

SIFAT MEKANIK BETON TANPA AGREGAT KASAR

Daniel Christianto¹, Tiara Amira Utami², dan Metta Yoana³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
danielc@ft.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
tiara.325190002@stu.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Metta.325190006@stu.untar.ac.id

Masuk: 17-01-2023, revisi: 20-01-2023, diterima untuk diterbitkan: 07-02-2023

ABSTRACT

One of the transitional materials in concrete mixes is Reactive Powder Concrete (RPC). There are several mechanical properties that can be used as a reference when judging the quality of concrete. The modulus of elasticity is the ratio of normal stress to associated strain for tensile or compressive stress below the proportional limit of the material. The modification factor (λ) value that reflects the reduction in mechanical properties of lightweight concrete compared to normal weight concrete of the same compressive strength. Until now, references to concrete for mechanical properties are still only intended for normal concrete. In this study tensile, splitting, and elasticity tests would be carried out on RPC without coarse aggregate which refers to the American Society for Testing and Materials (ASTM) standards to analyze the mechanical properties of the concrete with a Universal Testing Machine (UTM) and compressor meter tool which aims to determine the modulus of elasticity and the value of λ of the sample being tested. After testing on cylindrical specimens, the specific gravity ranges from 1884,3945 kg/m³ to 2040,9558 kg/m³, the modulus of elasticity values are 20064,2870 MPa and 34787,6751 MPa, and the λ values range from 1,1944 to 1,8665.

Keywords: Coarse Aggregate, Quality of Concrete, Mechanical Properties of Concrete, Modulus of Elasticity, Modification Factor

ABSTRAK

Salah satu bahan transisi dalam campuran beton adalah *Reactive Powder Concrete* (RPC). Adapun beberapa sifat mekanik yang dapat dijadikan acuan untuk menentukan kualitas atau mutu beton. Salah satunya adalah modulus elastisitas, yang merupakan rasio tegangan normal terhadap tegangan terkait pada tegangan tarik atau tegangan tekan di bawah batas proporsionalitas material. Faktor modifikasi (λ), yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan, semuanya relatif terhadap beton normal dengan kuat tekan yang sama. Acuan ketentuan sifat mekanik beton hingga saat ini hanya ditujukan untuk beton normal. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan pengujian tarik, tekan belah, dan elastisitas pada beton tanpa agregat kasar jenis RPC menurut standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) untuk menganalisa sifat mekanik dari beton tersebut dengan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dan alat kompresor meter yang bertujuan untuk mengetahui modulus elastisitas dan nilai λ dari sampel yang diuji. Setelah dilakukan pengujian pada benda uji silinder, didapatkan berat jenis yang berkisar antara 1884,3945 kg/m³ hingga 2040,9558 kg/m³, nilai modulus elastisitas sebesar 20064,2870 MPa dan 34787,6751, nilai λ yang berkisar antara 1,1944 hingga 1,8665.

Kata kunci: Agregat Kasar, Mutu Beton, Sifat Mekanik Beton, Modulus Elastisitas, Faktor Modifikasi

1. PENDAHULUAN

Dalam proses konstruksi, salah satu bahan konstruksi yang paling banyak digunakan di Indonesia dengan peranan yang cukup penting adalah beton. Beton sendiri merupakan bahan bangunan yang diperoleh dengan mencampurkan pasir, kerikil atau batu pecah, dan semen dengan air. Namun, selama pencampuran, berbagai aditif terkadang ditambahkan ke dalam campuran untuk meningkatkan sifat-sifat beton itu sendiri, seperti meningkatkan *workability*, *durability*, serta waktu pengerasan beton (Setiawan, 2016).

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, juga dikembangkan inovasi-inovasi saat proses pencampuran material beton untuk mencapai suatu tujuan tertentu, seperti meningkatkan mutu beton atau nilai kuat tekan beton. Peralihan dalam penggunaan beton konvensional menjadi beton mutu tinggi dapat menyebabkan biaya

yang dikeluarkan lebih rendah karena dimensi penampang yang digunakan dapat dikurangi. Peningkatan pengetahuan mengenai perilaku struktur dan mekanik material dibutuhkan seiring dengan meningkatnya permintaan dan penggunaan material pada beton mutu tinggi (Budiono, 2003).

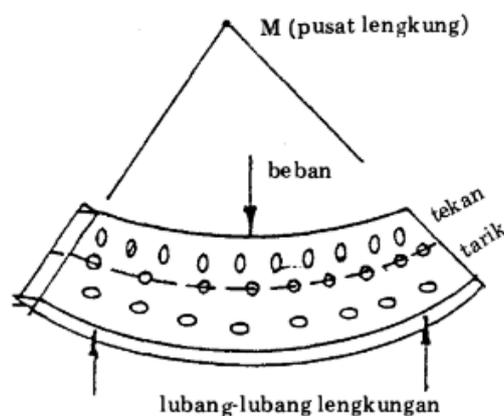
Adapun metode peralihan material pada campuran beton, salah satunya adalah *Reactive Powder Concrete* (RPC) yang memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan beton konvensional. RPC sendiri merupakan varian baru dari *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) atau beton mutu ultra tinggi. Salah satu prinsip dasar pembuatan RPC adalah penghilangan agregat kasar yang bertujuan meningkatkan homogenitas beton, menggunakan *silica fume* untuk reaksi *pozzolanic*, dan optimalisasi bahan granular sehingga peningkatan kerapatan dan matriks beton ultra padat dapat terbentuk (Alkhalay, 2013). Meniadakan agregat kasar juga dapat memperkecil kemungkinan terjadinya segregasi pada agregat kasar yang diakibatkan oleh mortar atau air dari bahan lain serta potensi pengisian rongga akan meningkat pada beton berpori-pori yang muncul akibat penggunaan agregat kasar pada campuran beton, sehingga mutu beton akan semakin tinggi.

Dalam menentukan mutu atau kualitas beton, terdapat beberapa sifat mekanik atau *mechanical properties* dari beton yang dapat dijadikan acuan. Salah satunya adalah modulus elastisitas, yang mendefinisikan rasio tegangan normal terhadap tegangan yang menyertainya dalam tarik atau tekan di bawah batas proporsional bahan. Modulus elastisitas juga terkait dengan nilai faktor modifikasi (λ) yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan, semuanya relatif terhadap beton normal dengan kuat tekan yang sama (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Hingga saat ini, acuan pada ketentuan beton untuk sifat mekanik atau *mechanical properties* masih hanya diperuntukkan untuk beton normal. Sehingga, dilakukan uji tekan dan tarik belah serta uji elastisitas pada beton tanpa agregat kasar jenis RPC menurut standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) pada penelitian ini untuk menganalisa sifat mekanik dari beton tersebut dengan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dan alat kompresor meter yang bertujuan untuk mengetahui modulus elastisitas dan nilai λ dari sampel yang diuji.

