

# BETON KHUSUS

## (SPECIAL CONCRETE)

### 1. Beton

Beton merupakan campuran antara bahan agregat halus dan kasar dengan pasta semen (kadang-kadang juga ditambahkan *admixtures*), campuran tersebut apabila dituangkan ke dalam cetakan kemudian dibiarkan akan menjadi keras seperti batuan. Proses pengerasan terjadi karena adanya reaksi kimiawi antara air dengan semen yang terus berlangsung dari waktu ke waktu, hal ini menyebabkan kekerasan beton terus bertambah sejalan dengan waktu. Beton dapat juga dipandang sebagai batuan buatan di mana adanya rongga pada partikel yang besar (agregat kasar) diisi oleh agregat halus dan rongga yang ada di antara agregat halus akan diisi oleh pasta (campuran air dengan semen) yang juga berfungsi sebagai bahan perekat sehingga semua bahan penyusun dapat menyatu menjadi massa yang padat.

Bahan penyusun beton meliputi air, semen portland, agregat kasar dan halus, serta bahan tambah (jika diperlukan), di mana setiap bahan penyusun mempunyai fungsi dan pengaruh yang berbeda-beda. Sifat yang penting pada beton adalah kuat tekan, bila kuat tekan tinggi maka sifat-sifat yang lain pada umumnya juga baik. Faktor-faktor penting yang dapat mempengaruhi kualitas beton adalah kualitas bahan penyusun, faktor air-semen, gradasi agregat, cara pengerjaan (pencampuran, pengangkutan, pemadatan dan perawatan) serta umur beton.

### 2. Beton Ringan

Beton ringan telah dikembangkan dan digunakan secara luas dengan tujuan mengurangi beban mati pada struktur beton. Beton ringan diharapkan dapat mengurangi berat sendiri struktur, jika digunakan beton normal yang merupakan bahan yang cukup berat maka berat sendiri struktur mencapai  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Menurut SNI 2847:2013, beton dapat digolongkan sebagai beton ringan jika beratnya kurang dari  $1840 \text{ kg/m}^3$ . Pada dasarnya beton ringan dapat diperoleh dengan cara-cara berikut :

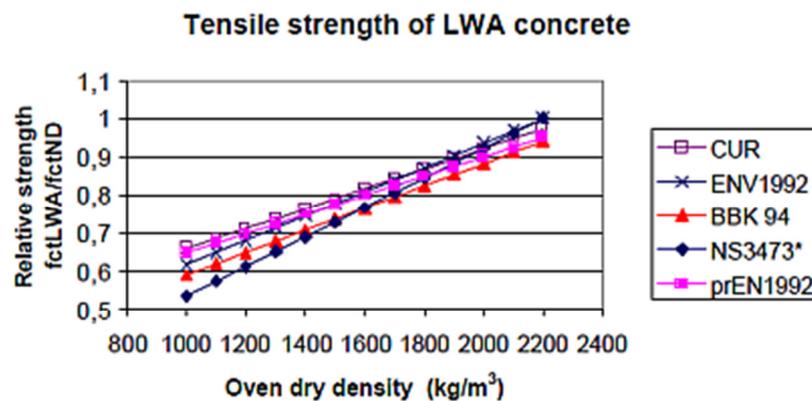
- 1) Membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen, sehingga akan terjadi banyak pori-pori udara di dalam betonnya.
- 2) Menggunakan agregat dengan berat jenis yang ringan, misalnya tanah liat bakar, batu apung dan butiran polystyrene.

- 3) Pembuatan beton dengan menghilangkan fraksi agregat halus, beton jenis ini dikenal sebagai beton tanpa pasir (*no-fines concrete*) yang hanya dibuat dari semen, agregat kasar (dengan ukuran butir maksimum 20 mm atau 10 mm) dan air. Beton jenis ini akan memiliki ukuran pori yang relatif sama, sedangkan agregat yang sering dipakai adalah kerikil alami (batu apung), terak tanur tinggi dan tanah liat bakar.

Menurut kegunaannya beton ringan dapat diklasifikasikan menjadi 3 golongan, yaitu :

- 1) Beton ringan struktural dengan kuat tekan karakteristik minimal 17 MPa dengan berat isi antara 1350 sampai dengan 1900 kg/m<sup>3</sup>.
- 2) Beton ringan kekuatan sedang dan juga tingkat insulasi panas sedang, pada umumnya memiliki kuat tekan 7 MPa sampai 17 MPa.
- 3) Beton ringan sebagai insulator thermal yang pada umumnya memiliki berat isi antara 300 sampai dengan 800 kg/m<sup>3</sup> (Neville, 1996).

Menurut EuroLightCon (2000), berbagai standar perencanaan di Eropa menyebutkan bahwa beton ringan memiliki kuat tarik lebih rendah dibandingkan dengan beton normal. Standar perencanaan beton CUR (Belanda), ENV dan prEN (*European Committee for Standardization*), BBK (Swedia) dan NS (Norwegia) telah memberikan faktor reduksi kuat tarik beton ringan berdasarkan berat jenisnya seperti ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



**Gambar 1** Faktor Reduksi Kuat Tarik Beton Ringan Menurut Berbagai Standar Perencanaan Beton (EuroLightCon, 2000)

Pernyataan serupa juga disampaikan oleh Nawy (2008), bahwa kuat tarik beton ringan pada umumnya lebih kecil bila dibandingkan dengan beton normal. Hal ini sejalan dengan ketentuan yang terdapat dalam SNI 2847:2013, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan 1 dan Persamaan 2.

$$f_{sp} = 0,56 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$f_{ft} = 0,62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

di mana:

$f_{ft}$  : kuat tarik lentur beton

$f_{sp}$  : kuat tarik belah beton

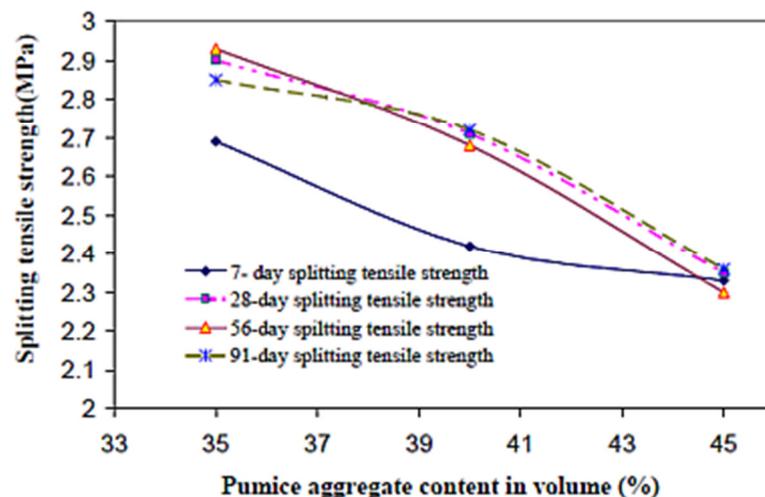
$f'_c$  : kuat tekan karakteristik beton

dengan:

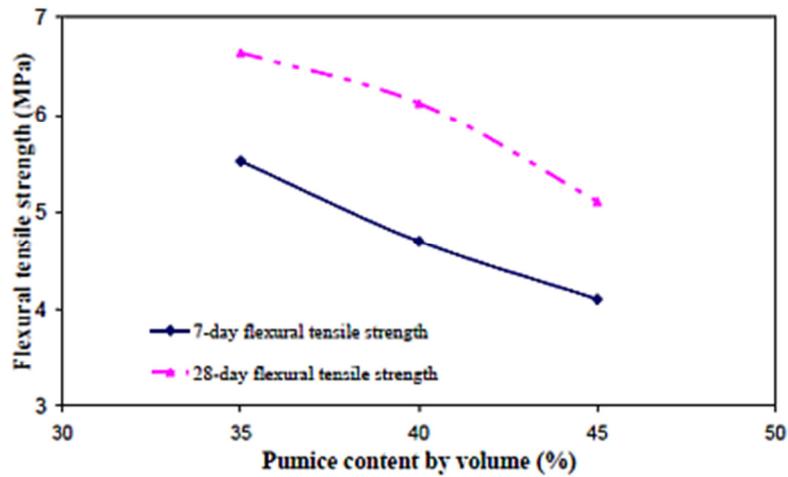
$\lambda = 0,75$  untuk *all-lightweight aggregate concrete* dan

$\lambda = 0,85$  untuk *sand-lightweight concrete*

Penelitian Xiaopeng (2005), berhasil mengembangkan beton ringan struktural dengan agregat kasar batu apung yang mencapai kuat tekan antara 18 MPa sampai dengan 28 MPa. Hasil penelitian tersebut menunjukkan kecenderungan bahwa semakin banyak volume batu apung yang digunakan maka akan semakin kecil kuat tarik belah dan kuat tarik lentur yang dihasilkan. Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

