

RINGKASAN PENELITIAN
STRATEGIS NASIONAL TAHUN ANGGARAN 2009

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



OLEH :
AGUS SANTOSO, M.PD
NURYADIN EKO RAHARJO, M.PD
SLAMET WIDODO, ST, MT

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
TAHUN 2009

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

Oleh :

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

Email: agus_santosa@uny.ac.id, nuryadin_er@uny.ac.id dan
swidodo@uny.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mencari sifat mekanik serta mendapatkan formula yang paling optimum balok komposit beton yang terdiri dari *hybrid fiber reinforced concrete* (HFRC) dan *high strength concrete/HSC*.

Jumlah benda uji terdiri dari : (1) 6 silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 30 mm, untuk pengujian kuat tekan beton. (2) 6 silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 30 mm, untuk pengujian kuat tarik belah beton. (3) 6 balok beton dengan ukuran 150x150x750 mm, untuk pengujian kuat lentur beton. (4) 15 balok beton bertulang dengan ukuran 150x250x2400 mm, untuk pengujian perilaku lentur balok beton bertulang. (4) 3 buah tulangan untuk diuji tegangan lelehnya. Analisis data yang digunakan adalah statistik deskriptif kuantitatif.

Hasil penelitian yang diperoleh antara lain (1) Modulus elastisitas berpengaruh terhadap beban yang diterima dari balok beton. Modulus elastisitas beton HFRC lebih besar dari beton HSC, yaitu modulus elastisitas HFRC sebesar 28618,611 MPa dan HSC sebesar 21790,660 MPa. (2) 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) Penggunaan serat campuran dapat meningkatkan beban maksimumnya 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 %, dan (5) Komposisi yang paling optimum balok beton adalah 50 % HFRC dan HSC 50 %. Dipilihnya 50 % dengan pertimbangan beban yang diperoleh maksimum, berat jenis beton akan lebih kecil, beton menjadi ringan dan dapat menghemat biaya.

Kata Kunci : *Optimasi lentur balok, struktur tahan gempa.*

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 (Majalah Bisnis Swa, November 2007). 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 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 tawar. 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 dan 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 beberapa 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 (*macrocracks*) dan meningkatkan ketahanan atau daktilitas beton. Serat yang berukuran lebih pendek diharapkan dapat memberikan kontribusi kekuatan saat akan terjadi dan awal terjadinya retak (menghambat laju *microcracks*), 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 dan berat sendiri yang minimal, 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 layan. 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.

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 balok beton terdiri dari : (1) tinggi balok (h) terdiri dari Beton HSC 100 % dari h (balok semua dari beton HSC),(2) Beton HSC tinggi balok 75 % h dan HFRC 25 % h, (3) Beton HSC tinggi balok 50 % h dan HFRC 50 % h, (4) Beton HSC tinggi balok 25 % h dan Beton HFRC 75% h, dan (5) Beton HSC tinggi balok 0 % h atau dapat dikatakan semua balok berupa beton HFRC.

METODOLOGI 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 (6) Superplastisizer.

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

Sifat mekanik yang diuji antara lain : **(1) Kuat Tekan Beton.** Kuat tekan beton dihitung berdasarkan besarnya beban persatuan luas, menurut persamaan 3

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{P}{A} \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (3)$$

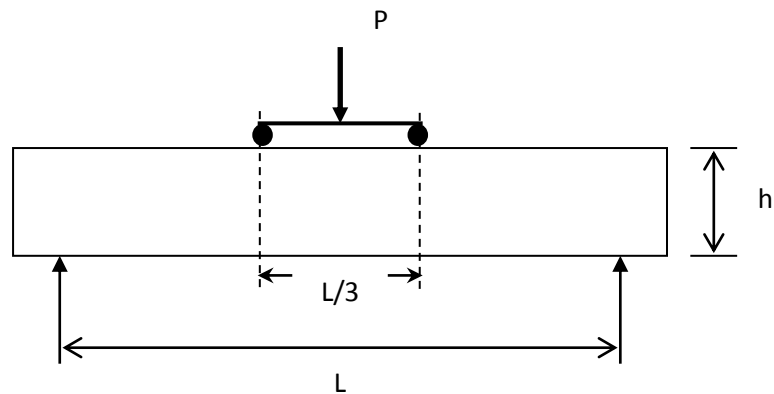
di mana ; P = beban maksimum (N)
 A = luas penampang benda uji (mm²)

(2) Kuat tarik belah, metode yang diguinaikan adalah metode uji tarik belah yang mengacu pada ASTM C496-90, besaran kuat tarik belah benda uji dihitung dengan Persamaan 4

$$\text{Kuat tarik} = \frac{2.P}{\pi.l.d} \text{ MPa} \dots\dots\dots (4)$$

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, besaran tegangan tarik (*modulus of rupture*) yang terjadi pada benda uji dihitung dengan Persamaan 5.

