

## **RETROFITTING KERETAKAN STRUKTURAL PEDESTAL HOT OIL HEATER DENGAN INJEKSI EPOKSI, GROUTING NON-SHRINK, DAN CFRP**

**Heri Khoeri<sup>1\*</sup>, Panji Nugroho<sup>2</sup>, Yuli Panca Asmara<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tama Jagakarsa, Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup>PT. Hesa Laras Cemerlang, Jakarta, Indonesia

<sup>3</sup>Faculty of Engineering and Quantity Surveying INTI International University, Putera Nilai, Malaysia

\* *E-mail Corresponding:* [hkhoeiri@hesa.co.id](mailto:hkhoeri@hesa.co.id)

**Abstrak:** Pedestal beton bertulang pada fasilitas *Hot Oil Heater* mengalami keretakan yang teridentifikasi melalui inspeksi visual, pengukuran lebar retak, dan *Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPVT)*. Lebar retak mencapai 0,85 mm dengan kedalaman hingga 111 mm (rata-rata  $\pm 62,7$  mm), melampaui selimut beton 50 mm dan mengindikasikan retak struktural. Hasil *UPVT* menunjukkan kualitas beton kategori *medium-good* dengan kuat tekan beton aktual untuk analisis ditetapkan sebesar  $f'_c = 22$  MPa, sementara mutu rencananya adalah  $f'_c = 28$  MPa. Analisis kapasitas lentur-aksial memperlihatkan bahwa kombinasi beban rencana dan beban sementara saat erection (penarikan *chain block*) dapat melampaui kapasitas aktual penampang. *Retrofit* dilakukan melalui injeksi epoksi, grouting non-shrink, dan perkuatan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Evaluasi pasca *retrofit* menunjukkan peningkatan kapasitas lentur dan aksial sehingga seluruh kombinasi gaya dalam kembali berada dalam domain aman diagram interaksi  $\phi P - \phi M$ .

**Kata Kunci:** pedestal, retak, *retrofit*, *CFRP*.

**Abstract:** Reinforced concrete pedestals at the *Hot Oil Heater* facility were found to exhibit cracking identified through visual inspection, crack width measurements, and *Ultrasonic Pulse Velocity Testing (UPVT)*. The crack width reached up to 0.85 mm, with crack depths of up to 111 mm (average approximately 62.7 mm), exceeding the 50 mm concrete cover and indicating structural cracking. *UPVT* results classified the concrete quality as medium-good, with the actual compressive strength adopted for analysis taken as  $f'_c = 22$  MPa, while the design compressive strength was  $f'_c = 28$  MPa. Flexural-axial capacity analysis revealed that the combination of design loads and temporary construction loads during erection (due to chain block pulling) could exceed the actual sectional capacity. *Retrofit* measures were implemented using epoxy crack injection, non-shrink grouting, and *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* strengthening. Post-*retrofit* evaluation demonstrated significant improvements in both flexural and axial capacities, resulting in all internal force combinations falling back within the safe domain of the  $\phi P - \phi M$  interaction diagram.

**Keywords:** pedestal, crack, *retrofit*, *CFRP*.

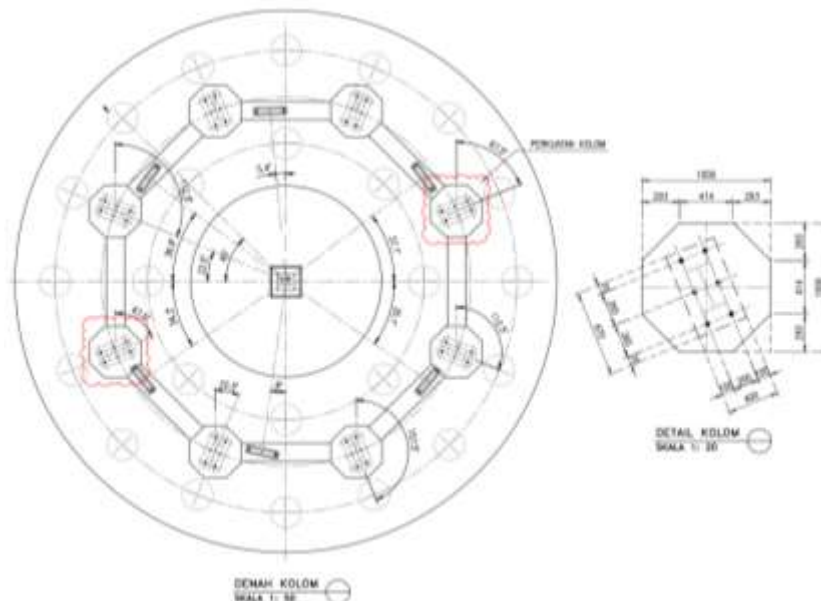
## PENDAHULUAN

Pedestal beton bertulang *Hot Oil Heater* (Gambar 1 dan Gambar 2) pada fasilitas industri minyak dan gas memikul kombinasi beban aksial, lentur, dan geser. Pada saat erection dilakukan penarikan untuk membuat struktur menjadi presisi menggunakan *chain block* dengan perkiraan gaya sebesar antara 4 sampai dengan 5ton, yang menyebabkan keretakan pada elemen pedestal. Keretakan pada elemen ini berpotensi menurunkan kapasitas struktural dan durabilitas. Evaluasi struktur beton eksisting karenanya harus mempertimbangkan kondisi material aktual, riwayat pembebanan (termasuk beban sementara konstruksi), serta analisis kapasitas berbasis kinerja (ACI Committee 562, 2021).

