

KAJIAN PERILAKU EKSPERIMENTAL – ANALISIS FEM BALOK BETON BERTULANG BERSERAT BAJA SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN TULANGAN GESER

Muhamad Ryanto¹, Antonius Amir², Prabowo Setiawan³

Universitas Sangga Buana YPKP Bandung, Indonesia¹

Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia^{2,3}

Email: mryanto2000@gmail.com¹

Abstrak

Kekuatan kapasitas geser balok beton dapat ditingkatkan dengan penggunaan serat baja tipe ujung bengkok pada campuran beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat baja dengan tipe ujung bengkok pada beton terhadap kapasitas geser balok beton bertulang. Pembuatan benda uji dibuat berupa balok bertulangan dengan/tanpa tulangan sengkang. Variabel-variabel yang digunakan : rasio air/semen ($w/c = 0.50$), dan volume serat (V_f) = 0.0%, 0.5%, 1.0% dan 2%. Hasil penelitian diperoleh bahwa kekuatan kapasitas geser balok yang diperkuat serat lebih besar daripada kekuatan balok beton polos dan cenderung meningkat seiring dengan penambahan serat baja pada kandungan beton seiring dengan peningkatan jumlah fraksi volume serat. Perbandingan data eksperimental dan model analisis kekuatan menunjukkan bahwa model analitis dapat memprediksi efek w/c , V_f , dan kontribusi tulangan baja longitudinal dan transversal secara memadai. Hasil beban ultimit yang diperoleh pada analisis model FE nilai gaya geser ultimit secara keseluruhan lebih rendah dibanding dengan hasil eksperimen. Bentuk pola keretakan/keruntuhan yang didapati hasil analisis model FE terlihat tidak jauh beda dengan hasil eksperimen.

Kata kunci: Kekuatan geser balok beton, Serat baja ujung bengkok, Rasio air/semen

Abstract

The shear capacity strength of concrete beams can be improved by the use of bent end type steel fibers on the concrete mixture. This study aims to evaluate the effect of adding steel fibers with bent end type on concrete on the shear capacity of reinforced concrete beams. The manufacture of test pieces is made in the form of reinforced beams with/without rebar. The variables used: water/cement ratio ($w/c = 0.50$), and fiber volume (V_f) = 0.0%, 0.5%, 1.0% and 2%. The results of the study obtained that the strength of the shear capacity of fiber-reinforced beams is greater than the strength of plain concrete beams and tends to increase along with the addition of steel fibers to the concrete content along with the increase in the number of fiber volume fractions. Comparison of experimental data and strength analysis model shows that the analytical model can adequately predict the effects of w/c , V_f , and contribution of longitudinal and transverse steel reinforcement. The results of the ultimate load obtained in the FE model analysis showed that the overall ultimate shear force value was lower than the experimental results. The shape of the crack/collapse pattern found by the analysis of the FE model does not look much different from the experimental results.

Keywords: Shear strength of concrete beams, Steel fiber bent ends, Water/cement ratio

Pendahuluan

Dalam konstruksi, beton adalah sebuah bahan bangunan komposit yang terbuat dari kombinasi agregat dan pengikat semen (BASRI, 2019). Bentuk paling umum dari beton adalah beton semen portland dibuat dengan bahan campuran yang terdiri dari kombinasi agregat mineral (biasanya agregat kasar dan halus berupa batu pecah/kerikil dan pasir), semen dan air. Beton memiliki karakteristik dengan kuat tekan yang tinggi tetapi lemah dalam kuat tarik dan cenderung memiliki sifat getas (*brittle*) (Arslan et al., 2017). Kelemahan dalam kuat tarik dapat diatasi dengan menggunakan serat (*fiber*) konvensional dan sampai batas tertentu dengan memasukkan volume serat tertentu yang cukup. Jadi penggunaan serat dapat mengubah perilaku komposit serat-matriks setelah retak, sehingga meningkatkan ketangguhannya (*toughness*) (Setiadji et al., 2020).

Beton berserat baja - Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) adalah matriks beton dengan komposisi campuran beton yang mengandung serat baja diskontinyu berorientasi acak (Demakos et al., 2021). Penggunaan material ini sudah banyak dipakai sebagai serat pengisi material beton bertulang. Penggunaan serat baja memiliki kekuatan serta modulus elastisitas yang relatif tinggi. Selain itu serat baja tidak mengalami perubahan bentuk terhadap pengaruh alkali dalam semen. Pembebanan dalam jangka waktu yang lama tidak berpengaruh terhadap sifat mekanikal dari serat baja. Ikatan dalam komposisi campuran dapat meningkat karena ikatan lekatan secara mekanikal (Hafedh & Hassan, 2019). Kelemahan yang dimiliki dari serat baja ini adalah terjadinya korosi apabila serat tidak dalam posisi terlindung dalam beton. Selain itu serat baja akan menambah berat beton.

Penggunaan serat baja merupakan dasar penguatan matriks beton untuk tegangan tarik (Saputra, 2016) (Zhao et al., 2018). Distribusi serat sebagai kesatuan campuran dalam beton mengarah ke perilaku yang lebih baik karena mereka mengurangi sifat getas elemen. Sebagai konsekuensi dari penggunaan serat baja, memiliki kapasitas ketangguhan yang lebih besar pada material komposit karena mereka dapat menyerap energi sebelum mencapai kegagalan elemen dan keruntuhannya. Penambahan serat baja pada beton membantu mengubah sifat getas menjadi daktail. Hal ini disebabkan oleh serat tersebut terdistribusi secara merata dan berorientasi secara acak ke segala arah dalam massa beton (Hameed & Al-Sherrawi, 2018).

Dengan mempertimbangkan kontribusi utama yang dimiliki serat baja, akan lebih mudah untuk dikaji perilaku balok pada tegangan geser balok beton bertulang serat; tegangan ini juga dikenal sebagai tegangan tarik diagonal, yang berada di area tumpuan balok (Fombrun, 2018). Tegangan geser menyebabkan keruntuhan mendadak jika tulangan transversal pada beton (sengkang) tidak mencukupi, dan keruntuhan ini biasanya terjadi dengan beban eksternal yang lebih kecil daripada keruntuhan lentur (Mutiar Insani, 2020). Oleh karena itu, dengan mempertimbangkan penggunaan serat baja sebagai perkuatan alternatif untuk geser, dapat mencegah kegagalan mendadak dan meningkatkan kekuatan ultimit, dan akan lebih mudah untuk membuat prosedur teoretis untuk memprediksi kekuatan tersebut dengan membandingkan dengan data eksperimen, sehingga akan dapat mengidentifikasi kontribusi serat dan juga rumusan formula yang dapat digunakan sebagai perencanaan desain (Juárez-Alvarado et al., 2021).

