OPTIMASI KINERJA LENTUR BALOK BETON BERTULANG UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA STRUKTUR BANGUNAN DI DAERAH RAWAN GEMPA

Oleh
Agus Santoso, Slamet Widodo, dan Nuryadin Eko Raharjo
Staf Pengajar FT UNY

Abstract

The paper summarizes the experimental result of flexural capacity of full scale reinforced concrete beam prepared as a composite members consisting of two concrete layers made of Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HFRC) and High Strength Concrete (HSC). Compressive strength and modulus of elasticity test, splitting tensile, flexural tensile tests conducted to identify the important mechanical properties of both HFRC and HSC. Every mechanical properties data collected using 3 standard samples based on ASTM and SNI codes. 15 reinforced concrete beams in 150x250x2400 mm dimensions, used for full scale flexural test of structural RC beam. The tests conducted on 5 types of composite beam: 100%, 75%, 50%, 25%, and 0% of HSC cross sectional depth, combined with HFRC for the opposite sides.

The experimental results indicated that HFRC shows higher modulus elasticity compared with HSC, it was 28618,611 MPa for HFRC, and 21790,660 MPa for HSC. All types of composite members and full depth of HFRC shows higher first crack load capacity compared with HSC structural reinforced concrete beam. The first crack load capacity increase ranging from 29,753% up to 33,267%. All types of composite members and full depth of HFRC also shows higher maximum load capacity compared with HSC structural reinforced concrete beam. The first crack load capacity increase ranging from 11,284% up to 16,03%. Based on the experimental test results, it can be suggested to apply partial depth of HSC and HFRC; 50% HSC and 50% HFRC on static determinate RC beam.

Keywords: Composite Reinforced Concrete Beam, HFRC, HSC, Full Scale Flexural Test

PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan material yang telah lama digunakan secara luas dalam dunia konstruksi. Material yang menggunakan beton dan baja tulangan ini banyak dimanfaatkan karena sebagian besar bahan-bahan penyusunnya mudah diperoleh sehingga dapat menekan biaya konstruksi yang diperlukan. Penggunaan material beton di Indonesia sangat dominan. Hal ini ditandai dengan tingkat konsumsi semen domestik yang mencapai 15,6 juta ton pada tahun 2007 dan tingkat pertumbuhan konsumsi semen diperkirakan berkisar antara 5% sampai 6% per-tahun. Beton sebagai komponen utama memiliki karakteristik yang kuat dalam menahan gaya tekan namun tidak efektif dalam menahan gaya tarik. Berdasarkan karakteristik mekanik beton di atas, maka dalam dalam analisis maupun perencanaan struktur beton bertulang, beton hanya diperhitungkan efektif menahan gaya tekan, tetapi diabaikan kekuatannya dalam menahan gaya tarik. Dalam meninjau kekuatan sisi tarik beton bertulang, beton hanya difungsikan sebagai media penghubung antara beton sebagai penahan

tegangan tekan dengan baja tulangan yang menahan tegangan pada sisi tarik. Dengan demikian, kuat lekat baja tulangan dengan beton di sekelilingnya akan memberikan pengaruh yang besar terhadap kekuatan beton bertulang.

Teknologi beton bertulang konvensional yang digunakan saat ini, menggunakan beton dengan kekuatan yang seragam, baik pada bagian yang menerima gaya tekan maupun bagian yang menerima gaya tarik. Dengan mengingat karakteristik mekanik beton dan konsep analisis kekuatan beton bertulang, maka penggunaan material beton dengan kekuatan yang seragam menjadi tidak efektif. Hal ini disebabkan karena beton yang terletak pada bagian penampang yang menerima beban tarik tidak memberikan sumbangan kekuatan lentur. Di sisi lain, bagian penampang yang menerima gaya tekan juga tidak didukung dengan kekuatan material yang optimal, sehingga dimensi penampang yang digunakan menjadi lebih besar. Selain itu, kebutuhan baja tulangan juga menjadi lebih besar, sehingga jarak antar tulangan menjadi lebih rapat, dan dapat mengakibatkan berkurangnya kuat lekat baja tulangan.