Pengecekan kedalaman retak dan identifikasi kekuatan beton dilakukan menggunakan *ultrasonic pulse velocity test (UPVT)*. *UPVT* merupakan metode non-destruktif yang luas digunakan untuk menilai keseragaman beton, indikasi cacat internal, serta estimasi mutu beton secara empiris (ASTM International, 2023), (Saint-Pierre et al., 2016a). Untuk rehabilitasi dan perkuatan, sistem *FRP* eksternal, khususnya *CFRP* telah terbukti efektif meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan daktilitas tanpa menambah dimensi elemen (ACI Committee 440, 2017), (Pellegrino & Modena, 2006), (El-Refaie et al., 2001). Makalah ini menyajikan studi kasus keretakan struktural pada pedestal *Hot Oil Heater*, evaluasi kapasitas rencana dan aktual, serta perancangan *retrofit* berbasis injeksi epoksi, *grouting non-shrink*, dan *CFRP*.



Gambar 1. Hot Oil Heater 3D View



Gambar 2. Lokasi Pedestal yang mengalami keretakan

## METODE

Objek penelitian adalah pedestal *Hot Oil Heater* pada fasilitas industri minyak dan gas. Data meliputi inspeksi visual, pengukuran lebar dan kedalaman retak, pengujian *UPVT*, serta dokumen perhitungan struktur pedestal. *UPVT* dilakukan dengan metode transmisi langsung. Kecepatan rambat gelombang digunakan untuk menginterpretasikan kualitas beton dan mengestimasi kuat tekan beton aktual, serta memperkirakan kedalaman retak dari perbedaan waktu rambat pada dua konfigurasi jarak (ASTM International, 2023), (Saint-Pierre et al., 2016a), (Ali-Benyahia et al., 2017). Analisis lentur-aksial dan geser dilakukan dengan membandingkan kapasitas rencana terhadap kapasitas aktual menggunakan hasil interpretasi *UPVT* serta mempertimbangkan tambahan gaya sementara saat erection. Evaluasi mengikuti kerangka asesmen dan rehabilitasi struktur beton eksisting (ACI Committee 562, 2021).

*Retrofit* dilakukan bertahap: (1) injeksi epoksi untuk memulihkan kontinuitas beton retak, (2) grouting non-shrink untuk perbaikan *spalling/chipping*, dan (3) perkuatan *CFRP* (lamina vertikal untuk lentur-aksial dan *wrap* untuk geser/*confinement*) mengacu panduan *FRP* eksternal (ACI Committee 440, 2017).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengukuran Lebar dan Kedalaman Retak dengan *UPVT*

Hasil pengukuran kedalaman retak dengan menggunakan *UPVT* seperti diberikan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Hasil Pengukuran Kedalaman Retak

No.	Structure ID	Lebar retak, <i>L</i> (mm)	Kedalaman retak (mm)				
			0.1 <i>L</i>	0.3 <i>L</i>	0.5 <i>L</i>	0.7 <i>L</i>	0.9 <i>L</i>
1	Kolom K6 (A) Elv. 2.00m	0.2 s/d 0.85	59	66	96	65	80
2	Kolom K6 (B) Elv. 2.00m	0.02 s/d 0.85	68	70	102	56	111
3	Kolom K6 (B) Elv. 1.47m	0.85 s/d 0.85	49	61	64	59	55
4	Kolom K6 (C) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.2	36	58	89	81	57
5	Kolom K6 (C) Elv. 1.47m	0.85 s/d 0.85	59	91	84	90	0
6	Kolom K6 (D) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.1	68	45	61	66	61
7	Kolom K6 (E) Elv. 2.00m	0.2 s/d 0.4	75	108	93	69	47
8	Kolom K6 (E) Elv. 1.47m	0.2 s/d 0.6	62	68	70	92	56
9	Kolom K6 (E) Elv. 2.62m	0.3 s/d 0.6	58	59	87	75	0
10	Kolom K6 (F) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.4	47	38	62	71	47
11	Kolom K6 (G) Elv. 1.47m	0.85 s/d 0.85	46	35	59	63	34
12	Kolom K6 (H) Elv. 2.00m	0.2 s/d 0.85	65	63	52	71	46
13	Kolom K6 (H) Elv. 1.47m	0.85 s/d 0.85	27	23	35	38	52
14	Kolom K2 (A) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.4	55	85	87	55	49
15	Kolom K2 (A) Elv. 1.54m	0.1 s/d 0.2	69	63	82	67	42
16	Kolom K2 (B) Elv. 2.00m	0.2 s/d 0.6	92	87	100	75	100
17	Kolom K2 (B) Elv. 1.54m	0.1 s/d 0.2	61	88	45	90	83
18	Kolom K2 (C) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.5	60	56	103	91	54
19	Kolom K2 (C) Elv. 1.54m	0.1 s/d 0.1	77	48	57	51	76
20	Kolom K2 (D) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.3	40	74	73	69	42
21	Kolom K2 (D) Elv. 1.54m	0.1 s/d 0.1	37	47	52	45	35
22	Kolom K2 (F) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.2	55	61	55	49	29
23	Kolom K2 (G) Elv. 2.00m	0.1 s/d 0.1	35	35	58	29	30

Berdasarkan hasil pengukuran, lebar retak yang terjadi antara 0.1 sampai dengan 0.85 mm. Sementara kedalaman retak yang terjadi antara 21-111 mm dengan rata-rata 62.7 mm, artinya sudah melampaui selimut beton yaitu 50 mm. Dari lebar retak yang sudah melebihi 0.3 mm dan kedalaman retak yang terukur, maka keretakan yang terjadi sudah masuk dalam katagori retak struktur.

