

## Aplikasi *High Performance Fiber Reinforced Concrete* sebagai Material Berkelanjutan: Ikhtisar

Wisena Perceka<sup>1\*</sup>, Herry Suryadi Djayaprabha<sup>1</sup>, dan Sisi Nova Rizkiani<sup>1</sup>

Dikirim: 05/10/2021

Diterima: 14/03/2022

### ABSTRAK

Salah satu keuntungan dari penggunaan beton dan baja tulangan mutu tinggi pada bangunan gedung bertingkat adalah dapat mereduksi ukuran komponen struktur seperti balok, kolom, dan dinding geser. Akan tetapi, semakin tinggi kekuatan tekan beton, maka semakin getas beton tersebut. Untuk mereduksi sifat getas beton mutu tinggi, material *fiber* (serat) dapat ditambahkan kedalam beton mutu tinggi. Salah satu jenis serat yang dapat ditambahkan kedalam beton adalah *steel fiber* (serat baja). Beton dengan serat dapat disebut *Fiber Reinforced Concrete* (FRC) atau *Fiber Reinforced Cementitious Composite* (FRCC). *Highly-Flowable Strain Hardening Fiber Reinforced Concrete* (HF-SHFRC) adalah salah satu perkembangan teknologi beton dengan serat. HF-SHFRC memiliki sifat *Self-Compacting Concrete* (SCC) sebelum mengeras, dan memiliki kemampuan *tensile strain-hardening* ketika sudah mengeras. Paper ini mempresentasikan hasil penelitian mengenai perilaku tarik material HF-SHFRC, dan aplikasi material HF-SHFRC pada kolom beton bertulang mutu tinggi dan hubungan balok-kolom eksterior yang sudah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Dengan menggunakan material HF-SHFRC pada elemen struktur beton bertulang, elemen struktur dapat meningkatkan kekuatan geser, daktilitas, disipasi energi, dan toleransi kerusakan. Selain itu, di dalam HF-SHFRC, material sementisius pengganti semen digunakan dalam jumlah besar, yaitu 50%. Penggunaan material sementisius pengganti semen dalam jumlah besar menunjukkan bahwa HF-SHFRC ramah lingkungan dan memenuhi kriteria sebagai material berkelanjutan.

**Kata kunci:** FRCC, HF-SHFRC, HPRCC, *steel fiber*, *tensile strain-hardening*

### 1. PENDAHULUAN

Penggunaan beton dan baja tulangan mutu tinggi untuk elemen struktur di dalam suatu bangunan tinggi beton bertulang terus meningkat dalam beberapa tahun ini, karena dapat mengurangi dimensi elemen struktur, terutama kolom lantai tingkat yang terletak di lantai rendah atau dasar [[1]] [[2]]. Selain itu, penggunaan material mutu tinggi dapat mereduksi volume material di dalam suatu struktur bangunan [[1]]. Berdasarkan *Taiwan New RC Project*, suatu beton diklasifikasikan sebagai beton mutu tinggi jika beton memiliki kuat tekan spesifikasi sebesar 70 MPa, di mana baja tulangan yang digunakan memiliki tegangan leleh sama dengan atau lebih besar dari 685 MPa [[2]];[3]]. Akan tetapi, hasil penelitian menunjukkan bahwa beton mutu tinggi bersifat lebih getas dibandingkan dengan beton normal. Hasil penelitian lainnya yang dilakukan oleh Ou dan Kurniawan di tahun 2015 [[4]] [[5]] membuktikan bahwa gaya aksial tekan pada kolom yang terbuat dari beton mutu tinggi akan menambah sifat getas beton, yaitu kolom akan mengalami kegagalan geser sebelum lentur terjadi.

Cara tradisional yang dapat digunakan untuk merubah sifat getas menjadi daktil adalah dengan menambah tulangan pengekang [[6]]. Namun, penambahan tulangan pengekang dapat menambah tingkat kesulitan konstruksi karena terjadinya penumpukan tulangan pengekang, terutama pada daerah yang berpotensi untuk mengalami sendi plastis [[6]] [[7]]. Secara teoretis, memperbesar dimensi penampang kolom dapat menghindari kesulitan konstruksi akibat

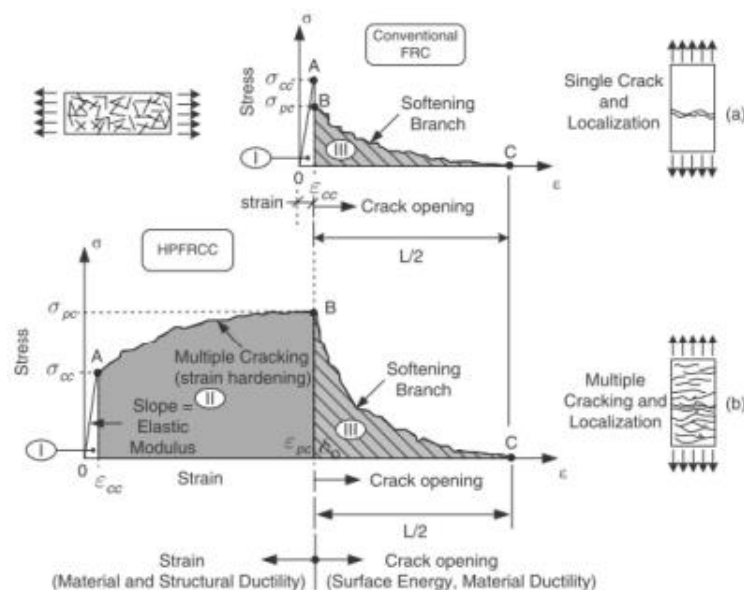
<sup>1</sup> Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No. 94, Bandung 40141

