

PERILAKU GESER BALOK TINGGI BETON SERAT BAGU TANPA TULANGAN TRANSVERSAL

I Ketut Sudarsana*, Ida Bagus Rai Widiarsa, dan Marselinus Anggur Ngganggus

Program Studi Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana Denpasar

*Email:ksudarsana@unud.ac.id

ABSTRAK

Mekanisme geser pada balok tinggi penting untuk diperhatikan karena keruntuhan geser bersifat getas (*brittle*). Gaya geser umumnya kombinasi dengan lentur, torsi, atau gaya normal. Untuk mengatasi keruntuhan yang getas (*brittle*), perlu untuk meningkatkan persentase tulangan horizontal dan vertikal atau menggantinya dengan beton bertulangan serat (FRC). Serat Bagu merupakan serat alami yang kuat dan awet, serat Bagu banyak ditemukan dipasaran daerah Bali karena merupakan bahan yang dibutuhkan secara berkelanjutan setiap tahun pada saat perayaan Nyepi dengan harga yang terjangkau. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku geser balok tinggi beton serat Bagu dengan variasi volume serat bagu 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% dan 1% terhadap berat semen yang meliputi perilaku pola retak, beban retak, kekakuan dan daktilitas balok tinggi. Penelitian ini juga membandingkan tingkat keakuratan prediksi geser dari SNI. 2847-2013 dan Strut and Tie Model (STM) untuk memprediksi kapasitas geser balok tinggi beton serat Bagu. Sebanyak 10 buah balok tinggi dengan ukuran 150x450x1500mm dibuat dan diuji diatas perletakan sederhana dengan dua buah beban terpusat pada jarak 370mm dari tumpuan. Balok dengan tulangan longitudinal tunggal 2D16mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 0,75 % serat Bagu menurunkan prosentase jumlah retak lentur sebesar 75 %, peningkatan beban retak lentur pertama sebesar 341,67%, beban retak geser pertama sebesar 170 % dan daktilitas balok sebesar 6,92% pada kondisi sebelum retak pertama dan 0,26% pada kondisi setelah retak pertama. Prediksi kapasitas geser balok tinggi beton serat Bagu tanpa tulangan transversal dengan metode STM lebih baik dari SNI dengan nilai rata-rata rasio V_{exp}/V_{STM} atau $V_{exp}/SNI}$ masing-masing sebesar 1.16 untuk teori STM dan 2,47 untuk teori SNI.

Kata kunci: beton serat, balok tinggi, geser balok, serat bagu

SHEAR BEHAVIORS OF DEEP BEAM BAGU-FIBER-REINFORCED CONCRETE WITHOUT TRANSVERSAL REINFORCEMENT.

ABSTRACT

The shear mechanism at deep beams is important to be observed because shear failure is brittle. Shear force is generally combined with bending, torque, or normal force. To overcome brittle collapse, it is necessary to increase the percentage of horizontal and vertical reinforcement or replace it with fiber reinforced concrete (FRC). Bagu fiber is natural fibers that are strong and durable. Bagu fiber is commonly found in the traditional market in Bali because it is a material that is needed continuously every year during the Nyepi celebrations at affordable prices. The purpose of this research was to evaluate the shear behavior of deep beams with Bagu fiber concrete with variations on fiber volume of 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, and 1% of the cement weight. The research also investigated the accuracy of SNI 2847-2013 and the Strut and Tie Model (STM) in predicting the shear capacity of the bagu fiber concrete deep beams. As many as 10 deep beam specimens of dimension 150x450x1500mm were made and tested on simply supported setup with two points loading at a distance of 370mm from each supports. Beams were singly reinforced of 2D16mm. The results show that the addition of 0.75% Bagu fiber resulted in a decrease in the percentage of flexural cracks by 75%, the increase in flexural first cracking load by 341.67% and first shear cracking load by 170% and the beam ductility by 6.92% in the condition before the first crack and 0.26% in the condition after the first crack. The predictions of shear capacity of the deep beam of bagu fibers concrete using STM are better than that of SNI with the average percentage ratio of V_{exp}/V_{STM} or $V_{exp}/SNI}$ of 1.07 for STM and 2.39 for SNI.

Keywords: fiber concrete, deep beam, shear, bagu fiber

1 PENDAHULUAN

Perilaku balok tinggi beton bertulang sangat rentan terhadap keruntuhan yang diakibatkan oleh gaya geser. Mekanisme transfer geser dominan disumbangkan oleh aksi pelengkung (arch action) pada saat dan setelah retak miring terjadi. Beberapa variabel penting sebagai penentu mekanisme aksi pelengkung yang mempengaruhi kinerja balok tinggi adalah, bentuk dan dimensi balok, jenis tulangan utama dan tulangan badan, serta kekuatan tekan dan tarik beton (Russo et al., 2005). Untuk menjamin agar sifat getas balok tinggi pada saat terjadi mekanisme aksi pelengkung dapat dikurangi, maka perlu untuk meningkatkan daktilitas beton yang ada. Campione (2012) menguraikan bahwa peningkatan daktilitas yang signifikan dapat dicapai dengan menggunakan Fibre Reinforced Concrete (FRC), disamping itu FRC memungkinkan tulangan longitudinal utama dimanfaatkan sepenuhnya sebelum terjadi keruntuhan. Serat yang banyak digunakan dalam campuran beton adalah serat baja, serat sintesis dan serat alami. Beberapa penelitian serat alami dilakukan oleh Ndoen, dkk (2015) meneliti serat daun gewang dalam beton dan Suhardiman (2011) meneliti serat bambu ori dalam beton. . Salah satu serat alami yang memiliki kuat tarik yang bagus adalah serat bagu. Yasa dan Wati (2015) menguji sehelai serat bagu dan diperoleh kuat tariknya sebesar 35,4 MPa serta mengujinya dalam campuran beton dengan agregat LECA (Wati, 2016).