### Perkiraan Mutu Beton dengan *UPVT*

Pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik dipengaruhi oleh sejumlah faktor termasuk jenis semen, kandungan semen, aditif, jenis dan ukuran agregat, kondisi pengeringan, dan umur beton, dimana dengan kondisi ini harus berhati-hati ketika menghubungkan hasil *UPV* ke dalam kuat tekan beton ((Saint-Pierre et al., 2016b), (Karaiskos et al., 2015)). Hubungan yang paling realistis adalah untuk menggambarkan kualitas beton dalam hal keseragaman, ada atau tidaknya cacat, retak, segregasi, dan lainnya dapat dievaluasi menggunakan panduan yang diberikan dalam Tabel 2 (BIS, 2004), yang telah dikembangkan untuk mengkarakterisasi kualitas beton dalam struktur dengan cepat rambat gelombang ultrasonik.

**Tabel 2.** Kriteria cepat rambat gelombang ultrasonik untuk tingkat kualitas beton

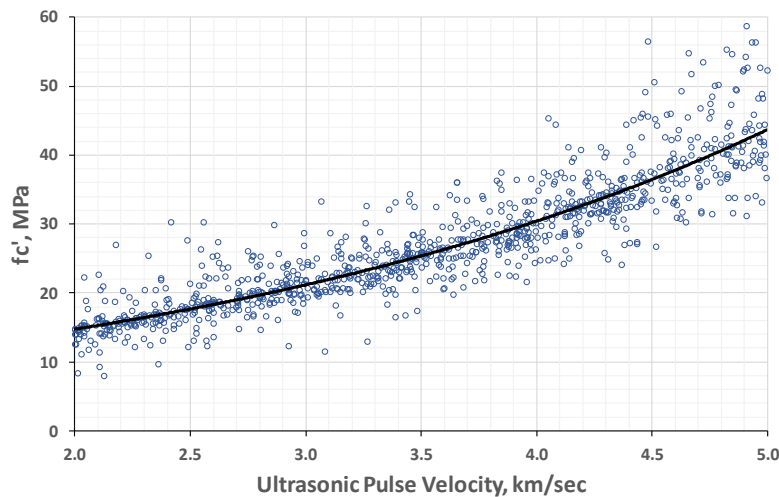
**Cepat rambat gelombang dengan metode transmisi langsung (km/detik)**

**Penilaian kualitas beton**

> 4.5	Sangat baik ( <i>Excellent</i> )
3.5 – 4.5	baik ( <i>Good</i> )
3.0 – 3.5	Cukup ( <i>Medium</i> )
< 3.0	Meragukan ( <i>Doubtfull</i> )

Catatan: Pada kasus “meragukan” diperlukan pengujian lebih lanjut

Selanjutnya untuk keperluan analisis pada asesmen ini, hasil pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik karena tidak memungkinkan untuk mengambil spesimen beton inti untuk diuji tekan maka digunakan persamaan yang diambil secara empirik dari hubunganbya dengan kuat tekan beton seperti pada Gambar 3 (PT. Hesa Laras Cemerlang, 2014),(Khoeri et al., 2024) berikut:



**Gambar 3.** Kurva hubungan antara kecepatan gelombang dan mutu beton

Data cepat rambat gelombang hasil pengujian termasuk interpretasi kualitasnya mengacu Tabel 2 dan Gambar 3, diberikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Pengukuran Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik dan Interpretasinya

No.	Structure ID	Distance (m)	Time 1 (µs)	Time 2 (µs)	Velocity (m/s)	Average Velocity (m/s)	Quality of concrete	Estimated value of $f_c'$ (MPa)
1	Kolom K2 (Sisi A- Sisi E)	1.0	333	0	3003	3047.6	Medium	21.7
			332	0	3012			
			318	0	3145			
			341	0	2933			
			318	0	3145			
2	Kolom K2 (Sisi D-Sisi H)	1.0	321	0	3115	3109	Medium	22.1
			327	0	3058			
			309	0	3236			
			321	0	3115			
			331	0	3021			
3	Kolom K2 (Sisi B-Sisi F)	1.0	328	0	3049	3162.8	Medium	22.6
			332	0	3012			
			305	0	3279			
			304	0	3289			
			314	0	3185			
4	Kolom K6 (Sisi C-Sisi G)	1.0	277	0	3610	3516	Good	25.7
			286	0	3497			
			305	0	3279			
			279	0	3584			
			277	0	3610			
5	Kolom K6 (Sisi A-Sisi E)	1.0	299	0	3344	3355.8	Medium	24.2
			300	0	3333			
			296	0	3378			
			293	0	3413			

No.	Structure ID	Distance (m)	Time 1 (μs)	Time 2 (μs)	Velocity (m/s)	Average Velocity (m/s)	Quality of concrete	Estimated value of $f'_c$ (MPa)
6	Kolom K6 (Sisi D-Sisi H)	1.0	302	0	3311	3399	Medium	24.6
			293	0	3413			
			294	0	3401			
			296	0	3378			
			295	0	3390			
			293	0	3413			

Hasil *UPVT* menunjukkan kecepatan rambat 3,0–3,5 km/s (kategori *medium–good*). Untuk analisis konservatif digunakan  $f'_c = 22$  MPa. Literatur menegaskan *UPVT* efektif untuk evaluasi kualitas beton, meski korelasi *UPV*– $f'_c$  bersifat empiris dan dipengaruhi kondisi material (ASTM International, 2023), (Saint-Pierre et al., 2016a), (Ali-Benyahia et al., 2017).