Pada bagian penampang beton bertulang yang menerima gaya tarik, beton yang digunakan idealnya merupakan beton yang mampu memberikan kuat lekat pada baja tulangan secara optimal, dan mampu menahan laju retak yang diakibatkan bekerjanya beban layan. Sedangkan pada bagian penampang yang menerima gaya tekan, sebaiknya digunakan beton dengan kekuatan tekan yang besar, sehingga dimensi struktur dapat diminimalisir. Di lain pihak, penelitian dan pengembangan dalam bidang teknologi beton terus dilakukan secara intensif. Penelitian-penelitian yang dilakukan dalam bidang material telah menghasilkan beton dengan karakteristik mekanik yang lebih menguntungkan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan daktilitas beton dengan menambahkan serat ke dalam adukan beton segar. Menurut Balendran dan kawan-kawan (2002), penambahan serat baja jenis *shortcut* mampu meningkatkan kuat tarik belah beton sampai 165%. Penambahan serat baja tersebut juga dapat meningkatkan kuat tarik lentur beton ringan sampai dengan 91%. Campione dan kawan-kawan (2005) melaporkan bahwa bahan tambah serat dapat meningkatkan kuat lekat tulangan maksimal, kuat lekat *residual* pasca beban puncak dan *slip* maksimum tulangan pada beton saat menerima beban *monotonic* maupun *cyclic*.

Untuk meningkatkan efektifitas penambahan serat dalam beton, telah dilakukan berbagai penelitian untuk mencampur atau melakukan hibridisasi serat. Hibridisasi ini

dilakukan dengan tujuan mengoptimalkan potensi masing-masing jenis serat, sesuai dengan karakteristik unik yang dimiliki. Hibridisasi dapat dilakukan dengan mencampur beberapan jenis serat dengan panjang, modulus elastisitas, ataupun kuat tarik yang berbeda. Serat yang lebih panjang diharapkan memberikan kontribusi pada perbaikan karakteristik beton sebagai penghambat retak yang berukuran besar (*macro-cracks*) dan meningkatkan keliatan atau daktilitas beton. Serat yang berukuran lebih pendek diharapkan dapat memberikan kontribusi kekuatan saat akan terjadi dan awal terjadinya retak (menghambat laju *micro-cracks*), serta memperbaiki kekuatan *pull out* fiber menjadi lebih besar. Penambahan serat yang memiliki modulus elastisitas tinggi dapat meningkatkan kekuatan tarik lentur beton secara lebih signifikan, namun kapasitas regangan yang dimiliki kecil. Sebaliknya, pemanfaatan serat dengan modulus elastisitas rendah tidak dapat meningkatkan kekuatan tarik lentur beton secara signifikan, tetapi dapat meningkatkan kapasitas regangan beton dengan signifikan. Hal ini telah dibuktikan oleh Ahmed dan kawan-kawan (2007), dengan mengkombinasikan serat baja dengan serat *polyethylene* ataupun serat *polyvinyl alcohol* untuk memperbaiki karakteristik mortar dengan bahan tambah abu terbang. Konsep hibridisasi ini juga telah dibuktikan mampu meningkatkan kekuatan tarik belah beton hingga 36,5%, meningkatkan kuat tarik lentur hingga 32,9%, dan meningkatkan *toughness index* beton hingga 199,5%, dengan menggabungkan serat baja dan serat karbon, maupun serat baja dan serat *polypropylene* (Yao dan kawan-kawan, 2003). Menurut Ozcan dan kawan-kawan (2008), kemampuan beton serat untuk menghambat terjadinya retak dapat mengurangi besaran tegangan tarik yang berkerja pada baja tulangan sehingga kapasitas *ultimate* beton dapat meningkat.