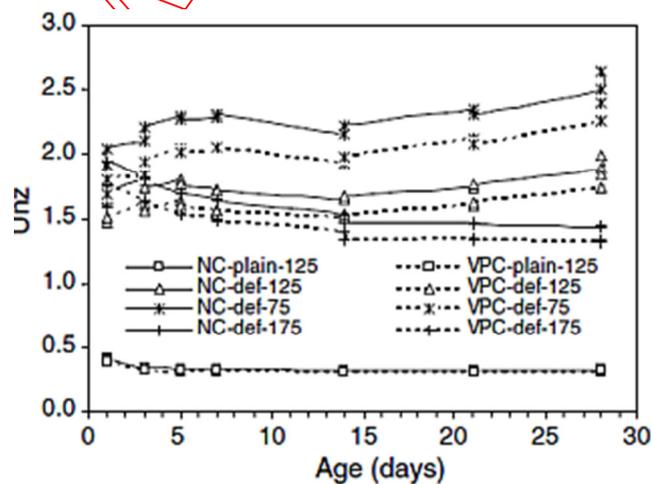


**Gambar 2** Hubungan antara Volume Agregat Batu Apung dengan Kuat Tarik Belah Beton Ringan Struktural (Xiaopeng, 2007)



**Gambar 3** Hubungan antara Volume Agregat Batu Apung dengan Kuat Lentur Beton Ringan Struktural (Xiaopeng, 2007)

Penelitian yang dilakukan oleh Hossain (2008), di Universitas Ryerson, Kanada juga telah berhasil mengembangkan beton ringan struktural dengan agregat kasar batu apung yang mencapai kuat tekan lebih dari 29 MPa. Kendatipun demikian, ditengarai bahwa kuat lekat tulangan beton ringan tersebut lebih rendah bila dibandingkan dengan beton normal, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah ini. Gambar tersebut menggunakan beberapa notasi sesuai dengan variabel penelitian yang dikaji, notasi *NC* mewakili *normal concrete*, *VPC* berarti *volcanic pumice concrete*, *plain* menunjukkan tulangan *polos*, *def* adalah tulangan sirip, 125 dan 75 menunjukkan panjang lekatan 125 mm dan 75 mm, serta *Unz* adalah kuat lekat tulangan yang dinormalisasi terhadap akar kuadrat kuat tekan beton.

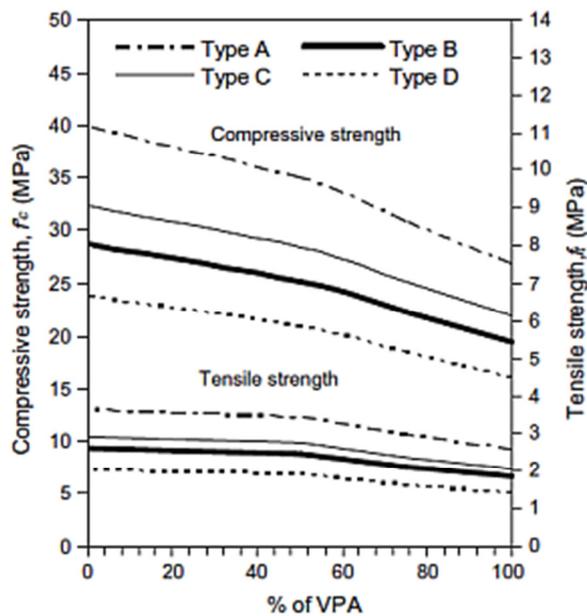


**Gambar 4** Hasil Uji Kuat Lekat Tulangan Beton Ringan dan Beton Normal (Hossain, 2008)

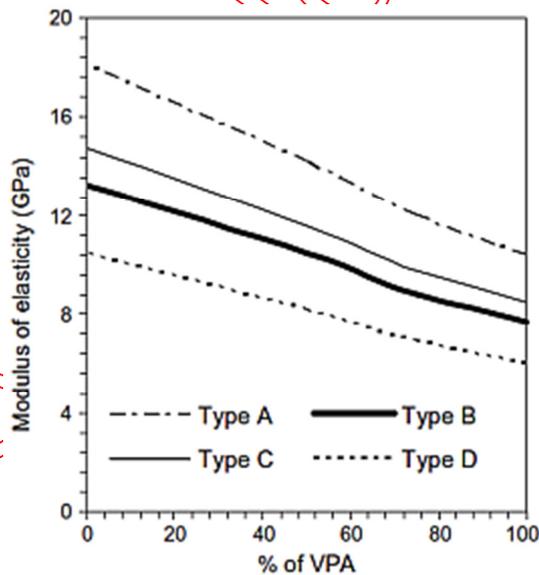
Penelitian untuk mengetahui teknik pengadukan yang paling baik untuk memproduksi beton ringan dengan agregat kasar batu apung telah dilakukan oleh Kabay dan Akoz (2011). Peneliti dari Turki tersebut membandingkan 3 (tiga) metode pengadukan: 1) *pre-soaked*; dilakukan penambahan air berdasarkan nilai serapan air batu apung dalam 1 jam perendaman, 2) *pre-wetted*; di mana batu apung direndam selama 24 jam sebelum dilakukan pengadukan, 3) *vacuum-soaked*, di mana batu apung diletakkan dalam ruangan untuk kemudian dilakukan *vacuum* kemudian diisikan air ke dalam ruang *vacuum* selama 10 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik *vacuum-soaked* menghasilkan kuat tekan beton ringan yang paling baik, namun cara ini memiliki tingkat kesulitan dan kebutuhan alat yang rumit. Cara *pre-wetted* menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah sekitar 2,50% dibandingkan metode *vacuum-soaked*, namun jauh lebih mudah untuk dilaksanakan. Sedangkan metode *pre-soaked* menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah antara 10 sampai 25% dibandingkan metode *vacuum-soaked*. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan dilaksanakan dengan metode *pre-wetted aggregate*.

Laporan yang disampaikan oleh Green et al. (2011), menyebutkan bahwa diperlukan optimasi komposisi campuran beton untuk meningkatkan kuat tekan beton ringan dengan agregat *pumice* agar dapat dipenuhi kriteria beton ringan struktural. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan faktor air semen maksimal 0,25 dan kandungan bahan pengikat (semen dan *silica fume*) minimal  $620 \text{ kg/m}^3$  dapat dicapai kuat tekan beton lebih dari 35 MPa dengan berat isi  $\pm 1900 \text{ kg/m}^3$ , dan kuat tarik belah sebesar  $\pm 10\%$  dari kuat tekan beton.

Menurut Hossain et al. (2011), dilaporkan bahwa semakin besar volume fraction agregat *pumice* di dalam beton maka akan semakin berkurang kuat tekan, kuat tarik dan modulus elastisitas beton, sebagaimana di tunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Kajian lain menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kuat tekan beton ringan beragregat *pumice* maka akan semakin berkurang rasio kuat tarik terhadap kuat tekan beton. Penelitian tersebut menggunakan empat varian beton yaitu: Tipe A, B, C, dan D. Tipe A adalah beton yang diproduksi dengan *Portland Cement (PC)*, agregat kasar campuran antara batu pecah dan *volcanic pumice aggregate (VPA)* serta pasir dengan faktor air semen (fas) 0,45. Tipe B adalah beton yang menggunakan *PC*, agregat kasar *VPA* dan batu pecah serta agregat halus *VPA* dengan fas 0,45. Tipe C menggunakan *pumice based ASTM Type I blended cement (PVPC)*, agregat kasar *VPA* dan batu pecah serta pasir dengan fas 0,45. Tipe D adalah beton yang dibuat dengan bahan dasar *PVPC*, agregat kasar *VPA* dan batu pecah serta agregat halus *VPA* dengan fas 0,45.



**Gambar 5** Hubungan antara *Volume Fraction Pumice* Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton (Hossain et al., 2011)



**Gambar 6** Hubungan antara *Volume Fraction Pumice* Terhadap Modulus Elastisitas Beton (Hossain et al., 2011)

Hasil-hasil penelitian di atas menunjukkan bahwa *pumice* berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai agregat untuk memproduksi beton ringan struktural. Hal yang perlu diperhatikan adalah meskipun dapat memenuhi klasifikasi sebagai beton ringan struktural namun beton ringan menunjukkan kuat tarik, modulus elastisitas, dan kuat lekat tulangan yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan beton normal.

### 3. Self-Compacting Concrete

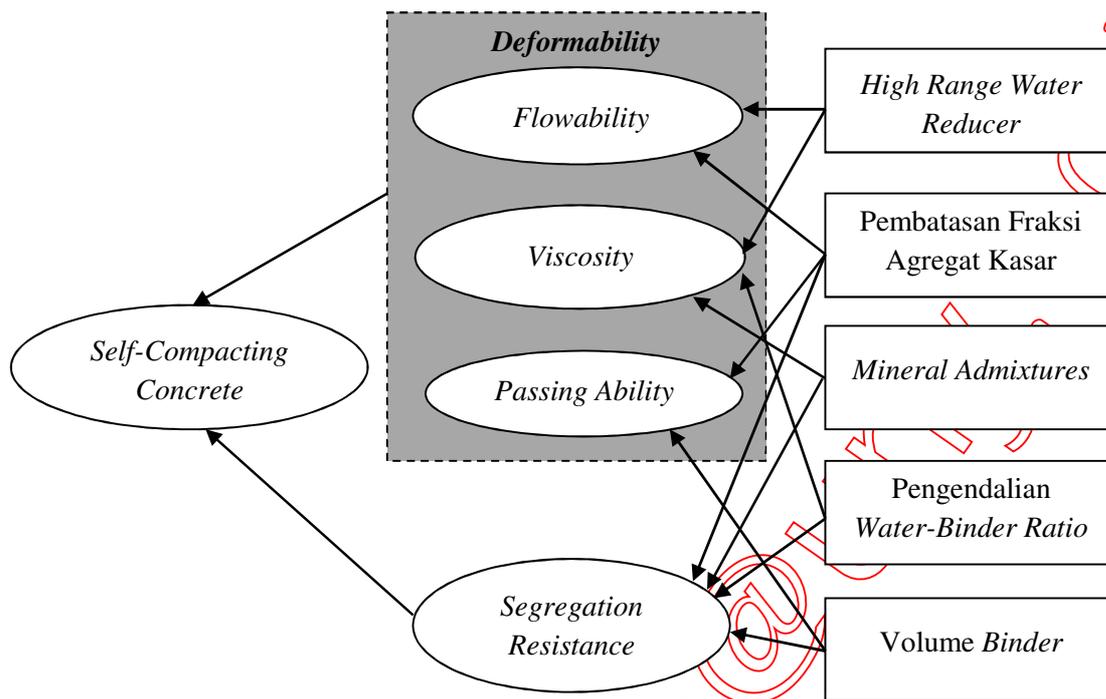
*Self-compacting Concrete (SCC)* dapat didefinisikan sebagai suatu jenis beton yang dapat dituang, mengalir dan menjadi padat dengan memanfaatkan berat sendiri, tanpa memerlukan proses pemadatan dengan getaran atau metode lainnya, selain itu beton segar jenis *self-compacting concrete* bersifat kohesif dan dapat dikerjakan tanpa terjadi segregasi atau *bleeding*. Beton jenis ini lazim digunakan untuk pekerjaan beton pada bagian struktur yang sulit dijangkau dan dapat menghasilkan struktur dengan kualitas yang baik.

