

## Kajian Penggunaan Profil *Pultruded Fiber Reinforced Polymer* untuk Jembatan Pejalan Kaki

Muhammad Iqbal

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

[muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id](mailto:muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id)

### Abstrak

Minat pada material komposit telah meningkat secara signifikan karena rasio kekuatan terhadap beratnya yang tinggi. Perencanaan struktur menggunakan material dasar *FRP* belum populer di Indonesia, penggunaannya masih didominasi untuk perkuatan elemen struktur. Kajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran desain menggunakan profil hipotesis persegi berongga dengan dimensi 150.130.10 pada jembatan bentang tunggal dengan variasi panjang bentang 12, 16, 20, dan 24 meter. Metode yang digunakan mengacu pada kriteria desain *AASHTO* berupa defleksi, vibrasi, serta tegangan ijin komponen. Hasil kajian menunjukkan dipenuhinya seluruh kriteria desain pada bentang 12 meter. Karena tidak cukupnya kekakuan jembatan pada bentang 20 dan 24 meter frekuensi fundamental vertikal masing-masing bernilai 4,33 Hz dan 3,3 Hz sehingga syarat ( $> 5\text{Hz}$ ) tidak terpenuhi. Selain itu, kapasitas tekan kritis sumbu lemah profil *FRP* (68,95 kN) tidak dapat menahan beban kritis pada bentang 16, 20, dan 24 meter (masing-masing: 97,91 kN; 144,39 kN; 185,36 kN). Kajian ini menunjukkan bahwa respon dinamis dan pemilihan karakteristik material *FRP* adalah dua hal yang mungkin menjadi faktor penentu desain jembatan *FRP* pejalan kaki.

Kata kunci: material maju, profil *FRP* terpultrusi, jembatan pejalan kaki

### Abstract

The interest in composite materials has increased significantly due to their high strength to weight ratio. Utilization of *FRP* as construction material is not yet popular in Indonesia as it's generally used for strengthening structural elements. This study aims to provide a design overview of a hypothetical hollow square profile 150.130.10 on a single span bridge with 12, 16, 20 and 24 meters span length variations. The method refers to the *AASHTO* design criteria in the form of deflection, vibration, and component allowable stress. The results show that all design criteria on a 12 meters span are fulfilled. Due to insufficient bridge stiffness in 20 and 24 meters span, the vertical fundamental frequency is 4.33 Hz and 3.3 Hz respectively, thus the requirements ( $> 5\text{Hz}$ ) are not fulfilled. In addition, the *FRP* profile weak axis critical compressive capacity (68.95 kN) cannot withstand the critical load at spans of 16, 20 and 24 meters (respectively: 97.91 kN; 144.39 kN; 185.36 kN). This study shows that dynamic responses and material characteristics are two factors that may determine pedestrian *FRP* bridges design.

Keywords: advance material, pultruded *FRP* profile, pedestrian bridge

### 1. Pendahuluan

Struktur yang didesain dengan stabilitas dan daya tahan yang kuat menggunakan material maju dan berkelanjutan merupakan tantangan dalam Teknik Sipil (Amran et al., 2018). Jembatan penyeberangan biasanya dibangun menggunakan material beton, kayu, atau logam. Namun, kemajuan dalam teknologi pembuatan material telah menghasilkan ketersediaan bahan konstruksi alternatif yaitu polimer yang diperkuat serat atau biasa disebut *FRP* (*fiber reinforced polymer*). Penggunaan material *FRP* pada infrastruktur khususnya jembatan masih belum berkembang di Indonesia. Penggunaan bahan *FRP* biasanya banyak ditemui pada perkuatan gelagar atau kolom beton (Kim, 2019) (Nandhini et al., 2020), berupa lembaran yang diaplikasikan pada elemen yang diperkuat menggunakan *epoxy* sebagai perekat seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Komposit *FRP* merupakan salah satu material yang masih diteliti dan diuji dalam upaya membuat material struktur baru yang lebih unggul dari beton bertulang dan baja karena aplikasinya yang beragam (Moy, 2013) (Zhao et al., 2020). Kajian dengan menggunakan serangkaian pengujian baik pengujian yang sifatnya fisik atau mekanik guna mengetahui dasar-dasar perencanaan beserta karakteristik bahan polimer telah banyak dilakukan (Arke et al., 2016). Disamping aspek bahan, hal lain yang menjadi tantangan dalam perencanaan struktur berbahan dasar *FRP* adalah belum adanya *code* atau pedoman perancangan komposit yang baku di Indonesia. Hal ini dikarenakan variasi tipe

#### Info Makalah:

Dikirim : 11-20-22;  
Revisi 1 : 01-03-23;  
Revisi 2 : 01-12-23;  
Revisi 3 : 01-26-23;  
Diterima : 01-26-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -  
e-mail : [muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id](mailto:muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id)

serat, arsitektur serat, matriks yang digunakan, kombinasi resin dan serat yang cukup besar sehingga sulit untuk dibuat *code* yang berlaku universal. Berbeda dengan bahan lain seperti baja atau beton yang memiliki variasi properties yang tidak terlalu besar, maka untuk *FRP* dengan perbedaan komposisi material akan memberikan perbedaan parameter desain (Riyono, A.W., 2013). Dua bahan bangunan tradisional sebelumnya terbukti tidak mampu memberikan ketahanan terhadap korosi, *fatigue*, kepadatan rendah, dan rasio kekuatan-

terhadap-berat yang tinggi yang dimiliki oleh komponen *FRP* (Li, Y. F. et al., 2013). Didorong oleh keadaan tersebut, dari hasil penelitian diketahui bahwa *FRP* menawarkan sifat yang lebih unggul (Lee & Jain, 2009)(Dahatre, 2019). Salah satu keunggulannya adalah kepadatannya yang rendah sehingga memiliki massa yang lebih kecil. Praktik hasil studi pada Tabel 3 menunjukkan rata-rata berat profil *FRP* yaitu sekitar setengah dari berat baja dan lima kali lebih ringan dari beton, artinya biaya transportasi, pengangkatan, perakitan struktur dan pondasi serta energi yang dibutuhkan dapat berkurang. Terdapat pula kelebihan dalam ketahanan yang tinggi terhadap korosi, sehingga kebutuhan pemeliharaan menjadi rendah (Smits, 2016). Dari sudut pandang volume produksi, pasar konstruksi merupakan sektor terbesar yang membutuhkan profil terpultrusi sehingga dianggap memberikan peluang yang baik di masa depan (Vedernikov et al., 2020).