Penggunaan beton bertulang serat baja (SFRC) meningkat di banyak negara karena sifat material dan strukturnya yang lebih baik dibandingkan dengan beton biasa dan bahkan beton bertulang konvensional dengan fraksi volume baja yang sama. Untuk penggunaan beton bertulang serat baja belum banyak digunakan secara konstruksi, mengingat standard penggunaan serat belum banyak distandardkan secara baku. Komite

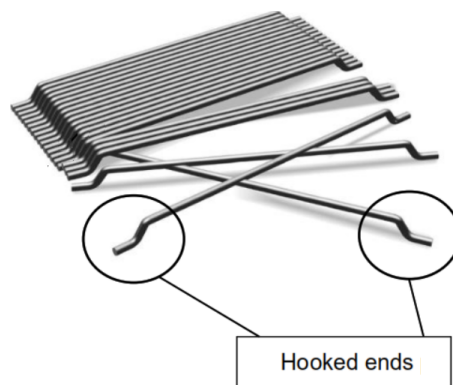
menyarankan bahwa pekerjaan tersebut belum selesai dan upaya penelitian berkelanjutan diperlukan untuk meningkatkan metode pengujian dan pelaporan untuk SFRC. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat baja dengan tipe ujung bengkok pada beton terhadap kapasitas geser balok beton bertulang. Penelitian ini juga bertujuan untuk membandingkan hasil eksperimental dengan model analitis menggunakan pendekatan Finite Element Model (FEM) dalam perangkat lunak SAP2000. Secara khusus, penelitian ini ingin menganalisis kontribusi fraksi volume serat baja terhadap kekuatan geser balok beton, baik dengan maupun tanpa tulangan geser (sengkang), dan memberikan rekomendasi desain struktural yang lebih efisien berbasis penguatan serat baja.

Penelitian ini menawarkan inovasi dalam mengintegrasikan penggunaan serat baja sebagai alternatif parsial pengganti tulangan geser tradisional pada balok beton bertulang. Pendekatan penelitian ini menggunakan kombinasi analisis eksperimental dan simulasi FEM untuk memahami pola retak, distribusi tegangan, dan kekuatan ultimit balok beton berserat. Selain itu, penelitian ini menyediakan validasi empiris terhadap model analitis yang dapat memprediksi kekuatan geser balok SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete). Dengan demikian, penelitian ini memberikan landasan ilmiah bagi pengembangan standar desain struktural berbasis beton berserat baja di industri konstruksi.

Dalam penelitian ini, balok RC yang terbuat dari beton polos dan SFRC dimodelkan dalam platform model FEM linier sederhana dengan bantuan SAP2000 v.24 untuk menyelidiki dan mengevaluasi perilaku geser dan lentur serta distribusi tegangan. Beton SFRC dimodelkan dengan mengoptimalkan parameter beton yang relevan, yaitu, modulus elastisitas, hubungan tegangan-regangan tekan, kepadatan, kekuatan tarik, koefisien transfer geser untuk retak terbuka dan tertutup. Model-model ini akan membantu untuk memprediksi perilaku struktur RC yang terbuat dari SFRC yang mungkin berguna untuk industri konstruksi lanjutan.

Metode Penelitian

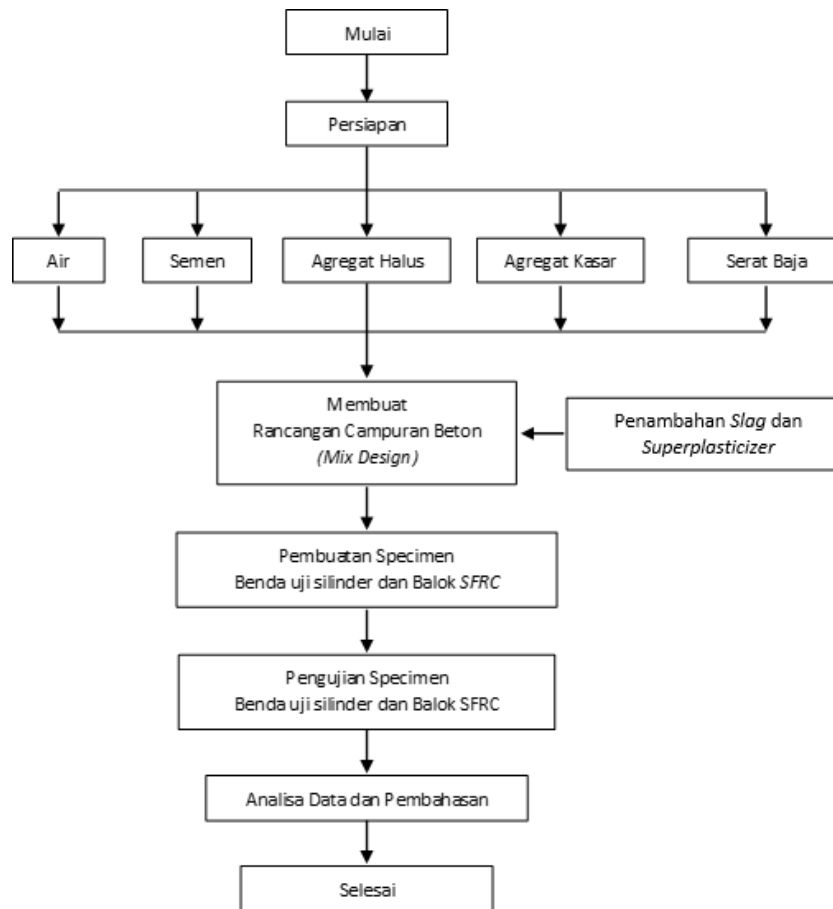
Semua bahan, yang telah digunakan dalam pengujian, disesuaikan dengan spesifikasi dan standar resmi. Semen yang digunakan berupa semen *Portland* (Tipe I). Agregat kasar dan halus disesuaikan dengan persyaratan Spesifikasi ASTM. Serat baja dengan panjang 60 mm dan diameter sama dengan $0,75\text{ mm}$ (rasio aspek serat baja = 80) digunakan berupa tipe ujung bengkok seperti pada Gambar 1. Serat baja memiliki kekuatan tarik ultimit nominal 1225 MPa , sedangkan baja tulangan dengan mutu tegangan leleh sebesar $f_y = 240\text{ MPa}$ digunakan sebagai tulangan tarik dan sengkang.



Gambar 1. Serat Baja Berdeformasi Tipe Ujung Bengkok

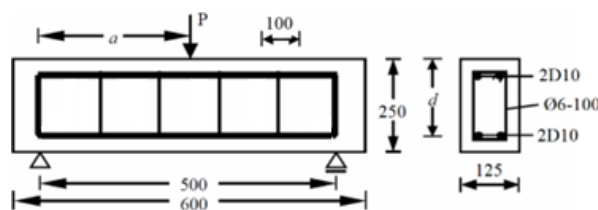
Rancangan campuran beton (*concrete mix design*) menggunakan semen, agregat halus dan agregat kasar digunakan untuk menyiapkan beton mutu tinggi dan normal dengan rasio air-semen $w/c = 0.5$. Serat baja berdeformasi digunakan untuk dicampur dengan beton konvensional dengan kadar bervariasi 0%, 0.5%, 1% dan 2% dari volume beton. Menggunakan tambahan mineral *blast furnace slag* dan zat aditif (*superplasticizers*). Serat baja dengan serat tipe ujung bengkok (*hooked ends*) dengan batasan rasio $L_f/d_f = 80$. Specimen silinder digunakan untuk menentukan sifat mekanik beton. Setelah benda uji dibuat, dilakukan *curing*/perawatan dengan 28 (dua puluh delapan) hari.