Penelitian eksperimental ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku geser balok tinggi beton serat Bagu tanpa tulangan transversal yang meliputi pola dan beban retak serta deformasi yang terjadi. Disamping itu penelitian ini juga untuk membandingkan prediksi geser balok tinggi SNI.2847:2013 dan metode Strut and Tie bila untuk balok tinggi beton serat Bagu.

2 TEORI

2.1 Beton Serat

Menurut American Concrete Institute (ACI) Committee 544, beton berserat merupakan bahan campuran beton yang terdiri atas semen hidrolis, agregat halus dan kasar dengan penambahan sejumlah kecil serat dengan ukuran tertentu yang tersebar secara acak. Beton serat juga dimungkinkan untuk ditambahkan bahan-bahan additive lainnya. Penambahan serat ini kedalam beton bertujuan untuk meningkatkan kuat tarik beton dan menahan retak yang terjadi pada beton. Namun, penambahan serat kedalam beton tidak banyak menambah kuat tekan beton, akan tetapi dapat menambah daktilitas (Tjokrodimulyo, 1996). Ada beberapa variabel penting dari serat yang mempengaruhi karakteristik beton serat yang dihasilkan yaitu perbandingan l/d antara panjang (l) dan diameter (d) serat, volume serat yang ditambahkan pada tiap satuan volume beton, mutu beton, Daya lekat (bond) antara fiber dan beton, Metode / Cara Pencampuran.

Perilaku mekanik beton serat berbeda dengan beton tanpa serat dimana serat akan berfungsi sebagai tulangan mikro yang tersebar merata dengan orientasi acak mampu mencegah atau mengurangi retak pada beton akibat pembebanan maupun panas hidrasi. Penambahan serat dapat meningkatkan kekuatan lentur, tekan dan tarik beton. Namun, prosentase peningkatan kuat lentur yang terjadi umumnya lebih besar dibandingkan dengan peningkatan kuat tekan dan tariknya (Ananta, 2007).

Persamaan hubungan tegangan – regangan pada beton serat sedikit berbeda dengan beton tanpa serat seperti ditunjukkan dengan Persamaan 1 :

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\beta \left[\frac{\epsilon}{\epsilon_o} \right]}{(\beta - 1) + \left[\frac{\epsilon}{\epsilon_o} \right]} \quad (1)$$

Dengan:

$$\epsilon = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2; \epsilon_o = 0,002 + 0,5 \times 10^{-6} \cdot R < 0,003; \beta = 1,09 + 0,71(R)^{-0,93}$$

$$R = \frac{V_f \cdot L}{\phi} \quad (2)$$

khusus untuk fiber berbentuk hooked, nilai $\beta = 1,09 + 7,5 (R)^{-1,39}$

2.2 Serat Bagu

Serat Bagu diperoleh dari tumbuhan yang memiliki ciri-ciri seperti pandan dengan pinggir daun berduri, tebal dan ruas-ruas yang sejajar. Di Bali pohon bagu juga disebut pohon gebang atau manas perau (Kabupaten Karangasem) dan pandan (Kabupaten Singaraja). Serat Bagu yang berkualitas baik dapat dihasilkan dari pohon yang sudah berusia + 1,5 tahun.

Serat bagu memiliki kuat tarik yang cukup besar. Yasa dan Wati (2015) melakukan pengujian tarik terhadap serat bagu tunggal dengan diameter 0,3 mm dan memperoleh nilai kuat tarik sebesar 35,4 MPa. Sedangkan, penelitian lain mengenai kekuatan serat bagu belum pernah ada.

2.3 Kekuatan Geser dan Lentur Balok Tinggi Tanpa Serat

a) Persyaratan Lentur Balok Tinggi

Hasil beberapa pengujian menunjukkan bahwa distribusi tegangan balok tinggi dengan angka perbandingan bentang bersih terhadap tinggi (l_n/h) sebesar 1,0 menunjukkan bahwa lengan momen tidak berubah terlalu *significant* walaupun telah terjadi retak awal sehingga momen tahanan nominal yang terjadi dapat dihitung dengan Persamaan 3:

$$M_n = A_s f_y \cdot j d \quad (3)$$

Adapun luas penampang tulangan (A_s) untuk lentur adalah (SNI 2847-2013.10.5.1) sebagai berikut:

$$A_s = \frac{M_u}{\phi \cdot f_y \cdot j d} \geq \frac{200 \cdot b \cdot d}{f_y} \quad (4)$$

$$A_{s,min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 \cdot f_y} \cdot b_w \cdot d \geq \frac{1,4}{f_y} \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

Lengan momen ($j d$) yang direkomendasikan oleh CEB adalah :

$$j d = 0,2 (l+2h) \text{ untuk } l \leq l/h < 2 \quad (6)$$

Dan

$$j d = 0,6 l \text{ untuk } l/h < 1 \quad (7)$$

b) Persyaratan Geser Balok Tinggi Konvensional

Jika x adalah jarak antara bidang keruntuhan dari muka perletakan, l_n adalah bentang bersih untuk beban terdistribusi merata, dan a adalah lengan geser atau bentang untuk beban terpusat, maka persamaan untuk jarak ini adalah:

Beban terdistribusi merata : $x = 0,15 l_n$

Beban terpusat : $x = 0,50 a$

Dalam kedua hal, jarak x ini tidak boleh melebihi tinggi efektif d . Gaya geser rencana V_u harus memenuhi kondisi yang ditentukan dalam SNI 2847: 2013 (11.7.3)

$$V_u \leq \phi (0,83 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d) \quad (8)$$

Jika Persamaan 8 tidak dapat dipenuhi maka penampang balok harus diperbesar. Adapun faktor reduksi kekuatan $\phi=0,85$

$$V_u \leq \phi (0,83 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d) \quad (9)$$

Dengan perhitungan yang lebih detail gaya geser nominal balok yang merupakan kontribusi dari beton (V_c) dapat dihitung dengan Persamaan 10:

$$V_u = \left(3,5 - 2,5 \frac{M_u}{V_u \cdot d} \right) \frac{1}{7} \left(\sqrt{f'_c} + 120 \cdot \rho_w \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) b_w \cdot d \leq 6 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (10)$$