\*Penulis korespondensi: [wperceka@unpar.ac.id](mailto:wperceka@unpar.ac.id)

terjadinya penumpukan tulangan penguat; namun, penambahan dimensi kolom dapat mengurangi area suatu lantai yang tersedia. Oleh karena itu, suatu material alternatif diperlukan untuk dapat ditambahkan ke dalam elemen struktur beton, sehingga suatu elemen struktur beton dapat memiliki kinerja yang baik dan mencapai daktilitas yang ditargetkan tanpa penambahan tulangan penguat yang berlebihan [[6]] [[7]]. Salah satu material alternatif yang dapat digunakan adalah serat. Selanjutnya, beton dengan serat disebut *Fiber Reinforced Concrete* (FRC) atau *Fiber Reinforced Cementitious Composite* (FRCC). Hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan serat ke dalam beton dapat meningkatkan kinerja elemen struktur yang menerima beban gravitasi, meningkatkan kapasitas geser, daktilitas, disipasi energi, dan toleransi kerusakan [[8]].

Jenis serat yang umumnya digunakan di dalam FRC atau FRCC adalah serat yang terbuat dari baja (*steel fiber*), serat berbahan polimer (*polymer fiber*), serat berbahan dasar kaca (*fiber glass*), dan serat berbahan dasar karbon (*carbon fiber*). Menurut Parra-Montesinos, tidak semua FRCC memiliki kinerja yang sama [[8]]. Oleh karena itu, pemilihan material sangat menentukan kinerja elemen struktur FRC atau FRCC [[8]]. Pada tahun 1996, Naaman dan Reinhardt mengklasifikasi FRCC berdasarkan kinerja material saat menerima beban tarik, dan memperkenalkan tipe FRCC baru, yang disebut *High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite* (HPFRCC) [[8]] [[9]].

Gagasan utama dari FRCC baru adalah untuk membedakan antara kinerja FRCC tradisional akibat beban aksial tarik, yaitu terjadinya *tension-softening* setelah retak pertama terjadi, dan perilaku *tensile strain-hardening* dengan penyebaran retak yang ditunjukkan oleh *fiber cement composite* tertentu [[8]] [[9]]. Gambar 1 menunjukkan perbedaan antara FRC atau FRCC tradisional dengan HPFRCC yang menerima beban aksial tarik [[8]] [[9]]. Terlihat pada gambar 1, HPFRCC memiliki kapasitas regangan dan *toughness* yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan FRCC tradisional. Oleh karena itu, HPFRCC dapat diaplikasikan pada elemen - elemen struktur yang direncanakan untuk mengalami deformasi inelastis yang besar [[8]]. Selain itu, perilaku *tensile strain-hardening* pada material HPFRCC dapat tercapai jika volume serat di dalam beton tidak melebihi 2% dan seluruh agregat kasar dieliminasi [[10]]. Di samping keunggulannya, kehadiran serat akan mengurangi *workability* beton segar. Hal tersebut akan memperlambat proses pekerjaan beton di lapangan, khususnya beton dengan rasio air terhadap material sementisius sama dengan atau kurang dari 0,3 [[1]] [[2]] [[10]].



Gambar 1. Tegangan-regangan tarik material HPFRCC dan FRCC tradisional [[10]]

Seiring dengan perkembangan teknologi, pada tahun 2017, Liao dkk. [[10]] mengusulkan *Highly-Flowable Strain Hardening Fiber Reinforced Concrete* (HF-SHFRC) yang merupakan perpaduan *Self-Compacting Concrete* (SCC) dan HPFRCC. Sebelum mengeras, HF-SHFRC memiliki sifat SCC, yaitu dapat mengalir dan memadat sendiri tanpa bantuan alat penggetar (*vibrator*). Selanjutnya, setelah mengeras, HF-SHFRC memiliki perilaku *tensile strain hardening* seperti halnya HPFRCC. Berbeda dengan HPFRCC, agregat kasar dengan jumlah yang dibatasi tetap digunakan untuk membuat HF-SHFRC. Selain itu, material sementisius pensubstitusi semen yang digunakan di dalam HF-SHFRC dapat mencapai 50% [[2]] [[10]]. Beberapa keuntungan dari penggunaan material semestisius pengganti semen adalah untuk meningkatkan workability, meningkatkan kekuatan tekan, dan meningkatkan durabilitas, terutama untuk beton yang terekspos kondisi lingkungan tertentu seperti yang sudah diatur di dalam ACI 318-14 atau SNI 2847-2019 [[11]] [[12]]. Oleh karena itu, material HF-SHFRC dapat dikategorikan sebagai material beton berkelanjutan yang ramah lingkungan jika dibandingkan dengan beton konvensional

Di dalam makalah ini, hasil dari penelitian terpilih yang berkaitan dengan penggunaan HF-SHFRC akan dipresentasikan dengan tujuan untuk menunjukkan potensi penggunaan material tersebut sebagai material elemen struktur tahan gempa. Proporsi campuran material HF-SHFRC yang sudah digunakan oleh peneliti sebelumnya juga akan dipresentasikan di dalam makalah ini. Selanjutnya, pembahasan akan terfokus pada perilaku tarik material HF-SHFRC, struktur kolom yang menerima lateral siklik dan beban aksial tekan, dan hubungan balok-kolom dengan dan tanpa tulangan pengekang.

