

KAJIAN PENAMBAHAN SERAT SINTETIK PADA CAMPURAN BETON TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON

Study On The Effect Of Adding Synthetic Fibers In Concrete Mixture On Its Mechanical Properties

N. Retno Setiati

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung, Bandung
Surel : retno.setiati@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 09 Maret 2015; Disetujui: 12 Februari 2016

Abstrak

Teknologi pemanfaatan serat sintetik pada campuran beton mengalami perkembangan pesat. Beberapa penelitian terkait penambahan serat sintetik ke dalam campuran beton pada umumnya menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kinerja beton dalam hal kekuatan, kekakuan, dan daktilitas. Kajian ini berisi tentang efek penambahan serat sintetik dengan komposisi 0,4% dan 0,5% volume absolut campuran beton pada perilaku mekanik beton. Pengkajian didukung dengan hasil uji laboratorium dengan membuat beberapa benda uji pelat berukuran 1500 x 1500 mm dengan ketebalan 200 mm dan 250 mm. Berdasarkan hasil kajian disimpulkan bahwa sifat daktilitas beton dengan penambahan serat sintetik sangat tergantung pada jumlah komposisi serat yang dicampurkan ke dalam beton dan ketebalan pelat. Sifat mekanik yang dihasilkan dari pengujian laboratorium untuk pelat dengan ketebalan 200 mm berbeda dengan pelat yang memiliki tebal 250 mm. Pelat yang berserat dengan tebal 200 mm, nilai lendutannya lebih besar 17% dan memiliki energi absorpsi lebih besar 22% dibandingkan pelat tanpa serat sintetik. Besarnya peningkatan kapasitas lentur berkisar antara (20 – 30)% dari pelat yang tidak ditambah dengan serat sintetik. Akan tetapi pada pelat dengan ketebalan 250 mm tidak terjadi peningkatan kapasitas momen lentur jika campuran beton ditambah dengan 0,4% atau 0,5%, Penambahan serat sintetik pada pelat dengan tebal 250 mm dapat menurunkan nilai daktilitas sebesar (9 – 13)% dan menurunkan energi absorpsi sebesar (45 – 55)%.

Kata Kunci : Pelat, serat sintetik, daktilitas, lendutan, energi absorpsi

Abstract

The application of synthetic fibers in concrete mixtures has grown rapidly since 1960. Some studies related to the addition of synthetic fibers in concrete mixtures generally indicate that there is an increased performance of concrete in strength, stiffness, and ductility. This study describes the effect of the addition of synthetic fibers with the composition of 0.4 and 0.5% of the absolute volume of the concrete mix on its mechanical properties. The research is supported by the results of laboratory tests to make some test specimen plates of 1500 x 1500 mm with a thickness of 200 mm and 250 mm. Based on the results of the study it can be concluded that the ductility properties of concrete with the addition of synthetic fibers depends on the amount of fiber composition that is added into the concrete and the thickness of the plate. The resulting mechanical properties of laboratory testing for plates with a thickness of 200 mm is different from those of the plate which has a thickness of 250 mm. Plate with a thickness of 200 mm and with added synthetic fibers, has deflection 17% greater and has absorption of energy 22% greater compared to the plate without synthetic fibers. The magnitude of the increase in flexural capacity ranging between (20-30)% of the plate without synthetic fibers. But plate with a thickness of 250 mm shows no increase in the bending moment capacity even though the concrete mix is added with 0.4% or 0.5% of fibers. The addition of synthetic fibers on the plate with thickness of 250 mm produces (9-13)% lower ductility and lower amount of energy absorption down to (45-55)%.

Keywords : Plate, synthetic fibre, ductility, deflection, energy absorption

PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang sudah umum digunakan untuk bangunan gedung maupun bangunan lainnya. Penggunaan

material beton dalam konstruksi (gedung, bendungan, terowongan, jalan, maupun jembatan) mengalami perkembangan yang pesat. Pada umumnya beton merupakan campuran antara

agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), semen, dan air. Untuk mendapatkan beton yang direncanakan, campuran material beton dapat ditambah dengan menggunakan bahan *admixture* (*additive*). Penggunaan bahan *admixture* (*additive*) pada beton sangat tergantung pada tujuan pembuatan konstruksi yang direncanakan. Beton sebagai bagian dari elemen struktur lantai gedung tentu berbeda dengan beton untuk pembuatan konstruksi lain. Penelitian ini dibatasi pada seberapa besar pengaruh penambahan serat sintetis ke dalam campuran beton ditinjau dari sifat mekanik beton tersebut. Pemanfaatan beton serat ini digunakan untuk jenis elemen struktur yang memiliki luas atau area yang besar, seperti lantai gedung, pelat jembatan, bendungan, terowongan (*tunnel*), atau kubah (*dome*). Beton memiliki sifat lebih kuat dalam menerima gaya tekan dan lemah dalam menerima gaya tarik (lentur). Dalam suatu struktur (baik gedung, bendungan, jembatan, atau struktur lainnya) kelemahan beton dalam menerima gaya tarik maupun lentur dapat diakomodir dengan baja tulangan atau dengan penambahan serat ke dalam campuran beton. Elemen struktur beton diharapkan mampu menahan gaya lentur akibat beban.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek mekanis dari penambahan serat pada beton. Pada prinsipnya, penambahan serat sintetis ke dalam campuran beton dimaksudkan untuk menghambat terjadinya retak pada beton akibat beban dan meningkatkan sifat mekanik beton. Berdasarkan beberapa penelitian yang sudah dilakukan mengenai sifat dan karakteristik beton serat dapat dibuat suatu hipotesis bahwa penambahan serat sintetis ke dalam campuran beton dari suatu elemen struktur dapat menyerap energi lebih tinggi dibandingkan beton konvensional.

Dalam penelitian ini dibuat beberapa benda uji dalam bentuk pelat berukuran 1500 mm x 1500 mm dengan ketebalan yang berbeda (ketebalan $t_1 = 200$ mm dan $t_2 = 250$ mm). Komposisi serat yang ditambahkan ke dalam campuran beton juga bervariasi (yaitu 0,4% dan 0,5%). Bahan serat yang digunakan adalah jenis sintetis dengan ukuran panjang 60 mm dan diameter antara (0,25 – 0,5) mm. Pembebanan dilakukan secara terpusat pada tengah pelat. Penelitian beton dengan penambahan serat (alami maupun sintetis) di mulai sejak tahun 1960-an yaitu sejak digunakannya serat baja lurus ke dalam campuran beton. Penambahan serat ke dalam campuran beton segar secara umum dapat menyebabkan terjadinya *balling effect* (serat yang berkumpul membentuk bola sehingga dapat mengganggu ikatan matrik). Masalah tersebut dapat diatasi dengan memberikan *superplasticizer*

atau dengan meminimalkan ukuran agregat maksimum (Resmi, 2008).

Ada beberapa keuntungan dari penggunaan serat ke dalam campuran beton. Penambahan serat ke dalam beton akan meningkatkan kuat tarik beton yang pada umumnya sangat rendah. Pertambahan kuat tarik akan memperbaiki kinerja komposit beton serat dengan kualitas yang lebih bagus dibandingkan dengan beton konvensional (Sholihin, 2008). Lebih rinci, keuntungan penambahan serat pada beton adalah pertama, serat terdistribusi secara homogen di dalam volume beton pada jarak yang relatif sangat dekat satu dengan yang lain. Hal ini akan memberi tahanan terhadap tegangan berimbang ke segala arah dan memberi keuntungan material struktur yang disiapkan untuk menahan beban dari berbagai arah. Kedua, perbaikan perilaku deformasi seperti ketahanan terhadap impak, daktilitas yang lebih besar, kuat lentur dan kapasitas torsi yang lebih baik. Ketiga, serat meningkatkan ketahanan beton terhadap formasi dan pembentukan retak. Keempat, peningkatan ketahanan pengelupasan (*spalling*) dan retak pada selimut beton akan menghambat terjadinya korosi pada baja tulangan. Penggunaan serat sintetis akan meningkatkan ketahanan material beton terhadap bahaya api. Secara umum semua keuntungan tersebut berarti peningkatan ketahanan struktur bangunan (Sholihin, 2008).