Untuk memperoleh beton bertulang dengan dimensi yang optimal, maka dalam penelitian ini diusulkan untuk memanfaatkan *Hybrid fiber Reinforced Concrete* (*HFRC*) pada bagian penampang beton bertulang yang menerima gaya tarik dan beton mutu tinggi (*High Strength Concrete/HSC*) pada daerah tekan. *HFRC* dipilih agar diperoleh beton yang mampu memberikan kuat lekat pada baja tulangan secara optimal, dan mampu menahan laju retak yang diakibatkan bekerjanya beban. Beton mutu tinggi digunakan pada bagian penampang yang menerima gaya tekan, agar kapasitas daerah tekan menjadi maksimal, sehingga dimensi balok beton menjadi optimal dan berat sendirinya dapat berkurang.

Dalam Penelitian ini akan dibuat sebuah balok komposit yang terdiri dari Beton

HFRC dengan kuat tekan direncanakan 30 MPa dan Beton mutu tinggi HSC dengan kuat tekan direncanakan 42 MPa. Komposisi tinggi balok beton terdiri dari: (1) Beton HSC 100% dari h (balok semua dari beton HSC), (2) Beton HSC 75% h dan HFRC 25% h, (3) Beton HSC 50% h dan HFRC 50% h, (4) Beton HSC 25% h dan Beton HFRC 75% h, dan (5) Beton HSC 0% h (semua balok berupa beton HFRC).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini termasuk jenis penelitian eksperimen. Pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta, sedangkan pengujian sifat mekanik dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan dan Laboratorium Struktur Universitas Gajah Mada Yogyakarta.

Bahan-bahan yang digunakan (1) Semen portland kategori type I., (2) Agregat halus alami, (3) Agregat kasar berupa batu pecah, (4) Serat *polipropylene monofilament* dengan diameter 18 μm dan panjang 12 mm, (5) Serat baja dengan diameter 0,5 mm dan panjang 50 mm, (6) Pozolan jenis *Silica fume*, dan (7) *Superplastisizer*.

Pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan FT UNY, dengan kontrol kadar air agregat secara ketat. Setelah benda uji berumur satu hari, benda uji dikeluarkan dari cetakan/bekisting untuk kemudian dilakukan perawatan selama 28 hari.

Jumlah benda uji terdiri dari: (1) 6 buah silinder beton, diameter 150 mm dan tinggi 30 mm, untuk uji kuat tekan beton. (2) 6 buah silinder beton, diameter 150 mm dan tinggi 30 mm, untuk uji kuat tarik belah beton, (3) 6 buah balok beton berukuran 150x150x750 mm, untuk uji kuat lentur beton, (4) 15 buah balok beton bertulang dengan ukuran 150x250x2400 mm, untuk pengujian perilaku lentur balok beton bertulang, (5) 3 batang baja tulangan untuk uji kuat tarik.

Untuk mengidentifikasi sifat mekanik HSC dan HFRC dilakukan pengujian karakterisitik mekanik beton yang meliputi:
(1) Kuat Tekan Beton. Kuat tekan beton dihitung berdasarkan besarnya beban persatuan luas, menurut persamaan 1.

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{P}{A} \; N/mm^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

di mana;

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm^2)

(2) Kuat tarik belah, metode yang digunakan adalah metode uji tarik belah yang mengacu pada ASTM C496-90, besaran kuat tarik belah benda uji dihitung dengan Persamaan 2.

$$\text{Kuat tarik} = \frac{2.P}{\pi.l.d} \; MPa \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

di mana;

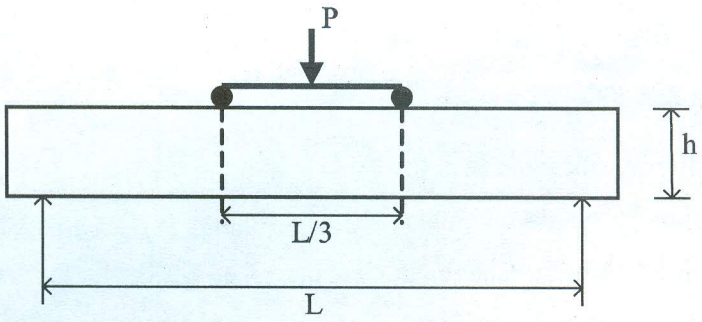
P = beban maksimum (kN)

l = panjang benda uji (mm)

d = diameter benda uji (mm)

Benda uji yang digunakan berupa silinder dengan diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm.

