

Pengaruh Penambahan Serat Baja Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang pada Beton Mutu Normal

Asyrofi Miranda Putra¹⁾
Vera Agustriana Noorhidana²⁾
Mohd Isneini³⁾

Abstract

The research in this thesis was an experimental study to investigate the effect of adding steel fibres to the flexural strength of reinforced concrete beams in normal quality concrete. This study also compared crack patterns and collapse patterns of reinforced concrete beams in fibre without concrete and concrete with a mixture of steel fibres. This study used reinforced concrete beam samples with sizes 15 cm x 19 cm x 170 cm with 2 D-10 mm (2D-10mm) flexural reinforcement with 1 beam sample per volume fraction (V_f) of 0%, 0.5%, 1% and 1.5%. Specimen of reinforced concrete beam had a span between two simple restraint 150 cm long, and was tested with two point loads gradually from zero to collapse. Testing of each sample was carried out 28 days after mixing. From the results of the study, it was found that: (1) The results of the compressive strength test did not experience a significant difference with the addition of steel fibres. (2) The highest flexural tensile strength of concrete beams is at V_f 1.5% and has an increase of 281.42% from V_f 0%, and (3) Bending strength of reinforced concrete beams with a maximum load found at V_f 1.5% and increased to 56.64% from V_f 0%. The addition of steel fibres in reinforced concrete beams causes not only the beam to be more rigid, but also improve the ductile of the concrete.

Keywords : Steel Fiber, Reinforced Concrete Beams, Compressive Strength, Bending Tensile Strength, and Bending Strength.

Abstrak

Penelitian pada skripsi ini merupakan studi eksperimental untuk menyelidiki pengaruh penambahan serat baja terhadap kuat lentur balok beton bertulang pada beton mutu normal. Penelitian ini juga membandingkan pola retak dan pola keruntuhan balok beton bertulang pada beton tanpa serat dan beton dengan campuran serat baja. Penelitian ini menggunakan sampel balok beton bertulang dengan ukuran 15 cm x 19 cm x 170 cm dengan 2 tulangan lentur D-10 mm (2D-10mm) dengan 1 buah sampel balok setiap *volume fraction* (V_f) 0%, 0,5%, 1% dan 1,5%. Sampel balok beton bertulang mempunyai bentang diantara dua tumpuan sederhana sepanjang 150 cm, dan diuji dengan dua beban titik secara bertahap dari nol sampai dengan runtuh. Pengujian tiap sampel dilakukan 28 hari setelah pengecoran. Dari hasil penelitian didapatkan: (1) Hasil uji kuat tekan tidak mengalami perbedaan yang signifikan dengan adanya penambahan serat baja., (2) Kuat tarik lentur balok beton tertinggi terdapat pada V_f 1,5% dan mengalami peningkatan sebesar 281,42% dari V_f 0%, dan (3) Kuat lentur balok beton bertulang dengan beban maksimum terdapat pada V_f 1,5% dan mengalami peningkatan sebesar 56,64% dari V_f 0%. Penambahan serat baja pada balok beton bertulang menyebabkan balok tersebut menjadi lebih kaku, penambahan serat juga dapat memperbaiki sifat getas pada beton.

Kata kunci : Serat Baja, Balok Beton Bertulang, Kuat Tekan, Kuat Tarik Lentur, dan Kuat lentur .

¹⁾ Mahasiswa pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Surel: asyrofimiranda97@gmail.com

²⁾ Staf pengajar pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Jalan. Prof. Sumantri Brojonegoro 1. Gedung Meneng Bandar Lampung. 35145.

³⁾ Staf pengajar pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Jalan Prof. Sumantri Brojonegoro 1. Gedung Meneng Bandar Lampung. 35145.

1. PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan material komposit yang terdiri dari beton dan baja tulangan yang ditanam di dalam beton. Beton banyak digunakan di berbagai macam konstruksi karena memiliki banyak keunggulan diantaranya kemampuan menahan gaya tekan yang tinggi, dapat dibentuk sesuai dengan kebutuhan konstruksi, ketahanan yang baik terhadap lingkungan sekitar serta proses perawatannya lebih murah dan mudah. Semakin meluasnya penggunaan konstruksi beton dan meningkatnya skala pembangunan maka kebutuhan akan teknologi beton yang efektif dan efisien juga semakin tinggi.

Sifat utama beton adalah sangat kuat menahan beban tekan (kuat tekan tinggi) tetapi lemah di dalam menahan gaya tarik (Pratikto, 2009). Kuat tarik yang rendah ini dapat diatasi dengan pemakaian baja tulangan. Namun, pada kenyataannya penambahan baja tulangan tidak memberikan hasil yang optimal. Retak-retak melintang halus atau yang sering disebut retak rambut masih sering timbul disekitar daerah tarik beton, sehingga dapat mempengaruhi keawetan bangunan. Untuk bangunan infrastruktur, kelemahan ini sedapat mungkin harus diantisipasi agar tidak menyebabkan kegagalan konstruksi. Baja tulangan di dalam beton berfungsi menahan gaya tarik yang bekerja dan sebagian gaya tekan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengatasi kelemahan beton ini. Dalam penelitian Soroushian & Bayasi (1987), kuat tarik pada beton dapat ditingkatkan dengan cara penambahan serat-serat pada adukan beton agar retak-retak yang mungkin terjadi akibat tegangan tarik pada daerah beton tarik dapat ditahan oleh serat-serat tambahan ini, sehingga kuat tarik beton serat dapat lebih tinggi dibanding kuat tarik beton biasa. Pemberian serat dengan distribusi secara random dalam adukan beton dapat menahan perambatan dan pelebaran retak-retak yang terlalu cepat pada beton, baik akibat panas hidrasi maupun akibat pembebanan.

Salah satu penggunaan beton bertulang yaitu pada struktur balok. Balok sendiri adalah bagian dari struktur sebuah bangunan yang kaku dan dirancang untuk menahan gaya lentur dan geser. Sesuai dengan fungsi balok menahan gaya lentur dan geser maka sering terjadi kerusakan atau kegagalan struktur pada daerah tersebut. Kerusakan atau kegagalan struktur tersebut dapat diakibatkan oleh umur struktur, akibat perubahan pembebanan, ataupun akibat bencana alam.