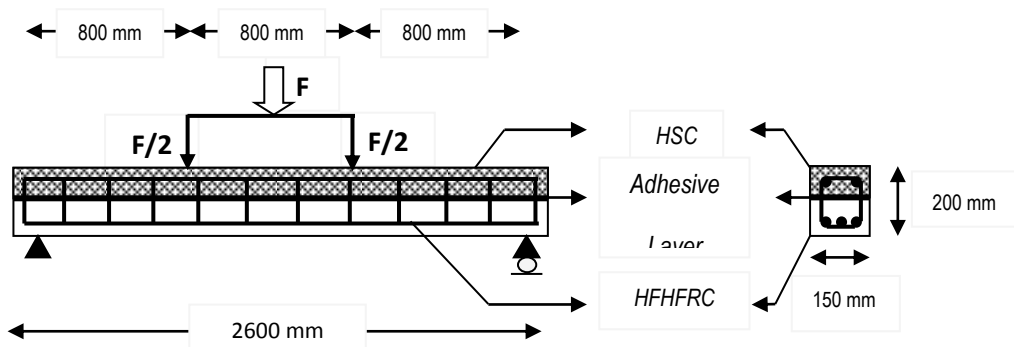


Gambar 1. Metode Pengujian Kuat Lentur Metode *Four Points Loading*

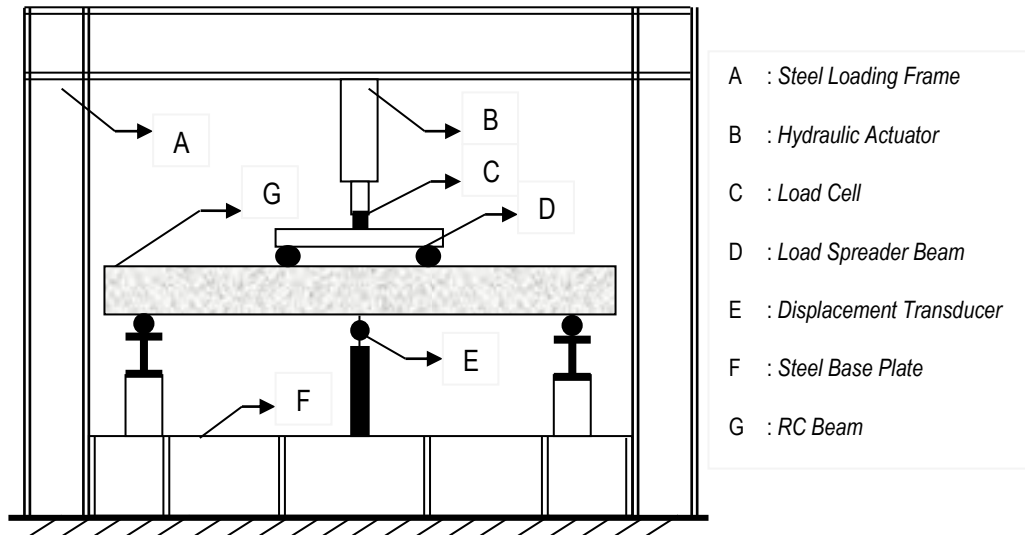
$$R = \frac{P.L}{b.h^2} \text{ MPa} \dots\dots\dots (5)$$

- 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)

Benda uji yang digunakan berupa balok dengan ukuran 150 mm x 150 mm x 750 mm, **(4) Pengujian 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 *ultimate* dan pola grafik hubungan beban-perpindahan untuk mengevaluasi daktilitas dan *residual strength* pasca fase leleh. Adapun setting pengujian dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 1. Skema Pengujian *Four Points Loading*



Gambar 2. *Setting Alat* dalam Pengujian *Four Points Loading*

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

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Ringkasan hasil pengujian sifat mekanik beton dapat dilihat dalam tabel 1

Tabel 1. Ringkasan Hasil Pengujian

Material	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Modulus Rupture Eksperimen (MPa)	Modulus Rupture Hitung ($0,63 \cdot f_c^{0,5}$ MPa)
Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HFRC)	37,179	4,152	4,61	3,841
High Strength Concrete (HSC)	44,916	3,303	3,84	4,222

Berdasarkan data material di atas, dapat dilihat bahwa material HFRC meskipun memiliki kuat tekan lebih kecil daripada 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.