Beton

Menurut SNI 2847:2013, beton merupakan campuran dari semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa ditambahkan bahan campuran tambahan (*admixture*). Beton harus dirancang untuk memiliki kekuatan tekan rata-rata serta harus memenuhi kriteria durabilitas. (Badan Standardisasi Nasional, 2013). Beton merupakan batu buatan yang sangat kuat apabila berada di bawah tekanan tetapi akan sangat lemah ketika mengalami gaya tarik. Sehingga, sifat-sifat beton akan sangat baik apabila hanya terhadap gaya tekan, sama halnya dalam kasus kolom. Namun, pada balok atau pelat, setelah beton menerima lenturan, akan timbul sifat-sifat lain yang tampak seperti pada karet busa. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1, terdapat dua sisi porinya berlubang dengan satu bagian tertekan dan lubang pada bagian lainnya tertarik. Area pada bagian dalam pusat kurva M merupakan area yang terkena tekanan, sedangkan area sebelah luarnya merupakan area yang terkena tarik (Canonica, 1991).



Gambar 1. Beton saat menerima lenturan (Canonica, 1991)

Reactive powder concrete (RPC)

Menggunakan beton dalam konstruksi bangunan merupakan pilihan utama yang dikarenakan oleh mudahnya beton diproduksi dan dibentuk. *Reactive Powder Concrete* (RPC) merupakan beton tanpa agregat kasar, memiliki homogenitas pencampuran yang baik untuk mencapai kuat tekan yang sangat tinggi. (Kushartomo, Fransiska, &

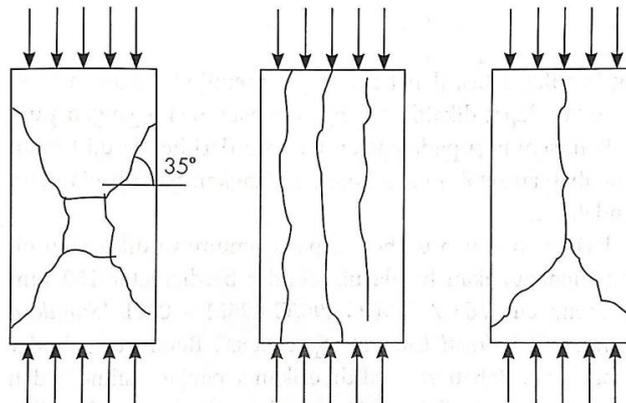
Wijaya, 2014). Apabila dibandingkan dengan beton konvensional, RPC merupakan material yang tersusun dengan ukuran partikel sangat kecil sehingga dapat terangkai secara kompak dan mempunyai homogenitas yang lebih unggul (Kushartomo & Christianto, 2015).

RPC dikembangkan dengan tujuan memenuhi kebutuhan bahan bangunan beton dengan kekuatan tinggi yang merupakan salah satu jenis beton paling mutakhir. RPC adalah *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) atau *Ultra High Strength Concrete* (UHSC) yang dapat mencapai kuat tekan 800 MPa dan memiliki sifat seperti material yang sangat padat. Kekuatan tekan ini dicapai dengan menggunakan modulus air-semen (fas) yang sangat rendah dari campuran RPC (0,15 – 0,26) dan mengoptimalkan struktur mikro matriks beton dengan gradasi material berukuran nano (nm) yang bermanfaat untuk meminimalkan rongga kosong antara butiran atau partikel dan mendapatkan matriks beton ultra padat (Alkhaly, 2013).

Kuat tekan

Ketika mendesain komponen beton, biasanya diasumsikan bahwa beton akan dibebani dengan gaya tekan daripada gaya tarik. Secara umum, sifat mekanis beton dapat ditentukan berdasarkan kuat tekannya. Oleh sebab itu, untuk menentukan mutu atau kualitas suatu material beton kuat tekan biasa digunakan sebagai kriteria. Kekuatan tekan beton tergantung pada beberapa faktor seperti rasio air terhadap semen, jenis semen dan aditif yang digunakan, agregat, air, kondisi kelembaban selama waktu pengerasan benda uji, dan umur beton. Referensi pada ASTM C39/C39M-12a dapat digunakan untuk menentukan nilai kuat tekan beton dengan melakukan uji kuat tekan (Setiawan, 2016).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, kegagalan benda uji selama pengujian pemadatan umumnya dapat terjadi dalam tiga cara. Yang pertama adalah karena pembebanan tekan aksial, yang menyebabkan benda uji gagal dalam geser. Resistensi yang dihasilkan disebabkan oleh kohesi dan gesekan internal spesimen. Kemungkinan kedua adalah kegagalan spesimen, yang diidentifikasi oleh spesimen yang pecah menjadi fragmen berbentuk kolom atau retaknya beton. Kegagalan ini terjadi pada beton dengan kuat tekan tinggi. Kegagalan yang terakhir merupakan gabungan dari kemungkinan pertama dan kedua, yaitu antara *shearing* dan *splitting* (Setiawan, 2016).



Gambar 2. Kegagalan uji tekan pada benda uji (Setiawan, 2016)

Kuat tarik

Beton adalah material bersifat getas yang tidak dapat menahan tegangan tarik tinggi. Kuat tarik beton yang rendah dapat dikaitkan dengan konsentrasi tegangan yang tinggi pada beton ketika dibebani, sehingga bagian tertentu dari benda uji mengalami tegangan yang sangat tinggi dan dapat dilihat secara mikroskopis, sedangkan pada bagian lainnya mengalami tegangan yang rendah. Kuat tarik belah beton dapat dihitung dengan Persamaan (1) (Setiawan, 2016).

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi \times L \times D} \quad (1)$$

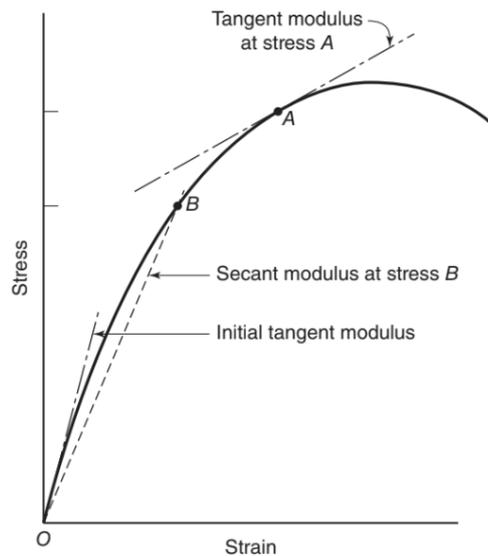
dengan f_{sp} = kuat tarik belah, P = beban batas pengujian, L = panjang benda uji, D = diameter benda uji

