

Perkuatan Struktur Girder Jembatan Beton Bertulang Bentang 10 M Menggunakan CFRP

VIRGIE LESTARI¹, EUNEKE WIDYANINGSIH²

1. Mahasiswa, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung
2. Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung

Email: vrglstr20@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini membahas penggunaan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sebagai metode perkuatan pada girder Jembatan Cigadung di Kabupaten Subang yang mengalami keretakan. Analisis ini dilakukan melalui perhitungan manual berdasarkan perhitungan manual, tegangan geser meningkat sebesar 11,34%, dan tegangan lentur meningkat 61%. Hasil ini membuktikan bahwa CFRP efektif dalam meningkatkan kekuatan struktural girder dengan keunggulan tahan korosi, ringan, dan mudah diaplikasikan. Oleh karena itu, CFRP dapat diandalkan sebagai solusi untuk memperkuat dan memperpanjang masa pakai jembatan di Indonesia.

Kata kunci: CFRP, FRP, Gerkuatan Girder, Jembatan

1. PENDAHULUAN

Jembatan adalah suatu struktur yang dibangun untuk menghubungkan dua tempat yang terpisah oleh rintangan, seperti sungai, jalan, atau rel kereta. Karena jembatan Cigadung Kabupaten Subang saat ini mengalami kerusakan salah satunya mengalami keretakan pada girder, maka dari itu perlu adanya perkuatan pada jembatan ini. Pada penelitian ini Jembatan Cigadung digunakan sebagai objek penelitian untuk perkuatan jembatan *existing* dengan kondisi saat ini menggunakan material FRP (*Fiber-Reinforced Polymer*).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) merupakan salah satu jenis dari FRP, daya tahan CFRP yang tinggi lebih ekonomis digunakan pada lingkungan korosif (baja akan mudah berkarat). Penggunaan CFRP akan lebih populer dibandingkan dengan jenis FRP lainnya seperti Glass dan Aramid. (Rizky Bayu Saputra, 2023)

2.2 Jembatan Girder Beton Bertulang

Girder Jembatan adalah elemen struktural utama dalam jembatan yang berbentuk balok horizontal atau penampang melintang yang mendukung dan menyalurkan beban lalu lintas serta beban lainnya dari permukaan jalan ke piers atau abutmen jembatan. Girder jembatan berperan penting dalam menjaga stabilitas, kekuatan, dan integritas struktural jembatan, adapun jenis-jenis girder jembatan dapat bervariasi tergantung pada desain, bahan konstruksi, dan konfigurasi proyek. Antaranya PCU Girder, PCT Girder, Box Girder, Steel Box Girder dan Plate Girder.

2.3 Perkuatan Struktur

Tujuan dari perkuatan struktur pada umumnya untuk meningkatkan ataupun mengembalikan kekuatan elemen struktur agar dapat menahan beban sesuai rencana, selain kebutuhan untuk rehabilitasi struktural, perkuatan juga mungkin diperlukan sebagai akibat dari peningkatan

beban mati, karena pelebaran jalan, pelapisan ulang atau peningkatan kemiringan untuk mengatasi penurunan diferensial. Ada berbagai macam metode untuk perkuatan struktur antara lain perkuatan struktur dengan prategang eksternal (PE), perkuatan struktur dengan pelat baja (*Steel Plate Bonding*), dan perkuatan struktur dengan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).