Dimana $1,0 < 3,5 - 2,5 \left(\frac{M_u}{V_u \cdot d} \right) \leq 2,5$ merupakan factor pengali dari persamaan dasar V_c dari balok biasa untuk memperhitungkan besarnya kapasitas tahanan balok tinggi. ACI 318 mengizinkan kapasitas tahanan yang tinggi apabila retak minor pada keadaan V_u melebihi beban retak geser pertama. Namun apabila hal ini tidak demikian, maka Persamaan 11 dapat digunakan dalam menghitung V_c .

$$V_c = 1,7 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (11)$$

2.4 Kuat Geser Balok - Tinggi Beton Bertulang Berdasarkan Strut and Tie Model (STM)

Metode Strut and Tie banyak direkomendasikan untuk menganalisis *Disturb Region (D-Region)* pada beton dimana salah satunya adalah tegangan pada balok tinggi. Sudarsana (2016) membandingkan STM dengan *collective data bank* pengujian balok tinggi menunjukkan prediksi geser STM cukup aman untuk balok tinggi dengan tulangan badan namun tidak aman untuk balok tinggi tanpa tulangan badan.

Analogi sebuah struktur rangka batang, ada tiga elemen utama yang membentuk keseimbangan pada model *strut and tie*, yaitu *strut*/penunjang yang berfungsi seperti batang tekan, *tie*/pengikat yang berfungsi sebagai batang tarik, dan *nodes/joints* yang merupakan titik simpul. Nodal pada model *strut and tie* sering juga disebut *hydrostatic element*.

2.4.1 Elemen Strut

Kuat hancur beton pada elemen *strut* merupakan penentu dari kekuatan dari *strut* tersebut. Kuat hancur beton ini berbeda dengan kuat hancur beton hasil pengujian tekan silinder. Menurut ACI 318- 2002, kekuatan hancur strut beton dinyatakan sebagai kekuatan efektif beton (f_{cu}) yang dihitung berdasarkan Persamaan 12:

$$f_{cu} = 0,85 \cdot \beta_s \cdot f'_c \quad (12)$$

Dimana:

- a) $\beta_s = 1,0$ untuk *strut* prismatis di daerah belum retak atau untuk *strut* menyilang yang sama panjang tanpa kontrol retak pada daerah penulangan.
- b) $\beta_s = 0,75$ untuk *strut* berbentuk botol dan terdapat kontrol retak pada daerah penulangan.
- c) $\beta_s = 0,60\lambda$ untuk *strut* yang berbentuk botol dan tidak terdapat tanpa tulangan, dimana λ adalah suatu faktor koreksi.
- d) $\beta_s = 0,40$ untuk *strut* di dalam komponen tarik
- e) $\beta_s = 0,60$ untuk kondisi lainnya

Pada model *strut and tie*, gaya tekan dari *strut* diperoleh dengan memperhitungkan kuat tekan nominal dari *strut* seperti pada Persamaan 13:

$$F_{ns} = f'_{cu} \cdot A_c \tag{13}$$

Dimana A_c adalah :

$$A_c = b_w \cdot w_s \text{ dengan } w_s = \text{lebar strut} \tag{14}$$

2.4.2 Elemen Tie

Gaya tarik yang bekerja pada ties dapat mengakibatkan kegagalan pada daerah penjangkaran (*nodal zone*). Tercapainya kekuatan leleh dari ties agar tidak mengalami kegagalan premature sangat ditentukan oleh pengankuran ties tersebut di daerah nodal. Kekuatan nominal dari ties dapat dihitung dengan Persamaan 15:

$$F_{nt} = A_{st} \cdot f_y \tag{15}$$

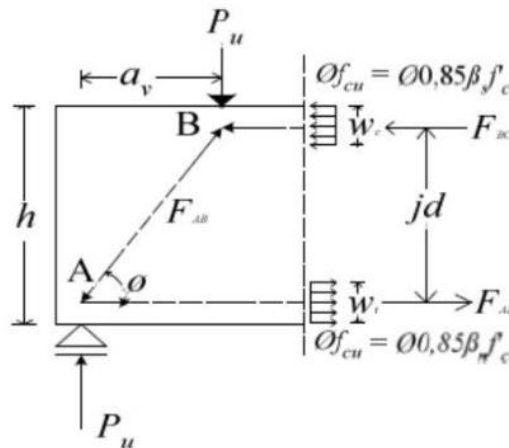
Pada metode Strut and Tie Model (STM), komponen ties yang berfungsi memikul tarik dihitung dari grup baja tulangan yang bekerja pada suatu daerah dengan lebar efektif (w_t). Lebar w_t tergantung dari sebaran penempatan tulangan tarik balok. Batasan dari lebar w_t ditentukan berdasarkan atas kesetimbangan gaya ($\Sigma V = 0; \Sigma H = 0; \Sigma M = 0$) dari beban luar, reaksi-reaksi tumpuan dan semua titik simpul yang ada. Adapun faktor yang harus diperhatikan dalam menghitung nilai w_t , adalah kekuatan dari tie itu sendiri (F_{nt}) dan kekuatan dari nodal zone akibat penjangkaran tulangan (F_{nn}) yang dapat dihitung dari Persamaan 16.

$$F_{nn} = 0,85\beta_n \cdot f'_c \cdot b_{wt} \tag{16}$$

Agar komponen ties dapat mencapai leleh, maka lebar efektif elemen tie (w_t) dapat diperoleh berdasarkan keseimbangan antara kapasitas nominal ties (F_{nt}) dan kapasitas nodal zone (F_{nn}) seperti diberikan pada Persamaan 17 dan 18.

$$F_{nt} = F_{nn} \tag{17}$$

$$w_t = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot \beta_n \cdot f'_c \cdot b} \tag{18}$$



Gambar 1. Model rangka batang yang ditinjau setengah bentang (Sumber : ACI 318-02 Appendix A, 2002)