Bagus (2018) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan serat kawat bendrat pada beton mutu tinggi terhadap kapasitas kuat tekan dan kuat lentur. penambahan serat kawat bendrat dilakukan berdasarkan persentase penambahan *volume fraction* (Vf) terhadap volume beton sebesar 0% ; 0,299% ; 0,695% ; dan 0,990%. Hasil kuat tarik belah dan kuat lentur pada beton mutu tinggi dengan *volume fraction* (Vf) 0,990% memiliki nilai tertinggi dengan kuat tarik belah rata-rata sebesar 4,6945 MPa dan kuat lentur rata-rata sebesar 7,9133 MPa. Dilihat dari uraian diatas, penelitian yang akan dilakukan disini yaitu penelitian tentang pengaruh penambahan serat baja terhadap kuat lentur balok beton bertulang pada beton mutu normal. Penelitian ini dilakukan dengan variasi *volume fraction* 0%, 0,5%, 1% dan 1,5%.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Pemilihan konstruksi dari beton banyak memiliki keuntungan seperti harga yang relatif lebih murah, mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, serta mudah dalam hal perawatannya, sehingga banyak bangunan-bangunan yang didirikan memilih konstruksi yang terbuat dari beton sebagai bahan utamanya. Serat baja dan serat kaca lebih banyak dipakai untuk keperluan struktur, karena serat tersebut mempunyai faktor-faktor prinsip penguat beton, yaitu kekuatan leleh, daktilitas dan lekatan yang cukup. Serat baja memiliki kekuatan serta modulus elastisitas yang relatif tinggi. Selain itu serat baja tidak mengalami perubahan bentuk terhadap pengaruh alkali dalam semen.

2.2 Beton

Menurut Tjokrodinuljo (2012), beton adalah bahan bangunan yang dibuat dari air, semen *portland*, agregat halus, dan agregat kasar yang bersifat keras seperti batuan. Beton mempunyai sifat getas (*brittle*) sehingga mempunyai kuat tekan yang tinggi tetapi kuat tarik rendah.

2.3 Bahan Penyusun Beton

1) Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Menurut SNI 15-7064-2004, PCC merupakan bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak/klinker semen portland dan gypsum dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain.

2) Air

Air digunakan sebagai salah satu bahan penyusun beton dan sebagai bahan perawatan beton (*curing*). Air akan bereaksi dengan semen, serta menjadi bahan pelumas antara butiran agregat agar mudah dipadatkan dan dikerjakan. Air yang digunakan harus bersih, tidak mengandung lumpur, minyak, dan tidak mengandung garam-garam dan zat-zat lain yang dapat merusak beton.

3) Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Dalam Sugiyanto dan Sebayang (2005), agregat halus untuk beton adalah agregat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batu-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu dan mempunyai ukuran butir 5 mm. Sedangkan agregat kasar untuk beton adalah agregat berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batu-batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu, dan mempunyai ukuran butir antara 5-40 mm.

4) Serat (*Fiber*)

ACI Committee 544 mengklasifikasikan tipe serat secara umum sebagai perkuatan beton, yaitu antara lain:

- a. SRFC (*Steel Fiber Reinforced Concrete*)
- b. GFRG (*Glass Fiber Reinforced Concrete*)
- c. SNFRC (*Synthetic Fiber Reinforced Concrete*)
- d. NFRC (*Natural Fiber Reinforced Concrete*)

2.4 Beton Serat (*Fiber Concrete*)

Beton serat didefinisikan sebagai beton yang dibuat dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air dan sejumlah fiber yang disebarkan secara acak dalam adukan. Ide dasar dari campuran beton serat adalah menulangi beton dengan fiber yang disebarkan secara merata ke dalam adukan beton, dengan orientasi random sehingga diharapkan dapat mengurangi retak rambut yang terjadi pada beton di daerah tarik baik akibat panas hidrasi maupun akibat pembebanan.

Setiap jenis fiber mempunyai kelebihan dan kekurangan, masing-masing tergantung dari tujuan pemakaiannya. Perbaikan yang dialami beton dengan adanya penambahan fiber antara lain :

1. Daktilitas

Penambahan serat ke dalam adukan beton dapat mengatasi masalah beton yang bersifat getas (*brittle*) menjadi lebih daktil. Energi yang diserap oleh beton serat untuk mencapai keruntuhan lebih besar dibandingkan dengan energi yang diserap oleh beton biasa, baik akibat beban tekan maupun akibat beban lentur.

2. Kekuatan lentur

Salah satu kelemahan beton yang paling besar adalah kekuatan untuk menahan gaya tarik dan lentur.

3. Ketahanan kejut (*impact resistance*)

Beton normal sangat lemah dalam menerima beban kejut. Penambahan serat ke dalam adukan beton dapat meningkatkan ketahanan kejut beton dengan baik.

4. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue life*)

Dengan adanya penambahan volume fraksi serat pada adukan beton ketahanan terhadap kelelahan dapat ditingkatkan, lebar retak dan lendutan yang terjadi akibat pembebanan kelelahan (*fatigue*) dapat diturunkan. Penggunaan beton serat dapat mereduksi tebal perkerasan beton biasa sampai 50% (ACI Committee 544, 1982)

5. Penyusutan

Keretakan pada beton dapat juga terjadi akibat pemampatan terhadap penyusutan bebas yang disebabkan oleh kontinuitas struktur, baja tulangan dan gradien kebasahan dalam beton. Dengan adanya serat dalam beton penyusutan dapat direduksi dan retak-retak penyusutan dapat dibatasi.

2.5 Landasan Teori

A. Kuat tekan beton/beton serat

Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan (SNI 03-1974-1990).

Kuat tekan beton dapat dicari dengan rumus :

$$P'_{cf} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dimana:

f'_{cf} = Kuat tekan beton/beton serat (Mpa)

P = Beban tekan maksimum (N)

A = Luas penampang silinder = $\frac{1}{4} \pi D^2$ (mm²)

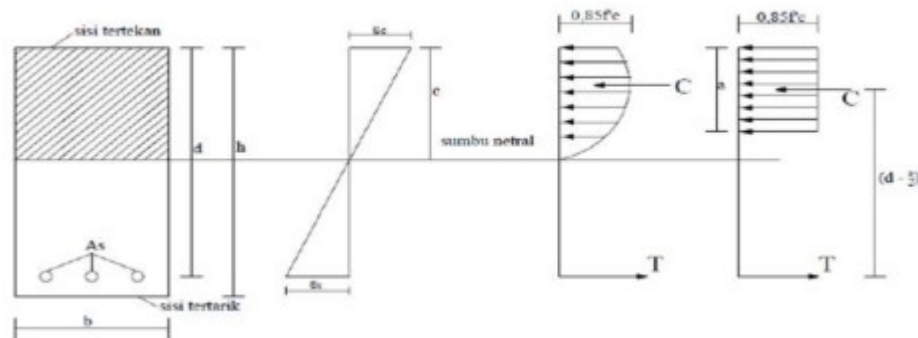
B. Kuat tarik lentur beton

Kuat tarik lentur balok beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji sampai benda uji patah (SNI 4431:2011). Kuat lentur dapat diteliti dengan membebani balok pada tengah-tengah bentang atau pada setiap sepertiga bentang dengan beban titik $\frac{1}{2} P$. Beban ditingkatkan sampai kondisi balok mengalami keruntuhan lentur, dimana retak utama yang terjadi terletak pada sekitar tengah-tengah bentang.

