4 jam pertama” sama seperti semen *fly ash* yang dicampurkan dengan alkali aktifator juga memerlukan waktu untuk mengeras. *Setting time* pada beton menggunakan semen dipengaruhi oleh jenis semen dan kadar air yang digunakan, sedangkan *setting time* pada *fly ash* yang dicampur dengan alkali aktifator dipengaruhi oleh kelas *fly ash* yang digunakan, jumlah campuran alkali aktifator dan tingkat molaritas alkali aktifator yang digunakan.

3.2.3 Fly Ash

Fly ash merupakan produksi samping dari pembakaran batu bara yang dibakar dan menghasilkan produk sisa berupa material-material yang terbang dan terendapkan, yang terbang tersebut disebut *fly ash*. *Fly ash* memiliki bentuk bulat dan tekstur yang sedikit halus dibandingkan abu vulkanik yang kasar seperti pasir. Ukuran partikel *fly ash* bervariasi mulai dari yang lebih kecil dari 1 (micrometer) sampai lebih besar dari 100 (micrometer) beberapa literatur menyatakan bahwa ukuran *fly ash* berkisar 0,5 – 300 (micrometer) dengan Sebagian besar partikel berukuran kurang dari 20 (micrometer). Luas permukaan *fly ash* berkisar antara 300 m²/kg hingga 500 m²/kg, dengan batas bawah 200 m²/kg dan batas atas 700 m²/kg. Berat jenis atau *Specific Gravity* (Gs) *fly ash* cukup bervariasi, terdapat beberapa institusi yang memberikan rentang tersendiri, namun umumnya rentang terbesar berkisar 1.6 – 3.1. Secara umum *specific gravity* material *fly ash* berkisar antara 1.9 – 2.55. Massa jenis *fly ash* dalam kondisi kering berkisar 540 – 860 kg/m³, dan dalam kondisi penggetaran alam kemasannya mempunyai massa jenis 1.120 – 1.500 kg/m³. Perbandingan ukuran antara partikel semen, *fly ash*, dan *silica fume* berdasarkan foto *Scanning Electron microscope* dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.



Gambar 3. 8 Perbandingan Ukuran Partikel Semen, Fly Ash, dan Silica Fume

(Sumber: <https://lauwtjunnji.weebly.com/fly-ash--overview.html>)

Fly ash yang dapat digunakan untuk campuran pengganti sebagian semen dalam beton diatur dalam ASTM (*American Standard Testing Methods*) nomor C 618 (*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*). Kualitas *fly Ash* dipengaruhi dari jenis batu bara yang digunakan pada saat pembakaran, selain itu proses pembakaran juga mempengaruhi *fly ash* yang dihasilkan, dari hasil pembakaran mempengaruhi kadar kimia yang ada pada *fly ash*. Terdapat 2 klasifikasi kelas *fly ash* berdasarkan kandungannya seperti pada berikut.

1. Kelas F
 - a. *Fly ash* dengan kandungan CaO kurang dari 10%
 - b. Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) lebih dari 70%.
 - c. Kadar Cao < 10%, batasan menurut ASTM menyatakan maksimal 20%, sedangkan dalam *Canadian Standard Association* (CSA) dinyatakan maksimal 8%.
 - d. Kadar karbon (C) berkisar antara 5% - 10%.

- e. Fly ash kelas F tidak memiliki sifat *cementious* karena mengandung kalsium yang rendah atau sering disebut *low-calcium fly ash*, dan hanya bersifat *pozolanic*.

2. Kelas C

- a. Mengandung CaO lebih dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub-bitumen batubara (batubara muda / *sub-bituminous*).
- b. Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) lebih dari 50%.
- c. Kadar CaO > 10%, ASTM menyatakan 20%, CSA menetapkan 8% - 20% untuk tipe Cl dan diatas 20% untuk tipe CH.
- d. Kadar karbon (C) sekitar 2%.

Fly ash kelas C disebut juga *high-calcium fly ash* karena mengandung CaO yang cukup tinggi, sehingga memiliki sifat *cementious* dan juga *pozolanic*. Jika terkena air atau kelembaban, akan terhidrasi dan dapat mengeras dalam waktu sekitar 45 menit

3.2.4 Alkali aktifator

Proses pembuatan geopolymer memerlukan alkali aktifator untuk mereaksikan kandungan kimia yang ada pada *fly ash*, sehingga menjadi pasta geopolimer dan dapat mengikat agregat. Pada umumnya alkali aktivator yang digunakan pada proses pembuatan beton geopolimer adalah Sodium Hidroksida (NaOH) *flakses* yang dapat dilihat pada Gambar 3.9 dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3) pada Gambar 3.10. Hardjito dkk. (2004) menyatakan “sodium silikat berfungsi untuk mempercepat polimerisasi, sedangkan natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur AL dan Si yang terkandung dalam pasta”, sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat Alkalin Aktivator pada pembuatan beton geopolymer berfungsi sebagai bahan yang mereaksikan kandungan kimia pada fly ash, sehingga pasta geopolymer dapat mengikat angregat.

Aktivator yang umumnya digunakan adalah *Sodium Hidroksida* (NaOH) *flakes* seperti dan *Sodium Silikat* (Na_2SiO_3). Hardjito dkk. (2004) menyatakan “Sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam pasta, sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.”

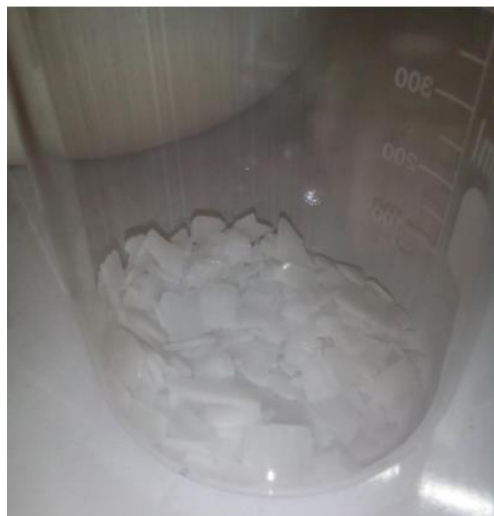
Alkali aktifator Sodium Hidroksida (NaOH). Untuk mendapatkan massa NaOH yang dipergunakan rumus perhitungan seperti berikut:

$$\text{Massa NaOH} = n \text{ mol} \times \text{Mr NaOH}$$

Keterangan

N Mol = Jumlah Mol

Mr = Masa molekul relative



Gambar 3. 9 NaOH (flakses)

(Sumber: Penelitian Muhammad Ridwan 2018)



Gambar 3. 10 Na₂SiO₃

(Sumber: Penelitian Muhammad Ridwan 2018)

3.2.5 Agregat Halus

Persyaratan agregat halus pada campuran beton adalah pasir alam hasil dari desintegrasi alami batuan, atau pasir yang dihasilkan dari industri pemevahan batu yang mempunyai ukuran sebesar 4,75 mm atau no 4 (SNI 1970, 2016). Persyaratan agregat halus menurut ASTM C33 (2003) untuk campuran beton adalah sebagai berikut.

1. Modulus halus butir yaitu berada pada rentang 2,3-3,1.
2. Kadar lumpur atau butiran yang lebih kecil dari 0,074 mm atau no.200 dalam persen berat maksimum adalah 3.0 % untuk beton yang mengalami abrasi dan 5% untuk beton jenis lainnya.
3. Kadar gumpalan tanah liat atau partikel yang mudah dirapikan maksimum 3%
4. Kandungan arang atau lignit untuk beton ekpos maksimum 0,5% dan beton jenis lainnya maksimum 1,0%
5. Kadar zat organik yang ditentukan dengan mencampur agregat halus dengan larutan Natrium Sulfat ($NaSO_4$) sebanyak 3% tidak menghasilkan warna yang lebih tua dibandingkan warna standar. Apabila warnanya lebih tua maka agregat halus tidak diperkenankan digunakan kecuali sebagai berikut
 - a. Warna tersebut timbul karena terdapat sedikit lignit atau sejenisnya
 - b. Ketika dilakukan pengujian kuat tekan beton sesuai ASTM C87 yang dibuat dengan pasir standar silika hasilnya menunjukkan nilai lebih besar dari 95%
 - c. Jika dipakai untuk beton yang berhubungan dengan basah dan lembab maka agregat tidak boleh bersifat reaktif terhadap alkali. Agregat juga tidak boleh berhubungan dengan bahan yang bersifat reaktif dengan alkali semen, yang mana penggunaan semen yang mengandung natrium oksida tidak lebih dari 0,6%
 - d. Kekalan jika diuji dengan natrium sulfat bagian yang hancur maksimum 10% dan jika dipakai magnesium sulfat adalah 15%
 - e. Susunan gradasi memenuhi syarat yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Persyaratan Susunan Gradasi Agregat Halus

Lewat	Tertinggal	Gradasi A	Gradasi B	Gradasi C
38.10	25.40	12.50		
25.40	19.05	12.50		
19.05	12.70	1250	12.50	
12.70	9.51	12.50	12.50	
9.51	6.35			12.50
6.35	4.75			12.50

(Sumber: ASTM C-33 (2003))

Sebelum dilakukanya pembuatan beton ada bebrapa pengujian untuk menguji agregat halus memenuhi persyaratan atau tidak. Jenis pengujian dan rumus pengujian dapat dilihat di uraian bawah ini.

1. Berat Jenis dan Penyerapan Air

$$\text{Berat Jenis Curah} = \frac{Bk}{(B+500+Bt)} \quad (3.1)$$

Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (SSD)

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

$$\text{Berat Jenis Semu} = \frac{Bk}{(B+500-Bt)}$$

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{500-Bk}{(Bk)} \times 100\% \quad (3.3)$$

Keterangan

Bk = Berat pasir kering mutlak

SSD = Berat pasir kondisi jenuh kering mutlak

Bt = Berat piknometer berisi pasir dan air

B = Berat piknometer berisi air

2. Modulus Halus Butir

Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

$$\text{Persentase berat tertinggal} = \frac{\text{Berat Tertinggal}}{\Sigma \text{Berat Tertinggal}} \times 100\% \quad (3.5)$$

Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Lubang ayakan 2,4 mm = Lubang ayakan 4,8 mm +
lubang ayakan 2,4 mm

Presentase Lolos Kumulatif

Lubang ayakan 4,8 mm = 100 % - Berat tertinggal
kumulatif%

$$\text{Modulus Halus Butir (MHB)} = \frac{\Sigma \text{Persentase berat tertinggal kumulatif}}{100} \quad (3.4)$$

Berat Volume Gembur

Berat Agregat (W3) = W2 – W1

Berat Volume Tabung (V) = $0,25 \times \pi \times d^2 \times t$

$$\text{Berat Volume Gembur} = \frac{W3}{V} \quad (3.6)$$

Keterangan

W3 = Berat Agregat

W2 = Berat tabung + agregat SSD

W1 = Berat tabung

d = diameter tabung

t = Tinggi tabung

V = Volume Tabung

3. Berat Volume Padat

Berat Agregat (W3) = W2 – W1

Berat Volume Tabung (V) = $0,25 \times \pi \times d^2 \times t$

$$\text{Berat Volume Padat} = \frac{W3}{V} \quad (3.7)$$

4. Kadar Lumpur

$$\frac{W1-W2}{W1} \times 100 \% \quad (3.8)$$

Keterangan :

W3 = Berat Agregat

W2 = Berat tabung + agregat SSD

W1 = Berat tabung

d = diameter tabung

t = Tinggi tabung

V = Volume Tabung

3.2.6 Agregat Kasar

Agregat kasar dalam campuran beton adalah kerikil hasil dari desintegrasi dari baru atau hasil dari industri batu pecah dan mempunyai ukuran 5 mm – 40 mm (SNI 03-2834-2000). Adapun persyaratan agregat kasar menurut ASTM C33 untuk campuran beton adalah sebagai berikut.

1. Jika agregat dipakai untuk beton yang berhubungan dengan basah dan lembab maka agregat t halus tidak boleh mengandung bahan yang bersifat reaktif dengan alkali pada semen dalam jumlah yang dapat mengakibatkan ekspansi mortar atau beton, kecuali material tersebut tersedia dalam jumlah yang merugikan, agregat halus diperbolehkan apabila digunakan dengan semen yang mengandung alkali kurang dari 0,60%, jika ada persyaratan yang memuaskan, evaluasi, atau dengan penambahan bahan yang dapat mencegah pemuaihan yang berbahaya akibat reaksi alkali agregat.
2. Susunan gradasi agregat kasar harus sesuai Gambar 3.11 sebagai berikut

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No. 50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	—	25 to 60	—	0 to 15	—	0 to 5	—	—	—	—	—	
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	—	—	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	—	0 to 5	—	—	—	—	—	
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	—	—	—	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	—	0 to 5	—	—	—	—	
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	—	—	—	100	95 to 100	—	35 to 70	—	10 to 30	—	0 to 5	—	—	
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	—	—	—	—	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	—	0 to 5	—	—	—	
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	—	—	—	—	100	95 to 100	—	35 to 70	—	10 to 30	0 to 5	—	—	
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	—	—	—	—	—	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	—	—	—	
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	—	—	—	—	—	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	—	—	
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	—	—	—	—	—	100	95 to 100	—	25 to 60	—	0 to 10	0 to 5	—	
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	—	—	—	—	—	—	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	—	—	
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	—	—	—	—	—	—	100	90 to 100	—	20 to 55	0 to 10	0 to 5	—	
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	—	—	—	—	—	—	—	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	—	
8	9.5 to 2.36 mm (¾ in. to No. 8)	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	
89	9.5 to 1.18 mm (¾ in. to No. 16)	—	—	—	—	—	—	—	—	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5
9 ^a	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5

^a Although size 9 aggregate is defined in Terminology C 125 as a fine aggregate, it is included as a coarse aggregate when it is combined with a size 8 material to create a size 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C 125.

Gambar 3. 11 Persyaratan Susunan Gradasi Agregat Kasar

(Sumber: ASTM C-33, 2003)

Sebelum dilakukanya pembuatan beton ada bebrapa pengujian untuk menguji agregat kasar memenuhi persyaratan atau tidak. Jenis pengujian dan rumus pengujian dapat dilihat di uraian bawah ini.

1. Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar

$$\text{Persentase Berat Tertinggal} = \frac{\text{Berat tertinggal}}{\Sigma \text{ Berat tertinggal}} \times 100 \% \quad (3.9)$$

Presentase Berat Tertinggal Kumulatif

$$\text{Lubang ayakan 20 mm} = \text{Lubang ayakan 40 mm} + \text{lubang ayakan 20 mm}$$

Persentase Lolos Kumulatif

$$\text{Lubang ayakan 40 mm} = 100\% - 0\%$$

$$\text{Modulus Halus Butir (MHB)} = \frac{\Sigma \text{ Persentase berat tertinggal kumulatif}}{100} \quad (3.10)$$

3. Berat Volume Gembur

$$\text{Berat Agregat (W3)} = W2 - W1$$

$$\text{Volume Tabung} = 0,25 \times \pi \times 14,95^2 \times 30,11$$

$$\text{Berat Volume Gembur} = \frac{W3}{V} \quad (3.11)$$

2. Berat Volume Padat

$$\text{Berat Agregat (W3)} = W2 - W1$$

$$\text{Volume Tabung} = 0,25 \times \pi \times 14,95^2 \times 30,11$$

$$\text{Berat Volume Padat} = \frac{W3}{V} \quad (3.12)$$

3.4 Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan besarnya beban per satuan luas yang dapat diterima oleh beton, dan akan menyebabkan benda uji beton hancur dengan kekuatan tertentu bila diberi beban yang dihasilkan oleh mesin tekan. Nilai kuat tekan dipengaruhi oleh umur beton, dimana kuat tekan akan mencapai kekuatan terbesarnya pada saat umur 28 hari, dimana pada saat umur 28 hari beton akan mencapai 90% dari kuat tekan beton yang direncanakan pada umur 28 hari (dipohusodo, 1994 dalam Prasetya ; 2018). Ridwan (2018) menyatakan semakin tinggi kekuatan struktur yang dikehendaki, maka semakin tinggi pula mutu beton yang diperlukan. Rumus yang dapat digunakan untuk mencari nilai kuat tekan beton berdasarkan dengan penelitian di Laboratorium dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (3.13)$$

Keterangan :

$f'c$ = Kuat tekan (MPa)

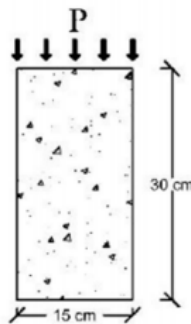
P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

Beton akan memiliki kuat tekan yang tinggi, jika bahan pengisi beton tersusun dari bahan lokal berkualitas baik (dipohusodo, 1996 dalam Ridwan ; 2018). Bahan penyusun yang perlu diperhatikan adalah agregat, hal tersebut dikarenakan agregat mengisi 70%-75% volume beton, karena kuat tekan sangat dipengaruhi oleh 26 kekuatan agregat, maka ada beberapa hal yang perlu diperhatikan pada agregat yang dapat dilihat sebagai berikut :

1. Permukaan agregat dan bentuk agregat,
2. Gradasi dari agregat dan
3. Ukuran maksimum dari agregat.

Pada penelitian ini digunakan benda uji berupa beton silinder yang sketsa benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.12 sebagai berikut.



Gambar 3. 12 Sketsa Benda Uji Kuat Beton

(Sumber: Prasetya, 2018)

3.5 Modulus Elastisitas Beton

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 berikut ini.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (3.14)$$

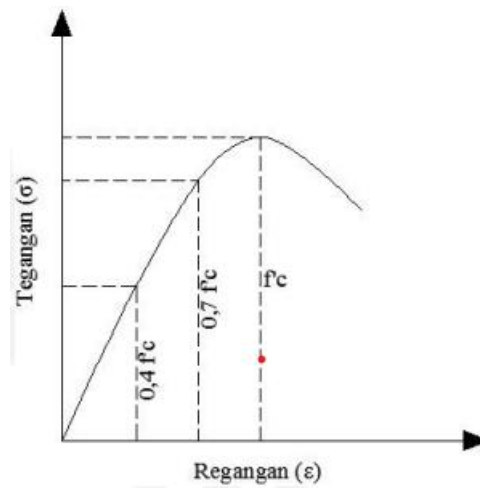
Keterangan :

E = modulus elastisitas

S_2 = tegangan Ketika 40 % dari beban *ultimate* (MPa)

S_1 = tegangan Ketika regangan 0,000050 (MPa), dan

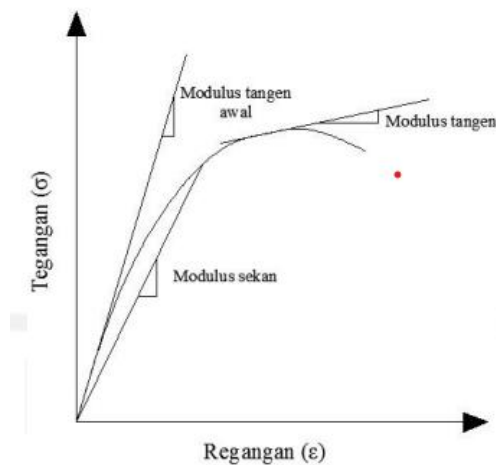
ε_2 = regangan akibat Tekanna S_2



Gambar 3. 13 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 $0,4 c \times f'c$ 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 3.14



Gambar 3. 14 Modulus Sekan dan Modulus Tangen Beton

(Sumber : Nawy, 1990)

Selain itu, menurut SNI 03-2847 2019 modulus elastisitas juga bisa dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c} \quad (3.15)$$

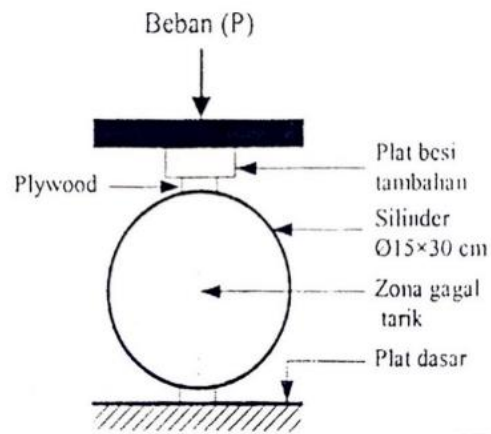
Keterangan :

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

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

3.6 Pengujian Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan berdasarkan SNI 03-2491-2002 menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan maksud untuk mengevaluasi ketahanan geser suatu komponen struktur berbahan beton dengan agregat ringan. Kuat tarik belah beton berbentuk silinder merupakan besaran nilai kuat tarik tidak langsung pada benda uji beton silinder yang didapatkan dari hasil pembebanan dengan cara meletakkan benda uji secara mendatar sejajar dengan permukaan meja penekan pada mesin uji tekan yang selanjutnya benda uji diberikan pembebanan. Pengujian dilakukan seperti pada Gambar 3.15 berikut ini.



Gambar 3. 15 Kuat Tarik Belah Beton

(Sumber : Nugraha dan Antoni (2007))

Perhitungan kuat tarik belah beton dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$F_{ct} = \frac{2P}{\pi L D} \quad (3.16)$$

Keterangan :

F_{ct} = Kuat tarik belah (MPa)

P = Beban maksimum (N)

L = Panjang benda uji silinder (mm)

D = Diameter benda uji silinder (mm)

BAB IV

METEDOLOGI PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian adalah langkah umum atau metode yang dilakukan pada penelitian secara ilmiah untuk memperoleh hasil yang rasional, Penelitian umumnya menggunakan metode eksperimental di laboratorium. Studi eksperimental merukan metode penelitian guna mencari pengaruh variable tertentu terhadap variable lain dalam suatu kondisi yang terkontrol. Tahapan pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Tahap persiapan, pada tahap persiapan ini meliputi pengumpulan bahan – bahan dan material, pengecekan kualias bahan, dan pemeriksaan alat uji yang akan digunakan apakah sesuai standar yang berlaku.
2. Tahapan pengujian karakteristik *fly ash* limbah PLTU Cirebon guna mengetahui klasifikasi *fly ash* tersebut untuk menjadi bahan beton geopolimer
3. Tahapan pembuatan benda uji, pada tahap ini melakukan pembuatan alkali aktivator 1 hari sebelum pengadukan adonan, pengecekan nilai *slump*, dan *slump-flow*, dan pembuatan benda uji berbentuk silinder.
4. Tahap pengujian karakteristik benda uji, meliputi pengujian kuat tekan beton, modulus elastisitas dan kuat tarik belah pada umur 28 hari.
5. Tahap pengumpulan data hasil pengujian beton geopolymer pada laboratorium.
6. Tahap pengolahan data, meliputi analisis data hasil pengujian dan, mengambil kesimpulan dari pengujian tersebut.

4.2 Bahan yang Digunakan

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

1. *Fly ash*

Fly ash yang digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash* dari PLTU Cirebon yang telah diuji di laboratorium dan termasuk kedalam *fly ash* kelas C

2. Alkali Aktifator

Alkali aktifator aktivator yang digunakan pada proses pembuatan beton geopolimer adalah Sodium Hidroksida (NaOH) *flakses* dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3)

3. Agregat halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini adalah agregat halus yang berasal dari sungai Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta dengan dilakukan pengujian analisa saringan terlebih dahulu untuk menentukan gradasi agregat.

4. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah agregat kasar dari

5. Air

Air yang digunakan pada penelitian ini adalah air yang berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Air yang digunakan pada penelitian ini tidak mengandung benda-benda yang dapat dilihat secara visual.

4.3 Peralatan penelitian

Peralatan yang akan digunakan untuk membuat benda uji dalam penelitian ini dapat dilihat sebagai ini.

1) Set Saringan Agregat

Set Saringan agregat pada penelitian ini berfungsi untuk memisahkan agregat berdasarkan ukuran butirnya. Alat ini digunakan pada pengujian Analisa saringan.

2) Timbangan merk "OHAUS" dengan kapasitas 20 kg

Timbangan pada penelitian ini digunakan untuk menimbang berat bahan yang akan digunakan berdasarkan perhitungan perencanaan campuran (*mix design*)

3) Mixer/pengaduk beton

Mixer pada pengujian ini berfungsi untuk mencampur adonan/campuran pembuat beton

- 4) Sekop
Sekop merupakan alat yang digunakan untuk menuangkan beton segar ke dalam bekisting beton
- 5) Cetakan silinder
Cetakan yang digunakan pada penelitian ini berukuran 15 cm dan tinggi 30 cm berfungsi sebagai cetakan pada saat membuat benda uji kuat tekan
- 6) Cangkul, sekop, cetok, ayakan, palu, tang, catut, dan peralatan lainya untuk membantu dalam proses pembuatan benda uji
- 7) Kaliper
kaliper digunakan untuk mengukur dimensi dari benda uji silinder beton sebelum dilakukan pengujian kuat tekan dan kuat Tarik (belah) pada sampel siliner beton
- 8) Alat uji *Vicat Camet*
Compression Testing Machine (CTM), tipe ADR 3000 dengan kapasitas 3000kN merupakan alat uji yang digunakan untuk mengukur tekan dan tarik (belah) silinder beton

4.3 Benda Uji

Pada pengujian kali ini Sampel yang di jadikan obyek penelitian adalah beton geopolymer dengan menggunakan limbah fly ash PLTU Cirebon sebagai pengganti semen yang direaksikan dengan alkali aktivator yang berupa larutan NaOH 8M, 9M, 10M, 11M, 12M dan Na_2SiO_3 . Sampel beton menggunakan perbandingan antara agregat dan pasta sebesar 75: 25 dengan agregat kasar 75% dan agregat halus 25%. Pasta (*binder*) menggunakan factor $w/fa = 0,25$, sedangkan perbandingan antara fly ash dengan alkali aktivator sebesar 75: 25. Sampel benda uji berbentuk silinder dengan tinggi 30 cm, dan diameter 15 cm yang akan diuji kuat tekan pada umur 28 hari dan diuji modulus elastitas pada umur 28 hari,

Tabel 4.2 Rincian Benda Uji

Pengujian	Kadar Molaritas	Umur Benda Uji (hari)	Kode Benda Uji	Jumlah Sampel
Kuat Tekan dan Modulus elastisitas	8 M	28	TM -8M	5
	9 M	28	TM -9M	5
	10 M	28	TM-10M	5
	11 M	28	TM-11M	5
	12 M	28	TM-12M	5
Tarik Belah	8 M	28	TB -8M	5
	9 M	28	TB -9M	5
	10 M	28	TB -10M	5
	11 M	28	TB -11M	5
	12 M	28	TB -12M	5
Total Sampel				50

Dengan keterangan sebagai berikut.

TM = Uji Kuat Tekan dan Uji Modulus Elastisitas Beton

TB = Uji Tatik Belah

Karena pengujian kuat tekan dengan pengujian modulus elastisitas beton bisa di uji secara bersamaan maka dari itu sampel yang di gunakan dalam pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas beton sama.

4.4 Lokasi pengujian

Pembuatan benda uji dan pengujian benda uji silinder beton geopolimer dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik sipil Fakultas Teknik sipil Dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Untuk mengetahui Karakteristik beton geopolimer dengan campuran fly ash limbah PLTU Cirebon.

4.5 Komposisi Campuran Beton Dan Jumlah Benda Uji

Bendah uji yang digunakan pada penelitian ini adalah beton tanpa semen atau biasa disebut beton geopolimer. Dengan bahan yang digubakan adalah limbah *fly*

ash dari PLTU Cirebon yang sudah di uji di laboratorium dan uji yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari benda uji silinder dengan tinggi 30 cm.

Dengan keterangan sebagai berikut:

KU = Uji kuat tekan dan uji modulus elastisitas

TB = Kuat Tarik belah

Berdasarkan jumlah kebutuhan fly ash sebanyak 444 kg/m^3 , dapat melakukan penghitungan jumlah kebutuhan bahan untuk 1 benda uji silinder

$$\begin{aligned} \text{Volume Silinder} &= \pi r^2 \times H \\ &= \pi \times 0,075 \text{ m} \times 0,075 \times 0,3 \text{ m} \\ &= 0,0053036 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fly ash 1 silinder} &= 444 \text{ kg/m}^3 \times V \text{ silinder} \\ &= 444 \text{ kg/m}^3 \times 0,0053036 \text{ m}^3 \\ &= 2,356 \text{ kg} \end{aligned}$$

Pada hasil perhitungan di atas mendapatkan hasil yaitu jumlah kebutuhan fly ash untuk 1 silinder sebanyak 2,356 kg. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut dapat dilakukan perhitungan jumlah kebutuhan air, agregat, Na_2SiO_3 , dan NaOH. Contoh perhitungan kebutuhan bahan dengan konsentrasi larutan NaOH sebesar 2M pada kombinasi perbandingan, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1/2$ berdasarkan perbandingan komposisi di atas sebagai berikut.