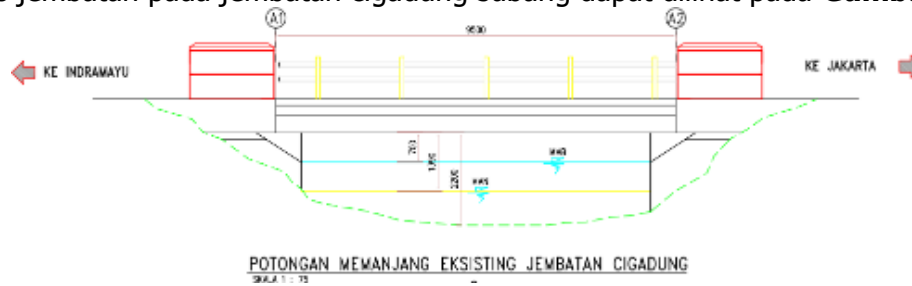
2.4 PERHITUNGAN KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN CFRP

Perkuatan FRP mengikat pada tulangan Tarik beton dengan serat FRP yang dipasangkan disepanjang permukaan balok dapat meningkatkan kekuatan lentur disepanjang balok, peningkatan kekuatan lentur berkisar antara 10% sampai 160% (Meier dan Kaiser 1991).

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Data Teknis Jembatan

Data teknis jembatan pada jembatan cigadung subang dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3. 1 Eksisting Jembatan Cigadung

- | | | | |
|-------------------------|----------|--------------------------------|-----------|
| Panjang total jembatan | : 10,1 m | 5. Tebal slab lantai jembatan: | 0,2 m |
| 2. Lebar lajur diaspal | : 4,9 m | 6. Mutu tulangan | : 420 MPa |
| 3. Lebar total jembatan | : 12 m | 7. Mutu beton | : 27 MPa |
| 4. Tebal lapisan aspal | : 0,2 m | | |

3.2 Spesifikasi Material Fiber Reinforced Polymer

Spesifikasi pada Fiber Reinforced Polymer menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) 170 GPa.

Sifat- Sifat Material Fiber	
Sifat-Sifat	Nilai
Tegangan Tarik	2,4 GPa
Modulus Tarik	170 GPa
Regangan Maksimum	1,6%
Kerapatan	1,8 g/cm ³
Berat per lembar	393 g/m ²
Tebal Fiber	1,2 mm

3.3 Analisis *Shear Strengthening* Penampang Balok dengan CFRP

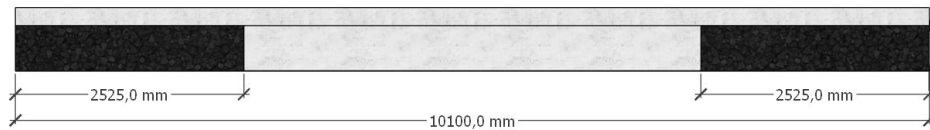
Analisis perkuatan *shear fracture mechanism* FRP berdasarkan ACI 440-2R-08 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d f_v}{s_f} \dots \dots \dots (3.1)$$

Menurut SNI Beton pasal 8.12.2 bentang efektif pada tumpuan adalah $1/4L$. Sehingga dapat diperhitungan dengan:

$$\frac{1}{4} \times L = \frac{1}{4} \times 10100 = 2525 \text{ mm}$$

Perhitungan tersebut menunjukkan panjang bentang kebutuhan yang dapat di pakai oleh FRP yang tertera pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3. 2 Sketsa FRP untuk Perbaikan Geser

3.4 Analisis *Flexural Strengthening* Penampang Balok dengan CFRP

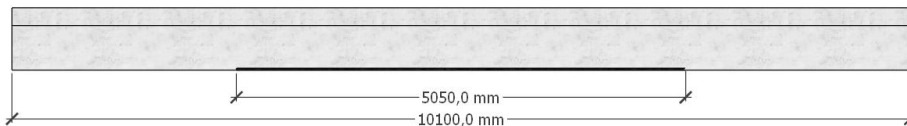
perhitungan kuat lentur nominal setelah diperkuat dengan CFRP ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \psi \psi_f M_{nf}] \dots \dots \dots (3.2)$$

Menurut SNI Beton pasal 8.12.2 bentang efektif pada lapangan adalah $1/2L$. Sehingga dapat diperhitungan dengan;

$$\frac{1}{2} \times L = \frac{1}{2} \times 10100 = 5050 \text{ mm}$$

Perhitungan tersebut menunjukkan panjang bentang kebutuhan yang dapat di pakai oleh FRP yang tertera pada **Gambar 3.7**.



