

Kajian Eksperimental Kapasitas Sambungan Material *Fiber Reinforced Polymer*

**EUNEKE WIDYANINGSIH¹, BERNARDINUS HERBUDIMAN²,
SETYO HARDONO³**

¹Mahasiswa, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
(Institut Teknologi Nasional)

²Dosen, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
(Institut Teknologi Nasional)

³Kepala Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan Puslitbang Jalan dan
Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum
e-mail: eunekewidya@gmail.com

ABSTRAK

Material Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah alternatif baru dalam perencanaan struktur yang memiliki keunggulan rasio strength terhadap berat sendiri yang sangat tinggi. Khususnya pada pembangunan jembatan yang hingga saat ini memiliki waktu perakitan yang lama dan material yang sulit dibawa tanpa alat berat, FRP menjadi pilihan dalam mendapatkan suatu struktur jembatan yang ringan, cepat dalam instalasi, dan memiliki kapasitas terhadap beban lalu lintas yang cukup besar.

Pada pengujian ini menggunakan 9 buah benda uji berupa pelat FRP dengan dimensi 100 mm x 400 mm x 9 mm dengan variasi lubang baut sebanyak 3 buah, yaitu 2, 4, dan 5 buah. Parameter yang dikaji adalah pola keruntuhan, nilai P, dan nilai stroke. Pengujian dilakukan di Laboratorium Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan di Puslitbang Jalan dan Jembatan Bandung.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pola kerusakan pada FRP didominasi oleh kerusakan pada arah geser, nilai P hasil pengujian terhadap nilai P hasil perhitungan memiliki faktor koreksi sebesar 0,2%, 23%, dan 32%.

Kata kunci : *Fiber Reinforced Polymer, variasi jumlah lubang baut, pola keruntuhan, nilai P, nilai stroke*

ABSTRACT

Fiber Reinforced Polymer is a new alternative in the design of structure that has advantage of a very high strength to weight ratio. Especially in the construction of the bridge which has long time to assemble and difficult to transport the material without using heavy equipment, FRP is an option in getting a bridge structure that is lightweight, fast in installation, and has the capacity to load large amount of traffic.

This study uses 9 specimens of FRP plates with dimensions of 100 mm x 400 mm x 9 mm and variations bolt holes of 2, 4, and 5 holes. The parameters studied is the collapse pattern, the value of P, and the value of the stroke. The test has been done at the Laboratory of Center of Bridge and Roads Complementary Buildings at The Center of Roads and Bridges Bandung.

The results showed that the pattern of damage for the FRP dominated by shearing failure, as P value from the test result to P value from the calculation have correction factors of 0.2%, 23%, and 32%.

Key words: *Fiber Reinforced Polymer, bolt holes variation, damage pattern, P value, stroke value.*

1. LATAR BELAKANG

Saat ini *Fiber Reinforced Polimer* (FRP) menjadi tren di dunia, baik di bidang transportasi, industri, infrastruktur, hingga permukiman. FRP dipilih sebagai alternatif material struktur karena rasio *strength* terhadap berat sendiri yang sangat tinggi disamping memiliki sifat lainnya seperti non konduktif, anti korosi, dan sebagainya. Sementara itu, sampai saat ini umumnya material pembuat konstruksi jembatan masih berupa elemen yang relatif berat dan sulit untuk dibawa tanpa menggunakan alat berat.

Maksud dan tujuan penelitian ini adalah: untuk merancang suatu sambungan baut dengan material FRP, memperkirakan kapasitas maksimum dari sambungan tersebut berdasarkan perhitungan, memperoleh konfigurasi baut yang paling baik untuk digunakan dalam desain struktur jembatan, memperoleh hubungan antara konfigurasi sambungan dengan jumlah baut yang digunakan pada FRP, dan untuk mengetahui bentuk kegagalan sambungan yang paling umum terjadi pada sambungan baut FRP.

