

# PEMODELAN FRP PRATEGANG BALOK BETON BERTULANG BERBASIS SIMULASI FEM

Asri Mulya Setiawan<sup>a\*</sup>, Rudy Djamaluddin<sup>b</sup>, Fakhruddin<sup>b</sup>, Muh. Fajrul Miftah R<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Mahasiswa Program Doktorat Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia, e-mail : [klanmulyasetiawan@gmail.com](mailto:klanmulyasetiawan@gmail.com)

<sup>b</sup> Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

<sup>c</sup> Mahasiswa Program Sarjana Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

## ABSTRAK

Penggunaan *Finite Element Method* (FEM) dalam menyelesaikan sebuah pemodelan struktur merupakan salah satu cara untuk dapat menyelesaikan sebuah analisis dengan memperhitungkan sifat material nonlinier, hubungan antara beton dan tulangan baja, serta dapat menghasilkan simulasi kegagalan seperti retak. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan mengenai rekayasa struktur menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM), serta untuk mengetahui penggunaan prategang CFRP *strip* dalam meningkatkan kapasitas struktur balok beton bertulang. Penelitian dilakukan dengan menggunakan aplikasi berbasis FEM dengan melakukan perbandingan terhadap tiga pemodelan, yaitu BN (balok beton bertulang non FRP), BFRP (balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP *strip*), dan BPFRP (balok beton bertulang dengan perkuatan prategang CFRP *strip*). Hasil. Pemodelan dengan menggunakan metode *Finite Element* menunjukkan perbandingan yang signifikan terhadap pemodelan yang dilakukan, dimana pada pemodelan balok BN (Balok beton bertulang non perkuatan), diketahui bahwa beban maksimum yaitu sebesar 271,243 kN, dan pada pemodelan BFRP (balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP *strip*) beban maksimum yaitu 316,961 kN, diketahui bahwa terjadi peningkatan sebesar 16,85%, kemudian pada pemodelan BPFRP (balok beton bertulang dengan perkuatan prategang CFRP *strip*) beban maksimum yaitu sebesar 408,782 kN. Terjadi peningkatan kemampuan balok untuk menahan beban maksimum, yaitu sebesar 50,70% terhadap model BN, dan sebesar 28,97% terhadap model BFRP. Pemodelan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) yang dilakukan dengan menambahkan perkuatan eksternal yaitu prategang pada sebuah CFRP sangat mempengaruhi nilai beban maksimum, nilai regangan beton, dan juga nilai terhadap regangan baja.

Kata Kunci: FEM, CFRP strip, Balok beton bertulang, Prategang

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan struktur beton bertulang yang kuat dan tahan lama semakin meningkat seiring dengan pesatnya perkembangan infrastruktur dan konstruksi di berbagai sektor. Beton bertulang adalah material konstruksi yang telah lama digunakan dalam pembuatan berbagai struktur, baik itu bangunan, jembatan, maupun jalan. Namun, dalam realitanya sering kali didapati struktur beton bertulang telah rusak/hancur sebelum waktunya (Hijriah et al., 2018). Oleh karena itu, meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton bertulang sangat penting untuk memastikan keberlanjutan dan keselamatan struktur.

Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk memperbaiki kekuatan beton bertulang adalah dengan menggunakan teknik perkuatan. Penggunaan perkuatan pada balok beton bertulang telah terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas beban dan umur layan struktur. Banyak metode inovasi terbaru dalam bidang ini seperti dengan beton tambahan (*concrete jacketing*), baja (*steel jacketing*), atau dengan perkuatan material komposit serat (FRP) (Mansur et al., 2022). FRP dikenal memiliki kekuatan tinggi dan berat yang ringan. Perkuatan dengan FRP ini bisa berupa strip FRP yang dipasang pada permukaan balok beton untuk meningkatkan kekuatan lentur dan geser.

Pemasangan lapisan pada FRP didasarkan pada jenis beban yang bekerja. Pengaplikasian pada balok sering kali dilakukan pada bagian bawah, dimana ditujukan untuk menahan beban lentur. Sedangkan penggunaan FRP pada bagian samping ditujukan untuk menahan beban geser, sehingga pemasangan posisi FRP disesuaikan dengan kebutuhan (Harahap et al., 2024). Untuk meningkatkan fungsi efisiensi FRP maka pemberian gaya prategang FRP merupakan suatu alternatif yang dapat dipertimbangkan karena memberikan manfaat tambahan yaitu dapat memperbaiki/menutup retak, memperbaiki lendutan sehingga akan memperbaiki pula durabilitas. Namun, metode ini membutuhkan analisis dan desain yang tepat agar hasilnya optimal.

Untuk melihat kemampuan dari balok yang akan di berikan perkuatan eksternal Prategang CFRP Strip, kita bisa melakukan sebuah analisis dengan menggunakan pemodelan berbasis *Finite Element Method (FEM)* agar dapat memprediksi perilaku benda dalam kondisi beban dan batas. Hal tersebut juga dapat dijadikan sebagai perbandingan awal sebelum melakukan pengujian eksperimen di laboratorium.

*Finite Element Method (FEM)* merupakan salah satu dari metode numerik yang memanfaatkan operasi matriks untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik. Metode lain yaitu metode analitik, yang untuk melakukannya diperlukan suatu persamaan matematik yang merupakan model dari perilaku fisik. Semakin rumit perilaku fisiknya (karena kerumitan bentuk geometrik, banyaknya interaksi beban, constrain, sifat material, dan lain-lain) maka semakin sulit atau bahkan mustahil dibangun suatu model matematik yang bisa mewakili permasalahan tersebut. Alternatif metodenya adalah dengan cara membagi kasus tadi menjadi bagian-bagian kecil yang sederhana yang mana pada bagian kecil tersebut kita bisa membangun model matematik dengan lebih sederhana. Kemudian syarat batas dalam interaksi antar bagian kecil tersebut ditentukan berdasarkan fenomena fisik yang akan diselesaikan. Metode ini dikenal sebagai metode elemen hingga, karena kita membagi permasalahan menjadi sejumlah elemen tertentu untuk mewakili permasalahan yang sebenarnya jumlah elemennya adalah kontinum (tak terhingga). *Finite Element Method (FEM)* memungkinkan pemodelan struktur dengan memperhitungkan sifat material nonlinear, hubungan antara beton dan tulangan, serta menghasilkan kegagalan seperti retak.

Penelitian yang dilakukan oleh (Nguyen et al., 2024) bertujuan untuk memperluas pemahaman terhadap kinerja balok beton bertulang yang diperkuat dengan lembaran FRP berprategang melalui pendekatan eksperimental dan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan parameter terhadap kinerja balok selama kualitas ikatan antara FRP dan baton dapat dijaga. Begitupun dengan sebaliknya apabila ikatan tidak memadai, maka akan berisiko mempercepat terjadinya laminasi

Berdasarkan hal-hal diatas, analisis ini dilakukan untuk mengembangkan model numerik berbasis *Finite Element Method (FEM)* yang akurat. Model ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai interaksi antara FRP dan beton, serta membantu dalam perencanaan dan desain struktur yang lebih efisien dan aman

## 2. PENDEKATAN TEORI

### Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strips

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strips merupakan material komposit ringan dengan perkuatan tarik sangat tinggi yang banyak digunakan untuk memperkuat elemen struktur beton bertulang. Dalam konteks balok beton, CFRP strips diaplikasikan secara eksternal pada permukaan balok dengan menggunakan resin epoxy, umumnya untuk meningkatkan kapasitas geser.

Studi eksperimental oleh Ibrahim et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan CFRP strips pada sisi balok mampu meningkatkan kapasitas geser hingga 88–95% dibandingkan balok kontrol tanpa perkuatan. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh (Askar et al., 2022).menunjukkan bahwa CFRP strip efektif dalam meningkatkan kekuatan lentur dan kekauan balok beton bertulang, bahkan saat dikenai pembebanan berulang. Penelitian tersebut juga menegaskan bahwa CFRP strip mampu menjaga performa struktural jangka panjang, menjadikannya solusi perkuatan yang handal untuk struktur yang mengalami beban siklik atau dinamis.



**Gambar 1.** Carbon Fiber Reinforced Polymer Strip

**Tabel 1.** Karakteristik CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) Strip

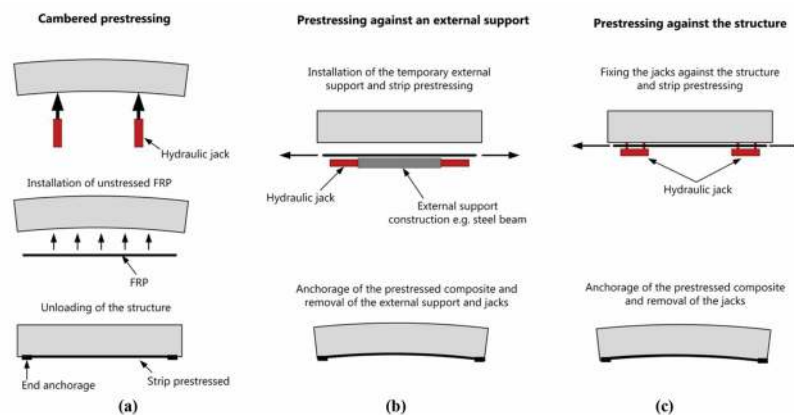
SIFAT MATERIAL CFRP STRIP	
SIFAT MATERIAL	NILAI TES
Kekuatan Tarik Standar (ASTM D3039)	2800 MPa
Modulus Tarik (ASTM D3039)	$1,6 \times 10^5$ Mpa
Regangan maks (ASTM D3039)	1,6 %
Kekuatan Geser (ASTM D2344)	80 Mpa
Kekuatan Lentur (ASTM D7264)	1600 Mpa
Kandungan Serat Karbon (%)	$\geq 65$ %
Tebal	2.00 mm

Sumber: Katalog horse

### Prategang FRP

Pemberian gaya eksternal dengan tujuan memperkuat nilai sebuah struktur beton bertulang yang dilakukan pada sebuah FRP (*Prestressed FRP*) (Moshiri et al. 2020). Pada perkuatan yang dilakukan di balok bertulang dengan penerapan *prestressed FRP* mampu mengurangi tegangan tarik pada baja tulangan internal sehingga dapat meningkatkan kemampuan untuk menahan beban dan mengurangi retakan serta lendutan pada beton. Selain itu dari hasil review Aslam et al. (2015) menyatakan bahwa *Prestressed FRP* meningkatkan kekuatan lentur, rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi, dan ketahanan terhadap debonding lebih tinggi dibandingkan dengan baja prategang. Nguyen et al. (2024) juga menerapkan prategang pada lembaran FRP jenis karbon (CFRP) sebesar 20% untuk menghindari terjadinya debonding awal dan mendapatkan bahwa CFRP yang diberi prategang lebih efektif dibandingkan CFRP tanpa prategang.

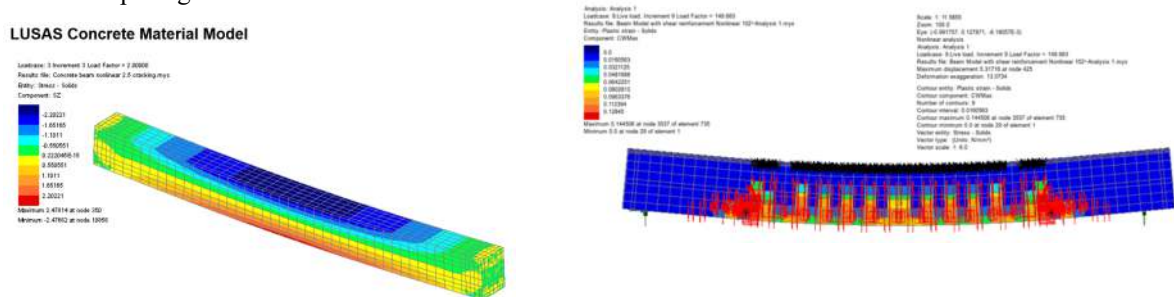
S&P Clever Reinforcement Company telah menyediakan sistem pemberian prategang menggunakan angkur dari pelat alumunium untuk menerapkan kompresi pada strip dan dongkrak hidrolik untuk mendorong angkur yang dipasang pada rangka. Gaya prategang pada ujung akan berhasil dilepaskan setelah satu hari pemasangan. Oleh karena itu diperlukan perawatan perekat pada angkur setidaknya 24 jam. Setelah 24 jam komponen sistem yaitu angkur, pelat alumunium serta baut sementara dapat dilepas (Michels et al., 2016).



**Gambar 9.** Tipe pemberian prategang FRP pada balok beton bertulang

*Finite element method (FEM)* atau metode elemen hingga merupakan sebuah penyelesaian numerik yang digunakan untuk mendapatkan hasil dari persamaan diferensial parsial yang disebabkan dari berbagai masalah rekayasa dan matematika fisik. Metode ini dijabarkan dari sistem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil yang lebih sederhana, yang disebut elemen hingga dengan tujuan agar dapat mempermudah saat melakukan analisis dan perhitungan (Santoso et al., 2019).

Dalam persoalan – persoalan yang menyangkut geometri yang rumit, seperti persoalan pembebanan terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji. Penyelesaian analisis dari suatu persamaan diferensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit dan tidak mudah diperoleh. Dalam menganalisis perilaku tegangan dan regangan nonlinear struktur beton bertulang, digunakan alat bantu perangkat lunak LUSAS. LUSAS adalah aplikasi perangkat lunak yang digunakan dalam pemodelan dan analisis struktur beton, dimana memungkinkan pengguna untuk memodelkan perilaku material beton secara lebih akurat, terutama dalam kondisi tegangan dan regangan nonlinier. Dalam konteks beton, LUSAS memungkinkan simulasi yang lebih realistis dengan mempertimbangkan berbagai aspek penting, seperti perilaku beton yang mengalami keruntuhan atau kegagalan. Berikut ini contoh hasil simulasi perilaku material beton dengan bantuan aplikasi LUSAS pada gambar 3.



**Gambar 3.** Contoh hasil analisis pemodelan aplikasi LUSAS

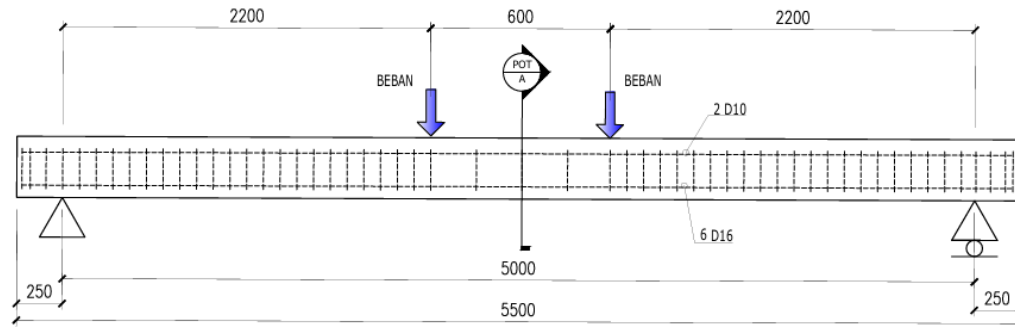
### 3. DESAIN PENELITIAN

Dimensi dan tulangan balok dianalisa dengan metode kekuatan batas (ultimate strength design). Ada 3 (tiga) variasi balok dalam penelitian ini dengan dimensi balok 500 x 700 x 5500 mm dengan mutu beton balok rencana sebesar  $f'c$  40 Mpa dan mutu baja sebesar  $f_y$  420 MPa. Untuk variasi balok beserta detailnya dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 4.

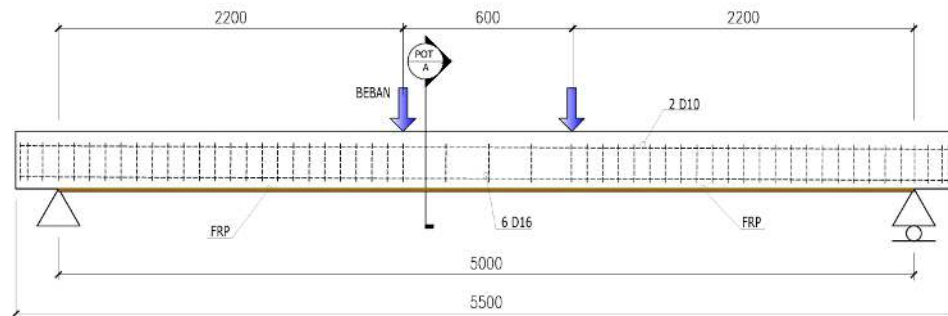
**Tabel 2.** Variasi Benda Uji

NO	Benda Uji	Jumlah
1	Balok Kontrol (CB)	2
2	Balok FRP Sheet Non Prategang (FRP-NP)	2
3	Balok FRP Sheet dengan Prategang ( <i>Prestressed</i> FRP) (FRP-PT)	2

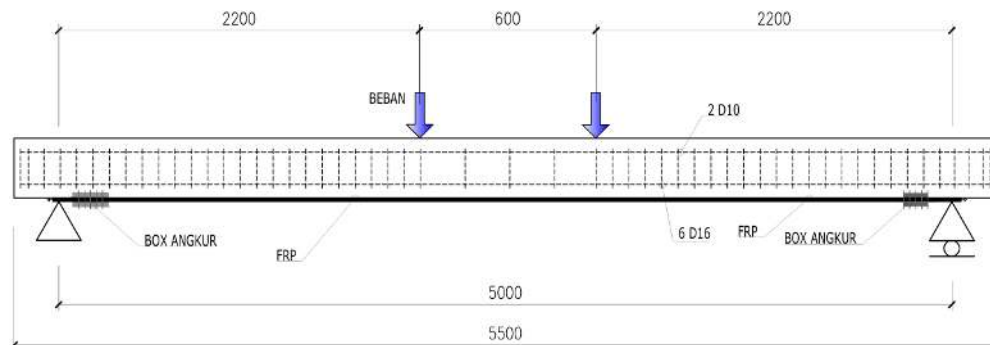
a) Balok beton bertulang non FRP



b) Balok beton bertulang dengan perkuatan FRP Strip



c) Balok beton bertulang dengan perkuatan Prstressed FRP Strip

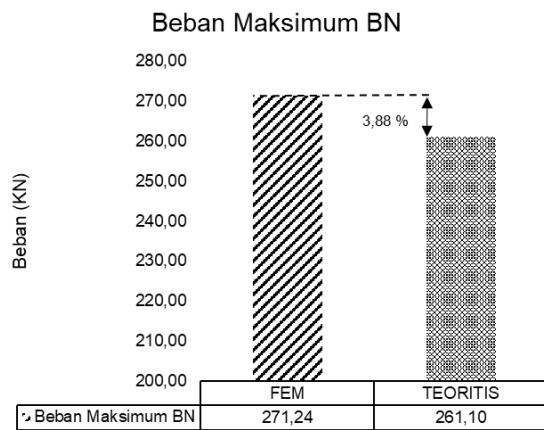


**Gambar 4.** Desain Benda Uji

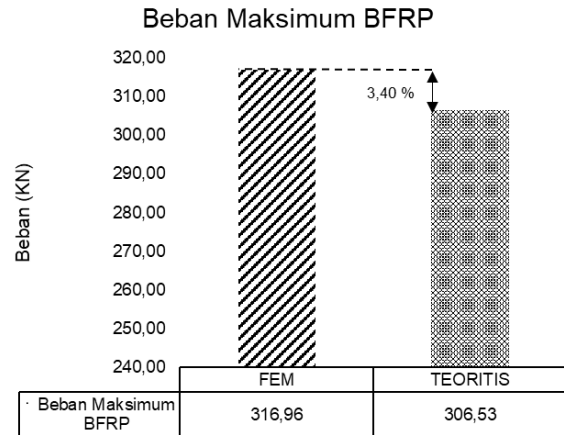
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Beban maksimum

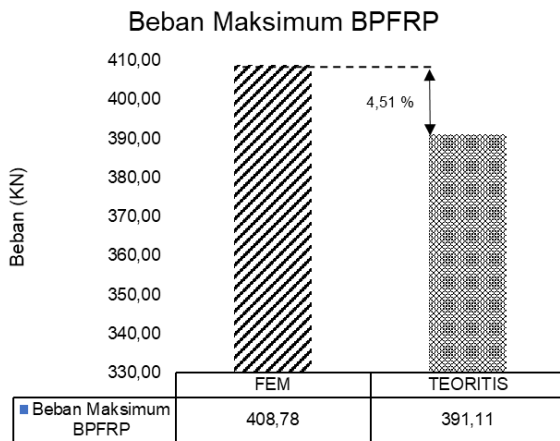
Penyelesaian yang dilakukan dengan melakukan perhitungan manual dengan menggunakan excel di dapatkan perbandingan hasil analisis pada pemodelan BN, BFRP dan BPFRP yang tertera pada Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7



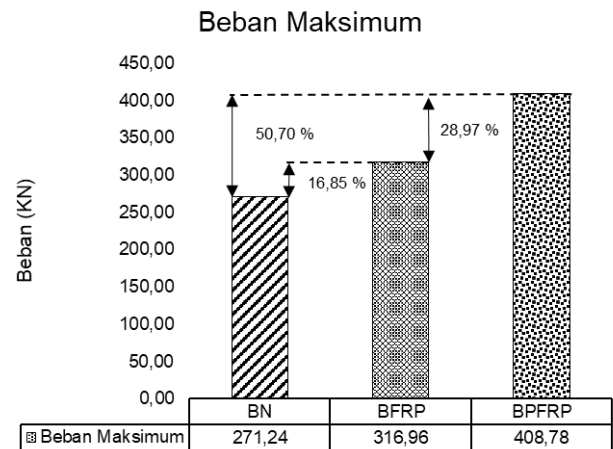
**Gambar 5.** Perbandingan Analisis FEM dan Teoritis model BN



**Gambar 6.** Perbandingan Analisis FEM dan Teoritis model BFRP



**Gambar 7.** Perbandingan Analisis FEM dan Teoritis model BPFRP

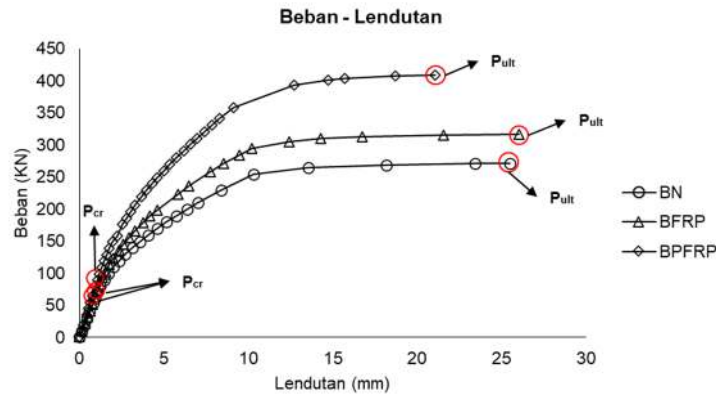


**Gambar 8.** Beban maksimum FEM

Analisis balok beton bertulang dengan menggunakan metode FEM, dapat memperlihatkan beban maksimum yang mampu diterima sebuah model balok, dengan membandingkan ketiga pemodelan balok, yaitu BN, BFRP, dan BPFRP. Pada gambar 8, dapat dilihat peningkatan yang terjadi pada saat pemodelan telah diberikan perkuatan.

#### Hubungan beban dan lendutan

Analisis yang dilakukan menggunakan metode *finite element method* ini memberikan data hubungan beban terhadap lendutan. Peninjauan hasil analisis ini dilakukan pada ujung model (tengah bentang) dengan pilihan *load factor* maksimum. Pada tabel dibawah akan ditunjukkan hasil analisis hubungan beban dan lendutan terhadap tiga model dengan menggunakan FEM.



**Gambar 9.** Grafik gabungan beban – lendutan

**Tabel 3.** Rekapitulasi nilai beban - lendutan

Model	Pemodelan FEM			
	P crack (kN)	Lendutan (mm)	P ultimit (kN)	Lendutan (mm)
<b>BN</b>	55	0,815	272,244	25,517
<b>BFRP</b>	63	0,933	316,961	26,051
<b>BPFPR</b>	80	0,946	408,782	21,090

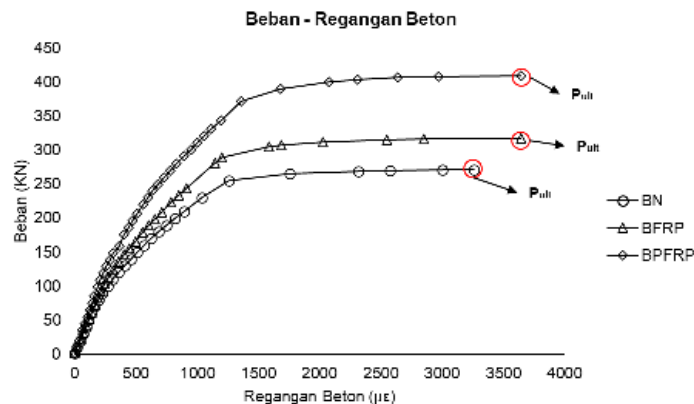
Pada pemodelan dapat dilihat hasil hubungan antara beban dan lendutan pada gambar grafik diatas di dapatkan beban maksimum pada balok BN yang diperoleh dari hasil analisis yaitu 271,244 kN, dengan lendutan yang terjadi dari tengah bentang balok yaitu sebesar 25,517 mm.

Pada pemodelan FEM balok BFRP diketahui bahwa terjadi peningkatan kemampuan balok bertulang untuk menahan beban maksimum hingga mencapai 316,96 kN dengan lendutan yang terjadi pada beban tersebut mencapai 26,052 mm. Terjadi peningkatan sebesar 16,85% dibandingkan pada model yang tidak diberikan perkuatan FRP.

Pada pemodelan FEM dengan perkuatan prategang FRP (BPFPR) didapatkan beban maksimum mencapai 408,782 kN dengan lendutan yang terjadi yaitu 21,090 mm. Terjadi peningkatan beban maksimum mencapai 50,70% dibandingkan dengan model balok bertulang non perkuatan, dan juga terjadi peningkatan sebesar 28,97% dibandingkan dengan model balok bertulang yang diberikan perkuatan penempelan FRP.

### Hubungan beban dan regangan beton

Pada analisis FEM yang dilakukan, untuk mengetahui perilaku beton hingga mencapai regangan maksimum dapat terlihat dengan dibuatkan grafik hubungan beban-regangan beton terhadap semua pemodelan.



**Gambar 10.** Grafik gabungan beban – regangan beton

**Tabel 4.** Rekapitulasi nilai beban – regangan beton

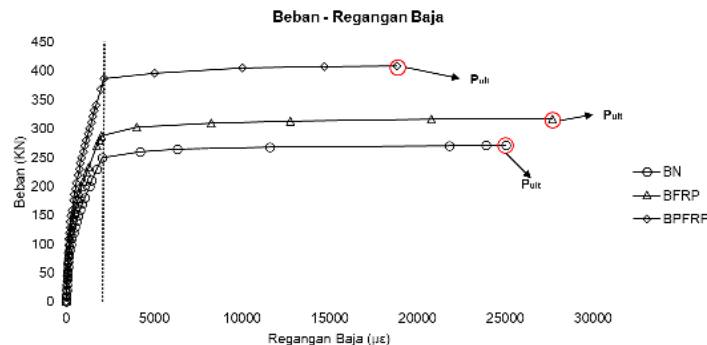


Model	Pemodelan FEM			
	P (KN)	Regangan beton ( $\mu\epsilon$ )	P ultimit (KN)	Regangan Beton ( $\mu\epsilon$ )
<b>BN</b>	271	3000	271,244	3228,02
<b>BFRP</b>	316	3000	316,96	3643,93
<b>BPFRP</b>	408	3000	408,782	3646,46

Dapat disimpulkan bahwa pada saat beton mencapai regangan minimum untuk dapat di definisikan yaitu 3000  $\mu\epsilon$ , berturut-turut beban yang didapatkan untuk setiap model yaitu 271 KN, 316 KN, 408 KN. Dan juga terjadi peningkatan kekuatan regangan beton pada setiap perkuatan yang diberikan pada balok beton bertulang, yang semula pada balok beton bertulang non regangan ultimit terjadi pada beban maksimum 271,244 KN sebesar 3228,02, kemudian setelah didiberikan perkuatan penempelan FRP, regangan ultimit yaitu 3643,93 terjadi pada beban maksimum sebesar 316,96 KN, dan pada pemodelan terakhir dengan diberikan perkuatan prategang pada CFRP, regangan ultimit beton yaitu 3646,46 terjadi saat beban maksimum mencapai 408,782 KN.

### Hubungan beban dan regangan baja

Hubungan beban dan regangan tulangan tarik yang dianalisis menggunakan metode FEM, dibuat untuk dapat mengevaluasi beban dan regangan yang terjadi pada tulangan tarik terhadap tiga pemodelan yang berbeda.



**Gambar 11.** Grafik gabungan beban – regangan baja

**Tabel 5.** Rekapitulasi nilai beban – regangan beton

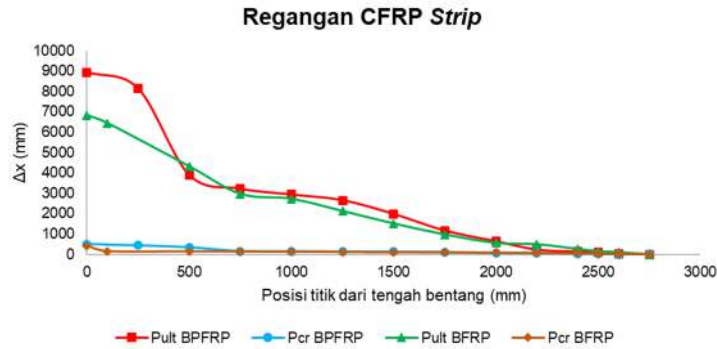
Model	Pemodelan FEM			
	P (KN)	Regangan baja ( $\epsilon$ )	P ultimit (KN)	Regangan Baja ( $\epsilon$ )
<b>BN</b>	254	2100	271,243	25051
<b>BFRP</b>	297	2100	316,961	27715
<b>BPFRP</b>	380	2100	408,782	18846

Pada saat mencapai model mencapai leleh yaitu 2100  $\mu\epsilon$ , beban yang terjadi pada model BN, BFRP, BPFRP adalah sebesar 254 KN, 297 KN, dan 380 KN, kemudian pada saat model mencapai beban maksimum regangan baja yang terjadi pada setiap model yaitu, pada BN beban maksimum 271,243 KN dengan regangan baja yaitu 25051  $\mu\epsilon$ , pada BFRP beban maksimum 316,961 dengan regangan baja yaitu 27715  $\mu\epsilon$ , dan untuk model BPFRP beban maksimum 408,782 dengan regangan baja yaitu 18846  $\mu\epsilon$ .

### Distribusi Regangan pada CFRP Strip

Grafik regangan CFRP pada balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP strip penempelan dan dengan perkuatan CFRP strip prategang ditunjukkan dalam Gambar 12. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai regangan akan semakin kecil dari tengah hingga ujung bentang untuk beban retak ( $P_{cr}$ ) dan beban ultimit ( $P_{ult}$ ).





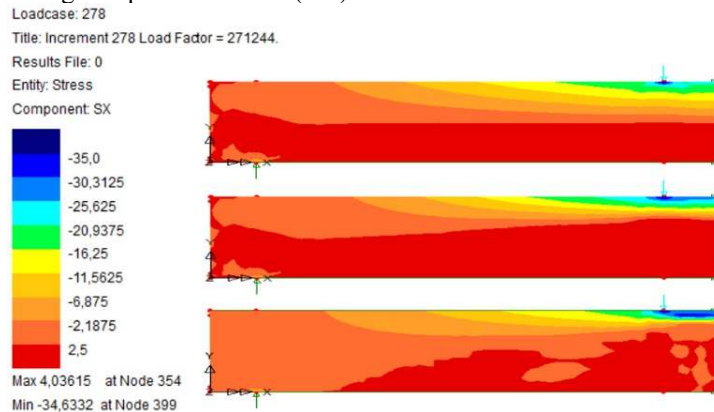
**Gambar 12.** Gabungan Distribusi Regangan Balok Beton Bertulang Model BFRP dan BFRP

Pada Grafik regangan yang ditunjukkan dalam Gambar 12. Untuk balok dengan perkuatan CFRP strip penempelan (BFRP) menunjukkan bahwa regangan pada tengah bentang untuk beban  $P_{ult} = 316,961 \text{ kN}$  adalah  $6825,2 \mu\epsilon$ , sedangkan pada ujung CFRP strip bernilai nol. Pada beban  $P_{cr} = 63 \text{ kN}$  tampak bahwa regangan pada tengah bentang  $433,047 \mu\epsilon$ , sedangkan pada ujung bentang bernilai nol. Kemudian untuk balok beton bertulang dengan perkuatan prategang CFRP strip (BFRP) menunjukkan bahwa regangan pada tengah bentang untuk beban  $P_{ult} = 408,782 \text{ kN}$  adalah  $8948,74 \mu\epsilon$ , sedangkan pada ujung bentang bernilai nol. Pada beban  $P_{cr} = 80 \text{ kN}$  tampak bahwa regangan pada tengah bentang  $504,55 \mu\epsilon$ , sedangkan pada ujung bentang bernilai nol

#### Kontur Tegangan pada Pemodelan

Pemodelan menggunakan metode *finite element method* (FEM) dapat menunjukkan hasil analisis gambar yang tidak dapat tidak ditunjukkan dengan menggunakan analisis berbeda. Salah satunya merupakan kontur tegangan.

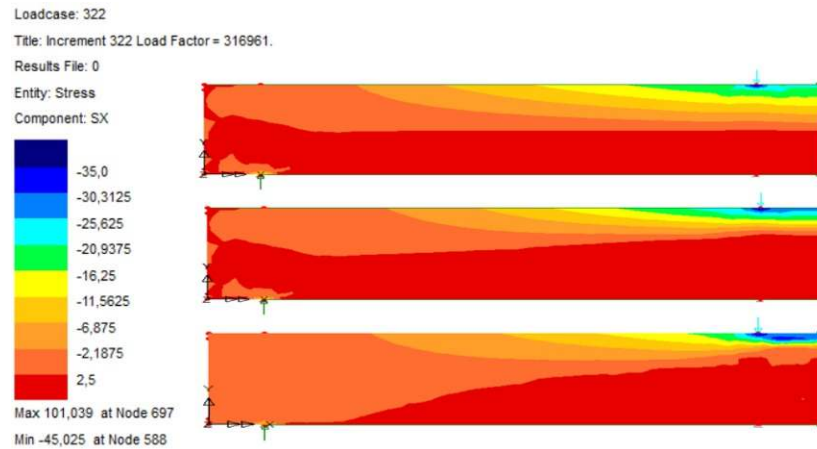
##### a) Balok beton bertulang non perkuatan FRP (BN)



**Gambar 13.** Kontur tegangan balok Model BN Pada Beban Retak ( $P_{cr}$ ), Baja Leleh ( $P_y$ ), dan Ultimate ( $P_u$ )

Pada kontur tegangan balok model BN yang divisualisasikan pada arah SX (yaitu tegangan normal dalam arah x (horizontal)). Diketahui bahwa pada saat beban maksimum yaitu  $271,244 \text{ kN}$ , balok mengalami tegangan tekan tertinggi pada node 399 yaitu  $-34,63 \text{ MPa}$ , dan tegangan tarik tertinggi terjadi pada node 354 yaitu  $4,03 \text{ MPa}$ .

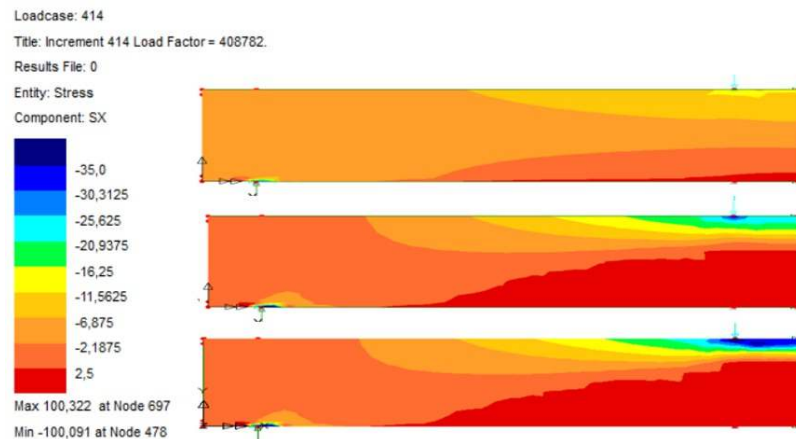
##### b) Balok beton bertulang dengan perkuatan penempelan CFRP *strip* (BFRP)



**Gambar 14.** Kontur tegangan balok Model BFRP Pada Beban Retak (Pcr), Baja Leleh (Py), dan Ultimate (Pu)

Pada kontur tegangan model BFRP yang divisualisasikan pada arah SX (tegangan normal dalam arah x (horizontal)). Diketahui pada saat model mencapai beban maksimum sebesar 316,961 KN, balok mengalami tegangan tekan pada node 382 yaitu sebesar -42,025 MPa, dan tegangan tarik pada daerah CFRP yaitu node 505 sebesar 101,039 Mpa.

c) Balok beton bertulang dengan perkuatan prategang CFRP *strip* (BPFRP)



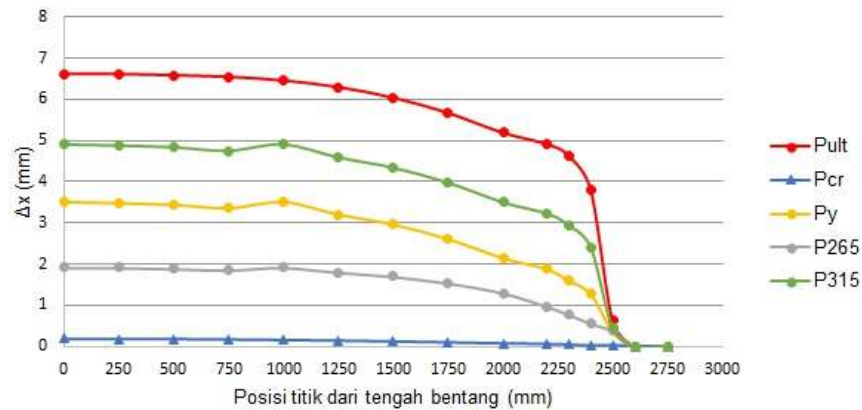
**Gambar 15.** Kontur tegangan balok Model BPFRP Pada Beban Retak (Pcr), Baja Leleh (Py), dan Ultimate (Pu)

Pada kontur tegangan model BPFRP, dapat dilihat bahwa terjadi tegangan tarik maksimum dengan pemod, yaitu sebesar 30,429 MPa pada node 591, yang berarti ini menunjukkan efektivitas CFRP prategang, dalam mengurangi tegangan tarik beton bawah (sebelum retak), serta menahan lendutan. Kemudian pada tegangan tekan yang terjadi pada node 53 yaitu sebesar -40,18 MPa.

### Displacement Rekatan CFRP

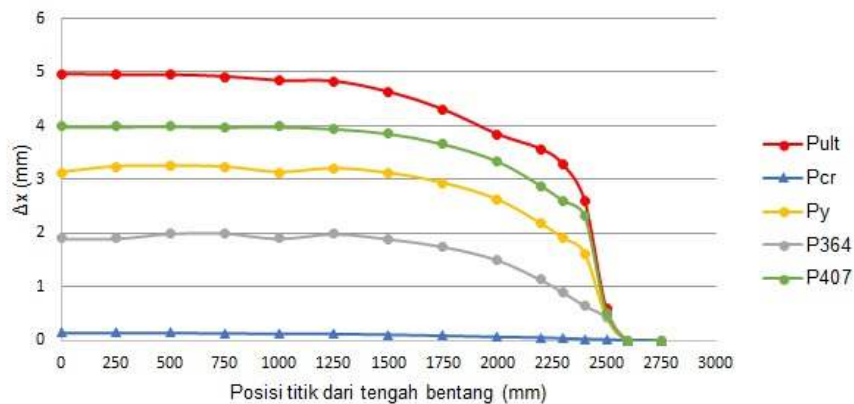
Untuk mengetahui kondisi rekatan antara CFRP strip dan balok beton maka dapat dilakukan peninjauan dari perpindahan atau displacement (Dx) yang terjadi disepanjang bentang penempelan CFRP. Rekatan antara CFRP dan balok beton ditunjukkan dalam Gambar 16 dan Gambar 17 dan yaitu grafik hubungan antara panjang bentang terhadap  $\Delta x$  CFRP strip dan balok beton.

- a. Balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP *strip* penempelan



**Gambar 16.** Displacement rekatan CFRP *strip* balok BFRP dari tengah hingga ke ujung bentang

- b. Balok beton bertulang dengan perkuatan prategang CFRP *strip*



**Gambar 17.** Displacement rekatan CFRP *strip* balok BFRP dari tengah hingga ke ujung bentang

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *Finite Element Method* (FEM) didapatkan perbandingan terhadap tiga pemodelan berbeda yaitu, balok beton non FRP, balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP *strip*, dan balok beton bertulang dengan perkuatan prategang CFRP *strip*, maka dapat disimpulkan beberapa hal penting sebagai berikut:

1. Pada ketiga pemodelan yang dilakukan dapat diketahui bahwa pada kondisi elastis, distribusi tegangan yang terjadi akan bersifat linier tetapi setelah balok mengalami retak awal maka distribusi tegangan akan berubah menjadi nonlinier.
2. Hasil pemodelan yang dilakukan dengan menambahkan perkuatan eksternal yaitu prategang pada sebuah CFRP sangat mempengaruhi nilai beban maksimum, nilai regangan beton, dan juga nilai terhadap regangan baja.
3. Hasil pemodelan dengan menggunakan metode *Finite Element* menunjukkan perbandingan yang signifikan terhadap pemodelan yang dilakukan dimana pada pemodelan balok BN (Balok beton bertulang non perkuatan), diketahui bahwa beban maksimum yaitu sebesar 271,243 kN, dan pada pemodelan BFRP (balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP *strip*) beban maksimum yaitu sebesar 316,961 kN, diketahui bahwa terjadi peningkatan sebesar 16,85%, kemudian pada pemodelan BPFPR (balok beton bertulang dengan perkuatan prategang CFRP *strip*) beban maksimum yaitu sebesar 408,782 kN. Terjadi peningkatan kemampuan balok untuk menahan beban maksimum, yaitu sebesar 50,70% terhadap model BN, dan sebesar 28,97% terhadap model BFRP.

## DAFTAR PUSTAKA

- askar, M. K., Hassan, A. F., & Al-Kamaki, Y. S. S. (2022). Flexural And Shear Strengthening Of Reinforced Concrete Beams Using Frp Composites: A State Of The Art. *Case Studies In Construction Materials*, 17, E01189. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.E01189>
- Gangarao, H. V. S., & Prachasaree, W. (2021). *Frp Composite Structures: Theory, Fundamentals, And Design* (1st Ed.). Crc Press. <https://doi.org/10.1201/9781003196754>
- Gökce, C., Hökelekli, E., Ercan, E., & Erkek, M. (2020). *Finite Element Analysis Of The Mechanical Behavior Of Reinforced Concrete (Rc) Beams Strengthened By Fiber Reinforced Polymers (Frp)*.
- Harahap, S., Putri, P. Y., Putra, R. R., Andayono, T., & Atika, L. (N.D.). *Perkuatan Struktur Beton Dengan Metode Frppada Bangunan Gedung*.
- Hawileh, R. A., Rasheed, H. A., Abdalla, J. A., & Al-Tamimi, A. K. (2014). Behavior Of Reinforced Concrete Beams Strengthened With Externally Bonded Hybrid Fiber Reinforced Polymer Systems. *Materials & Design*, 53, 972–982. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.087>
- Hijriah Et Al. - 2018—*Kapasitas Balok Beton Bertulang Dengan Lembar Gfrp*. (N.D.).
- Hosen, Md. A., Jumaat, M. Z., Alengaram, U. J., Sulong, N. H. R., & Islam, A. B. M. S. (2019). Structural Performance Of Lightweight Concrete Beams Strengthened With Side-Externally Bonded Reinforcement (S-Ebr) Technique Using Cfrp Fabrics. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107323. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107323>
- Mansur, A. Z., Djamaluddin, R., Parung, H., & Irmawaty, R. (2022). *Beban Ultimit Balok Beton Bertulang Hasil Perbaikan Dan Perkuatan Menggunakan Frp*.
- Michels, J., Barros, J., Costa, I., Sena-Cruz, J., Czaderski, C., Giacomini, G., Kotynia, R., Lees, J., Pellegrino, C., & Zile, E. (2016). Prestressed Frp Systems. In C. Pellegrino & J. Sena-Cruz (Eds.), *Design Procedures For The Use Of Composites In Strengthening Of Reinforced Concrete Structures* (Vol. 19, Pp. 263–301). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7336-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7336-2_7)
- Mohammed Yusuf, Oluseyi Salami, & Wasio O. Amusat. (2024). Advances In Carbon-Fiber Reinforced Polymers And Composites For Sustainable Concrete Structures. *World Journal Of Advanced Research And Reviews*, 23(2), 2308–2330. <https://doi.org/10.30574/Wjarr.2024.23.2.2601>
- Moshiri, N., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Hosseini, A., Sanginabadi, K., Breveglieri, M., & Motavalli, M. (2020). Flexural Strengthening Of Rc Slabs With Nonprestressed And Prestressed Cfrp Strips Using Ebrog Method. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108359. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108359>
- Nguyen, M. H., Ho, M. H., Tran, V. R., Phan, H. N., Nguyen, D. D. N., & Huynh, P. N. (2024a). Flexural Performance Of Reinforced Concrete Beams Strengthened With Prestressed Frp Sheets: Experiments And Numerical Investigations. *Case Studies In Construction Materials*, 21, E03475. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.E03475>
- Nguyen, M. H., Ho, M. H., Tran, V. R., Phan, H. N., Nguyen, D. D. N., & Huynh, P. N. (2024b). Flexural Performance Of Reinforced Concrete Beams Strengthened With Prestressed Frp Sheets: Experiments And Numerical Investigations. *Case Studies In Construction Materials*, 21, E03475. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.E03475>
- Novrian, R. R., Alami, F., & Isneini, M. (N.D.). *Analisis Elemen Hingga Pada Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan*.
- Osman, B. H., Wu, E., Ji, B., & Abdulhameed, S. S. (2017). Repair Of Pre-Cracked Reinforced Concrete (Rc) Beams With Openings Strengthened Using Frp Sheets Under Sustained Load. *International Journal Of Concrete Structures And Materials*, 11(1), 171–183. <https://doi.org/10.1007/S40069-016-0182-3>
- Peng, H., Zhang, J., Cai, C. S., & Liu, Y. (2014). An Experimental Study On Reinforced Concrete Beams Strengthened With Prestressed Near Surface Mounted Cfrp Strips. *Engineering Structures*, 79, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.007>
- Rumbyarso, Y. P. A. (2024). *Buku Ajar Struktur Beton Prestress*. Widina Media Utama.
- Salama, A. S. D., Hawileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2019). Performance Of Externally Strengthened Rc Beams With Side-Bonded Cfrp Sheets. *Composite Structures*, 212, 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.045>
- Santoso, Y. A., Sulandari, N., & Pranata, Y. A. (N.D.). *Studi Pendahuluan Simulasi Numerikal Metode Elemen Hingga Sambungan Balok-Kolom Baja Tipe Clip-Angle*.
- Sha, X., & Davidson, J. S. (2023). Verification Of Composite Beam Theory With Finite Element Model For Pretensioned Concrete Members With Prestressing Frp Tendons. *Materials*, 16(19), 6376. <https://doi.org/10.3390/Ma16196376>
- Siddika, A., Saha, K., Mahmud, Md. S., Roy, S. C., Mamun, Md. A. A., & Alyousef, R. (2019). Performance And Failure Analysis Of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (Cfrp) Strengthened Reinforced Concrete (Rc) Beams.

- Sn Applied Sciences*, 1(12), 1617. <https://doi.org/10.1007/S42452-019-1675-X>
- Slaitas, J., & Valivonis, J. (2021). Concrete Cracking And Deflection Analysis Of Rc Beams Strengthened With Prestressed Frp Reinforcements Under External Load Action. *Composite Structures*, 255, 113036. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113036>
- Sultan, M. A., Ar, R., & Gaus, A. (2022). Efek Perkuatan Glass Fiber Reinforce Polymer Sheet Pada Balok Beton Bertulang Dengan Tulangan Korosi. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 103. <https://doi.org/10.29103/Tj.V12i1.694>
- Tampubolon, S. P. (2022). *Struktur Beton I*. Uki Press.
- Varghese, S. M., Kamath, K., Selvam, R., & Salim, S. R. (2024). Flexural Performance Of Beams Strengthened With Frp Laminates And Alternative U-Wrap Anchors. *Civil Engineering Journal*, 10(8), 2404–2421. <https://doi.org/10.28991/cej-2024-010-08-01>
- Wang, Z., Wang, B., Jiang, H., & Zhuge, P. (2024). Experimental Study On The Flexural And Shear Performance Of Concrete Beams Strengthened With Prestressed Cfrp Tendons. *Applied Sciences*, 14(3), 1237. <https://doi.org/10.3390/app14031237>
- Wang, Z., Yao, Y., Liu, D., Cui, Y., & Liao, W. (2019). Shear Behavior Of Concrete Beams Pre-Stressed With Carbon Fiber Reinforced Polymer Tendons. *Advances In Mechanical Engineering*, 11(1), 1687814018816879. <https://doi.org/10.1177/1687814018816879>
- Wu, H. C., & Eamon, C. D. (2017). *Strengthening Of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers (Frp): Design, Construction And Practical Applications*. Woodhead Publishing.
- Yuhazri, M. Y., Zulfikar, A. J., & Ginting, A. (2020). Fiber Reinforced Polymer Composite As A Strengthening Of Concrete Structures: A Review. *Iop Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1003(1), 012135. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1003/1/012135>