*Prototype* dari *self compacting concrete* mulai dikembangkan di Jepang pada awal dekade 1990-an dengan tujuan mendapatkan struktur beton yang memiliki tingkat kepadatan yang tinggi untuk daerah rawan gempa. Berbagai penelitian telah dilakukan dengan hasil yang memuaskan, sehingga saat ini *self compacting concrete* telah digunakan secara luas di berbagai negara dengan aplikasi yang disesuaikan dengan kondisi serta konfigurasi struktur beton yang dibutuhkan.

Keuntungan-keuntungan yang dapat diperoleh dari penggunaan *self compacting concrete* antara lain :

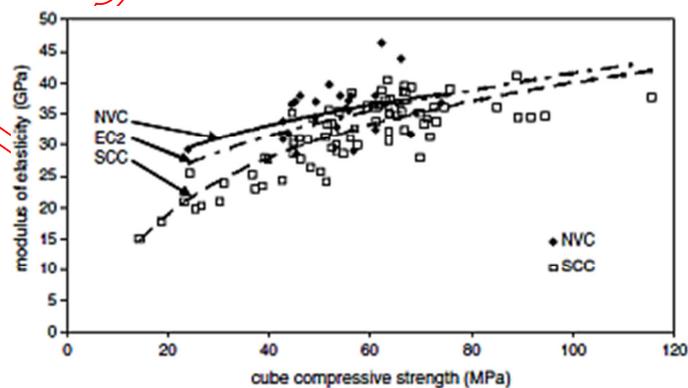
- 1) Mengurangi lamanya konstruksi dan besarnya upah pekerja.
- 2) Pemadatan dan penggetaran beton yang dimaksudkan untuk memperoleh tingkat kepadatan optimum dapat dieliminir.
- 3) Mengurangi kebisingan yang dapat mengganggu lingkungan sekitarnya.
- 4) Meningkatkan kepadatan elemen struktur beton pada bagian yang sulit dijangkau dengan alat pemadat, seperti vibrator.
- 5) Meningkatkan kualitas struktur beton secara keseluruhan.

*High range water reducer* diperlukan untuk menghasilkan *self compacting concrete* dengan *workability* dan *flowability* yang tinggi. *Filler*, baik yang bersifat *inert* misalnya serbuk batu kapur (*limestone powder*) ataupun yang bersifat reaktif misalnya *fly ash* atau *silica fume* perlu ditambahkan dalam proses pengadukan *Self Compacting Concrete* untuk meningkatkan homogenitas dan viskositas beton segar (Kheder dan Al Jadiri, 2010). *Self Compacting Concrete* mensyaratkan kemampuan mengalir yang cukup baik pada beton segar tanpa terjadi segregasi, sehingga viskositas beton juga harus diperhatikan untuk mencegah terjadinya segregasi (EFNARC, 2005). Hubungan antara penggunaan *superplasticizer* dan sifat beton segar pada proses produksi *self-compacting concrete* dapat ditunjukkan pada Gambar 7.



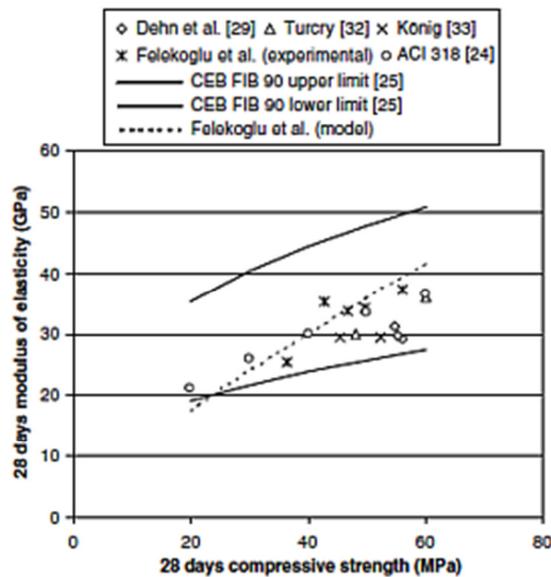
**Gambar 7** Prinsip Dasar Proses Produksi *Self-Compacting Concrete*

Menurut Domone (2007), SCC memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah bila dibandingkan dengan beton normal. Semakin rendah mutu beton maka akan terlihat perbedaan nilai modulus elastisitas yang lebih besar, sebaliknya semakin tinggi mutu beton maka akan semakin kecil perbedaan modulus elastisitas SCC dengan beton normal. Perbedaan modulus elastisitas SCC dan *normal vibrated concrete* (NVC) yang diperbandingkan dengan hitungan berdasarkan EC2 (*Eurocode*) ditunjukkan pada Gambar 8.



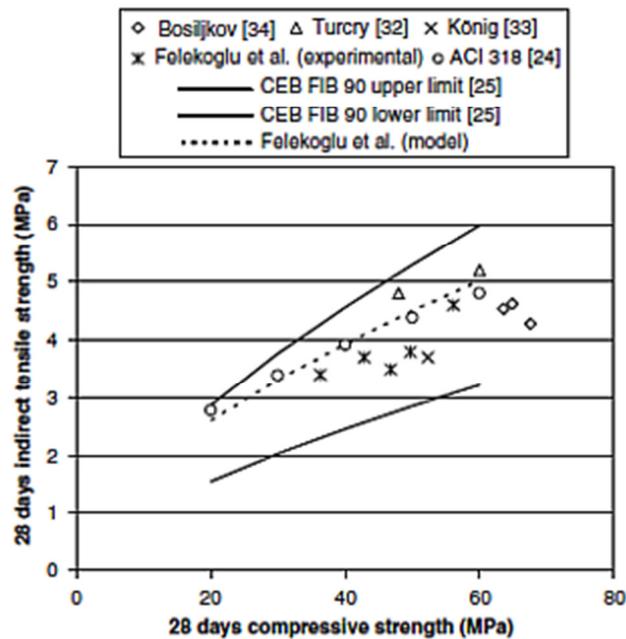
**Gambar 8** Perbedaan Modulus Elastisitas SCC dengan Beton Normal (Domone, 2007)

Dalam laporan penelitian Felokoglu et al. (2007), dikemukakan bahwa modulus elastisitas *self-compacting concrete* (SCC) bernilai sedikit lebih rendah dari beton normal. Hal ini mungkin disebabkan karena SCC lebih banyak mengandung agregat halus dan pasta semen jika dibandingkan dengan beton normal. Kendatipun demikian, perbedaan tersebut tidak cukup signifikan dan modulus elastisitas SCC masih berada di antara batas bawah dan batas atas kurva hubungan kuat tekan dan modulus elastisitas yang ditetapkan CEB FIB 90, seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



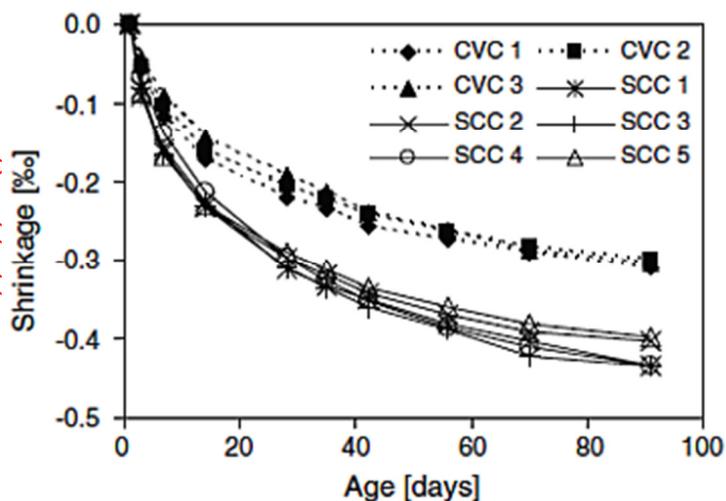
**Gambar 9** Hubungan Kuat Tekan dengan Modulus Elastisitas SCC (Felokoglu et al., 2007)

Di lain pihak, para peneliti di atas menyatakan bahwa SCC memiliki nilai kuat tarik tak langsung (*indirect tensile strength*) sedikit lebih tinggi dari beton normal. Meskipun demikian, perbedaan tersebut juga tidak terlalu signifikan dan nilai *indirect tensile strength* SCC juga masih berada di antara batas bawah dan batas atas kurva hubungan kuat tekan dan *indirect tensile strength* yang ditetapkan CEB FIB 90, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.