Menurut Dachlan T. (2011), bila dikaitkan dengan kondisi retak, perkerasan jalan yang dibuat dari beton dengan penambahan serat sintetis dapat mencapai umur 50 tahun, sedangkan perkerasan jalan dengan beton konvensional hanya dapat mencapai umur layan 25 tahun. Artinya bahwa penambahan serat sintetis pada beton untuk perkerasan jalan dapat menghambat terjadinya retak. Penelitian yang sama juga pernah dilakukan terkait kinerja beton yang ditambah dengan serat sintetis. Berbeda dengan kekuatan lentur, faktor penambahan serat pada beton ternyata tidak mempengaruhi kekuatan tekan beton tersebut. Peningkatan kuat tekan beton yang ditambah dengan serat sintetis hanya berkisar antara (1-2)%. Sifat mekanis beton dengan penambahan serat sintetis tergantung dari jumlah komposisi serat. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, diperoleh jumlah komposisi optimum dari serat yang harus ditambahkan ke dalam campuran beton sebesar 0% dari volume absolut campuran beton. Dengan komposisi tersebut, beton dapat memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan beton konvensional dalam hal kekuatan tekan dan lentur (Setiati R, 2010). Berdasarkan persamaan statika, momen lentur dapat dihitung dengan menggunakan Rumus (1).

$$M = \frac{\sigma_f I}{Y}, \text{ dan } I = \frac{1}{12} b h^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

σ_f adalah tegangan lentur (MPa);
 M adalah momen lentur (N.mm);
 Y adalah jarak dari garis netral terhadap serat atas beton (mm);
 I adalah momen inersia (mm⁴);
 b adalah lebar penampang (mm);
 h adalah tinggi penampang (mm).

Penambahan serat sintetik ke dalam campuran beton, selain dapat meningkatkan kekuatan lentur dan tekan, juga dapat meningkatkan daktilitas. Dalam hal ini beton memiliki kemampuan untuk dapat menyerap energi (*energy absorption*). Menurut Wahyono (1996), besarnya energi absorpsi (E_a) dapat dihitung dari besarnya luas di bawah fungsi diagram $f(x)$ yang merupakan hubungan antara beban vs lendutan (Rumus 2).

$$E_a = \int_{x1}^{x2} f(x) dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

$f(x)$ adalah hasil regresi dari fungsi persamaan diagram beban vs lendutan;
 $x1$ adalah lendutan belum terjadi (0 mm);
 $x2$ adalah lendutan maksimum sebelum pelat mengalami retak atau runtuh.

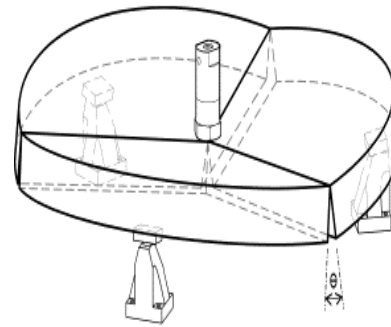
Penelitian lain terkait penambahan serat sintetik ke dalam campuran beton juga pernah dilakukan pada tahun 2009 yaitu uji lentur balok dengan kadar serat 0,5%. Uji lentur mengacu pada ASTM C1609/C-1609M dengan kuat lentur yang dihasilkan dari ketiga benda uji sebesar 46,28 kN dan lendutan maksimum 4,00 mm (Tabel 1).

Tabel 1 Hasil Uji Lentur Balok Beton Serat

No.	Benda Uji	Dimensi (mm)			Kuat Lentur Rata-rata (kN)	Lendutan (mm)
		Lebar	Tinggi	Panjang		
1	B5-1	148.50	151.50			
2	B5-2	150.00	151.50	450.00	46.28	4.00
3	B5-3	150.00	151.50			

Sumber : TSE, 2009

Pengujian benda uji pelat bundar beton serat dengan mengacu pada ASTM C 1550-04 pernah dilakukan, dimana pelat tersebut mempunyai ukuran diameter 800 mm dan tebal 75 mm. Pelat ditumpu pada tiga sisi (Gambar 1).



Gambar 1 Skema Uji Pelat Bundar Beton Serat

Berdasarkan skema uji pada Gambar 1 diperoleh energi absorpsi sebesar 548 Joule (ASTM C 1550-04). Bila benda uji dibuat dalam bentuk pelat persegi, maka besarnya energi adalah 1,370 Joule (EFNARC – EN 14488-5).



Gambar 2 Uji Pelat Persegi Beton Serat (EFNARC – EN 14488-5)

Dari Gambar 2, pada pelat persegi terjadi konsentrasi tegangan akibat beban pada keempat sudut pelat beton sehingga energi absorpsi yang terjadi pada pelat persegi lebih besar dari pada pelat bundar.

METODE

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini berupa kajian literatur dari beberapa hasil penelitian yang sudah dilakukan, pengumpulan data primer hasil pengujian di laboratorium, melakukan analisis dan evaluasi, serta membandingkan hasil analisis dengan penelitian sebelumnya terkait sifat mekanik beton yang ditambah dengan serat sintetik.

Pelat yang diuji adalah pelat beton tanpa serat sintetik (3 benda uji), pelat beton dengan penambahan serat sintetik 0,4% dan 0,5% (untuk masing-masing sebanyak 3 benda uji), tebal pelat adalah 200 mm dan 250 mm. Beban ditempatkan secara terpusat di tengah pelat sebagaimana dapat dilihat dalam ASTM C 1550 – 04. “*Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)*”. Sedangkan standar yang digunakan dalam

membuat rancangan campuran beton adalah SNI 03-2834-2004 (Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal). Kuat tekan karakteristik benda uji sebesar 35 MPa. Serat yang ditambahkan ke dalam campuran beton adalah jenis sintetis plastik yang memiliki kapasitas kuat tarik 640 MPa. Pemberian gaya (beban) pada pelat dilakukan sampai benda uji hancur dengan interval pembebanan per 250 kg. Pelat ditumpu pada keempat sisinya, kemudian beban diletakkan di tengah bidang pelat. Untuk mengetahui besarnya lendutan yang terjadi, pemasangan alat pada benda uji menggunakan *deflector meter* dan *displacement gauge*. Gambar 3 adalah *set up* pengujian pelat beton. Berdasarkan Gambar 3, pelat ditumpu pada ke empat sisi dengan pembebanan terpusat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kuat lentur pelat mengacu pada ASTM C 1550 – 04. Analisis hasil pengujian untuk pelat dengan tebal 200 mm ditunjukkan dalam Tabel 2 s/d Tabel 4 dan Gambar 4 s/d Gambar 8. Untuk analisis pelat dengan ketebalan 250 mm ditunjukkan dalam Tabel 5 s/d Tabel 7 dan Gambar 9 s/d Gambar 11. Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian kuat lentur pelat tanpa serat sintetis.

Hasil uji lentur dalam setiap tahap pembebanan menghasilkan lendutan yang terjadi pada setiap benda uji. Diagram beban vs lendutan dari uji lentur tersebut ditunjukkan dalam Gambar 4.