Tahapan penelitian dapat dibuat skematik bagan alir pada Gambar 2.

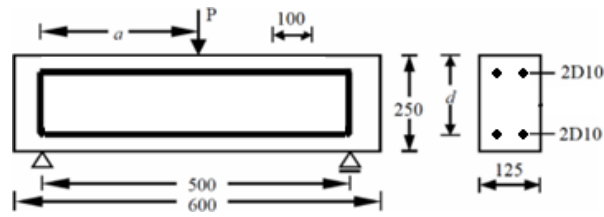


Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Spesifikasi balok uji berupa balok beton berserat dengan dimensi 125mm x 250 mm



(a) Balok dengan tulangan sengkang



(b) Balok dengan tulangan tanpa sengkang

Gambar 3. Balok Bertulang dengan/tanpa tulangan sengkang

Rancangan campuran matriks beton (*concrete mix design*) dibuat sebagai berikut pada Tabel 1 untuk rasio $w/c=0.5$ dengan campuran variasi jumlah kandungan kadar volume serat baja.

Tabel 1. Campuran Beton $w/c = 0.5$ dengan berbagai Kadar Serat Baja

W/C 0,5 SB 0%				
Material	JMF 1M ³ (kg)	JMF 0.038M ³ (kg)	MC	JMF Trial 0.038 (kg)
Semen OPC Type 1	258	9.80		9.80
Slag	45	1.71		1.71
Berat Baha	0	0.00		0.00
Split	978	37.16		37.16
Pasir	978	37.16	4%	38.65
Air	150	5.70	1.48656	4.21
Admin X Ture Tipe F	2.83	0.11		0.11
Density	2411.83			

W/C 0,5 SB 0,5%				
Material	JMF 1M ³ (kg)	JMF 0.038M ³ (kg)	MC	JMF Trial 0.038 (kg)
Semen OPC Type 1	258	9.80		9.80
Slag	45	1.71		1.71
Berat Baha	12.06	0.00		0.00
Split	978	37.16		37.16
Pasir	978	37.16	4%	38.65
Air	150	5.70	1.48656	4.21
Admin X Ture Tipe F	2.83	0.11		0.11
Density	2423.89			

W/C 0,5 SB 0,5%				
Material	JMF 1M ³ (kg)	JMF 0.038M ³ (kg)	MC	JMF Trial 0.038 (kg)
Semen OPC Type 1	258	9.80		9.80
Slag	45	1.71		1.71
Berat Baha	24.48	0.00		0.00
Split	978	37.16		37.16
Pasir	978	37.16	4%	38.65
Air	150	5.70	1.48656	4.21
Admin X Ture Tipe F	2.83	0.11		0.11
Density	2436.31			

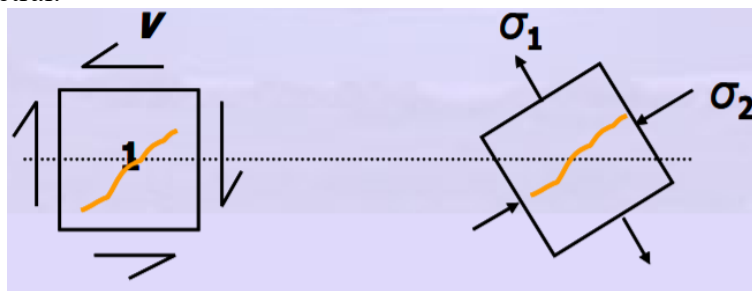
W/C 0,5 SB 2 %				
Material	JMF 1M ³ (kg)	JMF 0.038M ³ (kg)	MC	JMF Trial 0.038 (kg)
Semen OPC Type 1	258	9.80		9.80
Slag	45	1.71		1.71
Berat Baha	48.28	0.00		0.00
Split	978	37.16		37.16
Pasir	978	37.16	4%	38.65
Air	150	5.70	1.48656	4.21
Admin X Ture Tipe F	2.83	0.11		0.11
Density	2460.07			

Keterangan : *JMF (*Job Mix Formula*), *MC (*Moisture Content / kadar air*)
*SB (*Serat Baja*).

Hasil dan Pembahasan

Tegangan Geser pada Penampang Balok Homogen

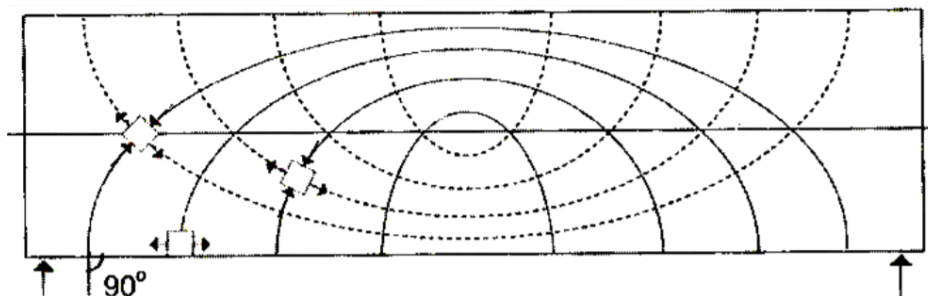
Gaya geser maksimum berada di area tumpuan, sehingga akan terjadi keretakan akibat tegangan geser pada balok. Retakan terbentuk di sekitar sumbu netral dan tegak lurus terhadap tegangan tarik utama (σ_1). Retakan membentuk kemiringan dengan sudut 45° dari sumbu balok. Gambar 4. berikut menunjukkan kemiringan retakan yang terbentuk pada sumbu netral.



Gambar 4. Retak miring akibat tegangan geser

Sumber : (Nawy E., *Reinforced Concrete, Sixth Edition*)

Konsep tegangan dapat digunakan untuk mengembangkan lintasan/trajektori tegangan utama. Gambar 5. menunjukkan lintasan tegangan yang bekerja pada balok dengan dua tumpuan sederhana dan dibebani oleh beban terdistribusi merata. Pola retakan dapat diprediksi dari trajektori tegangan ini.



