

PENGARUH SERAT TERHADAP TEGANGAN DAN REGANGAN PADA BETON TANPA AGREGAT KASAR

Yenny Untari Liucius^{1,2*}, Tavier³, Daniel Christianto², dan Benedict Lim²

¹Program Studi Doktor Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

³Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Surabaya, Indonesia

*yenny@ft.untar.ac.id

Masuk: 02-07-2025, revisi: 13-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 25-09-2025

ABSTRACT

This research aims to obtain stress and strain diagram curves and analyze the amount of compressive force produced by fibrous concrete without coarse aggregate. This research uses the type of concrete RPC (Reactive Powder Concrete). RPC is a concrete innovation with materials that have small particle sizes to fill cavities in concrete and can increase the strength of the concrete. For this study, silica fume additives were used to produce concrete with better quality than concrete in general. This study began by using cylinder-shaped concrete samples with a diameter of 10 x 20 cm. After that, concrete compressive tests were carried out to obtain stress and strain diagram curves. This study is expected to obtain the results of total concrete compressive strength and stress strain diagram for fibrous concrete without coarse aggregate, because the provisions of ACI (American Concrete Institute) are only used for normal concrete. In this study, it was found that the actual curve was non-linear and the concrete samples that had been tested were not crushed into fragments because they were retained by the fibers. Based on the data analysis that has been carried out, the peak stress of the sample is obtained between 31 MPa and 66 MPa. The amount of energy that can be absorbed by concrete is between 0,0866 to 0,3418 with an average multiplying factor of 0,4989.

Keywords: Stress; Strain; Concrete Without Coarse Aggregate; Curves; Silicafume

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kurva diagram tegangan dan regangan (*Stress Strain*) dan menganalisis besar gaya tekan yang dihasilkan oleh beton berserat tanpa agregat kasar. Penelitian ini menggunakan jenis beton RPC (*Reactive Powder Concrete*). RPC merupakan inovasi beton dengan bahan material yang memiliki ukuran partikel kecil guna mengisi rongga-rongga pada beton dan dapat meningkatkan kekuatan daripada beton tersebut. Untuk penelitian ini digunakan bahan tambahan *silica fume* untuk menghasilkan beton dengan mutu yang lebih baik dibanding dengan beton pada umumnya. Penelitian ini dimulai dengan menggunakan sampel beton berbentuk silinder dengan ukuran diameter 10 x 20 cm. Setelah itu dilakukan tes tekan beton untuk mendapatkan kurva diagram tegangan dan regangan. Penelitian ini diharapkan dapat mendapatkan hasil total kuat tekan beton dan diagram tegangan regangan untuk beton berserat tanpa agregat kasar, dikarenakan ketentuan pada ACI (*American Concrete Institute*) hanya digunakan untuk beton normal. Dalam penelitian ini didapatkan kurva aktual bersifat non-linear dan sampel beton yang telah dilakukan pengetesan tidak hancur menjadi serpihan karena tertahan oleh serat. Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan di peroleh *peak stress* sampel antara 31 MPa hingga 66 MPa. Besar energi yang dapat diserap oleh beton berada diantara 0,0866 hingga 0,3418 dengan rata-rata faktor pengali sebesar 0,4989.

Kata kunci: Tegangan; Regangan; Beton Berserat Tanpa Agregat Kasar; Kurva; *Silicafume*

1. PENDAHULUAN

Dalam proses pembangunan, khususnya di negara berkembang, kegiatan konstruksi memegang peran yang sangat vital, terlebih di masa ketika ilmu pengetahuan dan teknologi mengalami kemajuan yang pesat. Oleh karena itu, pemilihan bahan bangunan serta metode pelaksanaan yang tepat menjadi sangat krusial. Salah satu material utama yang banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur adalah beton. Beton sendiri merupakan kombinasi dari beberapa bahan komposit, yang umumnya terdiri atas agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambahan lainnya dengan komposisi tertentu. Sebagai material komposit, sifat daktilitas beton sangat dipengaruhi oleh mutu masing-masing komponen penyusunnya (Tjokrodinuljo, 2007).