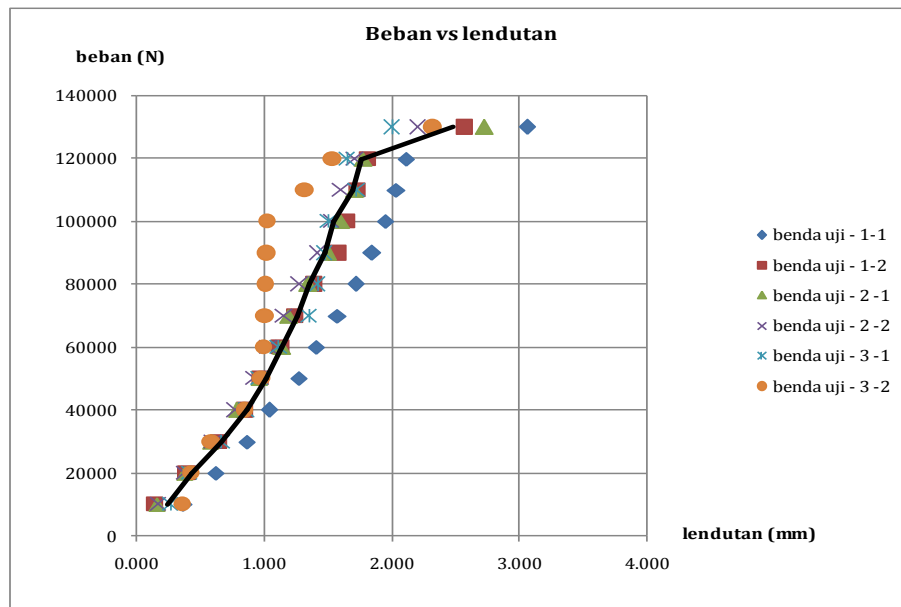
Gambar 3 Set Up Uji Pelat Beton

Tabel 2 Hasil Uji Lentur Pelat Tanpa Serat Sintetik

No	Beban (N)	Benda Uji - 1		Benda Uji - 2		Benda Uji - 3	
		Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)
1	10000	0.370	0.150	0.165	0.175	0.270	0.365
2	20000	0.620	0.400	0.375	0.380	0.420	0.435
3	30000	0.870	0.650	0.580	0.600	0.670	0.590
4	40000	1.040	0.850	0.785	0.780	0.870	0.850
5	50000	1.270	0.975	0.960	0.930	0.970	0.980
6	60000	1.410	1.130	1.145	1.035	1.120	1.000
7	70000	1.580	1.250	1.200	1.160	1.360	1.010
8	80000	1.720	1.400	1.350	1.280	1.420	1.014
9	90000	1.850	1.580	1.505	1.420	1.480	1.025
10	100000	1.950	1.650	1.605	1.530	1.510	1.030
11	110000	2.040	1.735	1.715	1.605	1.730	1.320
12	120000	2.120	1.815	1.785	1.715	1.650	1.540
13	130000	3.070	2.580	2.735	2.215	2.010	2.325
14	140000	-	-	-	-	-	-

Dari Tabel 2, beban maksimum terjadi pada 130.000 N. Pada beban 140.000 N ketiga benda uji pelat mengalami retak. Lendutan maksimum benda uji-1 sebesar 3,070 mm, pada benda uji-2 dan benda uji-3 lendutan maksimum sebesar 2,735 mm dan 2,325 mm. Ada sedikit perbedaan pada

lendutan yang terjadi untuk ketiga benda uji, hal ini kemungkinan dapat disebabkan pemadatan yang kurang sempurna. Bila dirata-ratakan, besarnya lendutan maksimum benda uji pelat tanpa penambahan serat sebesar 2,71 mm.



Gambar 4 Diagram Beban vs Lendutan Pelat Tanpa Serat Sintetik

Berdasarkan Gambar 4, diperoleh diagram hubungan beban dengan lendutan rata-rata dari beberapa benda uji (kurva warna hitam). Bentuk fungsi persamaan diagram pada Gambar 4 dapat dibuat sebagai fungsi $f(x)$, dimana :

$$f(x) = -21453x^3 + 77153x^2 - 8012x + 4576 \quad \text{..... (3)}$$

Persamaan (3) merupakan fungsi polinomial hubungan beban dengan lendutan yang diperoleh dari data hasil uji dalam Tabel 3. Persamaan tersebut diturunkan dari pendekatan regresi polinomial. Besarnya energi yang diserap dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2) sebesar :

$$E_a = \int_{x1}^{x2} \{-21453x^3 + 77153x^2 - 8012x + 4576\} dx \quad \text{..... (4)}$$

Dimana $x1=0$ mm dan $x2=2,489$ mm, sehingga besarnya energi yang diserap oleh pelat tanpa serat sintetik sebesar $E_a = 177.313$ Joule. Pola keruntuhan yang terjadi pada pelat tersebut bersifat *brittle* (getas), dikarenakan kekuatan tarik hanya dipikul oleh beton. Berdasarkan beberapa kajian literatur, besarnya kuat tarik beton hanya berkisar (1/10) dari kuat tekan beton rencana. Perilaku pelat beton dengan penambahan serat sintetik tentu akan berbeda dari segi kekuatan dan daktilitasnya. Gambar 5 menunjukkan pola keruntuhan dari pengujian pelat beton. Berdasarkan Gambar 5, retak lentur terjadi pada serat bawah beton.



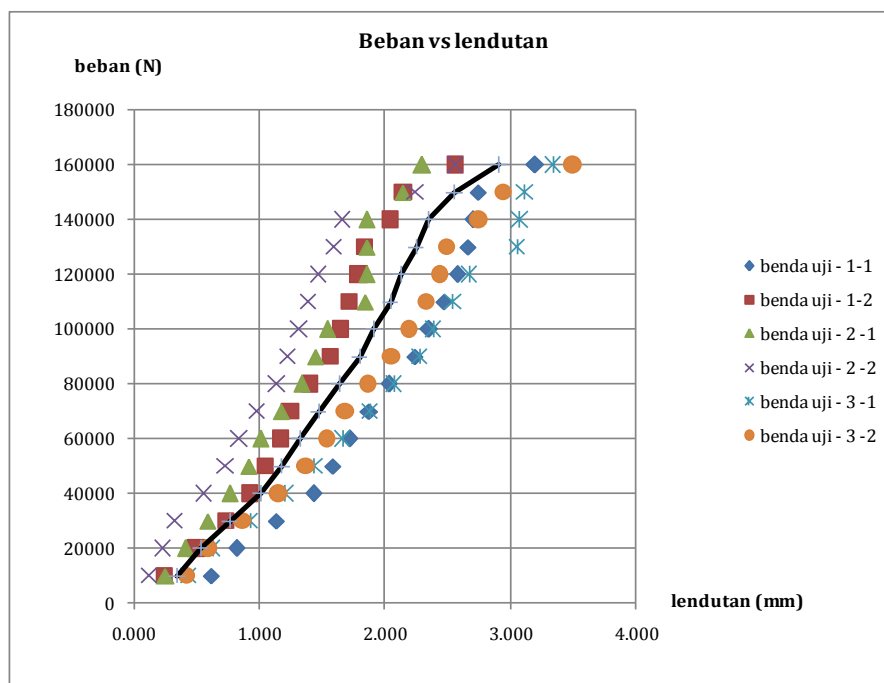
Gambar 5 Pola Runtuh Pengujian Pelat Beton

Tabel 3 Hasil Uji Lentur Pelat (Tebal 200 mm) dengan Penambahan 0,4% Serat

No	Beban (N)	Benda Uji - 1		Benda Uji - 2		Benda Uji - 3	
		Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)
1	10000	0.615	0.245	0.255	0.120	0.440	0.425
2	20000	0.815	0.500	0.410	0.230	0.630	0.595
3	30000	1.130	0.740	0.585	0.330	0.930	0.865
4	40000	1.430	0.925	0.765	0.560	1.210	1.155
5	50000	1.580	1.055	0.915	0.730	1.440	1.370
6	60000	1.715	1.175	1.010	0.840	1.660	1.545
7	70000	1.875	1.250	1.170	0.980	1.880	1.685
8	80000	2.030	1.405	1.335	1.140	2.070	1.865
9	90000	2.235	1.570	1.445	1.230	2.275	2.055
10	100000	2.355	1.650	1.540	1.315	2.390	2.195
11	110000	2.465	1.715	1.845	1.395	2.545	2.330
12	120000	2.580	1.795	1.855	1.475	2.670	2.440
13	130000	2.660	1.845	1.855	1.600	3.055	2.500
14	140000	2.700	2.050	1.855	1.660	3.075	2.750
15	150000	2.740	2.150	2.145	2.245	3.115	2.950
16	160000	3.200	2.565	2.300	2.565	3.345	3.500

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian kuat lentur pelat dengan penambahan 0,4% serat sintetik. Beban maksimum terjadi pada 160.000 N. Lendutan maksimum benda uji-1 sebesar 3,200 mm, pada benda uji-2 dan benda uji-3 lendutan maksimum sebesar 2,565 mm dan 3,500 mm. Dengan penambahan serat 0,4% ke dalam

campuran beton, kuat tekan pelat lebih besar dan lendutan maksimum yang dapat dipikul juga lebih besar. Lendutan maksimum rata-rata dari ketiga benda uji tersebut adalah 3,09 mm. Pola keruntuhan yang terjadi pada pelat tersebut lebih daktil. Bila Tabel 3 dibuat dalam bentuk diagram, maka akan seperti pada Gambar 6.