Berdasarkan *free body* balok pada Gambar 1, dengan mengambil kesetimbangan momen di titik A ($\Sigma MA = 0$) maka dapat diperoleh:

$$w_t = 1,25 \cdot w_c \tag{19}$$

$$j_d = h - \frac{w_c}{2} - \frac{w_t}{2} \tag{20}$$

2.4.3 Elemen Nodal

Nodal/joint merupakan suatu titik bertemunya gaya-gaya pada strut dan tie dari suatu model strut-and-tie. Nodal dalam STM diidealisasikan sebagai sendi seperti pada konsep struktur rangka batang. Daerah disekitar titik temu dari gaya *strut* dan gaya *ties* disebut nodal zone dimana gaya-gaya yang bekerja ini harus memenuhi kondisi kesetimbangan:

$$\sum F_x = 0 ; \sum F_y = 0 ; \text{ dan } \sum M = 0 \tag{21}$$

Kondisi $\sum M = 0$ menunjukkan bahwa garis aksi dari semua gaya yang bekerja harus melalui suatu titik umum (*common point*). Berdasarkan gaya-gaya dalam yang bekerja pada elemen nodal maka elemen ini dapat dibedakan menjadi 4 tipe yaitu:

- a) C-C-C yaitu apabila tiga buah gaya tekan bertemu pada titik nodal tersebut
- b) C-C-T yaitu apabila satu dari ketiga gaya yang bertemu pada titik nodal tersebut adalah gaya tarik
- c) C-T-T yaitu apabila salah satu dari ketiga gaya yang bertemu pada titik nodal tersebut adalah gaya tekan
- d) T-T-T yaitu apabila ketiga gaya yang bertemu pada titik nodal tersebut adalah gaya tarik

Kapasitas tekan dari daerah *nodal* dapat dihitung dengan Persamaan 22 berikut:

$$F_{nm} = f_{cu} \cdot A_n \tag{22}$$

Dimana:

Untuk daerah tekan :

$$A_n = b_w \cdot w_c \tag{23}$$

Untuk Daerah Tarik :

$$A_n = b_w \cdot w_t \tag{24}$$

Nilai tegangan efektif beton pada nodal ditentukan seperti halnya pada elemen strut yaitu:

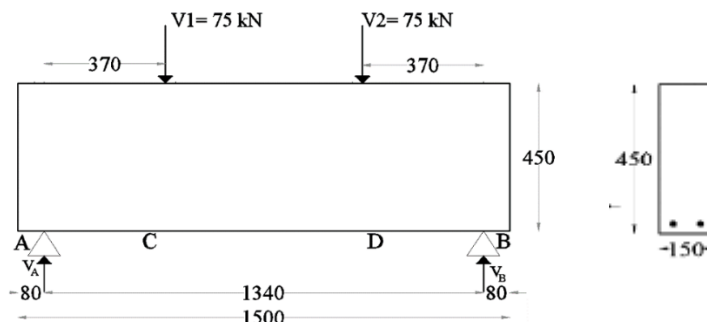
$$f_{cu} = 0,85 \beta_n \cdot f'_c \tag{25}$$

Nilai parameter β_n pada Persamaan 25 tergantung dari tipe daerah nodalnya. Menurut ACI 318 – 02 Appendix A, nilai β_n ditentukan sebagai berikut:

- a) $\beta_n = 1,0$ untuk tipe *CCC nodes*.
- b) $\beta_n = 0,8$ untuk tipe *CCT nodes*.
- c) $\beta_n = 0,6$ untuk tipe *CTT* atau *TTT nodes*

3 METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana. Perencanaan proporsi campuran beton normal merujuk pada Tavio dan Lasino (2015), dengan mutu beton rencana $f'_c = 23$ MPa. Pencampuran adukan beton dilakukan dengan menggunakan *concrete mixer*. Data penelitian berupa benda uji dalam bentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm sebanyak 30 buah dan balok dengan dimensi 150 x 450 x 1500 mm sebanyak 10 buah. Mutu beton (f'_c) = 23 MPa dengan tulangan tarik baja ulir $A_s = 2D16$, f_y sebesar 500 MPa. Benda uji silinder dan balok didesain dalam 5 (lima) variasi persentase berat serat terhadap berat semen yaitu 0%, 0,25% , 0,50% , 0,75% , 1,00% . Setiap variasi serat dibuat benda uji balok sebanyak 2 buah. Adapun dimensi serat bagu yang dipergunakan adalah serat dengan diameter 0,3mm dan Panjang 20mm.



Gambar 2. Model pengujian lentur balok tinggi

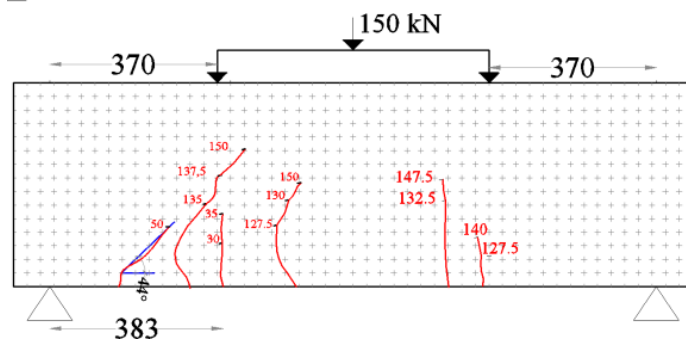
Pengujian kuat lentur balok menggunakan alat Hydraulic Jack . Pengujian ini dilakukan pada umur beton 28 hari. Kuat lentur diteliti dengan membebani balok dengan beban titik 1/2P pada jarak bentang geser (a) 370 mm dengan beban maksimum 75 kN. Aplikasi beban tekan ditingkatkan dengan kenaikan 2,5 kN sampai kondisi balok mengalami keruntuhan atau sampai batas kapasitas mesin maksimum sebesar 150 kN dicapai. Dua buah dial gauge dipasang pada kedua sisi balok di tengah bentang sejajar dengan posisi tulangan tarik. Setup pengujian kuat lentur balok dengan menggunakan benda uji balok beton serat dengan dimensi 150 x 450 x 1500 mm seperti terlihat pada Gambar 2. Pengamatan dilakukan terhadap terjadinya retak dan lendutan balok selama proses pembebanan.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pola dan Lebar Retak Balok