Modulus elastisitas

Modulus elastisitas beton (E_c) merupakan salah satu *mechanical properties* dari struktur beton yang cukup penting. Modulus didefinisikan sebagai kemiringan garis yang ditarik dari tegangan nol sampai tegangan tekan yang nilainya $0,45f_c'$. Modulus elastisitas agregat dan perbandingan campuran beton dianggap sensitif dalam menghasilkan modulus

elastisitas untuk beton. Nilai modulus elastisitas yang diukur bervariasi antara 80% – 120% dari nilai yang dihitung (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Terdapat tiga cara untuk mendefinisikan modulus elastisitas seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3. Pada tegangan yang bersesuaian dengan titik A, kemiringan garis yang bersinggungan dengan suatu titik pada kurva tegangan-regangan disebut *tangent modulus of elasticity* (E_T). Kemiringan kurva tegangan-regangan pada titik asal adalah *initial tangent modulus of elasticity*. Garis potong pada modulus elastisitas (*secant modulus*) pada tegangan tertentu adalah kemiringan garis dari titik asal dan melalui titik pada kurva yang mewakili tegangan tersebut dengan contoh pada titik B. Seringkali, garis potong modulus elastisitas didefinisikan menggunakan titik yang sesuai dengan $0,4f_c'$, yang mewakili *service-load stresses* (Wight, 2016).



Gambar 3. Grafik *tangent* dan *secant* modulus elastisitas (Wight, 2016)

Pengujian modulus elastisitas dilakukan pada spesimen silinder akan diukur nilai pemendekan yang terjadi dengan memasang *dial gauge* pada benda uji, pembacaan dilakukan pada tiap-tiap interval tertentu. Pengujian modulus elastisitas dilakukan menurut standar ASTM C469/C469M-14 yang nilainya dihitung menggunakan Persamaan (2) (ASTM International, 2014).

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (2)$$

dengan E_c = modulus elastisitas beton, S_2 = besar tegangan saat 40% beban batas, S_1 = besar tegangan saat regangan 0,00005, ε_2 = regangan saat 40% beban batas

Adapun hubungan antara modulus elastisitas beton berdasarkan nilai kuat tekan dan berat jenisnya untuk nilai w_c di antara 1400 dan 2560 kg/m³ pada Persamaan (3) di bawah ini serta untuk beton normal pada Persamaan (4) (Setiawan, 2016):

$$E_c = 0,043 \cdot w^{1,5} \sqrt{f_c'} \quad (3)$$

dengan E_c = modulus elastisitas beton, w_c = berat volume beton normal atau berat volume ekuivalen beton ringan, f_c' = kekuatan tekan beton yang disyaratkan

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \quad (4)$$

dengan E_c = modulus elastisitas beton, f_c' = kekuatan tekan beton yang disyaratkan

Faktor modifikasi (λ)

Faktor modifikasi (λ) diperhitungkan untuk mengetahui rasio kuat tarik terhadap kuat tekan beton ringan, yang lebih rendah dari beton normal. Pada struktur yang menggunakan beton ringan, kekuatan geser, properti friksi, tahanan

belah, lekatan antara beton dengan tulangan, dan persyaratan sambungan lewatan dianggap tidak sama dengan beton normal dengan kuat tekan yang sama. Pada Tabel 1 menjelaskan bahwa nilai dari λ diambil berdasarkan komposisi agregat pada campuran beton (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Tabel 1. Faktor modifikasi λ (Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Beton	Komposisi Agregat	λ
Beton ringan dengan semua agregat ringan	Halus: ASTM C330M Kasar: ASTM C330M	0,75
Beton ringan, agregat halus campuran	Halus: Kombinasi ASTM C330M dan C33M Kasar: ASTM C330M	0,75 s/d 0,85
Beton ringan dengan pasir ringan	Halus: ASTM C33M Kasar: ASTM C330M	0,85
Beton ringan dengan pasir ringan, dan agregat kasar campuran	Halus: ASTM C33M Kasar: Kombinasi ASTM C330M dan C33M	0,85 s/d 1
Beton normal	Halus: ASTM C33M Kasar: ASTM C33M	1

Nilai λ dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Badan Standardisasi Nasional, 2019):

$$\lambda = \frac{f_{ct}}{0,56 \sqrt{f_{cm}}} \leq 1,0 \quad (5)$$

dengan λ = faktor modifikasi yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan, semuanya relatif terhadap beton normal dengan kuat tekan yang sama, f_{ct} = tegangan tarik belah rata-rata beton ringan, f_{cm} = tegangan tekan belah rata-rata beton ringan

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini disusun menggunakan studi literatur dan pengujian di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton Universitas Tarumanagara. Studi literatur dilakukan dengan mencari berbagai sumber yang sesuai dengan topik yang dibahas dan diperlukan untuk memahami teori yang berkaitan dengan penelitian agar bisa dijadikan sebagai dasar kerangka berpikir dan melakukan analisa serta kesimpulan. Pengujian di laboratorium dilakukan secara eksperimental dengan cara membuat sampel beton berbentuk silinder yang kemudian akan dilakukan uji tekan, uji elastisitas, dan uji tarik belah dengan menggunakan mesin *Universal Testing Mechine* (UTM) dan alat kompresor meter untuk mendapatkan hasil modulus elastisitas dan nilai λ pada sampel yang diuji. Sampel beton yang ditinjau adalah beton tanpa agregat kasar berbentuk silinder dengan dua ukuran yaitu diameter 100 mm dan tinggi 200 mm serta diameter 150 mm dan tinggi 300 mm dengan perincian yang terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perincian pengujian pada setiap benda uji

Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Keterangan
S 1.1	150	300	Uji Elastisitas
S 1.3	150	300	Uji Tekan
S 1.4	150	300	Uji Tarik Belah
S 1.5	150	300	Uji Tarik Belah
S 1.6	150	300	Uji Tarik Belah
S 1.7	150	300	Uji Elastisitas
S 2.1	100	200	Uji Tarik Belah
S 2.2	100	200	Uji Tarik Belah
S 2.3	100	200	Uji Tarik Belah
S 2.4	100	200	Uji Elastisitas
S 2.5	100	200	Uji Elastisitas
S 2.6	100	200	Uji Tekan

Desain campuran beton

Dalam menentukan komposisi bahan baku dalam campuran beton, dilakukan perhitungan dengan tujuan mendapatkan jumlah ukuran perbandingan yang sesuai. Pada Tabel 3, dilampirkan komposisi bahan untuk kebutuhan material mix design beton pada penelitian ini setiap 1 m³.