2. TINJAUAN PUSTAKA

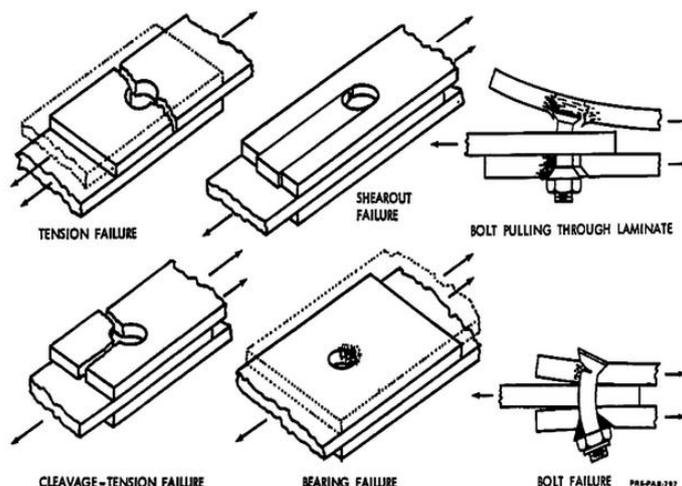
FRP adalah salah satu jenis material komposit yang terdiri atas matrik resin polimer yang diperkuat dengan serat gelas atau serat karbon. FRP banyak digunakan sebagai komponen struktur pada elemen pesawat terbang, otomotif, perkuatan (retrofit), dan struktur lain termasuk jembatan. Kelebihan material FRP dibandingkan dengan material lainnya adalah tahan korosi (*corrosion resistance*), memiliki kekuatan tinggi, bobotnya ringan, memiliki stabilitas dimensi, mengurangi penggunaan alat produksi, memiliki karakteristik insulasi listrik/non konduktif, tidak memerlukan proses finishing yang besar. Faktor kekurangan dari material ini adalah biayanya relatif mahal.

Sambungan yang digunakan oleh material FRP adalah sambungan baut. Hal-hal lain yang perlu diperhatikan dalam sambungan FRP dengan baut yaitu spasi minimum antara baut yang dipasang. Penentuan spasi ini juga perlu mengingat arah serat yang terdapat dalam profil FRP yang digunakan bersifat anisotropik. Moda pembebanan yang perlu diperhatikan pada sambungan profil komposit yaitu pembebanan tarik (*tensile*) dibandingkan pembebanan tekan (*compression*). Hal ini disebabkan sambungan yang menerima beban tekan kurang sensitif terhadap pengaruh geometri (seperti jarak lubang baut ke tepi, lebar profil, dan ketebalan profil) dan secara umum lebih kuat dibandingkan sambungan yang menerima beban tarik.

Dalam jurnal Dunhinh (2000) disampaikan bahwa ada 6 (enam) bentuk kegagalan sambungan FRP yang lazim terjadi yaitu kegagalan tarik, kegagalan geser, kegagalan tumpu, kegagalan belah (gabungan tarik dan geser), dan kegagalan pada alat penyambung (**Gambar 1**). Karena pola keruntuhan yang berbeda-beda digunakan pula formula perhitungan yang berbeda-beda dengan mempertimbangkan sifat FRP yang anisotropik.

Penelitian yang dilakukan di Laboratorium Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan oleh Winarputro (2013) telah menguji kuat tarik sambungan dengan variabel e/d dan menguji kapasitas sambungan dengan variasi torsi dengan *output* hasil berupa grafik hubungan beban terhadap *stroke*. Penelitian ini merujuk pada penelitian Winarputro (2013) tersebut dalam aspek konfigurasi pengujian dan tata cara pengujian. Modifikasi yang

dilakukan dari penelitian tersebut meliputi konfigurasi lubang baut dan formula perhitungannya.



Gambar 1. Jenis moda kegagalan sambungan baut pada FRP (Dat Dunhinh, 2000)

3. METODE PENELITIAN

Penelitian dimulai dengan melakukan pengumpulan data mengenai karakteristik material, dimensi material, dan sambungan. Material yang digunakan berupa FRP dengan *fiberglass* dan resin *polyester*. Karakteristik mekanik dalam perhitungan kapasitas sambungan berasal dari penelitian Winarputro (2012) seperti yang disampaikan pada **Tabel 1**. Dimensi atau ukuran dari profil FRP yang digunakan dalam eksperimen ini adalah profil berukuran tinggi x lebar x panjang kuping x tebal adalah 125 mm x 50 mm x 20 mm x 9 mm yang dipotong menjadi pelat dengan ukuran 100 mm x 9 mm x 400 mm. Untuk sambungan digunakan baut yang terbuat dari baja A325 dengan diameter 16 mm.