**Gambar 6** Diagram Beban vs Lendutan Pelat dengan Penambahan 0.4% Serat Sintetik

Berdasarkan Gambar 6, diperoleh diagram hubungan beban dengan lendutan rata-rata dari beberapa benda uji. Bentuk persamaan diagram

pada Gambar 6 dapat dibuat sebagai fungsi $f(x)$, dimana :

$$f(x) = -7023x^3 + 37309x^2 + 6524x + 2933 \quad \text{..(5)}$$

Persamaan (5) merupakan fungsi polinomial hubungan beban dengan lendutan yang diperoleh dari data hasil uji dalam Tabel 3. Besarnya energi yang diserap dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2) sebesar :

$$E_a = \int_{x1}^{x2} \{-7023x^3 + 37309x^2 + 6524x + 2933\} dx \quad \text{.....(6)}$$

Dimana $x_1 = 0$ mm dan $x_2 = 2,913$ mm, sehingga besarnya energi yang diserap oleh pelat dengan penambahan 0,4% serat sintetik sebesar $E_a = 217.126$ Joule. Kemampuan energi yang diserap lebih besar dibandingkan pelat sebelumnya. Pada saat pengujian dilakukan pengamatan perilaku yang terjadi pada benda uji terutama pada penampang yang mengalami retak. Dari hasil pemeriksaan dapat dilihat sebaran serat yang terdapat dalam beton keras (Gambar 7).



Gambar 7 Sebaran Serat dalam Pelat Beton

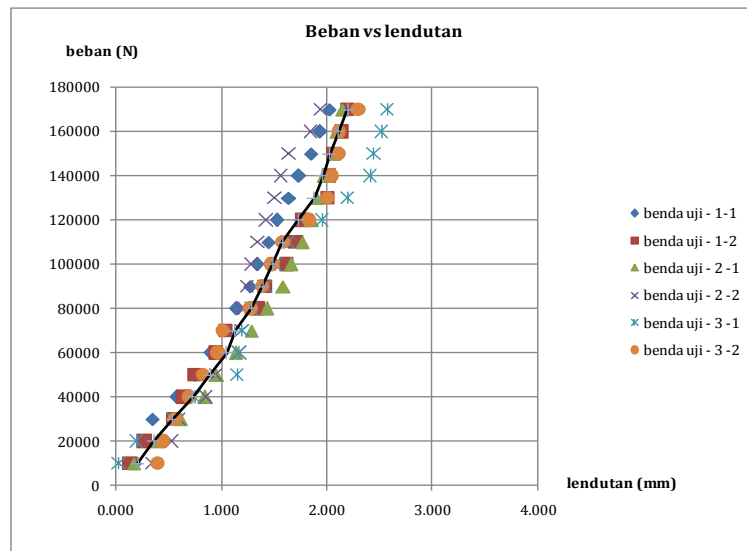
Gambar 7 memperlihatkan bahwa serat tersebar secara acak di dalam beton. Sebaran acak serat di dalam beton memiliki orientasi arah serat yang bervariasi. Tidak ditemukan adanya serat yang menggumpal. Penyebaran serat pada beton sangat dipengaruhi bagaimana proses pencampuran yang dilakukan pada saat pengecoran beton. Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian kuat lentur pelat dengan penambahan 0,5% serat sintetik.

Tabel 4 Hasil Uji Lentur Pelat (Tebal 200 mm) dengan Penambahan 0,5% Serat

No	Beban (N)	Benda Uji - 1		Benda Uji - 2		Benda Uji - 3	
		Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)
1	10000	0.180	0.140	0.170	0.345	0.035	0.400
2	20000	0.285	0.275	0.400	0.540	0.200	0.450
3	30000	0.350	0.550	0.615	0.600	0.550	0.570
4	40000	0.575	0.650	0.850	0.860	0.755	0.700
5	50000	0.755	0.750	0.960	0.950	1.157	0.835
6	60000	0.895	0.950	1.145	1.175	1.175	0.975
7	70000	1.030	1.050	1.290	1.200	1.200	1.020
8	80000	1.140	1.355	1.440	1.220	1.290	1.280
9	90000	1.275	1.420	1.590	1.250	1.415	1.400
10	100000	1.345	1.620	1.665	1.290	1.510	1.485
11	110000	1.450	1.710	1.770	1.350	1.630	1.590
12	120000	1.530	1.770	1.860	1.430	1.960	1.835
13	130000	1.645	2.015	1.910	1.510	2.200	2.010
14	140000	1.740	2.025	1.975	1.570	2.420	2.055
15	150000	1.850	2.075	2.070	1.645	2.450	2.115
16	160000	1.940	2.150	2.090	1.850	2.520	2.120
17	170000	2.025	2.205	2.150	1.950	2.575	2.300

Berdasarkan Tabel 4, beban maksimum terjadi pada 170.000 N. Lendutan maksimum benda uji-1 sebesar 2,205 mm, pada benda uji-2 dan benda uji-3 lendutan maksimum sebesar 2,150 mm dan 2,575 mm. Penambahan serat sintetik dari 0,4% menjadi 0,5% hanya dapat meningkatkan kuat

tekan sebesar 10.000 N. Kapasitas lendutan yang dapat dipikul sebaliknya lebih kecil dibandingkan benda uji sebelumnya, yaitu sebesar 2,31 mm. Bila Tabel 4 dibuat dalam bentuk diagram, maka akan seperti pada Gambar 8.



Gambar 8 Diagram Beban vs Lendutan Pelat dengan Penambahan 0,5% Serat Sintetik

Berdasarkan Gambar 8, diperoleh diagram hubungan beban dengan lendutan rata-rata dari beberapa benda uji. Bentuk persamaan diagram pada Gambar 8 dapat dibuat sebagai fungsi $f(x)$, dimana :

$$f(x) = 1061x^3 + 11668x^2 + 45337x + 797,4 \dots\dots\dots (7)$$

Persamaan (7) merupakan fungsi polinomial hubungan beban dengan lendutan yang diperoleh dari data hasil uji dalam Tabel 4. Besarnya energi yang diserap dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2) sebesar :

$$E_a = \int_{x1}^{x2} \{1061x^3 + 11668x^2 + 45337x + 797,4\} dx \dots\dots\dots (8)$$

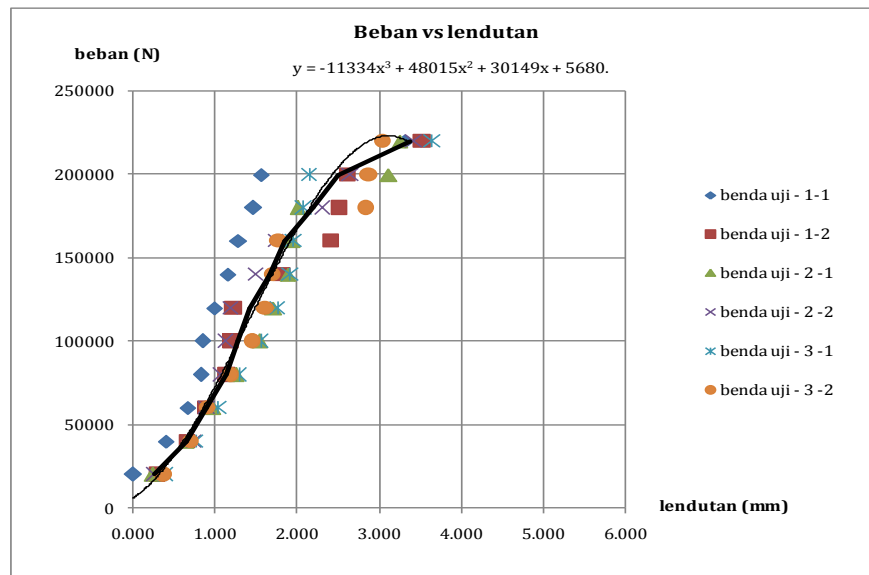
dimana $x1 = 0$ mm dan $x2 = 2,201$ mm, sehingga besarnya energi yang diserap sebesar $E_a = 159.237$ Joule. Energi yang diserap pada pelat dengan penambahan 0,5% serat sintetik lebih kecil dibandingkan pelat sebelumnya. Dugaan sementara bahwa dengan penambahan serat sintetik sebanyak 0,5% pada pelat dengan ketebalan 200 mm tidak menunjukkan kinerja beton yang lebih baik dibandingkan hasil uji pelat sebelumnya. Sehingga kadar optimum serat yang ditambahkan ke dalam campuran beton adalah 0,4%. Untuk memperkuat dugaan tersebut, dibuat pengujian dan analisis yang sama untuk pelat dengan ketebalan 250 mm. Tabel 5 adalah hasil uji pelat dengan tebal 250 mm tanpa penambahan serat sintetik.