4.1.1. Pola Retak Balok Kontrol (B0-1 serat Bagu 0%)

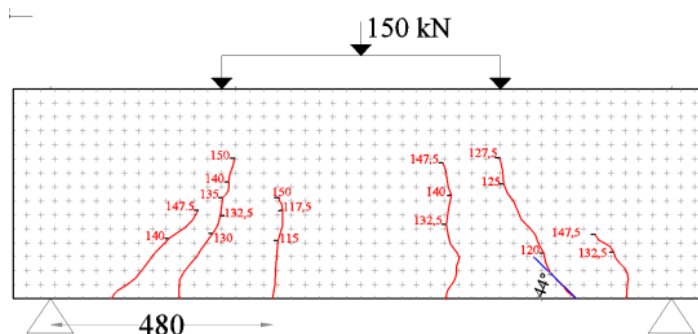
Pola retak yang terjadi pada balok kontrol (B0-1) didahului oleh retak pertama yang terjadi pada saat beban mencapai ± 30 kN atau $\pm 20\%$ dari beban maksimum pada jarak ± 383 mm (area lentur) dari tumpuan kiri berupa retak lentur seperti terlihat pada Gambar 3. Pada saat beban mencapai beban maksimum sebesar ± 150 kN, jumlah retakan pada daerah lentur bertambah yaitu berjumlah 4 buah retakan sedangkan retak miring/retak geser pertama kali terjadi pada saat beban mencapai 50 kN dengan sudut kemiringan $\pm 44^\circ$ terhadap sumbu memanjang balok. Retak geser bertambah setelah beban mencapai 135 kN dan mengalami perpanjangan retak geser sampai beban mencapai nilai maksimum. Jumlah retak geser sebanyak 2 buah retakan.



Gambar 3. Pola retak balok kontrol (serat Bagu 0%)

4.1.2. Pola Retak Balok B1-1 (serat Bagu 0.25%)

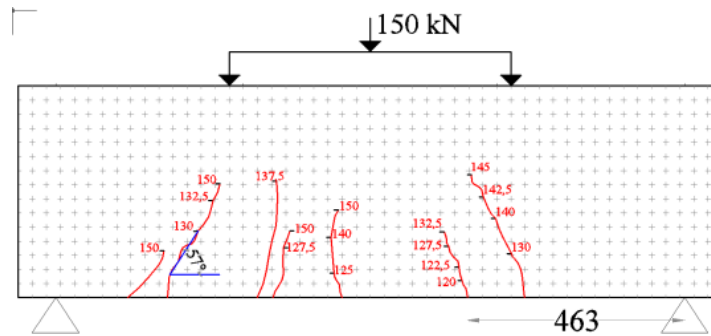
Pola retak yang terjadi pada balok B1-1 didahului oleh retak pertama yang terjadi pada saat beban mencapai ± 115 kN atau $\pm 76,7\%$ dari beban maksimumnya pada jarak ± 480 mm dari tumpuan kiri berupa retak lentur seperti terlihat pada Gambar 4. Pada saat beban mencapai beban maksimum sebesar ± 150 kN , di daerah lentur jumlah retakan bertambah yaitu berjumlah 2 buah retakan sedangkan retak miring/retak geser pertama kali terjadi pada saat beban mencapai 120 kN dengan sudut kemiringan $\pm 44^\circ$ dan bertambah lagi setelah beban mencapai 130,0 kN, 132,5 kN, dan 140 kN. Retak geser mengalami perpanjangan sampai beban mencapai nilai maksimum dengan jumlah retak geser sebanyak 4 buah retakan.



Gambar 4. Pola retak balok B1-1 (serat 0,25%)

4.1.3. Pola Retak Balok B2-1 (serat Bagu 0,50%)

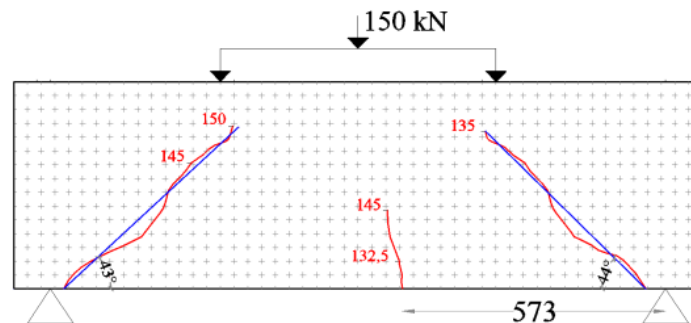
Pola retak yang terjadi pada balok B2-1 didahului oleh retak pertama yang terjadi pada saat beban mencapai ± 120 kN atau $\pm 80\%$ dari beban maksimum pada jarak ± 463 mm (area lentur) dari tumpuan kanan berupa retak lentur (Gambar 5). Pada saat beban mencapai beban maksimum sebesar ± 150 kN , pada daerah lentur jumlah retakan bertambah yaitu berjumlah 4,0 retakan sedangkan retak miring/retak geser pertama kali terjadi pada saat beban mencapai 130 kN dengan sudut kemiringan $\pm 57^\circ$ dan bertambah lagi setelah beban mencapai 150 kN dan mengalami perpanjangan retak geser sampai beban mencapai nilai maksimum dengan jumlah retak geser 3,0 retakan.