Jumlah air 1 silinder:

$$\begin{aligned} 0,25 &= \frac{W}{FA} \\ W &= FA \times 0,25 \\ &= 2,356 \times 0,25 \\ &= 0,589 \text{ kg} \\ &= 0,589 \text{ L} \end{aligned}$$

Molekul relative (Mr) NaOH:

Berat atom Na = 22.99

Berat atom O = 15,999

Berat atom H = 1

Mr NaOH = 22,99 + 15,999 + 1,006 = 40,105

Jumlah NaOH 8 M:

$$\begin{aligned} \text{Mola} &= \frac{W_{(gr)}}{Mr} \times \frac{1000}{v_{(ml)}} \\ W_{NaOH} 8M &= \frac{\text{Molar} \times Mr \times V_{(ml)}}{1000} \\ &= \frac{8 \times 40 \times 589}{1000} \\ &= 188,48 \text{ gr} \end{aligned}$$

Na₂SiO₃

$$\begin{aligned} W_{wg} &= 0,5 \times W_{NaOH} \\ &= 0,5 \times 0,18848 \text{ kg} \\ &= 0,09424 \text{ kg} \end{aligned}$$

Berat total:

$$\begin{aligned} W_{Tot} &= \frac{FA+W+WN_{aOH}+W_{wg}}{25\%} \\ &= \frac{2,356 + 0,589 + 0,18848 + 0,09424}{25\%} \\ &= \frac{3,22772}{25\%} \\ &= 12,91088 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Jumlah agregat kasar:

$$\begin{aligned} \text{Agregat kasar} &= \left(\frac{2}{3} 100\% \times 75\%\right) \times W_{tot} \\ &= (66,67\% \times 75\%) \times 12,91088 \text{ kg} \\ &= 6,45 \text{ kg} \end{aligned}$$

Jumlah agregat halus:

$$\begin{aligned} \text{Agregat halus} &= \left(\frac{1}{3} 100\% \times 75\%\right) \times W_{tot} \\ &= (33,33\% \times 75\%) \times 12,91088 \text{ kg} \\ &= 3,22 \text{ kg} \end{aligned}$$

Berdasarkan dari contoh perhitungan yang ada di atas dan dilakukan metode perhitungan yang sama pada semua kombnasi. Rekapitulasi perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.1 Jumlah Komposisi Bahan Untuk Satu Silinder

Beton	Alkali Aktivator	Kode Sampel	B 8M	B 9M	B 10M	B 11M	B 12M
75 : 25	4 : 2	Na ₂ SiO ₃ (Kg)	0,3768	0,4240	0,4712	0,5183	0,5654
		NaOH (kg)	0,3769	0,4240	0,4712	0,5183	0,5654
		Agregat Halus (kg)	3.2250	3.2603	3.2956	3.3310	3.3663
		Agregat Kasar (kg)	6.4500	6.5207	6.5913	6.6620	6.7327
		Air (L)	0.5884	0.5884	0.5884	0.5884	0.5884

Tabel 4.2 Jumlah Komposisi Bahan Total

Kode Sampel	B 8M	B 9M	B 10M	B 11M	B 12M
Na ₂ SiO ₃ (Kg)	3,7686	4,2408	4,712	5,1832	5,6544
NaOH (kg)	3,7686	4,2408	4,712	5,1832	5,6544
Agregat Halus (kg)	32,2501	32,6035	32,9569	33,2103	33,6637
Agregat Kasar (kg)	64,5003	65,2071	65,9139	66,6207	67,3275

4.5 Pelaksanaan Pengujian

Pelaksanaan pengujian ini melalui beberapa tahapan yang dilakukan yaitu tahapan persiapan, pengujian agregat, perencanaan campuran, pembuatan dan pengujian benda uji *trial*, pembuatan dan perawatan benda uji. Pengujian benda uji, olah data, analisis data, pembahasan dan kesimpulan.

4.5.1 Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian merupakan tahapan yang dilakukan studi literatur, penyiapan bahan dan alat yang akan digunakan dalam pengujian selama penelitian ini.

4.5.2 Perencanaan campuran Beton (*Mix Design*)

Perencanaan campuran beton pada penelitian ini mengacu kepada SNI 2842-2000. Untuk perhitungan campuran beton yang akan diuji pada V pembahasan.

4.5.3 Pembuatan dan pengujian Benda Uji *Trial* dengan umur 7 Hari

Berdasarkan campuran beton yang sudah dibuat, kemudian dilakukan pembuatan benda uji untuk dilakukan *trial*. Maksud dan tujuan pembuatan benda uji untuk *trial* ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian perencanaan campuran beton dan hasil pembuatan beton tersebut. Penelitian dilanjutkan setelah pengujian uji *trial* memenuhi mutu beton yang sudah direncanakan.

4.5.4 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Pembuatan dan perawatan benda uji pada penelitian ini mengacu kepada hasil perencanaan campuran beton, Bahan penyusun beton yang sudah disesuaikan dengan perencanaan kemudian dicampur menggunakan alat *concrete mixer*. Selanjutnya, beton dicetak dengan menggunakan bekisting beton. Setelah beton mengeras, beton dipisahkan dengan bekisting dan dilakukan perawatan beton dengan menggunakan teknik perendaman sampai umur rencana.

1. Uji Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton mengacu kepada SNI 1974-2011. Tahapan pengujian kuat tekan beton adalah sebagai berikut.

- a. Mengangkat benda uji dari bak perendaman kemudian di diamkan selama 24 jam
- b. Mengukur dimensi benda uji
- c. Menimbang berat total benda uji
- d. Meletakkan benda uji pada landasan tekan bawah dan memastikan penunjuk beban sudah menunjukkan angka 0

- e. Menjalankan mesin pengujian tekan dengan pembebanan 0,15 MPa/detik sampai 0,35 MPa/detik
- f. Melakukan pembebanan hingga benda uji hancr dan mencatat beban maksimum yang di terima benda uji.

4.5.5 Olah Data

Olah data merupakan pengolahan data mentah/data dari pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas beton berdasarkan landasan teori. Olah data dilakukan untuk mengetahui kuat tekan dan modulus elastisitas pada beton geopolimer.

4.5.6 Analisis Data

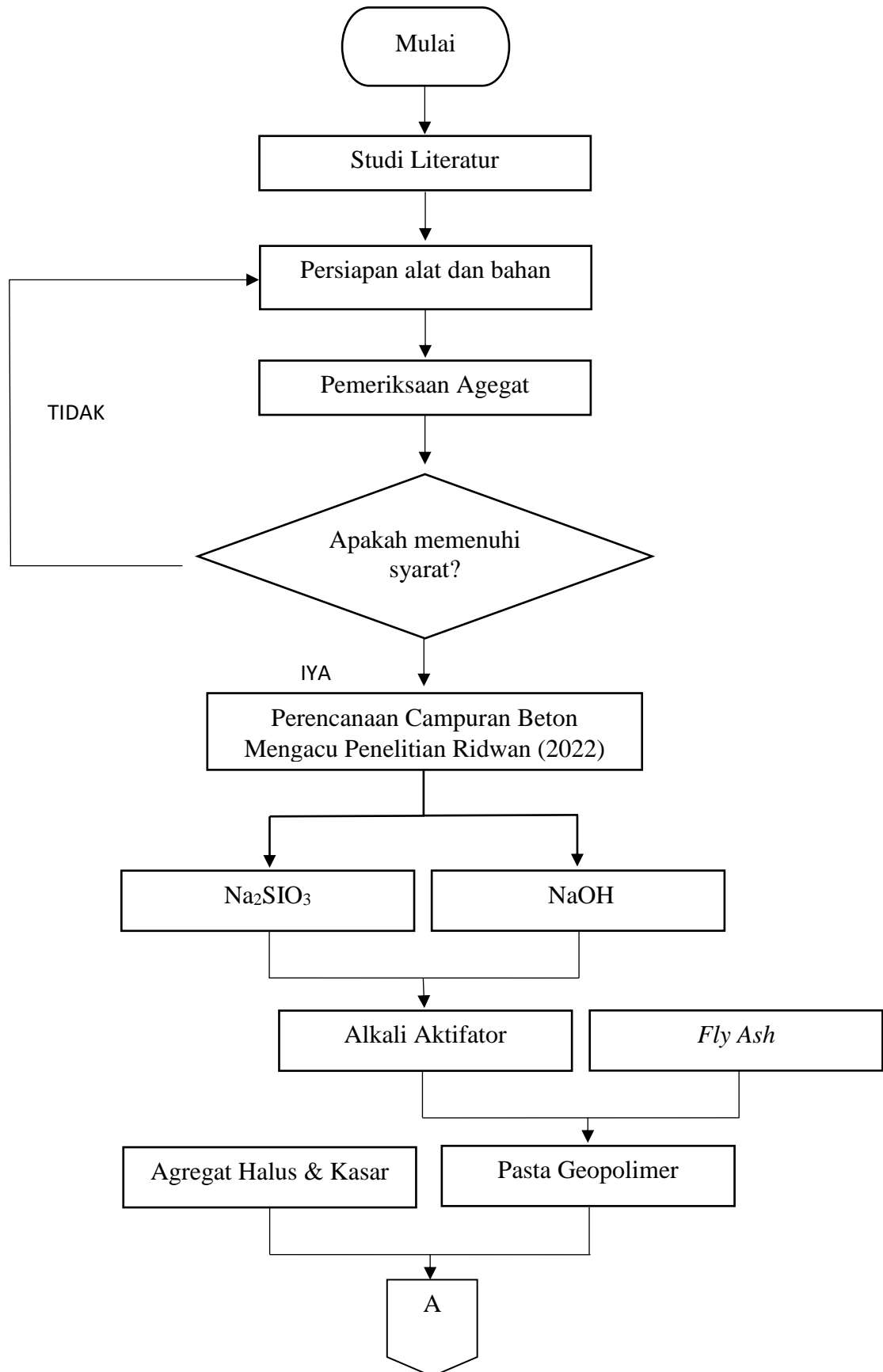
Analisis data merupakan perbandingan berdasarkan kelompok variable tertentu dengan maksud dan tujuan mengetahui perbedaan nilai dari sampel uji tersebut.

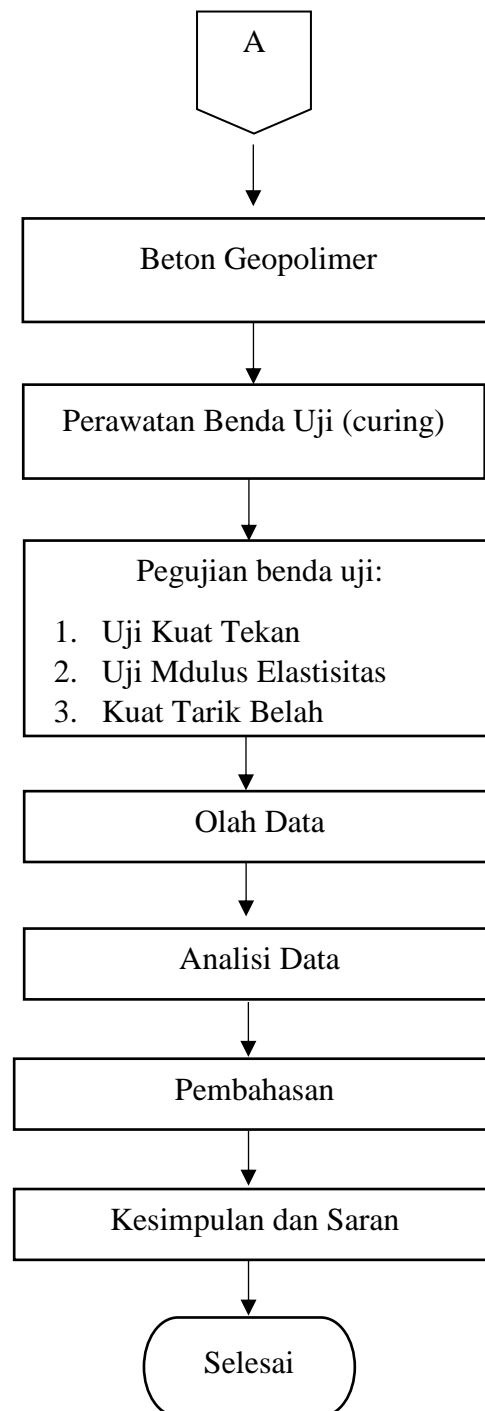
4.5.7 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran adalah tahapan penarikan kesimpulan dari hasil pembahasan dalam pengujian yang mengacu pada tujuan penelitian. Selanjutnya, dari kesimpulan yang ada di buat untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

4.5.8 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.





Gambar 4.1 *Flow Chart*

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian yang dilakukan sebelum pembuatan benda uji meliputi pengujian material yang digunakan dalam penyusunan beton, antara lain pengujian agregat halus dan agregat kasar, dan kandungan kimia dalam *fly ash* yang digunakan pada pembuatan beton. Hasil penelitian setelah proses pengecoran adalah konversi kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah beton dengan variasi molaritas.

5.1 Pengujian Agregat Halus

5.1.1 Berat Jenis dan Penyerapan Air

Pada pengujian berat jenis dan penyerapan air yang di lakukan bertujuan untuk menghitung penyerapan air pada agregat halus. Berikut adalah hasil dari pengujian berat jenis dan penyerapan air yang sudah dilakukan dapat dilihat di Tabel 5.1. Sedangkan, perhitungan berat jenis dan penyerapan air agregat halus menggunakan rumus yang ada pada landasan teori pada BAB III di atas, selanjutnya perhitungan berat jenis dan penyerapan air agregat halus menggunakan rumus persamaan (3.1), (3.2) dan (3.3) dan bisa dilihat sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Berat Jenis Curah} &= \frac{498}{(737+500-1043)} \\ &= 2,567 \\ \text{Berat Jenis SSD} &= \frac{500}{(737+500+1043)} \\ &= 2,577 \\ \text{Berat Jenis Semu} &= \frac{498}{(737+500-1043)} \\ &= 2,594 \\ \text{Penyerapan Air} &= \frac{500-498}{(498)} \times 100\% \\ &= 0,4016 \%\end{aligned}$$

Selanjutnya langkah-langkah perhitungan yang sama dilakukan untuk menghitung berat jenis dan penyerapan air agregat halus sampel 2. Adapun

rekapitulasi hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.1 sebagai berikut.

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

No.	Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
1.	Berat Jenis Curah	2,567	2,663	2,567
2.	Berat Jenis Kering Prmukaan	2,577	2,674	2,577
3.	Berat Jenis Semu	2,594	2,692	2,594
4.	Penyerapan ar (%)	0,4016%	0,4016%	0,4016%

Hasil dari pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat halus, diperoleh berat curah rata-rata sebesar 2,567, berat jenis semu sebesar 2,594 Hasil pengujian penyerapan air pada agregat halus didapatkan presentase penyerapan air sebesar 0,4016 % Menurut SNI No. 1737-1989-F (1989), persyaratan penyerapan air agregat adalah $\leq 3\%$. Berdasarkan dari hasil pengujian berat jenis yang sudah dilakukan didapatkan hasil, berat jenis kering permukaan sebesar 2,577 angka yang dihasilkan tersebut memenuhi persyaratan karena masih berada diantara berat jenis normal agregat halus 2,5 – 2,7 (SK SNI T-15-.1990-1 (1990)

5.1.2 Modulus Halus Butir

Pada pengujian Analisa saringan bertujuan untuk mengklasifikasikan agregat halus berdasarkan kekasaran butirannya. Pengujian ini menggunakan saringan dengan ukuran 4,80 mm; 2,40 mm; 1,20 mm; 0,6 mm; 0,30mm; 0,15 dan pan. Adapun data tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan Tabel 5.3. Rumus perhitungan Analisa saringan agregat halus ada pada landasan teori BAB III di atas. Sedangkan perhitungan analisa saringan agregat halus sampel 1 menggunakan persamaan (3.5), (3.6) dan (3.7) bisa dilihat di bawah ini.

a. Persentase Berat Tertinggal

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 4,8 mm} &= \frac{9}{2000} \times 100\% \\ &= 0,45 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 2,4 mm} &= \frac{10}{2000} \times 100\% \\ &= 0,50 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 1,2 mm} &= \frac{65}{2000} \times 100\% \\ &= 3,25 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,6 mm} &= \frac{520}{2000} \times 100\% \\ &= 26,00 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,30 mm} &= \frac{957}{2000} \times 100\% \\ &= 47,85 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,15 mm} &= \frac{396}{2000} \times 100\% \\ &= 19,90 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pan} &= \frac{40}{2000} \times 100\% \\ &= 2,000 \% \end{aligned}$$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

$$\text{Lubang ayakan 4,8 mm} = 0,45 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 2,4 mm} &= 0,45 \% + 0,50 \% \\ &= 1,10 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 1,2 mm} &= 1,10 \% + 3,25 \% \\ &= 4,35 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,6 mm} &= 4,35 \% + 26,00 \% \\ &= 30,35 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,30 mm} &= 30,35 \% + 47,85 \% \\ &= 78,20 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,15 mm} &= 78,20 \% + 19,80 \% \\ &= 98,00 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pan} &= 98,80 \% + 2,00 \% \\ &= 100,000 \end{aligned}$$

c. Persentase Lolos Kumulatif

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 4,8 mm} &= 100 \% - 0,60 \% \\ &= 99,40 \% \end{aligned}$$

Lubang ayakan 2,4 mm	= 100 % – 1,10 % = 98,90 %
Lubang ayakan 1,2 mm	= 100 % – 4,35 % = 95,65 %
Lubang ayakan 0,6 mm	= 100 % – 30,35 % = 69,65 %
Lubang ayakan 0,30	= 100 % – 78,20 % = 21,80 %
Lubang ayakan 0,15 mm	= 100 % – 98,00 % = 2,00 %
Pan	= 100 % – 100,00 % = 0 %

Selanjutnya langkah-langkah perhitungan yang sama juga dilakukan untuk analisa saringan agregat halus sampel 2. Rekapitulasi hasil perhitungan analisa saringan agregat halus sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan Tabel 5.3 sebagai berikut

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

Ukuran ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumuatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	0	0	0	100
10,00	3	0,15	0	100
4,80	9	0,45	0,60	99,40
2,40	10	0,50	1,10	98,90

Lanjutan Tabel 5.2 Hasil pengujian Analisa saringan agregat halus sampel 1

Ukuran ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
1,20	65	3,25	4,35	95,65
0,60	520	26,00	30,35	69,65
0,30	957	47,85	78,20	21,80
0,15	396	19,80	98,00	2,00
Sisa	40	2,000	100,000	0
Jumlah	2000	100	212,600	

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

Ukuran ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	0	0	0	100
10,00	0	0	0	100
4,80	0	0,00	0,00	100,00
2,40	10	0,50	0,50	99,50
1,20	80	4,00	4,50	95,50
0,60	570	28,50	33,00	67,00
0,30	934	46,70	79,70	20,30
0,15	384	19,20	98,90	1,10
Sisa	22	1,100	100,000	0
Jumlah	2000	100	216,600	

Berdasarkan hasil dari tabel 5.2 dan tabel 5.3, maka dapat dihitung nilai modulus halus butir menggunakan persamaan (3.8) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus Halus Butir (MHB)} &= \frac{\Sigma \text{Persentase berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 \text{MHB sampel 1} &= \frac{212,600}{100} = 2,126 \\
 \text{MHB sampel 2} &= \frac{216,600}{100} = 2,166
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MHB rata - rata} &= \frac{2,126+2,166}{2} \\ &= 2,146 \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian modulus halus butir diatas, didapatkan modulus halus butir sampel 1 adalah 2,146 % sesuai dengan syarat (SNI 03-1750-1990) modulus halus butir yaitu 1,5 - 3,8%, agregat yang di uji termasuk pada jenis agregat yang memiliki butir cukup kasar, sehingga baik digunakan untuk percampuran beton.

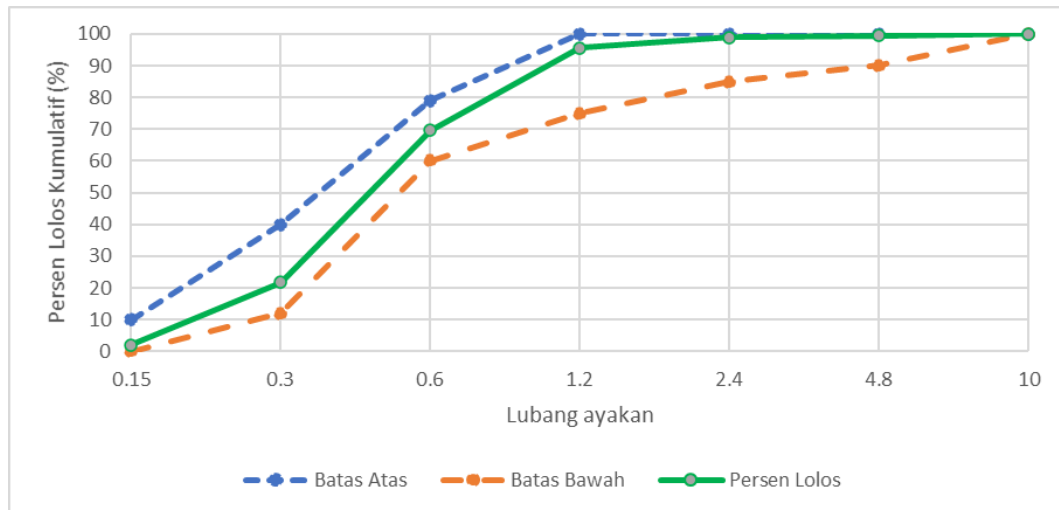
Selain itu, pengujian analisa saringan juga digunakan untuk menentukan gradasi agregat halus yang digunakan. Adapun penentuan gradasi tersebut berdasarkan Tabel 5.4 sebagai berikut.

Tabel 5. 4 Gradasi Agregat Halus

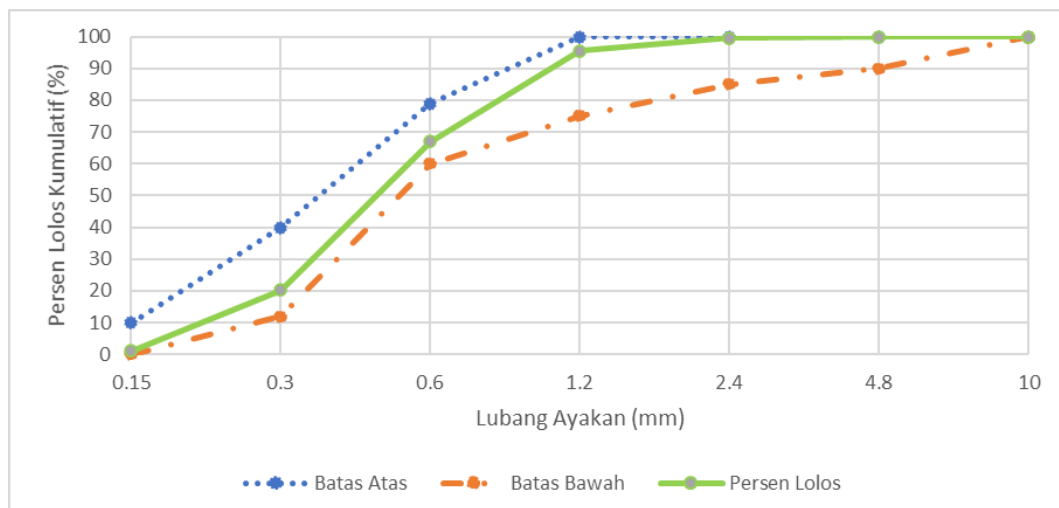
Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
>10	100	100	100	100
4,8	90 - 100	90 - 100	90 - 100	95 - 100
2,4	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100
1,2	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100
0,6	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100
0,3	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50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

Sumber: SNI 2834 (2000)

Dari Tabel 5.4 diatas, kemudian dibuat kurva gradasi agregat halus yang dapat dilihat pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.2 sebagai berikut



Gambar 5. 1 Gradasi Agregat Halus Sampel 1



Gambar 5. 2 Gradasi Agregat Halus Sampel 2

Berdasarkan hasil dari pengujian tersebut dijadikan pedoman dalam menentukan daerah gradasi agregat halus, Hasil pengujian Analisa saringan agregat halus masuk ke dalam gradasi daerah III.

5.1.3 Berat Volume

Pengujian berat volume gembur dan padat agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 4804-1998. Data pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6. Adapun perhitungan berat volume gembur dan padat agregat halus sampel 1 menggunakan rumus persamaan (3.9), (3.10) dan (3.11) dan mendapatkan hasil perhitungan di bawah.

1. Berat Volume Gembur

$$\begin{aligned} \text{Berat Agregat (W3)} &= 18996 - 11009 \\ &= 7987 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume Tabung (V)} &= 0,25 \times \pi \times 14,95^2 \times 30,1 \\ &= 5283,7074 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Volume Gembur} &= \frac{7987}{5283,7072} \\ &= 1,5116 \text{ gram} \end{aligned}$$

2. Berat Volume Padat

$$\begin{aligned} \text{Berat Agregat (W3)} &= 19889 - 11009 \\ &= 8880 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume Tabung (V)} &= 0,25 \times \pi \times 14,9500 \times 30,11 \\ &= 5285,4628 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Volume Padat} &= \frac{8880}{5285,4628} \\ &= 1,6801 \end{aligned}$$

Perhitungan yang sama juga dilakukan pada sampel 2, sehingga diperoleh rekapitulasi hasil pengujian berat volume gembur dan padat agregat halus yang dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 sebagai berikut.

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Halus Sampel 1

Uraian	Hasil Pengujian		Rata-rata	Satuan
	Sampel 1	Sampel 2		
Berat Tabung (W1)	11009	10764	10886,5	gram
Berat Tabung + Agregat SSD (W2)	18996	18503	19770	gram
Berat Agregat (W3)	7987	7739	8883,5	gram
Diameter Tabung (d)	14,95	14,95	14,95	cm
Tinggi Tabung (t)	30,1	30,1	30,11	cm
Volume Tabung (V)	5283,7074	5283,7074	5285,4628	cm ³
Berat Volume Gembur	1,5116	1,4647	1,6807	gram/cm ³

Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Halus Sampel 2

Uraian	Hasil Pengujian		Rata - rata	Satuan
	Sampel 1	Sampel 2		
Berat Tabung (W1)	11009	10764	10886.5	gram
Berat Tabung + Agregat SSD (W2)	19889	19651	18749,5	gram
Berat Agregat (W3)	8880	8887	7863	gram
Diameter Tabung (d)	14,9500	14,9500	14,95	cm
Tinggi Tabung (t)	30,11	30,11	30,1	cm
Volume Tabung (V)	5285,4628	5285,4628	5283,7074	cm ³
Berat Volume Padat	1,6801	1,6814	1,4881	gram/cm ³

Dari Tabel 5.5 dan 5.6 didapatkan hasil berat volume agregat halus dalam kondisi gembur rata-rata 1,4881 gr/cm³ dengan nilai rata-rata berat volume padat agregat halus sebesar 1,5844 gr/cm³. Menurut ASTM C33 (2003), persyaratan berat isi gembur dan padat agregat halus adalah lebih dari 1,12 kg/dm³. Sehingga, berdasarkan hasil pengujian yang telah diketahui bahwa agregat halus yang digunakan sudah memenuhi persyaratan. Dari hasil yang diperoleh didapatkan selisih antara berat volume gembur dan berat volume padat sebesar 0,1926 gr/cm³. Berat volume berguna untuk mempermudah perhitungan campuran beton jika dilakukan penimbangan agregat dengan ukuran volume dan bisa digunakan sebagai

perhitungan saat pembelian material. Semakin kecil selisih berat volume padat dan volume gembur yang didapat, berarti semakin baik gradasi agregat tersebut.

5.1.4 Kadar Lumpur

Pengujian Lolos Saringan No. 200 (Uji Kadar Lumpur dalam pasir) Pengujian lolos saringan no. 200 atau pengujian kadar lumpur agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 4142-1996. Rumus perhitungan yang digunakan menggunakan acuan yang ada pada landasan teori BAB III di atas. Adapun data pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.7. Sedangkan, perhitungan kadar lumpur dalam agregat halus sampel 1 menggunakan rumus persamaan (3.15) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Kadar lumpur dalam pasir} &= \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \% \\ &= \frac{500 - 490}{500} \times 100 \% \\ &= 2,00 \% \end{aligned}$$

Tabel 5. 7 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengujian		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Cawan (W1), gram	500	500	500
Berat Pasir kering mutlak (W2), gram	490	491	490,5
Berat yang lolos ayakan no.200 [(W1-W2)/W1] x 100	2,00%	1,80%	1,90%

Dari Tabel 5.7 di atas, terdapat kandungan lumpur sebesar 1,90%. Menurut Menurut ASTM C-33 (2003) untuk syarat pasir yang dapat digunakan sebagai bahan bangunan memiliki kadar lumpur kurang dari 5%. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa pasir yang akan digunakan bisa dipakai atau memenuhi syarat.