Secara sederhana, balok beton digambarkan sebagai struktur simple beam dengan beban terpusat masing-masing $\frac{1}{2} P$. Besarnya momen yang dapat mematahkan benda uji adalah momen akibat beban maksimum dari mesin pembebanan dan berat sendiri dari benda uji. Pada kejadian momen lentur positif, regangan tekan terjadi di bagian atas dan regangan tarik di bagian bawah dari penampang.

C. Analisis Balok Beton Bertulang dengan Tulangan Tunggal

Beton mempunyai kekuatan tarik yang sangat kecil, untuk menambah kemampuan dan kapasitas dukung struktur balok beton diperlukan batang tulangan baja pada daerah dimana tegangan tarik bekerja. Sistem tulangan tunggal hampir tidak pernah dimanfaatkan untuk balok, karena pemasangan tulangan tambahan di daerah tekan. Perencanaan penulangan lentur didasarkan pada asumsi bahwa tulangan baja telah mencapai regangan leleh sebelum beton mencapai regangan maksimum 0,003.



Gambar 1. Distribusi tegangan regangan pada penampang balok

Berdasarkan bentuk empat persegi panjang pada balok beton, intensitas tegangan beton rata-rata ditentukan sebesar $0,85 f'c$ dan dianggap bekerja pada daerah tekan dari penampang balok selebar b dan sedalam a , yang mana besarnya ditentukan dengan rumus (SNI 2847:2013) :

Persamaan keseimbangan gaya horizontal gaya internal:

$$C = T$$

Daerah tekan beton:

$$C = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b$$

Daerah tarik baja tulangan:

$$T = A_s \cdot F_y$$

Persamaan momen nominal:

$$M_n = T (d - a/2) \text{ atau } C (d - a/2)$$

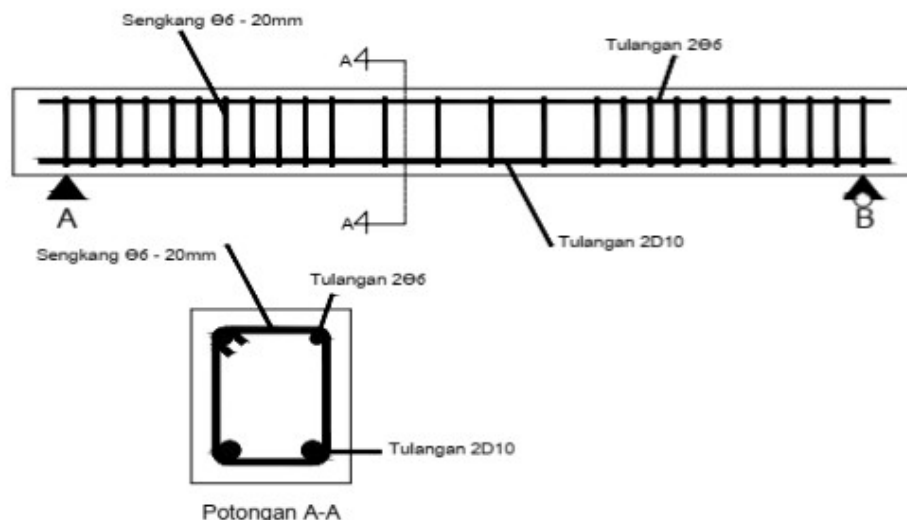
2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian Leksono, Suhendro dan Sulistyo (1995) tentang beton serat yang menggunakan kawat bendrat berbentuk lurus dan berkait ke dalam campuran beton. Untuk balok beton bertulang dengan ukuran 15 x 25 x 180 cm dengan kandungan fiber 0,25 ; 0,5 ; 0,75 dan 1,00% . Dari penelitian yang telah dilakukan dengan menambahkan fiber sebanyak 0,75 sampai dengan 1% dari volume beton dengan menggunakan aspect ratio sekitar 60–70 akan memberikan hasil yang optimal.

Pada penelitian Prabowo (2016) Peningkatan nilai kuat lentur beton dengan kadar serat bendrat sebesar 0%; 0,5%; 1%; 1,5%; dan 2% adalah sebesar 18,189%; 36,378%; 17,119%; dan 8,5597%. Kadar optimum penambahan serat bendrat pada balok beton bertulang adalah pada kadar 1% dengan nilai kuat lentur sebesar 6,373 kN.m.

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung dengan membuat beton mutu normal dan menambahkan kadar serat baja sebanyak 0%, 0,5%, 1% dan 1,5% dari volume adukan beton. Mutu beton rencana yang digunakan yaitu 25 MPa. Benda uji terdiri dari kubus dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm untuk pengujian kuat tekan, balok beton dengan ukuran 10 cm x 10 cm x 40 cm untuk pengujian kuat tarik lentur (detail benda uji dapat dilihat dalam Gambar 8), serta balok beton bertulang dengan ukuran 15 cm x 19 cm x 170 cm. Pengujian dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari.



Gambar 2. Sampel benda uji balok beton ukuran 15cm x 19cm x 170cm.

3.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1) Semen

Semen yang digunakan yaitu semen PCC (*Portland Composite Cement*) dengan merk dagang Semen Padang Tipe I

2) Agregat Halus

3) Agregat Kasar

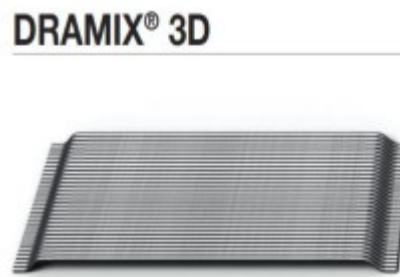
4) Tulangan Baja

Tulangan baja yang dipakai adalah tulangan ulir berdiameter 10 mm untuk tulangan memanjang pada benda uji balok beton bertulang.

5) Air

6) Serat

Serat yang digunakan adalah baja (*hooked*) dengan merk Dramix® 3D di produksi oleh PT. Bekaert. Serat baja Dramix® 3D memiliki diameter 0,75 mm dan panjang 60 mm dengan *Aspect Ratio* (l/d) 80.



Gambar 3. Serat baja

3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: Cetakan Benda Uji, Timbangan, Oven, Satu set saringan, Piknometer, Mesin Pengaduk Beton (*Concrete Mixer*), *Slump Test Apparatus*, Mesin Penggetar Internal (*Vibrator*), *Compressing Testing Machine* (CTM), Bak Perendam, *Loading Frame*, *Hydraulic Jack*, *Dial Gauge*, *Crack Wide Gauge*, Alat Bantu

3.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Pada penelitian ini dibagi menjadi tujuh tahap, yaitu persiapan bahan, pemeriksaan bahan campuran beton, pembuatan rencana campuran (*mix design*), pembuatan benda uji, pemeliharaan terhadap benda uji (*curing*), pelaksanaan pengujian dan analisis hasil penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisik Material

Pengujian sifat-sifat fisik material dilakukan untuk mengetahui data awal material yang akan dipakai pada campuran beton. Sifat-sifat fisik material yang diuji meliputi kadar air, berat jenis dan penyerapan, gradasi, berat volume, kadar lumpur, dan kandungan zat organik. Data yang diperoleh dari hasil pengujian kemudian digunakan untuk perhitungan campuran beton (*mix design*). Adapun ringkasan hasil pengujian sifat-sifat fisik material dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Hasil pemeriksaan pengujian material penyusun beton.

Jenis pengujian	Material yang dipakai	Nilai hasil pengujian	Standar ASTM
Kadar air	Agregat halus	0,59 %	0 – 1 %
	Agregat kasar	1,7 %	0 – 3 %
Berat jenis	Agregat halus	2,4390	2,0 – 2,9
	Agregat kasar	2,5840	2,5 – 2,9
Penyerapan	Agregat halus	2,04 %	1 – 3 %
	Agregat kasar	2,5 %	1 – 3 %
Berat volume	Agregat halus	1483 kg/m ³	-
	Agregat kasar	1413,5 kg/m ³	-
Kadar lumpur	Agregat halus	0,02 %	< 5 %
Kandungan zat organis	Agregat halus	Sama dengan warna standar	Tidak boleh lebih tua dari warna standar

Dari data yang diperoleh dalam tabel diatas, bahwa material penyusun beton telah memenuhi standar ASTM sehingga dapat digunakan pada campuran beton.

4.2 Perencanaan Campuran Beton

Perencanaan campuran beton tanpa serat baja dihitung dengan menggunakan metode *The British Mix Design Method*. Sedangkan komposisi campuran beton serat dihitung dengan penambahan serat baja sesuai dengan persentase volume serat yang ditambahkan pada setiap satuan volume beton (*volume fraction*) yang ditentukan. Variasi penggunaan serat baja yaitu 0%, 0,5%, 1% dan 1,5% dari volume adukan beton. Komposisi kebutuhan material per m³ beton untuk kuat tekan rencana $f_c = 25$ MPa dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kebutuhan material per m³ beton dan serat baja

Campuran Beton (m ³)	Material (Kg)				
	Semen	Pasir	Split	Air	Serat Baja
25 Mpa (Polos)	375	768	902	225	-
Serat 0,5 %	363,7711	745,0033	874,9909	218,2627	39,25
Serat 1 %	362,0053	741,3868	870,7433	217,2032	78,5
Serat 1,5 %	360,2564	737,8052	866,5368	216,1539	117,75

4.3 Keleccakan (*Workability*)

Keleccakan adukan beton (*workability*) dapat dilihat dari nilai *slump* yang terjadi. Keleccakan beton (*workability*) merupakan sifat-sifat adukan beton yang ditentukan oleh kemudahan dalam pencampuran, pengangkutan, pencetakan, pemadatan, dan *finishing*. Semakin tinggi nilai *slump* maka semakin mudah proses pengerjaan beton (*workability*). Dalam penelitian ini, nilai *slump* rencana berkisar antara 60-180 mm. Nilai *slump* beton serat masing-masing adukan beton disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai *slump* beton serat

Sampel	Keterangan	Tanggal Pengecoran	<i>Slump</i> (cm)
BL 1	Beton serat Vf 0% (normal) ($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	17/12/2019	16,75
BL 2	Beton serat Vf 0,5% ($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	18/12/2019	13,5
BL 3	Beton serat Vf 1% ($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	19/12/2019	9,25
BL 4	Beton serat Vf 1,5% ($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	23/12/2019	4

Dapat dilihat pada Tabel 3, Adanya penambahan serat baja dapat mengurangi *workability* beton. Semakin besar konsentrasi serat (*volume fraction*) maka semakin menurun *workability* pada adukan beton.

4.4 Berat Volume Beton

Berat volume beton ditentukan melalui perbandingan berat beton dengan volumenya. Pengujian berat volume beton dilakukan sebelum diadakannya pembebanan terhadap benda kubus. Nilai berat volume beton diketahui dengan cara menimbang dan mengukur dimensi benda uji, sehingga didapatkan berat dan volume benda uji tersebut. Hasil pengujian berat volume beton dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengukuran berat volume beton serat baja untuk benda uji kubus.

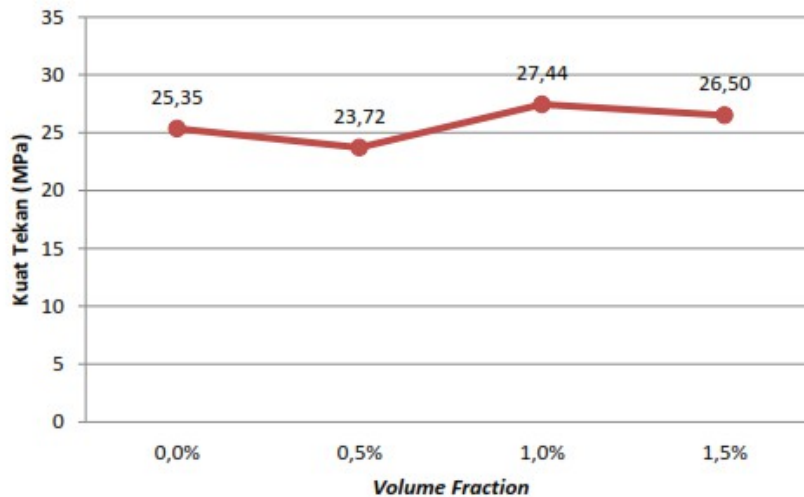
Volume fraction (%)	Kode	Berat (kg)	Volume beton (m ³)	Berat volume beton (kg/m ³)	Berat volume rata-rata beton (kg/m ³)
0	KB 1 a	8,06	0,0034	2386,6667	2334,3210
	KB 1 b	7,86	0,0034	2327,4074	
	KB 1 c	7,73	0,0034	2288,8889	
0,5	KB 2 a	7,98	0,0034	2362,9630	2440,9877
	KB 2 b	8,13	0,0034	2408,8889	
	KB 2 c	8,61	0,0034	2551,1111	
1	KB 3 a	8,31	0,0034	2460,7407	2464,1975
	KB 3 b	8,14	0,0034	2410,3704	
	KB 3 c	8,51	0,0034	2521,4815	
1,5	KB 4 a	8,39	0,0034	2484,4444	2450,8642
	KB 4 b	8,42	0,0034	2494,8148	
	KB 4 c	8,01	0,0034	2373,3333	

Dari hasil penelitian pada Tabel 4 dapat diketahui bahwa berat volume beton terbesar untuk benda uji kubus terdapat pada *volume fraction* 1% dengan nilai 2464,1975 kg/m³, sedangkan berat volume terkecil terdapat pada beton yang tidak dicampur dengan serat baja dengan nilai 2334,3210 kg/m³.