(3) Pengujian Kuat Lentur Beton, cara pengujian yang digunakan adalah metode dua titik pembebanan yang mengacu pada standar SNI 03-4431-1997, Benda uji yang digunakan berupa balok berukuran 150 mm x 150 mm x 750 mm, besaran tegangan tarik (*modulus of rupture*) yang terjadi pada benda uji dihitung dengan Persamaan 3.



Gambar 1. Metode Pengujian Kuat Lentur Metode

$$R = \frac{P.L}{b.h^2}\ MPa \quad \text{.....} \quad (3)$$

di mana;

R = modulus rupture

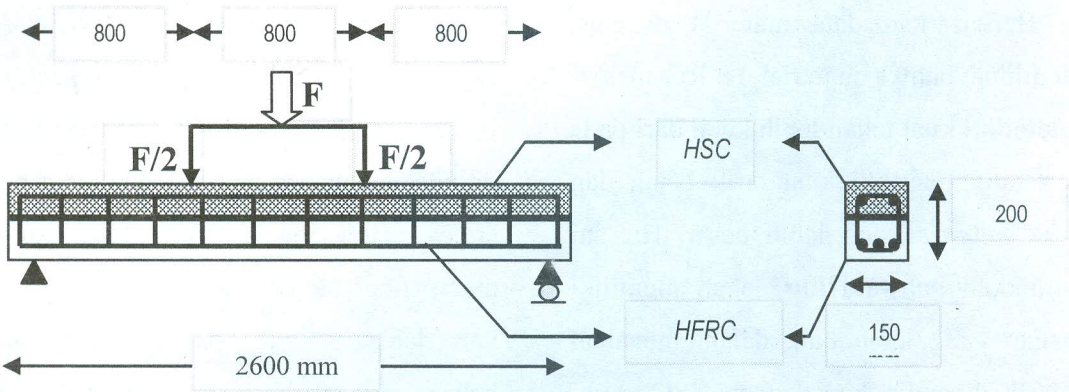
P = beban maksimum (kN)

L = panjang benda uji (mm)

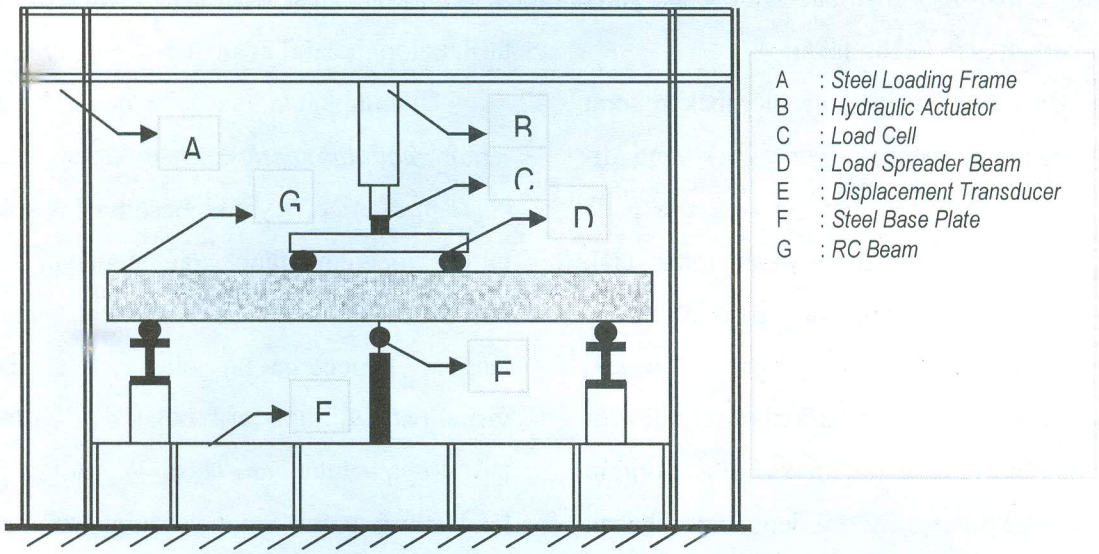
b = lebar penampang benda uji (mm)