Gambar 1. Perkuatan Elemen Struktur Menggunakan *FRP* ;(a) Perkuatan Gelagar (Gallal, 2016), (b) Perkuatan Kolom (Shin & Park, 2022).

Tabel 1. Perbandingan Sifat Mekanik Material *FRP* dengan Baja dan Aluminium (Smits, 2016).

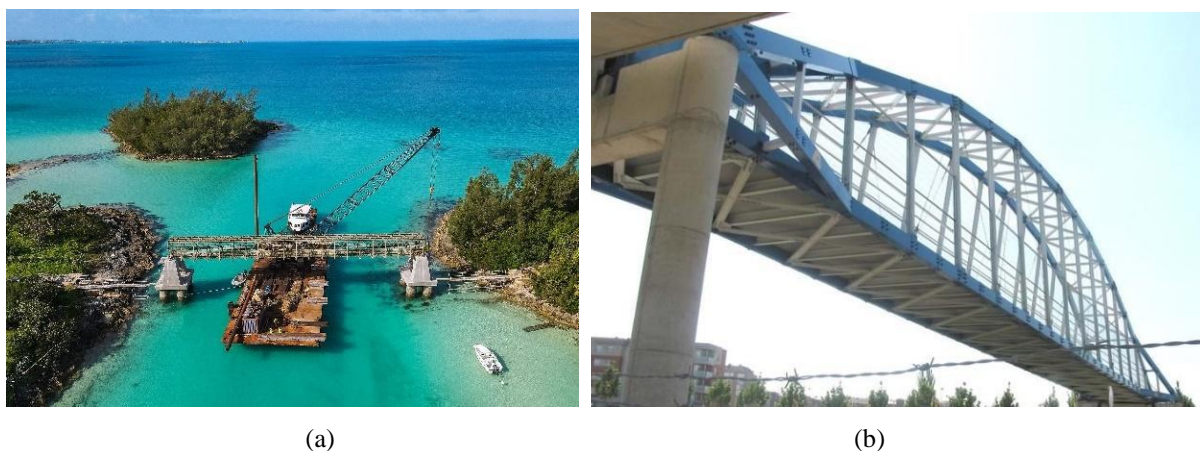
| Properti   | Kepadatan (kg/m <sup>3</sup> ) | Modulus Young arah-x (N/mm <sup>2</sup> ) | Modulus Young arah-y (N/mm <sup>2</sup> ) | Kuat tarik/tekan arah-x (N/mm <sup>2</sup> ) | Kuat tarik/tekan arah-y (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--|--------------------------------|---|---|--|--|
| GFRP UD, V <sub>f</sub> 50%  | 1.875                          | 36.569                                    | 10.924                                    | 740  | n/a  |
| GFRP 625, V <sub>f</sub> 50%,<br>anisotropic lay-up (0/90/45/-45)<br>(62,5%/12,5%/12,5%/12,5%) | 1.850                          | 27.600                                    | 15.200                                    | 33.100                                       | 182  |
| CFRP UD, V <sub>f</sub> 50%  | 1.450                          | 120.000                                   | 60.000                                    | 1,56   | n/a  |
| Steel S355   | 7.850                          | 210.000                                   | 210.000                                   | 355  | 355  |
| Aluminum 6063  | 2.720                          | 69.600                                    | 69.600                                    | 110  | 110  |

Metode pembuatan komponen jembatan *FRP* seperti ditunjukkan pada Gambar 2 terdiri dari pultrusi, *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM)*, dan *hand lay-up*. Pada profil *FRP* terpultrusi sifat mekanik sebagian besar mendominasi pada arah aksial, karenanya dalam hal detail, jembatan *FRP* yang dibuat dari komponen terpultrusi sangat mirip dengan jembatan baja. Profil dan lembaran terpultrusi dapat dirakit menjadi lengkungan, tiang, atau balok U seperti pada Gambar 3.

| Pultrusi  | VARTM                                  | Hand Lay-up                      |
|---|--|----------------------------------|
|   |  |                                  |
| Fiber: Glass & Kevlar<br>Resin : Polyethylene, polyester and, isophthalic | Fiber: Glass & Carbon<br>Resin : Epoxy | Fiber: Glass<br>Resin: Polyester |

Gambar 2. Metode Pembuatan dan Material Pembentuk *FRP* (Tauqeer et al., 2021).

Dalam merancang struktur menggunakan profil FRP, hal yang perlu diperhatikan adalah pengaruh jangka panjang dari cuaca dan *fatigue* (Mendes et al., 2011), perancangan sambungan (Feroldi & Russo, 2017)(Aksoyly et al., 2022), respon dinamik jembatan (Haw Shin et al., 2019), serta perilaku tekuk elastik jembatan yang didesain (Doan & Thai, 2020).

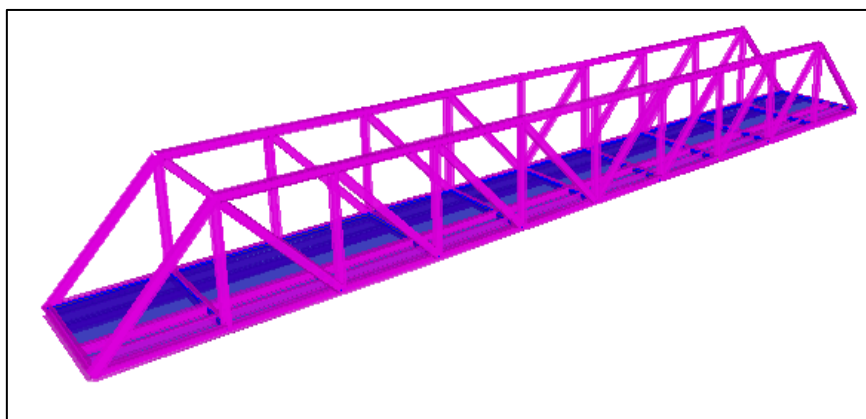


Gambar 3. Struktur Jembatan yang Menggunakan Material FRP Terpultrusi  
(a) Bailey's Bay, Bermuda; (b) Lleida, Spanyol.