Sumber : (Nawy E., *Reinforced Concrete, Sixth Edition*)

Gambar 5. Trajektori tegangan utama balok homogen

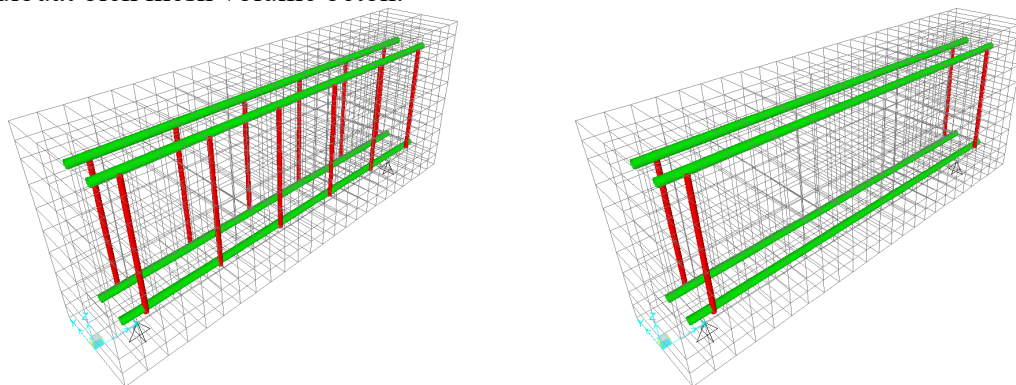
(Garis tak putus = trajektori tekan dan garis putus-putus = trajektori tarik)

Tegangan *Von Mises* digunakan dalam kriteria kegagalan *Von Mises*, yang menyatakan bahwa material akan mulai mengalami deformasi plastis ketika tegangan *Von Mises* mencapai atau melebihi kekuatan luluh material tersebut.

Finite Element Modeling

Spesimen geser dimodelkan pada platform FE SAP2000 dan elemen *SHELL* digunakan untuk memodelkan beton dan juga SFRC. Serat baja direpresentasikan sebagai lapisan yang matriks pada elemen (*SHELL*). Oleh karena itu, rasio volume serat baja dimasukkan sebagai konstanta nyata dalam elemen ini. Elemen (*FRAME*) digunakan untuk memodelkan tulangan baja.

Gambar 6. menunjukkan (FE) pemodelan balok beton bertulang dengan/tanpa tulangan sengkang. Tulangan baja dibuat sebagai tulangan diskrit melalui simpul yang dibuat oleh mesh volume beton.



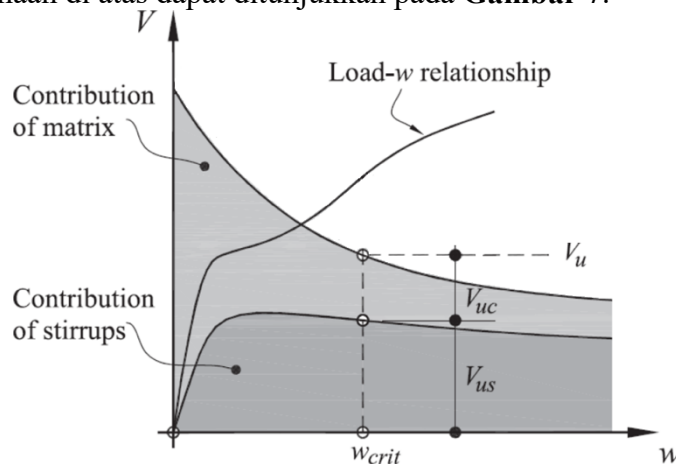
Gambar 6. Model *Finite Element* - Balok Bertulang Dengan/Tanpa Tulangan Sengkang

Kapasitas Kuat Geser Ultimit Balok RC

Kuat geser nominal penampang melintang balok beton bertulang sama dengan kontribusi ultimit, dimana kuat geser ultimit dari balok RC adalah jumlah dari kuat geser beton (V_{uc}) dan kuat geser sengkang (V_{us}) berdasarkan *American Concrete Institute* (ACI 318-14) :

$$V_n = V_u = V_{uc} + V_{us} \dots\dots\dots (1)$$

Hubungan persamaan di atas dapat ditunjukkan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Kuat geser ultimit balok RC

Sumber : (Kamara, Novak, *Simplified Design of Reinforced Concrete Buildings*)

Untuk balok yang hanya mengalami geser tarik diagonal, kuat geser yang diberikan oleh beton adalah sebagai berikut:

$$V_{uc} = 0.17\lambda\sqrt{f'_c} b_w d \dots\dots\dots (2)$$

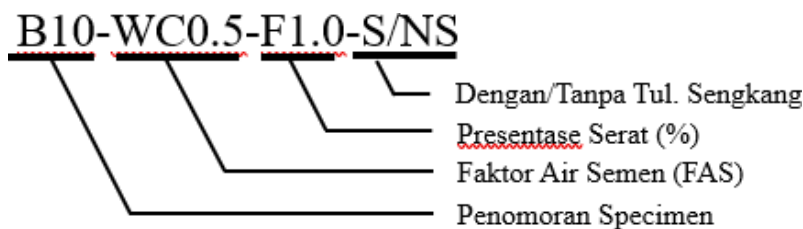
Jika sengkang yang digunakan dalam balok dipasang vertikal, kuat geser sengkang adalah sebagai berikut:

$$V_{us} = A_v f_{ys} \frac{d}{s} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

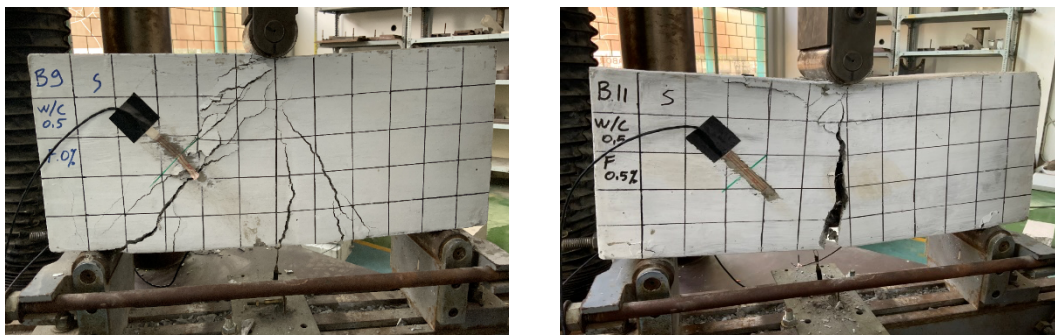
- V_n = Gaya geser nominal balok (*kN*).
- V_u = Gaya geser ultimit balok (*kN*).
- V_{uc} = Gaya geser beton (*kN*).
- V_{us} = Gaya ultimit dari sengkang (*kN*).
- b_w = Lebar balok (*mm*).
- d = Tinggi efektif balok (*mm*).
- f'_c = Kuat tekan rencana diberikan pada umur 28 hari. (*MPa*).
- f_{ys} = Tegangan leleh tulangan sengkang (*MPa*).
- λ = Faktor kepadatan beton = 1,0 untuk beton biasa.
- A_v = Luas tulangan sengkang (*mm²*).
- s = Jarak antar sengkang (*mm*).

Hasil Pengujian Balok



Gambar 8. Nomenklatur Balok

Hasil pengujian balok beton pada saat umur beton setelah 28 hari dapat dilihat pada Tabel 4, sedangkan pola keruntuhan balok beton terhadap beban ultimit dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.