**Gambar 10** Hubungan Kuat Tekan dengan *Indirect Tensile Strength SCC* (Felokoglu et al., 2007)

Hasil pengujian oleh Loser dan Leemann (2009), menunjukkan bahwa semua varian *SCC 1* hingga *SCC 5* yang dipersiapkan dengan berbagai komposisi campuran, kandungan semen, dan nilai *water/binder ratio* ternyata memiliki besaran susut yang lebih besar bila dibandingkan dengan semua varian *CVC 1* hingga *CVC 3* (*conventional vibrated concrete* beton normal). Hasil penelitian tersebut dapat dilihat secara lengkap pada Gambar 11 di bawah ini.



**Gambar 11** Komparasi Besaran Susut SCC dan CVC pada Berbagai Umur Beton (Loser dan Leemann, 2009)

Hasil-hasil penelitian di atas menunjukkan bahwa SCC dapat mencapai kekuatan yang setara dengan beton normal. Meskipun demikian SCC yang diproduksi dengan komposisi yang unik yaitu volume *binder* yang lebih banyak dan fraksi volume agregat halus yang lebih banyak pula menunjukkan karakteristik mekanik yang tidak sepenuhnya sama dengan beton normal.

#### 4. Beton Berserat (*Fiber Reinforced Concrete*)

##### 4.1. Beton Berserat

Beton bertulang berserat (*fibre reinforced concrete*) didefinisikan sebagai bahan beton yang dibuat dari bahan campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air dan sejumlah serat (*fibre*) yang tersebar secara acak dalam matriks campuran beton segar (Hannant, 1978). Menurut ACI Committee 544 (2002), jenis-jenis serat dapat digolongkan dalam empat kelompok yaitu:

- 1) Serat-serat logam, seperti serat baja karbon atau serat baja tahan karat
- 2) Serat-serat sintesis (*acrylic, aramid, nylon, polyester, polypropylene, carbon*)
- 3) Serat-serat gelas (*glass fibre*)
- 4) Serat-serat alami (serat ijuk, bambu, rami, ampas kayu, jerami, sisal, sabut kelapa)

Dalam penelitian ini digunakan campuran serat baja dan serat *polypropylene* karena mudah diperoleh, murah, awet dan tidak bersifat reaktif terhadap semen.

##### 4.2. Perilaku Beton Berserat

Perilaku beton berserat ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain sifat fisik matrik dan serat dan perlekatan antara serat dan matriknya.

- 1) Sifat-sifat fisik serat dan matrix

Hannant (1978) menyatakan bahwa faktor utama yang menentukan kemampuan bahan serat adalah sifat fisik matrix dan serat seperti yang diberikan pada Tabel 1 dan Tabel 2, serta kekuatan lekatan diantara keduanya. Tampak dari kedua tabel tersebut bahwa tegangan rerata serat adalah dua hingga tiga kali lebih besar dari tegangan runtuh matrix, sehingga beton akan retak sebelum kuat tarik maksimum serat tercapai.

**Tabel 1** Tipikal Sifat Berbagai Matrix (Hannant, 1978)

Matrik	Kepadatan (kg/m <sup>3</sup> )	Modulus Elastisitas (GPa)	Kuat Tarik (MPa)	Regangan Putus x 10 <sup>-6</sup>
Semen PC Normal	2.000-3.000	10-25	3-6	100-500
Pasta semen kadar alumina tinggi	2.100-2.300	10-25	3-7	100-500
Mortar OPC	2.200-2.300	25-35	2-4	50-150
Beton OPC	2.200-2.450	30-40	1-4	50-150

**Tabel 2** Sifat Berbagai Macam Serat (Mindess et al., 2003)

Tipe Serat	Diameter (mm)	Berat Jenis	Modulus Elastisitas (GPa)	Kuat Tarik (MPa)	Regangan Batas (%)
Baja	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Kaca	9-15	2,60	70-80	2-4	2,0-3,5
<i>Asbestos</i>					
<i>Crocidolite</i>	0,02-0,40	3,4	196	3,5	2,0-3,0
<i>Chrysotile</i>	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2,0-3,0
<i>Polypropylene</i>	6-200	0,91	5-77	0,15-0,75	15
<i>Aramid (Kevlar)</i>	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
<i>Carbon</i>					
<i>Polyacrylonitrile</i>	7-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
<i>Pitch</i>	9-18	1,6-2,15	28-480	0,5-3,0	0,5-2,4
<i>Nylon</i>	20-200	1,1	4,0	0,9	13-15
<i>Cellulose</i>	-	1,2	10	0,3-0,5	-
<i>Polyethylene</i>	25-1000	0,95	0,3	0,08-0,6	3-80
Sisal	10-50	1,5	13-26	0,3-0,6	3-5
Serat kayu ( <i>pulp</i> )	25-75	1,5	71	0,7-0,9	-

### 2) Pengaruh Panjang dan Diameter Serat

Perbandingan panjang dan diameter serat (*aspect ratio*) akan mempengaruhi lekatan antara serat dengan matrik. Serat dengan rasio  $l/d > 100$  mempunyai lekatan dengan beton yang lebih besar dibandingkan dengan serat yang pendek dengan rasio  $l/d < 50$ . Menurut Hannant (1978), hasil pengujian untuk  $l/d < 50$  menyebabkan serat akan lebih mudah tercabut dari beton. Peningkatan aspek rasio serat akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik maupun lentur beton, sama halnya dengan penambahan volume serat ke dalam campuran beton.

### 3) Ukuran maksimum matrik

Ukuran maksimum matrik akan mempengaruhi distribusi dan kuantitas serat yang dapat masuk ke dalam komposit. Hannant (1978), memberikan rata-rata ukuran agregat partikel  $\pm 10-30$  mikron, sedangkan ukuran agregat maksimum agregat untuk adukan 5 mm. Agregat dalam komposit tidak boleh lebih besar dari 20 mm dan disarankan lebih kecil dari 10 mm, yang bertujuan agar serat dapat tersebar dengan merata. Untuk menghindarkan terjadinya rongga, pada benda uji disarankan untuk memakai bahan pengisi (agregat campuran) paling sedikit 50 % dari volume beton.

4) Perilaku sifat mekanik beton berserat

Parameter yang diperoleh dari pengujian tekan terhadap beton berserat antara lain : modulus elastisitas, beban hancur maksimum. Dari hasil pencatatan defleksi diperoleh nilai regangan yang terjadi pada saat beban maksimum dan perilaku kurva beban (P) dengan defleksi ( $\delta$ ) atau perilaku kurva tegangan-regangan. Perubahan modulus elastisitas akibat penambahan serat sangat kecil. Penambahan serat pada beton normal dapat meningkatkan tegangan pada beban puncak. Beton berserat menyerap energi yang lebih besar daripada beton normal sebelum hancur (*failure*). Peningkatan terhadap daktilitas dengan penambahan serat pada beton normal tergantung pada beberapa faktor seperti : geometri serat, volume fraksi serat dan komposisi bahan penyusun matrik sendiri. Peningkatan volume serat dapat meningkatkan kapasitas peningkatan energi. Peningkatan penyerapan energi ini terjadi hanya pada batasan 0 – 0,7 % fraksi volume, apabila kandungan serat dinaikkan lagi hingga lebih besar dari 0,7 %, maka kenaikan energi yang terjadi tidak terlalu besar. Beton bermutu tinggi lebih getas (*brittle*) dibandingkan dengan beton normal, dan dengan penambahan serat dapat dihasilkan beton yang lebih daktail. Hannant (1978), memberikan Persamaan 3 dan Persamaan 4 untuk menyatakan hubungan antara volume fraksi dengan perbandingan serat dalam matriks sebagai berikut:

$$W'_f = \frac{W_f}{W_m} \times 100\% \quad (3)$$

$$W'_f = \frac{V_f D_f}{V_m D_m} \times 100\% \quad (4)$$

dimana:

$W_f$  : berat serat

$W_m$  : berat matrik beton

$W'_f$  : persentase berat serat terhadap matrik beton, %

$V_f$  : persentase volume fraksi serat terhadap matrik beton, %

$V_m$  : persentase matriks beton, %

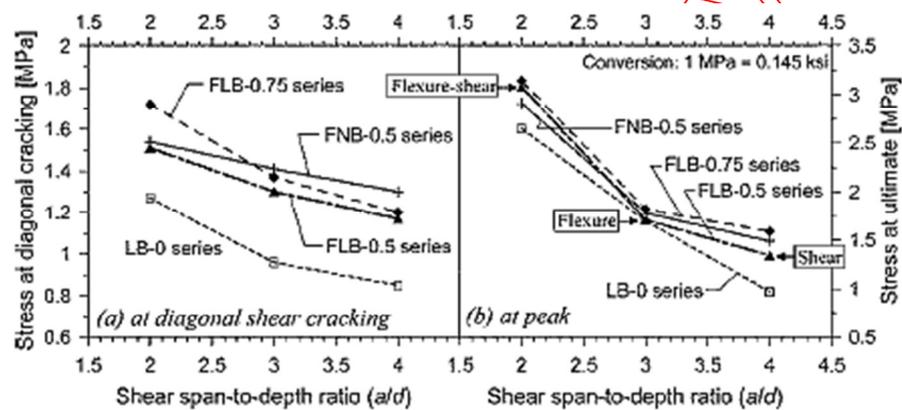
$D_f$  : berat jenis serat,  $\text{kg/m}^3$

$D_m$  : berat jenis matrik beton,  $\text{kg/m}^3$

5) Peningkatan kekuatan geser beton

Penelitian yang dilakukan oleh Kang et al. (2011), menunjukkan bahwa penambahan serat baja sebesar 0,75% *volume fraction* beton dapat meningkatkan kekuatan geser beton ringan hingga 30%. Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 12 di

bawah ini. Notasi FLB menunjukkan varian beton ringan berserat, FNB adalah varian beton normal berserat, sedangkan angka yang ada di belakangnya yaitu: 0, 0,5, dan 0,75 menunjukkan *volume fraction* serat baja yang ditambahkan. Analisis yang dilakukan lebih lanjut menunjukkan bahwa penambahan serat dengan *volume fraction* 0,75% akan memberikan tambahan kuat geser setara dengan kuat geser yang disumbangkan oleh tulangan geser minimal yang dihitung menurut ACI 381-08 *section* 11.4.7.2 [ $V_{smin}=(A_{vmin}f_y.d)/s$ ].