Tabel 1. Karakteristik FRP yang Digunakan dalam Desain Sambungan

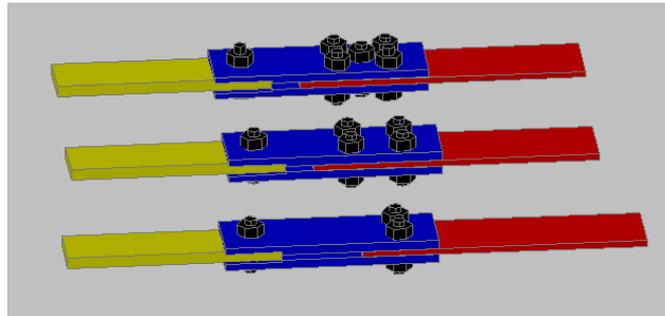
Parameter	Satuan	Maksimum	Standar Deviasi
Kuat tarik	MPa	370,4	18,35
Regangan akibat tarik	%	13,2	0,64
Kuat lentur	MPa	498	42,09
Kuat tekan	MPa	162,29	45,24
Jenis resin	-	Alkyd based on phthalicanhydride	
Kandungan CaCO ₃	cm ⁻¹	1.408; 875; dan 712	
Kandungan Polysilicate	cm ⁻¹	952 dan 690	
Komposisi serat	%	63	
Kekerasan	MPa	240	36,79
Kuat Geser	MPa	40,26	7,74
Regangan akibat geser	MPa	4,63	1,13

sumber: Winarputro Adi (2012)

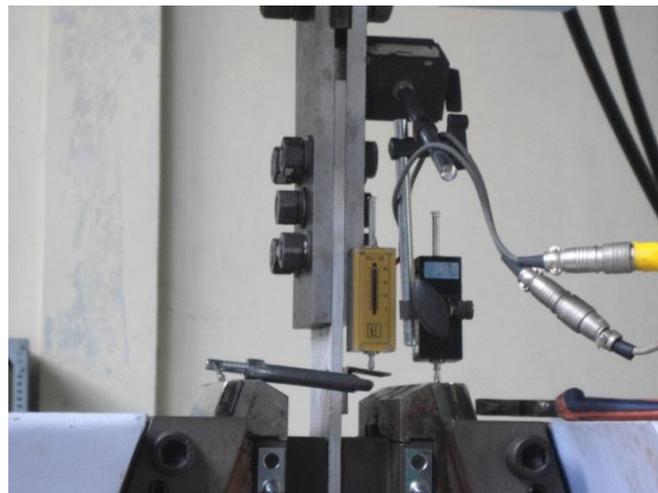
Perancangan mengacu pada "*Fiberline Design Manual*" (Thorning, 2003) dan penelitian pengaruh variasi e/d dari penelitian di Pusjatan sebelumnya (Winarputro, 2013). FRP yang diuji pada eksperimen ini berjumlah 9 pelat untuk 3 variasi jumlah dan konfigurasi lubang baut, yaitu: 2 lubang baut, 4 lubang baut, dan 5 lubang baut. Arah serat FRP sejajar dengan arah gaya tarik. Persiapan yang dilakukan yaitu memotong FRP profil C menjadi pelat datar

dan melubangi FRP dengan jumlah lubang dan konfigurasi lubang baut yang telah direncanakan.

Benda uji yang digunakan berupa 2 buah pelat baja penjepit yang di salah satu ujungnya dipasang FRP dan di ujung yang lain dipasang pelat baja (**Gambar 2**) untuk selanjutnya dilakukan uji tarik dengan alat *Universal Testing Machine* (UTM) dan diukur tegangan yang terjadi menggunakan *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) yang dipasang pada prosesor penyimpan data pengujian (**Gambar 3**).



Gambar 2. Pemodelan instrumen uji tarik



Gambar 3. Pelaksanaan uji tarik pada spesimen benda uji dengan 5 lubang baut

4. PERHITUNGAN KAPASITAS SAMBUNGAN

Sesuai dengan kekuatan geser dan tarik yang telah diuji oleh Winarputro (2012) sebelumnya, diketahui karakteristik dan dimensi spesimen uji FRP sebagai berikut: kekuatan geser (τ) 40,26 MPa dengan standar deviasi 7,74 MPa; tegangan aksial (σ) 370,4 MPa dengan standar deviasi 18,35 MPa; diameter lubang baut (d) 18 mm; tebal penampang (t) 9 mm; dan lebar penampang (w) 100 mm. Mengacu pada Dunhinh (2000), perhitungan kapasitas penampang FRP dengan parameter tersebut dilakukan hampir mirip untuk masing-masing kasus lubang baut, berikut adalah contoh perhitungan untuk kasus 2 lubang baut dengan ilustrasi seperti yang ditampilkan pada **Gambar 4** sampai dengan **Gambar 7**:

- *Bearing Failure*



Gambar 4. Sketsa pola keruntuhan tipe *bearing failure* untuk kasus 2 lubang baut

Persamaan untuk menghitung *bearing failure* adalah:

$$\sigma = \frac{P}{n \cdot d \cdot t} \quad \dots (1)$$

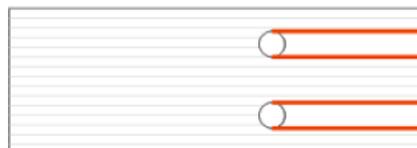
Untuk mencari nilai P maksimum maka rumus tersebut dibuat sebagai berikut:

$$P = \sigma \cdot n \cdot d \cdot t \quad \dots (1.a)$$

$n = 2$ lubang baut, maka diperoleh P untuk pola keruntuhan *bearing failure* adalah:

$$P = 370,4 \times 2 \times 18 \times 9 = 120.009,6 \text{ N}$$

- *Shear Failure*



Gambar 5. Sketsa pola keruntuhan tipe *shear failure* untuk kasus 2 lubang baut

Persamaan untuk menghitung *shear failure* adalah:

$$\tau = \frac{P}{2 \cdot e \cdot t} \quad \dots (2)$$

Untuk mencari nilai P maksimum maka rumus tersebut dibuat sebagai berikut:

$$P = \tau \cdot 2 \cdot e \cdot t \quad \dots (2.a)$$

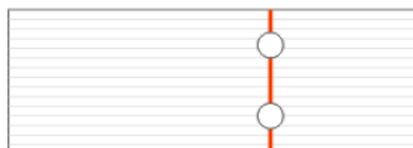
Nilai e (panjang 1 bidang geser) adalah 54 mm sehingga untuk 1 lubang baut dengan 2 buah bidang geser diperoleh:

$$P = 40,26 \times 2 \times 54 \times 9 = 39.132,72 \text{ N}$$

sehingga nilai P total untuk 2 lubang baut dengan 4 bidang geser adalah:

$$P = 39132,72 \text{ N} \times 2 = 78.265,44 \text{ N}$$

- *Tension Failure*



Gambar 6. Sketsa pola keruntuhan tipe *tension failure* untuk kasus 2 lubang baut

Persamaan untuk menghitung *tension failure* adalah:

$$\sigma = \frac{P}{(w - n \cdot d) \cdot t} \quad \dots (3)$$

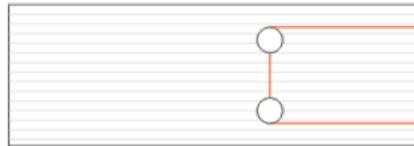
$(w - n \cdot d)$ adalah panjang bidang runtuh tarik yaitu lebar penampang bersih tanpa lubang baut. Untuk mencari nilai P maksimum maka rumus tersebut dibuat sebagai berikut:

$$P = \sigma \cdot (w - n \cdot d) \cdot t \quad \dots (3.a)$$

n = lubang baut = 2 buah

$$P = 370,4 \times (100 - 2 \times 18) \times 9 = 213.350,4 \text{ N}$$

- *Tension + Shear failure*



Gambar 7. Sketsa pola keruntuhan tipe *tension+ shear failure* untuk kasus 2 lubang baut

Persamaan untuk menghitung *shear failure* pada 2 bidang geser (1 lubang baut) adalah:

$$\tau = \frac{P}{2 \cdot e \cdot t} \quad \text{mengulang ... (3.a)}$$

Persamaan untuk menghitung *tension failure* adalah:

$$\sigma = \frac{P}{(w - n \cdot d) \cdot t} \quad \text{mengulang ... (4.a)}$$

Untuk mencari nilai P maksimum gabungan maka rumus tersebut digabungkan sebagai berikut:

$$P = (\tau \cdot 2 \cdot e \cdot t) + (\sigma \cdot (w - n \cdot d) \cdot t) \quad \dots (5)$$

e = panjang bidang runtuh geser = 54 mm

$n \cdot d$ = jumlah lubang yang mengurangi bidang runtuh tarik
 = $(0,5 \times 18) \times 2 = 18$ mm

sehingga:

$$P = (40,26 \times 2 \times 54 \times 9) + (370,4 \times (50 - 18) \times 9) = 145.807,92 \text{ N}$$