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi telah mendorong lahirnya berbagai inovasi dalam bidang beton yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja mekanis serta daya tahan beton. Inovasi ini juga berfokus pada pencapaian

mutu beton yang lebih tinggi serta bobot yang lebih efisien, guna mengatasi permasalahan umum seperti munculnya retak dini, tingginya permeabilitas, dan rendahnya kekuatan tarik. Pengembangan beton dengan sifat-sifat unggul menjadi sangat penting dalam menjawab kebutuhan konstruksi modern yang menekankan efisiensi dan efektivitas struktural. Salah satu inovasi mutakhir dalam teknologi beton adalah RPC (*Reactive Powder Concrete*), yaitu jenis beton bermutu tinggi yang memungkinkan struktur bangunan menjadi lebih kuat serta berdimensi lebih ramping dibandingkan dengan beton konvensional. RPC dibuat tanpa menggunakan agregat kasar, namun ditambahkan dengan material halus berukuran mikro hingga nano seperti *silica fume*. *Silica fume* memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat-sifat beton, seperti peningkatan kuat tekan dan durabilitas, karena kemampuannya dalam mengisi rongga-pori halus di dalam beton, sehingga mengurangi volume pori dan memperpadat struktur beton (Achmad Ihza Mahendra et al., 2023).

Penelitian ini menggunakan beton berserat tanpa penambahan agregat kasar. Beton serat adalah jenis beton yang mengandung serat yang ditambahkan ke campuran beton selama proses produksi. Serat ini dapat terbuat dari berbagai material, termasuk baja, polipropilena, serat karbon, dan serat kaca. Umumnya, jenis serat yang digunakan adalah serat baja mikro (*micro steel fibers*), dan serat berbahan dasar karbon (*carbon fiber*) (Perceka et al., 2022). Beton berserat diketahui mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap retak, memperbaiki perilaku daktilitas, serta memberikan kontribusi terhadap kekuatan tarik yang lebih baik dibandingkan beton konvensional (Imam et al., 2015).

Tegangan pada balok terjadi karena adanya regangan yang dipicu akibat dari beban dari pembebanan yang juga menyebabkan adanya deformasi dan menambah nilai regangan (Tripamungkas, 2023). Maka, pemahaman mengenai hubungan antara tegangan dan regangan sangat penting dalam mengevaluasi kinerja struktur beton, karena hubungan ini mencerminkan batas ketahanan material terhadap pembebanan sebelum mengalami deformasi atau keruntuhan. Parameter ini dipengaruhi oleh komposisi material dan struktur mikro beton. Beton tanpa agregat kasar cenderung memiliki respons regangan yang lebih seragam, meskipun hal ini dapat menyebabkan perbedaan karakteristik elastisitas dan daktilitas dibandingkan dengan beton normal.

Karena sebagian besar peraturan teknis dan model hubungan tegangan-regangan saat ini masih didasarkan pada karakteristik beton normal, maka penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kurva tegangan-regangan dari beton berserat tanpa agregat kasar. Pengujian dilakukan menggunakan mesin tekan dengan sistem *displacement control*, untuk kemudian dianalisis nilai kapasitas tekan serta karakteristik deformasi yang dihasilkan.

Beton

Menurut SNI 2847:2019 beton didefinisikan sebagai material yang terbentuk dari campuran semen portland atau semen hidrolik lainnya, agregat halus, agregat kasar, serta air, yang dapat ditambahkan bahan campuran (*admixture*) sesuai kebutuhan. Beton merupakan material konstruksi yang umum digunakan dalam berbagai infrastruktur, seperti jembatan, jalan, gedung, dan bendungan. Meskipun beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi, beton juga memiliki kelemahan dalam sifat getasnya (Kurniati, 2024). Hal tersebut menyebabkan terjadinya retak ketika tegangan tarik yang timbul, akibat penyusutan yang tertahan atau perubahan temperatur, melebihi kapasitas tarik dari beton itu sendiri (Wight, 2015).