Pada kajian ini hanya dilakukan analisis pada struktur atas jembatan. Tujuan kajian ini untuk mengetahui besarnya defleksi, frekuensi fundamental struktur jembatan, gaya-gaya dalam profil FRP, serta kekuatan profil dalam mendesain jembatan FRP untuk pejalan kaki. Hasil kajian diharapkan juga memberikan masukan kepada instansi yang berfokus pada bidang jembatan dalam mendukung standardisasi dan penggunaan FRP sebagai alternatif material konstruksi jembatan di Indonesia.

## 2. Metode

Perencanaan jembatan dilakukan secara sederhana dan dilakukan generalisasi untuk menemukan model yang mewakili karakteristik jembatan. Beberapa parameter ditentukan dalam proses desain, termasuk jenis konstruksi, jumlah, dan profil penampang FRP. Tipe jembatan yang dipilih adalah jembatan rangka Tipe Pratt, ditunjukkan pada Gambar 4. Seluruh profil rangka menggunakan material FRP penampang tertutup (persegi).



Gambar 4. Perspektif Jembatan Rangka FRP.

Jembatan didesain menggunakan bentang tunggal dengan panjang bentang 12,16, 20, dan 24 meter serta memiliki lebar 2,5 meter. Jembatan didesain untuk menerima beban pejalan kaki, kendaraan untuk pemeliharaan, dan beban angin. Pemodelan pada rangka jembatan dilakukan *release* pada batang diagonal dan balok memanjang (*stringer*) jembatan. Beban gempa tergantung zona seismik spesifik dimana jembatan dibangun, sehingga beban gempa diasumsikan diabaikan. Pemeriksaan elemen struktur terhadap tekuk lokal dan global tidak dibahas karena dipengaruhi oleh distribusi tegangan yang berbeda dari setiap bentuk profil. Selain itu, analisis sambungan dan *fatigue* tidak dibahas karena dipengaruhi banyak variabel, seperti material, konfigurasi, serta dimensi sambungan dan struktur. Perencanaan komponen struktur jembatan FRP terpultrusi menggunakan pendekatan tegangan izin mengacu kepada "Guide Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges: First Edition, 2008" by the American Association of State Highway and Transportation Officials" (AASHTO).

### A. Karakteristik Material FRP

Komponen jembatan FPR dibuat dari *E-glass* karena cenderung lebih ekonomis (El-salakawy et al., 2005). *E-glass* dibuat berkekuatan tinggi dan resin poliester isofalat kecuali ditentukan lain. Kandungan serat bahan komposit sangat bervariasi sesuai dengan kebutuhan yang diharapkan. Umumnya perbandingan serat terhadap resin bahan komposit adalah 50:50. Secara umum, FRP memiliki sifat anisotropi yang berarti memiliki karakteristik material yang berbeda di setiap arah sumbu yang berpengaruh pada proses desain elemen. Kekuatan material FRP dapat diketahui dengan melakukan pengujian tarik, tekan, dan lentur menggunakan sampel *dogbone*. Kekuatan dan sifat material minimum penampang FRP ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kekuatan Minimum Material Penampang FRP (AASHTO, 2008).

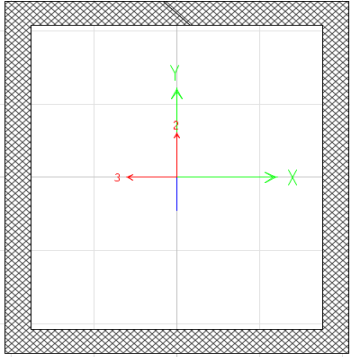
|                                     |               |                                 |
|-------------------------------------|---------------|---------------------------------|
| <i>Tension</i>                      | 33.000 psi    | (227,527 N/mm <sup>2</sup> )    |
| <i>Compression</i>                  | 33.000 psi    | (227,527 N/mm <sup>2</sup> )    |
| <i>Shear</i>                        | 4.500 psi     | (31,026 N/mm <sup>2</sup> )     |
| <i>Bending</i>                      | 33.000 psi    | (227,527 N/mm <sup>2</sup> )    |
| <i>Young's Modulus, x-direction</i> | 2.800.000 psi | (19.305,320 N/mm <sup>2</sup> ) |

Tebal profil elemen perlu diperhatikan agar elemen struktur terhindar dari kegagalan. Ketebalan minimum komponen berkisar antara 6,4 mm hingga 9,6 mm tergantung dari tipe penampang. Perilaku tekuk lokal FRP berbeda dengan logam dan material isotropik karena disertai dengan perambatan retak dan delaminasi, sehingga tekuk dapat terjadi sebelum batas kuat tercapai (Liu et al., 2019). Pemilihan penampang FRP menjadi tantangan karena variasi sifat mekanis yang tersedia sangat luas. Alternatif penentuan dimensi profil dapat diperkirakan dari inersia penampang berdasarkan batas layan akibat lendutan maksimum ( $L/400$ ) seperti dicontohkan pada *Design Manual Fiberline* menggunakan Persamaan (1) berikut:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{k_{\delta M} \cdot q_k \cdot L^3}{E_0 \cdot I_{xx}} + \frac{k_{\delta V} \cdot q_k \cdot L}{G \cdot A_{k,y}} \quad (1)$$

Pada kajian ini profil rangka jembatan didesain menggunakan profil hipotesis persegi berlubang 150.130.10. Profil persegi berlubang dipilih karena diketahui relatif lebih kuat menahan tekuk lokal (Alhawamdeh et al., 2021). Karakteristik material didesain menggunakan data yang ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Karakteristik Material Penampang Desain.

| Profil Persegi 150.130.10   |                          |
|---|--------------------------|
|  |                          |
| Modulus Young arah-x  | 20.000 N/mm <sup>2</sup> |
| Modulus Young arah-y  | 10.000 N/mm <sup>2</sup> |
| Modulus Geser, G  | 3000 N/mm <sup>2</sup>   |
| Angka Poisson, $\nu$  | 0.2                      |
| Berat isi   | 18 kN/m <sup>3</sup>     |
| Luas bruto  | 5200 mm <sup>2</sup>     |
| Kuat Tarik, $f_t$   | 230 N/mm <sup>2</sup>    |
| Kuat Tekan, $f_c$   | 230 N/mm <sup>2</sup>    |
| Kuat Lentur, $\sigma_b$   | 230 N/mm <sup>2</sup>    |
| Kuat Geser, $f_t$   | 32 N/mm <sup>2</sup>     |



## B. Kriteria Pembebanan

Beban yang dipikul yaitu:

### 1. Beban Mati

Beban rencana yang diperhitungkan pada perencanaan jembatan ini terdiri dari beban permanen yang berasal dari berat sendiri komponen struktur maupun non struktural yang ada di dalam desain perencanaan, beban hidup, dan beban angin.