Gambar 5. Pola retak balok B2-1 (serat 0,50%)

4.1.4. Pola Retak Balok B3-1 (serat Bagu 0,75%)

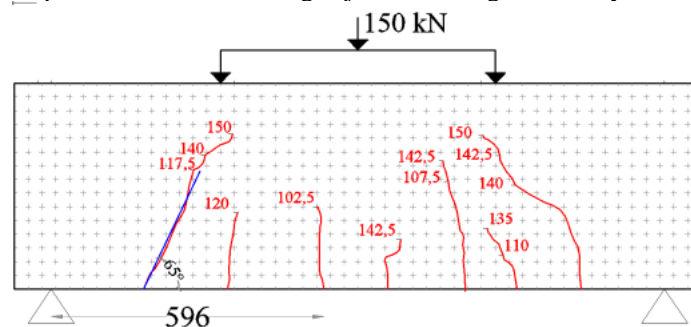
Pola retak yang terjadi pada balok B3-1 didahului oleh retak pertama yang terjadi pada saat beban mencapai $\pm 132,5$ kN atau $\pm 88,3\%$ dari beban maksimum pada jarak ± 573 mm dari tumpuan kanan (area lentur) berupa retak lentur seperti pada Gambar 6. Pada saat beban mencapai beban maksimum sebesar ± 150 kN, pada daerah lentur jumlah retakan tidak bertambah yaitu berjumlah 1 buah retakan sedangkan retak miring/retak geser pertama kali terjadi pada saat beban mencapai 135 kN dengan sudut kemiringan $\pm 44^\circ$ dan bertambah lagi setelah beban mencapai 145 kN serta mengalami perpanjangan retak geser sampai beban mencapai nilai maksimum dengan jumlah retak geser sebanyak 2 buah retakan.



Gambar 6. Pola retak balok B3-1 (serat 0,75%)

4.1.5. Pola Retak Balok B4-1 (serat Bagu 1,0%)

Pola retak yang terjadi pada balok B4-1 didahului oleh retak pertama yang terjadi pada saat beban mencapai $\pm 102,5$ kN atau $\pm 68,3\%$ dari beban maksimum pada jarak ± 596 mm di daerah tengah bentang berupa retak lentur seperti terlihat pada Gambar 7. Pada saat beban mencapai beban maksimum sebesar ± 150 kN, pada daerah lentur jumlah retakan bertambah yaitu berjumlah 4 buah retakan sedangkan retak miring/retak geser pertama kali terjadi pada saat beban mencapai 117,5 kN dengan sudut kemiringan $\pm 65^\circ$ dan bertambah lagi setelah beban mencapai 135 kN, 140 kN serta mengalami perpanjangan retak geser sampai beban mencapai nilai maksimum dengan jumlah retak geser sebanyak 3 buah retakan.



Gambar 7. Pola retak balok B4-1 (serat Bagu 1,0%)

Mengamati pola retak balok tinggi dengan berbagai variasi serat Bagu dalam kaitannya dengan persentase jumlah retak dan posisi retak maka data yang disampaikan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 7 dapat diringkas seperti pada Tabel 1 untuk melihat hubungan antara prosentase serat bagu dengan jumlah retak yang terjadi. Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa dengan penambahan serat Bagu telah terjadi perubahan jumlah retak pada pada masing-masing variasi serat. Perubahan maksimal terjadi pada persentase serat Bagu sebesar 0,75% yang mampu mengurangi retak pada daerah lentur sebesar 75 % tetapi tidak berpengaruh terhadap retak pada daerah geser. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan serat Bagu cukup signifikan untuk menaikan tahanan lentur balok terhadap momen karena serat Bagu mampu memperbaiki ikatan

antar agregat (*interlock*) sehingga mampu menghambat terjadinya retak lentur. Hal ini didukung oleh data kuat tarik beton serat 0,75% yang meningkat sebesar 6,98% menjadi 2,17 MPa. Namun, penambahan serat 0,75% tidak mempengaruhi jumlah retak geser yang terjadi. Hal menunjukkan bahwa penambahan serat Bagu 0,75% belum mampu meningkatkan kuat tarik beton dalam menahan gaya geser pada balok tinggi.

Tabel 1. Persentase Jumlah Retak Variasi Serat

Kode Balok	% Serat	Jumlah Retak			% terhadap Balok Kontrol	
		Daerah Lentur	Daerah Geser	Total	Daerah Lentur	Daerah Geser
B0-1	0.00	4	2	6	0.00	0.00
B1-1	0.25	2	4	6	-0.50	1.00
B2-1	0.50	4	3	7	0.00	0.50
B3-1	0.75	1	2	3	-0.75	0.00
B4-1	1.00	4	3	7	0.00	0.50

4.2. Beban Retak Pertama (P_{cr})

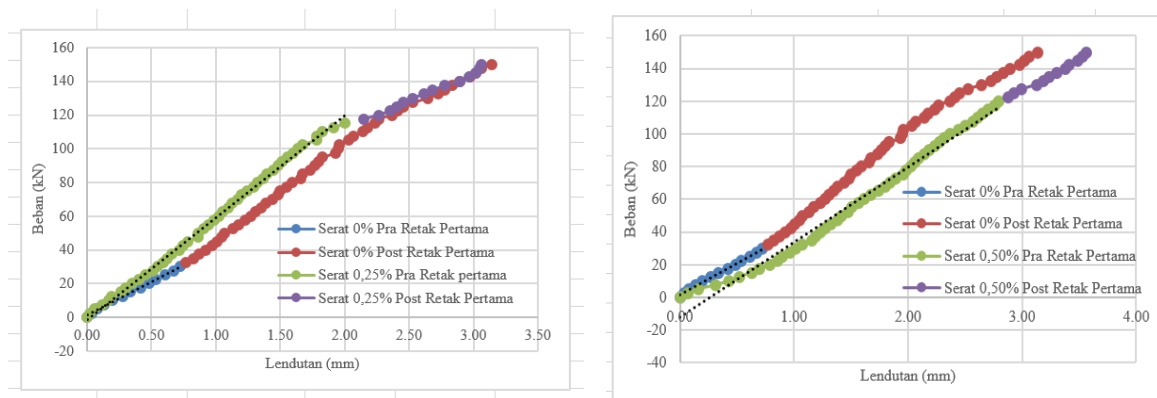
Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa akibat variasi serat Bagu pada balok tinggi telah terjadi peningkatan beban retak pertama lentur dan geser jika dibandingkan balok normal. Peningkatan beban retak lentur pertama yang paling besar terjadi pada variasi serat 0,75% yaitu sebesar 341,67% diikuti berturut-turut variasi serat 0,50%, 0,25% dan 1,0% dengan beban retak lentur pertama masing-masing sebesar 300%, 283,33% dan 241,67% terhadap benda uji control. Sedangkan pada beban retak geser pertama yang paling besar terjadi pada variasi serat 0,75% yaitu sebesar 170% diikuti berturut-turut variasi serat 0,50%, 0,25% dan 1,0% dengan beban retak geser pertama masing-masing sebesar 160%, 140% dan 135% terhadap benda uji control. Hasil pengujian ini menunjukkan penambahan serat Bagu optimum agar mampu memperlambat terjadinya retak pertama lentur dan geser adalah konsentarsi serat Bagu 0,75%.