Beton berserat

Beton berserat merupakan jenis beton yang ditingkatkan performanya melalui penambahan serat ke dalam campuran, yang secara merata tersebar dalam matriks beton. Penambahan ini bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis, khususnya dalam hal ketahanan terhadap retak dan kekuatan tarik. Peran serat dalam beton tidak hanya terbatas pada peningkatan kapasitas tarik, tetapi juga berdampak pada perilaku tegangan-regangan. Tidak seperti beton konvensional yang cenderung getas ketika mengalami tegangan tarik, beton yang diperkuat dengan serat menunjukkan karakteristik yang lebih plastis, dengan kemampuan regangan yang lebih besar sebelum retak terjadi (Mindess & Bentur, 2006).

Selain meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan terhadap tekan, penambahan serat juga memberikan kontribusi penting terhadap peningkatan daktilitas dan kemampuan beton dalam menyerap energi, baik akibat beban berulang maupun beban kejut. Penggunaan serat baja secara khusus terbukti efektif dalam meningkatkan *toughness*, yaitu kemampuan beton dalam menahan energi sebelum mengalami keruntuhan. Serat baja yang tersebar secara merata berfungsi sebagai elemen pengikat antar retakan, yang memperlambat propagasi retak dan memungkinkan deformasi lebih besar dibandingkan beton tanpa serat. Sifat ini sangat signifikan pada struktur yang berlokasi di wilayah rawan gempa atau pada konstruksi yang menerima beban dinamis tinggi, karena dapat meningkatkan ketahanan serta umur layan struktur (Imam et al., 2015).

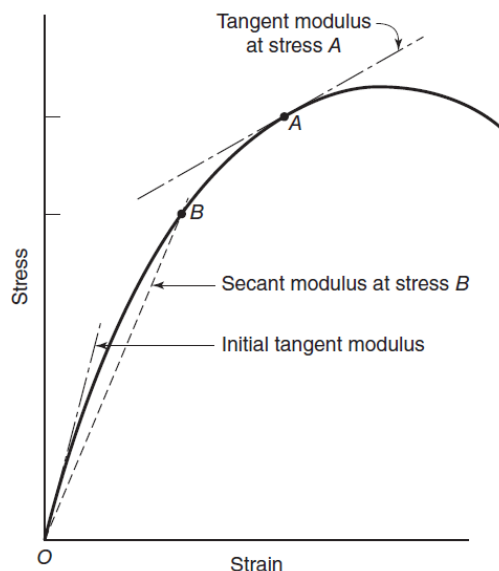
Untuk mencapai efektivitas tersebut, penyebaran serat dalam campuran beton harus merata, karena homogenitas campuran berpengaruh langsung terhadap ketangguhan, ketahanan terhadap retak, dan kapasitas tarik beton. Serat juga memainkan peran penting dalam meningkatkan performa geser. Serat baja, yang umumnya berbentuk

bergelombang atau melengkung, memberikan kontribusi terhadap peningkatan kapasitas geser dengan menyediakan gaya tahanan pasca retak. Hal ini memperkuat efek mengikat antar agregat dan menghasilkan pola keruntuhan yang lebih bertahap, berbeda dengan kegagalan tiba-tiba yang lazim terjadi pada balok tanpa tulangan geser (Wight, 2015).

Kurva diagram tegangan dan regangan pada beton normal

Tegangan didefinisikan sebagai besarnya gaya yang bekerja pada suatu material dibagi dengan luas penampangnya, sedangkan regangan merupakan perubahan panjang relatif suatu material akibat pembebanan terhadap panjang awalnya. Kurva tegangan-regangan merupakan representasi grafis dari interaksi antara tegangan dan regangan saat beton mengalami pembebanan, dan menjadi alat analisis penting dalam mengevaluasi respons material hingga mencapai titik kegagalan.