**Analisis Struktur Parsial Untuk Penilaian Kerusakan Dan Rekomendasi Perbaikan**

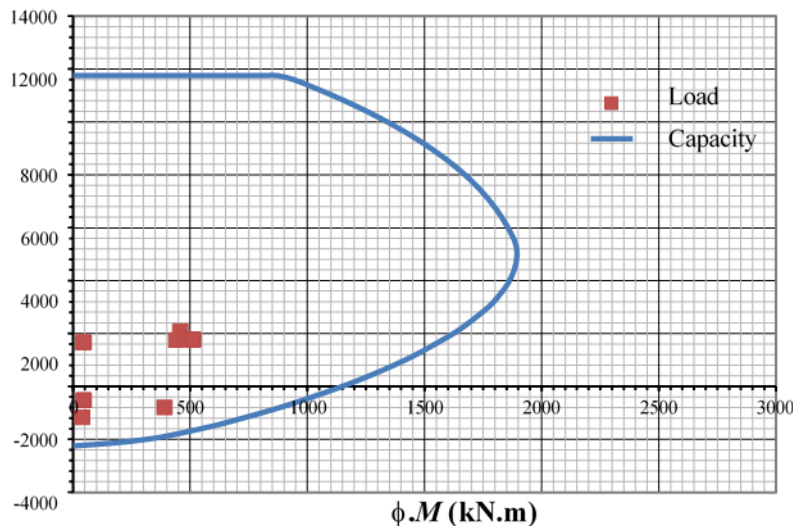
Gaya-gaya dalam ultimit rencana yang bekerja pada pedestal berdasarkan hasil perhitungan adalah seperti pada Tabel 4 berikut:

**Tabel 4.** Gaya Dalam Ultimit Rencana

Case	Beam	L/C	Axial/Shear (kN)			Moment (kN.m)		
			F <sub>x</sub> (kN)	F <sub>y</sub> (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>
Max F <sub>x</sub>	18	1304	2089.5	-162.0	44.2	10.0	-124.9	-457.5
Min F <sub>x</sub>	18	1309	-1157.2	139.2	-34.9	-10.1	12.1	39.3
Max F <sub>y</sub>	263	1301	-520.9	214.8	-17.7	0.0	3.6	44.0
Min F <sub>y</sub>	265	1303	1660.5	-214.8	-17.7	0.0	3.6	-44.0
Max F <sub>z</sub>	260	1306	-520.9	17.7	214.8	0.0	-44.0	3.6
Min F <sub>z</sub>	260	1307	1660.5	-17.7	-214.8	0.0	44.0	-3.6
Max M <sub>x</sub>	19	1305	-791.0	31.9	-131.7	10.1	390.7	97.8
Min M <sub>x</sub>	19	1316	1760.8	-41.5	154.5	-10.1	-440.7	-118.9
Max M <sub>y</sub>	23	1307	1782.0	-51.7	-195.1	-9.5	511.1	-73.3
Min M <sub>y</sub>	19	1306	1782.1	51.4	195.2	-9.6	-511.3	72.5
Max M <sub>z</sub>	21	1301	1782.0	195.2	-51.8	-9.5	73.3	511.2
Min M <sub>z</sub>	18	1303	1782.0	-195.2	-51.8	9.5	73.4	-511.3

Keterangan: z adalah sumbu vertikal

Diagram interaksi pedestal berdasarkan perhitungan rencana adalah seperti pada Gambar 4:



**Gambar 4.** Diagram Interaksi Pedestal dan Plot Gaya Dalam Ultimit

Kapasitas struktur (terfaktor) berdasarkan diagram interaksi Gambar 4 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \phi M_n &= 1220.62 \text{ kNm} \\ \phi P_{n,com} &= 11756.32 \text{ kN} \\ \phi P_{n,ten} &= -2237.59 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas geser berdasarkan perhitungan awal adalah:

$$V_c = 856.4 \text{ kN}$$

$$V_s = 1783.9 \text{ kN}$$

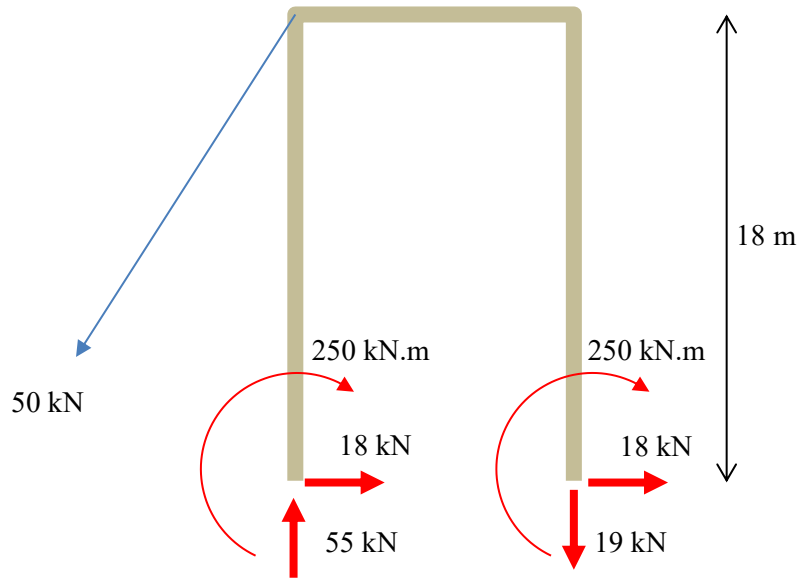
$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 1980.2 \text{ kN}$$