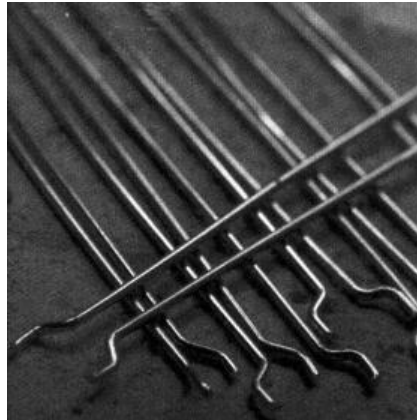
## 2. TENSILE STRAIN-HARDENING HF-SHFRC

Seperti disebutkan sebelumnya, material HF-SHFRC adalah HPFRCC yang sudah dimodifikasi. Pada dasarnya, material HF-SHFRC dan HPFRCC memiliki sifat mekanik yang sama. Di dalam penelitiannya, Liao dkk. menggunakan semen Portland tipe I, abu terbang, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) sebagai material sementisius [[10]]. Total volume agregat di dalam 1 m<sup>3</sup> beton adalah 60%, dengan perbandingan agregat kasar terhadap pasir adalah 1:2,5. Selain itu, *superplasticizer* (SP) digunakan untuk meningkatkan kinerja HF-SHFRC sebelum mengeras. Volume serat yang digunakan di dalam 1 kali pembuatan campuran beton adalah lebih besar dari 1,4% [[10]]. Proporsi campuran beton yang digunakan oleh Liao dkk. dirangkum di dalam Tabel 1. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, jumlah material sementisius pensubstitusi semen dapat mencapai 50%. Selain itu, perlu diketahui bahwa untuk mencapai kekuatan tekan yang lebih tinggi, abu terbang dapat diganti dengan *silica fume* [[2]] [[6]].

Tabel 1. Proporsi campuran beton HF-SHFRC (kg/m<sup>3</sup>) [[10]]

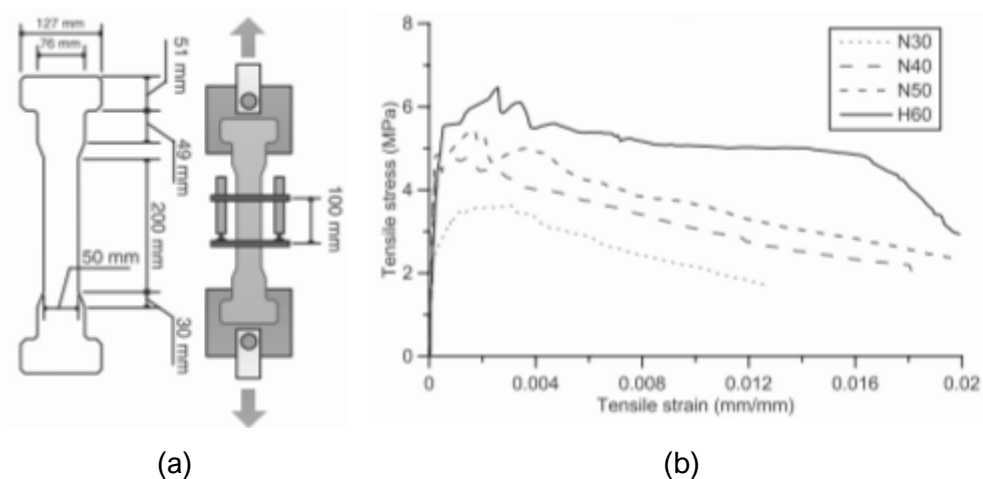
ID	Desain target		Semen	Abu terbang	GGBS	Pasir	Agregat kasar	Air	SP	Serat baja
	Flow diameter (mm)	$f'_c$ (MPa)								
N30	> 500	30	233	200	233	878	413	280	4	118
N40		40	266			899	423	266		
N50		50	366	200	933	439	5			
H60		60			977	455		240		

Jenis serat yang digunakan adalah serat baja yang memiliki kait dikedua ujungnya (*hooked-end steel fiber*), dengan rasio panjang terhadap diameter sebesar 79. Kekuatan tarik ultimit serat baja yang digunakan adalah 2300 MPa. Gambar 2 menunjukkan skematik *hooked-end steel fiber* yang digunakan oleh Liao dkk. [[13]].

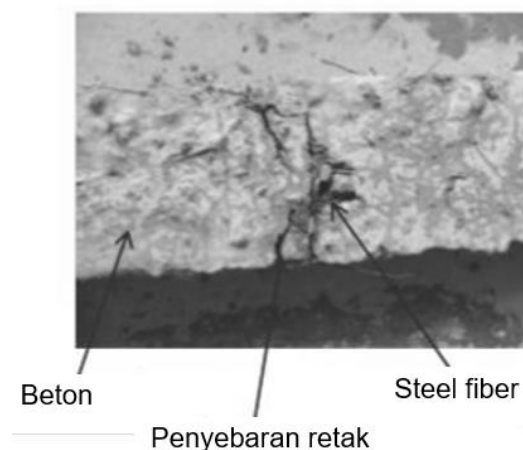


Gambar. 2 Hooked-End Steel Fiber [[13]]

Bentuk, ukuran benda uji, dan perilaku *tensile strain-hardening* hasil penelitian Liao dkk. [[10]] ditunjukkan oleh Gambar 3. Penyebaran retak terus terjadi sampai tegangan puncak paska retak pertama tercapai. Dari ke-empat variasi campuran, semua benda uji dapat mempertahankan tegangan sebesar 80% dari tegangan puncak sampai dengan regangan 0,5%. Selanjutnya, tegangan tarik turun secara perlahan sampai dengan regangan tarik 2%. Gambar 4 menunjukkan pola retak material HF-SHFRC setelah pengujian.



Gambar 3. (a) Geometri dan setup benda uji dog-bone, (b) Kurva tegangan-regangan HF-SHFRC akibat beban tarik [[10]]



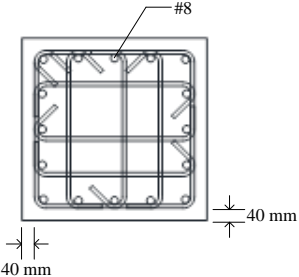
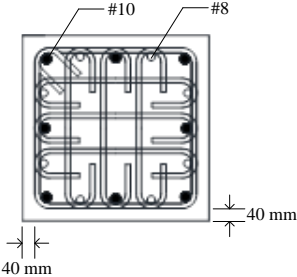
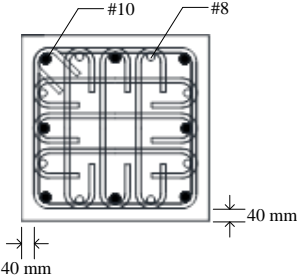
Gambar 4. Pola Penyebaran Retak Material HF-SHFRC [[10]]

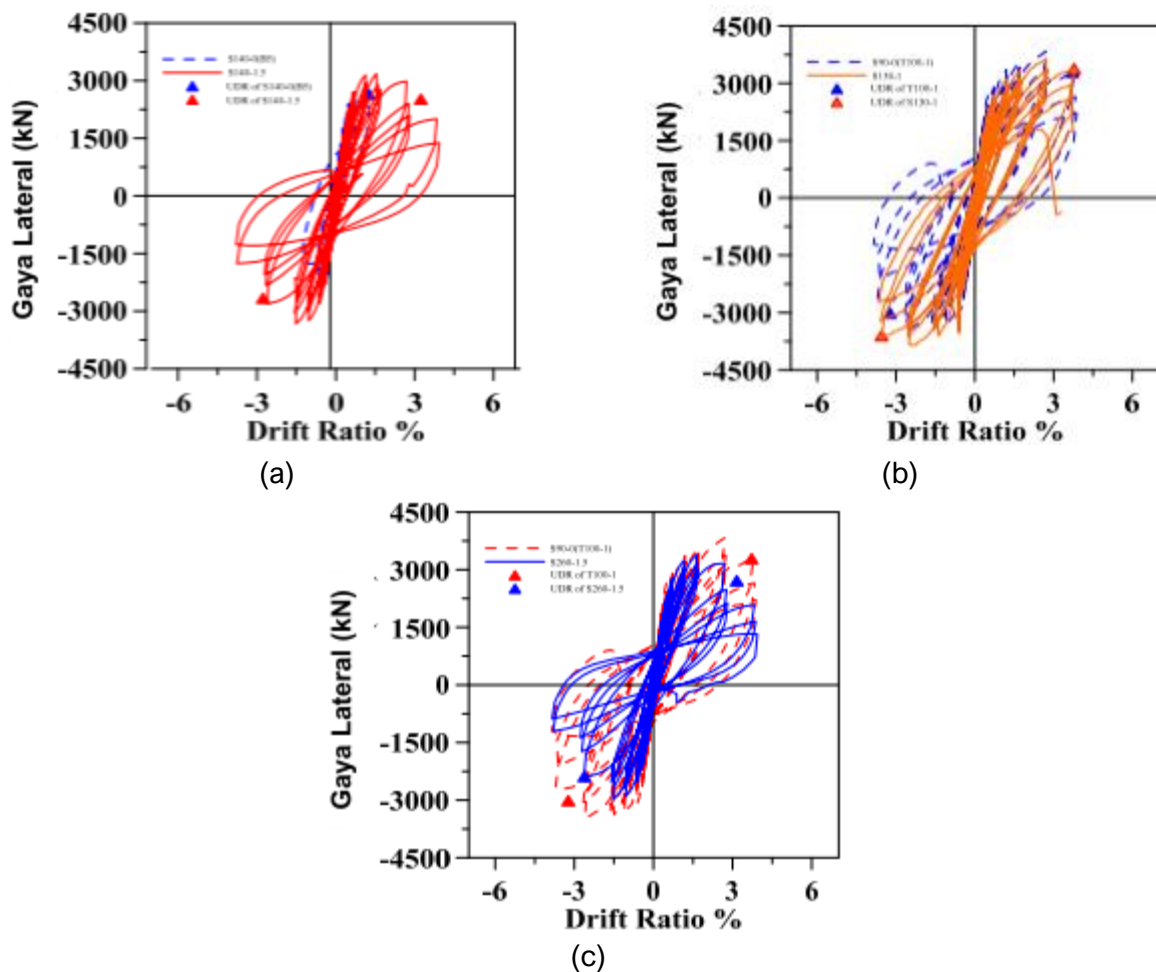
### 3. APLIKASI HF-SHFRC

#### Kolom Beton Mutu Tinggi [[6]]

Penelitian yang dilakukan oleh Perceka dkk. pada tahun 2016 [[6]] adalah mengaplikasikan HF-SHFRC pada kolom beton mutu tinggi yang menerima beban lateral siklik dan beban aksial konstan dengan rasio beban aksial lebih besar dari 0,3. Perceka dkk. [[6]] mempersiapkan tiga kolom beton skala besar yang memiliki penampang persegi dengan ukuran 600 mm x 600 mm. Benda uji pertama yang diberi kode S140-1.5 dibandingkan dengan benda uji yang memiliki kode B5, yaitu benda uji yang tidak menggunakan serat baja. Kedua kolom tersebut direncanakan berdasarkan ACI 318-11 [[14]] atau setara dengan SNI 2847-2013 [[15]]. Kolom dengan material HF-SHFRC, selanjutnya, disebut kolom kedua dan ketiga yang masing-masing memiliki kode S260-1.5 dan S130-1.0. Kedua kolom tersebut akan dibandingkan dengan kolom beton mutu tinggi konvensional yang diberi notasi T100-1. Seperti kolom T100-1, kolom HF-SHFRC S260-1.5 dan S130-1.0 direncanakan berdasarkan ACI 318-14 [[11]] atau setara dengan SNI 2847-2019 [[12]]. Tabel 2 menunjukkan desain benda uji yang digunakan oleh Perceka dkk. [[6]] Ketiga benda uji adalah kolom yang memiliki kelengkungan ganda. Pengujian dilakukan di *National Centre Research on Earthquake Engineering* (NCREE) yang berada di kota Taipei di Taiwan.

Tabel 2. Detail Benda Uji Kolom HF-SHFRC [[6]]

ID	Cross section	$f'_{c,spec}$ [ $f'_{c,test}$ ] in MPa ( $V_f$ [%])	Longitudinal bars SD685 $n-d_{bl}$ ( $f_{yt,test}$ in MPa)	Transverse bars SD785		$\frac{P}{A_g f'_c}$
				$d_{bl}$ ( $f_{yt,test}$ [MPa])	s (mm)	
S140-1.5		70 [63.9] (1.5%)	16D25 (703)	D13 (886)	140	0.57
S130-1.0		100 [81.2] (1%)	8D29 (733), 8D25(724)	D16 (816)	130	0.42
S260-1.5		70 [70.3] (1.5%)	8D29 (699), 8D25(703)	D16 (836)	260	



Gambar 5. Kurva Hubungan Beban Lateral Siklik dan Rasio Simpangan untuk: (a) S140-1.5 VS B5, (b) S130-1.0 VS T100-1, (c) S260-1.5 VS T100-1 [[6]]

Gambar 5 menunjukkan kurva hubungan gaya lateral siklik dengan perpindahan lateral. Komparasi kolom HF-SHFRC S140-1.5 dan kolom beton mutu tinggi konvensional B5 ditunjukkan oleh Gambar 5(a). Kedua kurva siklik yang dipresentasikan oleh gambar 5(a) menunjukkan bahwa kedua kolom memiliki kapasitas lateral yang identik. Namun, kolom B5 mengalami kegagalan secara tiba – tiba yang bersifat getas saat rasio simpangan yang terjadi adalah 1,25%. Tidak seperti kolom B5, kolom HF-SHFRC S140-1.5 masih dapat mencapai rasio simpangan 3.23% dengan penurunan kapasitas lateral sebesar 20%. Kolom HF-SHFRC S140-1.5 mengalami kegagalan saat rasio simpangan mencapai 4%. Studi komparasi kolom HF-SHFRC S140-1.5 dan kolom beton mutu tinggi konvensional B5 menunjukkan bahwa jika suatu kolom tidak memiliki tulangan pengekang yang memadai atau tulangan pengekang dengan spasi yang besar, penggunaan material beton HF-SHFRC dapat meningkatkan kinerja elemen struktur, sehingga kolom tetap dapat memenuhi kriteria kolom untuk bangunan tahan gempa.