Apabila dilakukan analisis *modulus rupture* menurut persamaan empirik yang disepakati oleh American Concrete Institute (ACI), terlihat bahwa modulus rupture hasil eksperimen untuk HSC lebih kecil dari modulus rupture beton normal, sedangkan modulus rupture hasil eksperimen untuk HFRC lebih besar dari *modulus rupture* beton normal. Kondisi ini memperkuat asumsi analisis bahwa *hybrid fiber* dapat meningkatkan ketahanan beton dalam menahan gaya tarik, sehingga diharapkan beban maksimum yang dapat ditanggung oleh balok beton bertulang akan meningkat.

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 Berserat (%)	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

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

Persentase Penampang Berserat Beton HFRC(%)	Beban First Crack (kN)	Perbedaan dengan Balok Beton Bertulang tanpa serat (%)
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 2.

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

Persentase Penampang Berserat Beton HFRC (%)	Beban Maks. Eksperimen (kN)	Perbedaan dengan Balok Beton Bertulang tanpa serat (%)
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 dan Grafik 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 maksima 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.

Perbedaan hasil uji pembeban maksimum hasil eksperimen dan pembebanan maksimum berdasarkan hasil hitungan dapat dilihat dalam tabel berikut ini.

Tabel. 5. Perbedaan Hasil Uji Pembebanan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Analisis Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulangan Tunggal (SNI 032847 2002)

Persentase Penampang Berserat Beton HFRC (%)	Beban Maks. Eksperimen (KN)	Beban Maks. Hitung (KN)	Beban Eksperimen./Hitung
0	36,667	35,587	1,028
25	40,730	35,587	1,145
50	42,467	35,587	1,193
75	41,900	35,587	1,176
100	42,433	35,318	1,202

Berdasarkan Tabel, dapat diamati bahwa beban hasil eksperimen dan hasil analisis dengan metode *ultimate strength design* (USD) untuk kasus HFRC 0% dapat dikatakan tepat, karena hanya ada perbedaan 2,8%. Untuk kasus balok beton bertulang dengan serat parsial maupun penuh, dapat dilihat adanya perbedaan di mana, nilai beban hasil eksperimen jauh di atas hasil hitungan. Penyimpangan tersebut berkisar antara 14,5 % sampai dengan 20,2%.

Hal ini dimungkinkan karena pada analisis USD, kontribusi kekuatan tarik beton sama sekali diabaikan, sedangkan pada kasus balok beton bertulang berserat parsial ataupun penuh diduga terdapat kontribusi kuat tarik beton yang signifikan.

A. Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Modulus elastisitas berpengaruh terhadap beban yang diterima dari balok beton. Modulus elastisitas beton HFRC lebih besar dari beton HSC, yaitu modulus elastisitas HFRC sebesar 28618,611 MPa dan HSC sebesar 21790,660 MPa. 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 maksimumnya 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. Komparasi hasil eksperimen dengan perhitungan kapasitas lentur balok beton bertulang tunggal berdasarkan SNI 03-2847 2002 tidak jauh berbeda yaitu perbedaan berkisar antara 14,5 % sampai dengan 20,2 %. Hal ini dimungkinkan karena hasil analisis USD kekuatan tarik beton diabaikan, dan dalam kenyataannya kuat tarik beton memberikan kontribusi pada kapasitas lentur.
5. Komposisi yang paling optimum balok beton adalah 50 % HFRC dan HSC 50 %. Dipilihnya 50 % dengan pertimbangan beban yang diperoleh maksimum, berat jenis beton akan lebih kecil, beton menjadi ringan (dapat dilihat dari perbandingan berat beton HFRC dan HSC) dan dapat menghemat biaya.

DAFTAR PUSTAKA

- Alves, M.F., Cremonini, R.A., Dal Molin, D.C.C., (2006), "A Comparison of Mix Proportioning Methods for High-Strength Concrete", *Cement & Concrete Composites* 26, pp. 613–621.
- 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.
- Altun, F., Haktanir, T., and Ari, K., (2007), "Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams", *Construction and Building Materials* 21, pp. 654–661.