Tabel 2. Beban Retak Pertama (P_{cr})

No	Kode Balok	Pcr Lentur (kN)	Pcr Geser (kN)	% to Lentur	% to Geser	Keterangan
1	B0-1	30.00	50.00	0.00	0.00	Balok beton tanpa serat
2	B1-1	115.00	120.00	283.33	140.00	Balok beton serat 0,25 %
3	B2-1	120.00	130.00	300.00	160.00	Balok beton serat 0,50 %
4	B3-1	132.50	135.00	341.67	170.00	Balok beton serat 0,75 %
5	B4-1	102.50	117.50	241.67	135.00	Balok beton serat 1,0 %

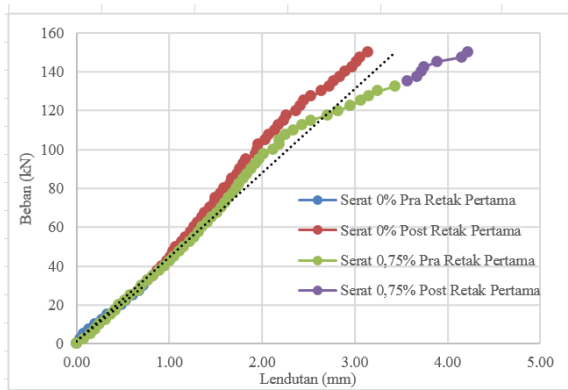
4.2. Hubungan Beban dan Lendutan

Lendutan vertikal pada tengah-tengah bentang balok dicatat pada setiap peningkatan beban 2,5 kN. Hubungan beban dan lendutan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 8.

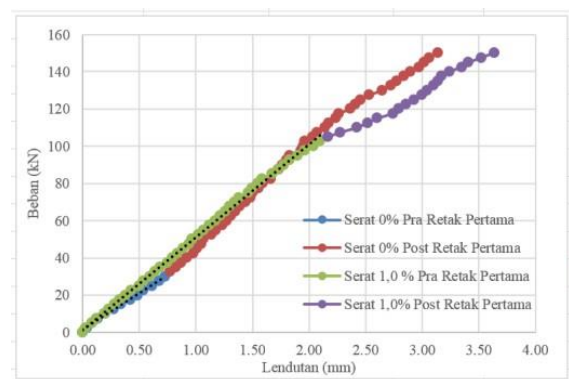


(a) Variasi Serat 0% dan 0,25%

(b) Variasi Serat 0% dan 0,50%



(c) Variasi Serat 0% dan 0,75%



(d) Variasi Serat 0% dan 1,00%

Gambar 8. Hubungan beban-lendutan pada balok beton dengan Variasi serat

Gambar 8 menunjukkan bahwa penambahan 0,25% serat Bagu menghasilkan perilaku balok semakin getas atau semakin mudah runtuh yang dapat dilihat dari kurva beban-defleksi semakin pendek. Hal ini dikarenakan retak yang terjadi adalah retak geser tanpa melalui retak lentur terlebih dahulu, sehingga retak mudah bertambah panjang dan lebar. Variasi serat Bagu 0,75% menunjukkan hubungan kurva beban-defleksi yang lebih landai yang berarti semakin daktail. Hal ini dikarenakan retak yang terjadi adalah retak geser badan yang menunjukkan bahwa telah terjadi mekanisme aksi pelengkung sebagai cadangan kapasitas pada balok yang berkontribusi dalam menahan gaya geser yang terjadi pada balok.

Berdasarkan kurva hubungan beban dan lendutan ($P-\delta$), dapat juga dihitung kekakuan dari semua benda uji. Melihat bentuk diagram $P-\delta$, maka kekakuan dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu kekakuan pada kondisi elastis (k_e) dan kekakuan pada kondisi Plastis (k_p). Tabel 4.8 menunjukkan perbandingan kekakuan dari semua variasi benda uji. Kekakuan terkecil dibandingkan dengan balok kontrol diberikan oleh balok dengan konsentrasi serat 0,75% yaitu sebesar 6,92% pada kondisi elastis atau sebelum retak pertama terjadi dan 0,26% pada kondisi plastis atau setelah retak pertama terjadi. Dengan demikian penambahan serat Bagu optimum sebesar 0,75% mampu menambah daktailitas balok beton tanpa tulangan transversal.