Tabel 5 Hasil Uji Lentur Pelat dengan Ketebalan 250 mm Tanpa Serat

No	Beban (N)	Benda Uji - 1		Benda Uji - 2		Benda Uji - 3	
		Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)
1	20000	0.005	0.300	0.250	0.255	0.400	0.375
2	40000	0.400	0.670	0.650	0.755	0.775	0.705
3	60000	0.665	0.890	0.975	0.900	1.045	0.915
4	80000	0.830	1.150	1.260	1.070	1.305	1.205
5	100000	0.850	1.195	1.540	1.140	1.560	1.460
6	120000	0.990	1.230	1.720	1.200	1.765	1.615
7	140000	1.160	1.820	1.890	1.500	1.920	1.710
8	160000	1.290	2.415	1.940	1.750	1.960	1.780
9	180000	1.470	2.520	2.010	2.315	2.085	2.845
10	200000	1.560	2.620	3.120	2.655	2.150	2.880
11	220000	3.325	3.530	3.250	3.430	3.650	3.050

Berdasarkan Tabel 5, beban maksimum terjadi pada 220.000 N. Lendutan maksimum benda uji-1 sebesar 3,530 mm, pada benda uji-2 dan benda uji-3 lendutan maksimum sebesar 3,430 mm dan 3,650 mm. Pelat mengalami retak setelah melewati beban 220.000 N. Beban yang diterima lebih besar daripada pelat dengan ketebalan 200 mm

(130.000N). Penyebaran pola retak langsung diikuti keruntuhan secara tiba-tiba (*brittle*). Besarnya lendutan maksimum rata-rata dari ketiga benda uji sebesar 3,54 mm. Nilai lendutan ini lebih besar dari pelat dengan ketebalan 200 mm. Bentuk persamaan dari diagram hubungan beban vs lendutan dapat dilihat dalam Gambar 9.



Gambar 9 Bentuk Regresi Diagram Beban vs Lendutan Pelat 250 mm Tanpa Serat

Besarnya energi yang diserap berdasarkan Gambar 9 adalah :

$$E_a = \int_0^{3,373} \{-11334x^3 + 48015x^2 + 30149x + 5680\} dx$$

$$E_a = 438.090,356 \text{ Joule}$$

Kemampuan pelat (dengan ketebalan $t_2=250$ mm) dalam menyerap energi lebih besar dua kali lipat dibandingkan dengan ketebalan 200 mm karena memiliki luasan penampang yang lebih besar. Keruntuhan yang terjadi pada pelat tersebut lebih getas dibandingkan pelat dengan tebal 200 mm. Untuk hasil uji pelat 250 mm dengan penambahan 0,4% serat sintetik ditunjukkan dalam Tabel 6 dan Gambar 1.

Tabel 6 Hasil Uji Lentur Pelat (Tebal 250 mm) dengan Penambahan 0,4% Serat Sintetik

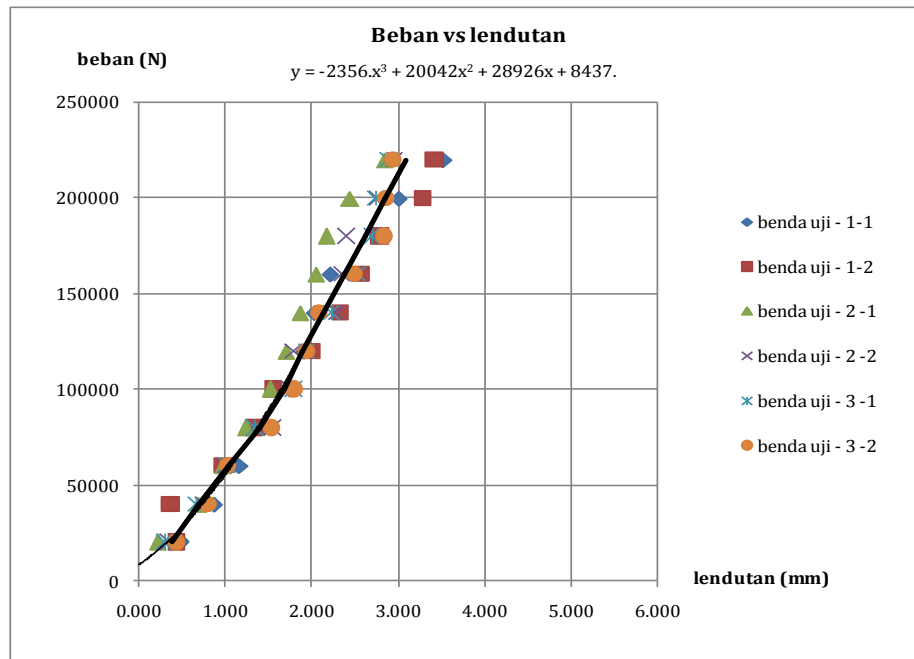
No	Beban (N)	Benda Uji - 1		Benda Uji - 2		Benda Uji - 3	
		Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)	Lendutan 1 (mm)	Lendutan 2 (mm)
1	20000	0.490	0.450	0.220	0.350	0.300	0.450
2	40000	0.870	0.375	0.685	0.750	0.675	0.800
3	60000	1.165	0.985	0.970	1.020	1.040	1.030
4	80000	1.450	1.340	1.245	1.555	1.350	1.550
5	100000	1.750	1.560	1.525	1.750	1.800	1.800
6	120000	1.915	2.010	1.710	1.800	1.950	1.950
7	140000	2.035	2.340	1.870	2.300	2.240	2.100
8	160000	2.220	2.575	2.055	2.355	2.540	2.500
9	180000	2.765	2.800	2.180	2.410	2.700	2.850
10	200000	3.010	3.300	2.450	2.760	2.750	2.870
11	220000	3.530	3.430	2.850	2.975	2.900	2.950

Berdasarkan Tabel 6, beban maksimum terjadi pada 220.000 N. Lendutan maksimum benda uji-1

sebesar 3,530 mm, pada benda uji-2 dan benda uji-3 lendutan maksimum sebesar 2,975 mm dan

2,950 mm. Besarnya beban maksimum yang dapat dipikul sama dengan pelat dengan ketebalan 250 mm tanpa penambahan serat sintetis. Lendutan yang terjadi tidak lebih kecil dibandingkan pelat dengan tebal 200 mm dengan penambahan

komposisi serat yang sama (lendutan rata-rata dari ketiga benda uji sebesar 3,15 mm). Bentuk persamaan diagram hubungan beban vs lendutan dapat dilihat dalam Gambar 10.



Gambar 10 Bentuk Regresi Diagram Beban vs Lendutan Pelat 250 mm dengan Penambahan 0,4% Serat Sintetik

Besarnya energi yang diserap berdasarkan Gambar 10 adalah :

$$E_a = \int_0^{3,106} \{-710,9x^3 + 10740x^2 + 44463x + 1348\} dx$$

$$E_a = 309.390,946 \text{ Joule}$$

Berdasarkan analisis di atas, beton dengan penambahan serat mempunyai kemampuan menyerap energi lebih baik dibandingkan beton konvensional, sehingga hasil tersebut sesuai dengan beberapa hasil penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya tentang pengaruh penambahan serat ke dalam campuran beton.