Sementara gaya geser yang harus ditahan adalah:

$$V_u = 1261.63 \text{ kN}$$

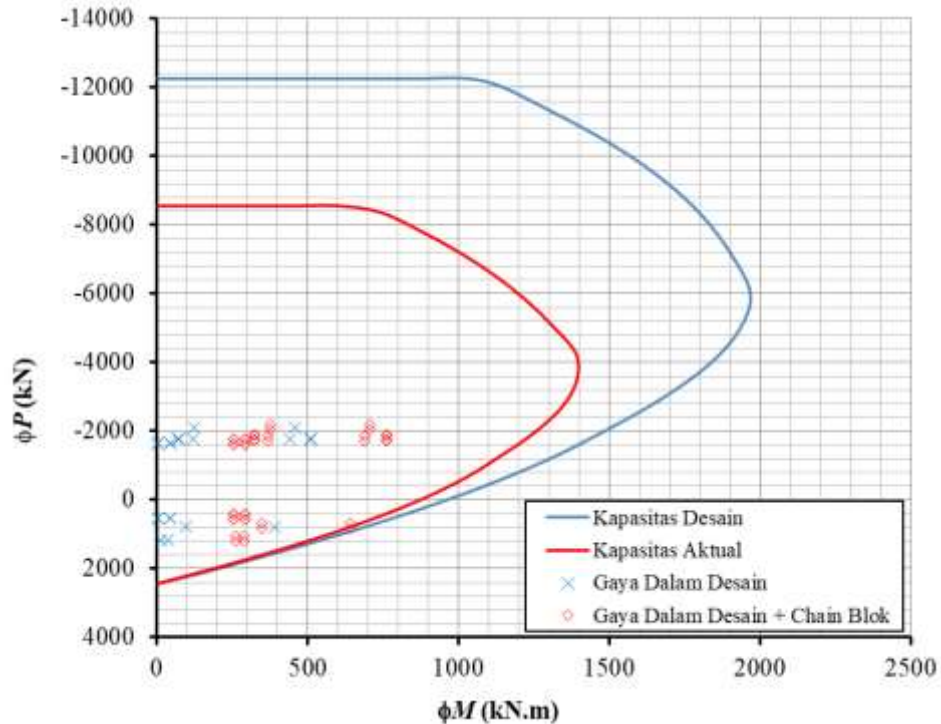
### Perkiraan Penyebab Keretakan

Pada saat erection dilakukan penarikan menggunakan *chain block* dengan perkiraan gaya sebesar 5 ton. Ilustrasi tambahan gaya yang terjadi akibat penarikan tersebut adalah seperti pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Tambahan gaya saat penarikan dengan menggunakan *chain block*

Selanjutnya berdasarkan hasil interpretasi mutu beton dari *UPV test*, seperti dijelaskan dalam Tabel 3,  $f'_c = 22 \text{ MPa}$  dan dengan menambahkan gaya-gaya dalam yang terjadi pada saat penarikan Gambar 5 dengan gaya dalam ultimit rencana Tabel 4 secara *envelope*, maka plot kapasitas pedestal dan gaya-gaya dalam yang terjadi seperti diperlihatkan pada Gambar 6. Diagram interaksi dibuat dengan memodelkan penampang menggunakan SAP2000, dengan property material disesuaikan dengan kondisi aktual.



**Gambar 6.** Diagram Interaksi Pedestal dan Plot Gaya Dalam Ultimit (Rencana dan Aktual)

Kondisi yang diperlihatkan pada Gambar 6 yang diperkirakan menjadi penyebab keretakan pada pedestal,

dimana pada saat penarikan dengan gaya 5 ton, menyebabkan tambahan gaya dalam yang melampaui kapasitasnya. Pada saat penarikan juga terjadi tambahan gaya geser yang harus ditahan pedestal, dengan pendekatan sederhana, penambahan gaya tersebut adalah:

$$\Delta \frac{(M_{pr3} + M_{pr4})}{H_0} = \frac{250 + 250}{2.625} = 190.5 \text{ kN dan } 35 \text{ kN} \quad (1)$$

$$\Delta P = 55 \text{ kN} \quad (2)$$

Kapasitas geser berdasarkan interpretasi mutu aktual ( $f'_c = 22 \text{ MPa}$ ) dan dengan mempertimbangkan keretakan yang terjadi:

$$V_c = 0.17 \left( 1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda b_w d \sqrt{f'_c} = \frac{0.17}{1000} \times \left( 1 + \frac{2089.46 + 55}{14 \times 800 \times 800} \right) \times 1 \times 800 \times 800 \sqrt{22} = 510.4 \text{ kN} \quad (3)$$

$$V_s = 1783.9 \text{ kN} \quad (4)$$

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 0.75(510.4 + 1783.9) = 1720 \text{ kN} \quad (5)$$

Sementara gaya geser yang harus ditahan adalah:

$$V_u = 1261.63 \text{ kN} + 35 \text{ kN} + 190.5 \text{ kN} = 1469 \text{ kN} \quad (6)$$

Dari pers. (4) dan (5) ternyata  $\phi V_n > V_u$  artinya walaupun dengan mutu beton yang lebih rendah dari rencana dan adanya tambahan gaya yang tidak diperhitungkan sebelumnya kapasitas geser masih memadai. Sehingga keretakan yang terjadi bukan karena geser tapi akibat retak lentur akibat adanya gaya tambahan yang belum diperhitungkan sebelumnya ditambah mutu beton yang kurang dari rencana.