Gambar 5(b) menunjukkan komparasi kolom HF-SHFRC S130-1.0 dan kolom beton mutu tinggi konvensional T100-2. Kedua kolom terbuat dari beton mutu tinggi dengan kuat tekan rencana 100 MPa. Akan tetapi, spasi tulangan pengekang dikedua kolom tersebut tidak sama. Kolom HF-SHFRC memiliki tulangan pengekang dengan spasi 130 mm, sedangkan kolom T100-1 memiliki spasi tulangan pengekang 90 mm. Dengan volume serat 1%, kolom HF-SHFRC S130-1 dapat memiliki kinerja yang identik dengan kolom T100-2. Rasio simpangan ultimit kedua kolom tersebut adalah 3,7%. Oleh karena itu, kedua kolom memenuhi kriteria kolom tahan gempa karena mencapai rasio simpangan lebih besar atau sama dengan 3%. Berdasarkan SNI 2847-2019 [[12]], kolom bangunan tahan gempa harus dapat mencapai rasio simpangan lateral lebih besar atau

sama dengan 3%. Selain itu, komparasi kolom HF-SHFRC 130-1.0 dan T100-1 membuktikan bahwa penggunaan material HF-SHFRC S130-1 dapat mengubah sifat getas beton mutu tinggi menjadi lebih daktail.

Komparasi kolom HF-SHFRC S260-1.5 dan T100-2 ditunjukkan oleh Gambar 5(c). Spasi tulangan pengekang kolom HF-SHFRC S260-1.5 adalah spasi maksimum yang diizinkan oleh peraturan SNI 2847-2019 [[12]]. Kapasitas lateral kolom HF-SHFRC S260-1.5 lebih kecil dibandingkan kapasitas lateral kolom T100-1 karena mutu beton rencana kolom HF-SHFRC S260-1.5 adalah 70 MPa. Rasio simpangan lateral kolom HF-SHFRC S260-1.5 dan kolom T100-2 masing – masing adalah 3,16% dan 3,7%. Namun, kapasitas lateral kolom HF-SHFRC S260-1.5 menurun pada saat memasuki siklus ke 2 dan 3 dari rasio simpangan 3,16%. Pada rasio simpangan 4%, perbedaan kapasitas lateral kolom T100-1 dan kolom HF-SHFRC S260-1.5 adalah 50%, dengan kapasitas lateral residual kolom T100-1 lebih besar.

### Hubungan Balok-Kolom Eksterior [[16]]

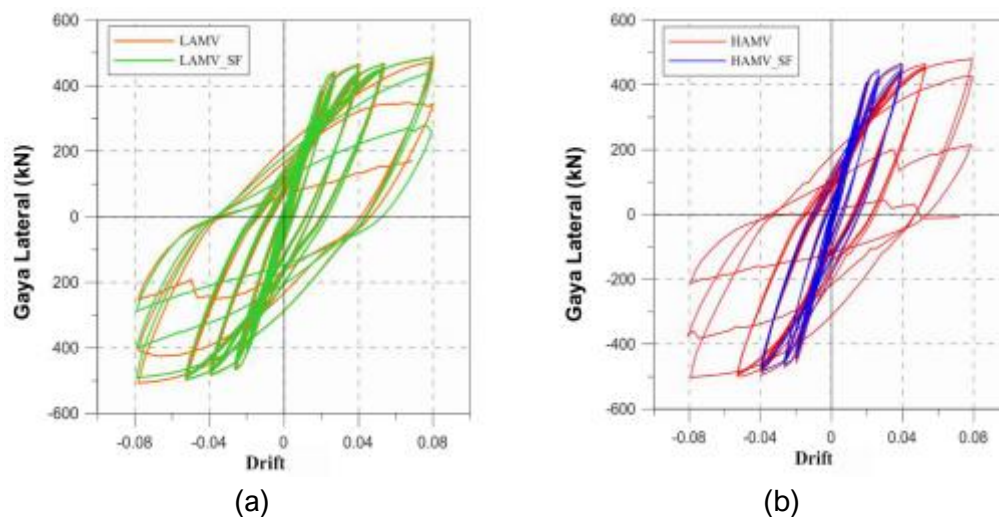
Liao dan Su [16] melakukan studi eksperimental mengenai perilaku hubungan balok-kolom eksterior yang menggunakan material HF-SHFRC. Kolom berpenampang persegi dengan ukuran penampang 600 mm x 600 mm dibuat dengan menggunakan material beton mutu tinggi dengan kuat tekan rencana 70 MPa. Tinggi kolom adalah 2800 mm. Elemen balok memiliki panjang bersih 3500 mm dengan tinggi penampang 700 mm dan lebar penampang 400 mm. Material beton HF-SHFRC hanya diaplikasikan pada hubungan balok-kolom. Tabel 3 menunjukkan desain dan parameter benda uji. LAMV adalah kode benda uji yang menerima beban aksial dengan aksial rasio 0,1, sedangkan HAMV adalah kode benda uji yang menerima beban aksial dengan aksial rasio 0,45. Selanjutnya, simbol SF menerangkan benda uji dengan material HF-SHFRC. Volume serat yang digunakan adalah 1,5%.

Tabel 3. Detail Benda Uji Hubungan Balok-Kolom [[16]]

ID	Elevasi	$A_{sh}/s.b_c$ (%)	$V_f$ (%)	$f'_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_{yt}$ (MPa)	$P/A_g.f'_c$
LAMV		1.0	0	70	685 (D25)	785 (D13)	0.1
LAMV_SF		0	1.5	70	685 (D25)	-	0.1
HAMV		1.0	0	70	685 (D25)	785 (D13)	0.45
HAMV_SF		0	1.5	70	685 (D25)	-	0.45

Kurva hubungan gaya lateral siklik dan rasio simpangan lateral ditunjukkan oleh Gambar 6. Gambar 6(a) menunjukkan kurva gaya lateral siklik dan rasio simpangan lateral benda uji dengan rasio gaya aksial 0,1. Perlu diketahui bahwa tidak terdapat tulangan pengekuat di daerah hubungan balok-kolom benda uji LAMV\_SF. Liao dan Su [[16]] melaporkan bahwa tipe kegagalan kedua benda uji, yaitu LAMV dan LAMV\_SF adalah kegagalan balok (*beam type failure mode*). Oleh karena itu, kurva siklik kedua benda uji tersebut relatif sama. Gaya lateral maksimum benda uji LAMV adalah 487 kN yang dicapai saat rasio simpangan 5,38%. Untuk benda uji LAMV\_SF, gaya lateral maksimum adalah 488 kN dengan rasio simpangan 8%. Tekuk pada tulangan longitudinal balok terjadi saat rasio simpangan 6%, dan kegagalan di daerah sendi plastis terjadi pada rasio simpangan 8%.

Kurva siklik hubungan gaya lateral dan rasio simpangan benda uji yang menerima beban aksial dengan rasio gaya aksial 0,45 ditunjukkan oleh Gambar 6(b). Tipe kegagalan yang terjadi pada benda uji HAMV adalah *beam type failure mode*. Gaya lateral maksimum yang terjadi saat rasio simpangan 7,93% adalah 478 kN. Sampai siklus kedua rasio simpangan 4%, perilaku benda uji HAMV\_SF identik dengan perilaku benda uji HAMV. Namun, saat rasio simpangan 4% siklus kedua sudah tercapai, kegagalan langsung terjadi secara tiba-tiba. Liao dan Su [16] melaporkan bahwa kegagalan yang terjadi dikarenakan tidak terdapat tulangan pengekuat di daerah hubungan balok-kolom. Terlepas dari kegagalan yang terjadi, benda uji HAMV\_SF memenuhi persyaratan yang ditetapkan di dalam ACI 374.



Gambar 6. (a) Kurva siklik benda uji LAMV dan LAMV\_SF, (b) Kurva siklik benda uji LAMV dan LAMV\_SF [[16]]

#### 4. KESIMPULAN

Gambaran umum mengenai material HF-SHFRC dan potensinya untuk diaplikasikan sebagai material elemen struktur yang akan digunakan pada bangunan tahan gempa, sudah dipresentasikan di dalam makalah ini. Selain itu, penggunaan material sementisius pengganti semen untuk pembuatan material HF-SHFRC sudah dipresentasikan, di mana jumlah material sementisius substitusi semen dapat mencapai 50%. Oleh karena itu, material HF-SHFRC dapat dikategorikan sebagai material beton yang ramah lingkungan jika dibandingkan dengan beton konvensional. HF-SHFRC adalah kombinasi SCC dan HPRCC. Akan tetapi, tidak seperti HPRCC, agregat kasar tetap digunakan untuk membuat campuran HF-SHFRC. Sebelum mengeras, HF-SHFRC memiliki sifat SCC, sehingga dapat mengalir dan lebih mudah dipompa jika dibandingkan dengan FRCC konvensional. Selanjutnya, berbeda dengan FRCC konvensional, HPRCC atau HF-SHFRC dapat menunjukkan perilaku *tensile strain-hardening*.

Uji tarik material HF-SHFRC dengan variasi kekuatan tekan beton rencana dan volume serat konstan sebesar 1,5% sudah dilakukan. Penyebaran retak terus terjadi sampai tegangan puncak



paska retak pertama tercapai. Semua benda uji dapat mempertahankan tegangan sebesar 80% dari tegangan puncak sampai dengan regangan 0,5%. Selanjutnya, tegangan tarik turun secara perlahan sampai dengan regangan tarik 1%.

Material HF-SHFRC sudah diterapkan pada tiga kolom beton berskala besar yang memiliki penampang persegi dengan ukuran 600 mm x 600 mm dan menerima lateral siklik dengan beban aksial konstan. Dari perbandingan benda uji S140-1.5 dan B5, serat baja mencegah kolom dari keruntuhan yang bersifat getas, meningkatkan rasio simpangan dan kemampuan elemen dalam mendisipasi energi. Selain itu, keunggulan serat baja untuk mengurangi sifat getas dapat dilihat pada benda uji S130-1.0 yang memiliki kekuatan tekan beton rencana 100 MPa. Selanjutnya, untuk kolom yang memiliki jumlah tulangan pengekuat kurang dari yang disyaratkan oleh peraturan perencanaan beton bertulang, serat baja dapat mensubstitusi tulangan pengekuat, seperti yang terlihat pada benda uji S260-1.5. Walaupun spasi tulangan pengekuat benda uji S260-1.5 adalah spasi maksimum yang disyaratkan oleh SNI 2847-2019 [[12]], keruntuhan yang terjadi tidak bersifat getas.

Dengan menggunakan material HF-SHFRC pada hubungan balok-kolom, tipe kegagalan yang terjadi adalah beam type failure mode, di mana kegagalan ini bersifat daktail. Hal ini terjadi pada benda uji LAMV dan LAMV\_SF, yaitu benda uji yang menerima beban aksial dengan rasio 0,1. Selanjutnya, kegagalan benda uji HAMV adalah beam type failure mode. Berbeda dengan benda uji HAMV, benda uji HAMV\_SF mengalami kegagalan secara tiba-tiba yang diakibatkan tidak tersedianya tulangan pengekuat di dalam hubungan balok-kolom.

Hasil pengujian yang ditinjau dan dipresentasikan di dalam makalah ini menunjukkan bahwa HF-SHFRC dapat menjadi material alternatif yang ramah lingkungan, memenuhi kriteria sebagai material berkelanjutan, dan dapat diaplikasikan untuk elemen-elemen struktur pendisipasi energi pada suatu struktur bangunan tahan gempa. Perilaku *tensile strain-hardening* yang dimiliki oleh HF-SHFRC dapat meningkatkan daktilitas, kemampuan material dalam mendisipasi energi, penyebaran retak, dan meningkatkan toleransi kerusakan. Akan tetapi, terlepas dari keunggulannya, kolom dan hubungan balok-kolom yang terbuat dari beton dengan serat baja (HF-SHFRC atau HPFRCC) masih tetap memerlukan tulangan pengekuat.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan secara khusus kepada PT. Wijaya Karya Beton, Tbk yang telah mendukung terlaksananya penelitian berdasarkan perjanjian kerja sama No. KU.09.09/WB-0A.0002/2021 dan No. III/AU/FT/2021-03/0146-E. Semua tulisan di dalam makalah ini menjadi tanggung jawab penulis dan tidak mencerminkan pandangan sponsor.

## DAFTAR RUJUKAN

- [1] Lee, H.J. dan Chen, J.H. (2014). *Testing of Mechanical Splices for Grade 685 Steel Reinforcing Bars*, TTK Report; NCREE: Taipei, Taiwan, pp. 54–88.
- [2] Perceka, W dan Liao, W-C. (2021). *Experimental Study of Shear Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete Columns*. Engineering Structures. Vol. 240, pp. 1-16.
- [3] Liao, W-C., Perceka, W., dan Wang, M. (2017). *Experimental Study of Cyclic Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns with Different Transverse Reinforcement Detailing Configurations*. Engineering Structures. Vol. 153, pp. 290-301.
- [4] Ou, Y-C dan Kurniawan, D.P. (2015). *Shear Behavior of Reinforced Concrete Columns with High-Strength Steel and Concrete*. ACI Structural Journal, Vol.112, pp. 35–46.
- [5] Ou, Y-C dan Kurniawan, D.P. (2015). *Effect of Axial Compression on Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns*. ACI Structural Journal, Vol. 112, pp. 209–220.
- [6] Perceka, W., Liao, W-C., dan Tseng, L-W. (2016). *Application of Highly-Flowable Strain Hardening Fiber Reinforced Concrete to New RC Columns*. Proceedings of The 11<sup>th</sup> fib

- International PhD Symposium in Civil Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 29-31 August 2016.
- [7] Paultre, P., Eid, R., Langlois, Y., dan Lévesque, Y. (2010). *Behavior of Steel Fiber-Reinforced High Strength Concrete Columns under Uniaxial Compression*. Journal of Structural Engineering, Vol. 136, pp. 1225–1235.
- [8] Parra-Montesinos, G.J. (2005). *High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites: An Alternative for Seismic Design of Structures*. ACI Structural Journal, Vol. 102, pp. 668-675.
- [9] Naaman, A.E., dan Reinhardt, H.W. (1996). *Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites—HPFRCC*. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC 2), Proceedings of the Second International RILEM Workshop, A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, E&FN Spon, London, pp. 1-24.
- [10] Liao, W-C., Perceka, W., dan Yu, L-C. (2017). *Systematic Mix Procedures for Highly Flowable-Strain Hardening Fiber Reinforced Concrete (HF-SHFRC) by Using Tensile Strain Hardening Responses as Performance Criteria*. Science of Advanced Materials, Vol. 9, pp. 1157-1168.
- [11] ACI Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p. 519.
- [12] Standar Nasional Indonesia (SNI 2847:2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2019.
- [13] Parra-Montesinos, G.J., Peterfreund, S.W., dan Chao, S-H. (2005). *Highly Damage-Tolerant Beam-Column Joints Through Use of High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites*. ACI Structural Journal, Vol. 102, pp. 487-495.
- [14] ACI Committee 318. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p. 503.
- [15] Standar Nasional Indonesia (SNI 2847:2013). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2013.
- [16] Liao, W-C dan Su, W-R (2017). *Implementation of Highly-Flowable Strain Hardening Fiber Reinforced Concrete in New RC Beam-Column Joints*. The 3rd International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment, SIBE, Bandung, Indonesia, 26-27 September 2017.