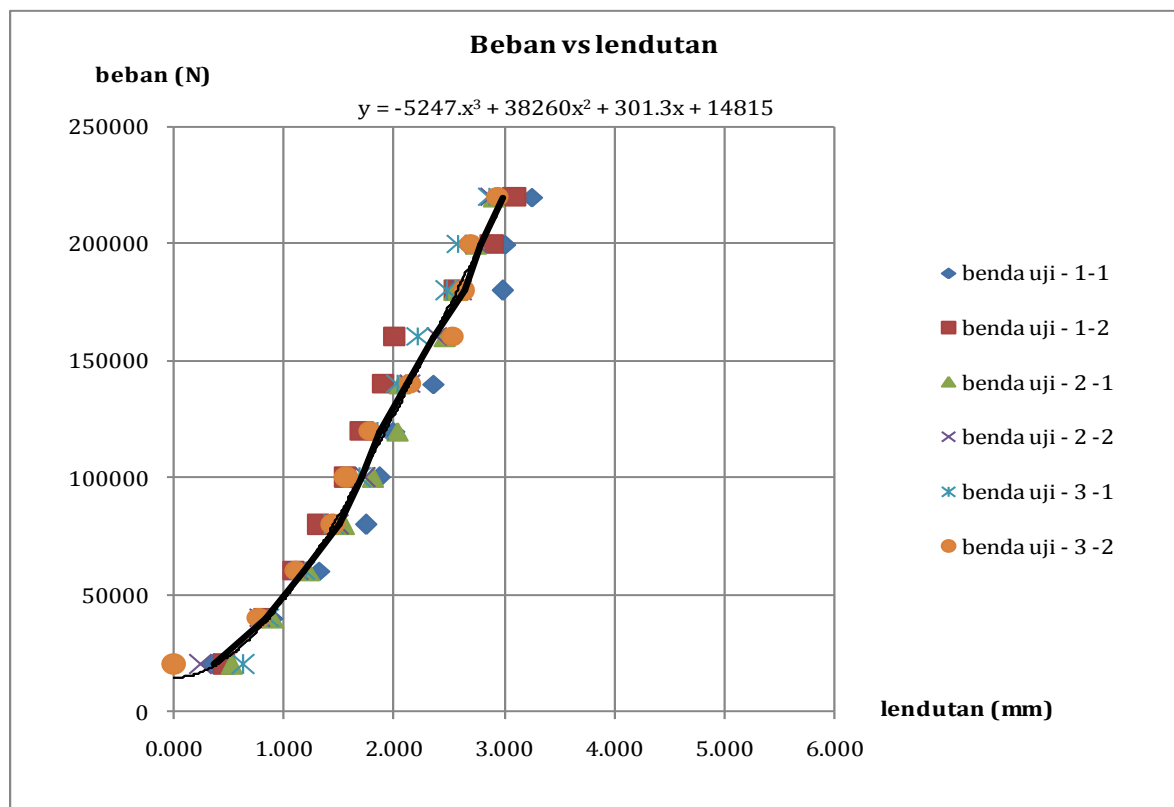
Peningkatan kinerja beton serat yang sudah mengeras (dalam hal ini kuat lentur dan daktilitas) dipengaruhi mekanisme kerja serat dalam campuran beton secara bersama-sama. Serat bersama dengan pasta beton akan membentuk suatu matrik komposit, sehingga serat dapat menahan beban yang sesuai dengan modulus elastisitasnya. Pasta beton akan semakin stabil dalam menahan beban karena aksi serat yang saling mengikat di sekelilingnya. Serat akan melakukan aksi sehingga pasta yang sudah retak akan tetap stabil (Wibowo, 2006). Untuk hasil uji pelat 250 mm dengan penambahan 0,5 % serat sintetis dapat ditunjukkan dalam Tabel 7 dan Gambar 11.

Tabel 7 Hasil Uji Lentur Pelat (Tebal 250 mm) dengan Penambahan 0,5% Serat Sintetik

No	Beban (N)	Benda Uji - 1		Benda Uji - 2		Benda Uji - 3	
		Lendutan 1	Lendutan 2	Lendutan 1	Lendutan 2	Lendutan 1	Lendutan 2
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	20000	0.375	0.460	0.520	0.250	0.635	0.010
2	40000	0.890	0.825	0.900	0.795	0.865	0.780
3	60000	1.320	1.100	1.230	1.140	1.200	1.115
4	80000	1.750	1.325	1.545	1.500	1.465	1.450
5	100000	1.870	1.565	1.810	1.750	1.695	1.575
6	120000	2.000	1.720	2.035	1.875	1.860	1.795
7	140000	2.365	1.910	2.060	2.150	2.040	2.155
8	160000	2.510	2.010	2.455	2.405	2.230	2.540
9	180000	2.985	2.575	2.575	2.620	2.495	2.650
10	200000	3.010	2.900	2.745	2.755	2.590	2.700
11	220000	3.250	3.100	2.905	2.895	2.875	2.950

Berdasarkan Tabel 7, beban maksimum terjadi pada 220.000 N. Lendutan maksimum benda uji-1 sebesar 3,250 mm, pada benda uji-2 dan benda

uji-3 lendutan maksimum sebesar 2,905 mm dan 2,950 mm. Bentuk persamaan diagram hubungan beban vs lendutan dapat dilihat dalam Gambar 11.

**Gambar 11** Bentuk Regresi Diagram Beban vs Lendutan Pelat 250 mm dengan Penambahan 0,5% Serat Sintetik

Besarnya energi yang diserap berdasarkan Gambar 11 adalah :

$$E_a = \int_0^{2,996} \{-5247x^3 + 38260x^2 + 301,3x + 14815\} dx$$

$$E_a = 283.016,246 \text{ Joule}$$

Berdasarkan hasil dan analisis terdapat perbedaan sifat mekanik dari beton tanpa serat dengan beton yang ditambah serat sintetik. Komposisi penambahan serat sintetik ke dalam campuran beton sangat mempengaruhi nilai kuat lentur dan daktilitas dalam menahan beban. Tabel 8

menunjukkan besarnya perbandingan energi yang diserap dan lendutan dari beton tanpa serat dan beton dengan penambahan 0,4% serta 0,5% serat sintetik untuk tebal pelat 200 mm.

Tabel 8 merupakan besar energi absorpsi pada setiap tahapan pembebanan yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2). Besarnya energi pada setiap tahapan pembebanan merupakan luas daerah dibawah grafik fungsi $f(x)$ yang dibatasi nilai lendutan sebelum dan sesudah beban tersebut bekerja. Berdasarkan Tabel 8 dapat diketahui bentuk diagram beban vs lendutan pada setiap benda uji.

Tabel 8 Perbandingan Energi yang Diserap pada Beton dengan Ketebalan 200 mm

No	Beban (N)	Lendutan (mm)	B0		B4		B5	
			Energi Absorpsi (Joule)	Lendutan (mm)	Energi Absorpsi (Joule)	Lendutan (mm)	Energi Absorpsi (Joule)	Lendutan (mm)
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
2	10000	0.249	1269	0.350	1933	0.212	1222	0.212
3	20000	0.438	3204	0.530	4184	0.358	3380	0.358
4	30000	0.660	7651	0.763	9075	0.539	7652	0.539
5	40000	0.863	14500	1.008	17175	0.732	14318	0.732
6	50000	1.014	21673	1.182	25117	0.901	22149	0.901
7	60000	1.140	29054	1.324	33080	1.053	30811	1.053
8	70000	1.260	37333	1.473	42903	1.132	36005	1.132
9	80000	1.364	45488	1.641	55808	1.288	47633	1.288
10	90000	1.477	55330	1.802	70104	1.392	56490	1.392
11	100000	1.546	61875	1.908	80534	1.486	65281	1.486
12	110000	1.691	76766	2.049	95760	1.583	75196	1.583
13	120000	1.771	85613	2.136	105778	1.731	91838	1.731
14	130000	2.489	177313	2.253	120089	1.882	111000	1.882
15	140000	-	-	2.348	132535	1.964	122440	1.964
16	150000	-	-	2.558	161759	2.034	132699	2.034
17	160000	-	-	2.913	217126	2.112	144663	2.112
18	170000	-	-	-	-	2.201	159237	2.201

Keterangan :