Tabel 3. Perbandingan Kekakuan Balok

No	Kode Balok	Kekakuan sebelum retak pertama (K_e)		Kekakuan setelah retak pertama (K_p)	
		P/δ	Persentase (%)	P/δ	Persentase (%)
		(kN/mm)		(kN/mm)	
1	B0-1	41.38	0.00	47.77	0.00
2	B1-1	57.36	38.61	48.94	0.02
3	B2-1	43.01	3.94	42.13	-0.12
4	B3-1	38.52	-6.92	35.50	-0.26
5	B4-1	48.93	18.24	41.27	-0.14

4.3. Beban Maksimum Balok & Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Teoritis

Pada Tabel 4 diuraikan beban maksimum (P_{max}) dan gaya geser maksimum (V_{max}) berdasarkan hasil pengujian yang diamati pada masing-masing benda uji balok beton bertulang. Adapun hasil data pengujian dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis untuk gaya geser maksimum (V_{max}). Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa kapasitas geser balok tinggi beton serat Bagu tanpa tulangan transversal lebih tinggi dari prediksi berdasarkan teori STM dan SNI dengan ratio terkecil terjadi pada balok dengan persentase serat Bagu 0,75 % yaitu sebesar 1,07 untuk teori STM dan 2,39 untuk teori SNI. Prediksi SNI terlalu aman dilihat dari nilai rasio V_{exp}/V_{SNI} . Hal ini mungkin disebabkan oleh rumusan prediksi yang diperhitungkan adalah untuk balok langsing sehingga kurang cocok untuk balok tinggi.

Tabel 4. Perbandingan beban maksimum hasil eksperimen dengan teoritis

No	Variasi Konsentrasi Serat Bagu	Kode Balok	f _c (MPa)	Beban Max Eksperimen (kN)	Gaya Geser Max. Teoritis (V _{max})		V _{n(exp)} /V _{n(STM)}	V _{n(exp)} /V _{n(SNI)}
					STM	SNI		
					(kN)	(kN)		
1	0,00 %	B0-1	21.68	150	132.18	61.22	1.13	2.45
2	0,25 %	B1-1	20.93	150	127.59	60.31	1.18	2.49
3	0,50 %	B2-1	20.93	150	127.59	60.31	1.18	2.49
4	0,75 %	B3-1	23.00	150	140.23	62.76	1.07	2.39
5	1,0 %	B4-1	20.18	150	122.99	59.39	1.22	2.53
					Rata-rata		1.16	2.47

5 SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang dilakukan pada penelitian ini maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan 0.75 % serat bagu dapat menurunkan persentase retak lentur sebesar 75 % dibandingkan dengan balok kontrol. Peningkatan ini juga terjadi pada kuat tarik beton serat 0,75% yang meningkat sebesar 6,98%.
2. Peningkatan beban retak lentur pertama yang paling besar terjadi pada variasi serat 0,75% yaitu sebesar 341,67%, sedangkan pada beban retak geser pertama yang paling besar terjadi pada variasi serat 0,75% yaitu sebesar 170 %.
3. Perilaku benda uji yang paling daktail diberikan oleh balok dengan konsentrasi serat 0,75% dengan persentase kekakuan terhadap balok kontrol sebesar 6,92% pada kondisi sebelum retak pertama terjadi dan 0,26% pada kondisi setelah retak pertama. Dengan demikian penambahan serat Bagu optimum sebesar 0,75% mampu menambah daktailitas balok beton tanpa tulangan transversal.
4. Prediksi kapasitas geser balok tinggi beton serat Bagu tanpa tulangan transversal dengan metode STM lebih baik dari SNI dengan nilai rata-rata rasio V_{exp}/V_{STM} atau V_{exp}/SNI masing-masing sebesar 1.16 untuk teori STM dan 2,47 untuk teori SNI.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 544. 1988. *Design Consideration For Steel Fiber Reinforced Concrete*, Report : ACI 544.4R – 88
- ACI committee 318. 2002. Building Code Require-ments for Reinforced Concrete, American Concrete Institute 318– 02, Detroit.
- Ananta, A. 2007. Pengaruh Pemakaian Serat Kawat Berkait Pada Kekuatan Beton Mutu Tinggi Berdasarkan Optimasi Diameter Serat. Universitas Diponegoro.
- Badan Standarisasi Nasional. 2013. *Persyaratan beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2013)*. Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta
- Campione, G.2012. *Flexural Behavior of Steel Fibrous Reinforced Concrete Deep Beams*. (journal of structural engineering © asce), Feb., (cited 2018 okt.18). Available from: ascelibrary.org by Udayana University on 10/18/17. Copyright ASCE.
- Campione, G.2013. *Flexural and Shear Resistance of Steel Fiber–Reinforced Lightweight Concrete Beams*. (journal of structural engineering © asce), Apr., (cited 2018 okt.18). Available from: ascelibrary.org by Udayana University on 10/18/17. Copyright ASCE.
- Ndoen, V.G., Sina D., Bunganaen, W. 2015. Pengaruh Penambahan Serat Daun Gwang (Corypha Utan Lam) Terhadap Kuat Lentur Dan Kuat Tarik Belah Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, Universitas Petra, April. Available from : <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/jurnal-teknik-sipil/article/view/19448>

- Russo, G., Venir, R. and Pauletta, M. 2005. Reinforced Concrete Deep Beams-Shear Strength Model and Design Formula. *ACI Structural Journal*, may-june.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2013. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Bertulang Untuk Bangunan Gedung. SNI 2847-2013. Jakarta: BSN
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 1991. Metode Pengujian Kuat Tarik – Beban Beton. SNI 03-2491-1991. Jakarta: BSN.
- Sudarsana, I K. 2016. Prediksi Kuat Geser Balok - Tinggi Beton Bertulang Berdasarkan Strut And Tie Model. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, Vol. 10, No. 1, Program Studi Teknik Sipil, Januari, 35-43.
- Suhardiman, M. 2011. Kajian Pengaruh Penambahan Serat Bambu Ori Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, Oktober.
- Tavio dan Lasino. 2015. Tata Cara Penentuan Proporsi Campuran Untuk Beton dengan Semen Portland Biasa, Semen Portland Pozzolan, dan Semen Portland Komposit (Berdasarkan SNI 7656;2012 dan ACI 211.1-91). CIPTA DEA PUSTAKA, Bandung.
- Tjokrodinuljo, K. 1996. Teknologi Beton. Yogyakarta
- Wati, Y. 2016. Pengaruh Variasi Kadar Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) Terhadap Karakteristik Beton Serat Bagu. Tugas akhir, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana.
- Yasa dan Wati. 2015. *Pemanfaatan serat nanas sebagai Material Penyusun Beton*. Makalah Lomba