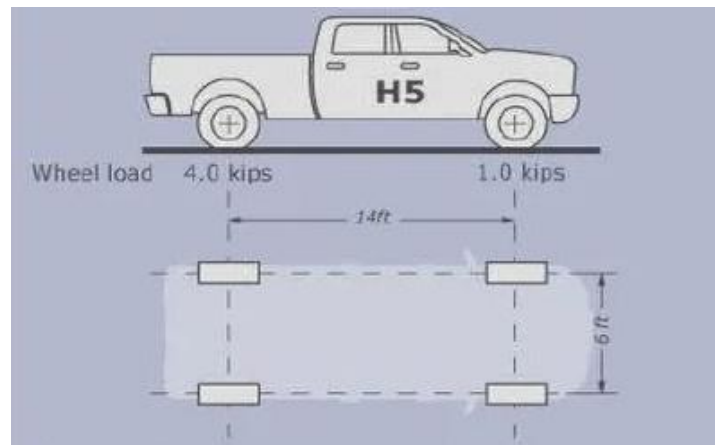
### 2. Beban Pejalan Kaki

Nilai besaran beban pejalan kaki untuk area jalan jembatan tergantung pada luas beban yang dipikul oleh komponen yang direncanakan. Namun tidak boleh kurang dari 65 psf (3,11 kN/m<sup>2</sup>). Jika area pengaruh dek lebih besar dari 400 kaki persegi (37,16 m<sup>2</sup>) beban pejalan kaki dapat dikurangi dengan persamaan (2).

$$w = 85 \left( 0.25 + \left( 15 / \sqrt{AI} \right) \right) \quad (2)$$

### 3. Beban Kendaraan

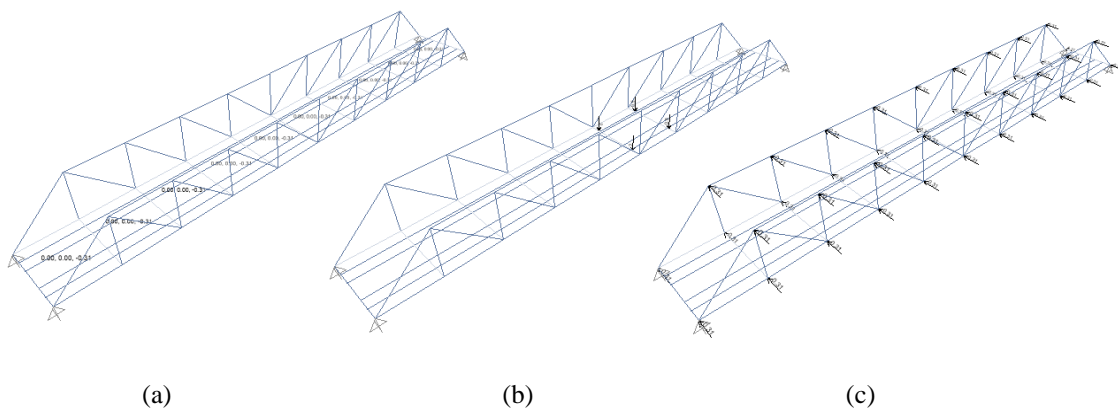
Jembatan harus didesain untuk menerima beban kendaraan pemeliharaan. Spesifikasi kendaraan untuk pemeliharaan dapat merujuk pada otoritas perhubungan setempat. Jika tidak ditentukan, beban standar Truk-H AASHTO dapat digunakan dengan memposisikan truk untuk mendapatkan beban maksimum. Untuk lebar lantai jembatan 2 hingga 3 meter digunakan Truk H-5 beban rencana dengan nilai 44,48 kN dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada Gambar 5. Beban kendaraan pemeliharaan tidak dikombinasikan dengan beban pejalan kaki. Tinjauan beban dinamis tidak perlu diperhitungkan.



Gambar 5. Spesifikasi Truk H5 AASHTO.

### 4. Beban Angin

Beban angin diaplikasikan pada bidang proyeksi seluruh elemen bangunan atas jembatan, termasuk elemen rangka di sisi yang berlawanan dengan sisi datangnya angin. Besaran beban angin untuk struktur jembatan rangka yaitu 75 psf (3,59 kN/m<sup>2</sup>). Untuk jembatan tipe rangka terbuka, dimana angin dapat melewati sistem rangka, jembatan dapat dirancang dengan beban angin minimum sebesar 35 psf (1,68 kN/m<sup>2</sup>) terhadap bidang proyeksi bangunan atas jembatan.



Gambar 6. Input Beban (a) Beban Pejalan Kaki, (b) Beban Kendaraan, (c) Beban angin.

Tabel 4. Kombinasi Beban dan Faktor Beban.

| No | Keadaan Batas | D   | LL <sub>p</sub> | LL <sub>t</sub> | W   |
|----|---------------|-----|-----------------|-----------------|-----|
| 1  | Kuat I        | 1,3 | 1,7             |                 |     |
| 2  | Kuat II       | 1,3 |                 | 1,7             |     |
| 3  | Kuat III      | 1,3 |                 |                 | 1,4 |
| 4  | Layan I       | 1   | 1               |                 |     |
| 5  | Layan II      | 1   |                 | 1               |     |
| 6  | Layan III     | 1   |                 |                 | 0,3 |

#### 5. Kombinasi Pembebanan

Beban desain yang bekerja seperti ditunjukkan pada Gambar 6 (a), (b), dan (c) selanjutnya dianalisis menggunakan kombinasi pembebanan yang mungkin terjadi. Kombinasi yang digunakan mengacu pada SNI 1725 (2016) disajikan pada Tabel 4.

### C. Kriteria Detail Desain

Parameter desain detail perlu dianalisa bertahap terhadap syarat yang berlaku. parameter desain detail ditentukan sebagai berikut.

#### 1. Defleksi

Material *FRP* cenderung memiliki modulus elastisitas yang rendah, sehingga jembatan *FRP* cenderung berada pada tingkat tegangan yang rendah pula. Defleksi akibat beban pejalan kaki didesain tidak melebihi 1/400 dari panjang bentang.