Hasil analisis untuk tiga variasi sambungan pada benda uji diperoleh hasil nilai kuat tarik sambungan ditampilkan pada **Tabel 2** berikut:

Tabel 2. Summary Nilai P Hasil Perhitungan

Tipe Sambungan	Nilai Kuat Tarik				Nilai P minimal [N]
	<i>Bearing</i> [N]	<i>Shear</i> [N]	<i>Tension</i> [N]	<i>Shear + Tension</i> [N]	
2 lubang baut	120.009,6	78.265,44	213.350,4	145.807,92	78.265,44
4 lubang baut	240.019,2	182.619,36	426.700,8	197.984,88	182.619,36
5 lubang baut	300.024	247.840,56	700.056	197.984,88 138.125,16	138.125,16

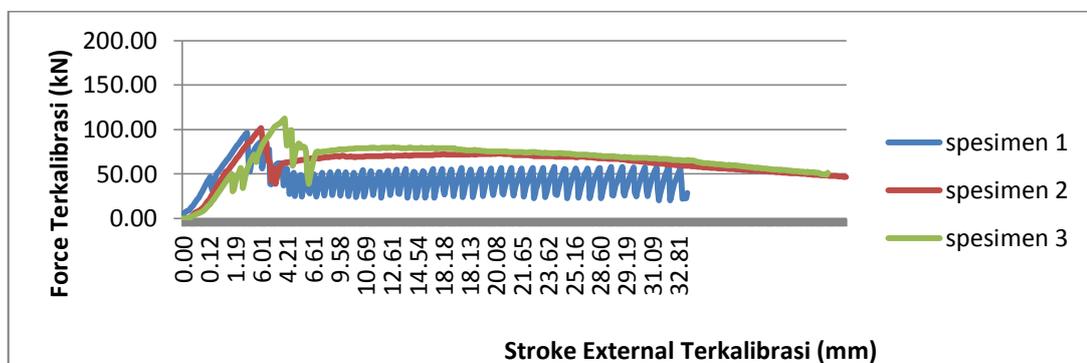
5. HASIL UJI TARIK FRP

Pada proses pengujian FRP diperoleh pola keruntuhan, nilai P , dan nilai *stroke* yang dapat dijadikan parameter untuk mengetahui hubungan kekuatan maksimum sambungan. Hasil pengujian menunjukkan bentuk pola keruntuhan yang berbeda-beda sesuai dengan variasi jumlah baut. Nilai P dan nilai *stroke* dari 2 (dua) alat pada jenis pengujian yang sama dikalibrasi untuk mendapatkan data tunggal. Grafik hasil pengujian ditunjukkan pada **Gambar 9**, **Gambar 11**, dan **Gambar 13**. Spesimen benda uji setelah pengujian ditunjukkan pada **Gambar 8**, **Gambar 10**, dan **Gambar 12**.

a. Kasus 2 lubang baut



Gambar 8. Pola keruntuhan FRP dengan 2 lubang baut



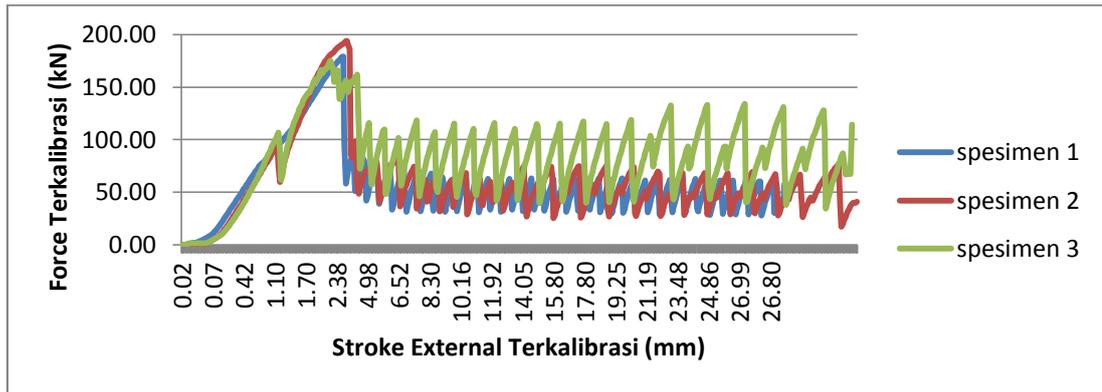
Gambar 9. Grafik pengujian tarik FRP dengan 2 lubang baut