**Gambar 12** Pengaruh Penambahan Serat Terhadap Kekuatan Geser Beton (Kang et al., 2011)

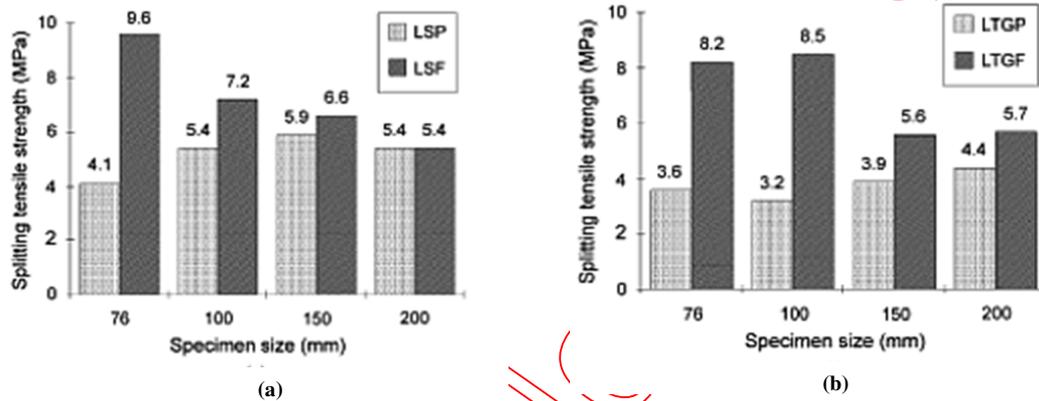
6) Kontribusi serat terhadap peningkatan kuat lentur beton

Dalam aplikasinya, beton berserat lebih banyak diperhitungkan kontribusinya sebagai elemen penahan beban lentur dibandingkan dengan fungsinya sebagai penahan jenis beban yang lain. Hasil percobaan menunjukkan peningkatan kuat lentur lebih tinggi daripada kuat tekan atau kuat tarik belah. Peningkatan kuat lentur sangat dipengaruhi oleh volume fraksi dan aspek rasio serat. Peningkatan volume fraksi sampai batas tertentu akan meningkatkan kuat lentur beton, demikian pula dengan aspek rasio serat.

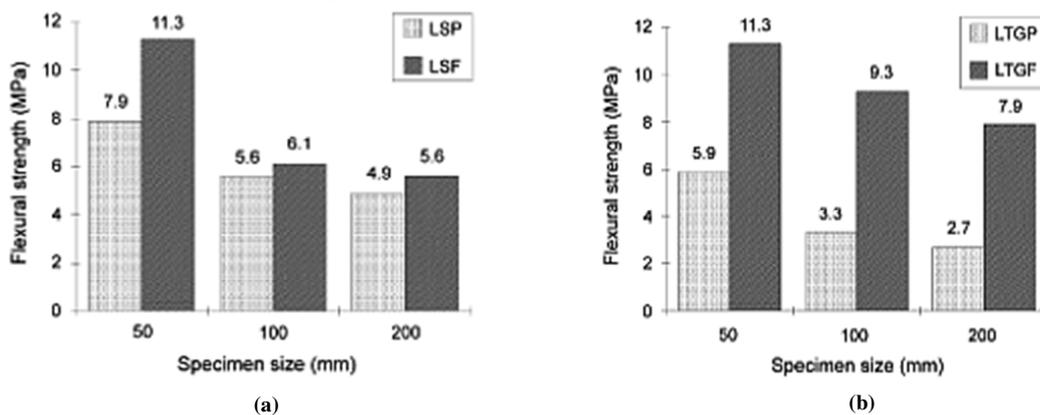
7) Daktilitas (*flexural toughness*)

Salah satu alasan penambahan serat pada beton adalah untuk meningkatkan kapasitas penyerapan energi beton, yang berarti menambah daktilitas beton. Peningkatan daktilitas beton pada umumnya juga disertai dengan peningkatan ketahanan beton terhadap pengaruh *fatigue* dan *impact*. Hasil-hasil penelitian yang berkaitan dengan pengaruh penambahan serat terhadap sifat mekanik beton dapat diuraikan sebagai berikut.

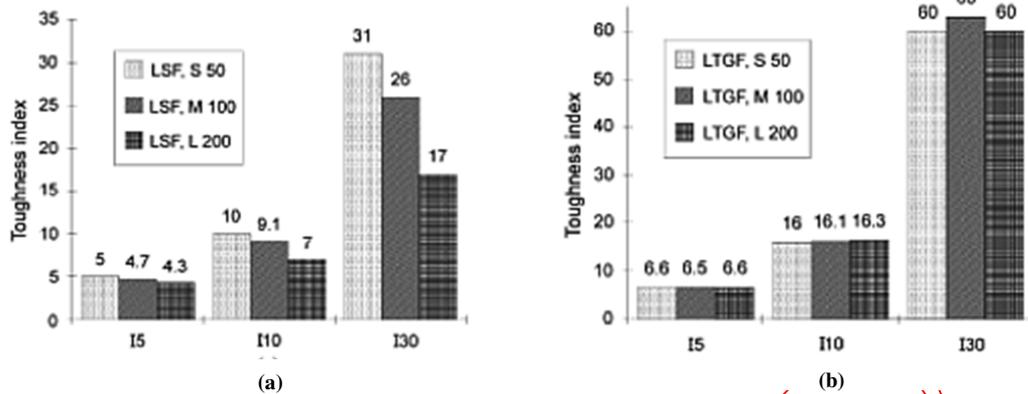
Menurut Balendran et al. (2002), penambahan serat baja dapat meningkatkan kuat tarik belah beton ringan sampai 165% bahkan dapat melampaui kuat tarik belah beton normal dengan bahan tambah serat baja yang sama. Penambahan serat baja juga meningkatkan kuat lentur beton ringan sampai dengan 91%. Hasil penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 13, Gambar 14 dan Gambar 15. Notasi *LSP* menunjukkan *limestone plain concrete*, *LSF* menandakan *limestone fiber reinforced concrete*, *LTGP* mewakili *lightweight aggregate plain concrete*, dan *LTGF* adalah *lightweight aggregate fiber reinforced concrete*.



**Gambar 13** (a) Pengaruh Penambahan Serat dan Ukuran Benda Uji Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Normal, (b) Beton Ringan (Balendran et al., 2002)

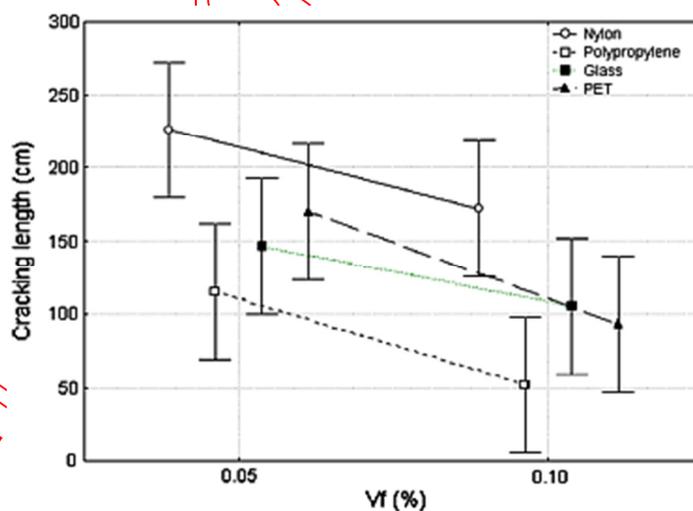


**Gambar 14** (a) Pengaruh Penambahan Serat dan Ukuran Benda Uji Terhadap Kuat Tarik Lentur Beton Normal, (b) Beton Ringan (Balendran et al., 2002)



**Gambar 15** (a) *Toughness Index* Beton Normal Berserat, (b) Beton Ringan Berserat (Balendran et al., 2002)

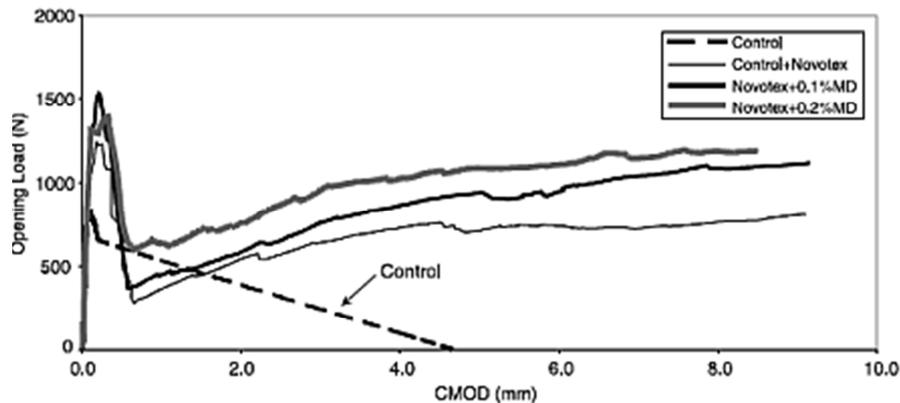
Penambahan serat ke dalam campuran adukan beton juga terbukti dapat menghambat laju retak akibat susut beton secara efektif. Menurut Pelisser et al., (2010), serat *polypropylene* merupakan jenis serat yang efektif dalam mengurangi terjadinya retak yang diakibatkan oleh susut beton. Penambahan serat *polypropylene* tipe *shortcut* dapat mengurangi panjang retak secara lebih efektif dibandingkan dengan serat nylon, *polyethylene (PET)*, maupun *glass fiber*. Pada penelitian tersebut juga diketahui bahwa nilai *volume fraction* 0.10% merupakan kadar optimum penambahan serat *polypropylene* ditinjau berdasarkan total panjang retak yang terjadi akibat susut beton. Hasil penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 16.



**Gambar 16** Pengaruh Jenis Serat dan *Volume Fraction* Terhadap Panjang Retak akibat Susut Beton (Pelisser et al., 2010)

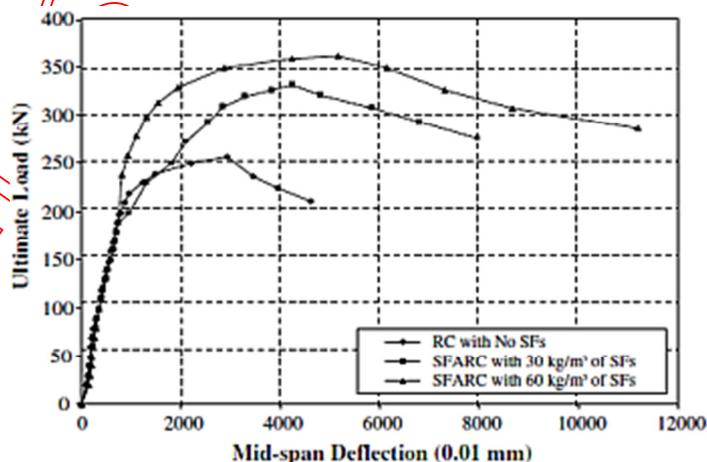
Dalam laporan penelitian Banthia dan Nandakumar (2003), disebutkan bahwa penggunaan serat campuran, dimana serat baja (*xorex*) dicampur dengan serat *polypropylene monofilament (MD)* dapat meningkatkan ketahanan *cement-based matrices*

terhadap perkembangan retak yang terjadi akibat bekerjanya beban pada benda uji *contoured double cantilever beam (CDCB)*. Gambar 17 menunjukkan bahwa pencampuran serata baja dengan serat *polypropylene* menghasilkan opening load yang lebih besar bila dibandingkan benda uji yang hanya menggunakan serat baja apalagi jika dibandingkan benda uji kontrol yang tidak ditambahkan serat.



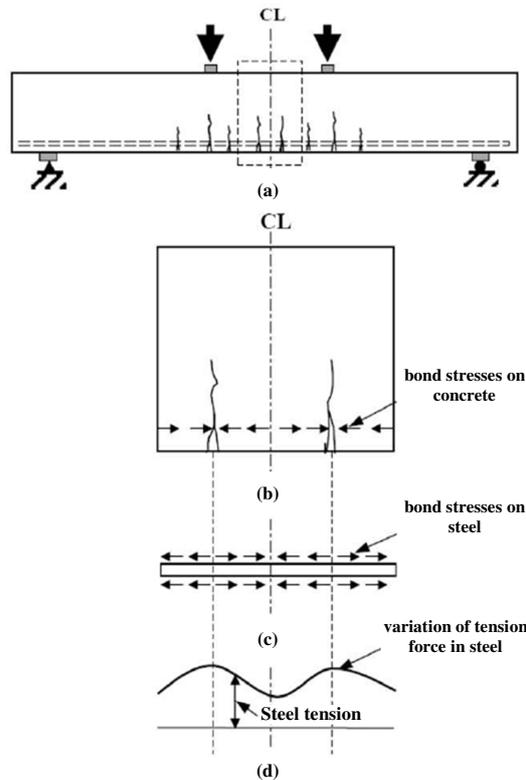
**Gambar 17** Hubungan Beban dan *Crack Opening Mouth Displacement* (Banthia dan Nandakumar, 2003)

Dalam penelitian oleh Altun et al. (2007), dilaksanakan uji eksperimental untuk mengetahui pengaruh penambahan serat baja berukuran panjang 60 mm dan diameter 0,75 mm terhadap kekuatan mekanik beton dan perilaku lentur balok beton bertulang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat baja (*SFs*) sebesar  $60 \text{ kg/m}^3$  dapat meningkatkan kuat tarik belah beton hingga 54% dan kuat lentur hingga 46%. Pada pengujian balok beton bertulang, juga terlihat peningkatan kapasitas lentur dan daktilitas beton sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 18.



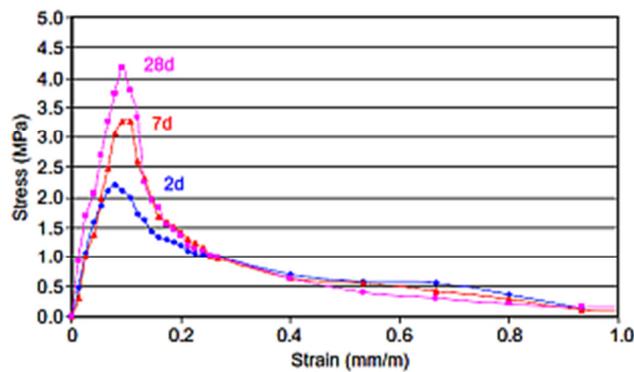
**Gambar 18** Hubungan Beban dan Lentutan Balok Beton Bertulang dengan Berbagai Penambahan Serat Baja (Altun et al., 2007)

Menurut Ozcan et al. (2008), kemampuan beton serat untuk menghambat terjadinya retak dapat mengurangi besaran tegangan tarik yang berkerja pada baja tulangan sehingga kapasitas *ultimate* beton dapat meningkat. Mekanisme kerja serat dalam kontribusinya terhadap peningkatan kekuatan lentur beton dapat dilihat pada Gambar 19.

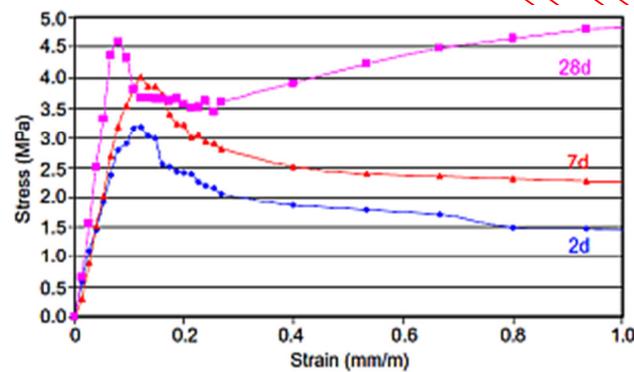


**Gambar 19** Variasi Gaya Tarik Baja Tulangan dalam Balok Beton Serat Bertulang; (a) Pola Retak Balok, (b) Bentuk Retak, (c) Tegangan pada Lektan Baja Tulangan dengan Beton, (d) Variasi Gaya Tarik Baja Tulangan (Ozcan et al., 2008)

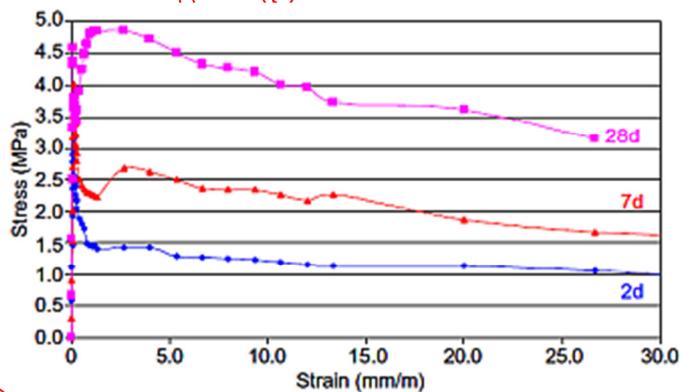
Laporan penelitian yang disampaikan oleh Camps et al. (2008), menyatakan bahwa penambahan  $85 \text{ kg/m}^3$  serat baja tipe lurus (panjang 30 mm, diameter 0,6 mm) dapat meningkatkan kuat tarik, sekaligus mempertahankan *residual strength* pasca terjadinya retak akibat bekerjanya gaya tarik pada beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada pengujian beton tanpa serat dapat diamati perilaku beton yang *brittle*, dimana setelah dicapainya beban maksimum terlihat peningkatan regangan dan penurunan *residual strength* secara cepat. Selain itu, dapat diamati bahwa setelah munculnya retak akan terjadi lokalisasi perkembangan retak secara cepat. Hal yang berbeda terjadi pada beton serat, dimana setelah dicapai beban maksimum, terjadi peningkatan regangan dan penurunan tegangan yang menandai terjadinya transfer tegangan dari matrix beton ke serat baja, selanjutnya terlihat *residual strength* yang disumbangkan oleh kekuatan serat dan kuat lekat serat dengan matrix beton di sekelilingnya. Hasil penelitian terkait dapat dilihat pada Gambar 20, Gambar 21 dan Gambar 22.