#### 2. Vibrasi

Potensi respon yang signifikan akibat beban dinamis dari pejalan kaki telah diakui bermasalah dalam beberapa analisis jembatan. Sehingga selain kekakuan, redaman dan massa menjadi pertimbangan untuk memastikan desain dapat diterima. Jembatan pejalan kaki *FRP* memiliki bobot yang relatif kecil karenanya frekuensi dibawah 3 Hz pada arah horizontal harus dihindari dan pada area di mana lompat dan lari dianggap terjadi di jembatan, desain harus memiliki frekuensi dasar minimum 5 Hz dalam arah vertikal untuk menghindari harmonik kedua.

#### 3. Kelelahan (*fatigue*)

Masalah kelelahan tidak berlaku pada *FRP*. Nilai modulus elastisitas yang cenderung rendah akan menghasilkan jembatan yang memenuhi syarat layan terhadap kelelahan karena tingkat tegangan yang terjadi cenderung rendah bila dibandingkan dengan baja.

#### 4. Tegangan izin

Perancangan tegangan izin digunakan untuk merancang seluruh elemen struktural. Kecuali ditentukan lain berdasarkan kekuatan bahan *FRP*, faktor keamanan yang digunakan dalam desain jembatan *FRP* ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Faktor Keamanan Desain Elemen.

| Tipe Elemen    | Faktor Keamanan |
|----------------|-----------------|
| Tarik          | 2,5             |
| Tekan          | 2,5             |
| Geser          | 2,5             |
| Tekuk          | 2,5             |
| Bantalan Ujung | 2,5             |
| Sambungan      | 2,5             |

Perhitungan kapasitas dilakukan berdasarkan komponen batang yang mengalami gaya maksimum. Analisis batang tarik dihitung menggunakan persamaan (3), analisis batang tekan menggunakan persamaan (4), (5), dan (6), desain tegangan geser menggunakan persamaan pada balok melintang (7), serta desain tegangan lentur menggunakan persamaan (8).

$$N_t = \frac{A_{net} \times f_{t0}}{SF} \quad (3)$$

$$F_d = \frac{A \times f_{c0}}{SF} \quad (4)$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 \times E_0 \times I}{A \times L_K^2} \quad (5)$$

$$N_{cr} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el}}} \quad (6)$$

$$\tau_{max} = \frac{V_{max}}{A} \quad (7)$$

$$\sigma_b = \frac{M_{max}}{S} \quad (8)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis struktur disajikan dalam nilai maksimum akibat kombinasi pembebanan yang diberikan, baik dalam kondisi layan maupun kuat. Analisis struktur meliputi parameter seperti defleksi, frekuensi fundamental, dan gaya-gaya dalam untuk menganalisis batang tarik dan tekan.

#### 3.1 Defleksi

Lendutan dihitung pada kondisi pembebanan layan akibat beban pejalan kaki sepanjang jembatan dan satu unit kendaraan pemeliharaan.

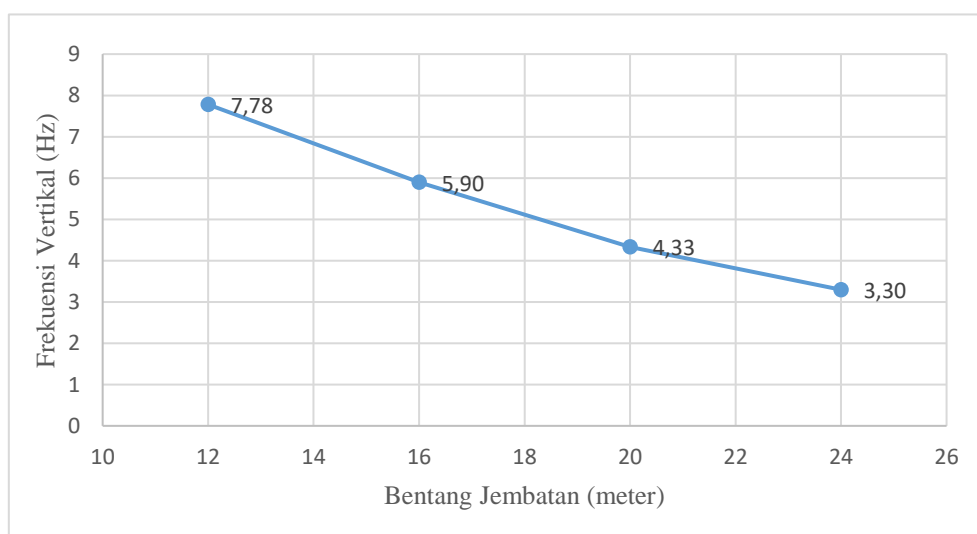
Tabel 6. Lendutan Maksimum pada Jembatan Akibat Beban Layan.

| Bentang Jembatan<br>(m) | Defleksi Maksimum<br>(mm) | Syarat Batas Defleksi<br>(mm) | Keterangan      |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 24                      | 49,858                    | 60                            | memenuhi syarat |
| 20                      | 28,85                     | 50                            | memenuhi syarat |
| 16                      | 16,85                     | 40                            | memenuhi syarat |
| 12                      | 7                         | 30                            | memenuhi syarat |

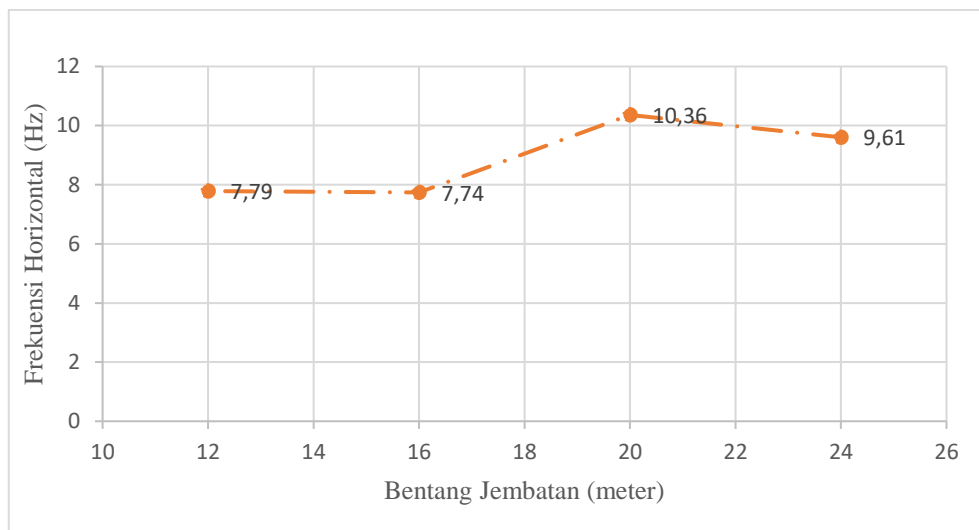
Hasil analisis yang ditunjukkan pada Tabel 6 memperlihatkan defleksi yang terjadi di tengah bentang jembatan 12, 16, 20, dan 24 meter telah memenuhi syarat desain defleksi sebesar  $1/400 L$ .