Dengan mutu beton aktual dan kondisi retak, kurva kapasitas aktual menurun. Pada skenario desain dengan tambahan gaya *chain block*, sebagian titik gaya dalam berada di luar kurva kapasitas aktual (overstress), menjelaskan mekanisme terjadinya retak. Hal ini konsisten dengan penekanan ACI 562 bahwa *loading history* harus dipertimbangkan pada asesmen struktur eksisting.

### Rekomendasi Perbaikan

Strategi retrofit pada penelitian ini dilakukan secara bertahap dan saling melengkapi, yaitu melalui injeksi epoksi untuk perbaikan retak, grouting non-shrink untuk pemulihan penampang beton yang rusak, serta perkuatan CFRP untuk meningkatkan kapasitas struktural elemen pedestal. Ketiga metode tersebut tidak diposisikan sebagai alternatif yang saling dibandingkan, melainkan sebagai satu sistem perbaikan dan perkuatan yang terintegrasi.

### Perbaikan Retak dengan Injeksi Epoksi

Tahapan pertama dilakukan dengan injeksi epoksi pada retak yang teridentifikasi melalui inspeksi visual dan pengujian UPVT. Injeksi epoksi bertujuan untuk mengembalikan kontinuitas beton pada daerah retak sehingga elemen dapat kembali bekerja secara monolit. Metode ini umum digunakan pada retak struktural dengan lebar retak lebih dari 0.3 mm karena mampu mengisi rongga retak dan memulihkan transfer tegangan antar bidang retak.

Material injeksi yang digunakan memiliki sifat mekanik seperti ditunjukkan pada Tabel 5, dengan kuat tekan hingga sekitar 60 MPa pada umur 7 hari dan kuat tarik hingga sekitar 40 MPa. Selain itu material memiliki modulus elastisitas tekan lebih dari 4600 N/mm<sup>2</sup> serta kekuatan adhesi tarik minimum 2 N/mm<sup>2</sup> terhadap beton. Dengan sifat tersebut, injeksi epoksi berfungsi memulihkan integritas beton yang retak sehingga mekanisme penyaluran gaya pada penampang kembali mendekati kondisi sebelum terjadi keretakan.

Tabel 5. Technical Data Material Injeksi

Curing	Kuat Tekan (N/mm <sup>2</sup> )(ASTM D695-23, 2023)		Kuat Tarik (N/mm <sup>2</sup> ) (EN 53452, 2019)	
	±10°C	±25°C	±10°C	±25°C
4 Hours	20	25	15	20
1 Day	45	50	25	30
3 Days	50	55	30	35
7 Days	55	60	35	40

Compressive Modulus > 4600 N/mm<sup>2</sup> (14 days, 25°C) (ASTM D695-23, 2023)

Flexural Modulus > 5000 N/mm<sup>2</sup> (14 days, 25°C) (EN 53452, 2019)

Tensile adhesion strength ≥ 2 N/mm<sup>2</sup> (Concrete Failure)

### **Pemulihan Penampang dengan Grouting Non-Shrink**

Tahapan kedua dilakukan dengan **grouting non-shrink** untuk memperbaiki bagian beton yang mengalami **spalling dan chipping** akibat keretakan. Tujuan utama tahap ini adalah **memulihkan geometri penampang beton** serta memberikan material pengisi dengan karakteristik mekanik yang memadai.

Spesifikasi material grouting ditunjukkan pada **Tabel 6**, dengan kuat tekan hingga sekitar 60 MPa pada umur 7 hari serta modulus elastisitas lebih dari 4800 N/mm<sup>2</sup>. Selain itu material memiliki sifat **non-shrink** sehingga dapat mengurangi potensi terjadinya retak susut pada area perbaikan. Melalui proses ini, bagian beton yang rusak dapat dikembalikan ke kondisi semula sehingga distribusi tegangan pada penampang dapat bekerja lebih merata.

**Tabel 6.** Technical Data Material Grouting

<i>Curing</i>	Kuat Tekan (N/mm <sup>2</sup> )(ASTM D695-23, 2023)		Kuat Tarik (N/mm <sup>2</sup> ) (EN 53452, 2019)	
	±10°C	±25°C	±10°C	±25°C
4 Hours	20	25	12	19
1 Day	45	50	26	28
3 Days	50	55	28	30
7 Days	55	60	30	32

Compressive Modulus > 4800 N/mm<sup>2</sup> (14 days, 23°C) (ASTM D695-23, 2023)

Flexural Modulus > 5200 N/mm<sup>2</sup> (14 days, 23°C) (EN 53452, 2019)

Tensile adhesion strength ≥ 2 N/mm<sup>2</sup> (Concrete Failure)

### **Perkuatan Struktur Menggunakan CFRP**

Tahapan terakhir merupakan **perkuatan struktural menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)**. CFRP dipasang pada pedestal dalam bentuk **lamina vertikal untuk meningkatkan kapasitas lentur-aksial** serta **wrap melingkar untuk meningkatkan kapasitas geser dan confinement beton**.

Spesifikasi material CFRP yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 7**, dengan kuat tarik serat mencapai sekitar 4900 MPa dan modulus elastisitas sekitar 260 GPa. Material ini dipasang pada delapan sisi pedestal serta pada elemen balok yang terhubung dengan pedestal sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 7 sampai dengan Gambar 10**.