Tabel 3. Komposisi bahan sampel beton

Materi yang Digunakan		Berat Jenis (kg/m ³)	Rasio	Volume Bahan per Massa Semen (m ³)	Kebutuhan Material per 1 m ³ (kg/m ³)
Semen	Semen OPC	3150	0,3	$9,5238 \times 10^{-5}$	259,7590
	Semen Putih	3150	0,7	$2,2222 \times 10^{-4}$	606,0924
Agregat Halus	Pasir Bangka	2617,8	1	$3,8200 \times 10^{-4}$	865,8463
	Tepung Marmer	2563	0,2	$7,8034 \times 10^{-5}$	173,1693
Admixture	<i>Silica Fume</i>	2200	0,2	$9,0909 \times 10^{-5}$	173,1693
	<i>Superplasticizer</i>	1150	0,0250	$2,1739 \times 10^{-5}$	21,6462
Air	Suling	1000	0,1891	$2,6480 \times 10^{-4}$	229,2736
			Σ	$1,1549 \times 10^{-3}$	

Pembuatan dan perawatan benda uji

Pembuatan dan perawatan benda uji dilakukan di laboratorium dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Menyiapkan dan mengoleskan oli pada cetakan atau bekisting yang berbentuk silinder dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm serta diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.
- Menyiapkan dan menimbang bahan yang digunakan sesuai dengan komposisi masing-masing.
- Memasukan semen, pasir, tepung marmer, dan *silica fume* ke dalam wadah molen cor yang kemudian diaduk hingga merata.
- Setelah campuran semen dan agregat halus merata, *superplasticizer* dan air dimasukkan ke dalam wadah secara perlahan.
- Setelah pengadukkan campuran beton telah dilakukan selama ± 30 menit, campuran beton dituangkan ke dalam cetakan atau bekisting yang telah disiapkan.
- Kemudian bekisting dipukul dengan palu karet agar rongga udara pada adukan beton berkurang.
- Sampel beton dibiarkan selama 1×24 jam hingga mengering dan mengeras, kemudian dilepas dari cetakan atau bekisting.
- Setelah dilepas dari cetakan atau bekisting, sampel beton dilakukan perawatan atau proses *curing* dengan teknik direndam di dalam bak air selama ± 2 bulan dengan tujuan agar beton tidak cepat kehilangan air dan mutu beton yang diinginkan dapat tercapai.

Pengujian tekan

Untuk mendapatkan data yang dibutuhkan agar tercapainya tujuan penelitian ini, dilakukan pengujian tekan terhadap benda uji silinder dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Sampel silinder beton yang telah melewati proses *curing* diangkat dari rendaman dan dikeringkan 1×24 jam.
- Benda uji kemudian ditimbang dan dilakukan proses kaping menggunakan bahan belerang.
- Apabila telah dilakukan proses kaping, benda uji dibiarkan pada suhu ruangan selama ± 6 jam.
- Kemudian, sampel beton diuji dengan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dengan menyesuaikan pilihan uji tekan.
- Setelah dilakukan pengujian, hasil yang tertera pada mesin UTM dicatat.

Pengujian elastisitas

Untuk mendapatkan data yang dibutuhkan agar tercapainya tujuan penelitian ini, dilakukan pengujian mengacu pada ASTM C469/C469M-14 "*Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*" terhadap benda uji silinder dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Sampel silinder beton yang telah melewati proses *curing* diangkat dari rendaman dan dikeringkan 1×24 jam.

- Benda uji kemudian ditimbang dan dilakukan proses kaping dengan bahan belerang.
- Apabila telah dilakukan proses kaping, benda uji dibiarkan pada suhu ruangan selama ± 6 jam.
- Kemudian, benda uji diletakkan di dalam alat kompresor meter lalu menyesuaikan posisi alat tersebut dengan memutar baut hingga benda uji tepat berada di bagian tengah dan memastikan angka pada dial gauge berada pada angka nol.
- Selanjutnya, sampel beton diuji dengan mesin *Universal Testing Mechine* (UTM) dengan menyesuaikan pilihan uji tekan.
- Selama dilakukan pengujian, angka yang tertera pada dial gauge kompresor meter dicatat.
- Setelah mencapai $\pm 40\%$ dari kuat tekan rata-rata, pengujian dapat dihentikan sementara untuk melepaskan alat kompresor meter dari benda uji.
- Setelah alat kompresor meter dilepaskan, benda uji kembali diletakkan di dalam mesin UTM dan melanjutkan pengujian tekan.
- Kemudian apabila pengujian telah selesai, hasil yang tertera pada mesin UTM dicatat.

Pengujian tarik belah

Untuk mendapatkan data yang dibutuhkan agar tercapainya tujuan penelitian ini, dilakukan pengujian yang mengacu pada ASTM C496/C496M-04 "*Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*" terhadap benda uji silinder dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Sampel silinder beton yang telah melewati proses *curing* diangkat dari rendaman dan dikeringkan 1×24 jam.
- Benda uji kemudian ditimbang, diukur diameter serta tingginya.
- Kemudian, benda uji diletakkan pada bantalan berupa papan kayu di bagian atas dan bawah dengan menggapit silinder beton yang telah disediakan untuk pengujian tarik belah.
- Apabila benda uji telah diposisikan dengan tepat di antara bantalan kayu, benda uji dapat diletakkan pada *Universal Testing Mechine* (UTM).
- Selanjutnya, sampel beton diuji dengan mesin UTM dengan menyesuaikan pilihan uji tarik belah.
- Setelah dilakukan pengujian, hasil yang tertera pada mesin UTM dicatat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan uji laboratorium, diperoleh parameter yang diperlukan untuk menganalisis modulus elastisitas serta nilai λ pada beton tanpa agregat kasar. Sebelum dilakukan pengujian, semua sampel ditimbang agar dapat memperhitungkan berat jenis masing-masing beton. Tabel 4 menunjukkan data yang diperlukan untuk keperluan perhitungan dalam penelitian ini.

Tabel 4. Data benda uji

Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Volume (mm ³)	Massa (gr)	Berat Jenis (kg/m ³)
S 1.1	150	300		10060	1897,5985
S 1.3	150	300		9980	1882,5082
S 1.4	150	300	5301437,6030	10140	1912,6887
S 1.5	150	300		10360	1954,1869
S 1.6	150	300		10160	1916,4613
S 1.7	150	300		10820	2040,9558
S 2.1	100	200			3100
S 2.2	100	200		2940	1871,6621
S 2.3	100	200	1570796,3270	3020	1922,5917
S 2.4	100	200		3120	1986,2537
S 2.5	100	200		2960	1884,3945
S 2.6	100	200		2960	1884,3945

Pada pengujian tekan, didapatkan hasil kuat tekan mutu beton (f_c') yang berasal dari pembacaan pada mesin *Universal Testing Mechine* (UTM) setelah benda uji diberikan beban yang kemudian apabila telah mencapai beban batas yang mampu ditahan oleh benda uji itu sendiri maka akan didapatkan nilai f_c' tersebut. Pengujian elastisitas pada benda uji juga menghasilkan nilai f_c' yang diperoleh setelah pembacaan deformasi pada *dial gauge* dan alat kompresor meter telah dilepaskan dari sampel dengan cara yang sama dengan uji tekan.

Dari data f_c' yang didapatkan pada pengujian ini akan digunakan untuk keperluan kuat tekan rata-rata dalam menghitung nilai λ . Rata-rata hasil f_c' digunakan dalam perhitungan nilai λ karena masih memiliki *mix design* atau desain campuran beton yang sama dengan benda uji yang digunakan pada pengujian tarik belah. Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian tekan dengan rata-rata yang akan digunakan untuk analisis perhitungan nilai λ .

Tabel 5. Hasil uji tekan pada benda uji

Kode Benda Uji	Mutu Beton (MPa)	\bar{X} (MPa)
S 1.1	45,99	
S 1.3	49,23	50,8667
S 1.7	57,38	
S 2.4	67,13	
S 2.6	54,20	60,6650

Analisis dan pembahasan modulus elastisitas

Pada uji elastisitas, parameter yang didapatkan dari alat kompresor meter berasal dari *dial gauge* diolah menjadi nilai deformasi. Berdasarkan hasil pengujian elastisitas yang telah dilaksanakan, didapatkan hasil pembacaan melalui *dial gauge* pada masing-masing benda uji yang dibaca pada setiap *load* atau beban pada interval tertentu. Setelah dilakukan pembacaan pada *dial gauge*, maka pengujian tekan pada benda uji dilanjutkan. Dengan demikian diperoleh nilai kuat tekan beton dari benda uji silinder yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil uji tekan pada benda uji elastisitas

Kode Benda Uji	Mutu Beton (MPa)	40% Mutu Beton (MPa)
S 1.1	45,99	18,3960
S 1.7	57,38	22,9520
S 2.4	67,13	26,8520
S 2.5	25,01	10,0040

Berdasarkan data yang telah didapatkan pada saat pengujian elastisitas, dilakukan pengolahan data agar didapatkan nilai tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) untuk mendapatkan modulus elastisitas dari masing-masing benda uji. Dalam menentukan nilai *stress* dan *strain* digunakan Persamaan (5), (6), dan (7).

$$\text{Deformasi} = \text{Gauge Reading} \times 0,002 \quad (5)$$

$$\text{Strain} = \frac{\text{Deformasi}}{L} \quad (6)$$

dengan L = panjang benda uji

$$\text{Stress} = \frac{P}{A} \quad (7)$$

dengan P = beban pengujian, A = luas permukaan benda uji yang tertekan oleh mesin UTM.

Sehingga, dengan menggunakan Persamaan (5), (6), dan (7) dan memasukan data yang telah didapatkan akan menghasilkan pengolahan data seperti pada Tabel 7, Tabel 8, Tabel 9, dan Tabel 10.

Tabel 7. Hasil pengolahan data pada benda Uji S 1.1

Kode Benda Uji	Load (kN)	Gauge Reading	Deformasi (mm)	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
	0	0	0	0	0
S 1.1	100	31	0,0620	5,6588	$2,0667 \times 10^{-4}$
	200	50	0,1000	11,3177	$3,3333 \times 10^{-4}$
	300	77	0,1540	16,9765	$5,1333 \times 10^{-4}$
	400	110	0,2200	22,6354	$7,3333 \times 10^{-4}$
	500	144	0,2880	28,2942	$9,6000 \times 10^{-4}$

Tabel 8. Hasil pengolahan data pada benda Uji S 1.7

Kode Benda Uji	Load (kN)	Gauge Reading	Deformasi (mm)	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
S 1.7	0	0	0	0	0
	100	28	0,0560	5,6588	$1,8667 \times 10^{-4}$
	200	48	0,0960	11,3177	$3,2000 \times 10^{-4}$
	300	75	0,1500	16,9765	$5,0000 \times 10^{-4}$
	400	96	0,1920	22,6354	$6,4000 \times 10^{-4}$
	500	120	0,2400	28,2942	$8,0000 \times 10^{-4}$

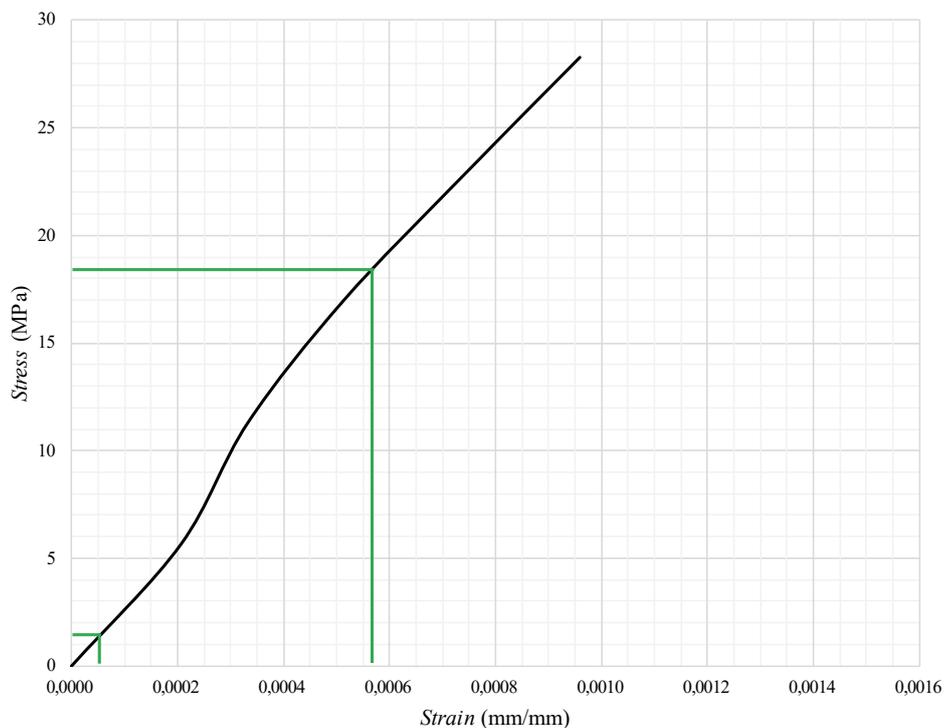
Tabel 9. Hasil pengolahan data pada benda Uji S 2.4

Kode Benda Uji	Load (kN)	Gauge Reading	Deformasi (mm)	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
S 2.4	0	0	0	0	0
	50	25	0,0500	6,3662	$2,5000 \times 10^{-4}$
	100	60	0,1200	12,7324	$6,0000 \times 10^{-4}$
	150	92	0,1840	19,0986	$9,2000 \times 10^{-4}$
	200	126	0,2520	25,4648	$1,2600 \times 10^{-3}$
	250	157	0,3140	31,8310	$1,5700 \times 10^{-3}$