h = tinggi penampang benda uji (mm)

Setelah karakteristik mekanik HSC dan HFRC dapat diketahui, selanjutnya dilakukan uji perilaku lentur balok beton bertulang. Pengujian perilaku lentur balok beton bertulang dilakukan setelah benda uji berumur lebih dari 28 hari. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kapasitas lentur *utimate* dan pola grafik hubungan beban-perpindahan untuk mengevaluasi daktilitas dan *residual strength* pasca fase leleh. Adapun setting pengujian dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 2. Skema Pengujian *Four*



Gambar 3. *Setting* Alat dalam Pengujian *Four Points Loading*

Setelah semua rangkaian eksperimen dilaksanakan, data yang diperoleh disajikan dalam bentuk tabel, dan selanjutnya dianalisis dengan metode statistik deskriptif kuantitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ringkasan hasil pengujian sifat mekanik beton dapat dilihat dalam tabel 1

Tabel 1. Ringkasan Hasil Pengujian Sifat Mekanik Beton

Material	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik Belah (MPa)	*Modulus rupture* (MPa)
Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HFRC)	37,179	4,152	4,61
High Strength Concrete (HSC)	44,916	3,303	3,84

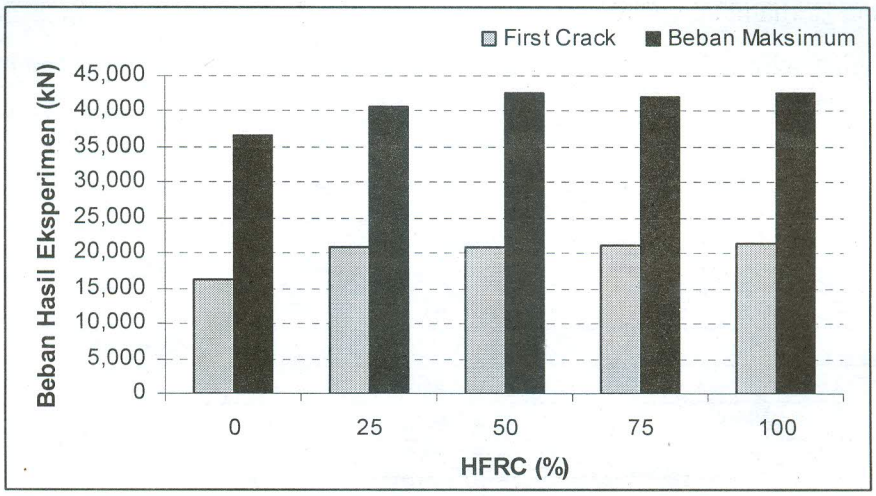
Berdasarkan data material di atas, dapat dilihat bahwa material HFRC meskipun memiliki kuat tekan lebih kecil dari pada HSC, tetapi memiliki kuat tarik belah dan *modulus rupture* yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa HFRC akan memiliki ketahanan yang lebih baik dalam menahan gaya tarik dibandingkan dengan HSC. Apabila digunakan pada sisi tarik balok, maka HFRC dapat menghambat laju retak yang dikaibatkan oleh beban layan.