#### 3.2 Frekuensi Fundamental

Frekuensi fundamental dapat bergantung pada kekakuan dan kepadatan konstruksi jembatan. Hasil analisis frekuensi struktur jembatan FRP yang ditinjau ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Ditunjukkan dengan bertambahnya bentang jembatan, frekuensi fundamental jembatan menjadi rendah karena kekakuan struktur dipengaruhi pula oleh panjang bentang.



Gambar 7. Frekuensi Fundamental Vertikal Struktur Jembatan FRP.

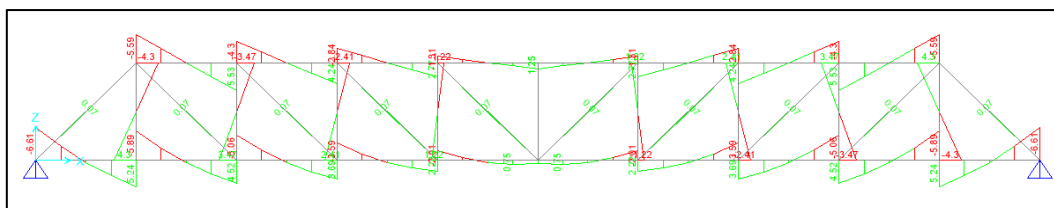


Gambar 8. Frekuensi Fundamental Horizontal Struktur Jembatan FRP.

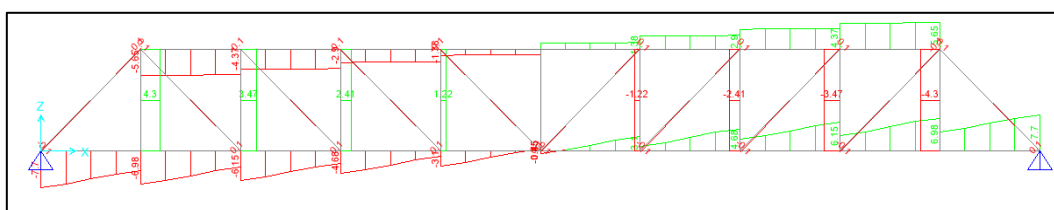
Penampang hipotesis yang digunakan telah memenuhi syarat nilai frekuensi lebih besar dari 3 Hz pada arah horizontal. Namun, hasil pengecekan frekuensi fundamental pada arah vertikal bentang 20 dan 24 meter memiliki frekuensi kurang 5 Hz. Hal tersebut menunjukkan besarnya pengaruh bentang (massa) dan kekakuan terhadap frekuensi. Jembatan yang relatif ringan memiliki frekuensi alami yang rendah sehingga memiliki risiko resonansi lebih besar yang dapat mengakibatkan kegagalan struktur.

### 3.3 Gaya-Gaya Dalam

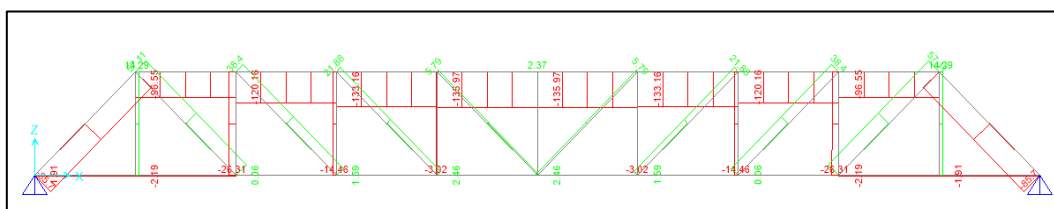
Pengecekan gaya-gaya dalam diperlukan untuk perancangan elemen struktur jembatan. Diagram gaya-gaya dalam yang terjadi pada struktur jembatan ditunjukkan dari Gambar 9 hingga Gambar 11.



Gambar 9. Diagram Momen pada Tipikal Tampak Arah Memanjang Jembatan.



Gambar 10. Diagram Geser pada Tipikal Tampak Arah Memanjang Jembatan.



Gambar 11. Diagram aksial pada tipikal tampak memanjang jembatan.

Kapasitas tarik dari profil ditunjukkan pada Tabel 7. Kapasitas tarik pada seluruh bentang memiliki faktor keamanan lebih besar dari syarat desain ( $FK = 2,5$ ). Nilai tersebut menunjukkan kelebihan dari material FRP, yaitu tingginya kapasitas tarik profil.



Kapasitas tekan dihitung terhadap arah-x dan arah-y karena kapasitas tekan kritis dipengaruhi oleh nilai modulus arah sumbunya. Tabel 8 menunjukkan nilai kapasitas kritis pada sumbu lemah bentang 24, 20, dan 16 meter memiliki nilai yang sangat kecil sehingga tidak memenuhi kriteria desain. Karena itu, perlu diberikan pengaku di tengah batang sehingga panjang tekuk menjadi separuhnya  $1/2 L$ . Dengan diberikan pengaku di tengah batang faktor keamanan yang disyaratkan 2,5 terpenuhi.