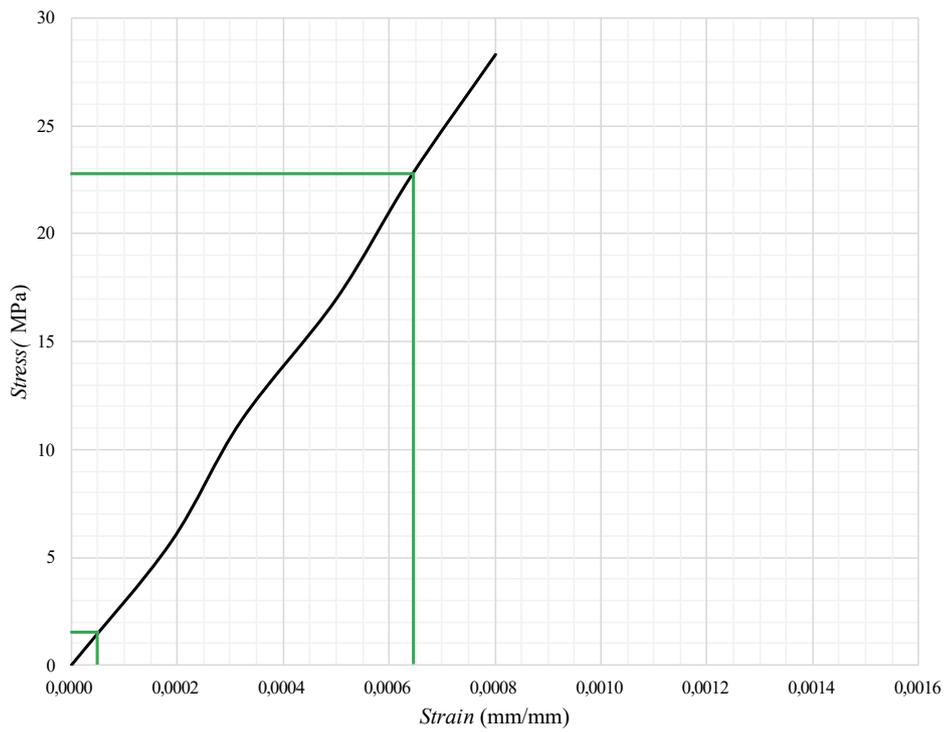
Tabel 10. Hasil pengolahan data pada benda Uji S 2.5

Kode Benda Uji	Load (kN)	Gauge Reading	Deformasi (mm)	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
S 2.5	0	0	0	0	0
	50	31	0,0620	6,3662	$3,1000 \times 10^{-4}$
	100	63	0,1260	12,7324	$6,3000 \times 10^{-4}$
	150	95	0,1900	19,0986	$9,5000 \times 10^{-4}$

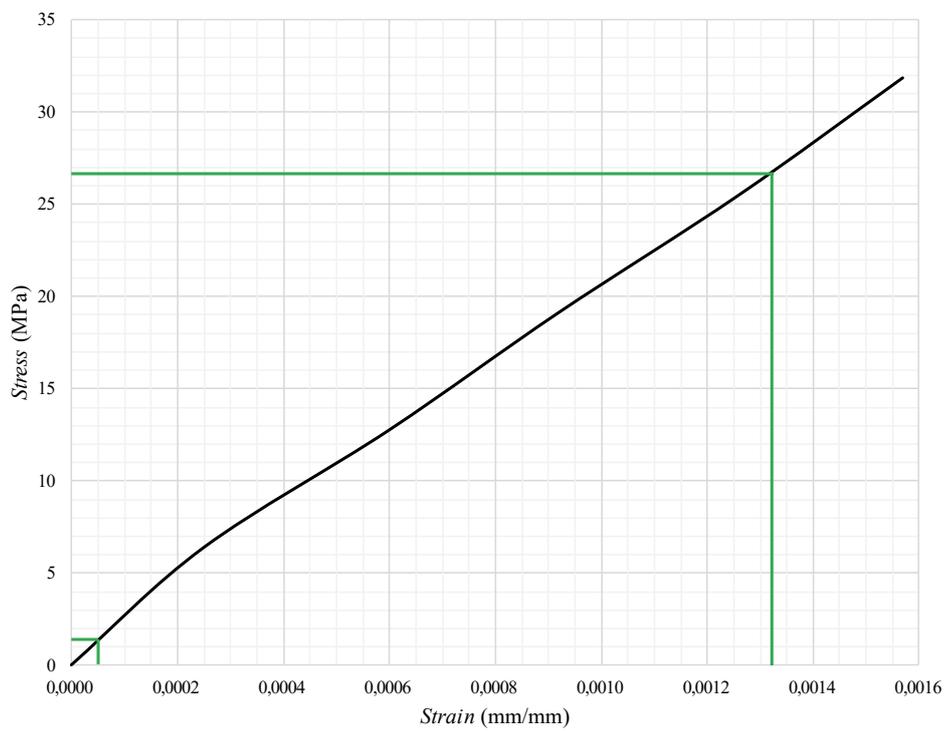
Setelah mendapatkan nilai stress dan strain, maka dapat dibuat diagram antara *stress* dan *strain* agar dapat mengetahui besar tegangan pada saat 40% beban batas dan besar tegangan pada saat regangan 0,00005 yang digunakan untuk mendapatkan modulus elastisitas yang dapat dilihat Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7.



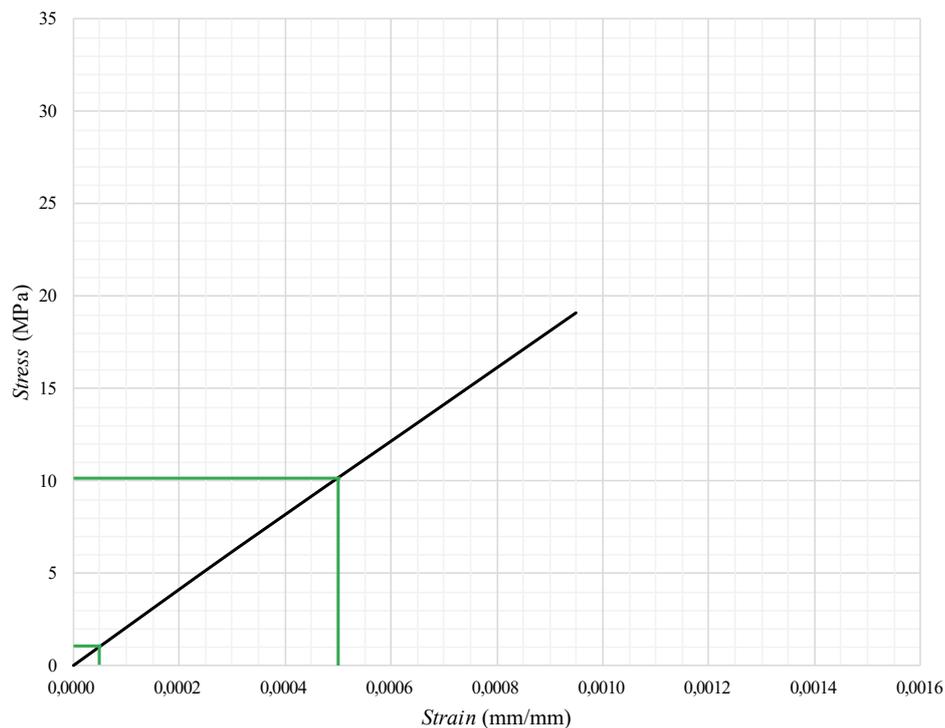
Gambar 4. Diagram *stress* vs. *strain* pada benda uji S 1.1