Hubungan antara tegangan dan regangan tekan pada beton dapat digambarkan melalui berbagai pendekatan, seperti model berbentuk persegi, trapesium, parabola, atau bentuk idealisasi lain yang dikembangkan berdasarkan hasil uji eksperimental. Pada kondisi regangan tinggi, hubungan ini bersifat nonlinier, artinya penambahan tegangan tidak sebanding secara langsung terhadap regangan. Dalam praktik perencanaan struktur, regangan maksimum yang umum digunakan adalah sebesar 0,003. Sementara itu, distribusi tegangan tekan yang terjadi pada beton dalam penampang melintang bersifat kompleks dan tidak dapat diketahui secara langsung. Oleh karena itu, pendekatan distribusi tegangan beton biasanya diasumsikan berdasarkan model tertentu untuk keperluan analisis struktural (SNI 2847, 2019).



Gambar 1. Diagram tegangan dan regangan pada beton normal (Wight, 2015)

Gambar 1 memperlihatkan salah satu contoh kurva tegangan-regangan yang umum dijumpai pada beton normal. Kurva ini diperoleh dari hasil uji tekan yang dilakukan selama kurang lebih 15 menit pada sampel yang dirancang menyerupai zona tekan pada elemen balok. Bagian menurun pada kurva tegangan-regangan dipengaruhi oleh kondisi pengujian, khususnya pada tahap pasca-puncak. Dalam beberapa kasus, silinder beton yang diuji dengan beban aksial dapat mengalami keruntuhan eksplosif tepat setelah mencapai tegangan maksimum. Fenomena ini terjadi apabila energi regangan yang dilepaskan oleh mesin uji saat beban menurun melampaui kapasitas energi yang mampu diserap oleh benda uji. Pada komponen struktur yang mengalami pembebanan tekan akibat lentur, kurva tegangan-regangan menunjukkan penurunan bertahap, karena saat serat-serat beton mengalami regangan dan mulai rusak, serat lainnya yang mengalami regangan lebih kecil masih mampu memikul beban, sehingga kegagalan keseluruhan dapat tertunda (Wight, 2015).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan studi literatur dan pengujian eksperimental di laboratorium berdasarkan variabel yang telah dirancang. Studi literatur dilakukan dengan mengkaji berbagai referensi yang relevan

dengan topik penelitian guna memperkuat pemahaman teoritis, membangun kerangka berpikir, serta mendukung proses pelaksanaan pengujian. Sementara itu, pengujian laboratorium dilakukan dengan mempersiapkan benda uji berbentuk silinder, yang kemudian diuji tekan menggunakan mesin dengan sistem *displacement control*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh kurva tegangan-regangan pada beton berserat tanpa agregat kasar.

Desain campuran sampel beton

Penentuan proporsi material dalam campuran beton dilakukan melalui proses perhitungan untuk memperoleh rancangan campuran (*mix design*) yang sesuai dengan kebutuhan benda uji (Christianto et al., 2023). Adapun perhitungan tersebut disusun seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Desain campuran sampel beton

Bahan	Berat Jenis (kg/m ³)	Rasio terhadap semen	Volume dalam massa semen	Kebutuhan Material per 1 m ³ (kg/m ³)
Semen	3150	1	0,00032	934,2338
Pasir	2617,8	1,1	0,00042	1027,6572
<i>Silica fume</i> (SikaFume)	2200	0,2	0,00009	186,8468
<i>Superplasticizer</i>	1150	0,025	0,00002	23,3558
Air	1000	0,18	0,00018	218,6107
Tepung Marmer	2563	0,1	0,00004	93,4234
Serat <i>fiber</i>	7850			7,85
Σ			0,00107	
$0,999/\Sigma$			934,2338	

Proses pembuatan dan perawatan sampel beton

Proses pembuatan dan perawatan benda uji yang dilakukan di laboratorium dengan langkah-langkah berikut ini:

1. Menyiapkan cetakan silinder dan mengoleskan oli pada bagian dalam silinder berukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm sebagai bekisting pengecoran.
2. Melakukan penimbangan dan persiapan seluruh bahan yang akan digunakan untuk pengecoran.
3. Mencampurkan semen, pasir, tepung marmer, dan *silica fume* dalam wadah pengecoran dan diaduk hingga tercampur rata.
4. Menambahkan air dan superplasticizer secara perlahan ke dalam campuran sambil terus diaduk.
5. Setelah adukan merata, masukkan serat baja mikro ke dalam campuran beton.
6. Setelah campuran beton homogen, adukan tersebut dituangkan ke dalam cetakan atau bekisting yang telah disiapkan.
7. Selanjutnya, bekisting diketuk menggunakan palu karet guna mengurangi gelembung udara yang terperangkap dalam campuran beton.
8. Sampel beton dibiarkan mengering selama 24 jam sebelum dilepaskan dari cetakannya.
9. Setelah proses pelepasan cetakan, sampel beton kemudian direndam dalam air panas untuk proses perawatan (*curing*) selama kurang lebih 28 hari.

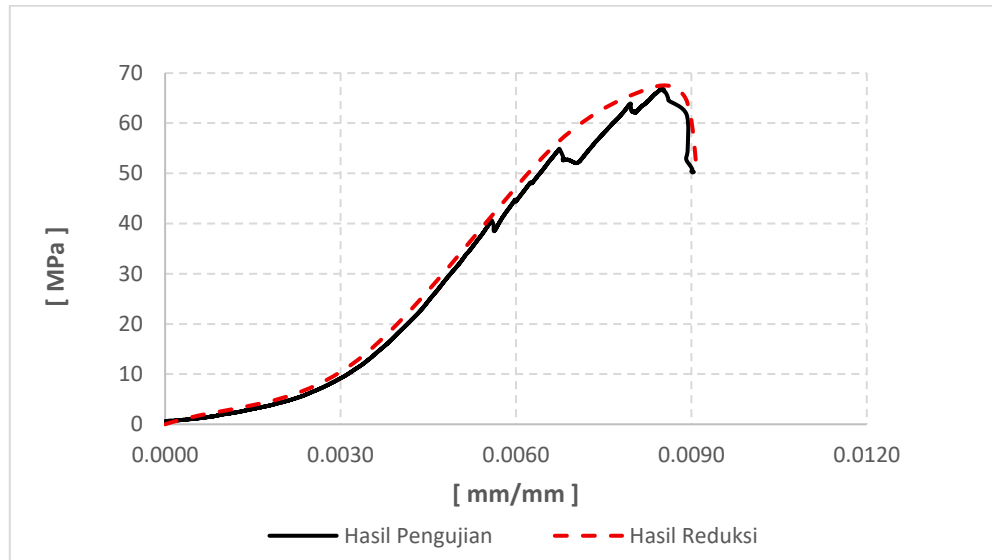
Pengujian tekan dengan mesin tipe *displacement control*

Penelitian ini mencakup pengujian eksperimental pada benda uji berbentuk silinder untuk memperoleh data karakteristik mekanis yang dibutuhkan. Proses pengujian menggunakan mesin uji tekan dengan sistem *displacement control* guna merekam respons material secara lebih akurat. Adapun tahapan pengujian yang diterapkan pada sampel yang telah dipersiapkan adalah sebagai berikut:

1. Sampel yang telah melewati fase *curing*, diangkat dan dikeringkan selama 1x24 jam.
2. Sampel beton yang telah melalui proses pengeringan selama 1x24 jam kemudian dilakukan pengujian dengan mesin uji tekan tipe *displacement control*.
3. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban secara bertahap hingga benda uji mengalami keruntuhan, sehingga dapat diperoleh kurva tegangan-regangan yang merepresentasikan respons material terhadap pembebanan aksial.