Serat *polypropylene* merupakan serat jenis potongan pendek (*short-cut*) yang difungsikan untuk menahan *microcracks* pada beton. *Microcracks* merupakan retak-retak berukuran sangat kecil yang pasti akan terbentuk dalam proses pengeringan beton. Hal ini dapat dipahami bahwa ketika terjadi proses pengerasan beton maka akan timbul panas hidrasi yang disertai dengan perubahan volume beton yang menyusut selama masa pengeringan. Pada saat inilah terjadi *microcracks* yang dapat diatasi dengan serat mikro berjenis *short-cut*, yang dalam penelitian ini digunakan serat polypropylene. Serat bendrat (*steel fiber*) merupakan salah satu jenis macro-fiber berjenis *long-cut*, yang diharapkan dapat menghambat laju retak ketika beban kerja mulai ditanggung oleh elemen struktur. Keberadaan steel fiber akan memberikan kontribusi dalam meningkatkan kuat tarik beton melalui adanya *bridging effect*.

Peningkatan kuat tarik belah dan kuat lentur/ *modulus rupture* terjadi karena adanya "*bridging effect*" yaitu berfungsinya serat untuk "menjembatani" atau menahan kedua muka retakan sehingga laju retak bias dihambat. Fenomena ini jelas terlihat secara visual pada uji kuat tarik belah dan uji lentur balok tanpa tulangan. Hasil Pengujian perilaku lentur balok beton bertulang dapat disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 2. Hasil Uji Pembebanan Lentur Balok Beton Bertulang

Persentase Penampang Beton Berserat/ HFRC (%)	Beban *First crack* (kN)	Beban Maks. Eksperimen (kN)
0	16,133	36,667
25	20,933	40,730
50	20,800	42,467
75	21,167	41,900
100	21,500	42,433



Gambar 4. Hasil Uji Pembebanan Lentur Balok Beton Bertulang

Tabel 3. Perbedaan Beban *First crack* pada Uji Pembebanan Lentur Balok Beton Bertulang

Persentase Penampang Beton Berserat/ HFRC (%)	Beban *First crack* (kN)	Peningkatan dibanding HFRC 0%
0	16,133	0.000
25	20,933	29.753
50	20,800	28.928
75	21,167	31.203
100	21,500	33.267

Berdasarkan tabel di atas dapat diamati bahwa besaran beban yang menimbulkan retak pertama pada balok beton bertulang tanpa serat hanya sebesar 16,13 kN sedangkan untuk balok beton bertulang yang menggunakan serat terlihat meningkat masing-masing 20,93 kN pada varian HFRC 25%; 20,83 kN untuk varian HFRC 50%; 21,167 kN pada varian HFRC 75%; dan 21,5 kN pada HFRC 100%.

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan serat pada sisi tarik dapat meningkatkan ketahanan balok beton bertulang dalam menerima beban layan. Secara jelas dapat diamati bahwa, meskipun HSC memiliki kuat tekan yang lebih besar dari HFRC namun besaran beban yang menimbulkan *first crack* jauh lebih kecil dari balok beton bertulang yang menggunakan material HFRC penuh maupun parsial. Peningkatan kapasitas beban *first crack* yang terjadi berkisar antara 29,75% sampai 33,27%.

Peningkatan ini dapat terjadi dimungkinkan karena HFRC memiliki ketahanan yang lebih baik dalam menahan gaya tarik, yang dibuktikan dengan nilai kuat tarik belah dan *modulus rupture* yang lebih besar dibandingkan HSC. Fenomena ini

mengakibatkan terhambatnya pembentukan retak pada bagian selimut beton di sisi tarik.

Perbedaan beban maksimum pada uji pembebanan lentur balok dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel. 4. Perbedaan Beban Maksimum pada Uji Pembebanan Lentur Balok Beton Bertulang

Persentase Penampang Beton Berserat/ HFRC (%)	Beban Maks. Eksperimen (kN)	Peningkatan dibanding HFRC 0%
0	36,667	0.000
25	40,730	11.284
50	42,467	16.030
75	41,900	14.298
100	42,433	15.937

Berdasarkan tabel di atas dapat diamati bahwa besaran beban maksimal yang dapat ditahan pada balok beton bertulang tanpa serat hanya sebesar 36,67 kN sedangkan untuk balok beton bertulang yang menggunakan serat terlihat meningkat masing-masing 40,73 kN pada varian HFRC 25%; 42,47 untuk varian HFRC 50%; 41,90 kN pada varian HFRC 75%; dan 42,43 kN pada HFRC 100%.