Tabel 7. Kapasitas Tarik Profil FRP Terpultrusi.

| Bentang Jembatan (m) | Gaya Tarik Maksimum (kN) | Kapasitas Tarik (kN) | Faktor Keamanan | Keterangan      |
|----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| 24                   | 72,62                    | 1030,4               | 14,1            | Memenuhi syarat |
| 20                   | 60,35                    | 1030,4               | 17,0            | Memenuhi syarat |
| 16                   | 44,1                     | 1030,4               | 23,3            | Memenuhi syarat |
| 12                   | 28,36                    | 1030,4               | 36,3            | Memenuhi syarat |

Tabel 8. Kapasitas Tekan Profil FRP Terpultrusi.

| Bentang Jembatan (m) | Gaya Tekan Maksimum (kN) | Kapasitas Tekan Kritis (kN) |        | Faktor Keamanan |        |                       | Keterangan       |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|--------|-----------------|--------|-----------------------|------------------|
|                      |                          | Arah-x                      | Arah-y | Arah-x          | Arah-y | Arah-y dengan pengaku |                  |
| 24                   | 185,365                  | 317,8                       | 68,95  | 3,6             | 0      | 5,7                   | Memenuhi syarat* |
| 20                   | 144,394                  | 317,8                       | 68,95  | 5,4             | 0      | 6,2                   | Memenuhi syarat* |
| 16                   | 97,91                    | 317,8                       | 68,95  | 9,4             | 0      | 10,1                  | Memenuhi syarat* |
| 12                   | 60,82                    | 317,8                       | 68,95  | 16,8            | 3,2    | -                     | Memenuhi syarat  |

\*Setelah diberi pengaku di tengah batang

Kapasitas tegangan geser dan lentur dianalisis pada balok melintang jembatan dengan menggunakan respon yang diperoleh dari beban mati dan pejalan kaki. Kapasitas tegangan geser dan lentur disajikan pada Tabel 9 dan Tabel 10. Hasil analisis menunjukkan balok melintang memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan tegangan yang bekerja akibat lentur dan geser, ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan tegangan geser dan lentur lebih besar dari 2,5.

Tabel 9. Kapasitas Tegangan Geser Profil FRP Terpultrusi.

| Bentang Jembatan (m) | Tegangan Geser Maksimum (MPa) | Kapasitas Tegangan Geser (MPa) | Faktor Keamanan | Keterangan      |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| 24                   | 2,21                          | 32                             | 14,4            | Memenuhi syarat |
| 20                   | 2,21                          | 32                             | 14,4            | Memenuhi syarat |
| 16                   | 2,21                          | 32                             | 14,4            | Memenuhi syarat |
| 12                   | 2,21                          | 32                             | 14,4            | Memenuhi syarat |

Tabel 10. Kapasitas Tegangan Lentur Profil FRP Terpultrusi.

| Bentang Jembatan (m) | Tegangan Geser Maksimum (MPa) | Kapasitas Tegangan Geser (MPa) | Faktor Keamanan | Keterangan      |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| 24                   | 42,09                         | 230                            | 5,4             | Memenuhi syarat |
| 20                   | 29,33                         | 230                            | 7,8             | Memenuhi syarat |
| 16                   | 18,78                         | 230                            | 12,2            | Memenuhi syarat |
| 12                   | 11,15                         | 230                            | 20,6            | Memenuhi syarat |

Berdasarkan hasil analisis pada struktur jembatan, penggunaan penampang hipotesis dapat memenuhi seluruh kriteria desain pada jembatan FRP bentang 12 meter. Pada bentang 20 dan 24 meter, frekuensi fundamental vertikal masing-masing bernilai 4,33 Hz dan 3,3 Hz sehingga syarat ( $> 5\text{Hz}$ ) tidak terpenuhi. Frekuensi fundamental dapat dimodifikasi pada tingkat struktural dengan mengubah bobot dan kekakuan konstruksi, jika hal tersebut masih belum bisa mencapai frekuensi fundamental yang dituju, maka dapat diberikan tambahan peredam getaran. Hal yang perlu diperhatikan dalam mendesain jembatan FRP bentang panjang adalah kemungkinan dampak dari tambahan massa pejalan kaki. Tambahan massa pejalan memungkinkan frekuensi fundamental turun ke kisaran frekuensi berjalan manusia yang mungkin menyebabkan deformasi tinggi akibat terjadinya resonansi. Oleh karena itu, desain jembatan perlu dirancang untuk memastikan getaran akibat lalu lintas pejalan kaki dapat dikontrol, sehingga tidak muncul fenomena lock-in yang menyebabkan jembatan runtuh.

Sifat anisotropi material ditunjukkan oleh nilai modulus young berbeda pada arah sumbu profil. Tidak terpenuhinya kapasitas tekan kritis sumbu lemah profil FRP (68,95 kN) menahan beban kritis pada bentang 16 meter (97,91 kN),

20 meter (144,39 kN), dan 24 meter (185,36 kN) diakibatkan oleh rendahnya kekakuan profil pada arah sumbu lemahnya. Kekakuan aksial dipengaruhi nilai modulus dan luas penampangnya, sehingga jembatan bentang 16, 20, dan 24 meter akan dapat memenuhi kriteria desain kapasitas kritis jika dilakukan modifikasi pada tingkat komponen terlebih dahulu dengan cara diberi pengaku di tengah batang atau memperbesar dimensi penampang.

### Kesimpulan

Kajian yang disajikan dengan penyederhanaan dan generalisasi cukup menggambarkan dapat dimanfaatkannya profil dengan material *FRP* terpultrusi untuk desain jembatan pejalan kaki di Indonesia. Hal tersebut dapat dilihat dari terpenuhinya seluruh kriteria desain dari penggunaan profil hipotesis pada jembatan bentang 12 meter. Sedangkan pada bentang 16, 20, dan 24 meter diperlukan modifikasi parsial, baik dengan cara diberikan pengaku pada komponen maupun peredam. Pemilihan karakteristik material *FRP* dan respon dinamik akibat beban pejalan kaki merupakan dua hal yang mungkin menjadi faktor penentu desain jembatan *FRP*. Adanya pedoman menjadi salah satu kunci berlanjutnya penggunaan material *FRP* terpultrusi pada desain jembatan pejalan kaki yang disesuaikan dengan perkembangan yang ada, serta dievaluasi, diverifikasi atau dirubah secara berkala.