Kajian Perilaku Eksperimental – Analisis FEM Balok Beton Bertulang Berserat Baja Sebagai Pengganti Sebagian Tulangan Geser

B9-WC0.5-F0.0-S



B11-WC0.5-F0.5-S



B13-WC0.5-F1.0-S

Gambar 9. Keruntuhan Balok Beton Dengan Tulangan Sengkang

Sumber : Dokumentasi Penelitian, 2023

B15-WC0.5-F2.0-S



B10-WC0.5-F0.0-NS



B12-WC0.5-F0.5-NS



B14-WC0.5-F1.0-NS



B16-WC0.5-F2.0-NS

Gambar 10. Keruntuhan Balok Beton Tanpa Tulangan Sengkang

Sumber : Dokumentasi Penelitian, 2023

Tabel 2. Hasil Pengujian Balok Geser Dengan Mode Keruntuhan

No	Specimen balok	F'_c (M Pa)	V_u exp (kN)	Mode Keruntuhan
1	B9- W/C 0.5 – F 0.0- S	40.89	73.6	Shear-Flexure
2	B11- W/C 0.5 – F 0.5- S	41.05	81.0	Flexure
3	B13- W/C 0.5 – F 1.0- S	41.35	91.0	Shear-Flexure
4	B15- W/C 0.5 – F 2.0- S	41.76	102.8	Shear-Flexure
5	B10- W/C 0.5 – F 0.0- NS	40.89	34.6	Shear
6	B12- W/C 0.5 – F 0.5- NS	41.05	42.1	Shear

No	Specimen balok	F'c (M Pa)	V _{u exp} (kN)	Mode Keruntuhan
7	B14- W/C 0.5 – F 1.0- NS	41.35	53.0	Shear-Flexure
8	B16- W/C 0.5 – F 2.0- NS	41.76	69.7	Shear

Analisis Ultimit Balok Beton Bertulang Normal

Pada Tabel 3 disajikan hasil kuat geser nominal (V_n), yang diperoleh melalui model ACI 318-14 dengan persamaan (1), (2) dan (3). Kekuatan V_n digunakan dalam desain balok beton bertulang terhadap gaya geser nominal, dan ini mencakup kekuatan yang disediakan oleh beton, tulangan longitudinal, dan sengkang. Model ini tidak mempertimbangkan kontribusi serat sebagai perkuatan tarik beton (polos).

Tabel 3. Kuat Geser Nominal pada Balok Beton Polos

Rasio w/c	Fc' Mpa	Vc kN	Fy MPa	Fs kN	Vn kN
0.5	40.89	31.31	240	31.9	63.21

Analisis Model Finite Elemen (FE)

Analisis kekuatan ultimit menggunakan model *Finite Elemen* (FE) adalah metode yang sangat efektif dalam menentukan kapasitas maksimum suatu struktur atau komponen sebelum gagal. Dengan menentukan batasan identifikasi struktur/komponen model yang akan dianalisis serta pengisian data spesifikasi material berupa identifikasi sifat mekanis material, seperti modulus elastisitas, *yield strength*, *ultimate strength* dari beton berupa tekan dan tarik yang didapati dari hasil eksperimental.

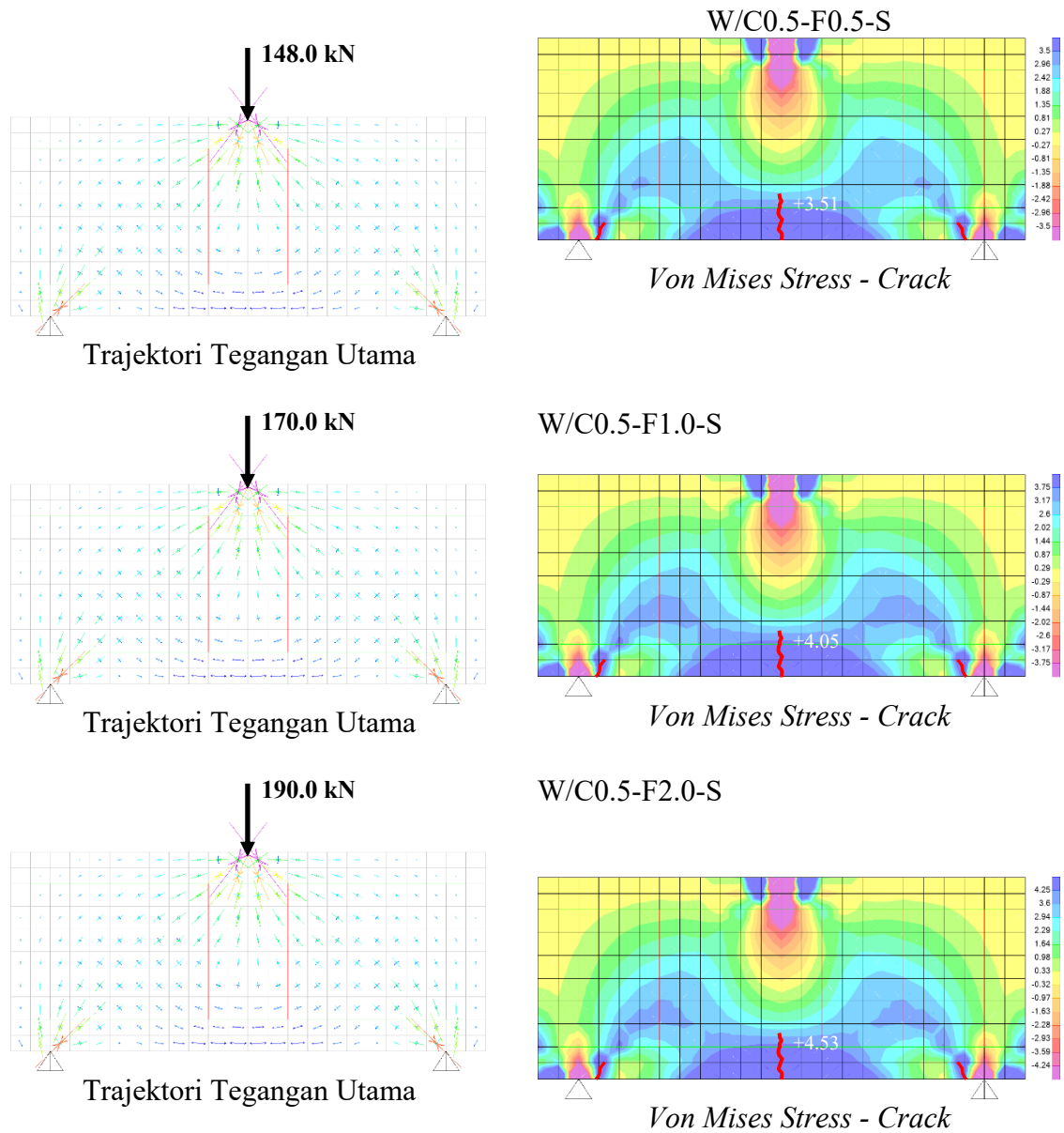
Penentuan definisi kondisi batas dan beban dilakukan dengan cara menetapkan batas (*boundary conditions*) seperti tumpuan, hubungan antar elemen, dan lain-lain dengan menerapkan beban statis pada input data model struktur. Analisis tegangan pada model struktur menggunakan desain kriteria kegagalan mengacu kriteria tegangan *Von Mises* terhadap material yang digunakan dan menggunakan *software finite elemen* untuk analisis struktur ini dengan perangkat peranti lunak SAP2000 versi 24.