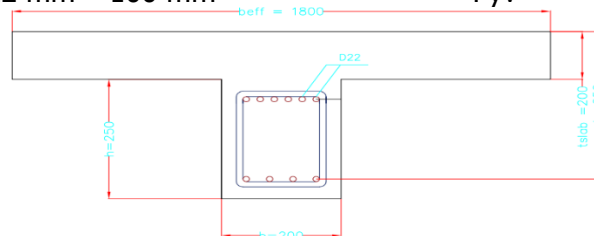
Gambar 3. 3 Sketsa FRP untuk Perbaikan Lentur

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.2 Perhitungan Kapasitas Jembatan Eksisting

Data teknis yang digunakan dalam perhitungan kapasitas geser beton sebelum diperkuat sebagai berikut:

b	= 400 mm	D	= 700 mm
d'	= 50 mm	h _{f1} =h _{f2} =	tslab = 200 mm
d	= 650 mm	f' _c	= 27 MPa
Tulangan tekan 6 Ø 22 mm – 100 mm		F _{yv}	= 240 MPa



Gambar 4. 1 Penampang Girder Jembatan Cigadung

Perhitungan kapasitas jembatan sebelum diperkuat di tinjau pada 2 kondisi sebagai berikut:

Data teknis:

beff	= 1400 mm	f' _c	= 27 MPa
b	= 400 mm	f _y	= 420 MPa
d'	= 50 mm	f _{yv}	= 240 MPa
d	= 700 mm	tslab	= 200 mm
Tulangan tekan 6 Ø 22 mm – 100 mm			

Tulangan Tarik 4 $\emptyset$ 22 mm – 100 mm

- Kapasitas geser balok girder jembatan

a) Kapasitas geser oleh beton (V_c) :

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'c}}{6} \right) b_w d = \left(\frac{\sqrt{27}}{6} \right) 400.650 = 225,166 \text{ kN.}$$

b) Kapasitas geser oleh tulangan

$$V_s = A_v F_y \frac{d}{s} = \left(\frac{\pi}{4} \cdot 6.22^2 \right) 240 \frac{650}{100} = 3558,042 \text{ kN.}$$

Kapasitas geser total yang dimiliki oleh girder Jembatan Cigadung pada kondisi balok ideal adalah sebesar :

$$V_t = (V_c + V_s) = 225,166 + 3558,042 = 3783,208 \text{ kN.}$$

Kapasitas lentur balok girder jembatan

$$\begin{aligned} M_{ns} &= A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \\ &= 1520,531.420 \left(650 - \frac{69,567}{2} \right) + 547391,104 (650 - 50) \\ &= 721326081,6 \text{ Nmm} \approx 721,326 \text{ kNm.} \end{aligned}$$

Pembebanan dan momen ultimit balok pada kondisi sebelum retak

1) Beban Mati (DL)

Beban beton sendiri

$$q_{\text{beton}} = b \cdot df \cdot \gamma_{\text{beton}} = 0,4 \cdot 0,5 \cdot 25 = 5 \text{ kN / m}$$

Tulangan

$$q_{\text{tul}} = A_{\text{tul}} \cdot n \cdot \gamma_{\text{baja}} = 0,00038 \cdot 4 \cdot 78,5 = 0,119 \text{ kN / m}$$

Aspal

$$q_{\text{aspal}} = t_{\text{aspal}} \cdot b_{\text{eff}} \cdot \gamma_{\text{aspal}} = 0,2 \cdot 1,4 \cdot 22 = 6,16 \text{ kN / m}$$

Air Hujan

$$q_{\text{airhujan}} = t_{\text{hujan}} \cdot b_{\text{eff}} \cdot \gamma_{\text{air}} = 0,5 \cdot 1,4 \cdot 9,8 = 0,686 \text{ kN/m}$$

