

Analisis Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* Menggunakan Program Abaqus

**Agustinus Sungsang Nana Patria^{1*}, Pramesta Armanisag Pangestuti²,
Anggun Dwi Sarida³, Master Almoris Baene⁴**
Universitas 17 Agustus 1945 Semarang, Semarang-50235, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

kuat lentur balok; perkuatan struktur; *GFRP*; *finite element*; *Abaqus*.

***Correspondence email:**

agustinus-sungsang@untagsmg.ac.id

Submitted: 06-01-2025

Revised: 30-01-2025

Accepted: 07-02-2025

Published: 07-02-2025

ABSTRAK

Perkuatan diperlukan untuk mengembalikan kapasitas struktur seperti pemasangan *GFRP*. Penelitian ini bertujuan menganalisis kuat lentur balok beton bertulang menggunakan program *finite element Abaqus 2017*, hasil eksperimen dan teoritis, berupa beban maksimum, momen maksimum dan pola retak. Obyek penelitian menggunakan data sekunder hasil eksperimen oleh Djamaluddin (2011) berupa lima varian balok, yaitu balok normal tanpa *GFRP*, balok 1 lapis *GFRP* sepanjang bentang, balok 1 lapis *GFRP* sepanjang bentang ditambah 2 lapis di tengah bentang, balok 3 lapis *GFRP* sepanjang bentang, dan balok 3 lapis *GFRP* sepanjang bentang ditambah 2 lapis di tengah bentang. Peneliti memodelkan kelima varian balok di program *Abaqus* dan melakukan perhitungan teoritis. Analisis ketiga metode diperoleh hasil bahwa semakin banyak lapisan *GFRP* terpasang maka beban maksimum dan momen maksimum akan semakin besar. Terdapat perbedaan nilai dari ketiga metode yang dimungkinkan karena lekatan (pengeleman) kurang sempurna dalam pemasangan *GFRP*, dan pembagian elemen (*meshing*) model di *Abaqus* kurang rapat sehingga penyebaran tegangan kurang merata. Selain itu dapat dilihat bahwa retak antara eksperimen dengan analisis menggunakan *Abaqus* tidak ada perbedaan, yaitu pola retak semua model dimulai dari tengah bentang kemudian menjalar ke sepanjang bentang.

ABSTRACT

Keywords:

beam flexural strength; structural strengthening; *GFRP*; *finite elements*; *Abaqus*.

Strengthening is needed to restore structural capacity such as installing GFRP. This research aims to analyze the flexural strength of reinforced concrete beams using the Abaqus 2017 finite element program, experimental and theoretical results, in the form of maximum load, maximum moment and crack patterns. The research object uses secondary data from experiments by Djamaluddin (2011) in the form of five beam variants, namely normal beams without GFRP, beams with 1 layer of GFRP along the span, beams with 1 layer of GFRP along the span plus 2 layers in the middle of the span, beams with 3 layers of GFRP along the span, and 3 layers of GFRP beams along the span plus 2 layers in the middle of the span. Researchers modeled the five beam variants in the Abaqus program and carried out theoretical calculations. Analysis of the three methods showed that the more layers of GFRP installed, the greater the maximum load and maximum moment. There are differences in the values of the three methods which are possible because the bonding (gluing) is less than perfect in installing the GFRP, and the distribution of the elements (meshing) of the model in Abaqus is less dense so that the stress distribution is less even. Apart from that, it was also seen that there was no difference in the crack pattern between the experiment and Abaqus, namely that the crack pattern in all models started from the middle of the span and then spread along the span.

PENDAHULUAN

Struktur beton bertulang merupakan struktur dengan material baja tulangan yang disusun ke dalam beton dengan bentuk dan dimensi tertentu untuk menahan gaya-gaya yang bekerja (Prayitno & Agustya, 2016). Kombinasi dari kedua material menjadikan beton bertulang mempunyai sifat yang kuat terhadap gaya tekan dan tarik (Vricilia et al., 2020). Balok beton bertulang merupakan suatu unsur horizontal dari struktur bangunan yang berfungsi untuk menahan momen lentur dan geser (Wicaksono et al., 2019). Gaya yang bekerja pada balok dapat mengakibatkan balok melendut hingga mengalami kerusakan (Musyaffa & Jafar, 2022). Perkuatan struktur biasanya dilakukan sebagai upaya untuk mencegah struktur mengalami kerusakan/kehancuran (Siahaan & Tarigan, 2024).

Salah satu perkuatan struktur dapat dilakukan dengan pemasangan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. *FRP* saat ini menjadi material yang populer untuk memperbaiki dan memperkuat struktur (Setiawan et al., 2020). *FRP* memiliki daya tarik tujuh hingga sepuluh kali lebih besar dibandingkan baja (Mulyono, 2021). Material *FRP* dapat terbuat dari *carbon (CFRP)*, *glass (GFRP)* dan *aramid (ARFP)* (Putera et al., 2024). Tarigan et al. (2018) melakukan

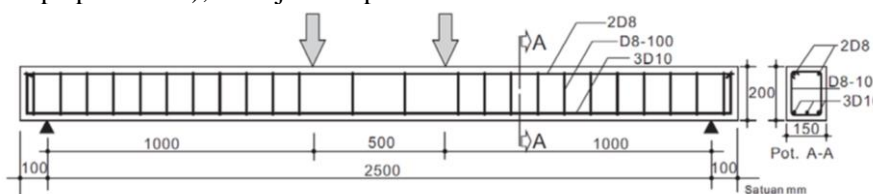
eksperimental untuk membandingkan kekuatan lentur balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan *CFRP* dan *GFRP*. Hasil menunjukkan bahwa balok dengan perkuatan *CFRP* dapat meningkatkan kuat lentur sebesar 59.09%, sedangkan perkuatan *GFRP* sebesar 57.14 %. Penelitian juga dilakukan Ashad et al. (2024) yang menggunakan silinder beton dilapisi *CFRP*, dengan hasil nilai kuat tekan beton, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton semakin bertambah seiring bertambahnya jumlah lapis *CFRP*.

Pemahaman perilaku struktur beton bertulang dapat berupa pendekatan numerik, eksperimental, maupun teoritis untuk mencegah kesalahan perencanaan struktural baru atau memperkuat struktur lama (Prameswara, et al., 2022). Sehingga pengujian lentur balok beton bertulang tidak hanya dilakukan di laboratorium tetapi dapat dilakukan juga dengan metode numerik. Metode numerik yang paling umum dengan penggunaan metode elemen hingga untuk melihat perilaku linear dan non-linear suatu struktur seperti program komputer Abaqus (Sudarsono, 2023). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kuat lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan *GFRP* menggunakan program Abaqus 2017 kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen dan perhitungan teoritis. Adapun eksperimen yang dilakukan Djamaluddin & Hino (2011) yang berjudul “Kapasitas Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang Yang Telah Meleleh Dengan Menggunakan Lembaran *GFRP*” digunakan sebagai obyek penelitian ini, yaitu dengan melakukan pengujian balok beton bertulang dengan dimensi 150 mm x 200 mm dan panjang 2700 mm. Terdapat lima varian benda uji balok yaitu satu varian balok normal tanpa pemberian lapis *GFRP* dan empat varian balok dilapisi *GFRP*. Penelitian serupa pernah dilakukan oleh Nurlina et al., (2016) yaitu membandingkan kuat lentur balok beton bertulang menggunakan perkuatan *GFRP*, dengan hasil peningkatan kuat lentur balok dengan *GFRP* dari balok tanpa perkuatan sebesar 31.86%.

METODE

Data penelitian menggunakan data sekunder dari pengujian kuat lentur balok beton bertulang yang dilakukan oleh Djamaluddin (2011). Terdapat lima varian model benda uji balok yang dilapisi *GFRP*, dengan dimensi balok 150 x 200 mm x 2700 mm sebagai berikut :

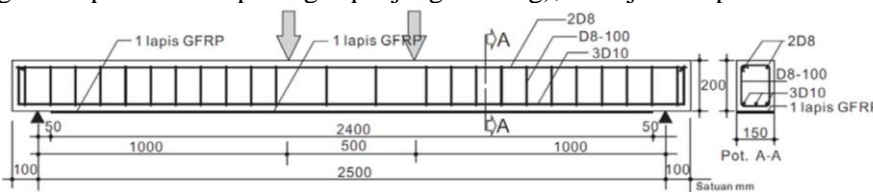
1. BN (balok normal tanpa perkuatan), ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Benda uji BN

Sumber: Djamaluddin (2011)

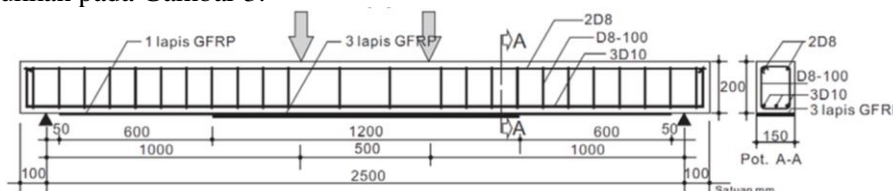
2. FH-1 (balok dengan 1 lapis *GFRP* dipasang sepanjang bentang), ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Benda uji FH-1

Sumber: Djamaluddin (2011)

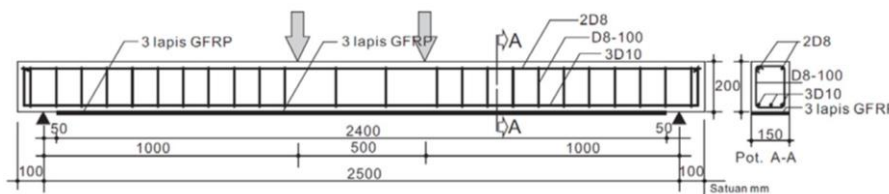
3. FH-12 (balok dengan 1 lapis *GFRP* dipasang sepanjang bentang dan ditambah 2 lapis *GFRP* pada titik tengah bentang), ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Benda uji FH-12

Sumber: Djamaluddin (2011)

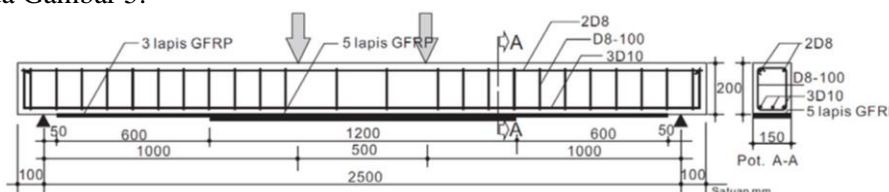
4. FH-3 (balok dengan 3 lapis *GFRP* dipasang sepanjang bentang), ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Benda uji FH-3

Sumber: Djamaluddin (2011)

- FH-32 (balok dengan 3 lapis GFRP dipasang sepanjang bentang dan ditambah 2 lapis di tengah bentang), ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 3. Benda Uji FH-32

Sumber: Djamaluddin (2011)

Penulis melakukan tiga metode untuk mendapatkan nilai beban maksimum dan momen maksimum, yaitu eksperimen, numerik *finite element*, dan perhitungan teoritis. Hasil metode eksperimen diperoleh dari pengujian kelima model balok di laboratorium yang telah dilakukan Djamaluddin (2011). Penulis memodelkan kelima varian balok di program *finite element* Abaqus 2017 dan perhitungan teoritis berdasarkan ACI Committee 318 dan 440. Hasil yang diperoleh dari ketiga metode akan dianalisis. Selain itu juga akan dilihat pola retak balok hasil eksperimen dan pemodelan di Abaqus 2017. Parameter material untuk pemodelan finite element sesuai dengan data eksperimen. Nilai parameter beton sebagai berikut : tegangan tarik = 2.7 MPa, tegangan tekan = 22.6 MPa, modulus Young = 22360 MPa, kerapatan = 2.1 ton/m³, nilai Poisson = 0.2. Nilai parameter tulangan baja sebagai berikut : tegangan leleh = 290 MPa, modulus tarik = 200000 MPa, regangan ultimit = 5.00%, kerapatan = 7.8 ton/m³, nilai Poisson = 0.3. Nilai parameter GFRP sebagai berikut : tegangan tarik = 575 MPa, modulus tarik = 26.1 GPa, regangan ultimit = 2.20%, tegangan tarik arah 90° = 25.8 GPa, tebal 1 lapis = 1.3 mm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Eksperimen oleh Djamaluddin (2011) dan Luastika et al. (2019)

Eksperimen oleh Djamaluddin (2011) pada kelima varian benda uji balok dilakukan dengan pemberian beban pada 2 titik pembebanan untuk melihat perilaku lentur yang terjadi. Eksperimen dimulai dengan balok normal (BN) diberi beban sampai balok mencapai kondisi leleh, kemudian balok dilapisi *GFRP* sesuai jumlah varian. Balok yang sudah dilapisi *GFRP* kemudian dilanjutkan pemberian beban sampai mencapai kondisi maksimum. Beban maksimum yang diperoleh kemudian digunakan untuk perhitungan momen maksimum. Berikut hasil eksperimen yang diperoleh ditunjukkan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Eksperimen

Tipe Balok	Hasil Eksperimen			
	P max (kN)	P max FH/BN	M max (kNm)	M max FH/BN
BN	16.50	1.00	8.27	1.00
FH-1	25.00	1.52	12.52	1.51
FH-12	29.50	1.79	14.77	1.79
FH-3	36.00	2.18	18.02	2.18
FH-32	42.00	2.55	21.02	2.54

Sumber: Djamaluddin (2011)

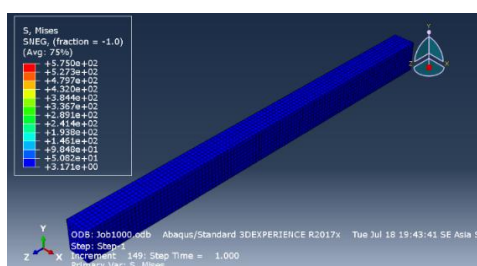
Tabel 1 menunjukkan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Djamaluddin (2011) dari kelima varian benda uji balok yang dianalisis. Dapat dilihat bahwa nilai beban maksimum (P max) dan momen maksimum (M max) tertinggi pada balok FH-32 yaitu dengan nilai P max sebesar 42 kN dan M max sebesar 21.02 kNm. Sedangkan nilai P max dan M max terendah pada balok BN dengan P max sebesar 16.5 kN dan M max sebesar 8.3 kNm. Rasio beban atau rasio momen maksimum yang diperoleh merupakan perbandingan beban atau momen maksimum balok *GFRP* dengan balok normal. Dapat dilihat bahwa balok *GFRP* FH-1 memberikan rasio paling kecil sebesar 1.52 dibandingkan tipe

balok *GFRP* lainnya, dan rasio tertinggi terjadi pada balok *GFRP* FH-32 sebesar 2.55. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak lapisan *GFRP* yang digunakan, maka beban dan momen yang dapat ditahan akan semakin besar juga.

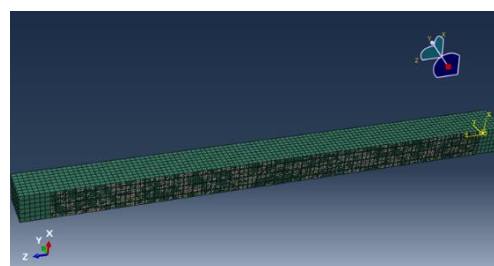
Hasil penelitian Djamaluddin (2011) didukung oleh Luastika et al. (2019) yang meneliti kuat lentur balok beton bertulang menggunakan satu balok tanpa perkuatan dan dua variasi balok dengan lapis perkuatan *GFRP*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa beban maksimum kuat lentur balok (P_{max}) dan momen maksimum (M_{max}) tertinggi pada balok BG2 (balok *GFRP* 2 lapis) dengan P_{max} sebesar 8.0 kN dan M_{max} sebesar 0.362 kNm. Nilai P_{max} dan M_{max} terendah pada balok BN (balok tanpa perkuatan) dengan P_{max} sebesar 6.6 kN dan M_{max} sebesar 0.333 kNm. Sedangkan nilai P_{max} dan M_{max} pada balok BG1 (balok *GFRP* 1 lapis) dengan P_{max} sebesar 7.3 kN dan M_{max} sebesar 0.350 kNm. Hal ini menunjukkan bahwa beban dan momen akan semakin besar seiring bertambahnya jumlah lapis *GFRP*.

Hasil Pemodelan *Finite Element* di Program *Abaqus* 2017

Penulis memodelkan kelima varian balok di program *finite element Abaqus* 2017 untuk melihat perilaku lentur balok secara non-linear. Diawali dengan penginputan material beton, tulangan, dan *GFRP*, dilanjutkan dengan pembuatan model seperti benda uji eksperimen lengkap dengan tumpuan dan titik pembebanan. Hasil pemodelan balok normal (BN) ditunjukkan pada Gambar 6 tanpa adanya pemberian lapisan *GFRP*. Sedangkan benda uji balok yang dilapisi *GFRP* ditunjukkan pada Gambar 7, dengan adanya interaksi antara *GFRP* dengan bidang balok yang dilapisi. Jumlah dan penempatan lapisan *GFRP* sesuai dengan varian benda uji.

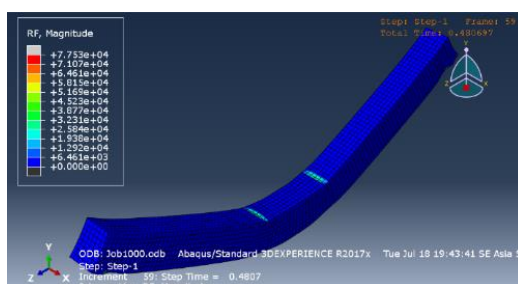


Gambar 6. Benda uji balok normal
Sumber: Data Olahan (2024)



Gambar 7. Lapisan *GFRP* pada muka bawah balok

Benda uji yang telah dimodelkan selanjutnya dilakukan pembebanan arah vertikal dengan dua titik pembebanan sesuai eksperimen yang dilakukan Djamaluddin (2011), dengan jarak antar beban terpusat sebesar 500 mm. Pembebanan dilakukan secara *trial and error* dengan memasukkan nilai beban, sampai diperoleh nilai beban maksimum (P_{max}) yang dapat diterima oleh balok. Perilaku lentur balok yang terjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 8, dengan nilai *reaction force* (RF) merupakan nilai reaksi yang diterima pada tumpuan balok akibat beban yang diberikan.



Gambar 8. Perilaku lentur balok akibat pembebanan

Sumber: Data Olahan (2024)

Beban maksimum (P_{Max}) yang diperoleh, kemudian nilainya digunakan untuk perhitungan momen maksimum (M_{Max}). Berikut rekapitulasi nilai P_{max} dan M_{max} hasil pemodelan di *Abaqus* 2017 seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Pemodelan di Abaqus 2017

Tipe Balok	Hasil Abaqus			
	P max (kN)	P max FH/BN	M max (kNm)	M max FH/BN
BN	18.26	1.00	9.15	1.00
FH-1	26.5	1.61	13.27	1.60
FH-12	40.3	2.44	20.17	2.44
FH-3	42.92	2.60	21.48	2.60
FH-32	53.34	3.23	26.69	3.23

Sumber: Data Olahan (2024)

Tabel 2 menunjukkan hasil pemodelan *finite element* di program *Abaqus 2017* dari kelima balok. Dapat dilihat bahwa nilai beban maksimum (P max) dan momen maksimum (M max) tertinggi pada balok FH-32 yaitu dengan nilai P max sebesar 53.34 kN dan M max sebesar 26.69 kNm. Sedangkan nilai P max dan M max terendah pada balok BN dengan P max sebesar 18.26 kN dan M max sebesar 9.15 kNm. Rasio beban atau rasio momen maksimum yang diperoleh merupakan perbandingan beban atau momen maksimum balok *GFRP* dengan balok normal. Dapat dilihat bahwa balok *GFRP* FH-1 memberikan rasio paling kecil sebesar 1.61 dibandingkan tipe balok *GFRP* lainnya, dan rasio tertinggi terjadi pada balok *GFRP* FH-32 sebesar 3.23. Dari hasil pemodelan di *Abaqus 2017* menunjukkan bahwa semakin banyak lapisan *GFRP* yang digunakan, maka beban dan momen yang dapat ditahan akan semakin besar juga.

Hasil Perhitungan Teoritis

Perhitungan teoritis dilakukan sebagai perbandingan nilai P max dan M max dari hasil eksperimen dan pemodelan di *Abaqus 2017*. Perhitungan teoritis dilakukan pada kelima varian balok mengacu prinsip tegangan regangan pada balok beton bertulang. Adapun perhitungan untuk balok normal (tanpa *GFRP*) mengacu ACI Committee 318 dan benda uji dengan *GFRP* mengacu ACI Committee 440 sebagai berikut ini :

1. Benda Uji BN

Sebelum menghitung momen nominal balok normal, nilai a dicari dengan persamaan:

$$0.85 \times f_c \times b \times a = A_s f_y$$

$$0.85 \times 22.6 \times 150 \times a = \left(\frac{1}{4} \pi 10^2 \times 3 \right) \times 290$$

$$a = 23.713 \text{ mm}$$

Menghitung nilai c:

$$c = \frac{23.713}{0.85} = 27.9 \text{ mm}$$

Momen maksimum:

$$M_u = \phi \times M_n$$

$$M_u = 0.85 \times \left\{ A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \right\}$$

$$M_u = 0.85 \times \left\{ 235.619 \times 290 \left(162 - \frac{23.713}{2} \right) \right\}$$

$$M_u = 8720347.017 \text{ Nmm}$$

$$M_u = 8.720 \text{ kNm}$$

Beban maksimum:

Dari momen tersebut dapat diketahui P design max dari benda uji tersebut dengan persamaan:

$$8.720 = (0.5 P \times L) + \left(\frac{1}{8} \times q \times L^2 \right), \text{ dengan } q \text{ (berat sendiri balok)} = 0.1944 \text{ kN/m}$$

$$8.720 = (0.5 P \times 1) + \left(\frac{1}{8} \times 0.1944 \times 2.7^2 \right)$$

$$P \text{ max} = 17.39 \text{ kN}$$

2. Benda Uji FH-1

Mencari nilai f_{fe} dari standar yang telah ditetapkan ACI committee 440:

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} \times E_f$$

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq 0.009 \right\} \times 26100 \\
 &= \left\{ 0.003 \left(\frac{200.65 - 27.9}{27.9} \right) - 0.00003 \leq 0.009 \right\} \times 26100 \\
 &= (0.01854 \leq 0.009) \times 26100 \\
 &= 0.009 \times 26100 \\
 &= 234.9 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Momen maksimum;

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \\
 &= \left\{ 235.619 \times 290 \times \left(162 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\} + \left\{ 0.85 \times (1 \times 1.3 \times 150) \times 234.9 \times \left(200.65 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\} \\
 &= 17.609738 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$M_u = 17.609738 \times 0.85 = 14.97 \text{ kNm}$$

Beban maksimum:

Dari nilai momen nominal tersebut, didapat $P_{design \text{ max}}$:

$$14.97 = (0.5 P \times L) + \left(\frac{1}{8} \times q \times L^2 \right), \text{ dengan } q \text{ (berat sendiri balok)} = 0.1944 \text{ kN/m}$$

$$14.97 = (0.5 P \times 1) + \left(\frac{1}{8} \times 0.1944 \times 2.7^2 \right)$$

$$P_{\text{max}} = 29.89 \text{ kN}$$

3. Benda Uji FH-12

Momen maksimum:

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \\
 &= \left\{ 235.619 \times 290 \left(162 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\} + \left\{ 0.85 \times (3 \times 1.3 \times 150) \times 234.9 \left(201.95 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\} \\
 &= 32.462732 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$M_u = 32.462732 \times 0.85 = 27.59 \text{ kNm}$$

Beban maksimum:

Dari nilai momen nominal tersebut, didapat $P_{design \text{ max}}$:

$$27.59 = (0.5 P \times L) + \left(\frac{1}{8} \times q \times L^2 \right), \text{ dengan } q \text{ (berat sendiri balok)} = 0.1944 \text{ kN/m}$$

$$27.59 = (0.5 P \times 1) + \left(\frac{1}{8} \times 0.1944 \times 2.7^2 \right)$$

$$P_{\text{max}} = 55.13 \text{ kN}$$

4. Benda Uji FH-3

Momen maksimum:

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \\
 &= \left\{ 235.619 \times 290 \left(162 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\} + \left\{ 0.85 \times (3 \times 1.3 \times 150) \times 234.9 \left(201.95 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\} \\
 &= 32.462732 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$M_u = 32.462732 \times 0.85 = 27.59 \text{ kNm}$$

Beban maksimum:

Dari nilai momen nominal tersebut, didapat $P_{design \text{ max}}$:

$$\frac{1}{8} \times q \times L^2)$$

$$27.59 = (0.5 P \times L) + \left(\frac{1}{8} \times 0.1944 \times 2.7^2 \right) \text{, dengan } q \text{ (berat sendiri balok)} = 0.1944 \text{ kN/m}$$

$$27.59 = (0.5 P \times 1) +$$

$$P \text{ max} = 55.13 \text{ kN}$$

5. Benda Uji FH-32

Momen maksimum:

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fs} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$$= \left\{ 235.619 \times 290 \left(162 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\} + \left\{ 0.85 \times (5 \times 1.3 \times 150) \times 234.9 \left(203.62 - \frac{0.85 \times 27.9}{2} \right) \right\}$$

$$= 47.590216 \text{ Nmm}$$

$$M_u = 47.590216 \times 0.85 = 40.45 \text{ kNm}$$

Beban Maksimum:

Dari nilai momen nominal tersebut, didapat $P_{design \text{ max}}$:

$$\frac{1}{8} \times q \times L^2)$$

$$40.45 = (0.5 P \times L) + \left(\frac{1}{8} \times 0.1944 \times 2.7^2 \right) \text{, dengan } q \text{ (berat sendiri balok)} = 0.1944 \text{ kN/m}$$

$$40.45 = (0.5 P \times 1) +$$

$$P \text{ max} = 80.85 \text{ kN}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan teoritis dari kelima varian benda uji balok dapat ditunjukkan pada Tabel 3.

Tipe Balok	Hasil Teoritis			
	P max (kN)	P max FH/BN	M max (kNm)	M max FH/BN
BN	17.39	1.00	8.72	1.00
FH-1	29.89	1.81	14.97	1.81
FH-12	55.13	3.34	27.59	3.33
FH-3	55.13	3.34	27.59	3.33
FH-32	80.85	4.90	40.45	4.89

Sumber: Data Olahan (2024)

Dapat dilihat bahwa nilai beban maksimum (P_{max}) dan momen maksimum (M_{max}) tertinggi pada balok FH-32 yaitu dengan nilai P_{max} sebesar 80.85 kN dan M_{max} sebesar 40.45 kNm. Sedangkan nilai P_{max} dan M_{max} terendah pada balok BN dengan P_{max} sebesar 29.89 kN dan M_{max} sebesar 14.97 kNm. Rasio beban atau rasio momen maksimum yang diperoleh merupakan perbandingan beban atau momen maksimum balok *GFRP* dengan balok normal. Dapat dilihat bahwa balok *GFRP* FH-1 memberikan rasio paling kecil sebesar 1.81 dibandingkan tipe balok *GFRP* lainnya, dan rasio tertinggi terjadi pada balok *GFRP* FH-32 sebesar 4.90. Dari hasil perhitungan teoritis menunjukkan bahwa semakin banyak lapisan *GFRP* yang digunakan, maka beban dan momen yang dapat ditahan akan semakin besar juga.

Berdasarkan hasil dari ketiga metode yaitu eksperimen, pemodelan *Abaqus 2017*, dan perhitungan teoritis dapat dilihat perbandingan nilai P_{max} pada Tabel 4 dan M_{max} pada Tabel 5.

Tabel 4. Perbandingan Beban Maksimum (P Max) Hasil Eksperimen, Pemodelan Abaqus, dan Perhitungan Teoritis

Tipe Balok	Eksperimen	Abaqus	Teoritis	Eks/Abq	Eks/Teo
	P max (kN)	P max (kN)	P max (kN)		
BN	16.5	18.26	17.39	0.90	0.95
FH-1	25.0	26.5	29.89	0.94	0.84
FH-12	29.5	40.3	55.13	0.73	0.54
FH-3	36.0	42.92	55.13	0.84	0.65
FH-32	42.0	53.34	80.85	0.79	0.52

Tabel 5. Perbandingan Momen Maksimum (M Max) Hasil Eksperimen, Pemodelan Abaqus, dan Perhitungan Teoritis

Tipe Balok	Eksperimen	Abaqus	Teoritis	Eks/Abq	Eks/Teo
	M max (kNm)	M max (kNm)	M max (kNm)		
BN	8.27	9.15	8.72	0.90	0.95
FH-1	12.52	13.27	14.97	0.94	0.84
FH-12	14.77	20.17	27.59	0.73	0.54
FH-3	18.02	21.48	27.59	0.84	0.65
FH-32	21.02	26.69	40.45	0.79	0.52

Sumber: Data Olahan (2024)

Berdasarkan hasil yang diperoleh, disimpulkan bahwa perhitungan teoritis menghasilkan P max paling tinggi yaitu sebesar 80.85 kN, dibandingkan dengan hasil analisis menggunakan Abaqus sebesar 53.34 kN, dan hasil eksperimental sebesar 42.0 kN. Begitu juga untuk M max paling tinggi dari perhitungan teoritis sebesar 40.45 kNm, hasil analisis Abaqus sebesar 26.69 kNm, dan eksperimen sebesar 21.02 kNm. Terdapat perbedaan nilai dari ketiga metode yang dimungkinkan karena lekatan lem kurang sempurna dalam pemasangan GFRP saat eksperimen, dan pembagian elemen (*meshing*) model di Abaqus kurang rapat sehingga penyebaran tegangan kurang merata.

Analisis Pola Retak Balok

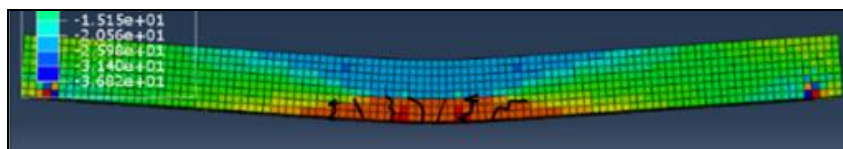
Pola retak balok dianalisis dengan membandingkan pola retak yang dihasilkan dalam pemodelan di Abaqus dengan eksperimen. Retak yang muncul pada eksperimen digambarkan dan diberi nomor di setiap penambahan beban yang diberikan, sedangkan retak yang muncul pada pemodelan Abaqus dilihat dari penyebaran tegangan tarik paling besar ditunjukkan dengan warna merah tua dan tegangan tekan paling besar ditunjukkan dengan warna biru tua. Adapun hasil analisis pola retak kedua metode ditunjukkan sebagai berikut:

1. Pola Retak Balok Normal



Gambar 9. Pola retak balok BN hasil eksperimen

Sumber: Djamaluddin (2011)

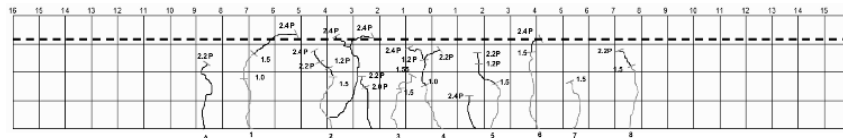


Gambar 10. Pola Retak Balok BN di Abaqus

Sumber: Data Olahan (2024)

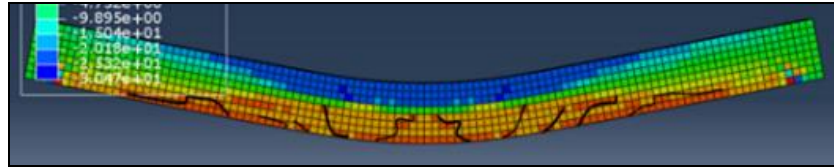
Gambar 9 menunjukkan pola retak balok normal BN pada pengujian eksperimen, yang digambarkan dalam sketsa pola retak dan diberi nomor retakan. Gambar 10 merupakan pola retak balok BN hasil pemodelan di Abaqus yang digambarkan dalam sketsa pola retak mengikuti tegangan tarik paling besar (warna merah tua) yang terjadi. Pola retak balok BN dari kedua metode memiliki persamaan, yaitu retak terkonsentrasi di bagian lapangan sisi bawah dan menjalar ke area tekan balok sisi atas.

2. Pola Retak Balok FH-1



Gambar 11. Pola retak balok FH-1 hasil eksperimen

Sumber: Djamaluddin (2011)

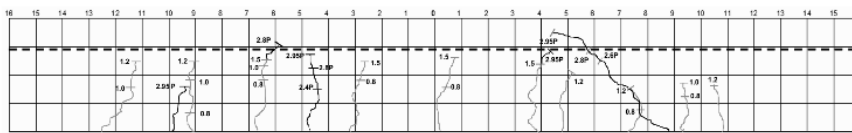


Gambar 12. Pola Retak Balok FH-1 di Abaqus

Sumber: Data Olahan (2024)

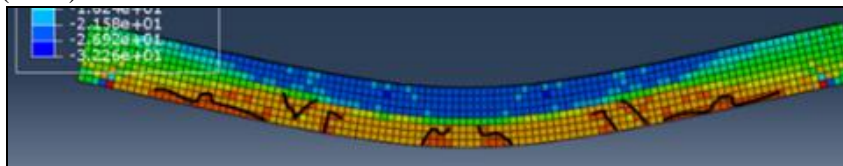
Gambar 11 dan 12 menunjukkan pola retak yang terjadi pada balok FH-1. Pola retakan pada balok FH-1 terjadi menyebar pada seluruh area tarik, dan hampir merata di sepanjang balok. Retakan yang terjadi berawal dari titik daerah lapangan (bagian tarik) kemudian menjalar ke sepanjang bagian yang mengalami tegangan tarik. Retakan yang terjadi pada balok FH-1 hampir mendekati garis sumbu netral.

3. Pola Retak Balok FH-12



Gambar 13. Pola retak balok FH-12 hasil eksperimen

Sumber: Djamaluddin (2011)

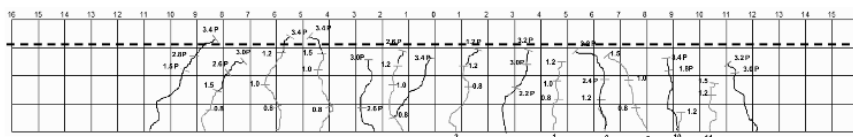


Gambar 14. Pola Retak Balok FH-12 di Abaqus

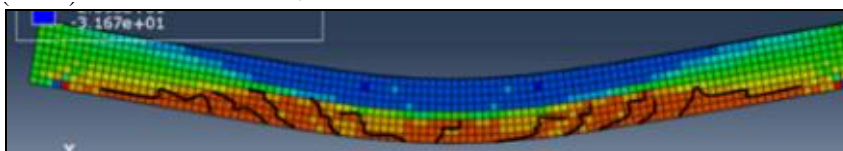
Sumber: Data Olahan (2024)

Gambar 13 dan 14 menunjukan pola retak yang terjadi pada balok FH-12. Pola retakan pada balok FH-12 banyak terjadi di area yang hanya menggunakan 1 lapis GFRP terutama bagian tarik yang mendekati daerah tumpuan. Hal tersebut dikarenakan pada daerah lapangan, dipasang tambahan GFRP sebanyak 2 lapis sehingga dapat meminimalisir adanya retakan.

4. Pola Retak Balok FH-3



Sumber: Djamaluddin

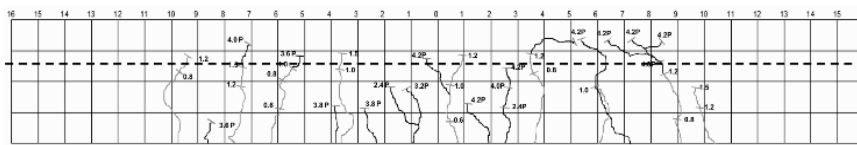


Gambar 16. Pola Retak Balok FH-3 di Abaqus

Sumber: Data Olahan (2024)

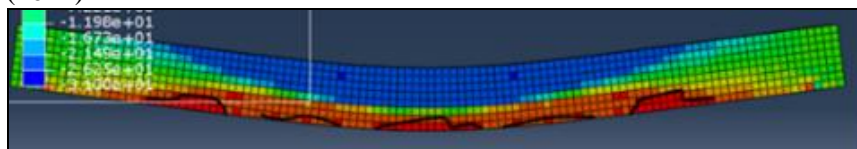
Gambar 15 dan 16 menunjukkan pola retak yang terjadi pada balok FH-3. Pola retakan pada balok FH-3 menyebar pada seluruh area tarik baik di daerah tumpuan maupun di lapangan. Awal mula retakan terjadi pada daerah lapangan (bagian tarik) kemudian menjala ke sepanjang bagian yang mengalami tegangan tarik bahkan hampir di sepanjang balok (bagian tarik). Retakan yang terjadi pada balok FH-3 lebih jauh dari sumbu netral jika dibandingkan dengan balok FH-1.

5. Pola Retak Balok FH-32



Gambar 17. Pola retak balok FH-32 hasil eksperimen

Sumber: Djamaluddin (2011)



Gambar 18. Pola Retak Balok FH-32 di Abaqus

Sumber: Data Olahan (2024)

Gambar 17 dan 18 menunjukkan pola retak yang terjadi pada balok FH-32. Pola dan area retakan pada balok FH-32 paling sedikit dan paling kecil jika dibandingkan dengan balok BN, FH-1, FH-3, dan FH-12. Hal tersebut dikarenakan balok FH-32 menggunakan perkuatan lebih optimal dibandingkan dengan varian balok lainnya.

Berdasarkan pola retak pada kelima varian benda uji menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan pola antara pengujian eksperimen dan pemodelan di *Abaqus 2017*. Retak balok FH-32 paling sedikit terjadi pada titik pembebanan yang sama pada kesemua benda uji, dikarenakan pemakaian *GFRP* paling banyak, dengan besar beban maksimum yang ditahan pada eksperimen sebesar 42 kN dan beban maksimum yang ditahan pada pemodelan di *Abaqus* sebesar 53,34 kN. Retak balok FH-3 paling menyebar dan lebih merata ke sepanjang bentang balok dikarenakan penggunaan 3 lapis *GFRP* dan dipasang sepanjang bentang, dengan besar beban maksimum yang ditahan pada eksperimen sebesar 36 kN dan beban maksimum yang ditahan pada pemodelan di *Abaqus* sebesar 42,92 kN. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah lapis dan lokasi pemasangan *GFRP* mempengaruhi pola retak baik kecepatan retak, besarnya retakan, jumlah retakan dan penyebarannya.

SIMPULAN

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi dalam analisis kuat lentur balok beton bertulang dengan perkuatan *GFRP* menggunakan program *finite element Abaqus*. Mengingat pemakaian program *finite element* masih jarang diaplikasikan di dunia konstruksi terutama sebagai salah satu alternatif metode analisis kekuatan struktur.
2. Berdasarkan ketiga metode, nilai beban maksimum (P_{max}) dan momen maksimum (M_{max}) tertinggi pada balok FH-32 dengan nilai P_{max} yang dapat ditahan pada eksperimen sebesar 42 kN, pada pemodelan *Abaqus* sebesar 53,34 kN, dan pada perhitungan teoritis sebesar 80,85 kN. Nilai M_{max} yang terjadi pada eksperimen adalah sebesar 21,02 kNm, pada pemodelan *Abaqus* sebesar 26,69 kNm, dan pada perhitungan teoritis sebesar 40,45 kNm.
3. Nilai P_{max} dan M_{max} terendah pada balok BN dengan nilai P_{max} yang dapat ditahan pada eksperimen sebesar 16,5 kN, pada pemodelan *Abaqus* sebesar 18,26 kN, dan pada perhitungan teoritis sebesar 17,39 kN. Nilai M_{max} yang terjadi pada eksperimen sebesar 8,27 kNm, pada pemodelan *Abaqus* sebesar 9,15 kNm, dan pada perhitungan teoritis sebesar 8,72 kNm.
4. Berdasarkan nilai P_{max} dan M_{max} dari masing-masing tipe balok, menunjukkan bahwa semakin banyak lapisan *GFRP* yang digunakan, maka beban dan momen yang dapat ditahan akan semakin besar.
5. Nilai P_{max} dan M_{max} dari perhitungan teoritis paling tinggi, diikuti hasil pemodelan *Abaqus*, dan hasil eksperimen paling kecil.
6. Perbedaan hasil P_{max} dari ketiga metode yang dilakukan, dimungkinkan karena lekatan (pengeleman) kurang sempurna dalam pemasangan *GFRP* saat eksperimen, dan pembagian elemen (*meshing*) model di *Abaqus* kurang rapat sehingga penyebaran tegangan kurang merata.
7. Jumlah lapis dan lokasi pemasangan *GFRP* mempengaruhi pola retak. Semakin banyak jumlah lapis *GFRP* maka kecepatan retak semakin lambat dan jumlah retak lebih sedikit. Apabila *GFRP* dipasang merata ke sepanjang bentang dan tidak terkonsentrasi di tengah bentang, maka retakan akan menyebar sepanjang bentang dan besar retakan akan merata.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaqus 6.14 Student Edition (2014) *Abaqus Theory Guide*. Simulia.
ACI Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14)*. Farmington Hills, MI, U.S.A.
ACI Committee 440. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for*

- Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)*. Farmington Hills, MI, U.S.A.
- Ashad, H., Nurdin, R. M. S. H., Nizar, M. C., Utina, T., & Syarif, M. (2024). Sifat sifat Mekanik Beton Dengan Menggunakan Fiber Reinforced Polymer (FRP). *Jurnal Talenta Sipil*, 7(2), 540–549. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v7i2.538>
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. SNI 2847:2019*. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2021). *Panduan Perancangan dan Pelaksanaan System Lembaran Serat Berpolimer Terlekat Eksternal Untuk Perkuatan Struktur Beton. SNI 8971:2021*. BSN. Jakarta.
- Djamaluddin, R. & Hino, S. (2011). Kapasitas Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang Yang Telah Meleleh Dengan Menggunakan Lembaran GFRP. *Dinamika Teknik Sipil*, 11(3). 293-300
- Luastika, G. N., Lingga, A. A., & Lestyowati, Y. (2019). Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Glass Fiber Reinforced Polymer. *JeLAST : Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, dan Tambang*, 6(2). 1–7.
- Mulyono, Tri. (2021). *Bahan Bangunan dan Konstruksi*. Stiletto Book
- Musyaffa, M. F., & Jafar, J. (2022). Perbandingan Kinerja Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Sambungan Lewatan Dan Sambungan Mekanis (Clamp). *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi) : Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 12(1), 101. <https://doi.org/10.24127/tp.v12i1.2327>
- Nurlina, S., Suseno, H., Hidayat, T., & Pratama, M. (2016). Perbandingan Daktilitas Balok Beton Bertulang Dengan Menggunakan Perkuatan CFRP Dan GFRP. *Rekayasa Sipil*, 10(1), 62–69. <https://rekayasasipil.uib.ac.id/index.php/rs/article/view/333>
- Prameswara, A.R., Dony, Rasiwan, & Rabihati, E. (2022). Evaluasi Rancangan Mutu Beton Pada Pembangunan Gedung Di Kalimantan Barat. *Construction and Material Journal*, 4(3), 149-156.
- Prayitno, S., Sunarmasto, & Agustya, H. (2016). Pengaruh Panjang Sambungan Lewatan Lebih Dari Syarat SNI-2847-2013 Terhadap Kuat Lentur Pada Balok Beton Bertulang Tulangan Baja Ulir. *Matriks Teknik Sipil*, 4(3), 892–898.
- Putera, B. H., Prasetyo, P. E., Mulyanto, Y. Y., & Setiyadi, B. (2024). Pengaruh Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Terhadap Kuat Lentur Beton. *G-Smart*, 8(1), 6–16. <https://doi.org/10.24167/gsmart.v8i1.10751>
- Setiawan, A. M., Padli, A. M. N., Ali, M. Y., Bachtiar, E., Tandioaga, V., & Fitriany, C., N. (2020). Perilaku Lentur Balok Beton pada Kombinasi Daerah Geser dan Tarik yang Menggunakan Material FRP sebagai Perkuatan Eksternal di Lingkungan Ekstrem. *Indonesian Journal of Fundamental Sciences*, 6(2), 146-156.
- Siahaan, S., & Tarigan, J. (2024). Perkuatan Pelat Lantai Dengan FRP (Fiber Reinforced Polimer) (Studi Kasus: Gedung Sekolah Siantar). *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.54367/jrkms.v7i1.3194>
- Sudarsono. (2023). *Simulasi Tarik Pada Komposit CFRP Berlubang*. *Jurnal Fokus Elektroda*, 08(03), 208–212.
- Tarigan, J., Patra, F. M., & Sitorus, T. (2018). Flexural Strength Using Steel Plate, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) And Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) On Reinforced Concrete Beam In Building Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*
- Wicaksono, D. A., Suryanita, R., & Djauhari, Z. (2019). Studi Eksperimental Balok Beton Bertulang Dengan Dan Tanpa Sengkang. *Sainstek (e-Journal)*, 7(1), 32–39. <https://doi.org/10.35583/js.v7i1.14>
- Vricilia, M., Ridwan, A., & Candra, A. I. (2020). Kuat Tekan Pelat Beton Menggunakan Pasir Wlingi dan Wiremesh Diameter 4 mm. *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*, 3(2), 219. <https://doi.org/10.30737/jurmateks.v3i2.1099>