### Daftar Notasi

|                |  |
|----------------|--|
| $A$            | = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )                               |
| $A_{net}$      | = Luas bersih penampang elemen ( $\text{mm}^2$ )                 |
| $D$            | = Beban mati komponen struktur                                   |
| $\delta$       | = Lendutan   |
| $E_0$          | = Modulus elastisitas <i>FRP</i> dalam arah sumbu pultrusi (MPa) |
| $f_{c0}$       | = Kuat tekan bahan <i>FRP</i> dalam arah sumbu pultrusi (MPa)    |
| $F_d$          | = Kapasitas tekan kritis maksimum (kN)                           |
| $f_{t0}$       | = Kuat tarik elemen dalam arah sumbu pultrusi (MPa)              |
| $G$            | = Modulus geser (MPa)  |
| $I$            | = Momen inersia elemen (mm)                                      |
| $k_{\delta M}$ | = Koefisien lendutan akibat momen maksimum                       |
| $k_{\delta V}$ | = Koefisien lendutan akibat geser maksimum                       |
| $L$            | = Panjang tekuk elemen (mm)                                      |
| $LL_P$         | = Beban pejalan kaki ( $\text{kN/m}^2$ )                         |
| $LL_T$         | = Beban kendaraan (kN)   |
| $\tau_{max}$   | = Tegangan geser maksimum ( $\text{N/mm}^2$ )                    |
| $N_{el}$       | = Beban kritis Euler (kN)  |
| SF             | = Faktor keamanan  |
| $V_{max}$      | = Gaya geser maksimum (kN)                                       |
| $W$            | = Beban angin ( $\text{kN/m}^2$ )                                |

### Daftar Pustaka

- AASHTO. (2008). *Appendix B — Proposed Guide Specifications for the Design of FRP Pedestrian Bridges Guide Specifications For Design of FRP Pedestrian Bridges*. 55, 51–64.
- Aksoyly, C., Özkılıç, Y. O., Madenci, E., & Safonov, A. (2022). Compressive Behavior of Pultruded GFRP Boxes with Concentric Openings Strengthened by Different Composite Wrappings. *Polymers*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/polym14194095>
- Alhawamdeh, M., Alajarmeh, O., Aravinthan, T., Shelley, T., Schubel, P., Kemp, M., & Zeng, X. (2021). *Modelling hollow pultruded FRP profiles under axial compression: Local buckling and progressive failure*. 262(December 2020), 113650. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113650>
- Arke, G. M., Hardono, S., Sipil, J. T., & Sipil, J. T. (2016). *Kajian Pemakaian Profil Fiber Reinforced Polymer ( FRP ) sebagai Elemen Struktur Jembatan Gantung Lalu Lintas Ringan*. Xx(x), 1–12.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan. *Badan Standardisasi Nasional*, 1–67.
- Dahatre, A. S. (2019). Experimental and Analytical Investigation of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bridge Deck Structures. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(9), 459–464. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.9065>
- Doan, Q. H., & Thai, D. (2020). A Numerical Study of the Effect of Component Dimensions on the Critical Buckling Load of a GFRP Composite Strut under Uniaxial Compression. *Materials*, 13, 931.
- El-salakawy, E., Benmokrane, B., El-ragaby, A., & Nadeau, D. (2005). *Field Investigation on the First Bridge Deck Slab Reinforced with Glass FRP Bars Constructed in Canada Field Investigation on the First Bridge Deck Slab Reinforced with Glass FRP Bars Constructed in Canada*. 0268(January 2015).

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9)
- Feroldi, F., & Russo, S. (2017). Mechanical Performance of Pultruded FRP Plates in Beam-to-Beam Connections. *Journal of Composites for Construction*, 21(4), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000779](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000779)
- Gallal, K. (2016). *FRP Retrofitting of Bridges*. 56. [http://users.encs.concordia.ca/~galal/Publications\\_files/ICIMART'16 - Keynote Lecture - Khaled Galal.pdf](http://users.encs.concordia.ca/~galal/Publications_files/ICIMART'16 - Keynote Lecture - Khaled Galal.pdf)
- Haw Shin, Y., Yee Yoong, Y., Hejazi, F., & Raizal Saifulnaz, M. R. (2019). Review on pultruded FRP structural design for building construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012006>
- Kim, Y. J. (2019). State of the practice of FRP composites in highway bridges. *Engineering Structures*, 179(April 2018), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.067>
- Lee, L. S., & Jain, Æ. R. (2009). *The role of FRP composites in a sustainable world*. 247–249. <https://doi.org/10.1007/s10098-009-0253-0>
- Li, Y. F. Chiu, Y. C. Badjie, S. (2013). Numerical analysis of FRP pedestrian bridge in Taijiang National Park. *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS 2013, December*.
- Liu, D., Bai, R., Wang, R., Lei, Z., & Yan, C. (2019). Experimental study on compressive buckling behavior of J-stiffened composite panels. *Optics and Lasers in Engineering*, 120(February), 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.02.014>
- Mendes, P. J. D., Barros, J. A. O., Sena-cruz, J. M., & Taheri, M. (2011). Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck. *Composite Structures*, 93(11), 2969–2982. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.05.005>
- Moy, S. (2013). *Advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites for civil engineering applications*. 177–204. <https://doi.org/10.1533/9780857098955.2.177>
- Mugahed Amran, Y. H., Alyousef, R., Rashid, R. S. M., Alabduljabbar, H., & Hung, C. C. (2018). Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. *Structures*, 16, 208–238. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>
- Nandhini, R., Saravanan, M. M., & A, K. G. (2020). *Retrofitting Of Concrete Structures Using Fiber- Reinforced Polymer ( FRP ): A Review*. 9(02), 1694–1700.
- Riyono, W. A. (2013). *Reinforced Polimer Karakterisasi Reinforced Polimer*.
- Shin, J., & Park, S. (2022). Optimum retrofit strategy of FRP column jacketing system for non-ductile RC building frames using artificial neural network and genetic algorithm hybrid approach. *Journal of Building Engineering*, 57(March), 104919. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104919>
- Smits, J. (2016). Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands : Architectural Challenges toward Innovative , Sustainable , and Durable Bridges. *Engineering*, 2(4), 518–527. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.004>
- Tauqeer, H., Akrami, R., Fotouhi, S., Bodaghi, M., Saeedifar, M., Yusuf, M., & Fotouhi, M. (2021). Fiber reinforced polymer composites in bridge industry. *Structures*, 30(December 2020), 774–785. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.092>
- Vedernikov, A., Safonov, A., Tucci, F., Carlone, P., & Akhatov, I. (2020). Pultruded materials and structures: A review. *Journal of Composite Materials*, 54(26), 4081–4117. <https://doi.org/10.1177/0021998320922894>
- Zhao, J., Mei, K., & Wu, J. (2020). Long-term mechanical properties of FRP tendon–anchor systems — A review. *Construction and Building Materials*, 230, 117017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117017>