Plat

$$q_{\text{plat}} = t_{\text{plat}} \cdot b_{\text{eff}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 0,2 \cdot 1,4 \cdot 24 = 6,72 \text{ kN / m}$$

$$\begin{aligned} q_{DL} &= q_{\text{beton}} + q_{\text{tul}} + q_{\text{aspal}} + q_{\text{airhujan}} + q_{\text{plat}} \\ &= 5 + 0,119 + 6,16 + 0,686 + 6,72 = 18,685 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2) Beban Hidup (LL)

Untuk beban hidup diasumsikan sebesar 16,2 kN/m diambil dari contoh perhitungan pada modul ACI.440 2R-08.

Beban/Momen	Besaran	Satuan
DL (q_{DL})	18,685	kN/m
LL (q_{LL})	16,2	kN/m
Unfactored Loads ($q_{DL} + q_{LL}$)	34,885	kN/m
Factored Loads ($1,2q_{DL} + 1,6q_{LL}$)	48,342	kN/m
M_{DL} (Momen beban mati)	238,257	kNm
M_{LL} (Momen beban hidup)	206,570	kNm
M_S (Momen service)	444,827	kNm
M_U (Momen ultimate)	616,420	kNm
V_u (Gaya Geser ultimit)	244,127	kN

Rasio kapasitas struktur terhadap momen ultimit pada balok kondisi ideal ditunjukkan sebagai berikut:

$$\left(\frac{M_u}{\phi M_n} \right) \leq 1 = \left(\frac{616,420}{0,9 \times 721,326} \right) \leq 1 = 0,949 \leq 1, \text{ maka pada balok kondisi ideal struktur jembatan dapat menahan beban yang bekerja.}$$

Kondisi Beton Mengalami Retak

b_{eff}	= 1400 mm	f'_c	= 27 MPa
b	= 116 mm	F_y	= 420 MPa
h	= 448 mm	F_{yv}	= 240 MPa
d	= 598 mm	tslab	= 200 mm

Kedalaman retak = 52 mm

Lebar total retak = 284 mm

Tulangan tekan 6 Ø 22 mm – 100 mm

Tulangan tarik 4 Ø 22 mm – 100 mm

- Kapasitas geser balok girder jembatan pada kondisi retak

a) Kapasitas geser oleh beton (V_c) :

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right) bwd = \left(\frac{\sqrt{27}}{6} \right) 116 \times 598 = 60,074 \text{ kN}.$$

b) Kapasitas geser oleh tulangan

$$V_s = A_v F_y \frac{d}{s} = \left(\frac{\pi}{4} \cdot 6 \cdot 22^2 \right) \times 240 \times \frac{598}{100} = 3273,398 \text{ kN}.$$

Kapasitas geser total yang dimiliki oleh girder Jembatan Cigadung pada kondisi balok ideal adalah sebesar:

$$V_t = 3333,472 \text{ kN}.$$

- Kapasitas lentur balok girder jembatan pada kondisi retak

$$\begin{aligned} M_{ns} &= A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \\ &= 1520,531 \cdot 420 \left(598 - \frac{239,885}{2} \right) + 547391,104 (598 - 50) \\ &= 588026027,8 \text{ kN} = 588,026 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Rasio kapasitas struktur terhadap momen ultimit pada balok kondisi ideal ditunjukkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \left(\frac{Mu}{\phi M_n} \right) &\leq 1 \\ \left(\frac{728,325}{0,9 \times 588,026} \right) &\leq 1 \end{aligned}$$

$1,376 \geq 1$, maka pada balok kondisi retak struktur jembatan tidak dapat menahan beban yang bekerja sehingga perlu adanya perkuatan pada struktur Jembatan Cigadung..