**Gambar 20** Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Tanpa Serat (Camps et al., 2008)



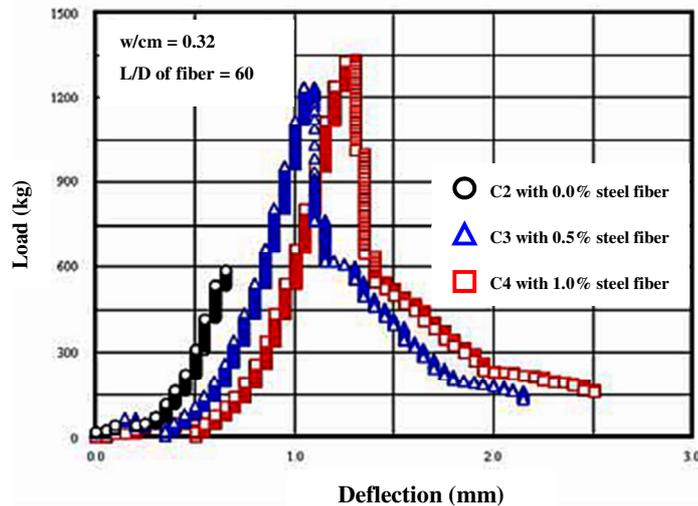
**Gambar 21** Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Berserat Baja sampai Regangan 1 mm/m (Camps et al., 2008)



**Gambar 22** Hubungan Tegangan dan Regangan pada Pengujian Tarik Beton Berserat Baja (Camps et al., 2008)

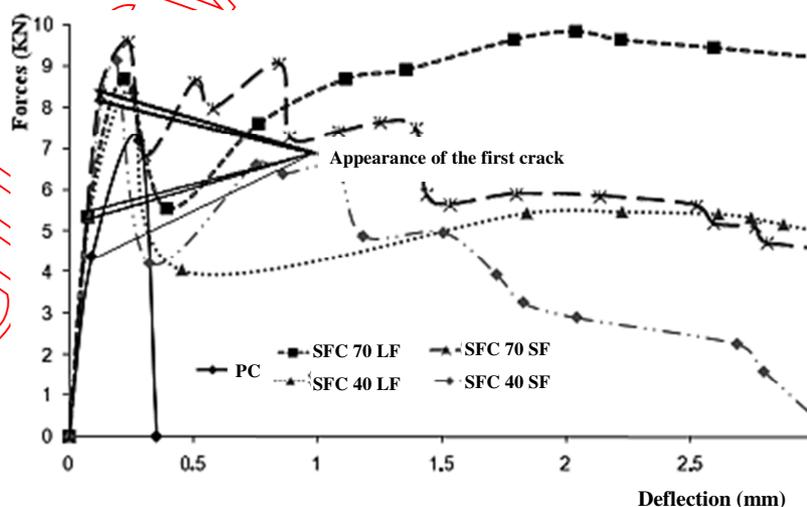
Tsai et al. (2009), menyatakan bahwa penambahan serat baja tipe *double hooke-edge* dapat meningkatkan kuat lentur beton, sekaligus mempertahankan *residual strength* pasca terjadinya beban maksimum. Grafik yang menunjukkan hubungan antara beban dan lendutan pada pengujian lentur beton tersebut disajikan pada Gambar 23. Varian C4 yang ditunjukkan grafik beban-defleksi berwarna merah merupakan varian dengan penambahan serat baja 1,0%

dari volume beton memperlihatkan kekuatan lentur maksimum dan *residual strength* yang lebih baik bila dibandingkan dengan varian C3 (penambahan serat baja 0,5%) yang diwakili grafik berwarna biru, maupun varian C2 (tanpa penambahan serat baja) yang ditunjukkan dengan grafik berwarna hitam.



**Gambar 23** Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton Berserat Baja (Tsai et al., 2009)

Ellouze et al. (2010), melaporkan bahwa penggunaan serat baja baik jenis *long fiber* (LF) dengan panjang serat 50 mm maupun *short fiber* (SF) dengan panjang serat 35 mm mampu meningkatkan kekuatan lentur pelat dua arah dalam hal beban *first crack*, beban maksimum maupun daktilitas pelat beton bertulang. SFC 70 menunjukkan penambahan serat baja sebesar  $70 \text{ kg/m}^3$  sedangkan SFC 40 ditambahkan serat baja  $40 \text{ kg/m}^3$  dan SFC 30 sebesar  $30 \text{ kg/m}^3$ . Hasil penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 24.



**Gambar 24** Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Pelat Dua Arah dengan Berbagai Material Beton (Ellouze et al., 2010)

Hasil-hasil penelitian tentang beton serat di atas menunjukkan bahwa penambahan serat ke dalam campuran beton dapat meningkatkan kuat tarik beton, menghambat terjadinya retak baik yang disebabkan oleh terjadinya susut maupun bekerja beban, dan mempertahankan *residual strength* pasca dilampauinya beban maksimum. Apabila digunakan pada elemen struktur beton bertulang, adanya serat akan mengurangi besaran tegangan yang terjadi pada baja tulangan sehingga dapat berkontribusi meningkatkan kapasitas lentur beton bertulang. Efektifitas penggunaan serat dalam campuran beton sangat dipengaruhi oleh kesesuaian tujuan penambahan serat dengan jenis, bentuk geometri, dan dimensi serat yang digunakan.

### 5. Beton Berserat Campuran (*Hybrid Fiber Reinforced Concrete*)

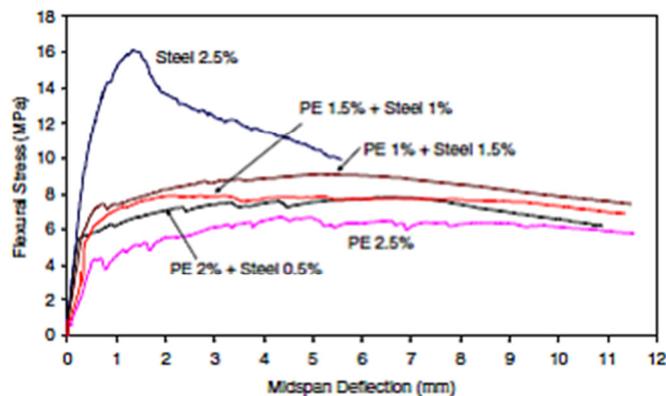
Untuk meningkatkan efektifitas penambahan serat dalam beton, telah dilakukan berbagai penelitian untuk mencampur atau melakukan hibridisasi serat. Hibridisasi ini dilakukan dengan tujuan mengoptimalkan potensi masing-masing jenis serat, sesuai dengan karakteristik unik yang dimiliki. Hibridisasi dapat 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. Hasil penelitian Yao et al. (2003), menunjukkan bahwa kombinasi serat dapat meningkatkan kekuatan tarik beton secara signifikan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3** Pengaruh Penambahan Berbagai Kombinasi Serat Terhadap Sifat Mekanik Beton (Yao et al., 2003)

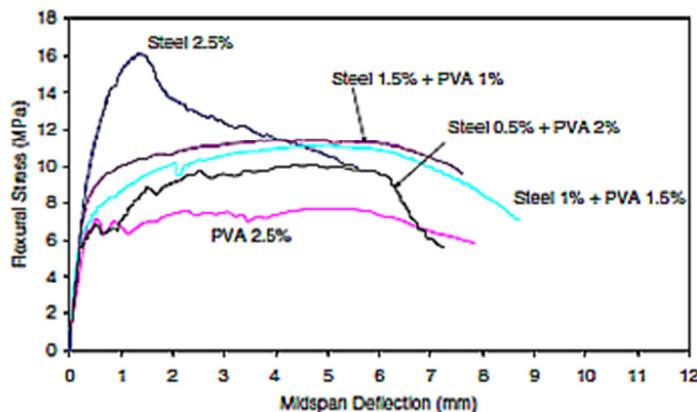
Campuran	Fiber Volume Fraction (%)			$f_c'$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)	MoR (MPa)	Toughness Index		
	Carbon	Baja	PP				I5	I10	I30
1	-	-	-	44,3	4,36	3,16	3,16	5,89	9,78
2	0,5	-	-	50,7	5,21	4,08	4,08	7,48	14,82
3	-	0,5	-	47,8	4,80	4,15	4,15	7,90	22,80
4	-	-	0,5	44,5	4,14	4,04	4,04	6,26	16,76
5	0,2	0,3	-	58,2	5,95	4,23	4,23	8,14	29,32
6	0,2	-	0,3	57,8	5,72	3,89	3,89	6,20	15,90
7	-	0,2	0,3	45,3	4,46	3,40	3,40	6,31	18,44

Penambahan serat dengan cara dicampur (hibridisasi) tersebut dapat meningkatkan kekuatan tarik belah beton ( $f_{sp}$ ) hingga 36,5%, meningkatkan kuat tarik lentur ( $MoR$ ) hingga 32,9%, dan meningkatkan *toughness index* beton hingga 199,5%. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggabungkan serat baja dan serat karbon, maupun serat baja dan *polypropylene* (PP).