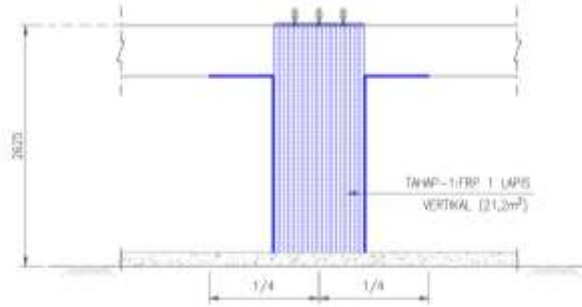
**Tabel 7.** Technical Data Material Carbon Fiber

<b>Spesifikasi</b>	<b>Nilai</b>
Areal Weight (g/m <sup>2</sup> )	300 ± 5
Width (mm)	500 ± 10
Thickness (mm)	0.167 ± 0.05
Tensile Strength (MPa)	4900
Tensile Modulus (GPa)	260
Elongation (%)	2.1
Fiber Orientation	Unidirectional

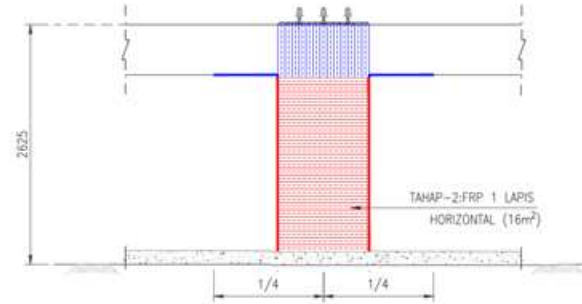
Perkuatan menggunakan CFRP memberikan kontribusi utama terhadap **peningkatan kapasitas lentur dan aksial pedestal**. Hal ini terlihat dari pergeseran kurva kapasitas pada diagram interaksi  $\phi P-\phi M$  seperti ditunjukkan pada **Gambar 11**, dimana seluruh titik gaya dalam termasuk kondisi dengan tambahan gaya akibat penarikan chain block kembali berada dalam domain aman.

Pembacaan konservatif terhadap diagram interaksi menunjukkan bahwa setelah retrofit terjadi **peningkatan kapasitas lentur sekitar 34–36% serta peningkatan kapasitas aksial tekan sekitar 23% dibandingkan kondisi aktual**. Peningkatan ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan efektivitas CFRP dalam meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan confinement pada elemen beton bertulang.

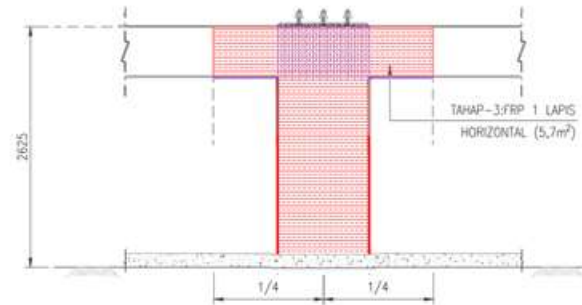
CFRP dipasang untuk perkuatan lentur dan geser dengan tahapan sebagai berikut:



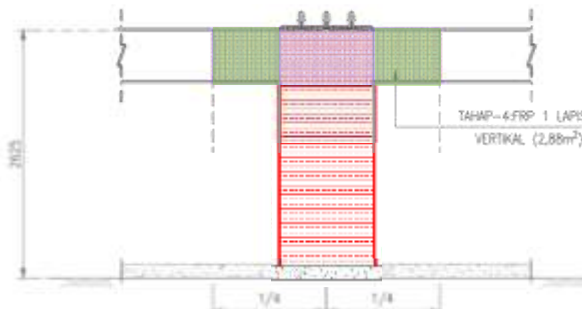
**Gambar 7.** Perkuatan lentur dengan CFRP vertikal pada 8 (delapan) sisi pedestal



**Gambar 8.** Perkuatan geser dengan CFRP wrap mengelilingi pedestal

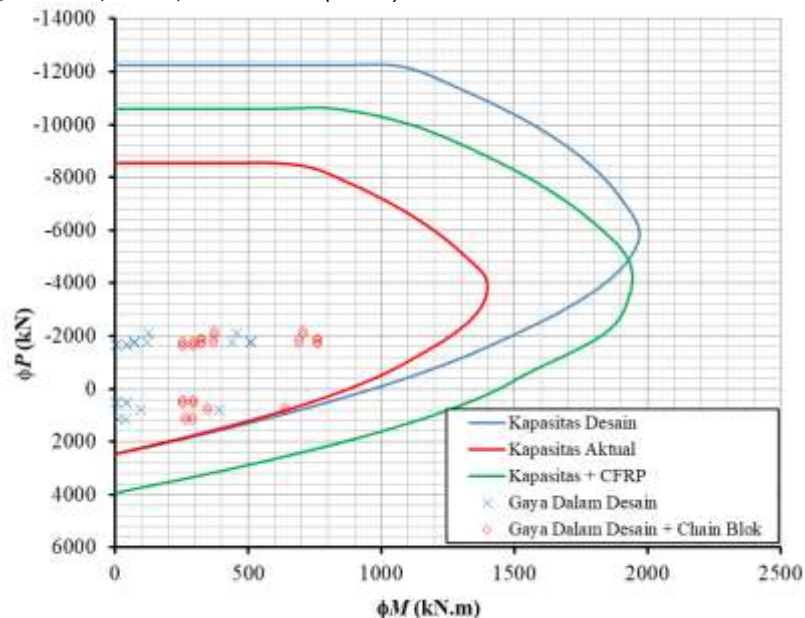


**Gambar 9.** Penambahan CFRP dengan serat searah balok sebagai confined serat vertikal



**Gambar 10.** Penambahan CFRP Warp pada balok

Dengan injeksi, *patching/ grouting* dan penambahan CFRP seperti pada Gambar 7, Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10, kapasitas kolom akan meningkat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram Interaksi Pedestal dan Plot Gaya Dalam Ultimit

Setelah *retrofit* (epoksi + *grouting* + *CFRP*), kurva kapasitas bergeser keluar sehingga seluruh titik gaya termasuk kondisi dengan *chain block* kembali berada dalam domain aman. Pembacaan konservatif diagram menunjukkan peningkatan kapasitas lentur sekitar 36% dan kapasitas aksial tekan sekitar 23% dibanding kondisi aktual. Peningkatan ini sejalan dengan kontribusi *CFRP* pada kapasitas lentur, geser, dan confinement sebagaimana dilaporkan pada studi-studi terdahulu (Najm et al., 2022), (Choi et al., 2021), (Khoeri, 2021).

Tabel 8. Perbandingan Kapasitas Lentur–Aksial Pedestal

Parameter	Rencana	Aktual	Setelah <i>Retrofit</i>	Perubahan sebelum dan sesudah <i>retrofit</i>
$f_c'$ (MPa)	28	22	22.0 + confinement	–
$\phi P_{max}$ (kN)	-12180	-8460	-10480	↑ 23.9%
$\phi M_{max\_}$ (kNm)	1985	1405	1895	↑ 34.9%
Status titik gaya desain	Aman	Aman	Aman	–
Status titik gaya + <i>chain block</i>	Aman	Tidak aman	Aman	Pulih

## KESIMPULAN

Keretakan pedestal dikategorikan sebagai retak struktural berdasarkan lebar dan kedalaman retak. Mutu beton aktual hasil *UPVT* lebih rendah dari asumsi desain awal dan berpengaruh signifikan terhadap kapasitas. Beban sementara saat erection berkontribusi terhadap terlampauinya kapasitas aktual. *Retrofit* menggunakan injeksi epoksi, *grouting non-shrink*, dan *CFRP* efektif mengembalikan serta meningkatkan kapasitas lentur–aksial sehingga seluruh kombinasi gaya berada dalam domain aman.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada **PT. Hesa Laras Cemerlang** <https://hesa.co.id> atas dukungan teknis, pelaksanaan investigasi lapangan, serta pengujian non-destruktif, serta kepada **PT. Consol Indonesia** atas dukungan dan penyediaan data teknis material *CFRP*, epoxy dan *grouting* yang digunakan dalam penelitian ini. Dukungan tersebut sangat berperan dalam terlaksananya evaluasi kerusakan dan kajian *retrofit* yang disajikan dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 440. (2017). *ACI PRC-440.2-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute. American Concrete Institute.
- ACI Committee 562. (2021). *ACI CODE-562-21: Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete*

- Ali-Benyahia, K., Sbartai, Z.-M., Breysse, D., Kenai, S., & Ghrici, M. (2017). Analysis of the single and combined non-destructive test approaches for on-site concrete strength assessment: General statements based on a real case-study. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.004>
- ASTM D695-23. (2023). *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*.
- ASTM International. (2023). *ASTM C597-22: Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete*.
- BIS. (2004). *IS13311 (Part 1 ):1992 (reaffirmed 2004), Non-Destructive Testing of Concrete - Methods of Test, Part 1 Ultrasonic Pulse Velocity*. Bureau of Indian Standards .
- Choi, Y., Kang, J. W., Hwang, T. Y., & Cho, C. G. (2021). Evaluation of residual strength with ultrasonic pulse velocity relationship for concrete exposed to high temperatures. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(9). <https://doi.org/10.1177/16878140211034992>
- El-Refaie, S. A., Ashour, A. F., & Garrity, S. W. (2001). Strengthening of Reinforced Concrete Continuous Beams with CFRP Composites. In *Structural Engineering, Mechanics and Computation* (pp. 1591–1598). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008043948-8/50179-X>
- EN 53452. (2019). *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of tensile adhesion strength (pull-off test)*.
- Karaiskos, G., Deraemaeker, A., Aggelis, D. G., & Hemelrijck, D. Van. (2015). Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method. *Smart Materials and Structures*, 24(11), 113001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/11/113001>
- Khoeri, H. (2021). Pemilihan Metode Perbaikan dan Perkuatan Struktur Akibat Gempa (Studi Kasus pada Bank Sulteng Palu). *Konstruksia*, 12(1), 93. <https://doi.org/10.24853/jk.12.1.93-104>
- Khoeri, H., Isvara, W., Pradana, R., & Sofiana, D. (2024). Formulation of Concrete Compressive Strength Based on Building Age, Density, and Non-Destructive Testing with Ultrasonic Pulse Velocity Tests. *Clean Energy and Smart Technology*, 2(2), 71–80.
- Najm, H. M., Nanayakkara, O., & Sabri, M. M. S. (2022). Destructive and Non-Destructive Evaluation of Fibre-Reinforced Concrete: A Comprehensive Study of Mechanical Properties. *Materials*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/ma15134432>
- Pellegrino, C., & Modena, C. (2006). Fiber-reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams: Experimental study and analytical modeling. *ACI Structural Journal*, 103, 720–728.
- PT. Hesa Laras Cemerlang. (2014). *Hubungan antara Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik dengan Kuat Tekan Beton*.
- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016a). Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022–1027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.158>
- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016b). Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022–1027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.158>