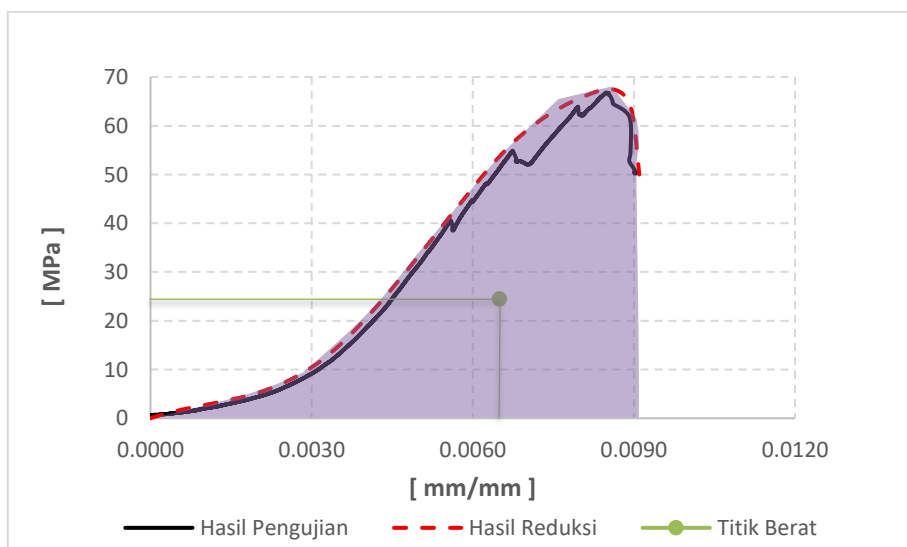
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kuat tekan terhadap benda uji silinder beton berserat dilakukan menggunakan mesin uji tekan dengan sistem *displacement control*. Dari pengujian ini diperoleh data berupa nilai perpindahan (*displacement*) dan beban maksimum yang dapat ditahan oleh sampel sebelum mengalami keruntuhan. Nilai *displacement* dicatat dalam satuan milimeter (mm), dan digunakan untuk menghitung regangan dengan membagi besarnya perpindahan terhadap tinggi sampel. Sementara itu, tegangan diperoleh dengan membagi beban tekan (dalam satuan Newton) terhadap luas penampang silinder beton. Setelah kedua parameter tersebut dihitung, dilakukan analisis lanjutan dengan menyusun diagram hubungan tegangan-regangan. Pada grafik tersebut juga ditambahkan kurva hasil reduksi sebagai representasi penyederhanaan data eksperimental yang telah diperoleh. Visualisasi lengkap hubungan tegangan dan regangan ditampilkan pada gambar 2 berikut.



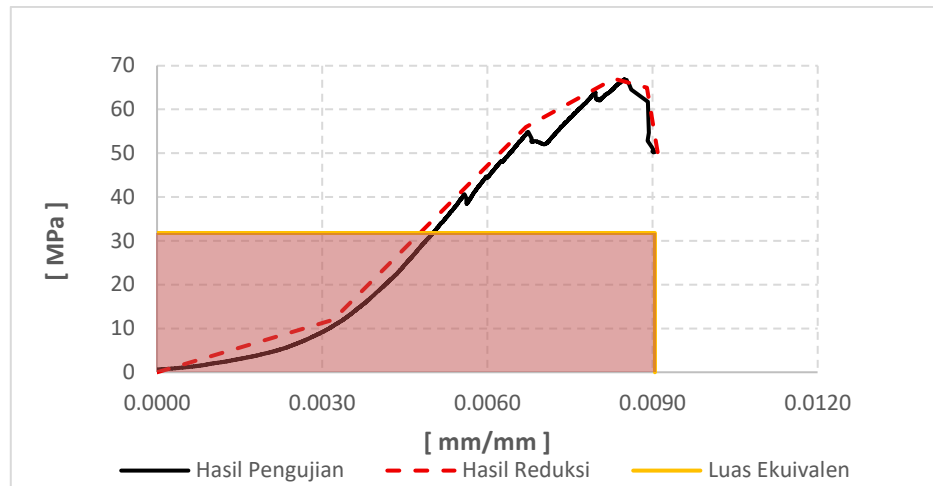
Gambar 2. Diagram tegangan dan regangan sampel S20

Berdasarkan analisis terhadap kurva tegangan-regangan yang telah disusun sebelumnya, diperoleh besar energi serap dari masing-masing benda uji. Energi ini dihitung melalui luas area di bawah kurva tegangan-regangan, yang mencerminkan kapasitas beton dalam menyerap energi selama proses pembebanan aksial. Perhitungan luas tersebut dilakukan menggunakan perangkat lunak AutoCAD untuk meningkatkan ketelitian pengukuran. Selain perhitungan luas energi, juga dilakukan penentuan titik berat energi pada diagram tegangan dan regangan. Titik berat ini merepresentasikan distribusi energi serap sepanjang kurva, yang berperan penting dalam memahami perilaku deformasi beton. Koordinat titik berat energi digambarkan pada diagram tegangan dan regangan seperti pada gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Koordinat titik berat pada diagram sampel S20

Melalui hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh nilai regangan maksimum untuk setiap sampel beton berserat tanpa agregat kasar. Dalam perhitungan selanjutnya, regangan maksimum (ϵ_{\max}) dari tiap sampel dinormalisasi menjadi satu satuan. Berdasarkan luas kurva tegangan-regangan yang telah dihitung sebelumnya, dilakukan pendekatan terhadap luasan ekuivalen berbentuk persegi panjang. Melalui pendekatan ini, nilai tegangan ekuivalen dapat ditentukan dengan membagi luas area di bawah kurva terhadap panjang regangan yang telah dinormalisasi. Berdasarkan hasil perhitungan tegangan ekuivalen, area ekuivalen tersebut dapat direpresentasikan dalam bentuk diagram hubungan tegangan-regangan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Luas ekuivalan sampel S20

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium serta analisis dan perhitungan yang telah dilakukan, disusun rekapitulasi data yang dirangkum dalam tabel 2. Tabel tersebut memuat sejumlah parameter penting, seperti nilai energi serap masing-masing sampel beton, koordinat titik berat yang merepresentasikan distribusi pusat energi, serta nilai *peak stress* atau tegangan maksimum yang diperoleh dari pengujian tekan dan mencerminkan kualitas kekuatan beton. Selain itu, ditampilkan pula hasil perhitungan tegangan ekuivalen yang diperoleh dari luas kurva tegangan-regangan. Nilai tegangan ekuivalen ini tidak hanya digunakan untuk membentuk representasi luas ekuivalen dalam diagram tegangan-regangan, tetapi juga sebagai dasar dalam perhitungan faktor pengali untuk masing-masing sampel.

Tabel 2. Rekapitulasi hasil perhitungan sampel

Sampel	Peak Stress (Mpa)	Peak Strain (mm/mm)	Energi	Titik Berat		Tegangan Ekuivalen (MPa)	Faktor Pengali
				X	Y		
S2	44,3675	0,006031	0,1234	0,0042	14,4765	20,4610	0,4612
S4	36,9906	0,005775	0,1086	0,0040	12,7439	18,8052	0,5084
S7	31,5817	0,007381	0,0899	0,0053	9,7935	12,1799	0,3857
S11	38,7817	0,006906	0,1500	0,0046	14,3247	21,7202	0,5601
S12	61,5794	0,008775	0,2604	0,0063	23,0495	29,6752	0,4819
S15	31,8534	0,009644	0,1568	0,0067	11,6989	16,2592	0,5104
S16	42,7361	0,004331	0,0866	0,0030	14,2044	19,9954	0,4679
S19	46,0098	0,011862	0,3418	0,0076	17,9936	28,8147	0,6263
S20	66,8403	0,009044	0,2877	0,0065	24,5235	31,8120	0,4759
S21	60,5787	0,008975	0,2781	0,0063	22,8468	30,9861	0,5115
mean	46,1319	0,007872				23,0709	0,4989

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang dilakukan pada sampel beton berserat tanpa agregat kasar dengan ukuran 10x20 cm, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Selama proses pengujian, benda uji beton yang mengalami kegagalan tidak mengalami kehancuran total menjadi serpihan. Hal ini disebabkan oleh keberadaan serat dalam campuran beton yang berfungsi menahan pecahan dan menjaga integritas bentuk sampel pasca keruntuhan.