5.2 Pengujian Agregat Kasar

5.2.1 Berat Jenis dan Penyerapan Air

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Asli Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar asli dilakukan berdasarkan SNI 1969-1990. Adapun data pengujian agregat kasar asli dapat dilihat pada Tabel 5.8. Sedangkan,

perhitungan berat jenis dan penyerapan air agregat kasar asli sampel 1 menggunakan rumus persamaan (3.16), (3.17), (3.18) dan (3.19) dan mendapatkan hasil berikut di bawah ini adalah.

$$\begin{aligned} \text{Berat Jenis Curah} &= \frac{498}{(500-2,577)} \\ &= 2,567 \\ \text{Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (SSD)} & \\ \text{Berat SSD} &= \frac{500}{(500-2,577)} \\ &= 2,596 \\ \text{Berat Jenis Semu} &= \frac{4870}{(4970-3074)} \\ \text{Penyerapan Air} &= \frac{500-4970}{(4970)} \times 100\% \\ &= 0,60\% \end{aligned}$$

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

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Jenis Curah	2,580	2,556	2,5681
Berat Jenis Kering Permukaan	2,596	2,577	2,5867
Berat Jenis Semu	2,621	2,612	2,6168
Penyerapan Air %	0,60	0,85	0,0073

Pada tabel diatas menunjukkan hasil analisis pengujian berat jenis dan penyerapan pada agregat kasar, berat jenis agregat kasar asli dalam keadaan jenuh kering permukaan (saturated surface dry) rata-rata adalah sebesar 2,5867. Menurut SK.SNI.T-15-1990:1 (1990), berat jenis kering permukaan agregat normal berada pada rentang 2,5 – 2,7. Berdasarkan hasil pengujian juga diperoleh penyerapan aor agregat kasar asli rata-rata sebesar 0,0073%. berat jenis semu didapatkan nila 2,6168 berdasarkan hasil pengujian penyerapan air dipatakan nilai sebesar 2,6168%. Menurut SNI No. 1737-1989-F (1989), persyaratan penyerapan air agregat adalah $\leq 3\%$. Oleh karena itu, agregat kasar asli yang digunakan penelitian ini adalah agregat normal.

5.2.2 Pengujian Analisa Saringan Agregat kasar

Pengujian analisa saringan agregat kasar dilakukan berdasarkan SNI 1968-1990. Pengujian ini dilakukan menggunakan sampel kerikil dengan berat 5000 gram. Untuk mengklasifikasikan agregat kasar berdasarkan kekasaran butirnya maka diperlukan pengujian Analisa saringan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan saringan berukuran 40 mm; 20 mm; 10 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm dan pan. Dalam pengujian ini memakai rumus perhitungan yang ada pada landasan teori BAB III dan diperoleh data berat tertinggal pada masing-masing nomor saringan. Adapun data tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.9 dan Tabel 5.10. Sedangkan, perhitungan analisa saringan agregat menggunakan rumus persamaan (3.20), (3.21), dan (3.22) sebagai berikut.

1. Persentase Berat Tertinggal

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 40 mm} &= \frac{0}{5000} \times 100 \% \\ &= 0 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 20 mm} &= \frac{16}{5000} \times 100 \% \\ &= 0,32 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 10 mm} &= \frac{3707}{5000} \times 100 \% \\ &= 74,14 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 4,8 mm} &= \frac{1151}{5000} \times 100 \% \\ &= 23,02 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 2,4 mm} &= \frac{23}{5000} \times 100 \% \\ &= 0,46 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 1,2 mm} &= \frac{6}{5000} \times 100 \% \\ &= 0,12 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pan} &= \frac{97}{5000} \times 100 \% \\ &= 1,94 \% \end{aligned}$$

2. Persetase Berat Tertinggal Kumulatif

$$\text{Lubang ayakan 40 mm} = 0 \%$$

Lubang ayakan 20 mm	= 0,32% + 0%
	= 0,32
Lubang ayakan 10 mm	= 74,14% + 0,32%
	= 74,46 %
Lubang ayakan 4,8 mm	= 23,02% + 74,14%
	= 97,48 %
Lubang ayakan 2,4 mm	= 0,46% + 97,48%
	= 97,94 %
Lubang ayakan 1,2 mm	= 0,12% + 97,94%
	= 98,06 %
Pan	= 1,94% + 98,06%
	= 100 %
3. Persentase Lolos Kumulatif	
Lubang ayakan 40 mm	= 100% - 0%
	= 100%
Lubang ayakan 20 mm	= 100% - 0,32%
	= 99,68%
Lubang ayakan 10 mm	= 100% - 74,46%
	= 25,54%
Lubang ayakan 4,8 mm	= 100% - 97,94%
	= 2,52%
Lubang ayakan 2,4 mm	= 100% - 97,94%
	= 2,06%
Lubang ayakan 1,2 mm	= 100 % - 98,06%
	= 1,94%
Pan	= 100% - 100%
	= 100%

Selanjutnya langkah-langkah perhitungan yang sama juga dilakukan untuk analisa saringan agregat kasar asli sampel 2. Rekapitulasi hasil perhitungan analisa saringan agregat kasar asli sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Tabel 5.9 dan Tabel 5.10 sebagai berikut.

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

Ukuran ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	16	0,32	0,32	99,68
10,00	3707	74,14	74,46	25,54
4,80	1151	23,02	97,48	2,52
2,40	23	0,46	97,94	2,06
1,20	6	0,12	98,06	1,94
0,60	0	0	98,06	1,94
0,30	0	0	98,06	1,94
0,15	0	0	98,06	1,94
Sisa	97	1,94	100	0,00
Jumlah	5000	100	662,44	

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

Ukuran ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	82	1,64	1,64	98,36
10,00	3659	73,18	74,82	25,18
4,80	1132	22,64	97,46	2,54
2,40	18	0,36	97,82	2,18
1,20	7	0,14	97,96	2,04
0,60	0	0	97,96	2,04
0,30	0	0	97,96	2,04
0,15	0	0	97,96	2,04
Sisa	102	2,04	100	0,00
Jumlah	5000	100	663,58	

Berdasarkan Tabel 5.9 dan 5.10, maka bisa dihitung nilai modulus halus butir menggunakan rumus persamaan (3.23) sebagai berikut :

$$\text{MHB sampel 1} = \frac{662,44}{100} = 6,6244$$

$$\begin{aligned} \text{MHB sampel 2} &= \frac{663,58}{100} = 6,6358 \\ \text{MHB rata - rata} &= \frac{6,6244+6,6358}{2} \\ &= 6,6301 \end{aligned}$$

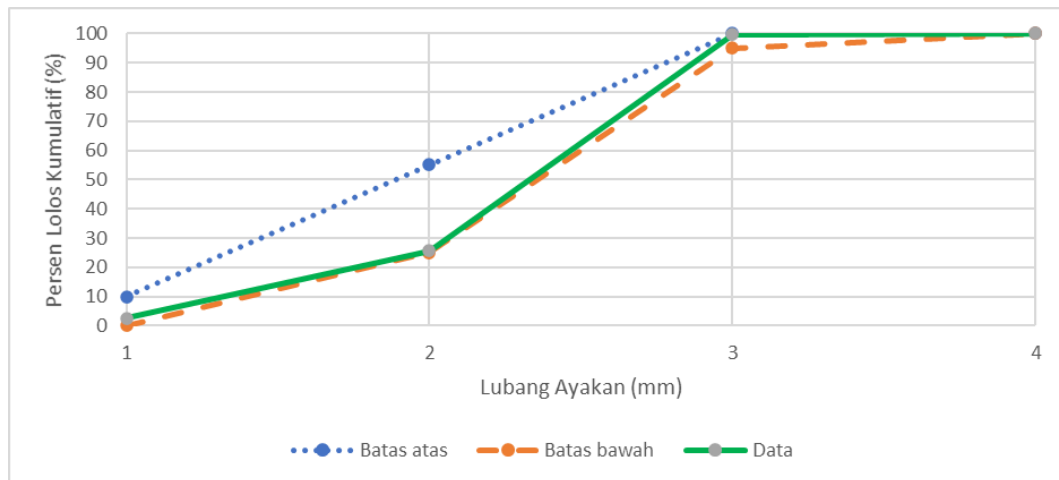
Dari hasil perhitungan di atas didapatkan modulus halus butir agregat kasar rata-rata sebesar 6,6301%. Menurut SK SNI S-04-1989-F, nilai modulus halus butir agregat kasar berada pada rentang 5 – 8, sehingga, nilai modulus halus butir agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini telah memenuhi persyaratan tersebut. Selain itu, pengujian analisa saringan juga digunakan untuk menentukan gradasi agregat agregat kasar asli yang digunakan. Adapun penentuan gradasi tersebut berdasarkan Tabel 5.11 sebagai berikut.

Tabel 5. 11 Gradasi Agregat Kasar

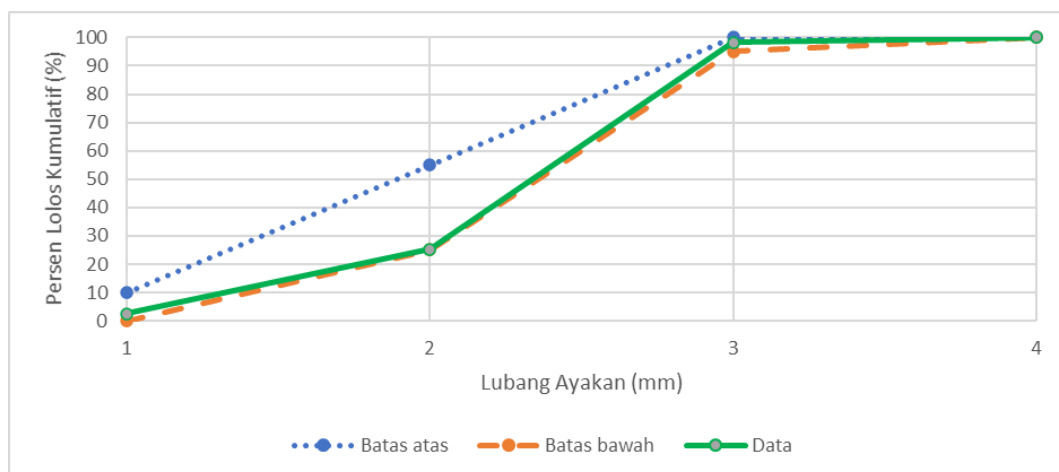
Lubang ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang lolos Ayakan/Besar	
	Butiran Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95-100	100
20	30-70	95-100
10	10-35	25-55
4,8	0-5	0-10

Sumber. SNI 2834 (2000)

Dari tabel 5.11 diatas, dibuatlah kurva gradasi agregat kasar yang dapat di lihat di gambar 5.3 dan gambar 5.4 dibawah ini.



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



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

Berdasarkan Gambar 5.3 dan Gambar 5.4 diatas, maka dapat diketahui bahwa agregat kasar asli yang digunakan memiliki ukuran maksimum 20 mm dan sesuai dengan persyaratan gradasi ukuran maksimum 20 mm.

5.2.3 Berat Volume

Pengujian berat volume gembur dan padat agregat kasar asli dilakukan berdasarkan SNI 4804-1998. Adapun data pengujian berat volume gembur dan padat agregat kasar asli dapat dilihat pada Tabel 5.12 dan Tabel 5.13. Sedangkan, perhitungan berat volume gembur dan padat agregat kasar asli sampel 1

menggunakan rumus persamaan (3.24), (3.25), (3.26), (3.27), (3.28) dan (3.29) sebagai berikut.

1. Berat Volume Gembur

$$\begin{aligned}\text{Berat Agregat (W3)} &= 18378 - 11191 \\ &= 7187\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume Tabung} &= 0,25 \times \pi \times 14,95^2 \times 30,11 \\ &= 5285,4628\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat Volume Gembur} &= \frac{7187}{5285,4628} \\ &= 1,3598\end{aligned}$$

2. Berat Volume Padat

$$\begin{aligned}\text{Berat Agregat (W3)} &= 19254 - 11191 \\ &= 8063\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volume Tabung} &= 0,25 \times \pi \times 14,95^2 \times 30,11 \\ &= 5285,4628\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat Volume Padat} &= \frac{8063}{5285,4628} \\ &= 1,5255\end{aligned}$$

Selanjutnya langkah-langkah perhitungan yang sama dilakukan untuk menghitung berat volume gembur dan padat agregat kasar asli sampel 2. Adapun rekapitulasi hasil pengujian berat volume gembur dan padat agregat kasar asli dapat dilihat pada Tabel 5.12 dan Tabel 5.13 sebagai berikut.

Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		Rata-rata	Satuan
	Sampel 1	Sampel 2		
Berat tabung (W1), gram	11191	10693	10942	gr
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gram	18378	17836	18107	gr

Lanjutan Tabel 5. 12 Hasil Pengujian Berat Volume Gembur Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		Rata-rata	Satuan
	Sampel 1	Sampel 2		
Berat Agregat, (W3) gram	7187	7143	7165	gr
Volume Tabung (V)	5285,4628	5285,4628	5285,46	cm ³
Berat Volume Gembur = W3 / V, gram/m ³	1,3598	1,3514	1,3556	gr/cm ³

Tabel 5. 13 Hasil Pengujian Berat Volume Padat Agregat Kasar

Uraian	Hasil Pengamatan		Rata-rata	Satuan
	Sampel 1	Sampel 2		
Berat tabung (W1), gram	11191	10693	10942	gr
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gram	19254	18891	19072,5	gr
Berat Agregat, (W3) gram	8063	8198	8130,5	gr
Volume Tabung (V)	5285,4628	5285,4628	5285,4628	cm ³
Berat Volume Padat = W3 / V, gram/m ³	1,5255	1,5510	1,5382	gr/cm ³

Berdasarkan Tabel 5.12 dan Tabel 5.13 didapatkan nilai berat volume agregat kasar dalam kondisi gembur 1,3556 gr/cm³ . Sedangkan, nilai rata-rata berat

volume padat agregat kasar asli adalah sebesar $1,5382 \text{ gr/cm}^3$ Menurut ASTM C33 (2003), persyaratan berat isi gembur dan padat agregat kasar adalah lebih dari $1,12 \text{ kg/dm}^3$. Sehingga, agregat kasar asli yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan.

5.2.4 Pengujian Abu Terbang

Pengujian abu terbang dilakukan dengan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* yang berguna untuk mengetahui kandungan komposisi zat kimia yang terkandung pada abu terbang, Pengujian ini bertujuan untuk menentukan tipe kelas abu terbang. Pengujian ini dilakukan di laboratorium Balai Konservasi Borobudur. Pengujian dilakukan 3 kali lalu diambil nilai rata-rata. Hasil dari pengujian kandungan abu terbang dapat dilihat pada tabel 5.14 berikut ini,

Tabel 5. 14 Hasil Uji X-Ray Fluorescence

Kimia	Hasil Analisis % Rata -rata
SiO ₂	25,732 %
Al ₂ O ₃	8,499 %
Fe ₂ O ₃	28,934 %
CaO	22,498 %
K ₂ O	1,429 %
P ₂ O ₅	0,561 %
TiO ₂	1,186 %

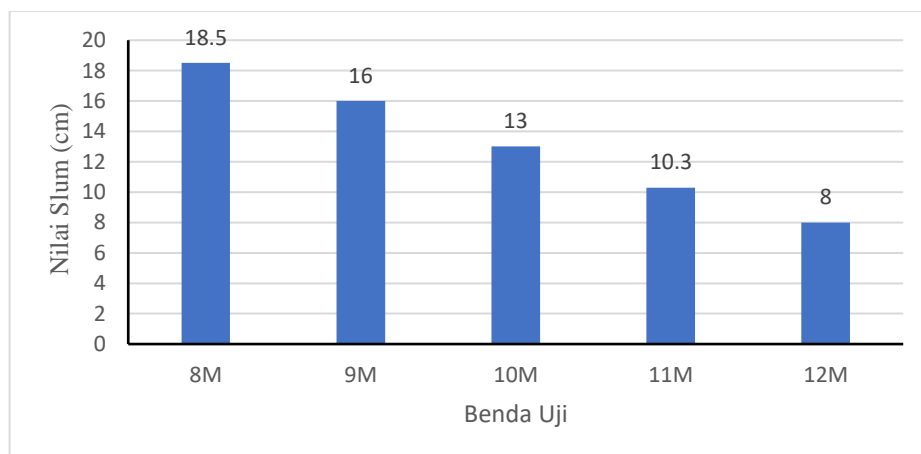
Berdasarkan hasil dari pengujian yang dilakukan *fly ash* mengandung SiO₂ sebanyak 25,732 %, Al₂O₃ sebanyak 8,499 %, FeO₃ sebanyak 28,934 %, dan CaO sebanyak 22,498 %, dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa *fly ash* termasuk ke dalam golongan kelas C karena mengandung SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ sebanyak $63,165 < 70 \%$, dan CaO $22,498 \% > 10 \%$ menurut ASTM C618 *fly ash* PLTU Kanci Cirebon yang digunakan pada penelitian ini termasuk pada kelas *fly ash* C

5.3 Pengujian Slump

Slump adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui tingkat kemudahan dalam pekerjaan pengecoran dari campuran beton segar. pada penelitian yang dilakukan tidak ada nilai *slump* rencana. Beton segar mempunyai tingkat kekentalan yang berbeda tergantung dengan *mix design* yang digunakan., pada penelitian ini tingkat kekentalan beton segar dipengaruhi oleh jumlah Na_2SiO_3 yang diguakan, Hasil dari pengujain slump di beberapa variasi molaritas pada pengujian saat ini dapat dilihat di Tabel 5.15 di bawah ini.

Tabel 5. 15 Hasil Pengujian Nilai Slump

No.	Benda Uji	<i>Slump</i> (cm)
1.	8 M	18.5
2.	9 M	16
3.	10 M	13
4.	11 M	10.3
5.	12 M	8



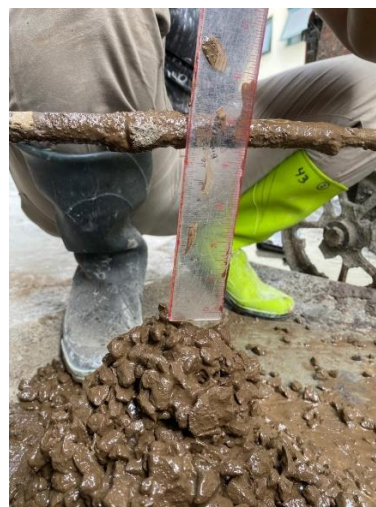
Gambar 5. 5 Hubungan Nilai Slump dengan Perbandingan Molaritas

Berdasarkan Tabel 5.15 dan Gambar 5.5 hasil dari pengujian nilai *slump*, dapat disimpulkan bahwa beton geopolymer dengan variasi molaritas 8M, 9M dan 10M mempunyai tingkat *workability* yang rendah berdasarkan angka hasil pengujian dengan teori. Perubahan nilai *slump* akan semakin kecil seiring dengan

penambahan molaritas dalam komposisi beton geopolimer. Namun apabila dilihat dari kondisi di lapangan, beton geopolimer sangat cepat mengeras apabila tidak segera di tuangkan kedalam cetakan beton. Menurut Setiawati dkk (2022), Semakin besar molaritas, maka semakin pekat larutannya dan semakin banyak larutan Na_2SiO_3 dan NaOH yang digunakan maka menghasilkan larutan alkali aktivator yang sangat kental, lengket dan memiliki daya ikat yang kuat. Adapaun hasil pengujian slump yang dilakukan dilapangan dapat dilihat di Gambar 5.6 dengan sampel 8M dan Gambar 5.7 dengan sampel 12M berikut ini.



Gambar 5.6 Pengujian Slump Sampel 8M



Gambar 5.7 Pengujian Slump Sampel 12M

5.4 Kuat Tekan

Pada pengujian ini sampel beton geopolier di uji pada umur beton 28 hari pada setiap variasi. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan didapatkan variasi yang memiliki komposisi yang baik dan mempunyai kuat tekan yang maksimal. Adapun proses pengujian kuat tekan yang dilakukan pada beton geopolimer dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



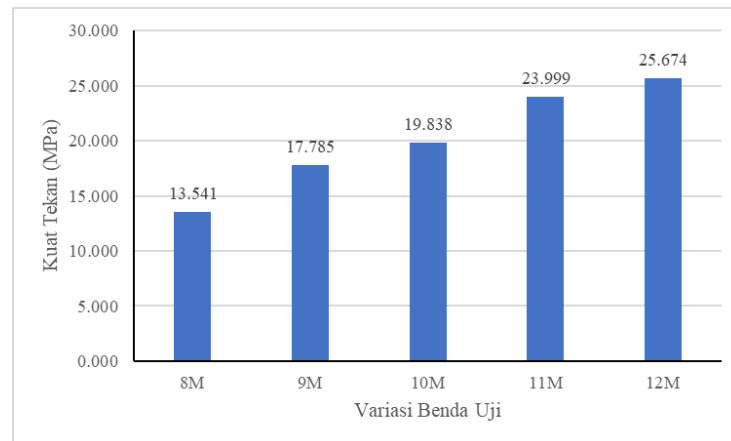
Gambar 5.8 Pengujian Kuat Tekan

5.4.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer

Pada penelitian ini pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur beton 28 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Benda uji yang diujikan berjumlah 25. Sebelum pengujian berlangsung, terlebih dahulu benda uji diberikan lapisan capping dibagian atas permukaannya. Maksud dari pemberian lapisan capping ini adalah untuk memberikan lapisan perata bagi permukaan tekan benda uji. Bahan yang digunakan untuk lapisan capping ini adalah belerang (sulfur). Pengujian kuat tekan beton dilakukan sampai benda uji hancur yang artinya benda uji tersebut tidak lagi mampu untuk menahan beban yang diberikan mesin uji. Kondisi tersebut ditandai dengan jarum pada dial pembebanan yang turun sampai beban sama dengan nol.

Tabel 5. 16 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer

No.	Benda Uji	Umur	F'c	Rata-rata (MPa)
			(MPa)	
1.	TM1 8M	28	13.559	13.541
2.	TM2 8M		13.527	
3.	TM3 8M		13.553	
4.	TM4 8M		13.507	
5.	TM5 8M		13.559	
1.	TM1 9M	28	17.635	17.785
2.	TM2 9M		16.959	
3.	TM3 9M		18.197	
4.	TM4 9M		18.028	
5.	TM5 9M		18.108	
1.	TM1 10M	28	19.806	19.838
2.	TM2 10M		19.162	
3.	TM3 10M		20.073	
4.	TM4 10M		19.806	
5.	TM5 10M		20.345	
1.	TM1 11M	28	23.874	23.999
2.	TM2 11M		23.569	
3.	TM3 11M		24.185	
4.	TM4 11M		23.569	
5.	TM5 11M		24.799	
1.	TM1 12M	28	26.116	25.674
2.	TM2 12M		25.770	
3.	TM3 12M		25.837	
4.	TM4 12M		25.493	
5.	TM1 12M		25.156	



Gambar 5. 9 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer Dengan Variasi Molaritas

Gambar 5.9 perbandingan kuat tekan beton dengan variasi molaritas

Berdasarkan Tabel 5.16 dan Gambar 5.9 Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan hasil dari pengujian kuat tekan beton variasi molaritas 8M sampai dengan 12M mengalami kenaikan, dari mulai variasi 8 M mendapatkan rata – rata kuat tekekan sebesar 13.541 Mpa . Variasi 9M mendapatkan kuat tekan rata – rata sebesar 17.785 Mpa . Variasi 10 M mendapatkan hasil kuat tekan rata – rata sebesar 19.838 Mpa . Variasi 11 M mendapatkan kuat tekan rata – rata sebesar 23.999 Mpa dan kuat tekan tertinggi pada variasi 12M dendapatkan hasil rata- rata sebesar 25.674 Mpa. Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer memperlihatkan peningkatan kuat tekan beton pada tiap variasi molaritasnya, pada variasi 8 M berkisar 23.86 %, pada variasi 9 M berkisar 10,35%, pada variasi 10 M berkisar 17,34 %, pada 11 M berkisar 6,52 %. Peningkatan kekuatan dari 8 M sampai 12 M disebabkan oleh ion Na^+ dan cukupnya ion OH^- yang disuplai dari material sumber untuk berikatan dengan larutan alkali. Konsentrasi NaOH yang tinggi mengandung kandungan ion Na^+ yang cukup yang membuat komposisi *fly ash* menjadi seragam, sehingga meningkatkan kuat tekan (Ibrahim, dkk 2022). Hasil ini sesuai dengan penelitian Ridwan (2018), semakin tinggi molaritas yang digunakan maka kuat tekan akan semakin tinggi.

5.5 Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas beton adalah tingkat kemampuan beton dalam meregang pada saat diberi tekanan atau di beri beban. Pengujian modulus elastisitas beton pada penelitian ini dilakukan pada umur beton 28 hari. Pengujian modulus elastisitas beton geopolimer ini dilakukan di semua perbandingan molaritas yang digunakan yaitu molaritas 8 M, 9 M, 10 M, 11 M, 12 M. Data yang di dapat dari hasil pengujian modulus elastisitas beton merupakan nilai tegangan dan regangan aksial yang selanjutnya diolah menggunakan program *Microsoft Excel* untuk dijadikan grafik yang dinamis. Berikut ini adalah Gambar 5.10 proses pengujian modulus elastisitas dan data hasil pengujian modulus elastisitas beton yang sudah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut ini.



Gambar 5.10 Pengujian Modulus Elastisitas Beton Geopolimer

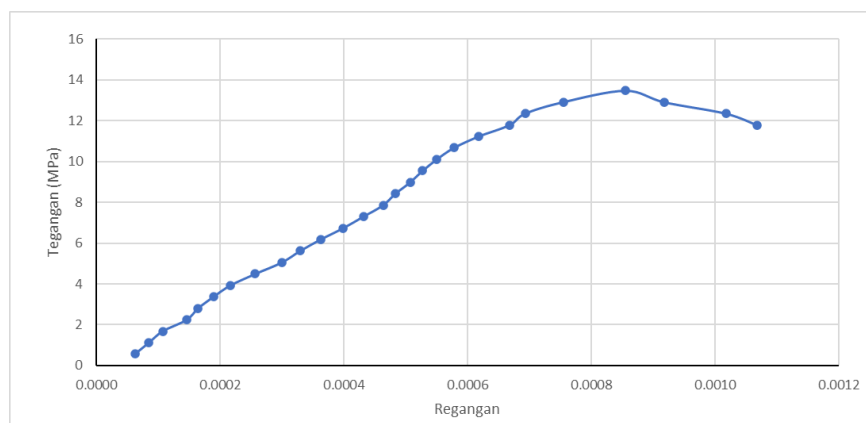
Tabel 5.17 Hasil Pengujian Modulus elastisitas Beton Geopolimer

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	18,9	0,0095	0,0000473	0,5614	0,0000625
20	20000	28	0,0140	0,0000700	1,1228	0,0000853
30	30000	36,9	0,0185	0,0000923	1,6842	0,0001075
40	40000	52,4	0,0262	0,0001310	2,2455	0,0001463
50	50000	59,8	0,0299	0,0001495	2,8069	0,0001648
60	60000	69,7	0,0349	0,0001743	3,3683	0,0001895
70	70000	80,7	0,0404	0,0002018	3,9297	0,0002170
80	80000	96,7	0,0484	0,0002418	4,4911	0,0002570
90	90000	113,9	0,0570	0,0002848	5,0525	0,0003000
100	100000	125,7	0,0629	0,0003143	5,6138	0,0003295

Lanjutan Tabel 5. 17 Hasil Pengujian Modulus elastisitas Beton Geopolimer

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
110	110000	138,9	0,0695	0,0003473	6,1752	0,0003625
120	120000	153,6	0,0768	0,0003840	6,7366	0,0003993
130	130000	166,6	0,0833	0,0004165	7,2980	0,0004318
140	140000	179,4	0,0897	0,0004485	7,8594	0,0004638
150	150000	187,3	0,0937	0,0004683	8,4208	0,0004835
160	160000	196,9	0,0985	0,0004923	8,9821	0,0005075
170	170000	204,9	0,1025	0,0005123	9,5435	0,0005275
180	180000	214,1	0,1071	0,0005353	10,1049	0,0005505
190	190000	225,1	0,1126	0,0005628	10,6663	0,0005780
200	200000	241,1	0,1206	0,0006028	11,2277	0,0006180
210	210000	261,2	0,1306	0,0006530	11,7891	0,0006683
220	220000	271,3	0,1357	0,0006783	12,3505	0,0006935
230	230000	295,8	0,1479	0,0007395	12,9118	0,0007548
240	240000	336,1	0,1681	0,0008403	13,4732	0,0008555
230	230000	361,1	0,1806	0,0009028	12,9118	0,0009180
220	220000	401	0,2005	0,0010025	12,3505	0,0010178
210	210000	421	0,2105	0,0010525	11,7891	0,0010678

Nilai dari pengujian modulus elastisitas beton didapat dari pengolahan data tegangan – regangan pada Tabel 5.17. Data pada Tabel 5.17 di atas, dapat dibuat grafik hubungan tegangan dan regangan sebagai berikut.



Gambar 5. 11 Kurva Tegangan Regangan Beton Geopolimer

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.11 dan data pada Tabel 5.17 di atas, dilakukan perhitungan koreksi regangan dengan bantuan program *AutoCad*. Selanjutnya, dapat dilakukan perhitungan modulus elastisitas menggunakan Persamaan 3.31 (menurut ASTM C-469-94) sebagai berikut.

$$S_2 = 5,613 \text{ Mpa.}$$

$$S_1 = 0,893 \text{ MPa.}$$

$$\varepsilon_2 = 0,0003295 \text{ MPa (terkoreksi)}$$

$$\varepsilon_1 = 0,00005.$$

$$E = \frac{5,613 - 0,893}{0,0003295 - 0,00005} = 16969,856 \text{ MPa}$$

Dengan Persamaan 3.31 tersebut atau menurut cara perhitungan modulus elastisitas berdasarkan ASTM C-469-94, didapatkan hasil nilai modulus elastisitas untuk beton sampel TM2 8M senilai 16969,856 MPa. Selanjutnya dilakukan pula perhitungan modulus elastisitas untuk benda uji lainnya. Rekapitulasi hasil perhitungan modulus elastisitas berdasarkan ASTM C-469-94 dapat dilihat pada Analisis Modulus Elastisitas Beton Geopimer:

Tabel 5. 18 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton ASTM C-469-94

Tipe Benda Uji	E_c (MPa)	E_c rerata (MPa)
TM1 8M	16432,624	16819,512
TM2 8M	16969,856	
TM3 8M	16857,646	
TM4 8M	16788,247	
TM5 8M	17049,185	
TM1 9M	21116,328	21294,042
TM2 9M	18547,621	
TM3 9M	21080,118	
TM4 9M	22291,607	
TM5 9M	23434,537	
TM1 10M	22282,975	22249,656
TM2 10M	21261,380	
TM3 10M	23058,513	
TM4 10M	22705,327	
TM5 10M	21940,085	

Lanjutan Tabel 5. 138 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton ASTM C-469-94

Tipe Benda Uji	E_c (MPa)	E_c rerata (MPa)
TM1 11M	29780,080	29967,702
TM2 11M	29322,420	
TM3 11M	30246,690	
TM4 11M	29322,420	
TM5 11M	31702,600	
TM1 12M	38314,970	36674,161
TM2 12M	38175,870	
TM3 12M	37039,336	
TM4 12M	35128,708	
TM1 12M	34711,921	

Selain dengan menggunakan Persamaan 3.31 nilai modulus elastisitas juga dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.32 yang mengacu pada SNI-2847-2019. Contoh perhitungan modulus elastisitas menurut SNI-2847-2019 menggunakan benda uji 8M dapat dilihat sebagai berikut.

$$\text{Kuat tekan maksimum} = 13,473 \text{ Mpa}$$

$$E_2 = 4700 \sqrt{13,473} = 17251,766 \text{ Mpa}$$

Hasil perhitungan keseluruhan untuk perhitungan modulus elastisitas menurut SNI-2847-2019 dapat dilihat pada Tabel 5.19

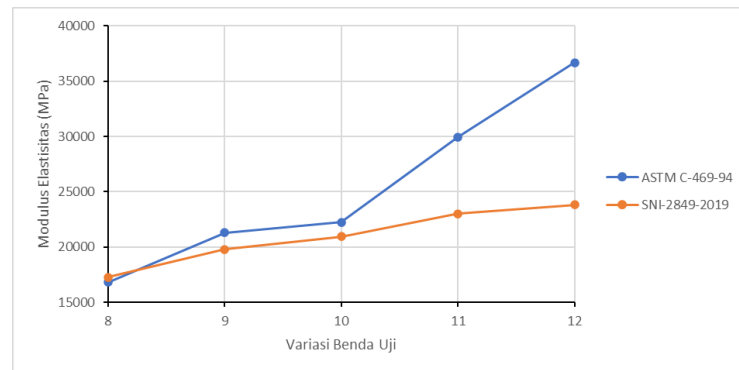
Tabel 5.19 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton SNI-2847-2019

Tipe Benda Uji	$\sqrt{f'_c}$	$4700 \sqrt{f'_c}$	
		E_c (MPa)	Rerata (MPa)
TM1 8M	13.559	17294.256	17292.652
TM2 8M	13.527	17286.201	
TM3 8M	13.553	17303.009	
TM4 8M	13.507	17273.214	
TM5 8M	13.559	17306.582	
TM1 9M	17.635	19737.144	19819.572
TM2 9M	16.959	19355.135	
TM3 9M	18.197	20049.316	
TM4 9M	18.028	19955.960	
TM5 9M	18.108	20000.306	

Lanjutan Tabel 5.19 Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton SNI-2847-2019

Tipe Benda Uji	$\sqrt{f'_c}$	$4700 \sqrt{f'_c}$	
		Ec (MPa)	Rerata (MPa)
TM1 10M	19.806	21199.481	20960.926
TM2 10M	19.162	20573.922	
TM3 10M	20.073	21057.202	
TM4 10M	19.806	20916.821	
TM5 10M	20,345	21057.202	
TM1 11M	23.874	22964.713	23023.771
TM2 11M	23.569	22817.425	
TM3 11M	24.185	23113.916	
TM4 11M	23.569	22817.425	
TM5 11M	24.799	23405.374	
TM1 12M	26.116	24019.018	23814.405
TM2 12M	25.770	23859.009	
TM3 12M	25.837	23889.984	
TM4 12M	25.493	23730.629	
TM1 12M	25.156	23573.386	

Data perhitungan modulus elastisitas pada Tabel 5.19 di atas menunjukkan modulus elastisitas berdasarkan kuat tekan. Nilai modulus elastisitas berdasarkan kuat tekan mencapai nilai paling tinggi pada variasi 12 M dengan rata-rata 23814,405 MPa. Untuk nilai modulus elastisitas terendah, berdasarkan kuat tekan ada pada variasi 8M dengan nilai 17292,652 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 2 (dua) perhitungan di atas dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut ini.



Gambar 5. 12 Kurva Tegangan-Regangan Variasi molaritas 8M sampai 12M

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.12, perhitungan nilai modulus elastisitas menggunakan metode ASTM C-469-94 menunjukkan hasil yang berbeda dibandingkan dengan metode SNI-2847-2019. Hal ini dikarenakan metode ASTM C-469-94 menggunakan data langsung saat pengujian di laboratorium. Sedangkan metode SNI-2847-2019, data modulus elastisitas diperoleh dari pendekatan nilai kuat tekan dan berat volume beton. Dengan menggunakan metode SNI-2847-2019 dan metode ASTM C-469-94, nilai modulus elastisitas tertinggi didapatkan pada variasi 112M. Nilai modulus elastisitas ini juga dipengaruhi oleh molaritas yang digunakan pada pembuatan beton geopolimer. Semakin tinggi molaritas yang digunakan maka pasta geopolimer dapat mengikat agregat semakin kuat dan nilai modulus elastisitas akan semakin besar. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, maka beton akan semakin daktail dan elastis. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang sudah dilakukan Ridwan (2018), semakin tinggi molaritas yang digunakan maka kuat nilai modulus elastisitas pada beton geopolimer juga semakin tinggi.

5.6 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan saat benda uji berumur 28 hari dan telah melalui masa perawatan dengan cara perendaman dalam air dan pengeringan 1 hari sebelum pengujian. Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan menggunakan alat *Compression Testing Machine* sehingga dapat diperoleh beban maksimum saat beton mengalami kehancuran. Hasil dari pengujian kuat tarik belah beton dapat dihitung seperti berikut ini.

Benda Uji 8M = 86 Kn = 86000 N.

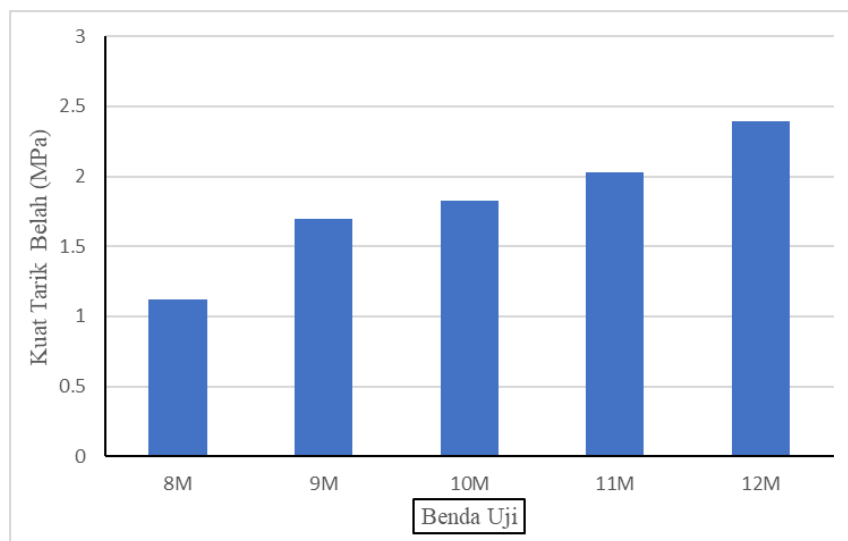
Kuat Tarik belah = $\frac{2 \times 8600}{(\pi \times 300 \times 150)} \times 8600 = 1.216 \text{ Mpa}$

Berdasarkan contoh perhitungan tersebut, maka sampel beton variasi 8M memiliki nilai kuat tarik belah beton sebesar 1,216 MPa.

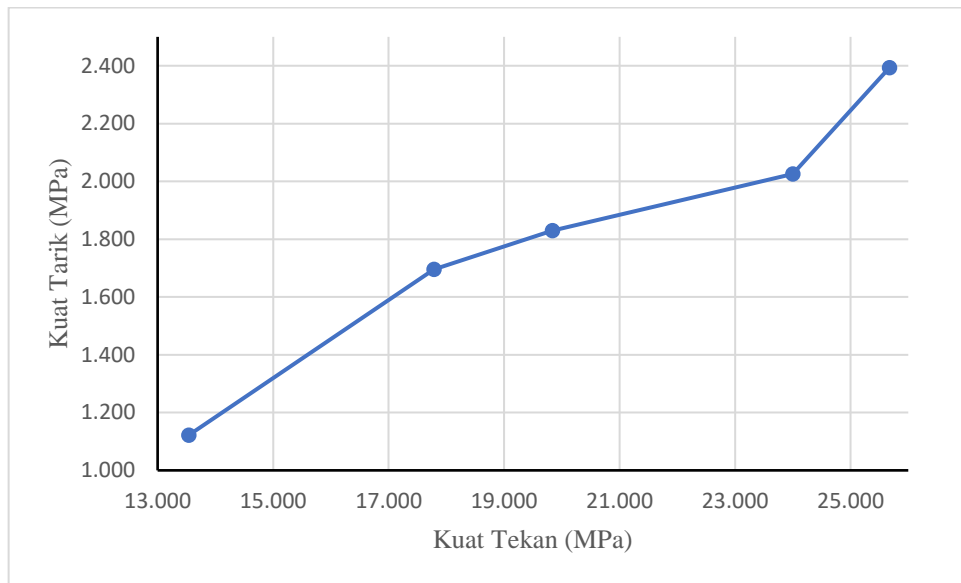
Tabel 5. 20 Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer

No.	Umur benda uji	Benda Uji	Luas panampang (cm ²)	Berat Sampel (kg)	Hasil benda uji (kN)	Kuat Tarik actual (MPa)	Kuat Tarik rata-rata (MPa)
1.	28	TB1 -8M	176,7145	12,70	86	1,2166	1,1221
2.		TB2 -8M	176,7145	12,13	82	1,1600	
3.		TB3 -8M	176,7145	12,34	76	1,0751	
4.		TB4 -8M	176,7145	12,43	72	1,0185	
5.		TB5 -8M	172,0336	12,48	79	1,1403	
1.	28	TB1 -9M	172,0336	12,33	120	1,7321	1,6954
2.		TB2 -9M	174,3662	12,48	119	16948	
3.		TB3 -9M	176,7145	12,74	117	1,6552	
4.		TB4 -9M	176,7145	12,44	116	16410	
5.		TB5 -9M	176,7145	12,51	124	17542	
1.	28	TB1 -10M	176,7145	12,51	128	1,8108	1,8299
2.		TB2 -10M	176,7145	12,55	126	1,7825	
3.		TB3 -10M	176,7145	12,44	127	1,7966	
4.		TB4 -10M	174,3662	12,76	134	1,9084	
5.		TB5 -10M	174,3662	12,43	130	1,8514	
1.	28	TB1 -11M	174,3662	12,38	146	2,0793	2,0251
2.		TB2 -11M	174,36624	12,52	140	2,0072	
3.		TB3 -11M	176,71458	12,73	142	2,0088	
4.		TB4 -11M	172,03361	12,55	139	1,9930	
5.		TB5 -11M	176,71458	12,40	144	2,0371	
1.	28	TB1 -12M	176,71458	12,27	165	2,3342	2,3934
2.		TB2-12M	176,71458	12,48	171	2,4191	
3.		TB3 -12M	176,71458	12,41	168	2,3767	
4.		TB4 -12M	172,03361	12,40	173	2,4888	
5.		TB5 -12M	176,71458	12,46	166	2,3484	

Berdasarkan Tabel 5.20, nilai kuat tarik belah untuk beton paling tinggi mencapai 2,393 MPa dengan variasi 12M, sedangkan untuk nilai kuat tarik belah minimum berada pada variasi 8M dengan nilai 1,122 MPa. Nilai kuat tarik belah beton cenderung konstan dan tidak mengalami perubahan ekstrem, hal ini dikarenakan perbedaan variasi molaritas yang digunakan tidak terlalu jauh berbeda, dan juga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi molaritas yang digunakan maka nilai kuat tarik belah juga semakin tinggi selaras dengan hasil pengujian kuat tekan yang sudah dilakukan. 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 5.13 dan 5.14 berikut



Gambar 5. 13 Grafik Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Dengan Variasi Molaritas 8M sampai 12M



Gambar 5. 14 Grafik Hubungan Kuat Tarik belah dan Kuat tekan Beton Geopolimer

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada bab V, dapat ditarik kesimpulan bahwa variasi molaritas yang digunakan pada pengujian ini menunjukkan peningkatan kuat tekan terjadi seiring dengan bertambahnya kadar molaritas pada campuran beton geopolimer. Kuat tekan paling rendah didapatkan pada komposisi 8M mendapatkan rata – rata kuat tekan sebesar 13.541 Mpa dan kuat tekan tertinggi pada variasi 12M dendapatkan hasil rata- rata sebesar 25.674 Mpa. Nilai modulus elastisitas tertinggi didapat dari komposisi beton 12M dengan nilai rerata sebesar 23346,496 MPa, Nilai modulus elastisitas beton geopolimer dengan komposisi 8M, 9M, 10M dan 11M berturut-urut rata-rata sebesar 17251,766 MPa, 19955,959 Mpa, 20916,821 MPa, 22964,713 MPa. Nilai tertinggi kuat Tarik belah beton geopolimer berada pada variasi 12M dengan rata – rata sebesar 2,393 MPa. Nilai kuat Tarik belah terendah pada variasi molaritas 8M dengan rata -rata sebesar 1,122 MPa, dari pengujian kuat tekan, modulus elastisitas dan kuat tarik belah dengan menggunakan variasi molaritas 8M, 9M, 10M, 11M dan 12M yang sudah dilakukan dapat disimpulkan bahwa, semakin tinggi molaritas yang digunakan pada komposisi beton geopolimer maka data yang dihasilkan mengalami kenaikan, hal disebabkan oleh ion Na⁺ dan cukupnya ion OH⁻ yang disuplai dari material sumber untuk berikatan dengan larutan alkali. Konsentrasi NaOH yang tinggi mengandung kandungan ion Na⁺ yang cukup yang membuat komposisi *fly ash* menjadi seragam, sehingga meningkatkan sifat mekanik beton.

6.2 Saran

Berdasarkan proses pelaksanaan dan hasil penelitian terdapat beberapa hal yang dapat menjadi saran sebagai pertimbangan untuk penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik beton geopolimer dengan memanfaatkan limbah fly ash dari PLTU Kanci Cirebon, antara lain sebagai berikut ini.

1. Membuat larutan NaOH 8 M – 12 M menghasilkan panas yang cukup tinggi dan bau yang menyengat di pernafasan, panas yang dihasilkan menyebabkan kesulitan dalam pelarutan NaOH sehingga diperlukan wadah besi untuk melarutkannya, pada penelitian ini saya menggunakan wadah plastik dan ternyata leleh sehingga proses pelarutan NaOH gagal. Bau yang menyengat dari hasil pelarutan yang di hasilkan oleh NaOH mengakibatkan sesak pernafasan sehingga harus di larutkan di tempat yang terbuka.
2. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan merubah presentase perbandingan komposisi molaritas di atas 12 M dan seterusnya, Komposisi w/fa juga dapat ditingkatkan hingga 0,5 atau lebih,
3. Beton segar memiliki karakteristik cepat mengeras, sehingga perlu diadakan penelitian mengenai penggunaan bahan tambah SuperPlastisizer sebagai pengencer guna mningkatkan workability beton segar.
4. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai tingkat kekerasan beton menggunakan alat PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive digital Indicatenig Test) untuk mengetahui perbedaan tingkat kekerasan pada setiap kombinasi serta hubungannya dengan kuat tekan yang dihasilkan.
5. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai teknik perawatan (curing) beton bedasarkan pengaruh suhu hingga pengaruh pembakaran suhu tinggi, karena pada saat pengangkatan beton setelah perendaman 28 hari masih ada cairan alkali aktifator yang keluar dari rongga kecil beton dan menandakan bahwa proses setting time beton kurang maksimal.
6. Fly ash sebagai bahan limbah memungkinkan untuk didapat secara bebas biaya, namun tidak demikian dengan NaOH, dan Na_2SiO_3 , Bahan NaOH, dan Na_2SiO_3 merupakan bahan yang dijual bebas pada toko kimia dengan

harga yang tidak murah, sehingga perlu diadakan penelitian dengan meninjau biaya yang dikeluarkan selama proses produksi

7. Sebelum melakukan pengujian dengan *fly ash* yang akan di gunakan sebaiknya di uji kadar kandungan kimia yang ada pada *fly ash* tersebut agar tau terlebih dahulu kelas *fly ash* dan bisa mendapatkan hasil yang maksikmal dalam pembuatan beton geopolimer.
8. Proses pembuatan beton geopolimer berbahaya karena kandungan alkali aktifator bisa mengakibatkan kulit melepuh, saran pada saat pembuatan beton geopolimer sebagiknya menggunakan alat perlindungan diri untuk menghindari pasta geopilimer terkena kulit secara langsung.
9. Dilakukan penelitian lebih lanjut yang terfokus kepada *setiing time* beton geopolimer .

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C 618 – 03 Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzoland for Use as a Mineral Admixture in Concrete, American Standard Testing and Material.
- ASTM C-33. 2003. *Standard Specification for Concrete Aggregates*, American Society for Testing and Material. USA.
- ASTM C-33. 2003. *Standard Specification for Concrete Aggregates*, American Society for Testing and Material. USA.
- Budiningrum, D.S. (2021). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash PLTU Tanjungjati B Jepara. Universitas Semarang.
- Davidovits, J. (1994, October). Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes (Vol. 1, pp. 131-149).
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of Geopolymer System, Terminology, Paper Presented at the Geopolymer '99 International Conference. Saint-Quentin. France.
- Davidovits, J., High-Alkali Cements for 21st Century Concretes . ACI Concrete International. 1994. Vol 144 (383-397).
- Dipohusodo, I., 1999. Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI-T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI., PT Gramedia Pustaka Utama: Jakarta.
- Hardjito, D and Rangan, B,V. 2005. Development and Properties Of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Perth.
- Hardjito, D and Rangan, B,V. 2005. Development and Properties Of Low-Calcium Fly Ash- Based Geopolymer Concrete. Perth.
- Hardjito, D,, Wallah S,E,, and Rangan, B,V. 2004. Factor Influencing The Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. Universitas Kristen Petra.Surabaya.
- Keller, A. and Klute, M. (2016) 'Semen Kotor Kasus di Indonesia', th.boell.org. Available at: <https://th.boell.org/en/2016/12/09/semen-kotor-kasus-di-indonesia>.

- Li, Z. , Ding,Z. , dan Zhang, Y ., 2004. *Development Of Sustainable cementitious materials*. HongKong.
- Nugraha P., Antoni, 2007. *Teknologi Beton, dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Perdana Muhammad, T.A. (2022). *Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi dan Viscocrete 1003 Pada Karakteristik Beton Geopolimer*. Universitas Islam Indonesia.
- Putera, A., & Herlina, L., (2021). *Pengaruh Molarotas Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Dengan Campuran Dua Tipe Fly Ash yang Berbeda*. hal: 147 - 152, ISBN 978-623-91358-3-3 ,FTSP, Universitas Trisakti.
- Rangan V, (2010). "Fly- Ash Based Geopolymer Concrete", *Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete*, Allied Publishers Private Limited, Mumbai, India, December 2010, pp 68- 106.
- Rozi, F.M., Tarigan, J., & Perwira A. (2020). *Analisis Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash PLTU Pangkalan Susu*. *Jurnal Syntax Admiration*. Vol. No 5 September 2020.
- SNI 03-2834. 2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1969. 2016. *Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1970. 2016. *Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1974. 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 2847. 2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 2847. 2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Sulistiyorini, D. (2023). *Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 dan 2,5*. Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus

PEMERIKASAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT HALUS

Uraian	Hasil Pengamatan	
	Sampel 1	Sampel 2
Berat pasir kering mutlak, gram (Bk)	498	498
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (Bt)	1043	1047
Berat piknometer berisi air, gram (B)	737	734
Berat Jenis Curah BK/(BJ-Ba)	2.567	2.663
Berat Jenis jenuh kering muda (SSD) Bj/(Bj-Ba)	2.577	2.674
Berat Jenis semu Bk/(Bk-Ba)	2.594	2.692
Penyerapan Air (Bj-Bk)/Bk x 100%	0.4016%	0.4016%

Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agegat Halus

PEMERIKSAAN ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS

1. Sampel 1

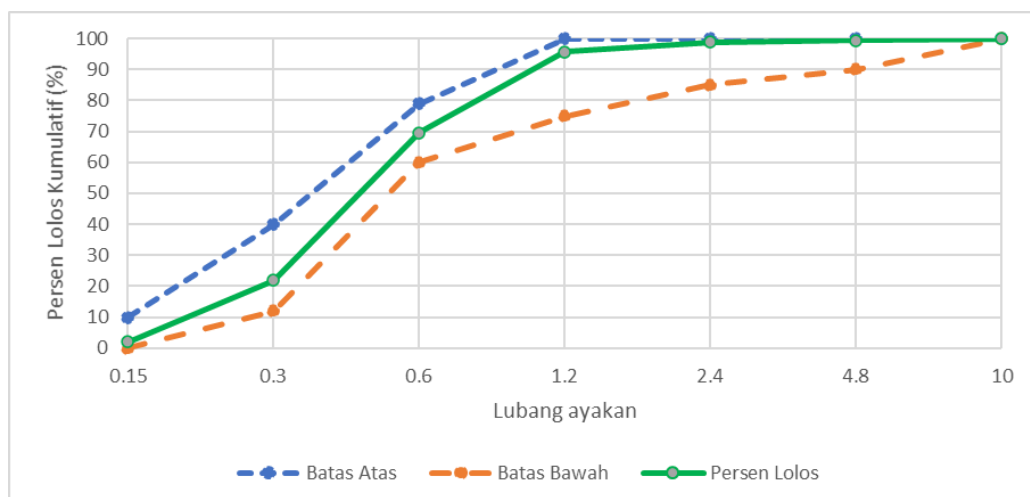
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	0	0	0	100
10,00	3	0.15	0	100
4,80	9	0.45	0.60	99.40
2,40	10	0.50	1.10	98.90
1,20	65	3.25	4.35	95.65
0,60	520	26.00	30.35	69.65
0,30	957	47.85	78.20	21.80
0,15	396	19.80	98.00	2.00
Sisa	40	2.000	100.000	0
Jumlah	2000	100	212.600	387.400
			MHB =	2.126

Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus

PEMERIKSAAN ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS

2. Sampel 2

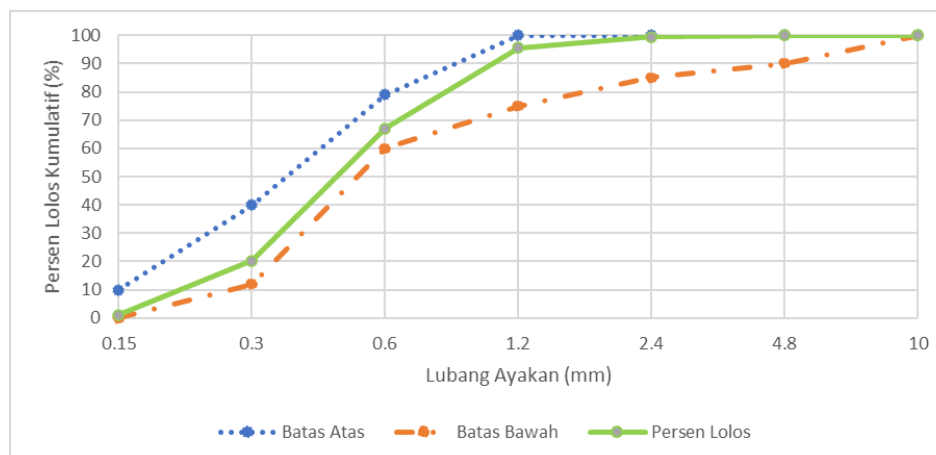
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	0	0	0	100
10,00	0	0	0	100
4,80	0	0.00	0.00	100.00
2,40	10	0.50	0.50	99.50
1,20	80	4.00	4.50	95.50
0,60	570	28.50	33.00	67.00
0,30	934	46.70	79.70	20.30
0,15	384	19.20	98.90	1.10
Sisa	22	1.100	100.000	0
Jumlah	2000	100	216.600	383.400
			MHB =	2.166



Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus

PEMERIKSAAN KADAR LUMPUR AGREGAT HALUS

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	0	0	0	100
10,00	0	0	0	100
4,80	0	0.00	0.00	100.00
2,40	10	0.50	0.50	99.50
1,20	80	4.00	4.50	95.50
0,60	570	28.50	33.00	67.00
0,30	934	46.70	79.70	20.30
0,15	384	19.20	98.90	1.10
Sisa	22	1.100	100.000	0
Jumlah	2000	100	216.600	383.400
			MHB =	2.166



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

Uraian	Hasil Pengujian		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Cawan (W1), gram	500	500	500
Berat Pasir kering mutlak (W2), gram	490	491	490,5
Berat yang lolos ayakan no.200 [(W1-W2)/W1] x 100	2,00%	1,80%	1,90%

Lampiran 1 Hasil Uji Sifat Agregat Halus**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME PADAT AGREGAT HALUS**

Uraian	Hasil Pengamatan		Satuan
	Sampel 1	Sampel 2	
Berat Tabung (W1)	11009.000	10764.000	gram
Berat Tabung + Agregat SSD (W2)	18996.000	18503.000	gram
Berat Agregat (W3)	7987.000	7739.000	gram
Diameter Tabung (d)	14.950	14.950	cm
Tinggi Tabung (t)	30.100	30.100	cm
Volume Tabung (V)	5283.707	5283.707	cm ³
Berat Volume Gembur	1.512	1.465	gram/cm ³

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 (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	16	0.32	0.32	99.68
10,00	3707	74.14	74.46	25.54
4,80	1151	23.02	97.48	2.52
2,40	23	0.46	97.94	2.06
1,20	6	0.12	98.06	1.94
0,60	0	0	98.06	1.94
0,30	0	0	98.06	1.94
0,15	0	0	98.06	1.94
Sisa	97	1.94	100	0.00
Jumlah	5000	100	662.44	237.56
			MHB =	6.6244

Lampiran 2 Hasil Uji Sifat Agregat Kasar

PEMERIKSAAN ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR

2. Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	82	1.64	1.64	98.36
10,00	3659	73.18	74.82	25.18
4,80	1132	22.64	97.46	2.54
2,40	18	0.36	97.82	2.18
1,20	7	0.14	97.96	2.04
0,60	0	0	97.96	2.04
0,30	0	0	97.96	2.04
0,15	0	0	97.96	2.04
Sisa	102	2.04	100	0.00
Jumlah	5000	100	663.58	236.42
			MHB =	663.58

Lampiran 2 hasil Uji Sifat Agregat Kasar**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME PADAT AGREGAT KASAR**

Uraian	Hasil Pengamatan		Satuan
	Sampel 1	Sampel 2	
Berat Tabung (W1)	11191	10693	gram
Berat Tabung + Agregat SSD (W2)	18378	17836	gram
Berat Agregat (W3)	7187	7143	gram
Diameter Tabung (d)	14.95	14.95	cm
Tinggi Tabung (t)	30.11	30.11	cm
Volume Tabung (V)	5285.4628	5285.4628	cm ³
Berat Volume Gembur	1.3598	1.3514	gram/cm ³

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1. 1 Proses Pencucian Agregat Kasar

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1. 2 Proses Perendaman Agregat Kasar



Gambar L-1. 3 Proses Perendaman Agregat Halus

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1. 4 Pengujian Berat Jenis dengan Piknometer



Gambar L-1. 5 Pengujian Kadar Lumpur

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian**Gambar L-1. 6 Proses Penyiapan Na_2SiO_3** **Gambar L-1. 7 Proses Penyiapan NaOH**

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1. 8 Proses Penyiapan Alkali Aktifator



Gambar L-1. 9 Proses Penyiapan *Fly Ash*

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian**Gambar L-1. 10 Proses Persiapan Pencampuran Beton Geoplimer**

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1. 11 Proses Pengujian Slump



Gambar L-1. 12 Proses Memasukan Beton Geopolimer ke Dalam Bekisting

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1. 13 Proses Pelepasan Beton Geopolimer dari Bekisting



Gambar L-1. 14 Proses Perendaman Beton Geopolimer

Lampiran 3 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-1. 15 Proses Pengeringan Beton Geopolimer Setelah Perendaman 28 Hari

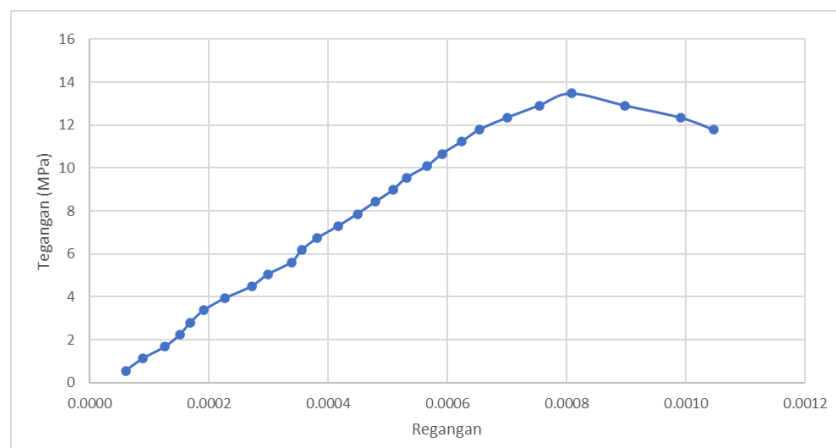


Gambar L-1. 16 Beton Geopolimer Setelah di Caping

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

1. Modulus TM1 8M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	18.58	0.0093	0.0000465	0.5614	0.0000610
20	20000	30	0.0150	0.0000750	1.1228	0.0000895
30	30000	45	0.0225	0.0001125	1.6842	0.0001270
40	40000	55	0.0275	0.0001375	2.2455	0.0001520
50	50000	62	0.0310	0.0001550	2.8069	0.0001695
60	60000	71	0.0355	0.0001775	3.3683	0.0001920
70	70000	85	0.0425	0.0002125	3.9297	0.0002270
80	80000	103	0.0515	0.0002575	4.4911	0.0002720
90	90000	114.1	0.0571	0.0002853	5.0525	0.0002998
100	100000	129.8	0.0649	0.0003245	5.6138	0.0003390
110	110000	136.7	0.0684	0.0003418	6.1752	0.0003563
120	120000	147.1	0.0736	0.0003678	6.7366	0.0003823
130	130000	161.1	0.0806	0.0004028	7.2980	0.0004173
140	140000	173.9	0.0870	0.0004348	7.8594	0.0004493
150	150000	185.9	0.0930	0.0004648	8.4208	0.0004793
160	160000	197.9	0.0990	0.0004948	8.9821	0.0005093
170	170000	206.9	0.1035	0.0005173	9.5435	0.0005318
180	180000	220.9	0.1105	0.0005523	10.1049	0.0005668
190	190000	230.9	0.1155	0.0005773	10.6663	0.0005918
200	200000	243.9	0.1220	0.0006098	11.2277	0.0006243
210	210000	255.9	0.1280	0.0006398	11.7891	0.0006543
220	220000	274.5	0.1373	0.0006863	12.3505	0.0007008
230	230000	295.9	0.1480	0.0007398	12.9118	0.0007543
240	240000	317.6	0.1588	0.0007940	13.4732	0.0008085
230	230000	353.7	0.1769	0.0008843	12.9118	0.0008988
220	220000	391	0.1955	0.0009775	12.3505	0.0009920
210	210000	413	0.2065	0.0010325	11.7891	0.0010470

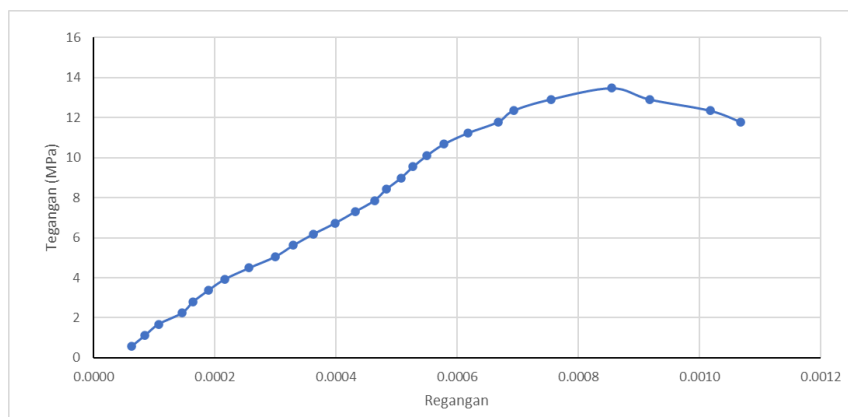


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	16336.823	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'c}$	17251.766	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

2. Modulus TM1 8M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	18.9	0.0095	0.0000473	0.5614	0.0000625
20	20000	28	0.0140	0.0000700	1.1228	0.0000853
30	30000	36.9	0.0185	0.0000923	1.6842	0.0001075
40	40000	52.4	0.0262	0.0001310	2.2455	0.0001463
50	50000	59.8	0.0299	0.0001495	2.8069	0.0001648
60	60000	69.7	0.0349	0.0001743	3.3683	0.0001895
70	70000	80.7	0.0404	0.0002018	3.9297	0.0002170
80	80000	96.7	0.0484	0.0002418	4.4911	0.0002570
90	90000	113.9	0.0570	0.0002848	5.0525	0.0003000
100	100000	125.7	0.0629	0.0003143	5.6138	0.0003295
110	110000	138.9	0.0695	0.0003473	6.1752	0.0003625
120	120000	153.6	0.0768	0.0003840	6.7366	0.0003993
130	130000	166.6	0.0833	0.0004165	7.2980	0.0004318
140	140000	179.4	0.0897	0.0004485	7.8594	0.0004638
150	150000	187.3	0.0937	0.0004683	8.4208	0.0004835
160	160000	196.9	0.0985	0.0004923	8.9821	0.0005075
170	170000	204.9	0.1025	0.0005123	9.5435	0.0005275
180	180000	214.1	0.1071	0.0005353	10.1049	0.0005505
190	190000	225.1	0.1126	0.0005628	10.6663	0.0005780
200	200000	241.1	0.1206	0.0006028	11.2277	0.0006180
210	210000	261.2	0.1306	0.0006530	11.7891	0.0006683
220	220000	271.3	0.1357	0.0006783	12.3505	0.0006935
230	230000	295.8	0.1479	0.0007395	12.9118	0.0007548
240	240000	336.1	0.1681	0.0008403	13.4732	0.0008555
230	230000	361.1	0.1806	0.0009028	12.9118	0.0009180
220	220000	401	0.2005	0.0010025	12.3505	0.0010178
210	210000	421	0.2105	0.0010525	11.7891	0.0010678

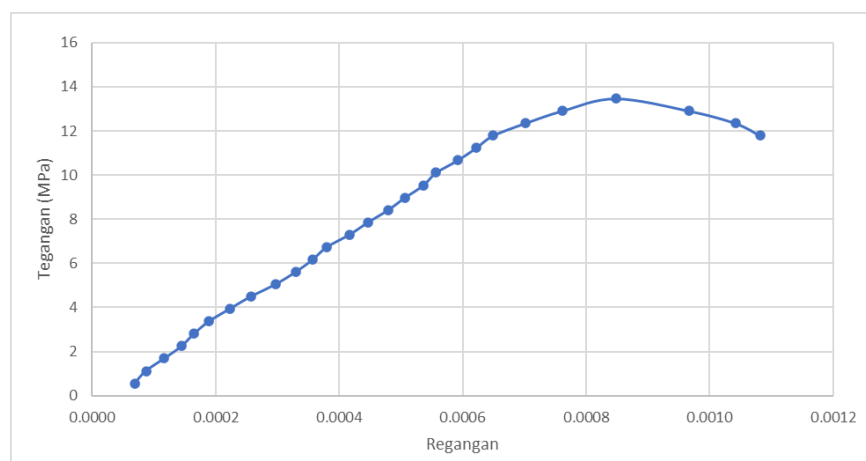


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	16889.595	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'c}$	17251.766	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

3. Modulus TM3 8M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	16.7	0.0084	0.0000418	0.5614	0.0000690
20	20000	24	0.0120	0.0000600	1.1228	0.0000873
30	30000	35.8	0.0179	0.0000895	1.6842	0.0001168
40	40000	47.1	0.0236	0.0001178	2.2455	0.0001450
50	50000	55.1	0.0276	0.0001378	2.8069	0.0001650
60	60000	64.8	0.0324	0.0001620	3.3683	0.0001893
70	70000	78.1	0.0391	0.0001953	3.9297	0.0002225
80	80000	91.8	0.0459	0.0002295	4.4911	0.0002568
90	90000	107.9	0.0540	0.0002698	5.0525	0.0002970
100	100000	121.1	0.0606	0.0003028	5.6138	0.0003300
110	110000	132.1	0.0661	0.0003303	6.1752	0.0003575
120	120000	141.1	0.0706	0.0003528	6.7366	0.0003800
130	130000	155.7	0.0779	0.0003893	7.2980	0.0004165
140	140000	167.9	0.0840	0.0004198	7.8594	0.0004470
150	150000	180.9	0.0905	0.0004523	8.4208	0.0004795
160	160000	191.9	0.0960	0.0004798	8.9821	0.0005070
170	170000	203.9	0.1020	0.0005098	9.5435	0.0005370
180	180000	211.9	0.1060	0.0005298	10.1049	0.0005570
190	190000	225.9	0.1130	0.0005648	10.6663	0.0005920
200	200000	237.9	0.1190	0.0005948	11.2277	0.0006220
210	210000	248.9	0.1245	0.0006223	11.7891	0.0006495
220	220000	269.7	0.1349	0.0006743	12.3505	0.0007015
230	230000	293.8	0.1469	0.0007345	12.9118	0.0007618
240	240000	328.3	0.1642	0.0008208	13.4732	0.0008480
230	230000	375.9	0.1880	0.0009398	12.9118	0.0009670
220	220000	406	0.2030	0.0010150	12.3505	0.0010423
210	210000	421.8	0.2109	0.0010545	11.7891	0.0010818

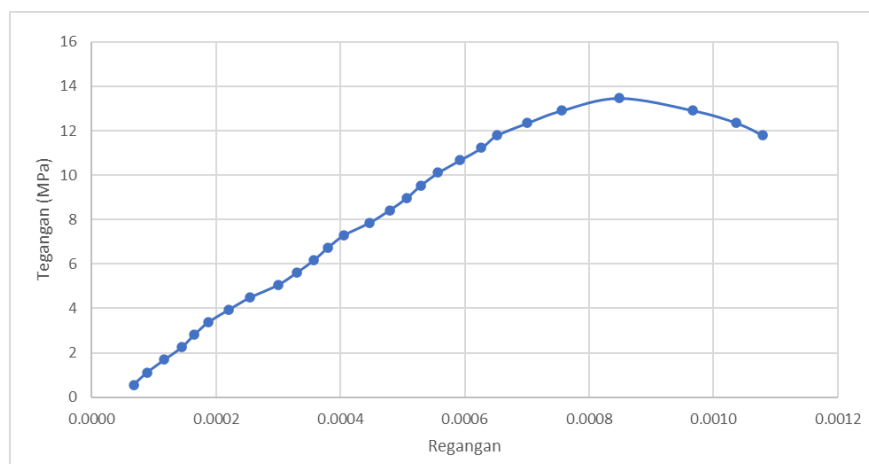


ASTM C-469	$(s_2-s_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$	16738.364	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	17251.766	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

4. Modulus TM4 8M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	16.1	0.0081	0.0000403	0.5614	0.0000675
20	20000	25	0.0125	0.0000625	1.1228	0.0000898
30	30000	35.9	0.0180	0.0000898	1.6842	0.0001170
40	40000	47.1	0.0236	0.0001178	2.2455	0.0001450
50	50000	55.1	0.0276	0.0001378	2.8069	0.0001650
60	60000	64.1	0.0321	0.0001603	3.3683	0.0001875
70	70000	77.1	0.0386	0.0001928	3.9297	0.0002200
80	80000	91.1	0.0456	0.0002278	4.4911	0.0002550
90	90000	108.9	0.0545	0.0002723	5.0525	0.0002995
100	100000	121.1	0.0606	0.0003028	5.6138	0.0003300
110	110000	132.1	0.0661	0.0003303	6.1752	0.0003575
120	120000	141.1	0.0706	0.0003528	6.7366	0.0003800
130	130000	151.5	0.0758	0.0003788	7.2980	0.0004060
140	140000	167.9	0.0840	0.0004198	7.8594	0.0004470
150	150000	180.7	0.0904	0.0004518	8.4208	0.0004790
160	160000	191.9	0.0960	0.0004798	8.9821	0.0005070
170	170000	200.9	0.1005	0.0005023	9.5435	0.0005295
180	180000	211.9	0.1060	0.0005298	10.1049	0.0005570
190	190000	225.9	0.1130	0.0005648	10.6663	0.0005920
200	200000	239.9	0.1200	0.0005998	11.2277	0.0006270
210	210000	249.8	0.1249	0.0006245	11.7891	0.0006518
220	220000	269.3	0.1347	0.0006733	12.3505	0.0007005
230	230000	291.5	0.1458	0.0007288	12.9118	0.0007560
240	240000	328.5	0.1643	0.0008213	13.4732	0.0008485
230	230000	376.1	0.1881	0.0009403	12.9118	0.0009675
220	220000	404	0.2020	0.0010100	12.3505	0.0010373
210	210000	420.9	0.2105	0.0010523	11.7891	0.0010795

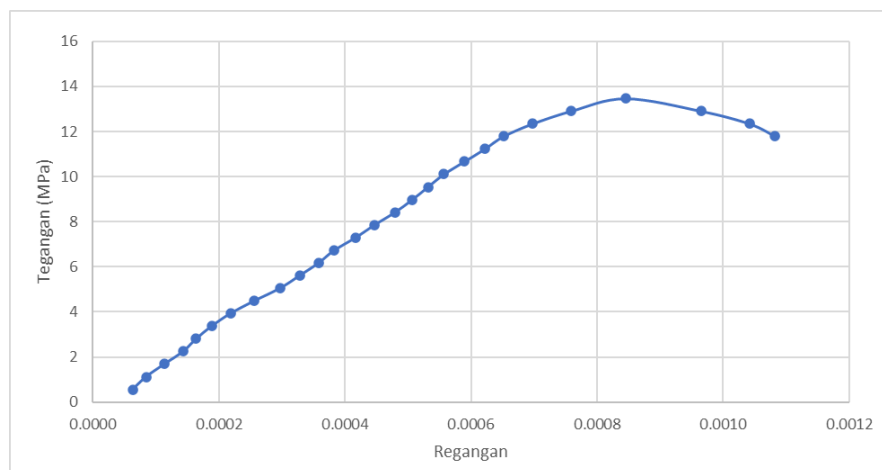


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$	16738.364	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	17251.766	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

5. Modulus TM5 8M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	17.5	0.0088	0.0000438	0.5614	0.0000633
20	20000	26	0.0130	0.0000650	1.1228	0.0000845
30	30000	37.5	0.0188	0.0000938	1.6842	0.0001133
40	40000	49.5	0.0248	0.0001238	2.2455	0.0001433
50	50000	57.8	0.0289	0.0001445	2.8069	0.0001640
60	60000	67.5	0.0338	0.0001688	3.3683	0.0001883
70	70000	79.5	0.0398	0.0001988	3.9297	0.0002183
80	80000	94.5	0.0473	0.0002363	4.4911	0.0002558
90	90000	110.9	0.0555	0.0002773	5.0525	0.0002968
100	100000	123.4	0.0617	0.0003085	5.6138	0.0003280
110	110000	135.4	0.0677	0.0003385	6.1752	0.0003580
120	120000	145.4	0.0727	0.0003635	6.7366	0.0003830
130	130000	158.9	0.0795	0.0003973	7.2980	0.0004168
140	140000	170.9	0.0855	0.0004273	7.8594	0.0004468
150	150000	183.9	0.0920	0.0004598	8.4208	0.0004793
160	160000	194.9	0.0975	0.0004873	8.9821	0.0005068
170	170000	204.9	0.1025	0.0005123	9.5435	0.0005318
180	180000	214.9	0.1075	0.0005373	10.1049	0.0005568
190	190000	227.9	0.1140	0.0005698	10.6663	0.0005893
200	200000	240.9	0.1205	0.0006023	11.2277	0.0006218
210	210000	252.8	0.1264	0.0006320	11.7891	0.0006515
220	220000	271.3	0.1357	0.0006783	12.3505	0.0006978
230	230000	295.8	0.1479	0.0007395	12.9118	0.0007590
240	240000	330.3	0.1652	0.0008258	13.4732	0.0008453
230	230000	378.3	0.1892	0.0009458	12.9118	0.0009653
220	220000	409	0.2045	0.0010225	12.3505	0.0010420
210	210000	425.3	0.2127	0.0010633	11.7891	0.0010828

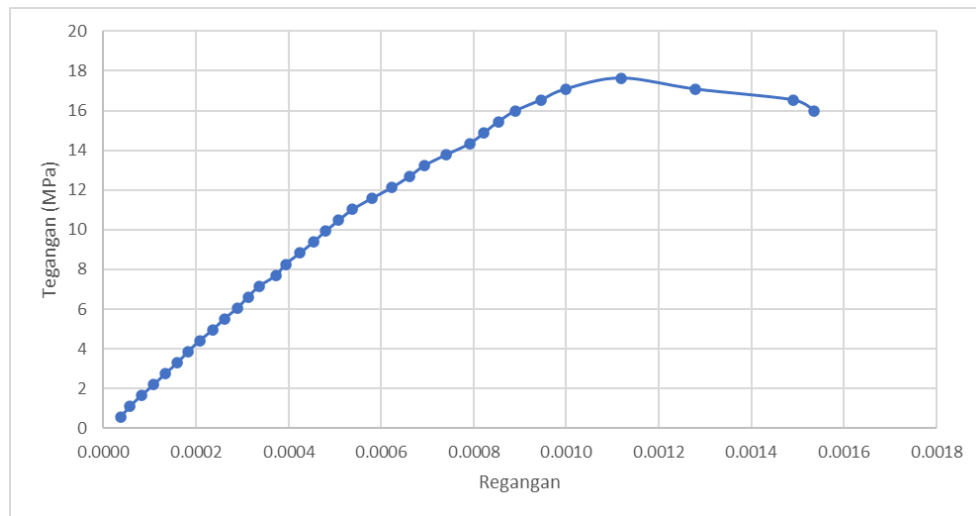


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	16920.654	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	17251.766	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

6. Modulus TM1 9M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	13.5	0.0068	0.0000338	0.5511	0.0000371
20	20000	21.5	0.0108	0.0000538	1.1022	0.0000571
30	30000	31.5	0.0158	0.0000788	1.6533	0.0000821
40	40000	42.2	0.0211	0.0001055	2.2044	0.0001089
50	50000	52.2	0.0261	0.0001305	2.7555	0.0001339
60	60000	62.7	0.0314	0.0001568	3.3065	0.0001601
70	70000	71.7	0.0359	0.0001793	3.8576	0.0001826
80	80000	81.7	0.0409	0.0002043	4.4087	0.0002076
90	90000	93.1	0.0466	0.0002328	4.9598	0.0002361
100	100000	103.1	0.0516	0.0002578	5.5109	0.0002611
110	110000	114.6	0.0573	0.0002865	6.0620	0.0002899
120	120000	123.6	0.0618	0.0003090	6.6131	0.0003124
130	130000	133.6	0.0668	0.0003340	7.1642	0.0003374
140	140000	148.1	0.0741	0.0003703	7.7153	0.0003736
150	150000	156.1	0.0781	0.0003903	8.2664	0.0003936
160	160000	168.6	0.0843	0.0004215	8.8174	0.0004249
170	170000	180.1	0.0901	0.0004503	9.3685	0.0004536
180	180000	190.6	0.0953	0.0004765	9.9196	0.0004799
190	190000	202.1	0.1011	0.0005053	10.4707	0.0005086
200	200000	214.1	0.1071	0.0005353	11.0218	0.0005386
210	210000	230.6	0.1153	0.0005765	11.5729	0.0005799
220	220000	248.1	0.1241	0.0006203	12.1240	0.0006236
230	230000	263.1	0.1316	0.0006578	12.6751	0.0006611
240	240000	276.1	0.1381	0.0006903	13.2262	0.0006936
250	250000	295.1	0.1476	0.0007378	13.7773	0.0007411
260	260000	315.1	0.1576	0.0007878	14.3284	0.0007911
270	270000	327.8	0.1639	0.0008195	14.8794	0.0008229
280	280000	339.8	0.1699	0.0008495	15.4305	0.0008529
290	290000	354.7	0.1774	0.0008868	15.9816	0.0008901
300	300000	376.8	0.1884	0.0009420	16.5327	0.0009454
310	310000	398.3	0.1992	0.0009958	17.0838	0.0009991
320	320000	445.8	0.2229	0.0011145	17.6349	0.0011179
310	310000	510	0.2550	0.0012750	17.0838	0.0012784
300	300000	595.3	0.2977	0.0014883	16.5327	0.0014916
290	290000	613.3	0.3067	0.0015333	15.9816	0.0015366

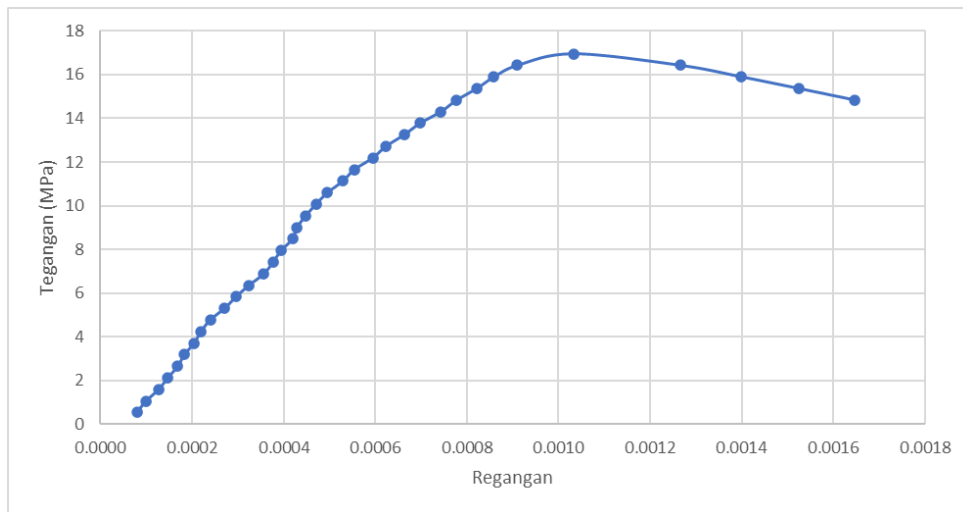


ASTM C-469	$(s_2-s_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$	21116.328	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	19737.144	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

7. Modulus TM2 9M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	12.5	0.0063	0.0000313	0.5300	0.0000796
20	20000	20.5	0.0103	0.0000513	1.0599	0.0000996
30	30000	31.5	0.0158	0.0000788	1.5899	0.0001271
40	40000	39.5	0.0198	0.0000988	2.1199	0.0001471
50	50000	48.2	0.0241	0.0001205	2.6498	0.0001689
60	60000	54	0.0270	0.0001350	3.1798	0.0001834
70	70000	62.5	0.0313	0.0001563	3.7098	0.0002046
80	80000	68.5	0.0343	0.0001713	4.2397	0.0002196
90	90000	76.5	0.0383	0.0001913	4.7697	0.0002396
100	100000	89	0.0445	0.0002225	5.2996	0.0002709
110	110000	99	0.0495	0.0002475	5.8296	0.0002959
120	120000	110.4	0.0552	0.0002760	6.3596	0.0003244
130	130000	123.4	0.0617	0.0003085	6.8895	0.0003569
140	140000	131.4	0.0657	0.0003285	7.4195	0.0003769
150	150000	138.4	0.0692	0.0003460	7.9495	0.0003944
160	160000	148.4	0.0742	0.0003710	8.4794	0.0004194
170	170000	152.4	0.0762	0.0003810	9.0094	0.0004294
180	180000	159.9	0.0800	0.0003998	9.5394	0.0004481
190	190000	168.9	0.0845	0.0004223	10.0693	0.0004706
200	200000	178.9	0.0895	0.0004473	10.5993	0.0004956
210	210000	192.4	0.0962	0.0004810	11.1293	0.0005294
220	220000	202.4	0.1012	0.0005060	11.6592	0.0005544
230	230000	218.4	0.1092	0.0005460	12.1892	0.0005944
240	240000	229.9	0.1150	0.0005748	12.7191	0.0006231
250	250000	245.9	0.1230	0.0006148	13.2491	0.0006631
260	260000	259.8	0.1299	0.0006495	13.7791	0.0006979
270	270000	278	0.1390	0.0006950	14.3090	0.0007434
280	280000	291.8	0.1459	0.0007295	14.8390	0.0007779
290	290000	309.3	0.1547	0.0007733	15.3690	0.0008216
300	300000	324.3	0.1622	0.0008108	15.8989	0.0008591
310	310000	344.8	0.1724	0.0008620	16.4289	0.0009104
320	320000	393.8	0.1969	0.0009845	16.9589	0.0010329
310	310000	487	0.2435	0.0012175	16.4289	0.0012659
300	300000	540.5	0.2703	0.0013513	15.8989	0.0013996
290	290000	590.5	0.2953	0.0014763	15.3690	0.0015246
280	280000	639.5	0.3198	0.0015988	14.8390	0.0016471

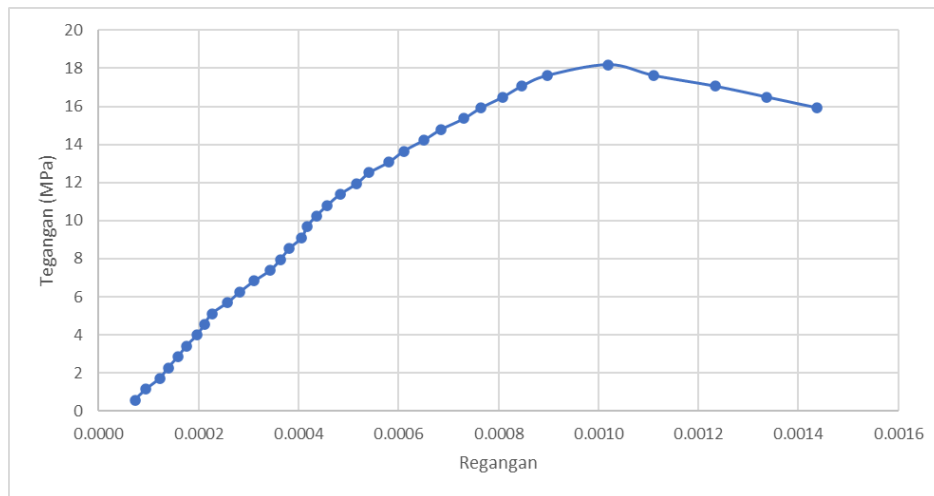


ASTM C-469	$(s_2-s_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$	18547.621	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	19355.135	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

8. Modulus TM3 9M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	14.8	0.0074	0.0000370	0.5687	0.0000723
20	20000	23.7	0.0119	0.0000593	1.1373	0.0000946
30	30000	34.6	0.0173	0.0000865	1.7060	0.0001219
40	40000	41.5	0.0208	0.0001038	2.2746	0.0001391
50	50000	49.2	0.0246	0.0001230	2.8433	0.0001584
60	60000	56	0.0280	0.0001400	3.4120	0.0001754
70	70000	64.5	0.0323	0.0001613	3.9806	0.0001966
80	80000	70.5	0.0353	0.0001763	4.5493	0.0002116
90	90000	76.5	0.0383	0.0001913	5.1179	0.0002266
100	100000	89	0.0445	0.0002225	5.6866	0.0002579
110	110000	99	0.0495	0.0002475	6.2553	0.0002829
120	120000	110.4	0.0552	0.0002760	6.8239	0.0003114
130	130000	123.4	0.0617	0.0003085	7.3926	0.0003439
140	140000	131.4	0.0657	0.0003285	7.9613	0.0003639
150	150000	138.4	0.0692	0.0003460	8.5299	0.0003814
160	160000	148.4	0.0742	0.0003710	9.0986	0.0004064
170	170000	152.4	0.0762	0.0003810	9.6672	0.0004164
180	180000	159.9	0.0800	0.0003998	10.2359	0.0004351
190	190000	168.9	0.0845	0.0004223	10.8046	0.0004576
200	200000	178.9	0.0895	0.0004473	11.3732	0.0004826
210	210000	192.4	0.0962	0.0004810	11.9419	0.0005164
220	220000	202.4	0.1012	0.0005060	12.5105	0.0005414
230	230000	218.4	0.1092	0.0005460	13.0792	0.0005814
240	240000	229.9	0.1150	0.0005748	13.6479	0.0006101
250	250000	245.9	0.1230	0.0006148	14.2165	0.0006501
260	260000	259.8	0.1299	0.0006495	14.7852	0.0006849
270	270000	278	0.1390	0.0006950	15.3538	0.0007304
280	280000	291.8	0.1459	0.0007295	15.9225	0.0007649
290	290000	309.3	0.1547	0.0007733	16.4912	0.0008086
300	300000	324.3	0.1622	0.0008108	17.0598	0.0008461
310	310000	344.8	0.1724	0.0008620	17.6285	0.0008974
320	320000	393.8	0.1969	0.0009845	18.1972	0.0010199
310	310000	430	0.2150	0.0010750	17.6285	0.0011104
300	300000	479.5	0.2398	0.0011988	17.0598	0.0012341
290	290000	520.5	0.2603	0.0013013	16.4912	0.0013366
280	280000	560.9	0.2805	0.0014023	15.9225	0.0014376

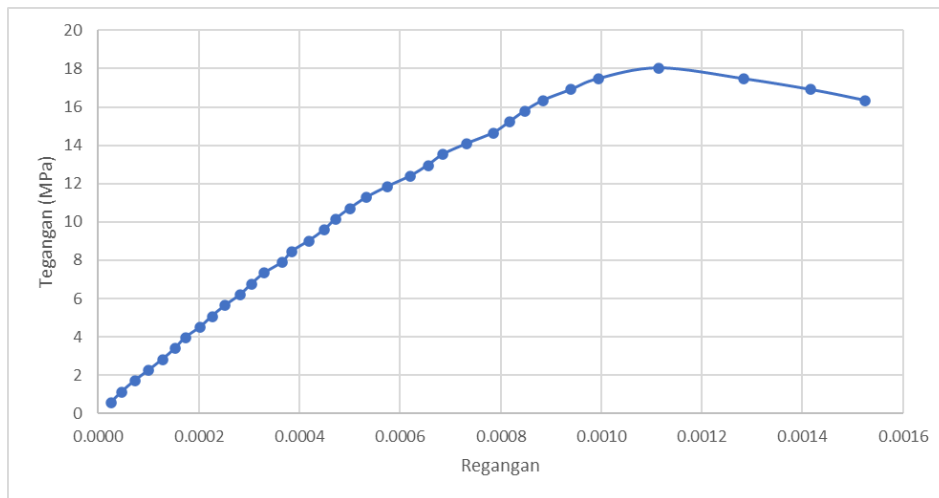


ASTM C-469	$(s_2-s_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$	21080.118	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	20049.316	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

9. Modulus TM4 9M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	14.1	0.0071	0.0000353	0.5634	0.0000257
20	20000	22.7	0.0114	0.0000568	1.1268	0.0000472
30	30000	32.8	0.0164	0.0000820	1.6901	0.0000725
40	40000	44.1	0.0221	0.0001103	2.2535	0.0001007
50	50000	55.1	0.0276	0.0001378	2.8169	0.0001282
60	60000	64.9	0.0325	0.0001623	3.3803	0.0001527
70	70000	73.1	0.0366	0.0001828	3.9436	0.0001732
80	80000	85.1	0.0426	0.0002128	4.5070	0.0002032
90	90000	94.4	0.0472	0.0002360	5.0704	0.0002265
100	100000	104.9	0.0525	0.0002623	5.6338	0.0002527
110	110000	116.9	0.0585	0.0002923	6.1972	0.0002827
120	120000	125.9	0.0630	0.0003148	6.7605	0.0003052
130	130000	135.9	0.0680	0.0003398	7.3239	0.0003302
140	140000	150.1	0.0751	0.0003753	7.8873	0.0003657
150	150000	157.9	0.0790	0.0003948	8.4507	0.0003852
160	160000	171.6	0.0858	0.0004290	9.0140	0.0004195
170	170000	183.5	0.0918	0.0004588	9.5774	0.0004492
180	180000	192.6	0.0963	0.0004815	10.1408	0.0004720
190	190000	204.1	0.1021	0.0005103	10.7042	0.0005007
200	200000	217.1	0.1086	0.0005428	11.2676	0.0005332
210	210000	233.6	0.1168	0.0005840	11.8309	0.0005745
220	220000	252.1	0.1261	0.0006303	12.3943	0.0006207
230	230000	266.1	0.1331	0.0006653	12.9577	0.0006557
240	240000	278.1	0.1391	0.0006953	13.5211	0.0006857
250	250000	297.1	0.1486	0.0007428	14.0844	0.0007332
260	260000	318.1	0.1591	0.0007953	14.6478	0.0007857
270	270000	330.8	0.1654	0.0008270	15.2112	0.0008175
280	280000	342.8	0.1714	0.0008570	15.7746	0.0008475
290	290000	357.7	0.1789	0.0008943	16.3379	0.0008847
300	300000	379.8	0.1899	0.0009495	16.9013	0.0009400
310	310000	401.3	0.2007	0.0010033	17.4647	0.0009937
320	320000	449.8	0.2249	0.0011245	18.0281	0.0011150
310	310000	517	0.2585	0.0012925	17.4647	0.0012830
300	300000	570.3	0.2852	0.0014258	16.9013	0.0014162
290	290000	613.3	0.3067	0.0015333	16.3379	0.0015237

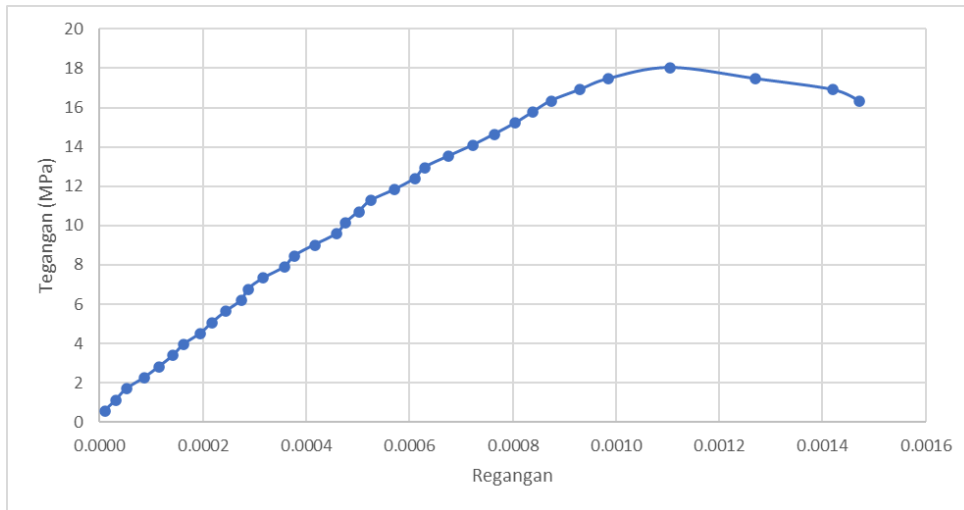


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	22291.607	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	19955.960	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

10. Modulus TM5 9M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	15.1	0.0076	0.0000378	0.5634	0.0000102
20	20000	23.7	0.0119	0.0000593	1.1268	0.0000317
30	30000	31.9	0.0160	0.0000798	1.6901	0.0000522
40	40000	45.6	0.0228	0.0001140	2.2535	0.0000865
50	50000	57.1	0.0286	0.0001428	2.8169	0.0001152
60	60000	67.9	0.0340	0.0001698	3.3803	0.0001422
70	70000	76.1	0.0381	0.0001903	3.9436	0.0001627
80	80000	89.1	0.0446	0.0002228	4.5070	0.0001952
90	90000	98.4	0.0492	0.0002460	5.0704	0.0002185
100	100000	108.9	0.0545	0.0002723	5.6338	0.0002447
110	110000	120.9	0.0605	0.0003023	6.1972	0.0002747
120	120000	126.1	0.0631	0.0003153	6.7605	0.0002877
130	130000	137.9	0.0690	0.0003448	7.3239	0.0003172
140	140000	154.1	0.0771	0.0003853	7.8873	0.0003577
150	150000	161.9	0.0810	0.0004048	8.4507	0.0003772
160	160000	177.6	0.0888	0.0004440	9.0140	0.0004165
170	170000	194.5	0.0973	0.0004863	9.5774	0.0004587
180	180000	201.6	0.1008	0.0005040	10.1408	0.0004765
190	190000	211.7	0.1059	0.0005293	10.7042	0.0005017
200	200000	221.1	0.1106	0.0005528	11.2676	0.0005252
210	210000	239.6	0.1198	0.0005990	11.8309	0.0005715
220	220000	255.1	0.1276	0.0006378	12.3943	0.0006102
230	230000	263.1	0.1316	0.0006578	12.9577	0.0006302
240	240000	281.1	0.1406	0.0007028	13.5211	0.0006752
250	250000	300.1	0.1501	0.0007503	14.0844	0.0007227
260	260000	317	0.1585	0.0007925	14.6478	0.0007650
270	270000	333.1	0.1666	0.0008328	15.2112	0.0008052
280	280000	346.8	0.1734	0.0008670	15.7746	0.0008395
290	290000	360.7	0.1804	0.0009018	16.3379	0.0008742
300	300000	382.8	0.1914	0.0009570	16.9013	0.0009295
310	310000	405.3	0.2027	0.0010133	17.4647	0.0009857
320	320000	452.8	0.2264	0.0011320	18.0281	0.0011045
310	310000	519	0.2595	0.0012975	17.4647	0.0012700
300	300000	579.3	0.2897	0.0014483	16.9013	0.0014207
290	290000	599.3	0.2997	0.0014983	16.3379	0.0014707

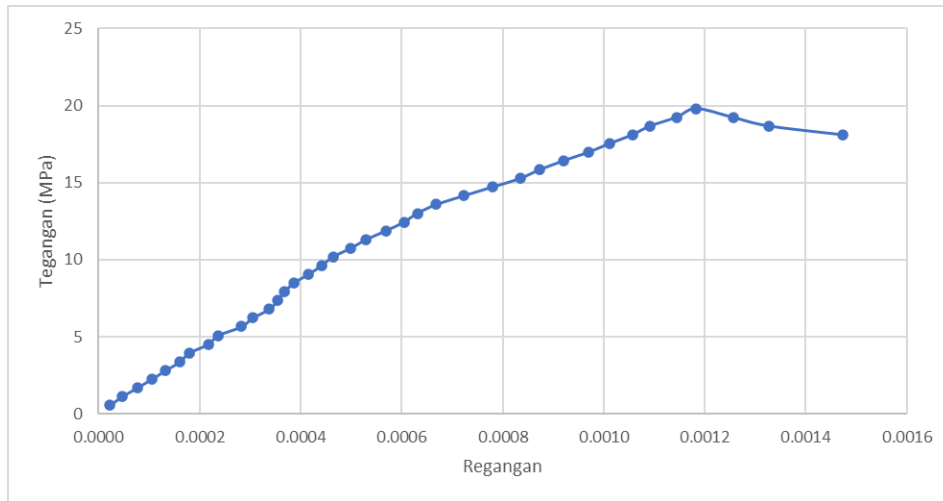


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	23434.537	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	19955.960	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

11. Modulus TM1 10M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	13	0.0065	0.0000325	0.5659	0.0000228
20	20000	22.5	0.0113	0.0000563	1.1318	0.0000465
30	30000	34.5	0.0173	0.0000863	1.6977	0.0000765
40	40000	46	0.0230	0.0001150	2.2635	0.0001053
50	50000	57	0.0285	0.0001425	2.8294	0.0001328
60	60000	68.5	0.0343	0.0001713	3.3953	0.0001615
70	70000	75.5	0.0378	0.0001888	3.9612	0.0001790
80	80000	90.9	0.0455	0.0002273	4.5271	0.0002175
90	90000	98.4	0.0492	0.0002460	5.0930	0.0002363
100	100000	116.9	0.0585	0.0002923	5.6588	0.0002825
110	110000	125.9	0.0630	0.0003148	6.2247	0.0003050
120	120000	138.9	0.0695	0.0003473	6.7906	0.0003375
130	130000	145.9	0.0730	0.0003648	7.3565	0.0003550
140	140000	150.9	0.0755	0.0003773	7.9224	0.0003675
150	150000	158.4	0.0792	0.0003960	8.4883	0.0003863
160	160000	169.9	0.0850	0.0004248	9.0541	0.0004150
170	170000	180.4	0.0902	0.0004510	9.6200	0.0004413
180	180000	189.4	0.0947	0.0004735	10.1859	0.0004638
190	190000	203.4	0.1017	0.0005085	10.7518	0.0004988
200	200000	215.9	0.1080	0.0005398	11.3177	0.0005300
210	210000	231.4	0.1157	0.0005785	11.8836	0.0005688
220	220000	245.8	0.1229	0.0006145	12.4495	0.0006048
230	230000	256.3	0.1282	0.0006408	13.0153	0.0006310
240	240000	271.3	0.1357	0.0006783	13.5812	0.0006685
250	250000	292.8	0.1464	0.0007320	14.1471	0.0007223
260	260000	315.8	0.1579	0.0007895	14.7130	0.0007798
270	270000	337.8	0.1689	0.0008445	15.2789	0.0008348
280	280000	353.3	0.1767	0.0008833	15.8448	0.0008735
290	290000	371.8	0.1859	0.0009295	16.4106	0.0009198
300	300000	391.8	0.1959	0.0009795	16.9765	0.0009698
310	310000	408.8	0.2044	0.0010220	17.5424	0.0010123
320	320000	426.7	0.2134	0.0010668	18.1083	0.0010570
330	330000	440.7	0.2204	0.0011018	18.6742	0.0010920
340	340000	461.7	0.2309	0.0011543	19.2401	0.0011445
350	350000	477.2	0.2386	0.0011930	19.8059	0.0011833
340	340000	506.2	0.2531	0.0012655	19.2401	0.0012558
330	330000	535	0.2675	0.0013375	18.6742	0.0013278
320	320000	593.1	0.2966	0.0014828	18.1083	0.0014730

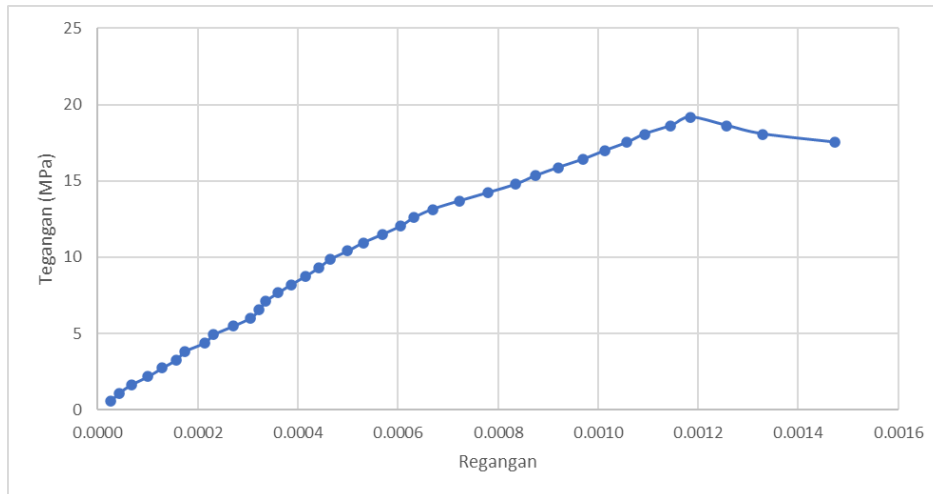


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	21604.030	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	20916.821	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

12. Modulus TM2 10M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	14	0.0070	0.0000350	0.5475	0.0000257
20	20000	20.5	0.0103	0.0000513	1.0950	0.0000420
30	30000	30.5	0.0153	0.0000763	1.6424	0.0000670
40	40000	44	0.0220	0.0001100	2.1899	0.0001008
50	50000	55	0.0275	0.0001375	2.7374	0.0001283
60	60000	66.5	0.0333	0.0001663	3.2849	0.0001570
70	70000	73.5	0.0368	0.0001838	3.8324	0.0001745
80	80000	88.9	0.0445	0.0002223	4.3799	0.0002130
90	90000	96.4	0.0482	0.0002410	4.9273	0.0002318
100	100000	111.9	0.0560	0.0002798	5.4748	0.0002705
110	110000	125.9	0.0630	0.0003148	6.0223	0.0003055
120	120000	132.9	0.0665	0.0003323	6.5698	0.0003230
130	130000	137.9	0.0690	0.0003448	7.1173	0.0003355
140	140000	147.9	0.0740	0.0003698	7.6648	0.0003605
150	150000	158.4	0.0792	0.0003960	8.2122	0.0003868
160	160000	169.9	0.0850	0.0004248	8.7597	0.0004155
170	170000	180.4	0.0902	0.0004510	9.3072	0.0004418
180	180000	189.4	0.0947	0.0004735	9.8547	0.0004643
190	190000	203.4	0.1017	0.0005085	10.4022	0.0004993
200	200000	215.9	0.1080	0.0005398	10.9497	0.0005305
210	210000	231.4	0.1157	0.0005785	11.4971	0.0005693
220	220000	245.8	0.1229	0.0006145	12.0446	0.0006053
230	230000	256.3	0.1282	0.0006408	12.5921	0.0006315
240	240000	271.3	0.1357	0.0006783	13.1396	0.0006690
250	250000	292.8	0.1464	0.0007320	13.6871	0.0007228
260	260000	315.8	0.1579	0.0007895	14.2346	0.0007803
270	270000	337.8	0.1689	0.0008445	14.7820	0.0008353
280	280000	353.3	0.1767	0.0008833	15.3295	0.0008740
290	290000	371.8	0.1859	0.0009295	15.8770	0.0009203
300	300000	391.8	0.1959	0.0009795	16.4245	0.0009703
310	310000	408.8	0.2044	0.0010220	16.9720	0.0010128
320	320000	426.7	0.2134	0.0010668	17.5194	0.0010575
330	330000	440.7	0.2204	0.0011018	18.0669	0.0010925
340	340000	461.7	0.2309	0.0011543	18.6144	0.0011450
350	350000	477.2	0.2386	0.0011930	19.1619	0.0011838
340	340000	506.2	0.2531	0.0012655	18.6144	0.0012563
330	330000	535	0.2675	0.0013375	18.0669	0.0013283
320	320000	593.1	0.2966	0.0014828	17.5194	0.0014735

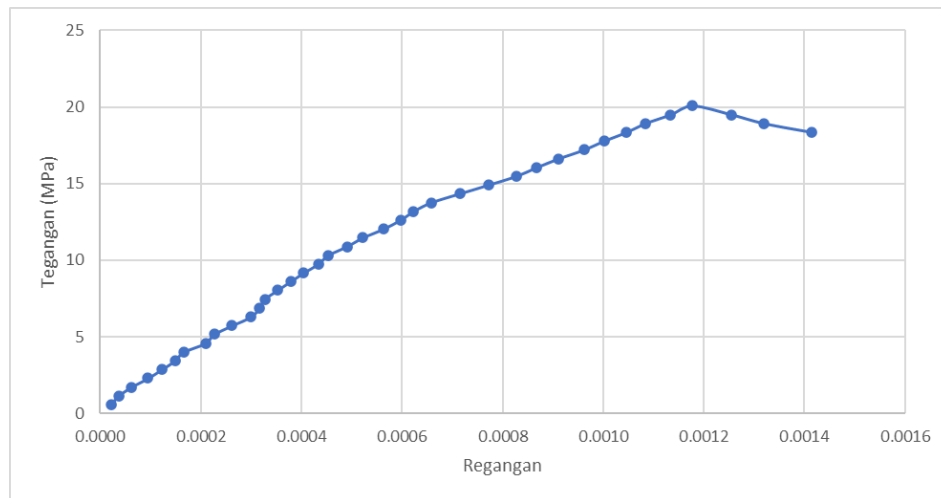


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	21261.380	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	20573.922	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

13. Modulus TM3 10M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	13.5	0.0068	0.0000338	0.5735	0.0000211
20	20000	19.7	0.0099	0.0000493	1.1470	0.0000366
30	30000	29.7	0.0149	0.0000743	1.7205	0.0000616
40	40000	43	0.0215	0.0001075	2.2940	0.0000949
50	50000	54	0.0270	0.0001350	2.8675	0.0001224
60	60000	64.5	0.0323	0.0001613	3.4410	0.0001486
70	70000	71.5	0.0358	0.0001788	4.0145	0.0001661
80	80000	88.9	0.0445	0.0002223	4.5880	0.0002096
90	90000	95.6	0.0478	0.0002390	5.1615	0.0002264
100	100000	109.9	0.0550	0.0002748	5.7351	0.0002621
110	110000	124.9	0.0625	0.0003123	6.3086	0.0002996
120	120000	131.9	0.0660	0.0003298	6.8821	0.0003171
130	130000	135.9	0.0680	0.0003398	7.4556	0.0003271
140	140000	145.9	0.0730	0.0003648	8.0291	0.0003521
150	150000	156.4	0.0782	0.0003910	8.6026	0.0003784
160	160000	166.9	0.0835	0.0004173	9.1761	0.0004046
170	170000	178.4	0.0892	0.0004460	9.7496	0.0004334
180	180000	186.4	0.0932	0.0004660	10.3231	0.0004534
190	190000	201.4	0.1007	0.0005035	10.8966	0.0004909
200	200000	213.9	0.1070	0.0005348	11.4701	0.0005221
210	210000	230.4	0.1152	0.0005760	12.0436	0.0005634
220	220000	243.8	0.1219	0.0006095	12.6171	0.0005969
230	230000	254.3	0.1272	0.0006358	13.1906	0.0006231
240	240000	268.3	0.1342	0.0006708	13.7641	0.0006581
250	250000	290.8	0.1454	0.0007270	14.3376	0.0007144
260	260000	313.8	0.1569	0.0007845	14.9111	0.0007719
270	270000	335.8	0.1679	0.0008395	15.4846	0.0008269
280	280000	352.3	0.1762	0.0008808	16.0582	0.0008681
290	290000	369.8	0.1849	0.0009245	16.6317	0.0009119
300	300000	389.8	0.1949	0.0009745	17.2052	0.0009619
310	310000	405.8	0.2029	0.0010145	17.7787	0.0010019
320	320000	423.7	0.2119	0.0010593	18.3522	0.0010466
330	330000	438.7	0.2194	0.0010968	18.9257	0.0010841
340	340000	458.7	0.2294	0.0011468	19.4992	0.0011341
350	350000	476.2	0.2381	0.0011905	20.0727	0.0011779
340	340000	507.2	0.2536	0.0012680	19.4992	0.0012554
330	330000	533	0.2665	0.0013325	18.9257	0.0013199
320	320000	571.1	0.2856	0.0014278	18.3522	0.0014151

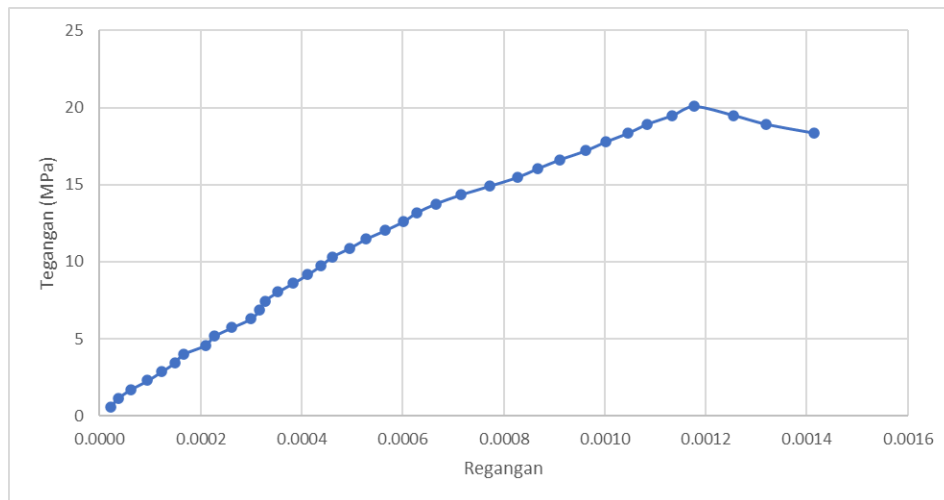


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	23058.513	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	21057.202	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

14. Modulus TM4 10M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	13.5	0.0068	0.0000338	0.5735	0.0000211
20	20000	19.7	0.0099	0.0000493	1.1470	0.0000366
30	30000	29.7	0.0149	0.0000743	1.7205	0.0000616
40	40000	43	0.0215	0.0001075	2.2940	0.0000949
50	50000	54	0.0270	0.0001350	2.8675	0.0001224
60	60000	64.5	0.0323	0.0001613	3.4410	0.0001486
70	70000	71.5	0.0358	0.0001788	4.0145	0.0001661
80	80000	88.9	0.0445	0.0002223	4.5880	0.0002096
90	90000	95.6	0.0478	0.0002390	5.1615	0.0002264
100	100000	109.9	0.0550	0.0002748	5.7351	0.0002621
110	110000	124.9	0.0625	0.0003123	6.3086	0.0002996
120	120000	131.9	0.0660	0.0003298	6.8821	0.0003171
130	130000	135.9	0.0680	0.0003398	7.4556	0.0003271
140	140000	145.9	0.0730	0.0003648	8.0291	0.0003521
150	150000	158.4	0.0792	0.0003960	8.6026	0.0003834
160	160000	169.9	0.0850	0.0004248	9.1761	0.0004121
170	170000	180.4	0.0902	0.0004510	9.7496	0.0004384
180	180000	189.4	0.0947	0.0004735	10.3231	0.0004609
190	190000	203.4	0.1017	0.0005085	10.8966	0.0004959
200	200000	215.9	0.1080	0.0005398	11.4701	0.0005271
210	210000	231.4	0.1157	0.0005785	12.0436	0.0005659
220	220000	245.8	0.1229	0.0006145	12.6171	0.0006019
230	230000	256.3	0.1282	0.0006408	13.1906	0.0006281
240	240000	271.3	0.1357	0.0006783	13.7641	0.0006656
250	250000	290.8	0.1454	0.0007270	14.3376	0.0007144
260	260000	313.8	0.1569	0.0007845	14.9111	0.0007719
270	270000	335.8	0.1679	0.0008395	15.4846	0.0008269
280	280000	352.3	0.1762	0.0008808	16.0582	0.0008681
290	290000	369.8	0.1849	0.0009245	16.6317	0.0009119
300	300000	389.8	0.1949	0.0009745	17.2052	0.0009619
310	310000	405.8	0.2029	0.0010145	17.7787	0.0010019
320	320000	423.7	0.2119	0.0010593	18.3522	0.0010466
330	330000	438.7	0.2194	0.0010968	18.9257	0.0010841
340	340000	458.7	0.2294	0.0011468	19.4992	0.0011341
350	350000	476.2	0.2381	0.0011905	20.0727	0.0011779
340	340000	507.2	0.2536	0.0012680	19.4992	0.0012554
330	330000	533	0.2665	0.0013325	18.9257	0.0013199
320	320000	571.1	0.2856	0.0014278	18.3522	0.0014151

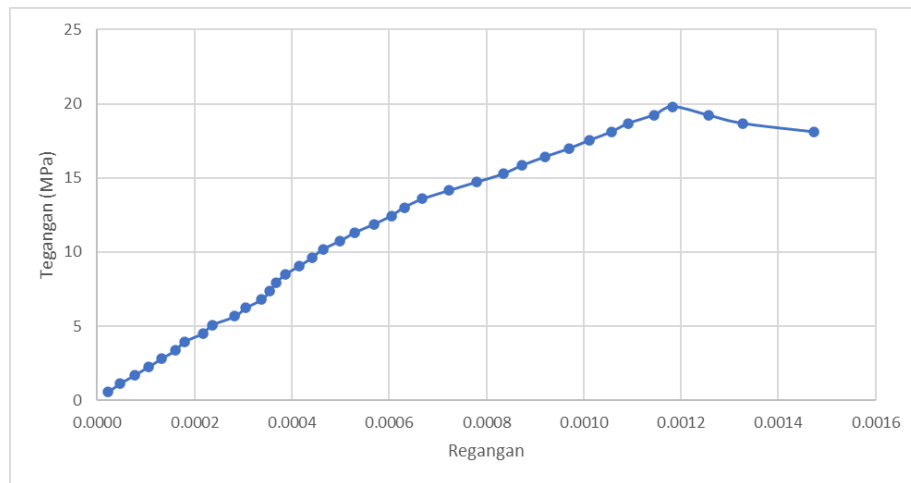


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	23058.513	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	21057.202	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

15. Modulus TM5 10M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	13	0.0065	0.0000325	0.5659	0.0000228
20	20000	22.5	0.0113	0.0000563	1.1318	0.0000465
30	30000	34.5	0.0173	0.0000863	1.6977	0.0000765
40	40000	46	0.0230	0.0001150	2.2635	0.0001053
50	50000	57	0.0285	0.0001425	2.8294	0.0001328
60	60000	68.5	0.0343	0.0001713	3.3953	0.0001615
70	70000	75.5	0.0378	0.0001888	3.9612	0.0001790
80	80000	90.9	0.0455	0.0002273	4.5271	0.0002175
90	90000	98.4	0.0492	0.0002460	5.0930	0.0002363
100	100000	116.9	0.0585	0.0002923	5.6588	0.0002825
110	110000	125.9	0.0630	0.0003148	6.2247	0.0003050
120	120000	138.9	0.0695	0.0003473	6.7906	0.0003375
130	130000	145.9	0.0730	0.0003648	7.3565	0.0003550
140	140000	150.9	0.0755	0.0003773	7.9224	0.0003675
150	150000	158.4	0.0792	0.0003960	8.4883	0.0003863
160	160000	169.9	0.0850	0.0004248	9.0541	0.0004150
170	170000	180.4	0.0902	0.0004510	9.6200	0.0004413
180	180000	189.4	0.0947	0.0004735	10.1859	0.0004638
190	190000	203.4	0.1017	0.0005085	10.7518	0.0004988
200	200000	215.9	0.1080	0.0005398	11.3177	0.0005300
210	210000	231.4	0.1157	0.0005785	11.8836	0.0005688
220	220000	245.8	0.1229	0.0006145	12.4495	0.0006048
230	230000	256.3	0.1282	0.0006408	13.0153	0.0006310
240	240000	271.3	0.1357	0.0006783	13.5812	0.0006685
250	250000	292.8	0.1464	0.0007320	14.1471	0.0007223
260	260000	315.8	0.1579	0.0007895	14.7130	0.0007798
270	270000	337.8	0.1689	0.0008445	15.2789	0.0008348
280	280000	353.3	0.1767	0.0008833	15.8448	0.0008735
290	290000	371.8	0.1859	0.0009295	16.4106	0.0009198
300	300000	391.8	0.1959	0.0009795	16.9765	0.0009698
310	310000	408.8	0.2044	0.0010220	17.5424	0.0010123
320	320000	426.7	0.2134	0.0010668	18.1083	0.0010570
330	330000	440.7	0.2204	0.0011018	18.6742	0.0010920
340	340000	461.7	0.2309	0.0011543	19.2401	0.0011445
350	350000	477.2	0.2386	0.0011930	19.8059	0.0011833
340	340000	506.2	0.2531	0.0012655	19.2401	0.0012558
330	330000	535	0.2675	0.0013375	18.6742	0.0013278
320	320000	593.1	0.2966	0.0014828	18.1083	0.0014730

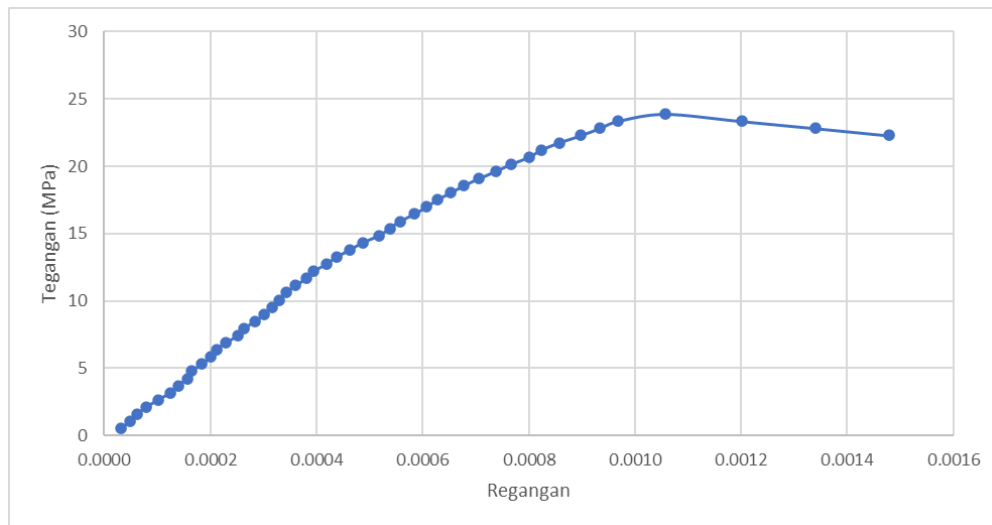


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	21604.030	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	20916.821	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

16. Modulus TM1 11M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	8	0.0040	0.0000200	0.5305	0.0000313
20	20000	15	0.0075	0.0000375	1.0611	0.0000488
30	30000	20	0.0100	0.0000500	1.5916	0.0000613
40	40000	27	0.0135	0.0000675	2.1221	0.0000788
50	50000	36	0.0180	0.0000900	2.6527	0.0001013
60	60000	45	0.0225	0.0001125	3.1832	0.0001238
70	70000	51	0.0255	0.0001275	3.7137	0.0001388
80	80000	58	0.0290	0.0001450	4.2443	0.0001563
90	90000	61	0.0305	0.0001525	4.7748	0.0001638
100	100000	69	0.0345	0.0001725	5.3053	0.0001838
110	110000	76	0.0380	0.0001900	5.8359	0.0002013
120	120000	80	0.0400	0.0002000	6.3664	0.0002113
130	130000	87	0.0435	0.0002175	6.8970	0.0002288
140	140000	96	0.0480	0.0002400	7.4275	0.0002513
150	150000	100.5	0.0503	0.0002513	7.9580	0.0002626
160	160000	109.4	0.0547	0.0002735	8.4886	0.0002848
170	170000	116.1	0.0581	0.0002903	9.0191	0.0003016
180	180000	122.2	0.0611	0.0003055	9.5496	0.0003168
190	190000	127.2	0.0636	0.0003180	10.0802	0.0003293
200	200000	132.3	0.0662	0.0003308	10.6107	0.0003421
210	210000	139.7	0.0699	0.0003493	11.1412	0.0003606
220	220000	147.5	0.0738	0.0003688	11.6718	0.0003801
230	230000	152.9	0.0765	0.0003823	12.2023	0.0003936
240	240000	162.9	0.0815	0.0004073	12.7328	0.0004186
250	250000	170.4	0.0852	0.0004260	13.2634	0.0004373
260	260000	180.5	0.0903	0.0004513	13.7939	0.0004626
270	270000	190.1	0.0951	0.0004753	14.3244	0.0004866
280	280000	202.2	0.1011	0.0005055	14.8550	0.0005168
290	290000	210.7	0.1054	0.0005268	15.3855	0.0005381
300	300000	218.2	0.1091	0.0005455	15.9160	0.0005568
310	310000	229.2	0.1146	0.0005730	16.4466	0.0005843
320	320000	238.2	0.1191	0.0005955	16.9771	0.0006068
330	330000	246.5	0.1233	0.0006163	17.5076	0.0006276
340	340000	256.7	0.1284	0.0006418	18.0382	0.0006531
350	350000	266.6	0.1333	0.0006665	18.5687	0.0006778
360	360000	278.1	0.1391	0.0006953	19.0993	0.0007066
370	370000	290.7	0.1454	0.0007268	19.6298	0.0007381
380	380000	302.4	0.1512	0.0007560	20.1603	0.0007673
390	390000	315.9	0.1580	0.0007898	20.6909	0.0008011
400	400000	325.1	0.1626	0.0008128	21.2214	0.0008241
410	410000	338.4	0.1692	0.0008460	21.7519	0.0008573
420	420000	354.6	0.1773	0.0008865	22.2825	0.0008978
430	430000	368.9	0.1845	0.0009223	22.8130	0.0009336
440	440000	382.7	0.1914	0.0009568	23.3435	0.0009681
450	450000	418.3	0.2092	0.0010458	23.8741	0.0010571
440	440000	475.9	0.2380	0.0011898	23.3435	0.0012011
430	430000	531.8	0.2659	0.0013295	22.8130	0.0013408
420	420000	586.8	0.2934	0.0014670	22.2825	0.0014783

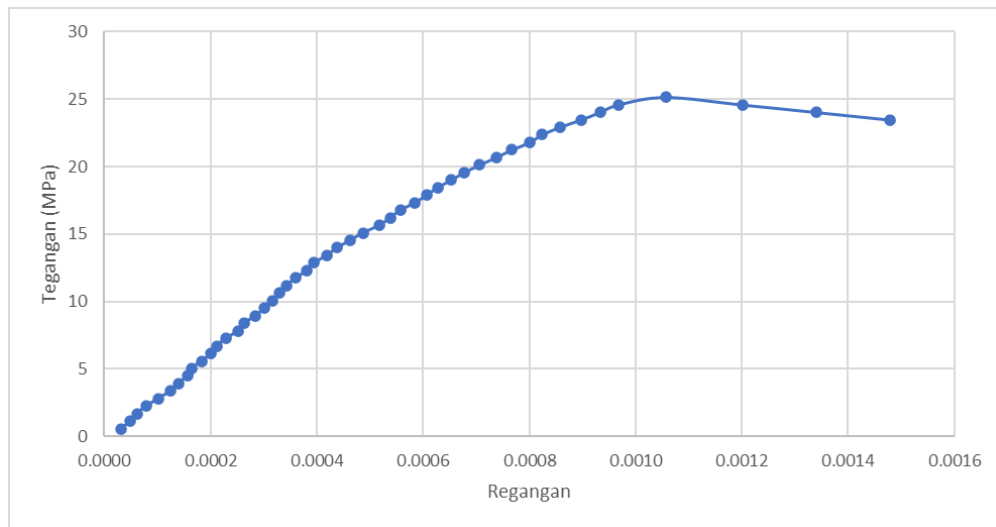


ASTM C-469	$(s_2-s_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$	29780.080	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	22964.713	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

17. Modulus TM2 11M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	8	0.0040	0.0000200	0.5590	0.0000313
20	20000	15	0.0075	0.0000375	1.1181	0.0000488
30	30000	20	0.0100	0.0000500	1.6771	0.0000613
40	40000	27	0.0135	0.0000675	2.2361	0.0000788
50	50000	36	0.0180	0.0000900	2.7952	0.0001013
60	60000	45	0.0225	0.0001125	3.3542	0.0001238
70	70000	51	0.0255	0.0001275	3.9132	0.0001388
80	80000	58	0.0290	0.0001450	4.4722	0.0001563
90	90000	61	0.0305	0.0001525	5.0313	0.0001638
100	100000	69	0.0345	0.0001725	5.5903	0.0001838
110	110000	76	0.0380	0.0001900	6.1493	0.0002013
120	120000	80	0.0400	0.0002000	6.7084	0.0002113
130	130000	87	0.0435	0.0002175	7.2674	0.0002288
140	140000	96	0.0480	0.0002400	7.8264	0.0002513
150	150000	100.5	0.0503	0.0002513	8.3855	0.0002626
160	160000	109.4	0.0547	0.0002735	8.9445	0.0002848
170	170000	116.1	0.0581	0.0002903	9.5035	0.0003016
180	180000	122.2	0.0611	0.0003055	10.0626	0.0003168
190	190000	127.2	0.0636	0.0003180	10.6216	0.0003293
200	200000	132.3	0.0662	0.0003308	11.1806	0.0003421
210	210000	139.7	0.0699	0.0003493	11.7396	0.0003606
220	220000	147.5	0.0738	0.0003688	12.2987	0.0003801
230	230000	152.9	0.0765	0.0003823	12.8577	0.0003936
240	240000	162.9	0.0815	0.0004073	13.4167	0.0004186
250	250000	170.4	0.0852	0.0004260	13.9758	0.0004373
260	260000	180.5	0.0903	0.0004513	14.5348	0.0004626
270	270000	190.1	0.0951	0.0004753	15.0938	0.0004866
280	280000	202.2	0.1011	0.0005055	15.6529	0.0005168
290	290000	210.7	0.1054	0.0005268	16.2119	0.0005381
300	300000	218.2	0.1091	0.0005455	16.7709	0.0005568
310	310000	229.2	0.1146	0.0005730	17.3300	0.0005843
320	320000	238.2	0.1191	0.0005955	17.8890	0.0006068
330	330000	246.5	0.1233	0.0006163	18.4480	0.0006276
340	340000	256.7	0.1284	0.0006418	19.0070	0.0006531
350	350000	266.6	0.1333	0.0006665	19.5661	0.0006778
360	360000	278.1	0.1391	0.0006953	20.1251	0.0007066
370	370000	290.7	0.1454	0.0007268	20.6841	0.0007381
380	380000	302.4	0.1512	0.0007560	21.2432	0.0007673
390	390000	315.9	0.1580	0.0007898	21.8022	0.0008011
400	400000	325.1	0.1626	0.0008128	22.3612	0.0008241
410	410000	338.4	0.1692	0.0008460	22.9203	0.0008573
420	420000	354.6	0.1773	0.0008865	23.4793	0.0008978
430	430000	368.9	0.1845	0.0009223	24.0383	0.0009336
440	440000	382.7	0.1914	0.0009568	24.5974	0.0009681
450	450000	418.3	0.2092	0.0010458	25.1564	0.0010571
440	440000	475.9	0.2380	0.0011898	24.5974	0.0012011
430	430000	531.8	0.2659	0.0013295	24.0383	0.0013408
420	420000	586.8	0.2934	0.0014670	23.4793	0.0014783

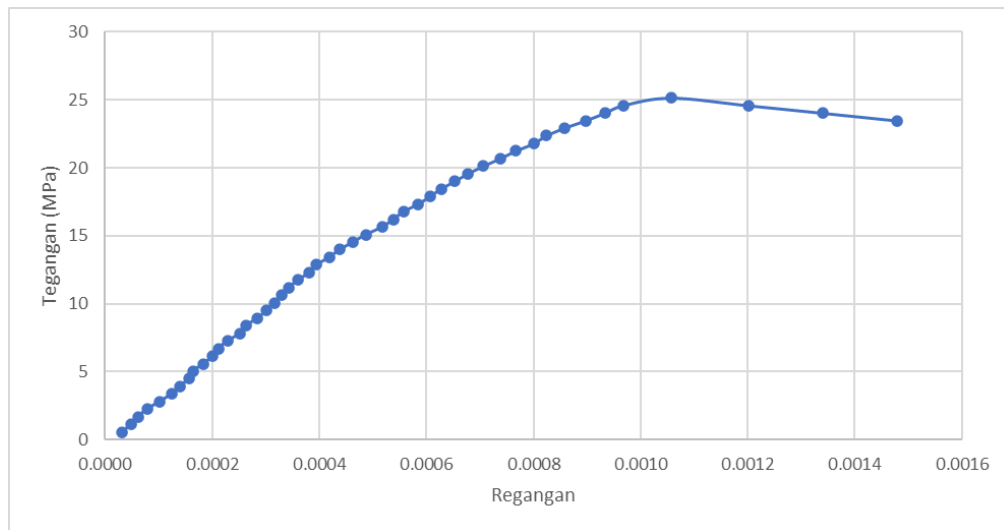


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	31702.600	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23573.386	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

18. Modulus TM3 11M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	8	0.0040	0.0000200	0.5590	0.0000313
20	20000	15	0.0075	0.0000375	1.1181	0.0000488
30	30000	20	0.0100	0.0000500	1.6771	0.0000613
40	40000	27	0.0135	0.0000675	2.2361	0.0000788
50	50000	36	0.0180	0.0000900	2.7952	0.0001013
60	60000	45	0.0225	0.0001125	3.3542	0.0001238
70	70000	51	0.0255	0.0001275	3.9132	0.0001388
80	80000	58	0.0290	0.0001450	4.4722	0.0001563
90	90000	61	0.0305	0.0001525	5.0313	0.0001638
100	100000	69	0.0345	0.0001725	5.5903	0.0001838
110	110000	76	0.0380	0.0001900	6.1493	0.0002013
120	120000	80	0.0400	0.0002000	6.7084	0.0002113
130	130000	87	0.0435	0.0002175	7.2674	0.0002288
140	140000	96	0.0480	0.0002400	7.8264	0.0002513
150	150000	100.5	0.0503	0.0002513	8.3855	0.0002626
160	160000	109.4	0.0547	0.0002735	8.9445	0.0002848
170	170000	116.1	0.0581	0.0002903	9.5035	0.0003016
180	180000	122.2	0.0611	0.0003055	10.0626	0.0003168
190	190000	127.2	0.0636	0.0003180	10.6216	0.0003293
200	200000	132.3	0.0662	0.0003308	11.1806	0.0003421
210	210000	139.7	0.0699	0.0003493	11.7396	0.0003606
220	220000	147.5	0.0738	0.0003688	12.2987	0.0003801
230	230000	152.9	0.0765	0.0003823	12.8577	0.0003936
240	240000	162.9	0.0815	0.0004073	13.4167	0.0004186
250	250000	170.4	0.0852	0.0004260	13.9758	0.0004373
260	260000	180.5	0.0903	0.0004513	14.5348	0.0004626
270	270000	190.1	0.0951	0.0004753	15.0938	0.0004866
280	280000	202.2	0.1011	0.0005055	15.6529	0.0005168
290	290000	210.7	0.1054	0.0005268	16.2119	0.0005381
300	300000	218.2	0.1091	0.0005455	16.7709	0.0005568
310	310000	229.2	0.1146	0.0005730	17.3300	0.0005843
320	320000	238.2	0.1191	0.0005955	17.8890	0.0006068
330	330000	246.5	0.1233	0.0006163	18.4480	0.0006276
340	340000	256.7	0.1284	0.0006418	19.0070	0.0006531
350	350000	266.6	0.1333	0.0006665	19.5661	0.0006778
360	360000	278.1	0.1391	0.0006953	20.1251	0.0007066
370	370000	290.7	0.1454	0.0007268	20.6841	0.0007381
380	380000	302.4	0.1512	0.0007560	21.2432	0.0007673
390	390000	315.9	0.1580	0.0007898	21.8022	0.0008011
400	400000	325.1	0.1626	0.0008128	22.3612	0.0008241
410	410000	338.4	0.1692	0.0008460	22.9203	0.0008573
420	420000	354.6	0.1773	0.0008865	23.4793	0.0008978
430	430000	368.9	0.1845	0.0009223	24.0383	0.0009336
440	440000	382.7	0.1914	0.0009568	24.5974	0.0009681
450	450000	418.3	0.2092	0.0010458	25.1564	0.0010571
440	440000	475.9	0.2380	0.0011898	24.5974	0.0012011
430	430000	531.8	0.2659	0.0013295	24.0383	0.0013408
420	420000	586.8	0.2934	0.0014670	23.4793	0.0014783

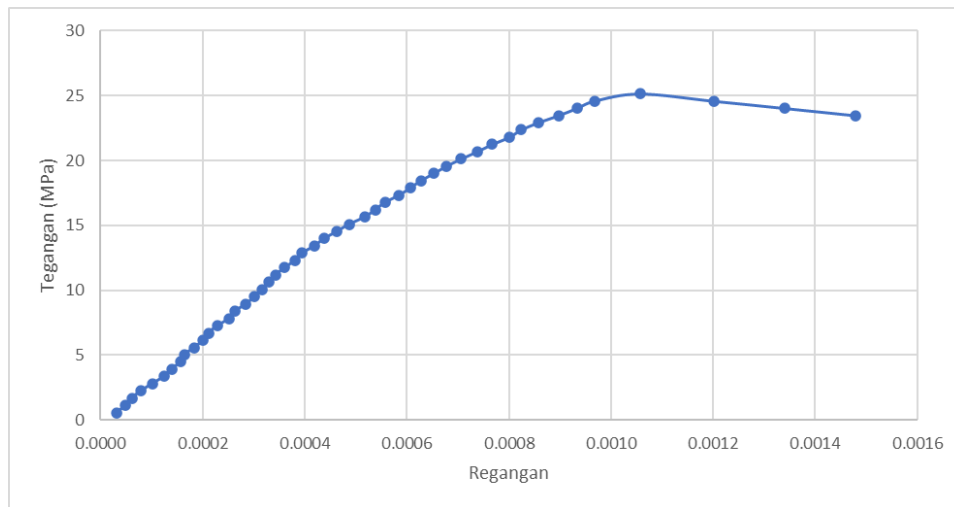


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	31702.600	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23573.386	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

19. Modulus TM4 11M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	8	0.0040	0.0000200	0.5590	0.0000313
20	20000	15	0.0075	0.0000375	1.1181	0.0000488
30	30000	20	0.0100	0.0000500	1.6771	0.0000613
40	40000	27	0.0135	0.0000675	2.2361	0.0000788
50	50000	36	0.0180	0.0000900	2.7952	0.0001013
60	60000	45	0.0225	0.0001125	3.3542	0.0001238
70	70000	51	0.0255	0.0001275	3.9132	0.0001388
80	80000	58	0.0290	0.0001450	4.4722	0.0001563
90	90000	61	0.0305	0.0001525	5.0313	0.0001638
100	100000	69	0.0345	0.0001725	5.5903	0.0001838
110	110000	76	0.0380	0.0001900	6.1493	0.0002013
120	120000	80	0.0400	0.0002000	6.7084	0.0002113
130	130000	87	0.0435	0.0002175	7.2674	0.0002288
140	140000	96	0.0480	0.0002400	7.8264	0.0002513
150	150000	100.5	0.0503	0.0002513	8.3855	0.0002626
160	160000	109.4	0.0547	0.0002735	8.9445	0.0002848
170	170000	116.1	0.0581	0.0002903	9.5035	0.0003016
180	180000	122.2	0.0611	0.0003055	10.0626	0.0003168
190	190000	127.2	0.0636	0.0003180	10.6216	0.0003293
200	200000	132.3	0.0662	0.0003308	11.1806	0.0003421
210	210000	139.7	0.0699	0.0003493	11.7396	0.0003606
220	220000	147.5	0.0738	0.0003688	12.2987	0.0003801
230	230000	152.9	0.0765	0.0003823	12.8577	0.0003936
240	240000	162.9	0.0815	0.0004073	13.4167	0.0004186
250	250000	170.4	0.0852	0.0004260	13.9758	0.0004373
260	260000	180.5	0.0903	0.0004513	14.5348	0.0004626
270	270000	190.1	0.0951	0.0004753	15.0938	0.0004866
280	280000	202.2	0.1011	0.0005055	15.6529	0.0005168
290	290000	210.7	0.1054	0.0005268	16.2119	0.0005381
300	300000	218.2	0.1091	0.0005455	16.7709	0.0005568
310	310000	229.2	0.1146	0.0005730	17.3300	0.0005843
320	320000	238.2	0.1191	0.0005955	17.8890	0.0006068
330	330000	246.5	0.1233	0.0006163	18.4480	0.0006276
340	340000	256.7	0.1284	0.0006418	19.0070	0.0006531
350	350000	266.6	0.1333	0.0006665	19.5661	0.0006778
360	360000	278.1	0.1391	0.0006953	20.1251	0.0007066
370	370000	290.7	0.1454	0.0007268	20.6841	0.0007381
380	380000	302.4	0.1512	0.0007560	21.2432	0.0007673
390	390000	315.9	0.1580	0.0007898	21.8022	0.0008011
400	400000	325.1	0.1626	0.0008128	22.3612	0.0008241
410	410000	338.4	0.1692	0.0008460	22.9203	0.0008573
420	420000	354.6	0.1773	0.0008865	23.4793	0.0008978
430	430000	368.9	0.1845	0.0009223	24.0383	0.0009336
440	440000	382.7	0.1914	0.0009568	24.5974	0.0009681
450	450000	418.3	0.2092	0.0010458	25.1564	0.0010571
440	440000	475.9	0.2380	0.0011898	24.5974	0.0012011
430	430000	531.8	0.2659	0.0013295	24.0383	0.0013408
420	420000	586.8	0.2934	0.0014670	23.4793	0.0014783

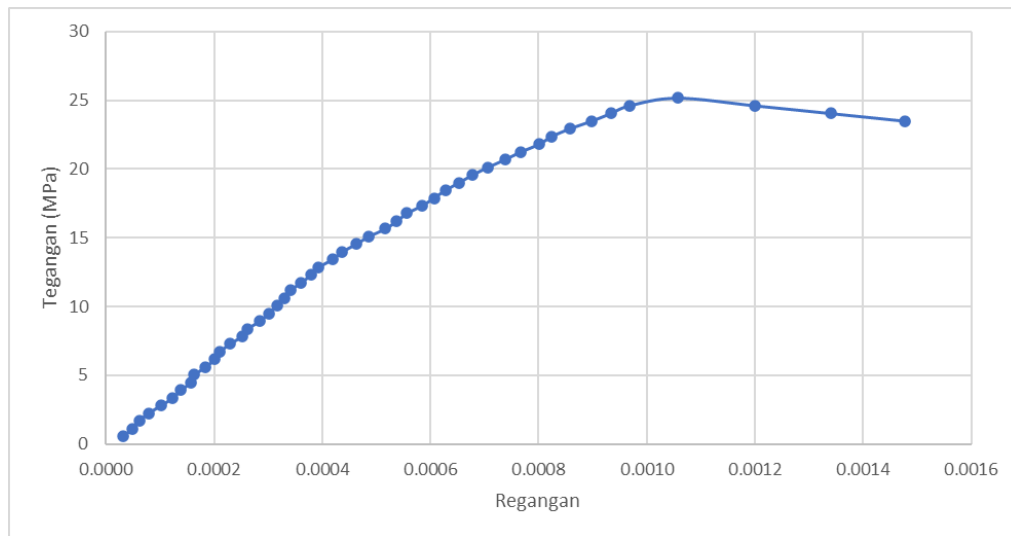


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	31702.600	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23573.386	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

20. Modulus TM5 11M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	8	0.0040	0.0000200	0.5590	0.0000313
20	20000	15	0.0075	0.0000375	1.1181	0.0000488
30	30000	20	0.0100	0.0000500	1.6771	0.0000613
40	40000	27	0.0135	0.0000675	2.2361	0.0000788
50	50000	36	0.0180	0.0000900	2.7952	0.0001013
60	60000	45	0.0225	0.0001125	3.3542	0.0001238
70	70000	51	0.0255	0.0001275	3.9132	0.0001388
80	80000	58	0.0290	0.0001450	4.4722	0.0001563
90	90000	61	0.0305	0.0001525	5.0313	0.0001638
100	100000	69	0.0345	0.0001725	5.5903	0.0001838
110	110000	76	0.0380	0.0001900	6.1493	0.0002013
120	120000	80	0.0400	0.0002000	6.7084	0.0002113
130	130000	87	0.0435	0.0002175	7.2674	0.0002288
140	140000	96	0.0480	0.0002400	7.8264	0.0002513
150	150000	100.5	0.0503	0.0002513	8.3855	0.0002626
160	160000	109.4	0.0547	0.0002735	8.9445	0.0002848
170	170000	116.1	0.0581	0.0002903	9.5035	0.0003016
180	180000	122.2	0.0611	0.0003055	10.0626	0.0003168
190	190000	127.2	0.0636	0.0003180	10.6216	0.0003293
200	200000	132.3	0.0662	0.0003308	11.1806	0.0003421
210	210000	139.7	0.0699	0.0003493	11.7396	0.0003606
220	220000	147.5	0.0738	0.0003688	12.2987	0.0003801
230	230000	152.9	0.0765	0.0003823	12.8577	0.0003936
240	240000	162.9	0.0815	0.0004073	13.4167	0.0004186
250	250000	170.4	0.0852	0.0004260	13.9758	0.0004373
260	260000	180.5	0.0903	0.0004513	14.5348	0.0004626
270	270000	190.1	0.0951	0.0004753	15.0938	0.0004866
280	280000	202.2	0.1011	0.0005055	15.6529	0.0005168
290	290000	210.7	0.1054	0.0005268	16.2119	0.0005381
300	300000	218.2	0.1091	0.0005455	16.7709	0.0005568
310	310000	229.2	0.1146	0.0005730	17.3300	0.0005843
320	320000	238.2	0.1191	0.0005955	17.8890	0.0006068
330	330000	246.5	0.1233	0.0006163	18.4480	0.0006276
340	340000	256.7	0.1284	0.0006418	19.0070	0.0006531
350	350000	266.6	0.1333	0.0006665	19.5661	0.0006778
360	360000	278.1	0.1391	0.0006953	20.1251	0.0007066
370	370000	290.7	0.1454	0.0007268	20.6841	0.0007381
380	380000	302.4	0.1512	0.0007560	21.2432	0.0007673
390	390000	315.9	0.1580	0.0007898	21.8022	0.0008011
400	400000	325.1	0.1626	0.0008128	22.3612	0.0008241
410	410000	338.4	0.1692	0.0008460	22.9203	0.0008573
420	420000	354.6	0.1773	0.0008865	23.4793	0.0008978
430	430000	368.9	0.1845	0.0009223	24.0383	0.0009336
440	440000	382.7	0.1914	0.0009568	24.5974	0.0009681
450	450000	418.3	0.2092	0.0010458	25.1564	0.0010571
440	440000	475.9	0.2380	0.0011898	24.5974	0.0012011
430	430000	531.8	0.2659	0.0013295	24.0383	0.0013408
420	420000	586.8	0.2934	0.0014670	23.4793	0.0014783

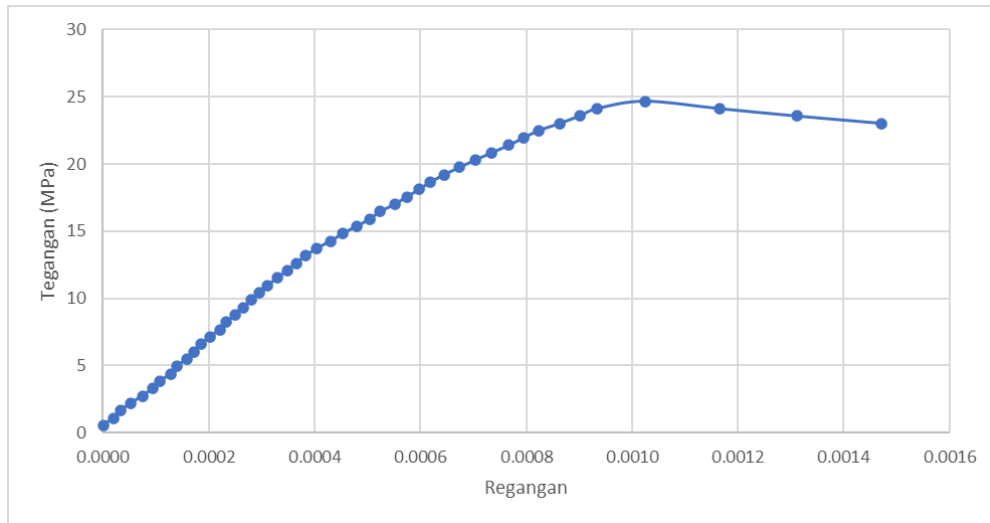


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	31702.600	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23573.386	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

21. Modulus TM1 12M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	11	0.0055	0.0000275	0.5483	0.0000005
20	20000	18.5	0.0093	0.0000463	1.0966	0.0000193
30	30000	24	0.0120	0.0000600	1.6450	0.0000330
40	40000	32	0.0160	0.0000800	2.1933	0.0000530
50	50000	40.5	0.0203	0.0001013	2.7416	0.0000743
60	60000	48.5	0.0243	0.0001213	3.2899	0.0000943
70	70000	54	0.0270	0.0001350	3.8382	0.0001081
80	80000	62	0.0310	0.0001550	4.3866	0.0001281
90	90000	66.5	0.0333	0.0001663	4.9349	0.0001393
100	100000	74	0.0370	0.0001850	5.4832	0.0001581
110	110000	79.5	0.0398	0.0001988	6.0315	0.0001718
120	120000	84.9	0.0425	0.0002123	6.5799	0.0001853
130	130000	91.9	0.0460	0.0002298	7.1282	0.0002028
140	140000	99	0.0495	0.0002475	7.6765	0.0002206
150	150000	104.1	0.0521	0.0002603	8.2248	0.0002333
160	160000	111.1	0.0556	0.0002778	8.7731	0.0002508
170	170000	117.1	0.0586	0.0002928	9.3215	0.0002658
180	180000	123.1	0.0616	0.0003078	9.8698	0.0002808
190	190000	129.1	0.0646	0.0003228	10.4181	0.0002958
200	200000	135.4	0.0677	0.0003385	10.9664	0.0003116
210	210000	142.9	0.0715	0.0003573	11.5147	0.0003303
220	220000	149.9	0.0750	0.0003748	12.0631	0.0003478
230	230000	156.9	0.0785	0.0003923	12.6114	0.0003653
240	240000	163.9	0.0820	0.0004098	13.1597	0.0003828
250	250000	172.4	0.0862	0.0004310	13.7080	0.0004041
260	260000	182.9	0.0915	0.0004573	14.2564	0.0004303
270	270000	192	0.0960	0.0004800	14.8047	0.0004531
280	280000	202.4	0.1012	0.0005060	15.3530	0.0004791
290	290000	212.8	0.1064	0.0005320	15.9013	0.0005051
300	300000	220.4	0.1102	0.0005510	16.4496	0.0005241
310	310000	231.4	0.1157	0.0005785	16.9980	0.0005516
320	320000	240.4	0.1202	0.0006010	17.5463	0.0005741
330	330000	249.9	0.1250	0.0006248	18.0946	0.0005978
340	340000	258.3	0.1292	0.0006458	18.6429	0.0006188
350	350000	268.8	0.1344	0.0006720	19.1912	0.0006451
360	360000	280.3	0.1402	0.0007008	19.7396	0.0006738
370	370000	292.3	0.1462	0.0007308	20.2879	0.0007038
380	380000	304.8	0.1524	0.0007620	20.8362	0.0007351
390	390000	317.6	0.1588	0.0007940	21.3845	0.0007671
400	400000	328.6	0.1643	0.0008215	21.9329	0.0007946
410	410000	340.3	0.1702	0.0008508	22.4812	0.0008238
420	420000	356.3	0.1782	0.0008908	23.0295	0.0008638
430	430000	371.3	0.1857	0.0009283	23.5778	0.0009013
440	440000	384.6	0.1923	0.0009615	24.1261	0.0009346
450	450000	420.6	0.2103	0.0010515	24.6745	0.0010246
440	440000	477.2	0.2386	0.0011930	24.1261	0.0011661
430	430000	535.2	0.2676	0.0013380	23.5778	0.0013111
420	420000	599.2	0.2996	0.0014980	23.0295	0.0014711

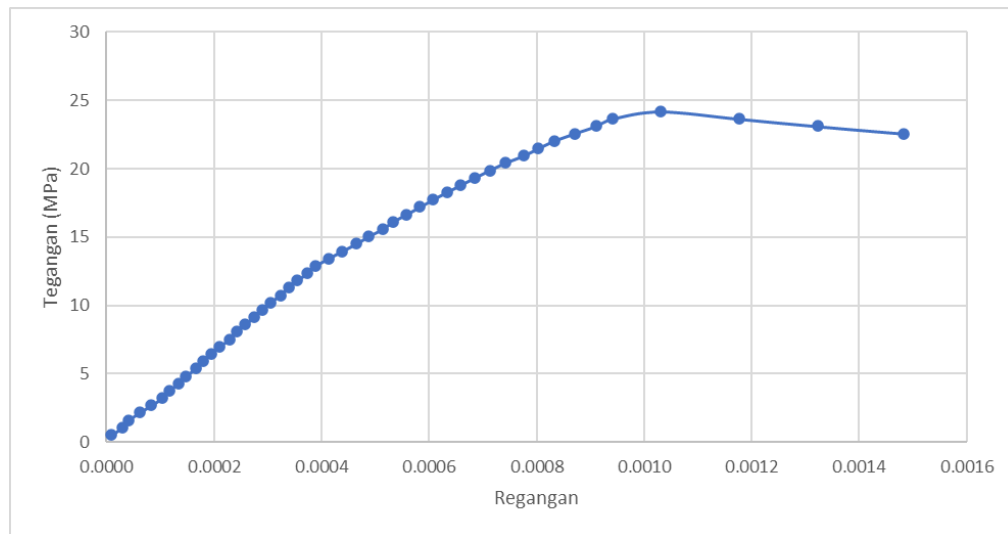


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	35815.792	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23346.496	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

22. Modulus TM2 12M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	10	0.0050	0.0000250	0.5375	0.0000096
20	20000	18.2	0.0091	0.0000455	1.0749	0.0000301
30	30000	22.8	0.0114	0.0000570	1.6124	0.0000416
40	40000	30.7	0.0154	0.0000768	2.1498	0.0000613
50	50000	39.5	0.0198	0.0000988	2.6873	0.0000833
60	60000	47.6	0.0238	0.0001190	3.2247	0.0001036
70	70000	52.8	0.0264	0.0001320	3.7622	0.0001166
80	80000	59.8	0.0299	0.0001495	4.2996	0.0001341
90	90000	64.9	0.0325	0.0001623	4.8371	0.0001468
100	100000	72.9	0.0365	0.0001823	5.3745	0.0001668
110	110000	78.3	0.0392	0.0001958	5.9120	0.0001803
120	120000	83.8	0.0419	0.0002095	6.4494	0.0001941
130	130000	89.9	0.0450	0.0002248	6.9869	0.0002093
140	140000	98	0.0490	0.0002450	7.5243	0.0002296
150	150000	103.1	0.0516	0.0002578	8.0618	0.0002423
160	160000	109.1	0.0546	0.0002728	8.5992	0.0002573
170	170000	116.1	0.0581	0.0002903	9.1367	0.0002748
180	180000	122.1	0.0611	0.0003053	9.6741	0.0002898
190	190000	128.1	0.0641	0.0003203	10.2116	0.0003048
200	200000	135.4	0.0677	0.0003385	10.7490	0.0003231
210	210000	141.9	0.0710	0.0003548	11.2865	0.0003393
220	220000	147.9	0.0740	0.0003698	11.8239	0.0003543
230	230000	155.9	0.0780	0.0003898	12.3614	0.0003743
240	240000	161.9	0.0810	0.0004048	12.8988	0.0003893
250	250000	171.4	0.0857	0.0004285	13.4363	0.0004131
260	260000	181.6	0.0908	0.0004540	13.9737	0.0004386
270	270000	192	0.0960	0.0004800	14.5112	0.0004646
280	280000	201.2	0.1006	0.0005030	15.0486	0.0004876
290	290000	211.6	0.1058	0.0005290	15.5861	0.0005136
300	300000	219.4	0.1097	0.0005485	16.1235	0.0005331
310	310000	229.4	0.1147	0.0005735	16.6610	0.0005581
320	320000	239.4	0.1197	0.0005985	17.1984	0.0005831
330	330000	248.9	0.1245	0.0006223	17.7359	0.0006068
340	340000	259.3	0.1297	0.0006483	18.2733	0.0006328
350	350000	269.8	0.1349	0.0006745	18.8108	0.0006591
360	360000	280.3	0.1402	0.0007008	19.3482	0.0006853
370	370000	291.3	0.1457	0.0007283	19.8857	0.0007128
380	380000	302.8	0.1514	0.0007570	20.4231	0.0007416
390	390000	316.6	0.1583	0.0007915	20.9606	0.0007761
400	400000	327.6	0.1638	0.0008190	21.4980	0.0008036
410	410000	339.3	0.1697	0.0008483	22.0355	0.0008328
420	420000	354.3	0.1772	0.0008858	22.5729	0.0008703
430	430000	370.3	0.1852	0.0009258	23.1104	0.0009103
440	440000	382.6	0.1913	0.0009565	23.6478	0.0009411
450	450000	418.6	0.2093	0.0010465	24.1853	0.0010311
440	440000	477.2	0.2386	0.0011930	23.6478	0.0011776
430	430000	535.2	0.2676	0.0013380	23.1104	0.0013226
420	420000	599.2	0.2996	0.0014980	22.5729	0.0014826

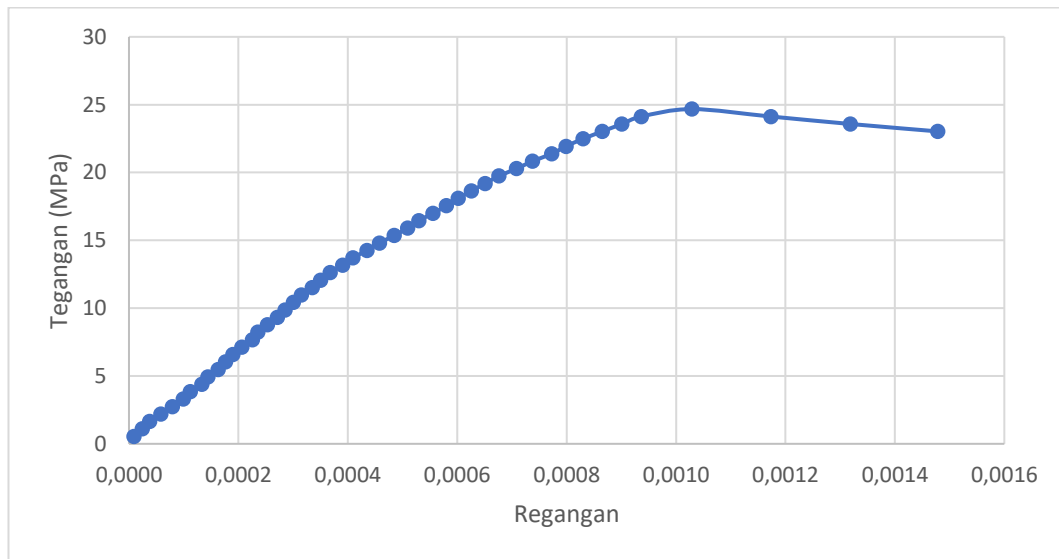


ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	35533.014	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23113.916	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

23. Modulus TM3 12M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	11.5	0.0058	0.0000288	0.5483	0.0000093
20	20000	17.5	0.0088	0.0000438	1.0966	0.0000243
30	30000	23	0.0115	0.0000575	1.6450	0.0000381
40	40000	31	0.0155	0.0000775	2.1933	0.0000581
50	50000	39.4	0.0197	0.0000985	2.7416	0.0000791
60	60000	47.5	0.0238	0.0001188	3.2899	0.0000993
70	70000	52.5	0.0263	0.0001313	3.8382	0.0001118
80	80000	61	0.0305	0.0001525	4.3866	0.0001331
90	90000	65.5	0.0328	0.0001638	4.9349	0.0001443
100	100000	73	0.0365	0.0001825	5.4832	0.0001631
110	110000	78.4	0.0392	0.0001960	6.0315	0.0001766
120	120000	83.7	0.0419	0.0002093	6.5799	0.0001898
130	130000	90.2	0.0451	0.0002255	7.1282	0.0002061
140	140000	98	0.0490	0.0002450	7.6765	0.0002256
150	150000	102.1	0.0511	0.0002553	8.2248	0.0002358
160	160000	109.1	0.0546	0.0002728	8.7731	0.0002533
170	170000	116.3	0.0582	0.0002908	9.3215	0.0002713
180	180000	121.9	0.0610	0.0003048	9.8698	0.0002853
190	190000	127.9	0.0640	0.0003198	10.4181	0.0003003
200	200000	133.8	0.0669	0.0003345	10.9664	0.0003151
210	210000	141.7	0.0709	0.0003543	11.5147	0.0003348
220	220000	147.9	0.0740	0.0003698	12.0631	0.0003503
230	230000	154.9	0.0775	0.0003873	12.6114	0.0003678
240	240000	163.9	0.0820	0.0004098	13.1597	0.0003903
250	250000	171.4	0.0857	0.0004285	13.7080	0.0004091
260	260000	181.9	0.0910	0.0004548	14.2564	0.0004353
270	270000	191	0.0955	0.0004775	14.8047	0.0004581
280	280000	201.6	0.1008	0.0005040	15.3530	0.0004846
290	290000	211.5	0.1058	0.0005288	15.9013	0.0005093
300	300000	219.7	0.1099	0.0005493	16.4496	0.0005298
310	310000	230.1	0.1151	0.0005753	16.9980	0.0005558
320	320000	239.9	0.1200	0.0005998	17.5463	0.0005803
330	330000	248.5	0.1243	0.0006213	18.0946	0.0006018
340	340000	258.1	0.1291	0.0006453	18.6429	0.0006258
350	350000	268.2	0.1341	0.0006705	19.1912	0.0006511
360	360000	278.3	0.1392	0.0006958	19.7396	0.0006763
370	370000	291.2	0.1456	0.0007280	20.2879	0.0007086
380	380000	302.9	0.1515	0.0007573	20.8362	0.0007378
390	390000	316.9	0.1585	0.0007923	21.3845	0.0007728
400	400000	327.4	0.1637	0.0008185	21.9329	0.0007991
410	410000	339.7	0.1699	0.0008493	22.4812	0.0008298
420	420000	353.9	0.1770	0.0008848	23.0295	0.0008653
430	430000	368.1	0.1841	0.0009203	23.5778	0.0009008
440	440000	382.4	0.1912	0.0009560	24.1261	0.0009366
450	450000	419.4	0.2097	0.0010485	24.6745	0.0010291
440	440000	477.2	0.2386	0.0011930	24.1261	0.0011736
430	430000	535.2	0.2676	0.0013380	23.5778	0.0013186
420	420000	599.2	0.2996	0.0014980	23.0295	0.0014786

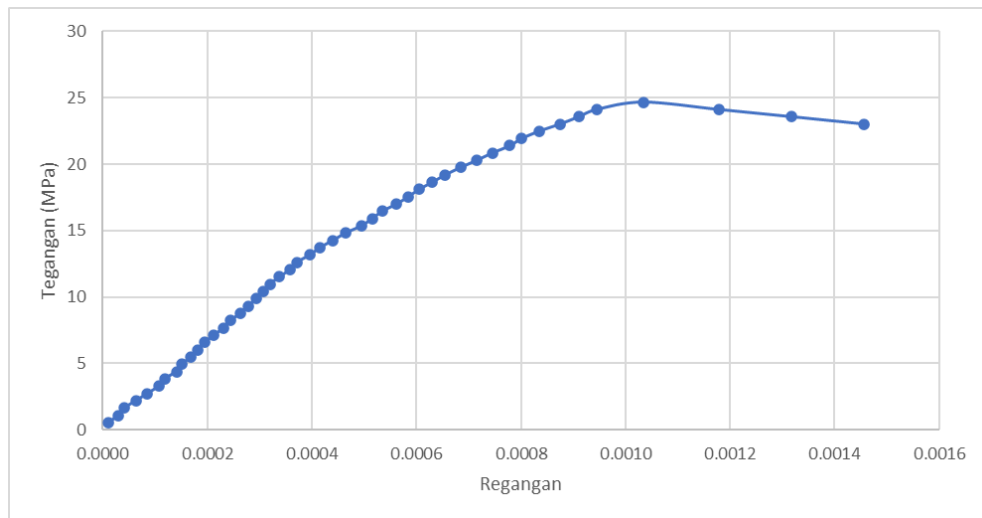


ASTM C-469	$(s_2-s_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$	35063.684	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23346.496	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

24. Modulus TM4 12M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ϵ	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ϵ
kN	N					
10	10000	9	0.0045	0.0000225	0.5483	0.0000113
20	20000	16.2	0.0081	0.0000405	1.0966	0.0000293
30	30000	21	0.0105	0.0000525	1.6450	0.0000413
40	40000	29.9	0.0150	0.0000748	2.1933	0.0000636
50	50000	38.7	0.0194	0.0000968	2.7416	0.0000856
60	60000	47.1	0.0236	0.0001178	3.2899	0.0001066
70	70000	51.7	0.0259	0.0001293	3.8382	0.0001181
80	80000	60.8	0.0304	0.0001520	4.3866	0.0001408
90	90000	64.7	0.0324	0.0001618	4.9349	0.0001506
100	100000	72	0.0360	0.0001800	5.4832	0.0001688
110	110000	77.4	0.0387	0.0001935	6.0315	0.0001823
120	120000	82.4	0.0412	0.0002060	6.5799	0.0001948
130	130000	89.5	0.0448	0.0002238	7.1282	0.0002126
140	140000	97	0.0485	0.0002425	7.6765	0.0002313
150	150000	102.5	0.0513	0.0002563	8.2248	0.0002451
160	160000	109.4	0.0547	0.0002735	8.7731	0.0002623
170	170000	116.1	0.0581	0.0002903	9.3215	0.0002791
180	180000	122.2	0.0611	0.0003055	9.8698	0.0002943
190	190000	127.2	0.0636	0.0003180	10.4181	0.0003068
200	200000	132.3	0.0662	0.0003308	10.9664	0.0003196
210	210000	139.7	0.0699	0.0003493	11.5147	0.0003381
220	220000	147.5	0.0738	0.0003688	12.0631	0.0003576
230	230000	152.9	0.0765	0.0003823	12.6114	0.0003711
240	240000	162.9	0.0815	0.0004073	13.1597	0.0003961
250	250000	170.4	0.0852	0.0004260	13.7080	0.0004148
260	260000	180.5	0.0903	0.0004513	14.2564	0.0004401
270	270000	190.1	0.0951	0.0004753	14.8047	0.0004641
280	280000	202.2	0.1011	0.0005055	15.3530	0.0004943
290	290000	210.7	0.1054	0.0005268	15.9013	0.0005156
300	300000	218.2	0.1091	0.0005455	16.4496	0.0005343
310	310000	229.2	0.1146	0.0005730	16.9980	0.0005618
320	320000	238.2	0.1191	0.0005955	17.5463	0.0005843
330	330000	246.5	0.1233	0.0006163	18.0946	0.0006051
340	340000	256.7	0.1284	0.0006418	18.6429	0.0006306
350	350000	266.6	0.1333	0.0006665	19.1912	0.0006553
360	360000	278.1	0.1391	0.0006953	19.7396	0.0006841
370	370000	290.7	0.1454	0.0007268	20.2879	0.0007156
380	380000	302.4	0.1512	0.0007560	20.8362	0.0007448
390	390000	315.9	0.1580	0.0007898	21.3845	0.0007786
400	400000	325.1	0.1626	0.0008128	21.9329	0.0008016
410	410000	338.4	0.1692	0.0008460	22.4812	0.0008348
420	420000	354.6	0.1773	0.0008865	23.0295	0.0008753
430	430000	368.9	0.1845	0.0009223	23.5778	0.0009111
440	440000	382.7	0.1914	0.0009568	24.1261	0.0009456
450	450000	418.3	0.2092	0.0010458	24.6745	0.0010346
440	440000	475.9	0.2380	0.0011898	24.1261	0.0011786
430	430000	531.8	0.2659	0.0013295	23.5778	0.0013183
420	420000	586.8	0.2934	0.0014670	23.0295	0.0014558

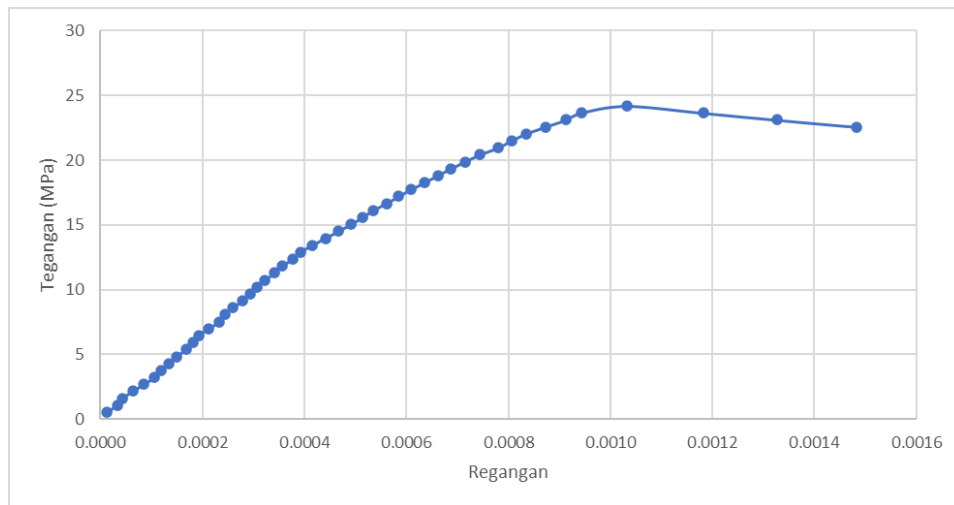


ASTM C-469	$(s_2-s_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$	33788.313	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23346.496	MPa

Lampiran 4 Modulus Elastisitas Tiap Sampel

25. Modulus TM5 12M.

Beban		Pembacaan Dial, $\Delta L'$ (μm)	ΔL (mm)	Regangan, ε	Tegangan, σ (MPa)	Regangan Terkoreksi, ε
kN	N					
10	10000	8	0.0040	0.0000200	0.5375	0.0000122
20	20000	16.1	0.0081	0.0000403	1.0749	0.0000324
30	30000	20.6	0.0103	0.0000515	1.6124	0.0000437
40	40000	28.4	0.0142	0.0000710	2.1498	0.0000632
50	50000	37.1	0.0186	0.0000928	2.6873	0.0000849
60	60000	45.4	0.0227	0.0001135	3.2247	0.0001057
70	70000	50.6	0.0253	0.0001265	3.7622	0.0001187
80	80000	57.1	0.0286	0.0001428	4.2996	0.0001349
90	90000	62.6	0.0313	0.0001565	4.8371	0.0001487
100	100000	70.6	0.0353	0.0001765	5.3745	0.0001687
110	110000	75.8	0.0379	0.0001895	5.9120	0.0001817
120	120000	80.1	0.0401	0.0002003	6.4494	0.0001924
130	130000	87.97	0.0440	0.0002199	6.9869	0.0002121
140	140000	96.3	0.0482	0.0002408	7.5243	0.0002329
150	150000	100.5	0.0503	0.0002513	8.0618	0.0002434
160	160000	107.13	0.0536	0.0002678	8.5992	0.0002600
170	170000	114.5	0.0573	0.0002863	9.1367	0.0002784
180	180000	120.6	0.0603	0.0003015	9.6741	0.0002937
190	190000	125.8	0.0629	0.0003145	10.2116	0.0003067
200	200000	132.2	0.0661	0.0003305	10.7490	0.0003227
210	210000	139.9	0.0700	0.0003498	11.2865	0.0003419
220	220000	145.5	0.0728	0.0003638	11.8239	0.0003559
230	230000	153.9	0.0770	0.0003848	12.3614	0.0003769
240	240000	159.9	0.0800	0.0003998	12.8988	0.0003919
250	250000	169.5	0.0848	0.0004238	13.4363	0.0004159
260	260000	179.5	0.0898	0.0004488	13.9737	0.0004409
270	270000	190	0.0950	0.0004750	14.5112	0.0004672
280	280000	199.7	0.0999	0.0004993	15.0486	0.0004914
290	290000	208.9	0.1045	0.0005223	15.5861	0.0005144
300	300000	217.2	0.1086	0.0005430	16.1235	0.0005352
310	310000	227.5	0.1138	0.0005688	16.6610	0.0005609
320	320000	237.1	0.1186	0.0005928	17.1984	0.0005849
330	330000	246.7	0.1234	0.0006168	17.7359	0.0006089
340	340000	257.7	0.1289	0.0006443	18.2733	0.0006364
350	350000	267.6	0.1338	0.0006690	18.8108	0.0006612
360	360000	278.2	0.1391	0.0006955	19.3482	0.0006877
370	370000	289.3	0.1447	0.0007233	19.8857	0.0007154
380	380000	300.8	0.1504	0.0007520	20.4231	0.0007442
390	390000	315.1	0.1576	0.0007878	20.9606	0.0007799
400	400000	325.7	0.1629	0.0008143	21.4980	0.0008064
410	410000	337.1	0.1686	0.0008428	22.0355	0.0008349
420	420000	352.4	0.1762	0.0008810	22.5729	0.0008732
430	430000	368.3	0.1842	0.0009208	23.1104	0.0009129
440	440000	380.3	0.1902	0.0009508	23.6478	0.0009429
450	450000	416.2	0.2081	0.0010405	24.1853	0.0010327
440	440000	476.2	0.2381	0.0011905	23.6478	0.0011827
430	430000	534.2	0.2671	0.0013355	23.1104	0.0013277
420	420000	596.2	0.2981	0.0014905	22.5729	0.0014827



ASTM C-469	$(s_2 - s_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$	33117.810	MPa
SNI 2847-2019	$4700 \times \sqrt{f'_c}$	23113.916	MPa