Kajian interpretasi hasil dari analisis pada model struktur balok dengan metode FE ini dilakukan untuk mengetahui titik-titik kritis dan mode kegagalan/keruntuhan dengan mengidentifikasi tegangan tarik yang sudah mencapai batas ultimit sehingga terjadi keretakan tarik di area ini. Selain itu melakukan validasi model dengan membandingkan hasil analisis model dengan hasil eksperimental untuk memastikan akurasi model. Detail dan properti material dari semua balok diberikan pada **Tabel 6**.

Tabel 4. Detail dan Properti Material

Panjang (mm)		500		
Rasio bentang geser (a/d)		1.1		
Fraksi Volume serat Vf (%)		0.5	1.0	2.0
Beton	Rasio w/c	0.5		
	Kuat Tekan F'c (Mpa)	41,05	41,35	41,76
	Kuat Tarik F'r (Mpa)	3.10	3.37	3.57
	Modul elastisitas Ec (N/mm ²)	32760	33929	34.502
	Rassio Poisson v	0.2		
Tulangan baja	Kuat lelah Fy (Mpa)	240		
	Modul elastisitas Es (N/mm ²)	200x 10 ³		
	Rassio Poisson v	0.3		

Pada tabel 4. merupakan model balok SFRC bersengkang dengan beban ultimit pada balok model FE, sehingga terbentuk keretakan inisial pada balok, pola retak yang timbul dominan terjadi di tengah bentang balok dan dimulai dari serat bawah menuju ke atas dengan tegangan yang telah melewati batasan tegangan tarik runtuh. Keretakan ini semakin besar dengan beban ultimit ditingkatkan semakin besar sehingga keretakan melintasi tulangan baja longitudinal dan mencapai tegangan leleh.

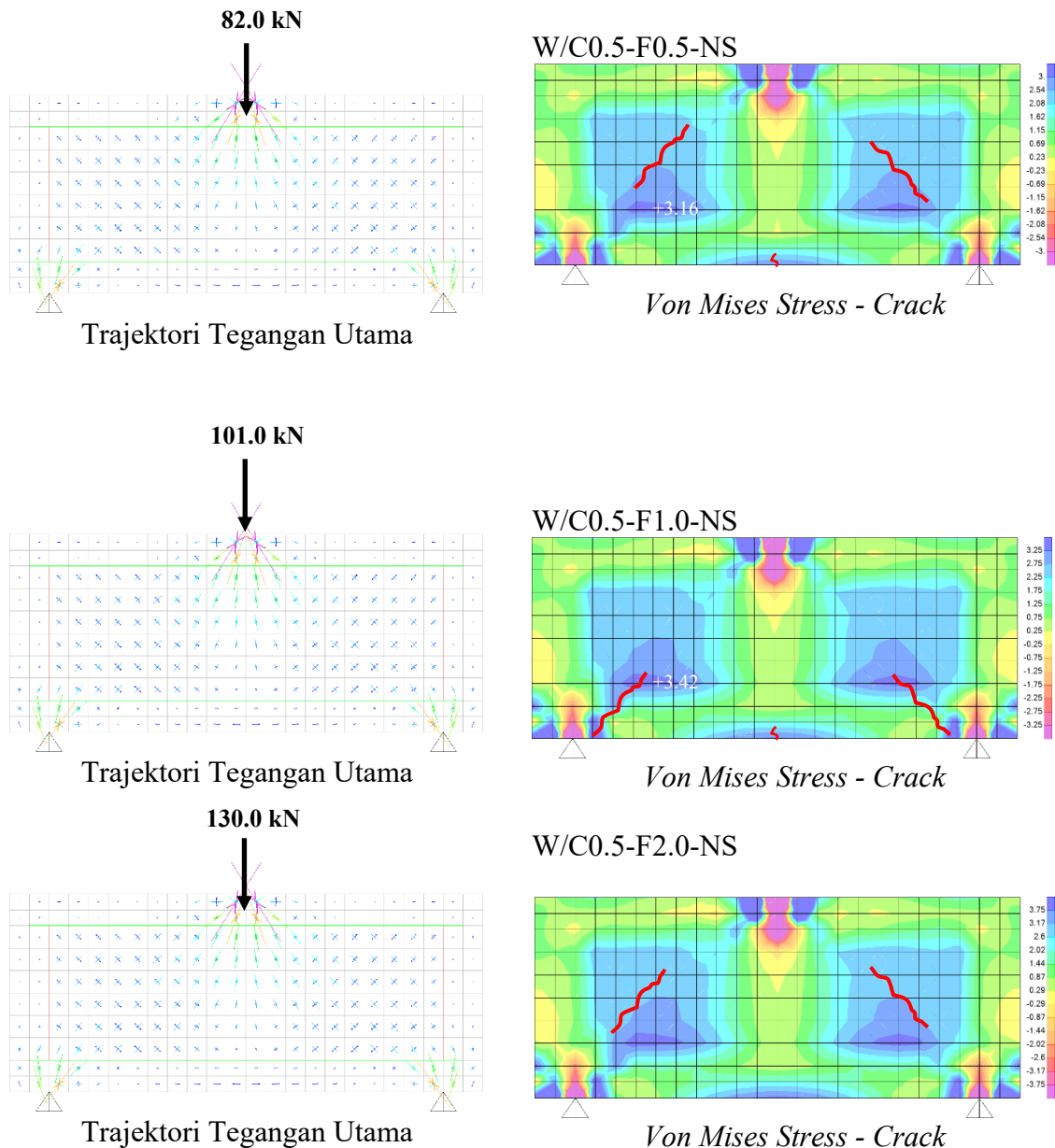


Gambar 11. Model FE Balok dengan Tulangan Sengkang

Beban ultimit pada balok model FE telah terbentuk keretakan inisial pada balok dengan tulangan sengkang, pola retak yang timbul dominan terjadi di tengah bentang balok dan dimulai dari serat bawah menuju ke atas dengan tegangan yang telah melewati batasan tegangan tarik runtuh yaitu sebesar 3.51 MPa, 4.05 MPa, dan 4.53 MPa secara berurutan untuk setiap balok dengan kadar serat baja yang berbeda. Keretakan ini semakin besar dengan beban ultimit ditingkatkan semakin besar sehingga keretakan melintasi

tulangan baja longitudinal dan mencapai tegangan leleh. Keruntuhan balok pada model ini termasuk mode keruntuhan lentur (*flexure*) (Mari Bernat et al., 2020).