4.5 Pengujian Mekanik Beton

4.5.1. Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari dari pengecoran. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tekan beton (f_c'), yaitu dengan membandingkan antara beban maksimum pada saat beton hancur terhadap luas penampang beton.



Gambar 4. Grafik hubungan antara *volume fraction* dan kuat tekan beton

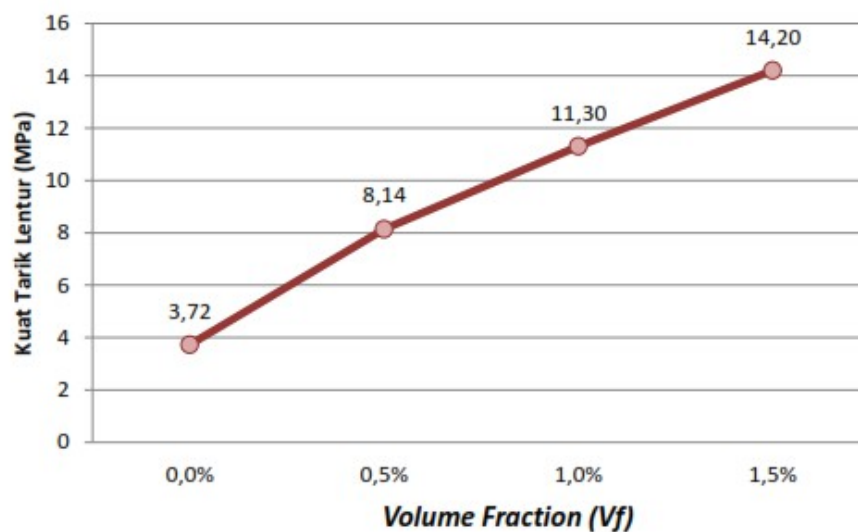
Dari hasil penelitian diketahui bahwa dengan penambahan serat baja *volume fraction* 1% dalam adukan beton menghasilkan kuat tekan beton tertinggi sebesar 27,44 MPa. Penambahan serat 1% mengalami peningkatan kuat tekan beton sebesar 5,39 % dari kuat tekan beton *volume fraction* 0 % yaitu 25,35 Mpa. Peningkatan kuat tekan terjadi karena adanya efek pengekangan di dalam beton oleh serat terhadap material penyusun beton sehingga beton menjadi lebih padat. Dari pengamatan dapat diketahui bahwa beton serat mengalami pecah yang perlahan-lahan dan tidak disertai bunyi ledakan, begitu pula retakan yang terjadi tidak sebanyak beton tanpa serat. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan serat baja ke dalam beton dapat membuat beton menjadi lebih liat (daktail).

4.5.2. Kuat Tarik Lentur Beton

Tujuan utama dari penambahan serat ke dalam adukan beton adalah untuk meningkatkan kekuatan beton terhadap tarik lentur. Pada penelitian ini, kuat lentur dilakukan pada balok beton ukuran 10 cm x 10 cm x 40 cm yang berumur 28 hari. Pengujian kuat lentur beton dilakukan dengan diberi beban terpusat pada jarak 1/3 bentang dan dibebani 2 beban terpusat. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan beban tekan sampai balok mengalami keruntuhan.

Tabel 5. Hasil pengujian kuat tarik lentur beton serat baja

Volume fraction (%)	Sampel	Beban maks (Div)	Beban maks (N)	Kuat tarik Lentur (Mpa)	Kuat tarik rata-rata (Mpa)	Persentase Kenaikan (%)
0	BB 1 a	28	13509,41	4,05	3,72	0
	BB 1 b	21	8896,44	2,67		
	BB 1 c	30	14827,41	4,45		
0,5	BB 2 a	50	28007,32	8,40	8,14	118,82
	BB 2 b	54	30643,30	9,19		
	BB 2 c	42	22735,35	6,82		
1	BB 3 a	54	30643,30	9,19	11,30	203,76
	BB 3 b	86	51731,17	15,52		
	BB 3 c	54	30643,30	9,19		
1,5	BB 4 a	70	41187,24	12,36	14,20	281,72
	BB 4 b	90	54367,15	16,31		
	BB 4 c	78	46459,20	13,94		

Gambar 5. Grafik hubungan antara *volume fraction* dan kuat tarik lentur beton

Berdasarkan Tabel 5 dapat dilihat bahwa semakin tinggi volume fraksi serat baja (V_f) maka semakin tinggi tegangan tarik lentur beton. Kuat lentur balok beton tertinggi terdapat pada *volume fraction* 1,5% yaitu sebesar 14,20 MPa. Peningkatan kuat lentur yang terjadi pada beton serat baja terhadap beton normal diakibatkan karena pada beton normal gaya lentur yang terjadi hanya ditahan oleh beton sendiri, sedangkan pada beton serat gaya tarik yang terjadi ditahan secara bersama-sama oleh beton dan serat baja.

4.6 Pengujian Balok Beton Bertulang

Pengujian balok beton bertulang dilakukan dengan meletakkan balok uji pada tumpuan sendi dan rol sejarak 1500 mm, dimana balok tersebut menerima dua beban terpusat yang diberikan oleh *hydraulic jack*. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap lendutan yang terjadi di tengah bentang dengan cara membaca *dial gauge* yang

dipasang di tengah bentang dan di bawah beban. Selanjutnya melakukan pengamatan terhadap lebar dan pola retak pada balok uji dengan cara menggambar pola retak pada setiap tahap pembebanan dan mengukur lebar retak pada saat beban maksimum. Balok beton bertulang diberi beban oleh *hydraulic jack* dan besarnya beban diketahui dari pembacaan *proving ring*.

Berdasarkan pengujian tersebut juga akan diketahui besarnya beban pada saat balok mulai retak, pola retak serta lebar retak awal dan perkembangannya sampai mencapai beban maksimum.

4.7 Analisis Hasil Pengujian

4.7.1. Beban Maksimum Pada Balok Beton Bertulang Berdasarkan Hasil Pengujian.

Data beban maksimum yang mampu dipikul setiap balok beton bertulang serta persentase peningkatan dan penurunan kekuatan balok beton bertulang dapat dilihat pada Tabel 6.