Gambar 5. Diagram *stress vs. strain* pada benda uji S 1.7



Gambar 6. Diagram *stress vs. strain* pada benda uji S 2.4



Gambar 7. Diagram *stress vs. strain* pada benda uji S 2.5

Berdasarkan diagram pada Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7 yang telah dibuat, maka didapatkan parameter untuk mengetahui modulus elastisitas dengan melakukan penarikan garis lurus pada besar tegangan pada saat 40% beban batas dan besar tegangan pada saat regangan 0,00005. Sehingga, didapatkan parameter-parameter yang dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Nilai *stress* dan *strain* pada berbagai kondisi

Kode Benda Uji	Kondisi saat stress 40%		Kondisi saat <i>strain</i> = 0,00005	
	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
S 1.1	18,3960	$5,6000 \times 10^{-4}$	1,3000	$5,0000 \times 10^{-5}$
S 1.7	22,9520	$6,4500 \times 10^{-4}$	1,0000	$5,0000 \times 10^{-5}$
S 2.4	26,8520	$1,3200 \times 10^{-3}$	1,3000	$5,0000 \times 10^{-5}$
S 2.5	10,0040	$5,0000 \times 10^{-4}$	1,5000	$5,0000 \times 10^{-5}$

Dengan mengetahui nilai tegangan dan regangan pada kedua kondisi yang telah ditentukan sebelumnya, maka modulus elastisitas dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (2). Sehingga, didapatkan modulus elastisitas dari setiap benda uji yang ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil modulus elastisitas

Kode Benda Uji	Modulus Elastisitas (MPa)	\bar{X} (MPa)
S 1.1	33521,5686	34787,6751
S 1.7	36053,7815	
S 2.4	20119,6850	20064,2870
S 2.5	20008,8889	

Berdasarkan analisis dan perhitungan modulus elastisitas dari hasil uji laboratorium yang telah dilakukan, didapatkan rata-rata nilai sebesar 34787,6751 MPa untuk silinder yang berukuran 150×300 mm dan 20064,2870 MPa untuk silinder yang berukuran 100×200 mm. Dengan *mix design* dan umur beton yang sama, nilai modulus elastisitas yang diperoleh beragam.

Semakin tinggi nilai modulus elastisitas maka semakin kuat pula beton mampu menahan tegangan yang besar. Hal ini dapat dibuktikan oleh dalam kondisi regangan yang kecil terjadi pada benda uji S 1.1 dan S 1.7 pada Gambar 4 dan Gambar 5 yang menghasilkan nilai modulus elastisitas yang cenderung lebih besar.

Dengan nilai modulus elastisitas yang telah diperoleh dari perhitungan hasil pengujian elastisitas, dilakukan perhitungan lain dengan rumus yang terdapat pada Standar Nasional Indonesia (SNI) yaitu menggunakan Persamaan (3) dan (4). Kedua rumus tersebut didasari oleh kuat tekan dan berat jenis serta untuk beton normal. Tujuan dari dilakukannya kedua perhitungan tersebut untuk mengetahui hasil perhitungan dengan rumus yang terdapat pada SNI dan hasil perhitungan dengan rumus yang terdapat pada *American Society for Testing and Materials* (ASTM) dari pengujian elastisitas pada masing-masing benda uji. Ringkasan perbandingan nilai modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Nilai modulus elastisitas dengan berbagai rumus

Kode Benda Uji	Mutu Beton (MPa)	Berat Jenis (kg/m ³)	Modulus Elastisitas (MPa)		
			Menurut ASTM	Menurut SNI	
			$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005}$	$w_c = 1400 - 2560 \text{ kg/m}^3$	Beton Normal
S 1.1	45,99	1897,5985	33521,5686	$E_c = 0,043 \cdot w^{1,5} \cdot \sqrt{f'_c}$	$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c}$
S 1.7	57,38	2040,9558	36053,7815		
S 2.4	67,13	1986,2537	20119,6850		
S 2.5	25,01	1884,3945	20008,8889		

Sehingga, dalam pengujian elastisitas pada beton tanpa agregat kasar dengan jenis *Reactive Powder Concrete* (RPC) untuk memperhitungkan nilai modulus elastisitas digunakan rumus yang terdapat pada *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Analisis dan pembahasan nilai λ

Pada uji tarik belah, didapatkan nilai *sample peak load* atau beban batas yang dicapai oleh benda uji sebelum akhirnya terjadi keretakan dan terbelah. Dari nilai beban batas ini dapat diketahui kuat tekan dan tarik belah dengan menggunakan rumus ada. Tabel 14 menjabarkan data yang diperoleh dari pengujian tarik belah pada benda uji.

Tabel 14. Hasil uji tarik belah benda uji

Kode Benda Uji	<i>Sample Peak Load</i> (kN)
S 1.4	467,1
S 1.5	443,4
S 1.6	330,2
S 2.1	234,2
S 2.2	187,9
S 2.3	232,8

Berdasarkan data yang telah didapatkan pada saat pengujian tarik belah, dilakukan perhitungan dengan menggunakan Persamaan (1) untuk mendapatkan nilai tarik dan tekan belah rata-rata. Nilai kuat tekan rata-rata diperoleh dari pengujian tekan yang telah dilakukan sebelumnya. Kemudian, dengan menggunakan Persamaan (1) akan didapatkan hasil tarik belah yang dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. Hasil kuat tarik belah pada benda uji

Kode Benda Uji	<i>Sample Peak Load</i> (kN)	Kuat Tarik Belah (MPa)
S 1.4	467,1	6,6081
S 1.5	443,4	6,2728
S 1.6	330,2	4,6714
S 2.1	234,2	7,4548
S 2.2	187,9	5,9810
S 2.3	232,8	7,4103

Hasil dari kuat tekan rata-rata dan tarik belah setiap benda uji digunakan untuk menghitung nilai λ dengan menggunakan Persamaan (5). Maka, didapatkan nilai λ yang tertera pada Tabel 16 sesuai dengan ukuran benda uji silinder.