Pada Gambar 11. merupakan model balok SFRC tanpa sengkang dengan beban ultimit pada balok model FE sehingga terbentuk keretakan inisial pada balok, dengan pola retak yang timbul terjadi di area geser balok bagian tanpa sengkang dengan tegangan yang terjadi sudah melewati batasan tegangan tarik runtuh. Kemudian keretakan ini semakin besar dan bila beban ultimit ditingkatkan semakin besar dengan arah keretakan menuju ke area tumpuan dan ke bagian serat atas tengah balok.



Gambar 12. Model FE Balok tanpa Tulangan Sengkang

Sumber : Dokumentasi Penelitian, 2023

Beban ultimit pada balok model FE telah terbentuk keretakan inisial pada balok tanpa tulangan sengkang, pola retak yang timbul dominan terjadi di tengah bentang balok dan dimulai dari serat bawah menuju ke atas dengan tegangan yang telah melewati

batasan tegangan tarik runtuh yaitu sebesar 3.16 MPa, 3.42 MPa, dan 3.94 MPa secara berurutan untuk setiap balok dengan kadar serat baja yang berbeda. Keretakan ini semakin besar dan bila beban ultimit ditingkatkan semakin besar dengan arah keretakan menuju ke area tumpuan dan ke bagian serat atas tengah balok. Keruntuhan balok pada model ini termasuk mode keruntuhan geser (*shear*) (Gul et al., 2014). Sebanyak delapan balok beton bertulang berserat baja dibuatkan analisis dengan pendekatan analisis FEM, kemudian dilakukan resume perbandingan dengan hasil eksperimen. Balok SFRC diberi beban maksimum hingga terjadi keruntuhan ultimit, dengan tujuan mengevaluasi pengaruh fraksi volume serat dengan $a/d=1.1$ dan kuat tekan beton terhadap kekuatan gaya geser dan keruntuhan balok seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Resume Komparasi Balok Geser Dengan Analisis FEM

No	Specimen balok	F'c (M Pa)	V _{u exp} (kN)	V _{u FE Model} (kN)	Mode Keruntuhan
1	B9- W/C 0.5 – F 0.0-S	40.89	73.6		
2	B11- W/C 0.5 – F 0.5-S	41.05	81.0	74.0	Flexure
3	B13- W/C 0.5 – F 1.0-S	41.35	91.0	85.0	Flexure
4	B15- W/C 0.5 – F 2.0-S	41.76	102.8	95.0	Flexure
5	B10- W/C 0.5 – F 0.0-NS	40.89	34.6		
6	B12- W/C 0.5 – F 0.5-NS	41.05	42.1	41.0	Shear
7	B14- W/C 0.5 – F 1.0-NS	41.35	53.0	50.5	Shear
8	B16- W/C 0.5 – F 2.0-NS	41.76	69.7	65.0	Shear

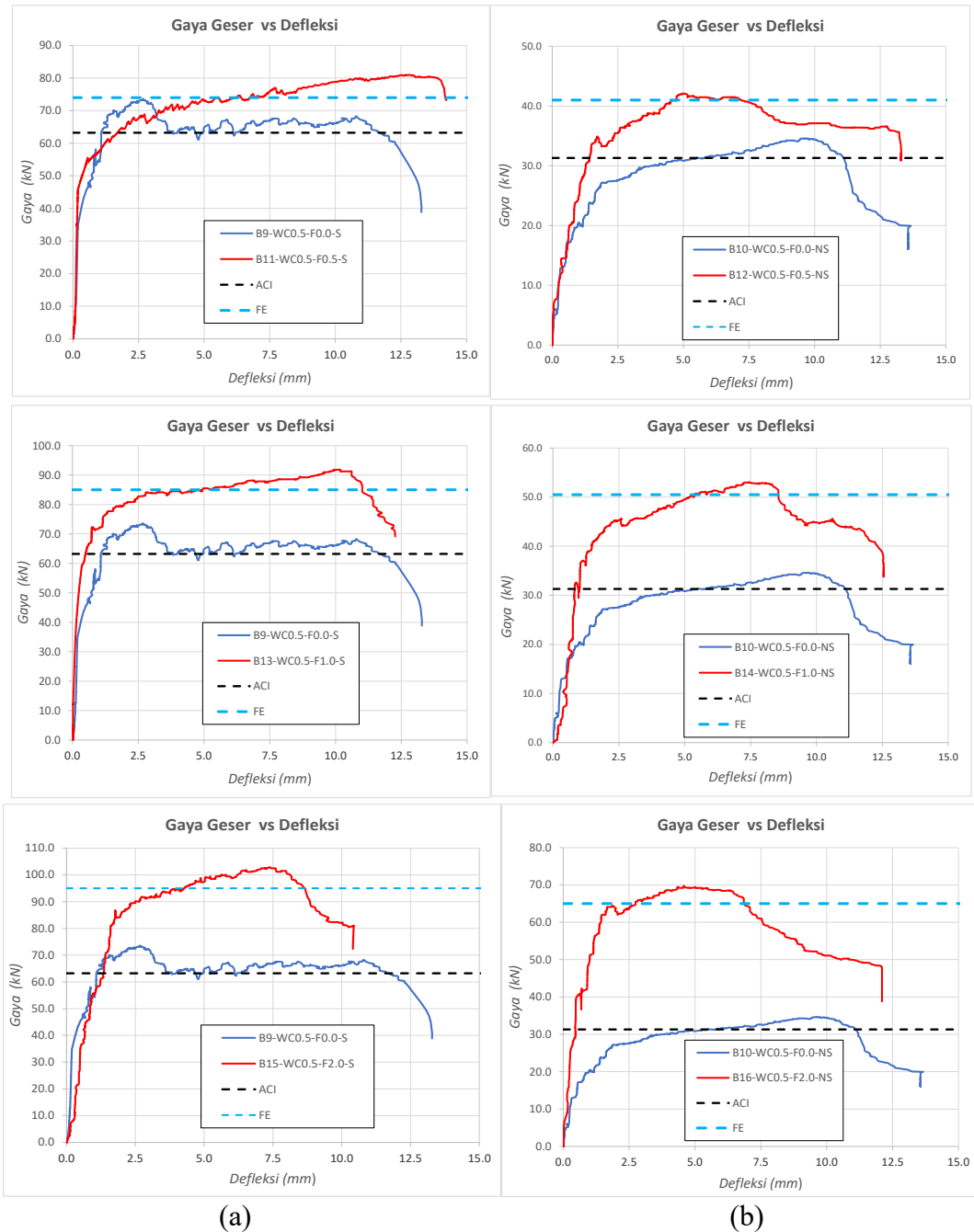
Hasil beban ultimit yang diperoleh pada analisis model FE nilai gaya geser ultimit secara keseluruhan lebih rendah dibanding dengan hasil eksperimen. Bentuk pola keretakan/keruntuhan yang didapati hasil analisis model FE terlihat tidak jauh beda dengan hasil eksperimen.