Laporan Ahmed et al. (2007), membuktikan bahwa konsep hibridisasi serat dengan mengkombinasikan serat baja dengan serat *polyethylene* (PE) ataupun serat *polyvinyl alcohol* (PVA) untuk memperbaiki karakteristik beton dengan bahan tambah abu terbang, terutama dalam hal daktilitas dan kemampuan untuk mencapai lendutan maksimum, maupun mempertahankan *residual strength* pasca fase leleh, seperti terlihat pada Gambar 25 dan Gambar 26.



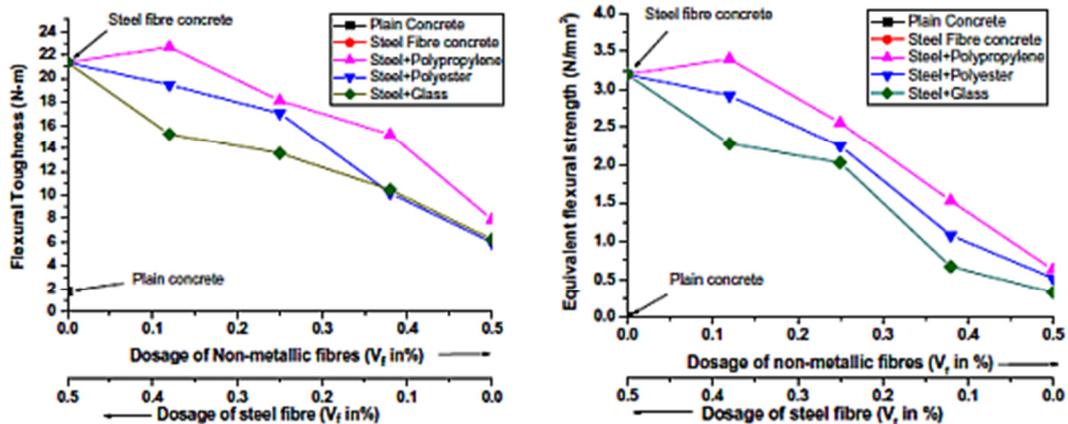
**Gambar 25** Hubungan antara Tegangan Lentur dan Lendutan Tengah Bentang pada Beton dengan *Fly Ash* Berserat Campuran Baja dan *Polyethylene* (Ahmed et al., 2007)



**Gambar 26** Hubungan antara Tegangan Lentur dan Lendutan pada Beton dengan *Fly Ash* Berserat Campuran Baja dan *Polyvinyl alcohol* (Ahmed et al., 2007)

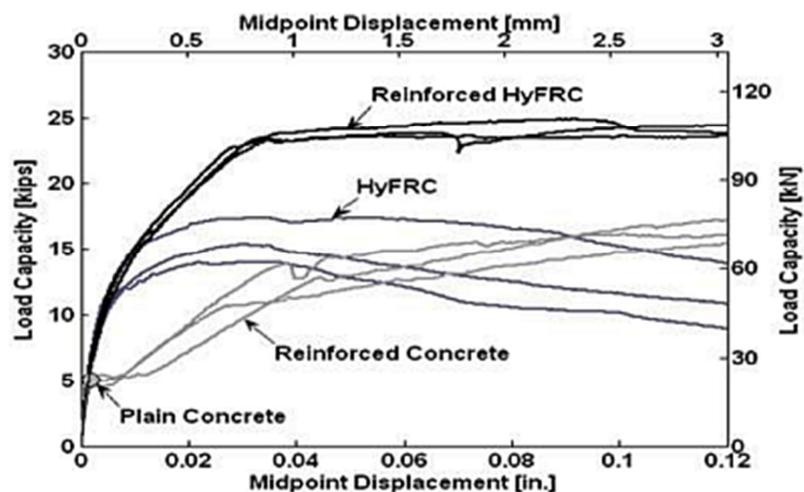
Aplikasi serat campuran antara *steel fiber* dan serat *polypropylene* dalam nilai fraksi volume kecil (0.12%), dapat meningkatkan *flexural toughness* melebihi beton yang hanya menggunakan serat baja saja. Hal ini menunjukkan adanya sinergi antara serat baja dengan serat

*polypropylene*. Serat *polypropylene* berfungsi pada saat terjadi retak-retak berukuran kecil, dan serat baja akan mengambil peran dalam mempertahankan *post-peak behavior* (Sivakumar dan Santhanam, 2007). Hasil penelitian tersebut disajikan pada Gambar 27.

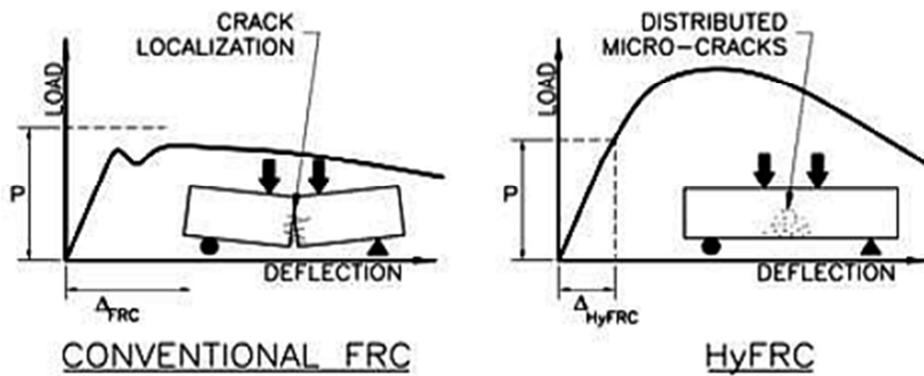


**Gambar 27** Efek Hibridisasi Serat terhadap *Flexural Toughness* dan *Equivalent Flexural Strength* Beton (Sivakumar dan Santhanam, 2007)

Ostertag dan Blunt (2007), melaporkan bahwa penggunaan beton berserat campuran mampu meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang maupun tanpa tulangan bila dibandingkan dengan beton normal seperti terlihat pada Gambar 28. Penggunaan serat campuran juga dapat menyebarkan retak yang terjadi sehingga tidak terjadi lokalisasi retak seperti ditunjukkan pada Gambar 29.

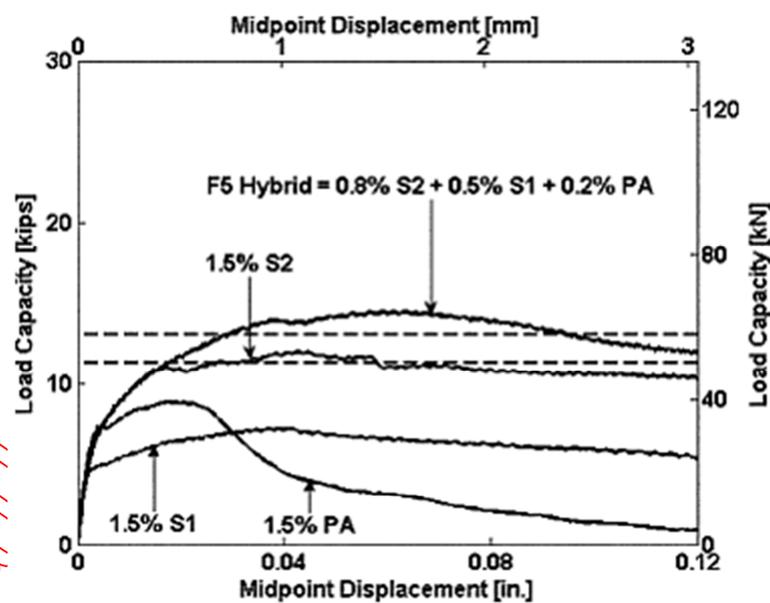


**Gambar 28** Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton Normal dan Berserat Campuran (Ostertag dan Blunt, 2007)



**Gambar 29** Pola Keruntuhan pada Pengujian Lentur Beton Berserat (Ostertag dan Blunt, 2007)

Penelitian Blunt dan Ostertag (2009), juga menunjukkan bahwa beton berserat campuran mampu meningkatkan kinerja lentur balok beton bertulang maupun tanpa tulangan bila dibandingkan dengan beton berserat konvensional. Dalam penelitian ini digunakan serat baja dengan panjang 30 mm (S1), serat baja dengan panjang 60 mm (S2) dan serat *polyvinil alcohol* (PA). Hasil penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 30.



**Gambar 30** Hubungan Beban dan Lendutan pada Pengujian Lentur Beton dengan Berbagai komposisi Serat (Blunt dan Ostertag, 2009)

Hasil-hasil penelitian di atas menunjukkan bahwa penggunaan serat campuran (*hybrid*) dapat mengoptimalkan kinerja beton dengan lebih efisien. Pada umumnya, serat yang berukuran lebih kecil akan efektif menghambat retak akibat susut beton maupun inisiasi retak akibat beban, sedangkan serat yang memiliki dimensi lebih besar akan memberikan kontribusi untuk meningkatkan kapasitas tarik maupun lentur serta mempertahankan *residual strength* beton.