2. Beton berserat tanpa agregat kasar menunjukkan karakteristik hubungan tegangan-regangan yang bersifat nonlinier. Setelah mencapai tegangan maksimum, kurva menunjukkan penurunan regangan tanpa disertai peningkatan deformasi yang signifikan, menandakan keterbatasan kemampuan material dalam mempertahankan regangan pasca puncak beban.
3. Dari hasil analisis data pengujian, diperoleh nilai energi serap masing-masing sampel beton. Sampel dengan nilai energi serap tertinggi adalah S19 sebesar 0,3418, sedangkan nilai terendah tercatat pada sampel S1 sebesar 0,0233. Hal ini menunjukkan adanya variasi kemampuan sampel dalam menyerap energi selama proses pembebanan.
4. Hasil perhitungan berdasarkan data pengujian menunjukkan bahwa nilai rata-rata tegangan ekuivalen dari seluruh sampel beton berserat tanpa agregat kasar adalah sebesar 19,6673 MPa. Nilai ini merepresentasikan besaran tegangan rata-rata yang ekuivalen terhadap luas energi serap masing-masing kurva tegangan-regangan.
5. Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan terhadap data uji laboratorium, diperoleh nilai faktor pengali sebesar 0,5172 pada sampel beton berserat tanpa agregat kasar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT Indocement Tunggul Prakarsa, Tbk yang telah mendukung keperluan semen dan juga kepada PT Sika Indonesia yang telah mendukung keperluan *Superplasticizer* dan *Silicafume* pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad Ihza Mahendra, Nurul Rochmah, & Herry Widhiarto. (2023). Pengaruh penggunaan silica fume sebagai bahan tambah pada beton alir. *Student Scientific Creativity Journal*, 1(4), 493–502. <https://doi.org/10.55606/sscj-amik.v1i4.1577>
- Christianto, D., Utami, T. A., & Yoana, M. (2023). Sifat mekanik beton tanpa agregat kasar. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 6(1), 145-158. <https://doi.org/10.24912/jmts.v6i1.21637>
- Imam, E., As'ad, S., & Basuki, A. (2015). Kinerja beton serat menggunakan uji toughness panel pada kandungan serat yang berbeda. *Matriks Teknik Sipil*, 3(3), 712-719. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v3i3.37270>
- Kurniati, D. (2024). Ketahanan kuat tekan beton serat fiber glass sebagai bahan tambah. *Jurnal Karkasa*, 10(2), 39-44. <https://doi.org/10.32531/jkar.v10i2.898>
- Mindess, S., & Bentur, A. (2006). *Fibre Reinforced Cementitious Composites* (2nd ed.). CRC Press LLC. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>
- Perceka, W., Djayaprabha, H. S., & Rizkiani, S. N. (2022). Aplikasi high performance fiber reinforced concrete sebagai material berkelanjutan: ikhtisar. *Journal of Sustainable Construction*, 1(2), 33-42. <https://doi.org/10.26593/josc.v1i2.5275>
- Tjokrodinuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Biro Penerbit KMTS FT UGM.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung* (SNI 2847:2019). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Tjokrodinuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Biro Penerbit KMTS FT UGM.
- Tripamungkas, A. D. (2023). Analisis tegangan regangan pada balok beton bertulang menggunakan metode elemen hingga. *Indonesian Journal of Civil Engineering Education*, 9(2), 34-37. <https://doi.org/10.20961/ijcee.v9i2.83603>
- Wight, J. (2015). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Pearson Education