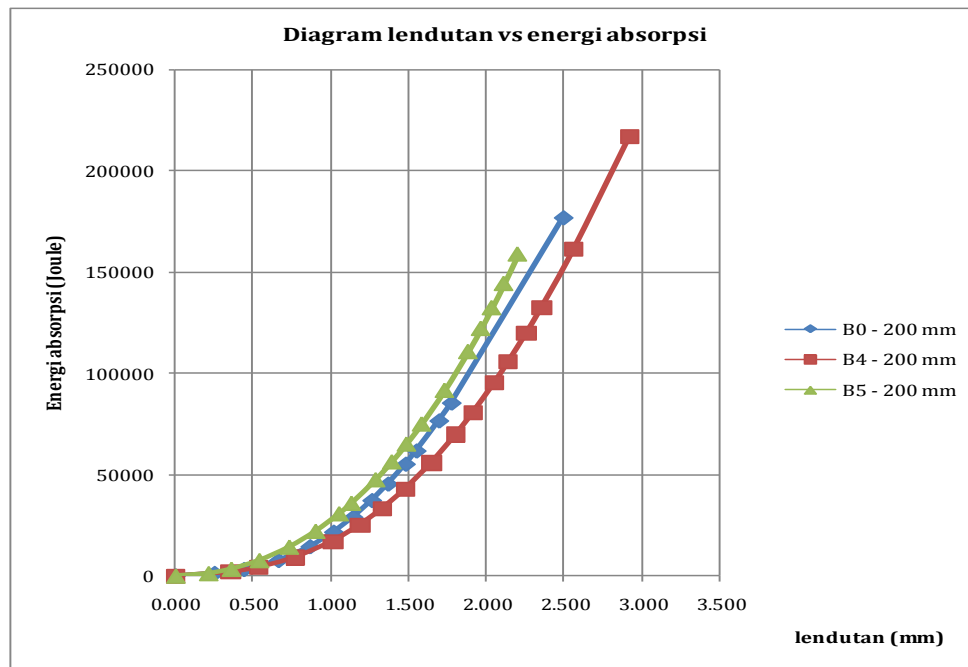
B0 pelat tanpa serat sintetik;

B4 pelat dengan penambahan 0,4% serat sintetik;

B5 pelat dengan penambahan 0,5% serat sintetik.

Berdasarkan Tabel 8, beban maksimum yang dapat dipikul beton tanpa serat sebesar 130.000 N, pelat sudah mulai retak pada beban 140.000 N. Bila ditambahkan dengan 0,4% dan 0,5% serat sintetik, kapasitas beban pelat bertambah menjadi 23% dan 31%. Semakin banyak serat yang ditambah pada campuran beton, semakin besar pula beban yang dapat dipikul. Sifat pelat dalam memikul beban

akan berbeda dengan sifat daktilitas. Daktilitas sangat erat kaitannya dengan *toughness* (keuletan), yaitu kemampuan beton untuk menyebarkan secara merata energi yang diterima akibat pembebanan ke seluruh struktur. Semakin besar lendutan, maka energi yang diserap juga akan semakin besar. Gambar 12 menunjukkan diagram hubungan antara lendutan dengan energi absorpsi.



Gambar 12 Diagram Lendutan vs Energi Absorpsi Pelat Beton dengan Ketebalan 200 mm

Lendutan maksimum pelat beton tanpa serat sebesar 2,489 mm. Dengan penambahan 0,4% serat sintetik, lendutan semakin bertambah sebesar 17%. Tetapi bila serat ditambah menjadi 0,5%, lendutan akan lebih kecil 13% dibandingkan dengan beton tanpa serat. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah prosentase sebanyak 0,4% serat yang ditambahkan ke dalam campuran beton merupakan kadar yang paling optimum. Jika serat yang ditambahkan lebih dari 0,4% justru akan menurunkan kinerja daripada beton. Hasil penelitian dalam Gambar 12 memperlihatkan bahwa penambahan serat sintetik hanya dapat meningkatkan lendutan sebesar 17%. Kemudian setelah mencapai kadar yang optimal, pelat beton mulai mengalami penurunan lendutan. Fenomena ini berkaitan dengan teori bahwa penambahan

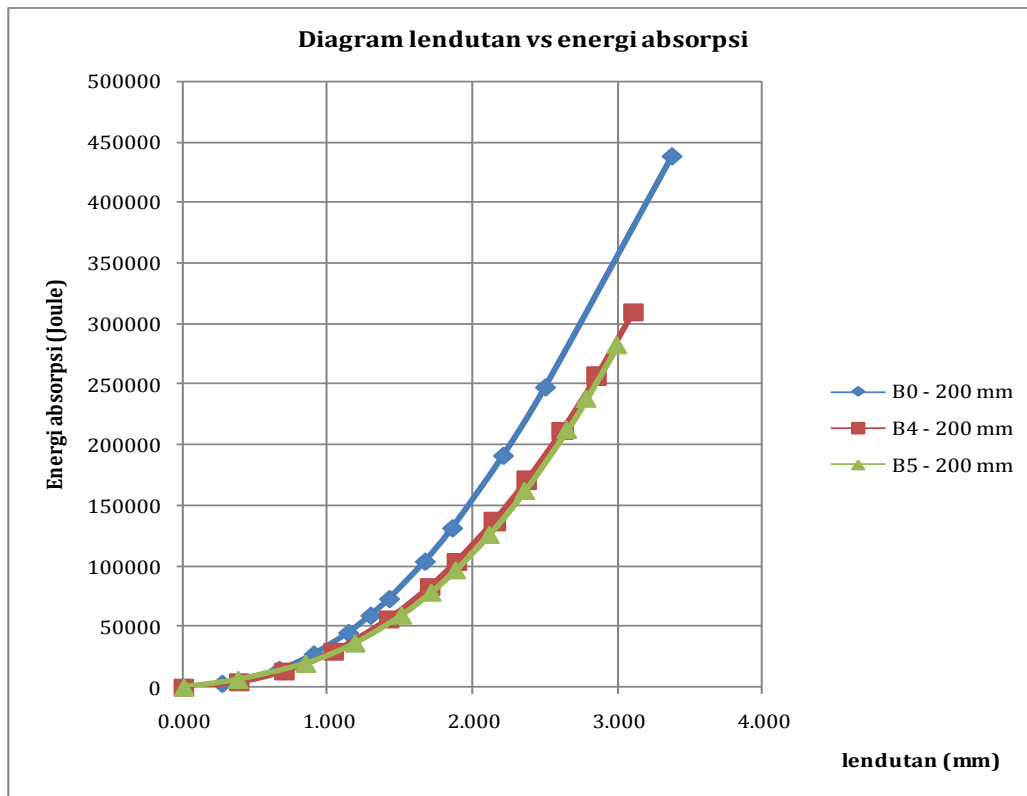
serat dapat menurunkan *workability* (kelecekan) pada saat pengadukan sehingga beton akan cenderung menjadi tidak padat lagi. Berdasarkan Gambar 12, besarnya energi yang diserap adalah sebanding dengan besar lendutan. Dari Tabel 8, energi absorpsi pelat dengan penambahan 0,4% serat sintetik adalah 217.126 Joule. Energi absorpsi ini lebih besar 22% dibandingkan pelat tanpa serat sintetik. Akan tetapi apabila serat sintetik ditambah menjadi 0,5%, energi absorpsi yang terjadi malah lebih kecil 10% dibandingkan pelat tanpa serat. Sehingga besarnya energi absorpsi pelat dengan penambahan 0,4% serat sintetik lebih besar 36% dibandingkan pelat dengan penambahan 0,5%. Untuk sifat mekanik pelat dengan tebal 250 mm dapat dilihat dalam Tabel 9.

Tabel 9 Perbandingan Energi yang Diserap pada Beton dengan Ketebalan 250 mm

No	Beban (N)	B0		B4		B5	
		Lendutan (mm)	Energi Absorpsi (Joule)	Lendutan (mm)	Energi Absorpsi (Joule)	Lendutan (mm)	Energi Absorpsi (Joule)
1	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0
2	20000	0.264	2834	0.377	3850	0.375	6223
3	40000	0.659	14343	0.693	12743	0.843	19554
4	60000	0.898	27025	1.035	28975	1.184	36352
5	80000	1.137	44707	1.415	55850	1.506	59453
6	100000	1.291	59007	1.698	82384	1.711	78412
7	120000	1.420	72768	1.889	103764	1.881	96836
8	140000	1.667	103574	2.148	137097	2.113	126189
9	160000	1.856	131148	2.374	170774	2.358	162479
10	180000	2.208	190881	2.618	211702	2.650	212963
11	200000	2.498	247300	2.857	256893	2.783	238669
12	220000	3.373	437981	3.106	309354	2.996	282980

Berdasarkan Tabel 9, besarnya lendutan maksimum pelat tanpa serat (B0) adalah 3,373 mm. Lendutan ini lebih besar dibandingkan pelat dengan penambahan 0,4% dan 0,5% serat sintetik

(B0 lebih besar 8,5% dan 12,5% dibandingkan B4 dan B5). Hubungan lendutan vs energi absorpsi pelat dengan ketebalan 250 mm ditunjukkan dalam Gambar 13.



Gambar 13 Diagram Lendutan vs Energi Absorpsi Pelat Beton dengan Ketebalan 250 mm

Untuk energi absorpsi, pelat tanpa serat (B0) lebih besar 42% dibandingkan dengan B4 dan lebih besar 55% dibandingkan B5. Dari beberapa pembahasan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa perilaku sifat mekanik pada pelat dengan ketebalan yang berbeda akan menghasilkan sifat

mekanik yang berbeda pula. Besarnya kapasitas lentur pelat dapat ditentukan sesuai persamaan (1), dimana momen lentur (M) berbanding lurus dengan kuat lentur (σ_f). Kapasitas lentur dari masing-masing pelat ditunjukkan dalam Tabel 10.

Tabel 10 Kapasitas Momen Lentur Pelat

No.	Benda Uji	Tebal (mm)	Beban (N)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Lentur (MPa)	Momen Inersia (mm ⁴)	Y (mm)	Momen Lentur (N.mm)
1	B0	200	130000	1000000	0.13	666666667	100	866667
2	B4	200	160000	1000000	0.16	666666667	100	1066667
3	B5	200	170000	1000000	0.17	666666667	100	1133333
4	B0	250	220000	1000000	0.22	1302083333	125	2291667
5	B4	250	220000	1000000	0.22	1302083333	125	2291667
6	B5	250	220000	1000000	0.22	1302083333	125	2291667

Dari Tabel 10, besarnya kapasitas momen lentur pada pelat dengan ketebalan 250 mm lebih besar dibandingkan pelat dengan tebal 200 mm. Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil uji laboratorium, penambahan (0,4-0,5)% serat

sintetik terhadap pelat dengan ketebalan 250 mm tidak mempengaruhi kapasitas momen lentur. Kondisi ini dapat disebabkan pada saat proses pencampuran dan pengadukan yang tidak merata sehingga serat dalam campuran beton tidak

tersebar secara merata. Hal ini berbeda dengan perilaku pelat yang tebalnya 200 mm. Penambahan (0,4-0,5) % serat sintetis dapat meningkatkan (20-30)% kapasitas lentur pelat tanpa serat sintetis. Dari hasil tersebut, penambahan 0,4% serat sintetis terhadap campuran beton merupakan kadar yang optimum dibandingkan dengan 0,5% serat sintetis. Dengan penambahan kadar serat sama atau lebih besar dari 0,5% terjadi penurunan dari kinerja beton.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

Sifat mekanik beton dengan penambahan serat sintetis sangat tergantung pada jumlah komposisi serat yang ditambahkan ke dalam campuran beton tersebut. Semakin banyak serat sintetis yang dicampurkan ke dalam beton tidak berarti bahwa beton akan semakin daktil. Dalam penelitian ini kadar serat yang ditambahkan sebanyak 0,4% adalah kadar yang paling optimum dibandingkan kadar serat 0,5% karena dengan penambahan kadar optimum tersebut terjadi peningkatan kinerja beton pada pelat dengan ketebalan 200 mm dan 250 mm.

Secara mekanik, sifat daktilitas beton sangat tergantung pada besarnya lendutan. Semakin besar lendutan yang dapat dipikul oleh pelat, maka akan semakin daktil dan energi yang diserap juga akan semakin besar.

Terjadi anomali dengan perilaku pelat yang tebalnya 250 mm. Lendutan pelat tanpa serat lebih besar dibandingkan pelat dengan penambahan serat. Energi absorpsi juga lebih besar dari pelat berserat. Kondisi ini dapat disebabkan proses pencampuran dan pengadukan yang tidak homogen sehingga serat tidak tersebar secara merata.

Peningkatan kapasitas momen lentur dari pelat dengan ketebalan 200 mm lebih besar dari pelat tanpa serat sintetis. Untuk pelat dengan ketebalan 250 mm, penambahan serat sintetis terhadap campuran beton tidak meningkatkan kapasitas momen lentur.

Penambahan serat ke dalam beton dapat menghambat terjadinya retak akibat bekerjanya gaya aksi dari serat yang saling mengikat.

Saran

Faktor ketelitian alat dalam pengujian laboratorium perlu ditingkatkan agar mendapatkan hasil yang lebih akurat. Perlu dibuat benda uji pelat dengan penambahan serat yang bervariasi agar diperoleh kadar serat yang paling optimum untuk mendapatkan kinerja beton yang lebih baik. Perlu diperhatikan kondisi pada saat proses pencampuran serat ke dalam beton agar tidak terjadi *balling effect*. Pembuatan benda uji pelat dengan ketebalan 250 mm perlu diteliti dan diuji kembali untuk membuktikan sifat anomali yang terjadi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Prof. (R) Lanneke Tristanto yang telah memberikan bimbingan, masukan dan saran dalam penulisan karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C 1550 – 04. "Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)", United States, 2004.
- Dachlan, A. T, 2011, "Kinerja Perkerasan Jalan Beton Semen Dengan Serat Polimer Sintetis", *Jurnal Jalan-Jembatan*, Volume 28, No. 3, halaman (151 – 166), Desember 2011.
- EPC (Elasto Plastic Concrete) Organization, 1990. "Introduction To Barchip Structural SyntheticFibres", <http://www.elastoplastic.com/index.php/introduction-to-barchip-structural-synthetic-fibres>.
- EFNARC, June, 2011, Efnarc three point bending test on square panel with notch, "Flexural tensile strength of fibre concrete on sprayed test specimen".
- Kementerian Pekerjaan Umum, "Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal", SNI 03 – 2834 – 2004.
- Resmi, S, 2008. "Kajian Tentang Aplikasi Serat Sintetis dan Serat Alami Untuk Campuran Beton", Tugas Akhir Universitas Katolik Soegijapranata Semarang.
- Setiati, N. Retno, 2009. "Laporan Hasil Pengujian Serat Sintetis Barchip60 untuk Campuran Beton", Puslitbang Jalan dan Jembatan.
- Setiati, N. Retno, 2010. "Pengaruh Penambahan Serat Sintetis Plastik Terhadap Kekuatan Tekan dan Lentur Beton", *Jurnal Jalan-Jembatan*, Volume 27, No 3, halaman (217 – 223), Desember 2010.

- Sholihin. 2008. "Evaluasi Jumlah Serat dan Distribusinya di Bidang Retak terhadap Variasi Kuat Lentur dan Kuat Lentur Ekuivalen Beton Serat Baja", Prosiding vol. II Seminar Nasional Pascasarjana VIII – ITS, Surabaya ISBN 978-979-96565-4-4.
- Technical Procedure Batching and Mixing, Product : Structural Synthetic Fibre, ISO 9001 Elasto Plastic Concrete 2009.
- TSE (Technologies in Structural Engineering), "Test Certificate for ASTM C – 1609/C – 1609M, 2009.
- Wahyono, A, 1996. "*Pengaruh Fiber Bendrat terhadap Kuat Geser Balok Beton Bertulang*", Tesis, Program Pasca Sarjana, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Wibowo, 2006. "Kapasitas Lentur, Toughness, dan Stiffness Balok Beton Berserat Polyethylene", *Media Teknik Sipil*, Universitas Sebelas Maret, Januari 2006.