Hasil pengujian tarik FRP dengan 2 lubang baut diperoleh nilai P maksimum rata-rata yaitu: 103,32 kN.

b. Kasus 4 lubang baut



Gambar 10. Pola keruntuhan FRP dengan 4 lubang baut



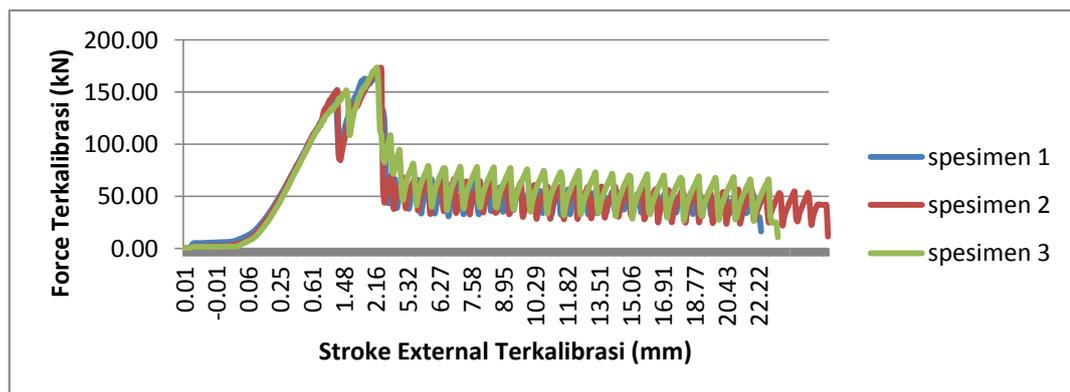
Gambar 11. Grafik pengujian tarik FRP dengan 4 lubang baut

Hasil pengujian tarik FRP dengan 4 lubang baut diperoleh nilai P maksimum rata-rata yaitu: 182,92 kN.

c. Kasus 5 lubang baut



Gambar 12. Pola keruntuhan FRP dengan 5 lubang baut



Gambar 13. Grafik pengujian tarik FRP dengan 5 lubang baut

Hasil pengujian tarik FRP dengan 5 lubang baut diperoleh nilai P maksimum rata-rata yaitu: 170,10 kN.

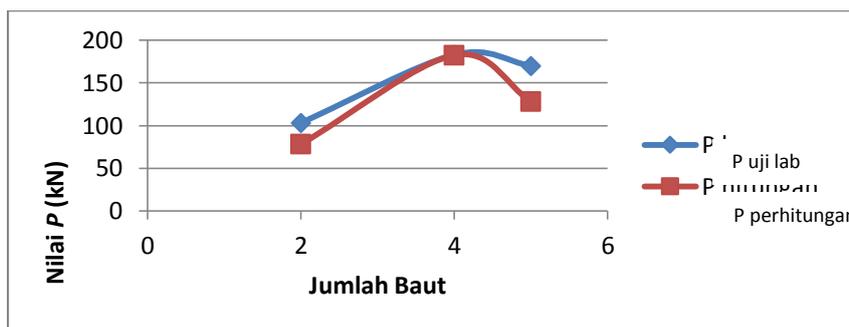
6. PEMBAHASAN

Setelah diperoleh nilai P maksimum dari uji kuat tarik, maka dilakukan perbandingan nilai P hasil uji tarik dengan nilai P hasil perhitungan sebelumnya. Terdapat perbedaan nilai antara

P dari hasil uji laboratorium dengan P hasil perhitungan (Tabel 3 dan Gambar 14).

Tabel 3. Perbandingan Nilai P Eksperimen dan Perhitungan

Tipe Sambungan	P hasil eksperimen [kN]	P hasil perhitungan [kN]	Faktor Koreksi [%]
2 lubang baut	103,23	78,265	32
4 lubang baut	182,917	182,619	0,2
5 lubang baut	170,104	138,120	23,2



Gambar 14. Perbandingan nilai P maksimum

Hasil pengujian menunjukkan pola keruntuhan pada kasus 2 (dua) lubang baut memiliki pola yang sama dengan pola keruntuhan hasil perhitungan karena tidak adanya patah/rusak diluar kerusakan yang terjadi dari sambungannya sendiri.