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan serat pada sisi tarik dapat meningkatkan ketahanan balok beton bertulang dalam menerima beban layan. Secara jelas dapat diamati pula bahwa, meskipun HSC memiliki kuat tekan yang lebih besar dari HFRC namun besaran beban maksimal yang dapat ditanggung nilainya lebih kecil dari balok beton bertulang yang menggunakan material HFRC penuh maupun parsial. Peningkatan kapasitas beban maksimal yang terjadi berkisar antara 11,28% sampai 15,94%.

Peningkatan ini dapat terjadi dimungkinkan karena HFRC memiliki ketahanan yang lebih baik dalam menahan gaya tarik, yang dibuktikan dengan nilai kuat tarik belah dan *modulus rupture* yang lebih besar dibandingkan HSC. Fenomena ini mengakibatkan terhambatnya pembentukan retak pada bagian selimut beton di sisi tarik. Selain itu karena beton masih efektif menahan tarik, maka besaran gaya tarik yang ditanggung baja tulangan juga menjadi lebih kecil, dengan demikian kapasitas balok beton bertulang dalam menahan momen lentur menjadi lebih besar.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Modulus elastisitas beton HFRC lebih besar dari beton HSC, yaitu modulus elastisitas HFRC sebesar 28618,611 MPa dan HSC sebesar 21790,660 MPa.

Berdasarkan nilai modulus elastisitas ini secara kuat dapat diindikasikan bahwa jika terjadi deformasi dengan besaran yang sama, maka HFRC akan mampu menanggung beban kerja yang lebih besar atau dapat dikatakan semakin besar modulus elastisitas maka semakin besar gaya yang dapat diterima.

2. Pengaruh penggunaan serat campuran dapat meningkatkan beban *first crack* pada balok beton komposit sebesar 29,753% sampai dengan 33,267%. Peningkatan yang paling besar pada komposisi HFRC 100%.
3. Pengaruh penggunaan serat campuran dapat meningkatkan beban maksimum-nya artinya dapat meningkatkan balok beton bertulang dalam menerima beban layan. Peningkatan beban maksimum sebesar 11,284% sampai 16,030%. Peningkatan yang paling besar terjadi pada komposisi HFRC 50% dan HSC 50%.
4. Komposisi yang paling optimum untuk balok beton bertulang komposit adalah 50% HFRC dan HSC 50%.

DAFTAR PUSTAKA

American Concrete Institute (2006), *Manual of Concrete Practice*, Michigan: ACI.

Ahmed, S.F.U., Maalej, M., and Paramasivam, P., (2007), "Flexural Responses of Hybrid Steel–Polyethylene Fiber Reinforced Cement Composites Containing High Volume Fly Ash", *Construction and Building Materials 21*, pp. 1088–1097.

Balendran, R.V., Zhou, F.P., and Leung, A.Y.T., (2002), "Infuence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Strength Concrete" *Building and Environment 37*, pp. 1361–1367.

Campione, G., Cucchiara, C., La Mendola, L., and Papia, M., (2005), "Steel–Concrete Bond in Lightweight Fiber Reinforced Concrete under Monotonic and Cyclic Actions", *Engineering Structures 27*, pp. 881–890.

Özcan, D.M., Bayraktar, A., Sahin. A., Haktanir, T., and Türker, T., (2008), "Experimental and Finite Element Analysis on the Steel Fiber-Reinforced Concrete (SFRC) Beams Ultimate Behavior", *Construction and Building Materials 23*, pp. 1064–1077.

Yao, W., Li, J., and Wu, K., (2003), "Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction", *Cement and Concrete Research 33*, pp. 27–30.