Tabel 16. Hasil nilai λ

Kode Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik Belah (MPa)	λ
S 1.4		6,6081	1,6545
S 1.5	50,8667	6,2728	1,5706
S 1.6		4,6714	1,1696
S 2.1		7,4548	1,7091
S 2.2	60,6650	5,9810	1,3713
S 2.3		7,4103	1,6989

Berdasarkan analisis dan perhitungan nilai λ dari hasil uji laboratorium yang telah dilakukan, didapatkan nilai λ yang berkisar antara 1,1696 hingga 1,6545 untuk silinder yang berukuran 150×300 mm dan 1,3713 hingga 1,7091 untuk silinder yang berukuran 100×200 mm. Perolehan nilai yang dihasilkan oleh beton yang memiliki *mix design* yang sama ini menghasilkan nilai kuat tarik belah yang saling mendekati. Sehingga, nilai λ yang diperoleh pada penelitian ini tidak memiliki selisih yang signifikan. Nilai λ yang dihasilkan oleh beton tanpa agregat kasar dengan jenis *Reactive Powder Concrete* (RPC) pada penelitian ini lebih besar daripada ketentuan SNI yang terdapat pada

Tabel 1 untuk beton normal dan beton ringan yang berkisar antara 0,75 – 1.

Rekapitulasi perolehan data

Berdasarkan hasil uji laboratorium serta analisis yang telah dilakukan, disusun rekapitulasi perolehan data pada Tabel 17 untuk memudahkan dalam peninjauan data yang diperoleh.

Tabel 17. Rekapitulasi perolehan data

Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Berat Jenis (kg/m ³)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)	λ
S 1.1	150	300	1897,5985	45,99	-	33521,5686	-
S 1.3	150	300	1882,5082	49,23	-	-	-
S 1.4	150	300	1912,6887	-	6,6081	-	1,6545
S 1.5	150	300	1954,1869	-	6,2728	-	1,5706
S 1.6	150	300	1916,4613	-	4,6714	-	1,1696
S 1.7	150	300	2040,9558	57,38	-	36053,7815	-
S 2.1	100	200	1973,5213	-	7,4548	-	1,7091
S 2.2	100	200	1871,6621	-	5,9810	-	1,3713
S 2.3	100	200	1922,5917	-	7,4103	-	1,6989
S 2.4	100	200	1986,2537	67,13	-	20119,6850	-
S 2.5	100	200	1884,3945	25,01	-	20008,8889	-
S 2.6	100	200	1884,3945	54,23	-	-	-

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pada beton tanpa agregat kasar dengan jenis *Reactive Powder Concrete* (RPC) dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Beton tanpa agregat kasar memiliki berat jenis yang berkisar antara 1884,3945 kg/m³ hingga 2040,9558 kg/m³ untuk kedua ukuran silinder yaitu 150×300 mm dan 100×200 mm. Hal ini mengatakakan bahwa RPC yang telah dibuat pada penelitian ini termasuk beton ringan karena memiliki berat jenis lebih kecil dari 2400 kg/m³.
- Pada penelitian ini, dengan *mix design* dan umur beton yang sama menghasilkan kuat tekan beton (f_c') yang beragam yaitu berkisar antara 45,99 MPa hingga 67,13 MPa. Beda halnya dengan kuat tarik belah beton (f_{sp}) yang tidak memiliki selisih yang signifikan yaitu 4,6714 MPa hingga 7,4548 MPa.

- Nilai modulus elastisitas yang dihasilkan adalah 34787,6751 MPa untuk silinder yang berukuran 150×300 mm dan 20064,2870 MPa untuk silinder yang berukuran 100×200 mm.
- Setelah dilakukan pengujian pada benda uji silinder beton tanpa agregat kasar dengan jenis *Reactive Powder Concrete* (RPC), untuk perhitungan nilai modulus elastisitas pada penelitian ini digunakan rumus yang terdapat pada *American Society for Testing and Materials* (ASTM).
- Nilai λ yang dihasilkan pada penelitian dengan benda uji silinder beton tanpa agregat kasar dengan jenis *Reactive Powder Concrete* (RPC) berkisar antara 1,1696 hingga 1,6545 untuk silinder yang berukuran 150×300 mm dan 1,3713 hingga 1,7091 untuk silinder yang berukuran 100×200 mm. Nilai tersebut berada di luar kisaran nilai λ yang terdapat pada Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk beton normal yaitu sama dengan lebih besar dari 1 (≥ 1).

Saran

Berdasarkan hasil penelitian pada beton tanpa agregat kasar dengan jenis *Reactive Powder Concrete* (RPC) dapat diajukan beberapa saran sebagai berikut:

- Pada penelitian ini, didapatkan mutu beton (f_c') yang berkisar antara 45,99 MPa hingga 67,13 MPa, sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan uji tekan, tarik belah, dan elastisitas pada benda uji dengan f_c' yang lebih tinggi dari penelitian ini untuk memperoleh modulus elastisitas dan nilai λ .
- Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui faktor pengali atau faktor skala dalam mencari modulus elastisitas dan nilai λ pada ukuran benda uji yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Alkhaly, Y. R. (2013). Reactive Powder Concrete dengan Sumber Silika dari Limbah Bahan Organik. *Teras Jurnal*, 3(2), 157-166.
- ASTM International. (2014). *ASTM C469/C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *SNI 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. Retrieved from <http://staffnew.uny.ac.id/upload/132256207/pendidikan/sni-2847-2013.pdf>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2487:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. Retrieved from https://lmsspada.kemdikbud.go.id/pluginfile.php/543340/mod_resource/content/1/SNI%202847-2019%20Persyaratan%20Beton%20Struktural%20Untuk%20Bangunan%20Gedung%20dan%20penjelasan.pdf
- Budiono, B. (2003). Analisis Kolom Langsing Beton Mutu Tinggi Terkekang terhadap Beban Aksial Tekan Eksentris. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(4), 145-154.
- Canonica, L. (1991). *Memahami Beton Bertulang* (1 ed.). Bandung: Penerbit Angkasa Bandung.
- Kushartomo, W., & Christianto, D. (2015). Pengaruh Serat Lokal Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Reactive Powder Concrete dengan Teknik Perawatan Penguapan. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(1), 31-36.
- Kushartomo, W., Fransiska, S., & Wijaya, R. (2014). Sifat Permeabilitas pada Reactive Powder Concrete dengan Menggunakan Limbah Kaca (Green Concrete). *Jurnal Kajian Teknologi*, 10(2), 101-109.
- Setiawan, A. (2016). *Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2013*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Wight, J. K. (2016). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design* (7 ed.). New Jersey: Pearson Education, Inc.