Hasil pengujian dengan 4 lubang baut menunjukkan pola keruntuhan yang berbeda dengan hasil perhitungan. Retak FRP tidak hanya terjadi pada sambungan saja, tetapi merambat sampai hampir ke seluruh batang FRP, sehingga menyebabkan nilai faktor koreksi yang dihasilkan jauh berbeda dengan yang dihasilkan dari variasi lain. Diperkirakan hal ini dikarenakan terjadi fraktur pada penampang netto FRP yang mengakibatkan retak pada batang tubuh FRP, sehingga perbandingan nilai P hasil pengujian terhadap nilai P hasil perhitungan menunjukkan besar faktor koreksi yang tidak akurat.

Pengujian dengan 5 lubang baut menghasilkan pola keruntuhan yang sama dengan pola keruntuhan yang diperoleh perhitungan. Faktor koreksi yang diperoleh pun cukup mendekati atau sebanding dengan faktor koreksi untuk 2 lubang baut, sehingga data yang dihasilkan dapat dianggap akurat.

Jenis keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan geser kasus 2 lubang baut, keruntuhan geser untuk kasus 4 lubang baut, dan keruntuhan geser + tarik untuk kasus 5 lubang baut.

7. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Grafik yang dihasilkan berdasarkan pengujian menunjukkan bahwa FRP benar merupakan material yang getas. Hal ini terlihat dari grafik kerusakan yang terjadi adalah jenis kerusakan tiba-tiba.
- Berdasarkan pengujian di laboratorium dengan 3 variasi lubang baut diperoleh:
 - P maksimum rata-rata untuk masing-masing variasi sebagai berikut:
 - P maksimum untuk 2 lubang baut adalah 103,32 kN,
 - P maksimum untuk 4 lubang baut adalah 182,92 kN,
 - P maksimum untuk 5 lubang baut adalah 170,10 kN.

Sambungan terkuat dari 3 variasi lubang baut diperoleh pada sambungan dengan 4 lubang baut dengan nilai P maksimum sebesar 182,92.

- b. Terjadi perbedaan keruntuhan pada sambungan dengan 5 lubang baut.
3. Pola keruntuhan yang diperoleh dari pengujian 3 variasi lubang baut adalah pola keruntuhan geser untuk varian 2 dan 4 lubang baut, dan pola keruntuhan geser+ tarik untuk varian 5 baut, sehingga dapat disimpulkan bahwa pola keruntuhan yang lazim terjadi pada FRP adalah pola runtuh geser. Hal ini dikarenakan pola keruntuhan FRP dipengaruhi oleh arah serat fiber terhadap arah gaya tarik, namun hal ini dipengaruhi juga dengan jarak antar baut yang digunakan halmana untuk kasus 5 baut terlalu dekat.
4. Pada pengujian ini digunakan arah fiber yang sejajar dengan arah gaya tarik sehingga nilai kekuatan terbesar FRP ada pada arah gaya tariknya yang mengakibatkan FRP lemah terhadap gaya geser dikarenakan lebih sedikitnya *fiber* yang terdapat pada arah tegak lurus gaya tarik.
5. Berdasarkan perbandingan nilai P hasil perhitungan terhadap nilai P hasil pengujian diperoleh faktor koreksi, yaitu: 32% untuk varian FRP dengan 2 lubang baut; 0,2% untuk varian FRP dengan 4 lubang baut; 23% untuk varian FRP dengan 5 lubang baut. Nilai faktor koreksi 0,2% yang terjadi pada variasi 4 lubang baut diperkirakan terjadi karena fenomena gabungan pola keruntuhan geser dan fraktur pada benda uji tersebut.

DAFTAR RUJUKAN

- Dunhinh, D. (2000). *Connection of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structural Members: A Review of the State of Art*. USA: Structures Division Building and Fire Research Laboratory. United State Department of Commerce Technology Administration.
- Thorning, H. (2003). *Fiberline Design Manual*. Kolding: Fiberline Composites A/S.
- Winarputro, A. (2012). *Teknologi Jembatan Sementara Berbahan Dasar Material Komposit*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan.
- Winarputro, A. (2013). *Konsep Perencanaan Jembatan FRP dan Karakterisasi Fiber Reinforced Polimer (FRP)*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan.