

## Analisis Kekuatan Struktur Pasca *Retrofitting* pada Kerusakan Struktur Balok Beton Bertulang

Luluk Kristanto<sup>1</sup>, Sumargo<sup>1</sup>, dan Muhammad Iqbal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

[mrluke.014@gmail.com](mailto:mrluke.014@gmail.com), [sumargo@lecture.unjani.ac.id](mailto:sumargo@lecture.unjani.ac.id), [muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id](mailto:muhammad.iqbal@lecture.unjani.ac.id)

### Abstrak

Adanya permasalahan kerusakan struktur yang melebihi ketentuan, menyebabkan *retrofit* menjadi alternatif terbaik dibandingkan metode konvensional. Penelitian eksperimental untuk mengetahui parameter kerusakan, kapasitas desain FRP StrongGlass E450 sebagai bahan *retrofit* dan perilaku balok beton bertulang pasca retrofitting. Hasil Hammer Test balok *existing*  $h_{lap}$  (270 mm) <  $h_{min}$  (286 mm), mutu beton terkecil K.408 belum mencerminkan perilaku daktail balok *existing* pada kondisi retak dan lendutan melebihi ijin. Kerusakan belum menyebabkan keruntuhan, di mana hasil uji tarik nilai  $f_y$  rata-rata 348,47MPa dan  $f_u$  rata-rata 491,32MPa masih melebihi batas minimum sehingga BjTP 12 terpasang berkontribusi maksimal pada daktilitas balok. Kemiripan nilai lendutan hasil analisis teoritis dan SAP 2000, maka permodelan SAP 2000 digunakan dalam desain FRP, di mana tipe StrongGlass E450 jumlah 1 lapis, lebar 200 mm sepanjang 3 balok uji memenuhi syarat kuat lentur, kuat geser, dan lendutan. Pasca uji pembebanan dengan beban pasir seberat 4200 Kg (meningkat 25,98 %) dalam 3 tahap, kuat tarik balok retrofit max 117,325 MPa (meningkat 23,879 %) dan regangan max. 0,00154 mengindikasikan balok belum mencapai luluh. Pasca injeksi pada retakan turut mempengaruhi kekakuan balok terhadap lendutan, saat pra-*retrofit*  $\Delta P1$  (-34 mm) dan  $\Delta P2$  (-37 mm), serta pasca *retrofit*  $\Delta P1$  (-30,8 mm) dan  $\Delta P2$  (-34,2 mm).

Kata kunci: FRP tipe *strong glass* E450, *retrofitting*, uji pembebanan.

### Abstract

The provisions exceed of crack and deflection problems, causing retrofit as best alternative methods more than the conventional. This experimental research determines damage parameters, FRP StrongGlass E450 retrofits design capacity and the behavior of reinforced concrete beams post-retrofitting. Hammer Test results for existing beams with  $h_{lap}$  (270 mm) <  $h_{min}$  (286 mm), the minimum concrete quality K.408 not reflecting beam ductile behavior that exceed of allowable cracked and deflection conditions. It has not yet caused collapse, where the tensile test results with  $f_y$  average 348,47 MPa and  $f_u$  average 491,32 MPa still exceed the minimum strength, so the BjTP 12 installed contributes maximum for beam ductility. The similarity field deflection values with theoretical analysis and SAP 2000, made SAP 2000 modeling as FRP design, where 1 layer StrongGlass E450, 200 mm wide along 3 beams object, fulfilling flexural strength requirements, shear strength and deflection. Loading test post with sand weighing 4200 Kg (increased 25,98%) in 3 stages, the tensile strength increased 23,879% (117,325 MPa) and strain max. 0,00154 indicates the beam before yielded. Post-density injection could be affects beam stiffness on deflection, pre-retrofit  $\Delta P1$  (-34 mm) and  $\Delta P2$  (-37 mm), and post-retrofit  $\Delta P1$  (-30,8 mm) and  $\Delta P2$  (-34,2 mm).

Keywords: FRP StrongGlass E450 Type, load test, retrofitting

### 1. Pendahuluan

Struktur bangunan yang telah direncanakan dengan baik dan dibangun, terkadang setelah difungsikan mempunyai beberapa permasalahan. Visual awal kerusakan pada objek penelitian balok beton bertulang nonprategang bangunan masjid pedesaan, memiliki permasalahan kerusakan yang melebihi batas ketentuan, sehingga berpotensi buruk terhadap keselamatan jiwa pengguna hingga kegagalan struktur bila ditingkatkan fungsionalnya secara vertikal. Seiring dengan kemajuan teknologi material konstruksi yang lebih bersifat ringan dan kuat, maka metode perbaikan secara konvensional secara perlahan mulai bergeser ke metode yang lebih modern. Hal ini untuk lebih mengefisienkan tenaga, biaya, dan waktu sehingga diperlukan perkuatan atau perbaikan struktur (Derianto R.P. dkk., 2022).

Salah satu teknologi material utama *Retrofit* adalah *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* tipe *StrongGlass* E450. Kelebihan dari spesifikasi bahan ringan, kuat tarik tinggi, pelaksanaan lebih cepat, tidak memerlukan area kerja luas dan tahan terhadap korosi, sebagai perkuatan telah terbukti secara eksperimental oleh Tavio dkk., 2022; Ridwan dkk., 2022, Pranata dkk., 2022; Luastika dkk., 2019; Nalarita dkk., 2019; Yusfar, 2018; Parannuan, 2017; dan Parmo dkk., 2014, dimana peningkatan kekuatan dan daktilitas pada balok beton bertulang.

#### Info Makalah:

Dikirim : 02-20-23;  
Revisi 1 : 04-18-23;  
Revisi 2 : 06-06-23;  
Revisi 3 : 06-27-23;  
Diterima : 07-12-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -  
e-mail : [mrluke.014@gmail.com](mailto:mrluke.014@gmail.com)

Penelitian Ridwan dkk. (2022), dimana penurunan tegangan pada baja akan menurunkan kapasitas balok dalam menahan lentur. Perkuatan GFRP-S pada balok beton bertulang dapat meningkatkan kapasitas balok 12,07 % dibanding balok normal. Balok perkuatan dengan tulangan terkorosi selama 2 minggu, 4

minggu dan 6 minggu mempunyai peningkatan kapasitas 5,17%; 3,45% dan 1,38% dibanding balok normal.

Penelitian tentang pengaruh dua jenis produk GFRP yakni produk A dari FYFE Type SHE-51A *Composite* dan produk B dari Estop Tipe *EstoGlass*, dimana hasil penelitian didapat bahwa terjadinya peningkatan kekuatan pada balok yang telah dilapisi dengan GFRP. Produk A terjadi peningkatan kekuatan sebesar 10,72% dari balok normal dan untuk produk B terjadi peningkatan kekuatan sebesar 24,15 % dari balok normal (Yusfar, 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui parameter kerusakan pada balok beton bertulang *existing*, kapasitas desain FRP tipe *StrongGlass* E450 dalam *retrofit* dan perilaku balok beton bertulang *existing* pasca *retrofitting*.

## 2. Metode

Eksperimental digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini, dan sebagai pendekatan penyelesaian permasalahan kerusakan struktur balok beton bertulang *existing* yakni rangkaian pengujian di lapangan meliputi:

### 2.1. Parameter Kerusakan

- 1) Uji kekuatan beton, menggunakan *Non Destructive Test* (NDT) yakni *Schmidt Hammer Test* mengacu pada SNI 03-4430-1997.
- 2) Uji tarik baja tulangan, menggunakan *Destructive Test* (NDT) yakni Mesin Uji Tarik dengan cara uji mengacu pada SNI 8389: 2017 dan cara pengambilan contoh mengacu SNI 2052: 2017.

### 2.2. Proses Retrofit

- 1) Perbaikan retak pada balok beton bertulang dilakukan dengan injeksi bertekanan menggunakan *nozzle* sehingga balok beton bertulang kembali padat. Acuan digunakan *Estrong Technical Data Sheet 2022*.
- 2) Desain kapasitas FRP tipe *StrongGlass* E450 sebagai bahan *retrofit*, meliputi kuat lentur, kuat geser dan lendutan, menggunakan acuan ACI-440.2R-08, SNI 2847: 2019 dan *Estrong Technical Data Sheet 2022*.
- 3) *Retrofit* metode *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) sebagai tambahan perkuatan, diaplikasikan pada 3 (tiga) jalur balok *existing* B2 (Balok EG3, EG4 dan F25) mengacu Gambar 4, dengan komposisi bahan meliputi:
  - a) FRP tipe *StrongGlass* E450 pada permukaan bagian bawah balok beton untuk membantu menahan momen lentur. Acuan pelaksanaan digunakan *Estrong Technical Data Sheet 2022* (Tabel 1).
  - b) *Epoxy*, sebagai bahan pengikat untuk aksi komposit beton dan FRP tipe *StrongGlass* E450. Acuan pelaksanaan digunakan *Estrong Technical Data Sheet 2022* (Tabel 2).

Tabel 1. Karakteristik *StrongGlass* E450

<i>Properties</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<b><i>Fiber Material</i></b>		
<i>Tensile Strength</i>	MPa	2.300
<i>Modulus Elasticity</i>	Gpa	76
<i>Elongation at Break</i>	%	3,0
<b><i>Composite Material</i></b>		
<i>Tensile Strength</i>	MPa	580
<i>Modulus Elasticity</i>	Gpa	31
<i>Elongation at Break</i>	%	0,5
<b><i>Fabric</i></b>		
<i>Glass Fabric Weight</i>	g/m <sup>2</sup>	450
<i>Glass Fabric Thickness</i>	mm	0,17

Tabel 2. Karakteristik *StrongWrap Primer*

<i>Properties (Unit)</i>	<i>Value</i>
<i>Adhesive Strength (MPa)</i>	> 3.5 ( <i>concrete failure</i> )
<i>Shear Strength (MPa)</i>	> 30
<i>Compressive Strength (MPa)</i>	> 65
<i>Flexural E-Modulus (MPa)</i>	> 3600
<i>Flexural Strength (MPa)</i>	> 40
<i>Elongation at Break (%)</i>	> 1,0
<i>Viscosity (cps@ 25°)</i>	< 1000
<i>Application Temperature (°C)</i>	20 ~ 45
<i>Package</i>	<i>Hardner (5 Kg), Base Resin (10 Kg)</i>
<i>Mixing ratio</i>	1 : 2

### 2.3. Perilaku Pasca Retrofitting

- 1) Uji Pembebanan dengan beban pasir, mengacu SNI 03-6760-2002 dan besaran pembebanan mengacu SNI 1727: 2020.
- 2) Pengujian menggunakan beberapa alat uji jenis *Non Destructive Test*:
  - a) Uji Lendutan, menggunakan alat *Linear Variabel Differential Transformer (LVDT)*.
  - b) Uji Regangan, menggunakan *Strain Gauge*.
  - c) Acuan melaksanakan berdasar pada SNI 03-6760-2002 dan ACI 437R-03.

### 2.4. Permodelan Struktur

Permodelan Struktur dengan Elemen Hingga yakni *Software SAP 2000* sebagai perbandingan analisis hasil pengujian lapangan dan analisis teoritis.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Kondisi Kerusakan Existing

Untuk mendapatkan hipotesa awal dari data kerusakan hasil pengamatan secara visual maka perlu dikaji dengan menggunakan literatur terkait terhadap data kerusakan aktual.

#### 1) Keretakan.

Retak aktual dengan lebar melebihi batas max. 0,3 mm (SNI 2847: 2019) dan 0,41 mm (ACI 224R-01 dalam ACI 318R-19) dalam Tabel 3, sehingga retak aktual 1-2 mm tidak wajar dan menimbulkan keraguan saat lantai diberikan beban layan rencana. Maka perlu upaya memperbaiki kerusakan dan meningkatkan kapasitas balok.

Tabel 3. Panduan Lebar Retak yang Wajar pada Beton Bertulang Dibawah Beban Layan (ACI 224R-01)

<i>Exposure Condition</i>	<i>Crack width</i>	
	<i>in.</i>	<i>mm</i>
<i>Dry air or protective membrane</i>	0,016	0,41
<i>Humidity, moist air, soil</i>	0,012	0,30
<i>Deicing chemicals</i>	0,007	0,18
<i>Seawater and seawater spray, wetting and drying</i>	0,006	0,15
<i>Water-retaining structures</i>	0,004	0,10

#### 2) Lendutan.

Titik acu "0" pada P3 (Gambar 4) maka lendutan P1 (-34 mm) dan lendutan P2 (-37 mm) dari balok struktur lantai yang hanya bekerja berdasar berat sendiri, mengacu SNI 2847: 2019 telah melampaui lendutan ijin, karena:

- a) Tinggi minimum balok beton bertulang nonprategang pada perlekatan menerus dua sisi ( $L/21$ ) bentang terpendek  $L$  6000 mm adalah  $h_{\min}$  286 mm  $>$   $h_{\text{balok}}$  270 mm.
- b) Lendutan ijin maksimum pada lantai ( $L/360$ ) bentang terpanjang  $L$  9000 mm,  $\Delta_{\text{ijin}}$  yakni 25 mm, maka perlu upaya memperbaiki kerusakan dan meningkatkan kapasitas balok.

Tabel 4. Tinggi Minimum Balok Nonprategang (SNI 2847: 2019)

Kondisi Perletakan	Minimum
Perlekatan sederhana	$1/16$
Menerus satu sisi	$1/18,5$
Menerus dua sisi	$1/21$
Kantilever	$1/8$

Tabel 5. Lendutan Ijin Maksimum (SNI 2847: 2019)

Jenis komponen struktur	Kondisi	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen-elemen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat $L_r$ dan $R$ maksimum	$l/180^{(1)}$
Lantai		Lendutan seketika akibat $L$	$l/360$

### 3.2. Parameter Kerusakan

- 1) Hasil *Hammer Test* pada Tabel 6, nilai kuat tekan balok terpasang EG3 K.460 kg/cm<sup>2</sup>, EG4 K.408 kg/m<sup>2</sup> dan F25 K.478 kg/cm<sup>2</sup>, memiliki kuat mutu  $>$  kuat mutu K.275. Pada dasarnya hasil *Hammer Test* hanya mengindikasikan kekerasan permukaan saja, dan hasil yang didapat dari kuat tekan balok terpasang jauh melebihi kuat mutu desain beton *existing*, maka belum bisa dijadikan sebagai tolak ukur nilai mutu beton secara keseluruhan. Namun bila diasumsikan sebagai nilai kuat tekan yang sebenarnya, meningkatnya mutu beton tidak berpengaruh signifikan dalam menentukan kekakuan/ketegaran lentur balok. Berdasarkan SNI 2847:

2019, dimana ukuran balok  $h_{lap}$  270 mm terhadap  $h_{min}$  286 mm, sehingga  $h_{lap} < h_{min}$ , maka terhadap dimensi balok beton yang kurang dari ketentuan akan berpengaruh terhadap kekuatan beton sehingga timbul lendutan dan retak. Timbulnya keretakan, mengindikasikan kuat tekan beton terlampaui dan kinerja balok sepenuhnya beralih pada baja tulangan.

Tabel 6. Rekapitulasi *Hammer Test* (5 Titik Uji) dan Posisi Uji

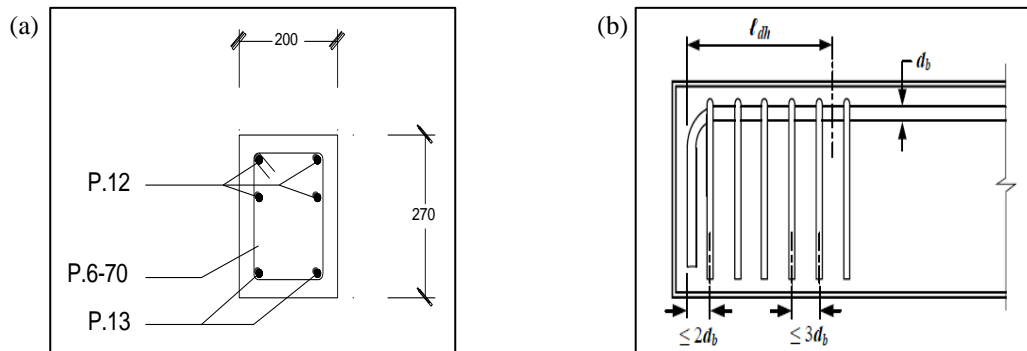
KODE	$f'_c$ MPa	$K_{lap}$ Kg/cm <sup>2</sup>	$K_{desain}$ Kg/cm <sup>2</sup>	SKEMA BALOK UJI
EG3 (R1)	45	460	275	
EG4 (R2)	40	408	275	
F25 (R3)	47	478	275	
E25 & G25 (R4)	51	519	275	
EG2 & EG5 (R5)	39	398	275	

- 2) Hasil Uji Tarik pada Tabel 7, dimana  $B_jTP$  12 dengan nilai kuat luluh/leleh sebesar 349,96 MPa; 351,37 MPa; dan 344,08 MPa serta rata-rata sebesar 348,47 MPa, memenuhi syarat kuat luluh/leleh min. 280 MPa dan max. 405 MPa (SNI 2052: 2017), berarti baja tulangan uji seharusnya masih berperilaku cukup elastis untuk memberikan daktilitas balok beton. Kuat tarik yang disyaratkan SNI 2052:2017 untuk kelas  $B_jTP$  280 adalah minimal sebesar 350 MPa, sehingga hasil uji terhadap kuat tarik dengan rata-rata sebesar 491,32 MPa mengindikasikan baja tulangan memiliki kuat tarik yang cukup dalam menahan beban layan yang ada. Kondisi lendutan balok pada P1 (34 mm) dan P2 (37 mm) telah melampaui lendutan ijin (24,375 mm) dan belum mengalami keruntuhan, maka balok beton bertulang terpasang membuktikan berperilaku cukup daktil secara maksimal. Tinjauan tinggi balok  $h_{lap}$  270 mm  $<$   $h_{min}$  yakni 286 mm (bentang balok terpendek  $L$  adalah 6000 mm), maka inersia yang dimiliki cukup kecil dan kekakuan balok akan kecil pula. Kekakuan yang kecil makin melipat gandakan beban kerja baja tulangan yang ada. Diameter baja  $B_jTP$  terpasang (diameter terbesar 11,33 mm) belum memenuhi batas bawah toleransi  $\pm 0,4$  mm untuk  $B_jTP$  12 yakni 11,6 mm. Luas tulangan makin mengecil akan berpengaruh berkurangnya kapasitas kuat tarik dalam memikul beban layan.

Tabel 7. Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan  $\varnothing 12$  mm

Sampel	Diameter (mm)	Luas Tampang (mm <sup>2</sup> )	P Leleh (N)	P Max (N)	$f_y$ (MPa)	$f_{max}$ (MPa)
1	11,22	98,912	34602	48462	349,96	490,14
2	11,33	100,861	35426	49930	351,37	495,24
3	11,22	98,912	34020	48307	344,08	488,58
<b>Rataan</b>					<b>348,47</b>	<b>491,32</b>

- 3) Hasil data primer penelitian, selain As tulangan terpasang yang berkurang, tidak adanya penyaluran geser di bagian dalam pertemuan balok (P1 dan P2) hingga sejauh  $l_{dh}$ , dimungkinkan tegangan tinggi yang terjadi secara terus menerus di pertemuan tidak mampu dibendung sehingga menyebabkan deformasi arah bawah meningkat dan retak melintang terjadi dan akan semakin lebar seiring berjalannya waktu. Menurut SNI 2847:2019, perlu adanya tambahan penyaluran berupa sengkang kait yang membungkus penulangan longitudinal di bagian *joint* seperti pertemuan balok P1 dan P2 sejarak  $\leq 3 d_b$ .



Gambar 1. (a) Detail Tulangan Balok B2 dan (b) Sengkang Ikat Tegak Lurus Sepanjang  $l_{dh}$  (SNI 2847:2019)

### 3.3. Desain dan Pelaksanaan *Retrofitting*

#### 1) Permodelan Struktur.

Metode analisis garis leleh dari pelat yakni metode keseimbangan dan metode virtual. Didalam kedua metode, suatu pola garis luluh pertama-tama harus dimisalkan sehingga dihasilkan suatu mekanisme runtuh. Untuk mekanisme ini, pergerakan benda kaku dari segmen-segmen pelat dimungkinkan oleh putaran sepanjang garis luluh. Boleh Jadi, ada lebih dari satu pola garis luluh yang mungkin terjadi, yakni lokasi garis luluh dan arah momen yang terjadi di tengah bentang serta dapat pula pola garis luluh yang memotong tepi bebas tidak tegak lurus (Yazid M dkk, 1994).

Analisa perhitungan difokuskan pada lebar sayap efektif pada pelat lantai untuk balok sesuai ketentuan dalam standar SNI 2847: 2019. Pada lebar efektif inilah kemampuan batas maksimum balok memikul pelat lantai.

Tabel 8. Batasan Dimensi Lebar Sayap Efektif Untuk Balok-T (SNI 2847:2019)

Lokasi sayap	Lebar sayap efektif, di luar penampang balok	
Kedua sisi balok	Sekurangnya:	$8h$
		$s_w/2$
		$l_n/8$
Satu sisi balok	Sekurangnya:	$6h$
		$s_w/2$
		$l_n/12$

Data primer dan data sekunder yang didapatkan serta hasil uji parameter kerusakan, selanjutnya diolah kedalam permodelan struktur. Beban yang bekerja yakni berat sendiri struktur lantai elv +4.400 (Beban Mati) dan beban hidup acuan SNI 1727:2020. Guna menjamin permodelan mendekati kondisi aktual, maka perlu dilakukan analisa elemen hingga SAP 2000 dan analisa teoritis.

#### a) Analisa SAP 2000.

Hasil input data lalu di *running* sehingga memunculkan nilai lendutan. Pada titik kritis persilangan balok P1 dan P2, didapatkan perbandingan nilai lendutan sebagai berikut:

(1) Persilangan balok ke-1 (P1), memiliki selisih nilai lendutan 0,06 mm, yakni:

(a) Lendutan *Existing* = 34,00 mm.

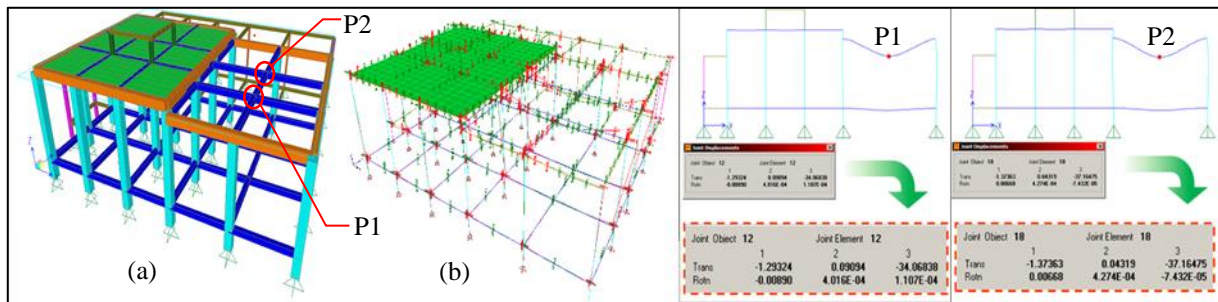
(b) Lendutan Joint 12 = 34,06 mm.

(2) Persilangan balok ke-2 (P2), memiliki selisih nilai lendutan 0,16 mm, yakni:

(a) Lendutan *Existing* = 37,00 mm.

(b) Lendutan Joint 18 = 37,16 mm.

Kedua nilai lendutan, antara versi SAP 2000 dan lendutan *existing* memiliki selisih nilai lendutan yang tidak terlampaui jauh. Hal ini berarti, permodelan struktur versi SAP 2000 telah mendekati kondisi struktur bangunan yang sebenarnya di lapangan.



Gambar 2. (a) Permodelan Struktur dan (b) Distribusi Momen Bangunan Uji pada SAP 2000

#### b) Analisa Teoritis.

Pada Setyawanto (2015), disebutkan bahwa penampang tak persegi yang paling umum adalah balok “T” dan “L” berflens. Prinsip-prinsip yang sama dipergunakan untuk perhitungan defleksi penampang-penampang persegi dapat diterapkan pada penampang tak persegi. Kontribusi gaya penahan tekan dapat diperoleh menggunakan luasan beton yang sesuai.

Persamaan *Barnson*, terbukti dapat diterapkan pada sebagian besar kasus-kasus balok bertulang dan prategang dan secara universal diadopsi untuk perhitungan-perhitungan defleksi, dengan menetapkan momen inersia efektif ( $I_e$ ) dalam perhitungan lendutan, kemudian pada komponen perhitungan tertentu digunakan acuan dalam standarisasi SNI 2487:2019 dan SNI 1727:2020.

Sumbu netral  $c$  dihitung dari kesetimbangan gaya horizontal penampang balok T, sehingga  $c$  dapat dicari menggunakan rumus abc (rumus persamaan kuadrat) yakni:

$$c = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1)$$

Setelah didapatkan Inersia penampang retak,  $I_{cr}$ , dan Inersia penampang bruto,  $I_g$ , selanjutnya Momen penampang retak,  $M_{cr}$ , dihitung menggunakan rumus:

$$M_{cr} = \frac{I_g \times f_r}{y_t} \quad (2)$$

P terpusat L/2 bentang dan beban merata L bentang, maka Momen aktual pasca retak,  $M_a$ , adalah:

$$M_a = \frac{P \times Ln}{4} + \frac{q \times Ln^2}{8} \quad (3)$$

Perhitungan Inersia efektif,  $I_e$ , dihitung dengan cara:

$$I_e = \left( \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times I_g \right) + \left( \left( 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \times I_{cr} \right) \quad (4)$$

Sehingga lendutan pada L/2, dimana P terpusat pada L/2 dan beban merata sepanjang L balok adalah:

$$\Delta = \frac{P \times Ln^3}{48 \times E_c \times I_e} + \frac{5 \times q \times Ln^4}{384 \times E_c \times I_e} \quad (5)$$

Hasil perhitungan lendutan pada titik kritis P1 (balok EG4) dan P2 (balok EG3) disajikan pada Tabel 9. Nilai Lendutan Teoritis dan Lendutan SAP 2000 Terhadap Lendutan Lapangan.

Tabel 9. Nilai Lendutan Teoritis dan Lendutan SAP 2000 Terhadap Lendutan Lapangan

Lokasi Lendutan	M <sub>lap</sub> Nmm	I <sub>cr</sub> mm <sup>4</sup>	I <sub>g</sub> mm <sup>4</sup>	I <sub>e</sub> mm <sup>4</sup>	Δ <sub>Teoritis</sub> ΔP <sub>t</sub> (mm)	Δ <sub>SAP</sub> ΔP <sub>s</sub> (mm)	Δ <sub>Lap.</sub> mm
L <sub>EG3/2</sub> (P2)	78203171,7	300104178,3	996771428,6	305162870,7	39,54 (6,8%)	37,16 (0,4%)	37,000
L <sub>EG4/2</sub> (P1)	71894856,1	318154549,5	957723012,6	323554567,9	33,37 (1,8%)	34,06 (0,2%)	34,000

Ditinjau persentase hasil lendutan pada Tabel 9. Nilai Lendutan Teoritis dan Lendutan SAP 2000 Terhadap Lendutan Lapangan, di mana lendutan hasil analisis SAP 2000 memiliki persentase perbedaan lebih kecil dibandingkan hasil analisis Teoritis mengacu pada lendutan *existing* di lapangan. Maka hasil permodelan struktur SAP 2000 selanjutnya digunakan sebagai dasar desain *retrofit* metode FRP tipe *StrongGlass* E450.

## 2) Desain *Retrofit*.

### a) Kuat Geser.

Pada Tabel 10 dapat dijelaskan bahwa lembaran FRP tipe *StrongGlass* E450 berjumlah 1 (satu) lapis, lebar 200 mm sepanjang balok uji EG4, EG3 dan F25 memenuhi persyaratan kuat geser nominal melebihi kuat geser yang dibutuhkan. Pemenuhan kuat geser yang dicapai, terindikasi dari besaran nilai 75% Kuat Geser nominal ( $\Phi V_n$ ) dari ketiga balok, dan seluruhnya terbukti mampu melebihi Kuat Geser ultimit ( $V_u$ ) baik di tumpuan ( $V_{u\_tumpuan}$ ) maupun di tengah bentang ( $V_{u\_lap}$ ). Masih tersimpannya kekuatan sebesar 25%, berarti aksi komposit ketiga balok memiliki kekuatan tambahan dalam menahan gaya geser diluar prediksi serta menekan kemungkinan terjadinya kegagalan geser. Hal tersebut atas pertimbangan kerusakan retak dan lendutan yang telah melampaui ijin.

Analisis perhitungan kontribusi FRP terhadap Kuat Geser menggunakan rumus dalam ACI-440.2R-08, faktor reduksi dalam SNI 2847: 2019 serta elemen penting lembaran FRP berdasarkan karakteristik *StrongGlass* E450 dalam *Estrong Technical Data Sheet* 2022. Kuat Geser harus memenuhi ketentuan:

$$\Phi V_n \geq V_u \quad (6)$$

$$\Phi V_n = \Phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (7)$$

Tabel 10. Rekapitulasi Desain Kuat Geser Balok Uji Penguatan FRP

Balok	Ln (mm)	n (lapis)	w <sub>f</sub> (mm)	V <sub>f</sub> N	V <sub>c</sub> N	V <sub>s</sub> N	ΦV <sub>n</sub> N	V <sub>u_lap</sub> N	V <sub>u_tumpuan</sub> N	Ket. ΦV <sub>n</sub> > V <sub>u</sub>
EG4	6000	1	200	3768,1	33054,9	10296,0	34915,3	11350,638	-31216,248	Memenuhi
EG3	6000	1	200	3768,1	33054,9	10296,0	34915,3	12559,231	-33846,839	Memenuhi
F25	9000	1	200	2512,1	33054,9	10296,0	34114,6	14303,665	3886,016	Memenuhi

b) Kuat Lentur.

Pada Tabel 11. Rekapitulasi Desain Kuat Lentur Balok Uji Perkuatan FRP, lembaran FRP tipe *StrongGlass* E450 dengan jumlah 1 (satu) lapis, lebar 200 mm sepanjang balok uji EG4, EG3 dan F25 memenuhi persyaratan kuat lentur nominal melebihi kuat lentur yang dibutuhkan. Pencapaian kekuatan terlihat dari 90% Kuat Lentur nominal ( $\Phi M_n$ ) dari ketiga balok, secara analisis terbukti mampu melebihi Kuat Lentur ultimit ( $M_u$ ) maksimal di tengah bentang ( $M_u_{lap}$ ). Ketiga balok lapis FRP tipe *StrongGlass* E450, melalui aksi komposit, masih menyimpan kekuatan sebesar 10%, sehingga balok perkuatan diharapkan berperilaku daktail maksimal menghindari keruntuhan lentur.

Analisis perhitungan kontribusi FRP terhadap Kuat Lentur menggunakan rumus dalam ACI-440.2R-08, faktor reduksi dalam SNI 2847: 2019 serta elemen penting lembaran FRP berdasarkan karakteristik *StrongGlass* E450 dalam *Estrong Technical Data Sheet* 2022. Kuat Lentur harus memenuhi ketentuan:

$$\phi M_n \geq M_u \quad (8)$$

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{\beta_c}{2} \right) \quad (9)$$

Tabel 11. Rekapitulasi Desain Kuat Lentur Balok Uji Pekuatan FRP

Balok	Ln (mm)	n (lapis)	w <sub>f</sub> (mm)	$\Phi M_n$ Nmm	Mu <sub>lap</sub> Nmm	Ket. $\Phi M_n > M_u_{lap}$
EG4	6000	1	200	73778386,74	65549935,07	Memenuhi
EG3	6000	1	200	73778386,74	72529559,50	Memenuhi
F25	9000	1	200	73778386,74	34099792,27	Memenuhi

c) Lentutan.

Lentutan balok retrofit FRP tipe *StrongGlass* E450 pada Tabel 12. Rekapitulasi Desain Lentutan Pada Balok Uji Pekuatan FRP, secara analisis memenuhi persyaratan terhadap lentutan ijin. Nilai lentutan pada ketiga balok ( $\Sigma \Delta$ ), hasil gabungan nilai lentutan akibat beban (D dan L) dan momen ultimit, tidak melampaui lentutan ijin ( $\Delta$  ijin). Penambahan FRP tipe *StrongGlass* E450 sebagai lapis perkuatan turut meningkatkan kekakuan balok, akibat meningkatnya inersia disamping kuat geser dan kuat lentur yang bekerja secara komposit pada balok.

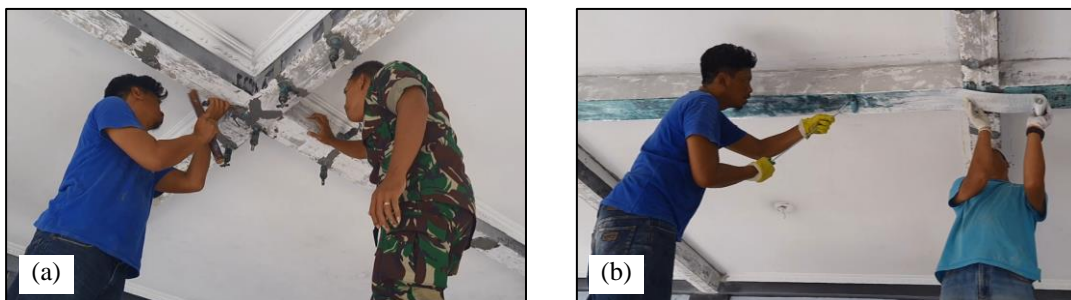
Tabel 12. Rekapitulasi Desain Lentutan pada Balok Uji Pekuatan FRP

Balok	L (mm)	n (lapis)	w <sub>f</sub> (mm)	$\Sigma \Delta$ Balok (mm)	$\Delta$ ijin (mm)	Ket. $\Sigma \Delta$ Balok < $\Delta$ ijin
EG4	6000	1	200	5,426	16,042	Memenuhi
EG3	6000	1	200	5,976	16,042	Memenuhi
F25	9000	1	200	10,519	24,375	Memenuhi

3) Pelaksanaan *Retrofit*.

a) Injeksi Beton.

Metode perbaikan pada beton dapat dilakukan melalui injeksi bahan *Epoxy* yang berkekuatan tinggi untuk menutupi retak pada muka beton, juga digunakan untuk injeksi pada *nozzle*, sehingga dapat bertahan dibawah tekanan pompa injeksi *epoxy* (Puspita dkk., 2018). Bahan injeksi *StrongGrout EP10* yang memiliki viskositas rendah untuk mengisi bagian beton yang terpisah, bersifat mengeras (tidak getas), serta bahan *Estobond EC* (*base* dan *hard*) untuk mencegah kebocoran sealer. Mekanisme aplikasi mengacu pada *Estrong Technical Data Sheet* 2022 mengikuti standar ASTM D965 dan ASTM D638.



Gambar 3. (a) Proses Injeksi, dan (b) Proses Pemasangan FRP *StrongGlass* E450.

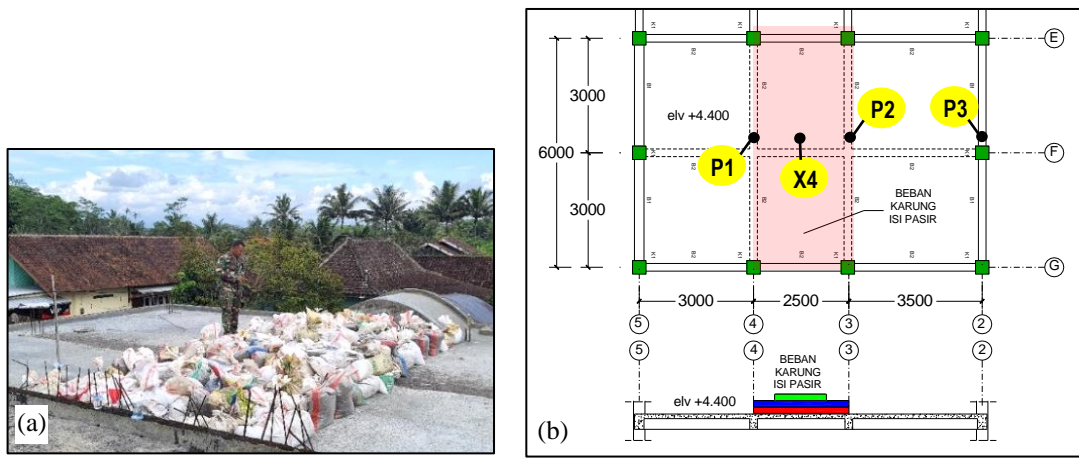
b) Pemasangan FRP.

Pelaksanaan pemasangan FRP tipe *StrongGlass E450*, dengan bahan perekat *EstoWrap Resin Hardener* mengacu pada *Estrong Technical Data Sheet 2022*. Bahan perekat diaplikasikan sebanyak 3 lapis, di mana tiap lapisan sebanyak 0,6 Kg/m<sup>2</sup> (setebal ± 2 mm pada muka beton) disebarikan secara paralel searah kerja FRP menggunakan *roll*. Waktu tunggu *fully cured* adalah 7 hari, sebagai batas minimal untuk dilakukan pengujian pembebanan (*Loading Test*) pasca *retrofitting*.

3.4. Perilaku Pasca *Retrofitting*

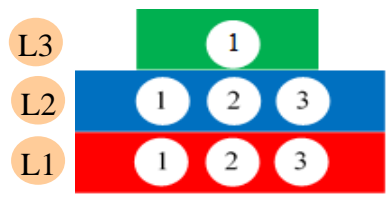
1) Uji Pembebanan (*Loading Test*).

Mekanisme pembebanan untuk pengujian lendutan sesuai tahapan pengujian dalam SNI 03-6760-2002. Pada SNI 1727: 2020, data yang diperoleh pada bangunan aktual menunjukkan bahwa jarang ada suatu lantai yang dibebani sampai lebih dari 80% dari beban hidup rata-rata yang dihitung. Beban uji adalah beban hidup sebesar 3,830 kN/m<sup>2</sup>, maka digunakan desain 70% (280 Kg/m<sup>2</sup>), diletakkan pada bidang lantai seluas 15 m<sup>2</sup> sehingga dibutuhkan 210 karung isi pasir (berat per karung 20 Kg) atau senilai 4200 Kg yang disusun sebagai berikut:



Gambar 4. (a) Pemeriksaan Beban Karung Isi Pasir, dan (b) Posisi Area Pembebanan pada Muka Lantai Elv +4.400.

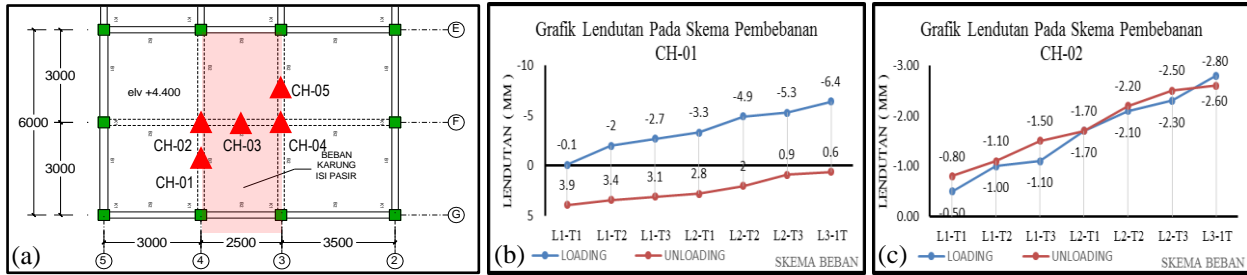
- a) Beban 94 karung (1880 Kg) pada lapisan 1 (L1).
  - (1) Tahap 1 = 31 karung.
  - (2) Tahap 2 = 31 karung.
  - (3) Tahap 3 = 32 karung.
- b) Beban 94 karung (1880 Kg) pada lapisan 2 (L2).
  - (1) Tahap 1 = 31 karung.
  - (2) Tahap 2 = 31 karung.
  - (3) Tahap 3 = 32 karung.
- c) Beban 22 karung (440 Kg) pada lapisan 3 (L3).
  - 1 tahap = 22 karung.



2) Uji Lendutan dengan LVDT.

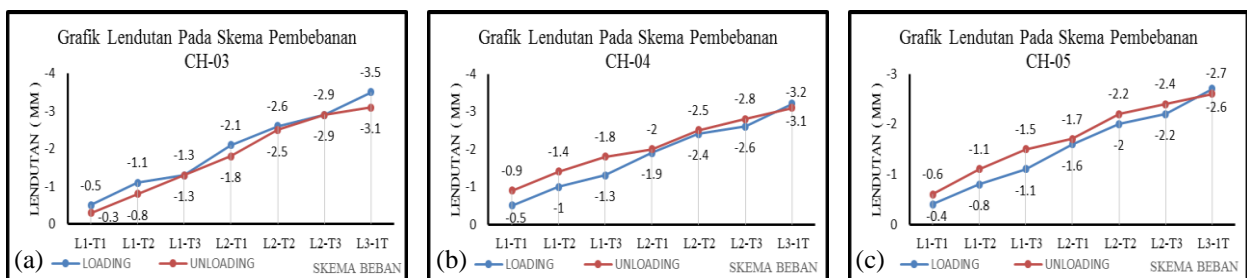
Pelaksanaan uji lendutan dengan LVDT mengacu pada SNI 03-6760-2002 dan ACI 437R-03, di mana jumlah LVDT sebanyak 5 unit terpasang memenuhi ketentuan yang disyaratkan. Lendutan max. CH-02 terbaca -2,80 mm (ke bawah), saat sebelum *Loading Test* pada titik CH-02 total lendutan terukur -28,00 mm, maka akumulasi lendutan CH-02 menjadi -30,80 mm (Titik “0” pada P3). Lendutan CH-02 pada kondisi *existing* (sebelum dilapisi FRP) sebesar -34,00 mm, maka terdapat beda elevasi sebesar +3,20 mm (ke atas). Secara keseluruhan akumulasi lendutan pada CH-02 pasca *Loading Test* (-30,80 mm) masih melampaui nilai lendutan ijin -24,375 mm. Pemberian injeksi pada keretakan balok, dimungkinkan mempengaruhi peningkatan kekakuan balok.





Gambar 5. (a) Posisi LVDT pada Balok Uji Lantai Elv +4.400, serta Grafik Lendutan pada Skema Pembebanan (b) CH-01, dan (c) CH-02.

Pada CH-03, lendutan tertinggi yakni -3,50 mm (arah ke bawah). Apabila ditinjau lendutan titik X4 sebelum start uji beban (-31,00 mm), maka pasca uji pembebanan lendutan titik X4 menjadi senilai -34,50 mm, atau masih melampaui nilai lendutan ijin 24,375 mm. Walaupun lendutan telah melewati batas ijin, balok retrofit lapis FRP terbukti mampu bertahan dan melayani peningkatan beban aksial uji (sebesar 25,98 %) tanpa adanya kerusakan. Defleksi yang ada memperlihatkan kemampuan daktil dari aksi komposit pada beton retrofit.



Gambar 6. Grafik Lendutan pada Skema Pembebanan (a) CH-03, (b) CH-04, dan (c) CH-05.

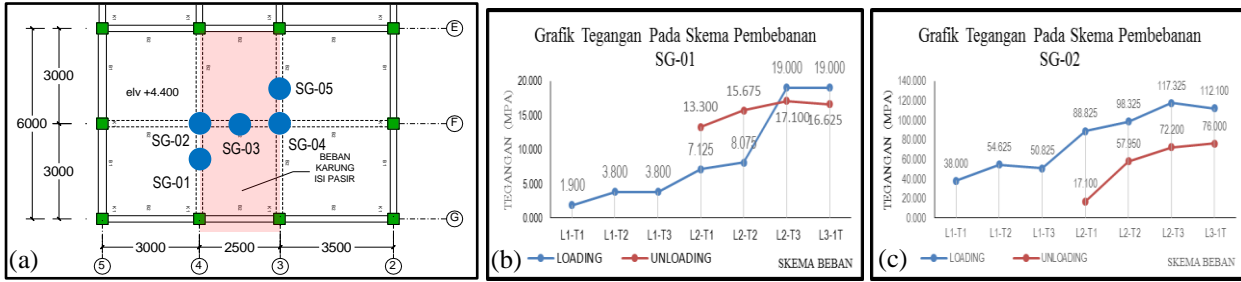
Kemudian CH-04, lendutan max. terbaca -3,20 mm (arah ke bawah), sementara saat sebelum *Loading Test* lendutan pada titik CH-04 terukur -31,00 mm, maka total lendutan CH-04 menjadi -34,20 mm. Lendutan CH-04 pada kondisi *existing* (sebelum dilapisi FRP) sebesar -37,00 mm, maka terdapat beda elevasi sebesar +2,80 mm (ke atas), pada kondisi beban naik sebesar 25,98 %. Secara keseluruhan akumulasi lendutan pada CH-04 pasca *Loading Test* (-34,20 mm) masih melampaui nilai lendutan ijin sebesar -24,375 mm. Pemberian injeksi pada keretakan balok, dimungkinkan mempengaruhi peningkatan kekakuan balok.

Lendutan CH-05 tertinggi terbaca -2,70 mm (arah ke bawah) dan masih berada dibawah nilai lendutan desain balok EG3 lapis FRP yakni -5,976 mm. Titik CH-05 berjarak 80 cm dari titik CH-04 maka perilaku balok *retrofit* FRP pada titik CH-05 tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Meskipun prosedur kalibrasi 5 unit LVDT pembacaan “0” pada *Data Logger* dan prosedur *Loading - Unloading* telah dilaksanakan dengan tahapan yang benar melalui pengawasan secara langsung dari aplikator, namun posisi 5 bentuk kurva hasil pembacaan alat terekam tidak sama. Hal ini dimungkinkan akibat perlemahan area pertemuan dua balok pada CH-02 dan CH-04 yang memerlukan waktu kembali ke posisi “0” balok beton lebih lama dibandingkan posisi tengah bentang CH-03, sehingga nilai lendutan cenderung lebih besar.

### 3) Uji Regangan dengan *Strain Gauge*.

Pada titik uji SG-01 sampai dengan SG-05 secara umum memiliki kondisi yang hampir sama. Hasil regangan melalui modulus elastisitas FRP *StrongGlass* E450 dikonversi ke tegangan. Berdasarkan grafik masing-masing bacaan alat dapat terlihat bahwa pada skema dua titik beban (L2-T3 dan L3-1T) terdapat perbedaan nilai Tegangan yang tidak begitu jauh, baik pada saat proses *Loading* dan *Unloading*. Hal ini membuktikan bahwa aktivitas Tegangan pada beban mendekati puncak dan beban meninggalkan puncak berada di daerah elastis (menyerupai garis datar).

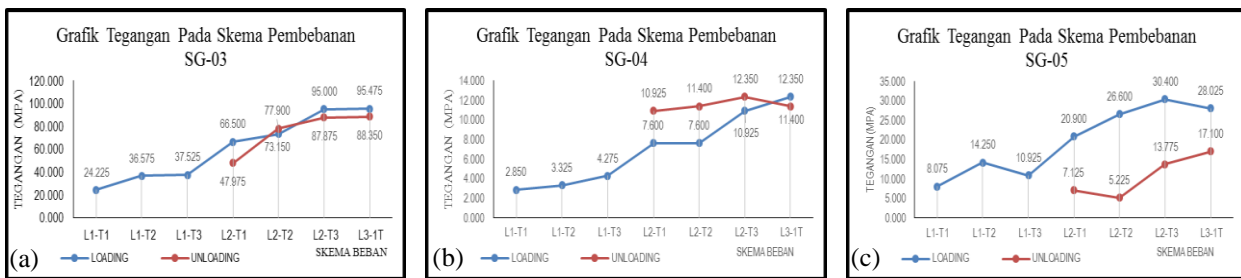
Pada kondisi ini mengindikasikan tegangan tarik mendekati maksimum dan mulai memperlihatkan batas kekuatan. Penambahan FRP pada balok untuk mendapatkan perimbangan kondisi regangan dan tegangan. Kondisi retak awal, mengindikasikan tulangan tarik telah mencapai tegangan leleh atau regangan min. 0,004 tercapai, berperilaku daktil pada kekakuan yang kecil ( $h < h_{min}$ ). Akibat penambahan FRP, regangan tertinggi terjadi di daerah tarik pada titik SG-02 sebesar 0,00154 sehingga menurut SNI 2847: 2019, memungkinkan balok berperilaku getas lentur pada kondisi beban max. 4200 kg (beban naik 25,98 %).



Gambar 7. (a) Posisi *Strain Gauge* pada Balok Uji Lantai Elv +4.400, serta Grafik Tegangan pada Skema Pembebanan (b) SG-01, dan (c) SG-02.

Tegangan tarik tertinggi dicapai pada SG-02 (Pertemuan balok P1) sebesar 117,325 MPa (naik 23,879 % dari  $f_u$  491,32 MPa) diikuti CH-03 (Pertengahan bentang balok lantai uji beban) sebesar 95,475 MPa dan masih dibawah tegangan komposit FRP sebesar 580,000 MPa (*Strong Technical Data Sheet*, 2022). Regangan puncak pada SG-02 sebesar 0,00154 lebih rendah dari regangan ijin max. 0,003 (SNI 2847: 2019) maupun regangan komposit *StrongGlass* E450 sebesar 0,005, maka hal ini dapat mengindikasikan bahwa balok belum mencapai keseimbangan regangan atau keadaan luluh.

Meninjau kondisi pra *retrofit* dimana balok mengalami lendutan disertai retak pada muka beton (kondisi daktail), maka pada pasca *retrofit* penerapan FRP tipe *StrongGlass E450* terbukti meningkatkan kapasitas kekuatan balok dalam memikul beban, dimana balok beton bertulang masih menyediakan kekuatan pada beban layan tambahan sebesar 4200 kg.



Gambar 8. Grafik Tegangan pada Skema Pembebanan (a) SG-03, (b) SG-04, dan (c) SG-05.

## Kesimpulan

- Kondisi balok nonprategang *existing* 200/270 memiliki  $h_{lap} < h_{min}$  (286 mm) dengan mutu beton terkecil *Hammer Test* K.408 kg/cm<sup>2</sup> melebihi mutu desain K.275 Kg/cm<sup>2</sup>. Indikator mutu beton yang ada belum mencerminkan perilaku aktual balok *existing*, dimana balok berperilaku daktail pada kondisi retak > 0,3 mm (retak ijin max) dan lendutan nyata  $\Delta P1$  (-34 mm) dan  $\Delta P2$  (-37 mm) melampaui ijin (24,75 mm).
- Kondisi BjTP 12 terpasang diluar batas bawah  $\pm 4$ mm berakibat luasan tarik baja tulangan berkurang, idealnya ikut mempengaruhi kapasitas kuat tariknya. Hasil uji tarik nilai  $f_y$  rata-rata 348,47 MPa >  $f_y$  min 280 MPa dan  $f_u$  rata-rata 491,32 MPa >  $f_u$  min 350 MPa, memperlihatkan tulangan masih mampu memberikan kontribusi daktail pada balok yang retak dan melendut tanpa adanya keruntuhan.
- Lendutan hasil permodelan *Software SAP 2000* yakni  $\Delta P_{s1}$  (34,06 mm) dan  $\Delta P_{s2}$  (37,16 mm), lebih mendekati nilai lendutan *existing*  $\Delta P1$  (34,0 mm) dan  $\Delta P2$  (37,0 mm) dibanding hasil analisis Teoritis. Prosentase perbedaan berturut-turut sebesar 0,2% dan 0,4%. Maka permodelan SAP 2000 digunakan sebagai dasar desain balok *retrofit*.
- Desain FRP tipe *StrongGlass E450* dengan jumlah 1 (satu) lapis, lebar 200 mm sepanjang 3 balok uji memenuhi syarat kuat lentur ( $\phi Mn \geq Mu$ ) dan kuat geser ( $\phi Vn \geq Vu$ ) dengan lendutan tertinggi 10,519 mm pada Balok F25 Ln 9.000 mm, tidak melampaui lendutan ijin 24,375 mm.
- Perilaku balok *retrofit* lapis FRP tipe *StrongGlass E450* pasca uji pembebanan dengan beban pasir max. 4200 Kg (beban meningkat sebesar 25,98 %) membuktikan terjadi peningkatan kekuatan dari hasil uji lendutan dan uji regangan. Peningkatan kuat tarik balok *retrofit* sebesar 117,325 MPa (naik 23,879 %), memberikan dampak regangan max. sebesar 0,00154 dan masih lebih rendah dari regangan ijin maupun regangan komposit, sehingga mengindikasikan balok belum mencapai keseimbangan regangan atau keadaan luluh. Pasca injeksi pada balok yang retak sebelum pemasangan FRP *StrongGlass E450*, turut mempengaruhi nilai defleksi serta kekakuan balok, dimana total lendutan pra *retrofit* (*existing*)  $\Delta P1$  (-34 mm) dan  $\Delta P2$  (-37 mm), menjadi lendutan pasca *retrofit*  $\Delta P1$  (-30,8 mm) dan  $\Delta P2$  (-34,2 mm), namun secara keseluruhan masih melampaui lendutan ijin 24,375 mm.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas organisasi A atas dukungan finansialnya pada penelitian ini dan organisasi B atau dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada ahli C atas dikusinya yang bermanfaat.

## Daftar Notasi

- $c$  = Jarak dari serat tekan terjauh ke sumbu netral, mm.  
 $I_{cr}$  = Inersia penampang retak, mm<sup>4</sup>  
 $I_e$  = Momen inersia efektif, mm<sup>4</sup>  
 $I_g$  = Inersia penampang bruto, mm<sup>4</sup>  
 $M_a$  = Momen aktual pasca retak, N-mm  
 $M_{cr}$  = Momen penampang retak, N-mm  
 $\Delta$  = Perbedaan antara defleksi awal dan akhir, mm

## Daftar Pustaka

- ACI Committee 318. (2019). *ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 228. (2013). *ACI 228.2R-13 Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 440. (2008). *ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 437. (2003). *ACI 437R-03 Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 224. (2001). *ACI 224R-01 Control of Cracking in Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- Apriyani, W. (2016). Aplikasi Non Destructive Test Pada Investigasi Keandalan Struktur Beton (Studi Kasus: Kolom Basement – K4 Pada Bangunan Stadion Utama Riau). *Jurnal Teknik Sipil Siklus*: Vol. 2 No. 2, pp. 95-103.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727: 2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional: ICS 93.020.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847: 2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional: ICS 91.080.40.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 2052: 2017 Baja Tulangan Beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8389: 2017 Cara Uji Tarik Logam*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI ASTM C597: 2012 Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton (ASTM C597-02, IDT)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-6760-2002 Pengujian Pembebanan Lantai Beton Bertulang Bangunan Bertingkat Dengan Beban Air*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Estrong. (2022). *StrongGlass E450 High Strength Glass Fiber Sheet for Concrete Structural Strengthening System. Technical Data Sheet*. PT. Estrong Nusantara Mandiri.
- Estrong. (2022). *StrongWrap Primer E450 and StrongWrap Encap Resin. Technical Data Sheet*. PT. Estrong Nusantara Mandiri.
- Luastika, G.N., Lingga, A.A., Lestyowati, Y. (2019). Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer*. FT-Untan. pp: 1-7.
- Nalarita, K., Isneini, M., Alami, F. (2019). Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Menggunakan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) dan WM (*Wiremesh*). JRSD, Edisi Juni 2019, Vol.7, No. 2. pp: 234-246.
- Parannuan, K. (2017). Kapasitas Lentur Balok Beton Perkuatan GFRP Pasca Tulangan Leleh. Universitas Hassanuddin: Makasar: pp. 1-28.
- Parmo, Taufikurrahman. (2014). Perbaikan Kekuatan dan Daktilitas Balok Beton Bertulang Menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) Strips. *Jurnal Ilmu-ilmu Teknik-Sistem*, Vol. 10, No. 3. pp: 63-71.
- Pranata, D.R., Witjaksana, B., Tjendani, H.T. (2022). Analisis Perkuatan Struktur Beton dengan Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (Cfrp)*, dan *Glass Fiber Reinforced Polymer (Gfrp)* Terhadap Biaya. *Prosiding Senakama*, Vol. 1. pp: 35-45.
- Puspita, F.F., Aulia, T.B., Afifuddin, M. (2018). Analisis Retak Lentur Pada Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi yang Diperbaiki dengan Injeksi Epoxy. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala, Hidrologi, Lingkungan dan Struktur*. Vol. 1 No. 4. pp: 831-844.
- Ridwan, A.R., Sultan, M.A., Gaus, A. (2022). Efek Perkuatan Glass Fiber Reinforce Polymer Sheet Pada Balok Beton Bertulang dengan Tulangan Korosi. *Teras Jurnal*, Vol. 12 No. 1. pp: 103-116.
- Setyawanto, R.A. (2015). Pengaruh Letak Sambungan Beton dan Tulangan Longitudinal Terhadap Balok T Pada Jarak Seperempat Bentang. *Institut Teknologi Nasional Malang*. pp: 35-78.

- Tavio, Firmansyah, M.F., Rasyid, H.A. (2022). Kajian Perkuatan Struktur Rumah Sakit RKZ Surabaya Menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Sheets*. Jurnal Teknik ITS, Vol. 11, No. 3. pp: 138-145.
- Yusfar. (2018). Analisa Pengaruh Perkuatan Dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* Pada Struktur Balok Beton Bertulang, Teknik Sipil Universitas Islam Riau, Tesis. pp: 1-57.