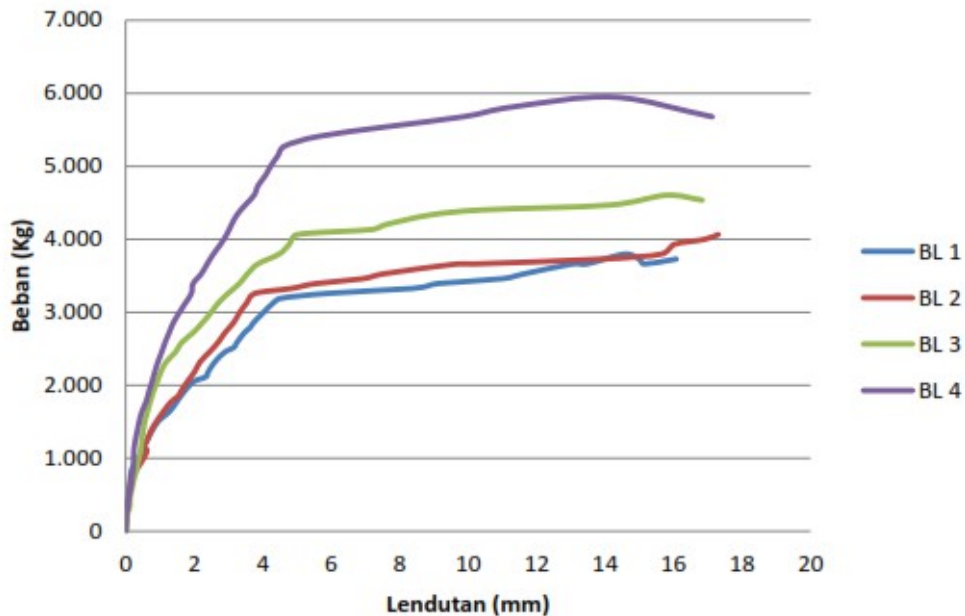
Tabel 6. Beban maksimum dan persentase peningkatan kapasitas balok beton bertulang.

Sampel	Keterangan	Beban Maksimum Berdasarkan Penelitian (Kg)	Besar Peningkatan (%)
	Beton serat Vf 0% (normal)		
BL 1	($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	3796,74	-
	Beton serat Vf 0,5%		
BL 2	($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	4065,53	7,08
	Beton serat Vf 1%		
BL 3	($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	4603,12	21,24
	Beton serat Vf 1,5%		
BL 4	($\rho_{\min} < \rho_{\text{pakai}} < \rho_{\max}$) 2D 10 mm	5947,10	56,64

Berdasarkan Tabel 6, dapat dilihat bahwa beban maksimum yang mampu dipikul setiap balok beton bertulang *volume fraction* 1,5% yaitu sebesar 5947,10 Kg. Beban maksimum yang mampu dipikul balok beton bertulang *volume fraction* 1,5% mengalami peningkatan sebesar 56,64% dari *volume fraction* 0% yaitu 3796,74 Kg.

4.7.2. Hubungan Beban dan Lendutan

Untuk mengetahui besarnya nilai lendutan/defleksi (Δ) digunakan alat *dial gauge*, yang diletakkan di tengah bentang. Pengukuran nilai lendutan dilakukan dengan mencatat perubahan nilai yang terdapat pada *dial gauge* setiap tahap pembebanan.



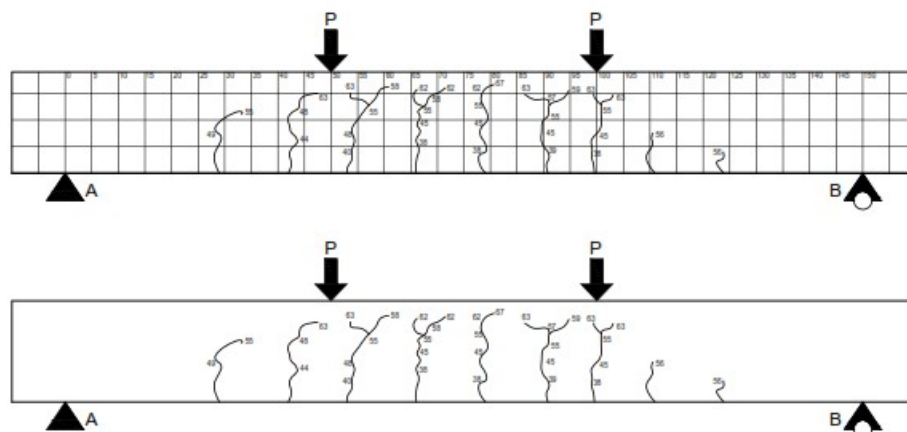
Gambar 6. Grafik hubungan antara beban dan lendutan tengah bentang.

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa penambahan serat baja pada balok beton bertulang dapat meningkatkan kekakuan balok dan kapasitas beban maksimum balok.

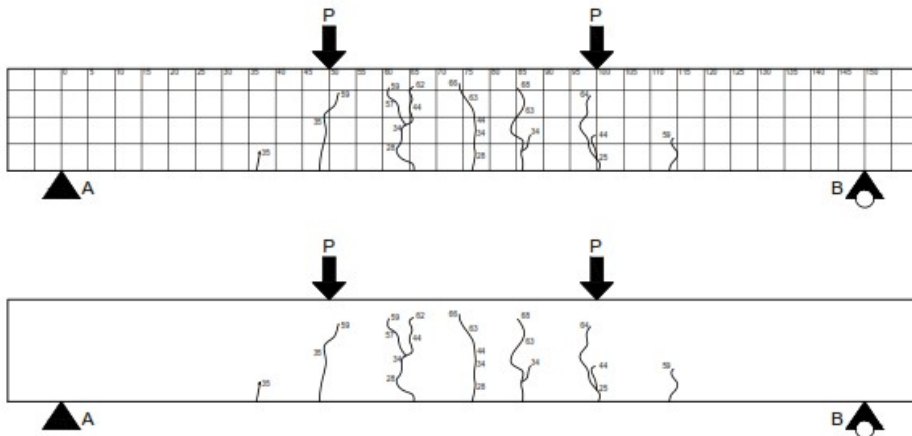
4.7.3. Pengamatan Terhadap Lebar Retak serta Pola Retak.

Pengamatan retak dilakukan selama pengujian berlangsung yang bertujuan untuk mengetahui pola retak dan perkembangannya setiap tahapan pembebanan. Cara yang dilakukan dalam mengamati pola retak yaitu dengan mengukur lebarnya retak serta membuat gambar/sketsa pada benda uji tersebut.

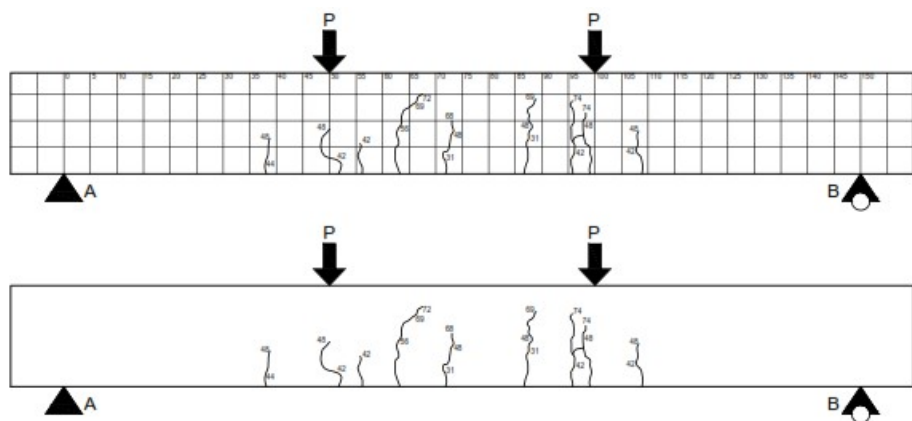
Secara umum retak terjadi pada daerah tengah bentang . Retak ini diawali di daerah tengah bentang dan kemudian retak bertambah dari tengah bentang hingga mendekati tumpuan. Retak yang terjadi juga semakin panjang dan lebar.



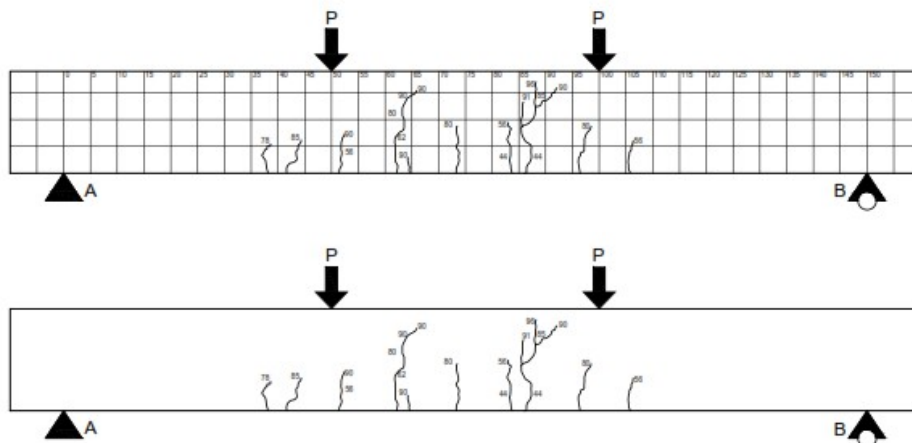
Gambar 7. Gambar pola retak balok beton bertulang BL 1.



Gambar 8. Gambar pola retak balok beton bertulang BL 2.

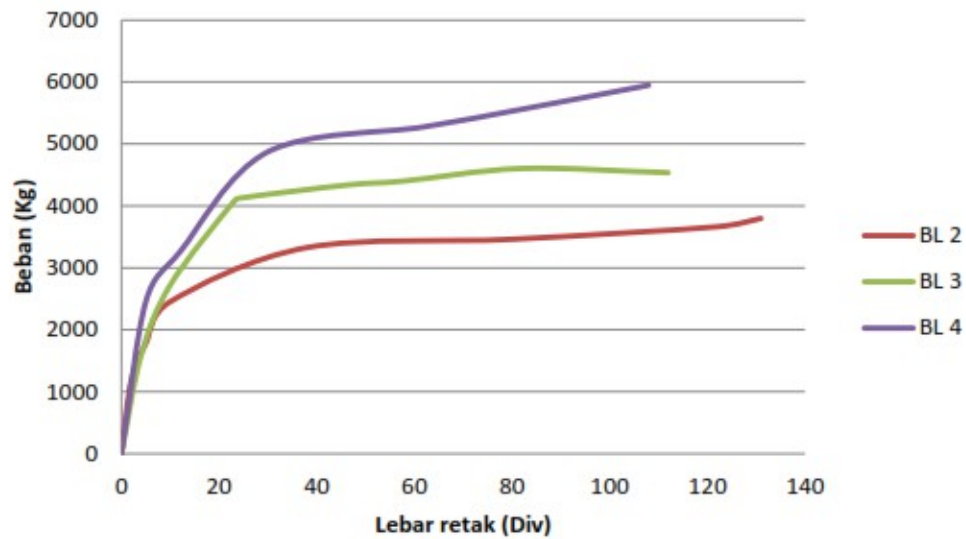


Gambar 9. Gambar pola retak balok beton bertulang BL 3.



Gambar 10. Gambar pola retak balok beton bertulang BL 4.

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang tanpa serat dan balok beton bertulang dengan serat tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Pola retak yang terjadi merupakan pola retak akibat beban lentur, hal ini dapat dilihat bahwa pola retak yang terjadi berada di tengah bentang, selain itu pola retak juga tegak lurus terhadap penampang balok.



Gambar 11. Grafik hubungan antara beban dan lebar retak.

Berdasarkan grafik, dapat dilihat bahwa pengaruh penambahan serat baja terhadap beban retak pertama, beban leleh, dan beban ultimate semakin tinggi. Pada lebar retak dapat dilihat bahwa dengan adanya penambahan serat dapat memperkecil lebar retak yang terjadi.

4.8 Metode Teoritis

Metode teoritis digunakan untuk menganalisis kemampuan balok menahan beban yang tujuannya adalah sebagai pembanding dari hasil yang diperoleh dimetode eksperimental. Data material yang digunakan dalam perhitungan metode teoritis telah disesuaikan dengan material-material penyusun balok pada metode eksperimental.

1. Perhitungan Momen Nominal (M_n)

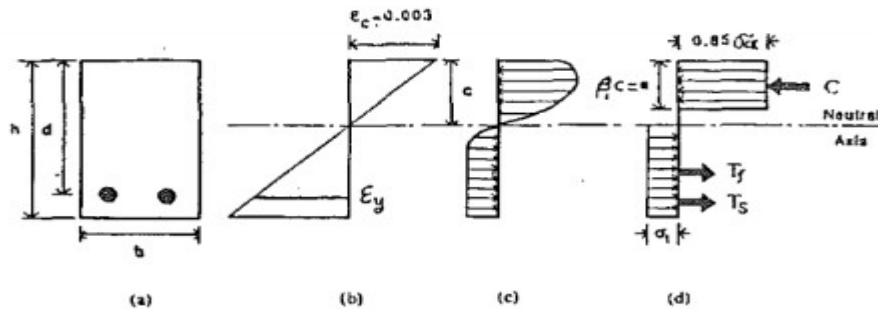
Besarnya M_n teoritis diperoleh dengan persamaan keseimbangan gaya dan dari gambar diagram momen pengujian balok pada penelitian ini. Besarnya kekuatan lentur nominal balok beton bertulang berdasarkan SK SNI T-15 1991-03 adalah sebagai berikut :

$$M_n = C (d - 0,5a) \text{ Atau}$$

$$M_n = T (d - 0,5a)$$

Pada analisa balok beton serat, kekuatan tarik beton serat diperhitungkan sebagai penambahan kontribusi pada tulangan tarik untuk memperoleh momen ultimit.

- Usulan Henager dan Doherty (1976)



Gambar 12. Distribusi regangan dan tegangan lentur balok beton bertulang yang diberi fiber. (Henager & Doherty, 1976)

Kekuatan momen lentur nominal apabila tulangan baja pada daerah tekan diabaikan :

Gaya-gaya dalam adalah :

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot \beta \cdot c \cdot b$$

$$T_s = A_s \cdot f_y$$

$$T_{cf} = f_{tf} \cdot (h - c) \cdot b$$

$$M_n = T_s (d - a/2) + T_{cf} (h - \frac{h-c}{2}) - (a/2))$$

Dimana : M_n = Kekuatan momen lentur murni (Nmm)

T_{cf} = Gaya tarik dari beton serat (Nmm)

T_s = Gaya tarik dari baja (N)

Perhitungan kapasitas kuat momen lentur nominal dengan menggunakan kuat tekan dan kuat tarik belah beton dari hasil pengujian. Pada balok beton normal, tegangan tarik tidak diperhitungkan karena sifatnya yang getas. Hasil kapasitas kuat momen lentur nominal dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan persamaan prediksi kuat momen lentur nominal beton bertulang

Persamaan Prediksi	Momen Lentur Nominal (Nmm)			
	BL 1	BL 2	BL 3	BL 4
Hasil Pengujian	9311504,85	9970712,32	11289151,8	14585262,75
Usulan SK SNI T-15-1991-03	8240034,176	-	-	-
Usulan Henager dan Doherty (1976)	-	20715776,28	23490900,9	25515330,3

Dapat dilihat pada Tabel 7 bahwa kuat momen lentur nominal beton serat lebih tinggi dari pada kuat momen lentur nominal beton tanpa serat. Hal ini membuktikan bahwa serat mampu memperbaiki sifat getas beton. Nilai kuat momen lentur nominal terbesar didapatkan dari hasil pengujian pada *volume fraction* 1,5 % yaitu 14585262,75 Nmm. Hasil perbandingan momen lentur nominal eksperimen dan teoritis menunjukkan perbedaan yang signifikan disebabkan pada metode teoritis digunakan hasil kuat tarik dari pengujian yang menghasilkan penambahan kuat tarik yang sangat signifikan yaitu mencapai 281,72% pada beton serat Vf 1,5% dibandingkan dengan beton normal.

5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian mengenai kuat tekan, tarik lentur dan lentur beton dengan empat variasi penambahan serat baja yang telah dilakukan dengan menggunakan pembebanan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan serat baja *volume fraction* 1% dalam adukan beton menghasilkan kuat tekan beton tertinggi sebesar 27,44 MPa. Penambahan serat 1% mengalami peningkatan kuat tekan beton sebesar 5,39 % dari kuat tekan beton *volume fraction* 0 % yaitu 25,35 Mpa. Penurunan kuat tekan pada *volume fraction* 1,5% akibat semakin banyaknya rongga di dalam beton karena ikatan antar serat yang menggumpal seperti bola (*balling effects*) menyebabkan sulitnya pergerakan agregat.
2. Kuat tarik lentur balok beton tertinggi terdapat pada *volume fraction* 1,5% yaitu sebesar 14,20 MPa. Kuat lentur balok beton serat *volume fraction* 1,5% mengalami peningkatan sebesar 281,42% dari *volume fraction* 0% yaitu 3,72 Mpa.
3. Kuat lentur balok beton bertulang dengan beban maksimum yang mampu dipikul balok beton bertulang *volume fraction* 1,5% yaitu sebesar 5947,10 Kg. Beban maksimum yang mampu dipikul balok beton bertulang *volume fraction* 1,5% mengalami peningkatan sebesar 56,64% dari *volume fraction* 0% yaitu 3796,74 Kg.
4. Nilai kuat momen lentur nominal terbesar didapatkan dari hasil pengujian pada *volume fraction* 1,5 % yaitu 14585262,75 Nmm, mengalami peningkatan sebesar 56,64% dari *volume fraction* 0% yaitu 9311504,85 Nmm.
5. Penambahan serat baja pada balok beton bertulang menyebabkan balok tersebut menjadi lebih kaku, penambahan serat juga dapat memperbaiki sifat getas pada beton. Dengan adanya penambahan serat baja pada balok beton bertulang juga menyebabkan bertambahnya kapasitas beban maksimum pada balok tersebut. Penambahan serat baja tidak memberikan kontribusi yang besar dalam peningkatan kuat tekan, sedangkan pada kuat tarik dan lentur, serat baja pada penelitian ini mempunyai kuat tarik yang tinggi dan dapat memberikan peningkatan kuat tarik yang signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 544. 1982. *State of The Art Report on Fiber Reinforced Concrete International*. May 1982, pp 9-25.
- ACI Committee 544. 1984. *Guide for Specifying, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete*. ACI Journal. Mar-Apr, 1984. Vol.81, No:2.
- Bagus, Krisna. 2018. *Pengaruh Penambahan Serat Kawat Bendrat Pada Beton Mutu Tinggi Terhadap Kapasitas Kuat Tekan Dan Kuat Lentur*. Skripsi Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- British Standard Institution. 1990. *Testing Aggregates*. BS 812. England: BSI
- Leksono, B. T., Suhendro, B. dan Sulisty, P. 1995. *Pengaruh Fiber Bendrat Berkait Secara Parsial Pada Prilaku dan Kapasitas Balok Beton Bertulang Dengan Model Skala Penuh*. BPPS-UGM, 8(3B), Agustus 1995.
- Prabowo, Faisal. 2016. *Pengaruh Penambahan Serat Bendrat Terhadap Kuat Lentur Nominal Balok Beton Bertulang*. Tesis Program Pasca Sarjana UNS. Solo.
- Pratikto. 2009. *Konstruksi Beton I*. Politeknik Negeri Jakarta, Jakarta. 126 hlm.

- SNI 03-1974-1990. 1990. *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Badan Standarisasi Nasional. Bandung.
- SNI 03-4431-1997. 1997. *Metode Pengujian Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan*. Badan Standarisasi Nasional. Bandung.
- Soroushian, P., Bayasi, Z. 1987. *Concept of Fiber Reinforced Concrete*. Proceeding of the International Seminar on Fiber Reinforced Concrete. Michigan State University. Michigan, USA.
- Tjokrodimuljo, Kardiyono. 2012. *Teknologi Beton*. Yogyakarta. Biro Penerbit KMTS FT UGM