

## Pengaruh *High Volume Fly Ash* (HVFA) Terhadap Kuat Lentur Balok *Self Compacted Concrete* (SCC)

Samuel Salimu<sup>1\*</sup>, Mardin Mendrofa<sup>1</sup>, Berkat S. F. Zalukhu<sup>1</sup>, Anugrah Jaya Telaumbanua<sup>1</sup>, Yosua Emmanuel Zebua<sup>1</sup>, Romanus Halawa<sup>1</sup>, Andi Parlindungan Gea<sup>1</sup>, Sanhedrin Hia<sup>1</sup>, Lince Herni Wulansari<sup>1</sup>, Margeritha Agustina Morib<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta, INDONESIA

\*E-mail: samuel.s2031@student.ukrimuniversity.ac.id

### ABSTRAK

Balok beton bertulang merupakan komponen penahan lentur. Penggunaan *Self Compacted Concrete* (SCC) pada balok meningkatkan kinerja beton segar maupun beton keras. Penggantian semen dengan *fly ash* dilakukan untuk mengurangi jumlah semen sampai 50%. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekakuan, beban retak dan beban maksimum pada balok dengan 100% semen (PC-FA0) dan balok dengan 50% *fly ash* sebagai pengganti semen (HVFA50). Pengujian beton segar sesuai EFNARC 2005. Kuat tekan diuji dengan 3 buah silinder beton pada umur 28 hari. Pengujian lentur menggunakan pembebanan dua titik (*two point loading*) untuk mendapatkan data lentur murni. Balok beton berukuran 15 cm x 20 cm x 320 cm dengan jarak tumpuan 300 cm. Kuat tekan PC-FA0 sebesar 34,39 MPa dan HVFA50 sebesar 38,50 MPa. Hasil uji lentur balok PC-FA0 didapat retak pertama pada beban 1647,5 kg, lendutan 9,05 mm dan kekakuan elastis 182,04 kgf/mm. Beban maksimum sebesar 3272,5 kg, lendutan 21,1 mm dan kekakuan setelah retak 134,85 kgf/mm. Hasil uji HVFA50 diperoleh retak pertama pada beban 1047,5 kg, lendutan 2,6 mm dan kekakuan elastis 402,88 kgf/mm. Beban maksimum sebesar 3497,5 kg, lendutan 21,7 mm dan kekakuan setelah retak 128,27 kgf/mm. Perbandingan hasil analisis dan hasil uji menunjukkan bahwa perhitungan analisis PC-FA0 lebih akurat.

**Kata kunci:** Beton bertulang, Kuat lentur, SCC

### ABSTRACT

*Reinforced concrete beam are a bending holding component. The use of Self Compacted Concrete (SCC) on beams improves performance of fresh concrete and hard concrete. Replacing cement with fly ash is to reduce the amount of cement by 50%. This study aims to determine the stiffness, crack load and maximum load on beams with 100% cement (PC-FA0) and with 50% fly ash as a substitute for cement (HVFA50). Testing of fresh concrete according to EFNARC 2005. Compressive strength was tested with 3 concrete cylinders at the age of 28 days. Bending testing uses two-point loading to obtain pure bending data. The concrete beam measures 15 cm x 20 cm x 320 cm with a base distance of 300 cm. The compressive strength of PC-FA0 is 34.39 MPa and HVFA50 is 38.50 MPa. The results of the PC-FA0 beam bending test were obtained for the first crack at a load of 1647.5 kg, deflection of 9.05 mm and elastic stiffness of 182.04 kgf/mm. The maximum load is 3272.5 kg, deflection is 21.1 mm and stiffness after cracking is 134.85 kgf/mm. The results of the HVFA50 test obtained first crack at a load of 1047.5 kg, deflection of 2.6 mm and elastic stiffness of 402.88 kgf/mm. The maximum load is 3497.5 kg, deflection is 21.7 mm and stiffness after cracking is 128.27 kgf/mm. The comparison of analysis results and test results shows that the calculation of the PC-FA0 analysis is more accurate.*

**Key words:** Reinforced concrete, Flexural strength, SCC

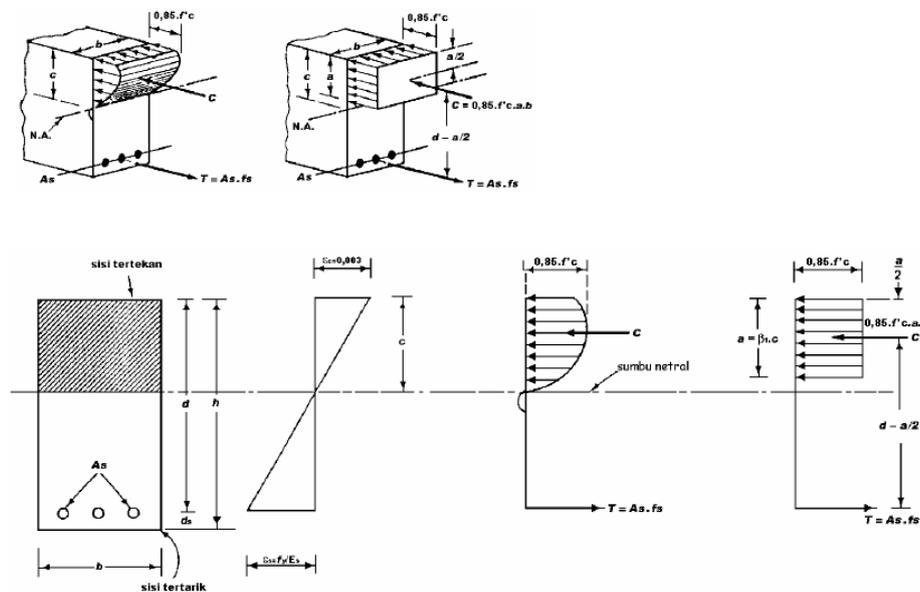
## 1. PENDAHULUAN

Balok beton bertulang adalah elemen struktural yang terdiri dari beton yang diperkuat dengan tulangan. Kombinasi kekuatan tekan beton dan kekuatan tarik tulangan memberikan kekuatan dan kekakuan yang optimal. Kekuatan tarik beton besarnya hanya kira-kira 10% kekuatan tekannya (Stevie Andean, M. D. J. Sumajow, 2015). Oleh karena itu diperlukan baja tulangan untuk memberikan kontribusi terhadap kuat tarik. Balok beton bertulang merupakan elemen penahan lentur. Parameter kekuatan balok ditentukan dari kontribusi tegangan tekan beton, tegangan tekan baja tulangan dan tegangan tarik dari baja tulangan. Parameter kekakuan ditentukan dari besarnya modulus elastisitas, inersia balok serta bentang balok. Penurunan kekakuan balok beton bertulang ditandai dengan lendutan yang semakin besar dan penyebaran retak paska pembebanan.

Balok beton bertulang yang memikul beban berat biasanya memiliki tulangan yang rapat. Diperlukan beton dengan kemampuan mengalir dan memadat serta melewati zona padat tulangan tanpa terjadi segregasi. Pembuatan balok beton

bertulang menggunakan *Self-Compacted Concrete* (SCC) adalah untuk mempermudah pelaksanaan pengecoran. Penggunaan SCC merupakan salah satu solusi produktivitas kerja di bidang konstruksi dalam mengurangi penggunaan tenaga kerja secara efisien dan ekonomis. SCC adalah suatu beton yang ketika masih berbentuk beton segar mampu mengalir melewati tulangan dan memenuhi seluruh ruang yang ada didalam cetakan secara padat tanpa memerlukan proses pemadatan manual atau getaran mekanik (Morib, Telaumbanua and Zebua, 2024). Penggunaan SCC mengakibatkan jumlah semen yang digunakan sangat besar karena *water powder ratio* rendah dan jumlah pasta semen besar untuk memudahkan aliran. Penggantian semen dengan *High Volume Fly Ash* (HVFA) sampai dengan 50% diharapkan dapat mengurangi berat semen dengan tetap menjaga kekuatan beton. Hasil pengujian mortar HVFA dengan 50% *fly ash* sebagai substitusi parsial semen menghasilkan kuat tekan dan aliran mortar lebih tinggi dari pada mortar tanpa *fly ash* pada umur 28 hari. Kenaikan kekuatan mortar HVFA lebih lambat pada umur awal, tetapi berkontribusi besar pada kekuatan akhir (Morib, Telaumbanua and Zebua, 2024). Parameter kekakuan beton adalah modulus elastisitas. Penggunaan HVFA sampai dengan 50% meningkatkan kuat tekan tetapi modulus elastisitas turun sampai dengan 39,91%. Penggunaan HVFA menyebabkan beton menjadi lebih getas (Telaumbanua and Zebua, 2024).

Kuat lentur beton adalah kemampuan beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan pada balok sampai benda uji mengalami patahan. Lentur pada balok maupun pelat diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar. Pertambahan beban mengakibatkan balok mengalami deformasi dan regangan tambahan mengakibatkan retak di sepanjang balok. Semakin banyak beban yang bertambah akan menyebabkan keruntuhan pada elemen struktur (Kurnia Sandy and Yusuf, no date). Menurut (Stevie Andrian, M. D. J. Sumajow, 2015) jenis keruntuhan pada beton dibagi menjadi 3 bagian yaitu keruntuhan tarik (*under-reinforced*), keruntuhan tekan (*over-reinforced*) dan keruntuhan *balance*. Keruntuhan tarik disebabkan karena tulangan baja tarik terlalu sedikit sehingga terjadi pelelehan pada tulangan baja sebelum beton pecah. Keruntuhan tekan terjadi karena jumlah tulangan vertikal terlalu banyak maka terjadi keruntuhan dimulai dari beton sedangkan tulangan bajanya masih elastis. Keruntuhan *balance* terjadi apabila baja dan beton tepat mencapai kuat batasnya yaitu baja tepat mengalami regangan leleh dan regangan beton 0,003 terjadi disaat bersamaan. Asumsi distribusi tegangan dan regangan balok beserta gaya-gaya dalamnya disajikan pada Gambar 1. Kekuatan dan kekakuan lentur balok beton bertulang SCC dengan HVFA diteliti, untuk mengetahui perbandingan hasil antara balok SCC dengan 100% semen dan balok SCC dengan 50% semen 50% *fly ash*.



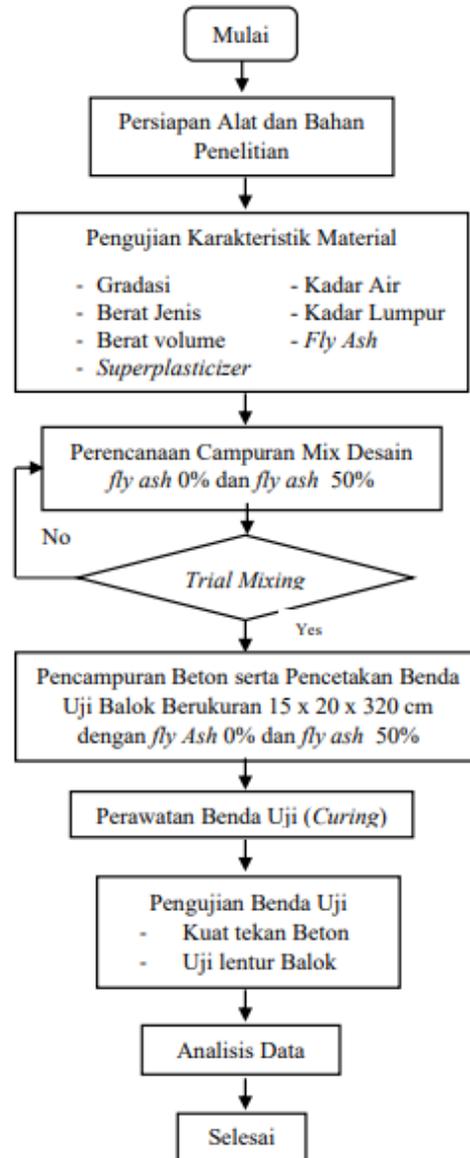
Gambar 1 Asumsi tegangan dan regangan balok beserta gaya-gaya dalamnya (Priyosulistyo, 2022)

## 2. METODE PENELITIAN

Adapun tahapan pelaksanaan dari penelitian yang dilakukan dibagi menjadi beberapa bagian yaitu sebagai berikut :

### 2.1. Bagan Alir Penelitian

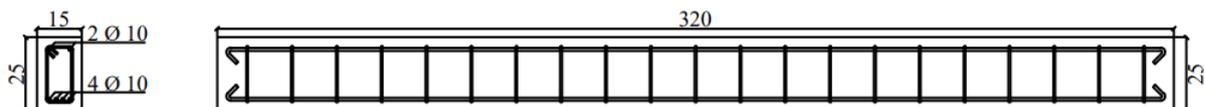
Bagian alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

## 2.2. Benda Uji

Benda uji yang digunakan merupakan balok beton PC-FA0 dan HVFA50 dengan dimensi 15 x 25 x 320 cm menggunakan tulangan polos BJTP 280 Mpa berdiameter 10 mm seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Detail penulangan balok

## 2.3. Pembuatan Benda Uji

Adapun tahapan dalam pembuatan benda uji sebagai berikut:

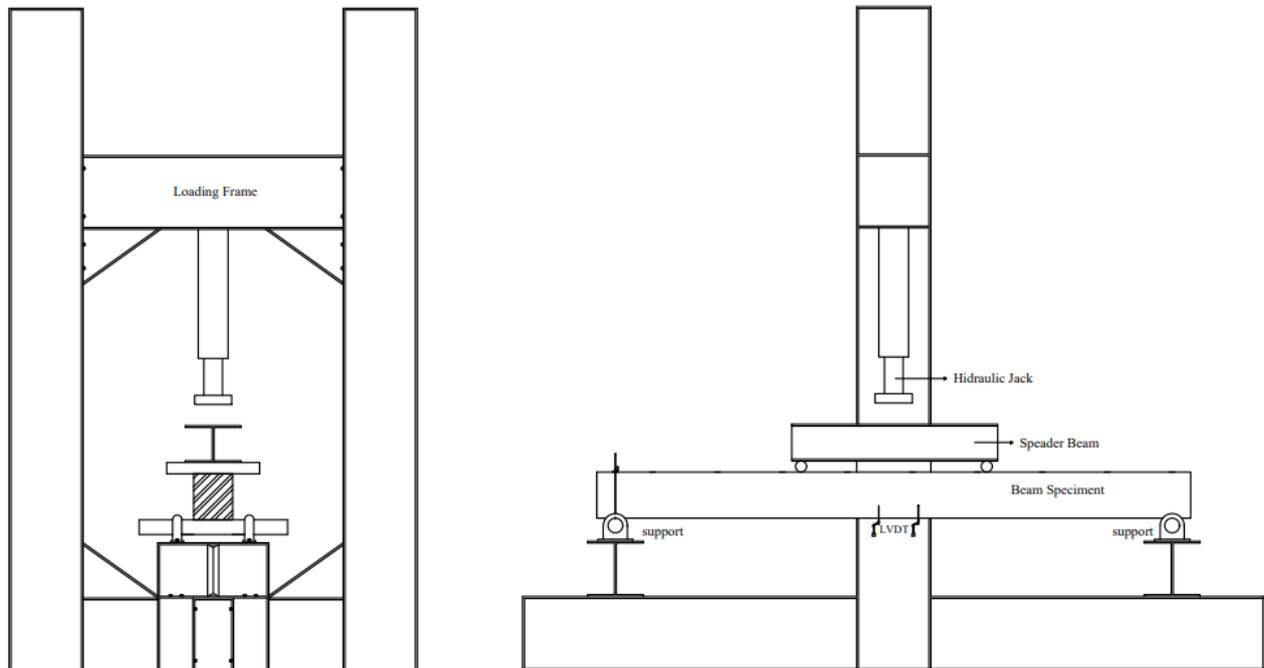
- Persiapan bahan.
- Pembuatan campuran beton.
- Pegujian beton segar SCC sesuai standar EFNARC 2005.
- Pencetakan benda uji balok 15 x 25 x 320 cm untuk pengujian kuat lentur dan pencetakan silinder dengan ukuran 15 x 30 cm untuk uji kuat tekan sebanyak 3 silinder.
- Perawatan benda uji dengan cara perendaman benda uji didalam air.
- Pengujian kuat tekan dan kuat lentur balok

## 2.4. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dilakukan pada beton umur 28 hari dengan jumlah benda uji sebanyak 3 buah benda uji. Tujuan dari pengujian kuat tekan ini yaitu untuk mengetahui kekuatan tekan beton dari hasil *mix design* atau campuran yang telah dibuat sesuai dengan campuran yang telah direncanakan.

## 2.5. Pengujian Kuat Lentur

Pembebanan pengujian kuat lentur menggunakan beban di dua titik (*two point loading*) untuk mendapatkan momen maksimum dan perilaku keruntuhan akibat lentur murni sesuai (SNI 4431, 2011). *Set up* pengujian disajikan Gambar 4.



Gambar 4. *Set up* pengujian kuat lentur balok beton

## 2.6. Analisa Balok Beton Bertulang

Analisa dilakukan untuk memastikan apakah tulangan yang direncanakan *underreinforced* atau *overreinforced* juga untuk mendapatkan data regangan yang terjadi pada tulangan baja tarik. Prosedur analisis sesuai (SNI 2847, 2019) disajikan pada persamaan di bawah ini.

- Menetapkan nilai  $\beta_1 = 0,85$  untuk  $f'_c \leq 28$  MPa atau  $\beta_1 = 0,85 - 0,05(f'_c - 28)/7$  untuk  $f'_c > 28$  MPa dan  $\beta_1 \geq 0,65$ .
- Menghitung tinggi blok tekan beton pada kondisi *balance*  $a_b = \beta_1 \frac{600d}{(600+f_y)}$ .
- Menghitung tinggi blok tekan beton sesuai persamaan keseimbangan gaya  $C_c = T_s$ , dan menganggap bahwa tulangan tarik sudah leleh, maka didapat  $a = \frac{A_{st}f_y}{(0,85f'_c \cdot b)}$ .
- Membandingkan nilai  $a$  dengan  $a_b$ , bila  $a < a_b$  maka tulangan terpasang akan menghasilkan penulangan liat/*ductile* tetapi sebaliknya akan menghasilkan tulangan getas.
- Menghitung momen nominal balok melalui persamaan  $M_n = 0,85 f'_c b a (d - \frac{1}{2}a) \rightarrow M_u \leq \phi M_n$ .
- bila  $a > a_b$  maka langkah c) dan d) di atas salah dan hitungan  $a$  diulang dengan menganggap tulangan tarik tidak leleh maka regangan baja pada tulangan tarik  $\epsilon_s = \frac{0,003(d-c)}{c}$ .
- Melalui persamaan keseimbangan gaya  $C_c = T_s$  maka  $a = \frac{A_{st}f_s}{0,85f'_c \cdot b}$ .
- $a = \frac{A_{st}(E_s \epsilon_s)}{0,85f'_c \cdot b} = \frac{A_{st}600\beta_1(d - \frac{a}{\beta_1})}{a0,85f'_c \cdot b} = \frac{A_{st}600(\beta_1 d - a)}{a0,85f'_c \cdot b}$   
 $(0,85f'_c \cdot b)a^2 + (A_{st}600)a - (A_{st}600\beta_1 d) = 0 \rightarrow a$  dapat dihitung  $\rightarrow c = \frac{a}{\beta_1}$
- Kontrol regangan baja tarik  $\epsilon_s = \frac{0,003(d-c)}{c} < \frac{f_y}{E_s}$ .
- Kemampuan nominal balok dapat dihitung melalui persamaan  $M_n = 0,85 f'_c b a (d - \frac{1}{2}a) \rightarrow M_u = \phi M_n$ .

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil uji Karakteristik Material

Hasil pengujian karakteristik material disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian karakteristik material

Karakter Material	Material					
	Semen	Air	<i>Fly ash</i>	SP	Pasir	Kerikil
Berat satuan (kg/m <sup>3</sup> )	1250	1000	-	-	1480	1550
Berat jenis	3,15	1	2,63	2,34	2,7	2,5
Gradasi	-	-	-	-	II	-
MHB	-	-	-	-	3,82	6,24
Penyerapan air (%)	-	-	-	-	1,01	3,73
Volume rongga (%)	-	-	-	-	45	55

#### 3.2. Hasil rancangan campuran beton

Berdasarkan data uji karakteristik material dilakukan pembuatan rancangan campuran untuk balok PC-FA0 dan HVFA50. Hasil rancangan campuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi campuran balok beton PC-FA0 dan HVFA50

Kode Benda Uji	Berat Material per 1 m <sup>3</sup> SCC (kg)					
	Semen	Air	<i>Fly ash</i>	SP	Pasir	Kerikil
PC-FA 0	576,8	205,5	0	10,4	739,7	818,3
HVFA50	275,7	196,5	275,7	9,9	739,6	828,32

#### 3.3. Pengujian beton segar SCC

Campuran beton segar diuji menggunakan alat uji *slump flow*, *L-box*, *V-funnel* dan *segregation resistance* untuk mengetahui kinerja SCC. Hasil uji beton segar disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian beton segar

Kode	Kamampuan	Pengujian	Standar EFNARC 2005	Hasil Uji	Kelas SCC
PC-FA0	<i>Fillingability</i>	<i>Slump flow</i>	550-850 (mm)	272,5 mm	TM
	<i>Passingability</i>	<i>L-box</i>	0,8	0	TM
	<i>Viscosity</i>	<i>V-funnel</i>	8-25 (detik)	52 detik	TM
	<i>Segregation resistance</i>	<i>Sieve Segregation</i>	15-20 (%)	7,5%	SR2
HVFA50	<i>Fillingability</i>	<i>Slump flow</i>	550-850 (mm)	642,5 mm	SF1
	<i>Passingability</i>	<i>L-box</i>	0,8	0,85	PA2
	<i>Viscosity</i>	<i>V-funnel</i>	8-25 (detik)	17 detik	VF2
	<i>Segregation resistance</i>	<i>Sieve Segregation</i>	15-20 (%)	2,71%	SR2

Benda uji PC-FA0 tidak memenuhi syarat sebagai SCC meskipun telah menggunakan *superplasticizer*. Kemampuan alir, kemampuan melewati rintangan dan kecepatan aliran beton sangat rendah namun memiliki ketahanan terhadap segregasi tinggi. Penggantian semen dengan 50% *fly ash* meningkatkan kinerja beton segar dengan sangat signifikan. Kemampuan aliran memenuhi kelas SF1 dengan diameter aliran beton mencapai 642,5 mm. *Passing ratio* melewati 3 buah rintangan batang tulangan mencapai 85% dan kecepatan aliran beton meningkat drastis. Jumlah *laitance* yang tertahan pada pengujian *sieve segregation* juga sangat sedikit yaitu sebesar 2,71% yang mengindikasikan material beton sangat homogen dan tidak ada kemungkinan terjadinya segregasi maupun *bleeding* pada beton.

#### Pengujian Kuat Tekan

Hasil uji kuat tekan silinder digunakan untuk mewakili balok yang diuji. Hasil pengujian kuat tekan beton silinder untuk PC-FA0 dan HVFA50 disajikan pada Tabel 4.

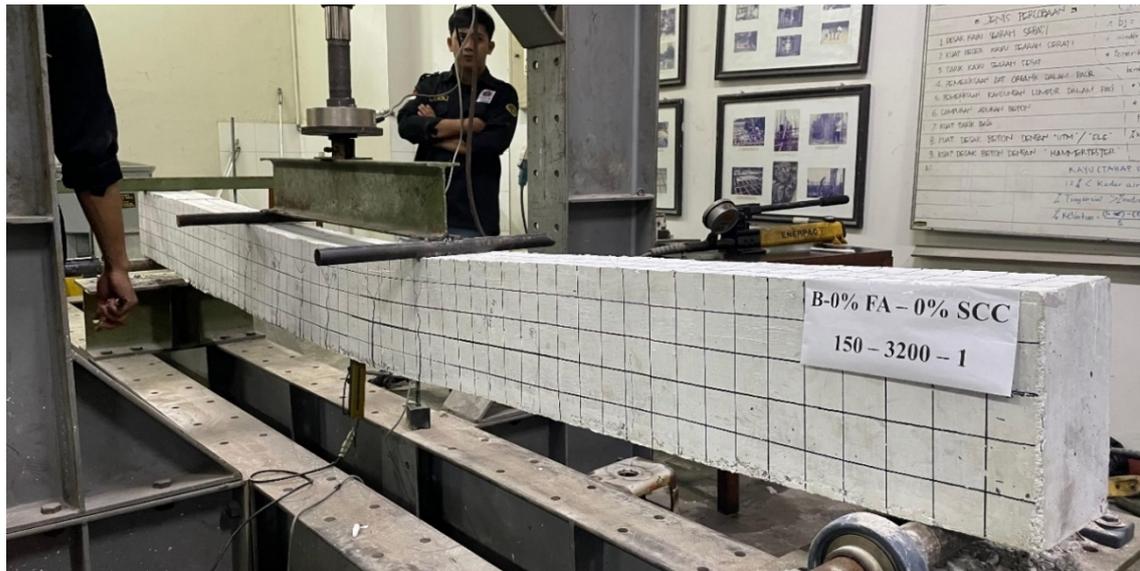
Tabel 4. Hasil pengujian kuat tekan silinder

No	Kode benda uji	Kuat tekan (Mpa)
1	PC-FA0	34,39
2	HVFA50	38,50

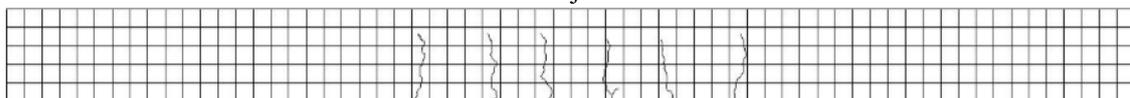
HVFA50 memiliki kuat tekan 38,50 Mpa. Nilai tersebut lebih tinggi dari menggunakan 100% semen yaitu sebesar 34,39 MPa. Ini menunjukkan bahwa *fly ash* dapat berperan sebagai bahan pengganti sebagian semen yang efektif dalam meningkatkan performa mekanis beton, sekaligus mendukung upaya pengurangan emisi karbon di industri konstruksi. Kandungan silika dan alumina yang tinggi menjadikan *fly ash* sebagai bahan pozzolan yang jika dicampur dengan semen dapat bereaksi dengan  $\text{Ca(OH)}_2$  hasil sampingan dari reaksi hidrasi semen dan air dan menghasilkan perekat dengan sifat sementius yang baik (Nurfaizi, Setiya Budi and Adi Kristiawan, 2019). Meskipun bereaksi lebih lambat, namun menghasilkan kuat tekan lebih tinggi pada umur 28 hari.

### 3.4. Pengujian Kuat Lentur

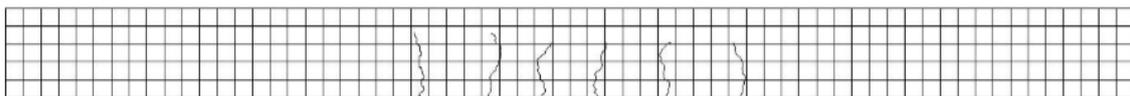
Pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Bangunan Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta. Dokumentasi pengujian dan retak yang terjadi pada balok disajikan pada Gambar 5 dan 6.



a. Hasil laboratorium uji lentur balok PC-FA0



b. Sketsa retak tampak Depan

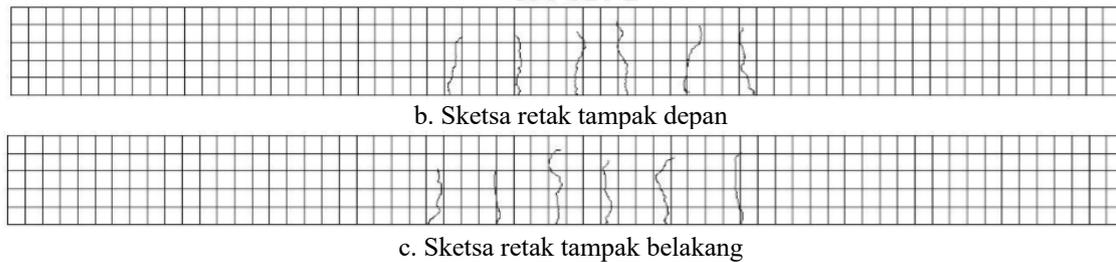


c. Sketsa retak tampak belakang

Gambar 5. Retak pasca pengujian lentur benda uji PC-FA0

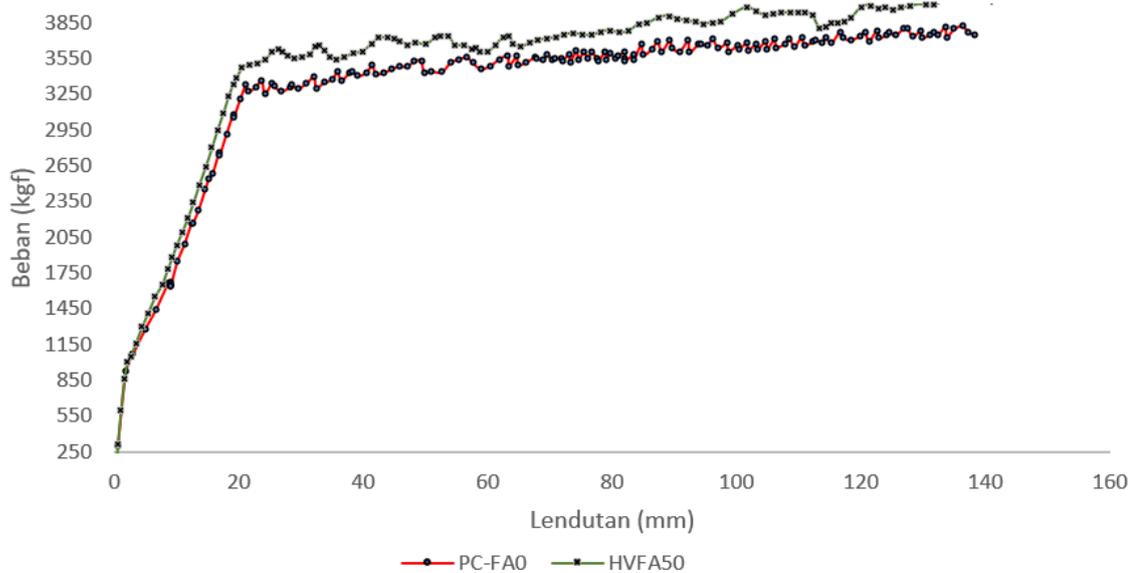


a. Hasil laboratorium uji lentur balok HFVA50



Gambar 6. Retak pasca pengujian lentur benda uji HVFA50

Gambar 5 dan 6 menunjukkan mekanisme keretakan yang terjadi pada balok beton. Retak pertama terjadi tepat di bawah beban mulai dari bawah balok yang mengalami tegangan tarik terbesar kemudian merambat ke atas dan dilanjutkan kemunculan retak-retak berikutnya. Keseluruhan retak terjadi di zona lentur, diawali dengan retak rambut yang kemudian membesar dengan lebar retak maksimum mencapai 11 mm di akhir pengujian. Perilaku balok beton sebelum dan setelah retak dapat dilihat pada kurva hubungan beban lendutan yang terekam selama proses pengujian. Rekaman data diperoleh dari *data logger* yang merekam beban dari bacaan *load cell* dan lendutan dari bacaan LVDT. Kurva hubungan beban lendutan menunjukkan titik di mana terjadi perubahan kemiringan kurva saat balok mengalami retak pertama dan mengindikasikan terjadinya perubahan kekakuan pada balok pasca retak sampai mengalami beban maksimum. Setelah beban maksimum terlampaui, tidak terdapat perubahan beban yang signifikan namun lendutan balok terus bertambah. Gambar 7 merupakan kurva beban lendutan untuk benda uji dengan PC-FA0 dan HVFA50.



Gambar 7. Kurva beban lendutan PC-FA0 dan HFVA50

Retak pertama PC-FA0 terjadi pada beban 1647,5 kg dengan lendutan 9,05 mm dengan kekakuan elastis sebesar 182,04 kgf/mm. Setelah retak kekakuan berkurang menjadi sebesar 134,85 kgf/mm sampai mencapai beban maksimum pada beban 3272,5 kg dengan lendutan 21,1mm. Pada balok HVFA50, retak pertama terjadi pada beban 1047,5 Kg dan lendutan sebesar 2,6 mm. Kekakuan elastis sebesar 402,88 kgf/mm lebih kaku dari pada PC-FA0. Kekakuan balok berkurang menjadi 128,27 kgf/mm setelah retak. Nilai ini lebih kecil dari PC-FA0. Beban maksimum sebesar 3497,5 kg dengan lendutan sebesar 21,7 mm. Kekakuan HVFA sebelum retak lebih tinggi, namun setelah mengalami retak kekakuannya jauh berkurang. Hal ini disebabkan karena penggantian semen dengan *fly ash* sampai dengan 50% meningkatkan kuat tekan namun modulus elastisnya berkurang. Secara keseluruhan HVFA50 memberikan kinerja yang lebih baik dari pada PC-FA0. Keretakan pada benda uji setelah pengujian lentur disajikan pada Gambar 6 dan 7.

### 3.5. Perbandingan Hasil Analisis dan Hasil Pengujian Laboratorium

Perhitungan manual dan hasil pengujian laboratorium dibandingkan dan hasilnya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan perhitungan analisis dan hasil laboratorium

Keterangan	PC-FA0		HVFA50		Satuan
	Analisis	Pengujian	Analisis	Pengujian	
$\beta_1$	0,799	-	0,773		
Tinggi blok tekan kondisi <i>balance</i> ( $a_b$ )	107,359	-	103,828		mm
Luas tulangan terpasang ( $A_{st}$ )	314,159	-	314,159		mm <sup>2</sup>
Tinggi blok tekan beton ( $a$ )	19,656	-	17,791		mm
Jarak serat tekan terluar ke garis netral ( $c$ )	24,592	-	23,015		mm
$a < a_b$	<i>Ductile beam</i>		<i>Ductile beam</i>		
Beban saat retak ( $P_{cr}$ )	-	16475	-	10475	N
Lendutan retak ( $\delta_{cr}$ )		9,05		2,6	mm
Momen retak ( $M_{cr}$ )		8237500		5237500	Nmm
Beban Uji Maksimum ( $P_u$ )		32725		34975	N
Lendutan maksimum ( $\delta_u$ )		21,1		21,7	mm
Momen kapasitas balok ( $M_n$ )	16464681,19	-	16546933,99	-	Nmm
Momen akibat beban ( $M_u$ )	-	16362500	-	17487500	Nmm

Perbandingan hasil perhitungan analisis dan pengujian menunjukkan bahwa perhitungan analisis sangat akurat untuk memperhitungkan momen kapasitas balok PC-FA0 mendekati hasil pengujian dengan selisih perhitungan 0,62%. HVFA50 memberikan selisih hasil 5,7% antara perhitungan analisis dan hasil pengujian. Momen maksimum akibat beban yang mampu ditahan oleh balok HVFA50 sebesar 17487500 Nmm lebih besar dari momen kapasitas balok.

#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- HVFA50 memberikan kinerja yang lebih baik dari pada PC-FA0.
- Kekakuan elastis balok PC-FA0 sebesar 182,04 kgf/mm dan kekakuan setelah retak turun menjadi 134,85 kgf/mm. Kekakuan elastis balok HVFA50 sebesar 402,88 kgf/mm dan kekakuan setelah retak turun menjadi 128,27 kgf/mm.
- Retak PC-FA0 terjadi pada beban 1647,5 kgf dengan momen retak sebesar 8237500 Nmm. Beban maksimum sebesar 32725 kgf menghasilkan momen maksimum sebesar 16362500 Nmm, mendekati perhitungan kapasitas balok hasil analisis dengan selisih 0,62%. Retak HVFA50 terjadi pada beban 1047,5 kgf dengan momen retak sebesar 5237500 Nmm. Beban maksimum sebesar 34975 kgf menghasilkan momen maksimum sebesar 17487500 Nmm dengan selisih 5,7% dari hasil perhitungan kapasitas balok.
- Perhitungan analisis balok beton bertulang akurat untuk penggunaan 100% semen sedangkan untuk penggunaan material pengganti semen dalam volume besar, prosedur perhitungan kapasitas balok perlu dikaji lebih lanjut.

#### DAFTAR PUSATAKA

- BSN (2019) 'Sni-2847-2019-Persyaratan-Beton-Struktural-Untuk-Bangunan-Gedung-1'.
- Kurnia Sandy, Y. And Yusuf, M. Kajian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Pasca Pembakaran Berdasarkan Variasi Mutu Dan Suhu.
- Morib, Margeritha.A., Telaumbanua, Anugrah.J. And Zebua, Yosua.E. (2024) 'Perancangan Mortar Sebagai Media Alir Agregat Kasar Dalam Scc Menggunakan Fly Ash sebagai Substitusi Parsial Semen', In Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil Xiii. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta, Pp. 9–16.
- Nurfaizi, E., Setiya Budi, A. And Adi Kristiawan, S. (2019) Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang High Volume Fly Ash (Hvfa) Memadat Sebdiri Dengan Kadar Fly Ash 60% Terhadap Beton Normal. Surakarta.
- Priyosulistyo, H. (2022) Perancangan Dan Analisis Struktur Beton Bertulang 1. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Sni 4431, B.S.N. (2011) 'Sni 4431-2011 Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan', Badan Standar Nasional Indonesia [Preprint].
- Stevie Andrean, M. D. J. Sumajow, R.S.W. (2015) 'Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Ratio Tulangan Tarik', Jurnal Sipil Statik Maret, 3(3).
- Telaumbanua, A.J. And Zebua, Y.E. (2024) Prosedur Perancangan Mix Desain Menggunakan Fly Ash Sebagai Substitusi Parsial Semen Dan Karakteristik Teknik Scc. Skripsi. Universitas Kristen Immanuel.