4.3 Perhitungan Perkuatan Jembatan dengan FRP

1) Perkuatan Arah Geser

Kapasitas geser balok girder jembatan setelah diperkuat dengan CFRP SCH 11UP. Untuk perencanaan perkuatan geser berdasarkan kegagalan akibat retaknya (*fracture mechanism*) FRP, ACI *Committee Report* 440 memberikan persamaan:

$$V_f = \frac{A_f v f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d f_v}{S_f} = \frac{24240 \cdot 40,8 (\sin 90 + \cos 90) 450}{1} = 445,046 \text{ kN}$$

Maka peningkatan kapasitas geser setelah dipasang CFRP yaitu sebesar:

$$V_{\text{addf}} = \phi VF = (0,85) \cdot (445,046) = 378,289 \text{ kN.}$$

$$V_{\text{new}} = V_t + V_{\text{addf}} = 3333,472 + 378,289 = 3711,7614 \text{ kN.}$$

Sehingga didapatkan rasio peningkatan kapasitas geser setelah diperkuat menggunakan CFRP:

$$\frac{v_{\text{new}} - v_t}{v_t} \times 100\% = \frac{3711,7614 - 3333,472}{3333,472} \times 100\% = 11,34 \%$$

2) Perkuatan Arah Lentur

$$\phi M_{nf} = \phi [M_{ns} + \psi f M_{nf}]$$

$$= 0,9 [588,026 + 0,85 \times 541,99]$$

$$= 943,845 \text{ kNm}$$

Sehingga didapatkan rasio peningkatan kapasitas momen lentur setelah diperkuat menggunakan CFRP :

$$\frac{\phi M_{nf} - M_{ns}}{M_{ns}} \times 100 = \frac{943,845 - 588,026}{588,026} \times 100 = 61 \%$$

Rasio kapasitas lentur akibat perkuatan CFRP terhadap momen ultimit ditunjukkan sebagai berikut:

$$\left(\frac{M_u}{\phi M_n} \right) \leq 1 = \left(\frac{728,325}{0,9 \times 943,845} \right) \leq 1$$

$0,857 \leq 1$, maka pada balok kondisi setelah diperkuat oleh CFRP struktur jembatan dapat menahan beban yang bekerja.

KESIMPULAN

Pengaplikasian CFRP dengan menggunakan analisis perhitungan manual pada struktur balok menghasilkan peningkatan pada nilai tegangan lentur dan tegangan geser. Nilai tegangan geser sebelum diaplikasikan CFRP senilai **3333,472 kN** dan sesudah diaplikasikan sebesar **3711,761 kN**, pada tegangan geser meningkat sebesar **11,34%**. Sedangkan nilai tegangan lentur sebelum diaplikasikan CFRP sebesar **588,026 kNm** Setelah diaplikasikan sebesar **943,845 kNm**, sehingga peningkatan pada tegangan lentur adalah sebesar **61%**.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvin Purmawinata, E. L. (2020). : Jurnal Mitra Teknik Sipil. *ANALISIS PENGGUNAAN CARBON FIBER REINFORCED PLATE PADA KAPASITAS LENTUR BETON BERTULANG DENGAN METODE ELEMEN HINGGA*, 1-10.
- Hanifah, A. S. (2022). ITENAS . *ANALISIS PERKUATAN JEMBATAN BETON BERTULANG MENGGUNAKAN MATERIAL FIBER REINFORCED POLYMER (FRP)*, 1-91.
- Institute, A. C. (2017). *Guide For The Design and Contrstuction of Externally Bonded FRP System for Strengthening concrete Structures: ACI 440.2R-17*. USA: American Concrate Institute.
- Nasional, B. S. (2016). *SNI 1725:2016 Pembebanan Jembatan*. Jakarta : Badan Standar Nasional.
- Nasional, B. S. (2019). *SNI 2847:2019 Perancangan Struktur Jembatan*. Jakarta: Badan Standar Nasional.
- Vemmy, Y. (2017). *Perkuatan Gedung Dengan Menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kim, N.-H. (2018). *Introduction to Finite Element Analysis and Design*. Washington: With Website .
- Lawrence, K. L. (2012). *ANSYS Workbench tutorial*. Arlington: University of Texas.