- Balendran, R.V., Zhou, F.P., and Leung, A.Y.T., (2002), “Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Strength Concrete” *Building and Environment* 37, pp. 1361–1367.
- Banthia, N., and Nandakumar, N., (2003), “Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites”, *Cement & Concrete Composites* 25, pp. 3–9.
- 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.
- Campione, G., and Mangiavillano, M.L., (2008), “Fibrous Reinforced Concrete Beams in Flexure: Experimental Investigation, Analytical Modelling and Design Considerations”, *Engineering Structures* (article in press available on <http://sciencedirect.com>).
- Carneiro, J.O., Jalali, S., Teixeira, V., and Tomas, M., (2005), “The Effect of Concrete Strength and Reinforcement on Toughness of Reinforced Concrete Beams, *Construction and Building Materials* 19, pp. 493–499.
- Chan, Y.W., Chen, Y.G., and Liu, Y.S., (2003), Effect of Consolidation on Bond of Reinforcement in Concrete of Different Workabilities, *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 4, July-August, pp. 294-301.
- Chen, B., and Liu, J., (2005), “Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of the High-Strength Lightweight Concrete Having Good Workability, *Cement and Concrete Research* 35, pp. 913–917.
- Dancygier, A.N., and Savir, Z., (2006), “Flexural Behavior of HSFRC with Low Reinforcement Ratios, *Engineering Structures* 28, pp. 1503–1512.
- Dehn, F., Holschemacher, K. and Weiße, D., (2000), “Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour”, *LACER No.5.*, pp. 115-124.
- Feldman, L.R., and Bartlett, M.F., (2008), “Bond in Flexural Members with Plain Steel Reinforcement” *ACI Structural Journal*, Vol 105, No. 5, September-October, pp. 552-560.
- Gao, J., Sun, W., and Morino, K., (1997), “Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced High Strength Lightweight Concrete”, *Cement and Concrete Composite* 19, pp. 307-313.

- Gravina, R.J., and Smith, S.T., (2008), “Flexural Behaviour of Indeterminate Concrete Beams Reinforced with FRP Bars, *Engineering Structures* 30, pp. 2370–2380.
- Habel, K., Denarie, E., and Bruhwiler, E., (2007), “Experimental Investigation of Composite Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete and Conventional Concrete Members”, *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 1., January-February, pp. 93-101.
- Ho, D.W.S., Sheinn, A.M.M., and Tam, C.T., (2001), “The Sandwich Concept of Construction with SCC”, *Cement and Concrete Research* 31, pp. 1377–1381.
- Hsie, M., Tua, C., and Song, P.S., (2008), “Mechanical Properties of Polypropylene Hybrid Fiber-Reinforced Concrete”, *Materials Science and Engineering A* 494, pp. 153–157.
- Iskhakov, I., and Ribakov, Y., (2007), “A Design Method for Two-Layer Beams Consisting of Normal and Fibered High Strength Concrete, *Materials and Design* 28, pp. 1672–1677.
- Julio, E.N.B.S., Branco, F.A.B., Silva, V.D., and Lourenco, J.F., (2006), “Influence of Added Concrete Compressive Strength on Adhesion to An Existing Concrete Substrate”, *Building and Environment* 41, pp. 1934–1939.
- Kayali ,O., Haque, M.N., and Zhu, B., (2003), “Some Characteristics of High Strength Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete, *Cement & Concrete Composites* 25, pp. 207–213.
- Lapko, A., Buraczewska, B.S., and Tomaszewicz, A., (2005), “Experimental and Numerical Analysis of Flexural Composite Beams with Partial Use of High Strength/High Performance Concrete”, *Journal of Civil Engineering and Management Vol. XI No. 2*, pp. 115-120.
- Lee, J.Y., Kim, T.Y., Kim, T.J., Yi, C.K., Park, J.S., You, Y.C., and Park, Y.H., (2008), “Interfacial Bond Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in High-Strength Concrete”, *Composites: Part B* 39, pp. 258–270.
- Manfredi, G., and Pecce, A., (1998), “A Refined R.C. Beam Element Including Bond-Slip Relationship for the Analysis of Continuous Beams” *Computers and Structures* 69, pp. 53-62.

- Mertol, H.C., Rizkalla, S., Zia, P., and Mirmiran, A., (2008), “Characteristics of Compressive Stress Distribution in High-Strength Concrete” *ACI Structural Journal*, Vol. 5, No. 5, September-October, pp. 626-633.
- Mo, Y.L., and Lai, H.C., (1995), “Effect of Casting on Ductilities of Reinforced Concrete Beams”, *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 4, July-August, pp. 419-424.
- Oliveira, R.S., Ramalho, M.A., and Correa, M.R.S., (2008), “A Layered Finite Element for Reinforced Concrete Beams with Bond–Slip Effects”, *Cement & Concrete Composites* 30, pp. 245–252.
- 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.
- Rashid, M.A., and Mansur, M.A., (2005) “Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure”, *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 3, May-June, pp. 462-471.
- Sato, R., Maruyama, I., Sogabe, T., and Sogo, M., (2007), “Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 5, No.1, pp. 43-61.’
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S. and Matsuhisa, M., (2000), “Effects of Chemical Structures on the Properties of Polycarboxylate-Type Superplasticizer”, *Cement and Concrete Research* 30, pp. 197-207.
- 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.