Pengaruh Aksi Gabungan Balok Beton Bertulang Berserat Baja Dengan/Tanpa Sengkang

Pengaruh aksi gabungan balok bertulang berserat baja terhadap hasil eksperimental dengan model teoritis yang mengacu ke pada standard ACI 318-14 sebagai kontrol kapasitas kuat geser ultimit beton polos, analisis model FE.

Acuan analisis Tabel 5 dan Tabel 7 diplotkan secara bersamaan dan digabung dengan hasil kuat geser eksperimental, yang dituangkan pada Gambar 13. Grafik menunjukkan gabungan hasil uji kuat geser eksperimental balok beton bertulang serat dengan/tanpa sengkang, untuk masing-masing jenis balok yang menggunakan mutu beton dengan $w/c=0.5$, dengan berbagai kandungan serat, kemudian dibandingkan dengan balok beton polos sebagai pembanding (Li et al., 2021).

Kontribusi kandungan serat terhadap kuat geser eksperimental balok baik dengan/tanpa sengkang meningkat secara signifikan bila dibanding dengan balok pembanding yang tidak memiliki serat.



(a) (b)
Gambar 13. Perilaku Balok Beton Bertulang Berserat Rasio $w/c=0,5$ Terhadap Balok Kontrol.

(a) Dengan Sengkang. (b) Tanpa Sengkang.

Sumber : Dokumentasi Penelitian, 2023

Pengujian balok untuk kedua rasio $w/c=0.5$, secara keseluruhan menunjukkan hasil pengujian dengan nilai gaya geser yang lebih tinggi daripada nilai kekuatan geser berdasarkan ACI dan model FE, pengamatan perilaku pasca-retak pada balok yang

diperkuat dengan serat memiliki pengurangan kekuatan geser yang lebih rendah dibandingkan balok dengan sengkang saja, hal ini disebabkan oleh lekatan matriks serat, yang memungkinkan terjadinya transfer tegangan. Balok kontrol pembanding menunjukkan perilaku yang sesuai dan mencapai nilai yang diprediksi oleh ACI. Hasil beban ultimit yang diperoleh pada analisis model FE nilai gaya geser ultimit secara keseluruhan lebih rendah dibanding dengan hasil eksperimen (Lehmann & Głodkowska, 2021).

Dari sudut pandang perilaku struktur beton bertulang, keberadaan serat baja sebagai perkuatan tarik beton tambahan untuk balok tanpa/dengan sengkang meningkatkan kekuatan geser ultimit secara signifikan, oleh karena itu, dapat dibenarkan untuk menggunakan model analitis yang dapat memprediksi secara akurat kekuatan geser teoritis yang mendekati kekuatan geser yang diperoleh secara eksperimental, dan hal ini dapat menjadi alat bantu untuk mendesain analisis rancangan kekuatan geser untuk jenis elemen struktur balok.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan diperoleh Kesimpulan bahwa hasil pengujian balok beton nilai kapasitas gaya geser ultimit balok beton bertulang dengan/tanpa sengkang cenderung meningkat seiring dengan penambahan serat baja pada kandungan beton, hal ini menyatakan bahwa nilai kapasitas gaya geser balok beton berserat meningkat seiring dengan peningkatan jumlah fraksi volume serat. Pengujian balok berserat untuk dengan rasio $w/c=0.5$, secara keseluruhan menunjukkan hasil pengujian nilai gaya geser yang lebih tinggi daripada nilai kekuatan geser beton polos berdasarkan ACI 318-14. Hasil beban ultimit yang diperoleh pada analisis model FE nilai gaya geser ultimit secara keseluruhan lebih rendah dibanding dengan hasil eksperimen. Bentuk pola keretakan/keruntuhan yang didapati hasil analisis model FE terlihat tidak jauh beda dengan hasil eksperimen.

BIBLIOGRAFI

- Arslan, G., Keskin, R. S. O., & Ulusoy, S. (2017). An experimental study on the shear strength of SFRC beams without stirrups. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 55(4), 1205–1217.
- Basri, D. R. (2019). Pengaruh Limbah Plastik Botol (Leleh) Sebagai Material Tambah Terhadap Kuat Lentur Beton. *Racic: Rab Construction Research*, 4(2), 66–77.
- Demakos, C. B., Repapis, C. C., & Drivas, D. P. (2021). Experimental investigation of shear strength for steel fibre reinforced concrete beams. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 15(1).
- Fombrun, C. (2018). Realising value from the corporate image. *Reputation*, 1–596.
- Gul, M., Bashir, A., & Naqash, J. A. (2014). Study of modulus of elasticity of steel fiber reinforced concrete. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, 3(4), 304–309.
- Hafedh, A. A., & Hassan, G. H. (2019). Finite element analysis of steel fiber reinforced concrete beams. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12(12), 2303–2311.
- Hameed, A. A., & Al-Sherrawi, M. H. (2018). Influence of steel fiber on the shear strength of a concrete beam. *Civil Engineering Journal*, 4(7), 1501.

- Juárez-Alvarado, C. A., Mendoza-Rangel, J. M., Terán-Torres, B. T., Valdez-Tamez, P. L., & Castruita-Velázquez, G. (2021). Theoretical-experimental behavior of steel fibers as a partial replacement for shear reinforcement in reinforced concrete beams. *Revista ALCONPAT*, 11(3), 31–49.
- Lehmann, M., & Głodkowska, W. (2021). Shear Capacity and Behaviour of Bending Reinforced Concrete Beams Made of Steel Fibre-Reinforced Waste Sand Concrete. *Materials*, 14(11), 2996.
- Li, C., Zhao, M., Zhang, X., Li, J., Li, X., & Zhao, M. (2021). Effect of steel fiber content on shear behavior of reinforced expanded-shale lightweight concrete beams with stirrups. *Materials*, 14(5), 1107.
- Mari Bernat, A., Spinella, N., Recupero, A., & Cladera, A. (2020). Mechanical model for the shear strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams without stirrups. *Materials and Structures*, 53, 1–20.
- Mutiara Insani, N. (2020). *Perencanaan Struktur Gedung Perkuliahan Di Tasikmalaya*. Universitas Siliwangi.
- Saputra, I. (2016). *Pengaruh Variasi Komposisi Serat Rumput Payung (Cyperus Alternifolius) Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Komposit*.
- Setiadji, B. H., Dewabrata, H., Lie, H. A., & Subagyo, S. A. P. (2020). Studi Penggunaan Semen Slag sebagai Substitusi Semen Portland pada Beton. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 117–128.
- Zhao, J., Liang, J., Chu, L., & Shen, F. (2018). Experimental study on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams with high-strength reinforcement. *Materials*, 11(9), 1682.

Copyright holder:

Muhamad Ryanto, Antonius Amir, Prabowo Setiawan(2024)

First publication right:

Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia

This article is licensed under:

