

ASSESSMENT DAN PERKUATAN STRUKTUR PADA BANGUNAN INDUSTRI 7 LANTAI

Celine Michaella Sutjiadi¹, Tika Harsono², Handoko Sugiharto³, and Daniel Tjandra⁴

ABSTRAK : Penelitian dilakukan pada bangunan X yang merupakan bangunan industri 7 lantai dimana beberapa elemen struktur mengalami kerusakan salah satunya diakibatkan oleh penambahan beban ditiap lantai. *Assessment* struktur dilakukan untuk mengetahui letak dan jenis kerusakan, serta pemilihan metode yang tepat untuk perbaikan dan perkuatan struktur. Setelah itu dilakukan pengumpulan data bangunan, *mapping* kerusakan, dan analisa struktur. Analisa struktur dilakukan dengan 3 permodelan yaitu dengan menggunakan beban awal, dengan menggunakan beban tambahan dan dengan mempertimbangkan kerusakan struktur yang terjadi dilapangan saat mendapat beban tambahan. Penentuan metode perkuatan didapatkan dari pengecekan pola keruntuhan, *strengthening limit*, dan pengecekan terhadap gaya geser. Struktur dengan pola keruntuhan tekan menggunakan perkuatan *steel plate jacketing* dengan *shear connector* sedangkan elemen struktur dengan pola keruntuhan tarik dan memenuhi syarat *strengthening limit* menggunakan perkuatan *Carbon Fiber Reinforced Polymer*. Perbaikan struktur yang retak dilapangan menggunakan metode *grouting*. Hasil evaluasi performa ketiga kondisi struktur didapatkan bahwa deformasi terbesar terjadi pada kondisi struktur yang menggunakan beban tambahan dengan mempertimbangkan kerusakan struktur yang terjadi. Deformasi terbesar terjadi dilantai 7 baik arah x maupun arah y. Nilai simpangan antar lantai pada ketiga kondisi struktur masih berada pada batas aman. Kegagalan struktur setelah diperkuat sudah memenuhi syarat, dimana kapasitas penampang lebih besar daripada beban yang diterima.

KATA KUNCI: *assessment* struktur; perkuatan struktur; *steel plate jacketing*; *fiber reinforced polymer*.

1. PENDAHULUAN

Bangunan yang telah beroperasi cukup lama memungkinkan mengalami penurunan kekuatan struktur. Penurunan kekuatan struktur yang terjadi dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti perubahan kekuatan statis dan dinamis, korosi, penambahan beban berlebih, dan faktor-faktor lainnya. Seperti pada penelitian ini, *existing building* yang merupakan bangunan industri dengan total 7 lantai dimana mengalami kerusakan pada beberapa elemennya. Salah satu penyebab kerusakan tersebut diakibat dari beban *overload* yang perlu diterima struktur. Salah satu tanda yang dapat dilihat secara visual bahwa elemen struktur tersebut mengalami kerusakan yaitu adanya retak pada komponen struktural maupun non struktural. Tanda-tanda umum kerusakan beton lainnya dapat diklasifikasikan seperti *spalling*, *stain*, defleksi struktural yang berlebihan, erosi, dan korosi (Sahafnia, 2018).

Akibat dari kerusakan tersebut, maka perlu dilakukan *assessment* struktur untuk menilai dan mengetahui kondisi struktur yang selanjutnya akan dilanjutkan dengan pemilihan metode perbaikan dan perkuatan untuk meningkatkan kekuatan elemen struktur agar dapat menahan beban yang direncanakan serta memperbaiki kerusakan yang terjadi. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui performa struktur

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416187@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21416197@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, hands@petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, danieljtj@petra.ac.id

bangunan saat menerima beban sesuai dengan desain awal, setelah mendapat beban tambahan yang signifikan, didesain dengan mempertimbangkan kerusakan yang terjadi, dan setelah diberi perkuatan. Direncanakan struktur yang mengalami kerusakan dan kegagalan diperbaiki menggunakan metode *grouting* dan diperkuat menggunakan metode *carbon fiber reinforced polymer* atau *steel plate jacketing* dengan *shear connector*.

2. LANDASAN TEORI

2.1. *Assesment* Struktur

Dalam mempertahankan kekuatan struktur sebuah *existing building* agar tetap berfungsi dalam jangka waktu yang lebih lama, diperlukan *assessment* struktur untuk menilai dan mengetahui kondisi struktur bangunan yang ada. Menurut Melchers (2001), *assessment* struktur diawali dengan melakukan investigasi di lapangan yang kemudian dibuatkan *mapping* kerusakan. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data dan informasi terkait struktur bangunan. Setelah itu, menerapkan skema penilaian dan menyatukan hasil yang didapatkan. Tahapan terakhir dari *assessment* struktur adalah membuat keputusan dari hasil *assessment* yang dilakukan.

2.2. Pembebanan Struktur

Beban yang bekerja pada permodelan struktur bangunan ini adalah beban gravitasi dan beban gempa (beban dinamis). Beban gravitasi yang diperhitungkan adalah beban sendiri struktur dan beban hidup pada bangunan industri. Sedangkan, untuk beban gempa dilakukan dengan metode analisis gempa dinamik berupa analisis Respon Spektrum. Analisis dinamik dilakukan pada perancangan struktur bangunan tingkat tinggi atau struktur dengan bentuk atau konfigurasi yang tidak teratur. Analisis ini mengacu pada peraturan SNI gempa yaitu SNI 1726:2012.

2.3. Metode Perkuatan dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

Fiber Reinforced Polymer (FRP) telah digunakan untuk memperkuat kolom beton bertulang. Penggunaan FRP telah terbukti meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas kolom yang ingin diperkuat (Hadi, Pham, & Lei, 2013). Perkuatan dilakukan dengan membungkus struktur beton menggunakan serat fiber dengan lebar dan ketebalan yang telah ditentukan pada sekitar elemen struktur. Sebelum menghitung perkuatan menggunakan FRP, kapasitas struktur *existing* diharapkan mampu menahan beban dengan batas tertentu. Pengecekan batasan ini berdasarkan acuan dari ACI 440.2R-17 pasal 9.2, seperti pada persamaan berikut:

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1.1S_{DL} + 0.75S_{LL})_{new} \quad (1)$$

Perkuatan kapasitas geser akan terpenuhi jika kapasitas geser desain (ϕV_n) lebih besar dibandingkan beban terfaktor *ultimate* (V_u).

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2)$$

Dimana kapasitas geser dikalikan dengan faktor reduksi ψ_f karena adanya sistem FRP. Untuk mendapatkan nilai ϕV_n digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (3)$$

Faktor reduksi tambahan yang direkomendasikan untuk kapasitas geser dengan perkuatan FRP untuk 3-*sided* (*U-wrap*) atau 2 *sides* adalah 0,85. Sedangkan faktor reduksi untuk *completely wrapped members* adalah 0,95. Penelitian yang dilakukan oleh Khalifa, Gold, Nanni, & Abdel-Aziz (1998) mendapatkan hasil bahwa arah serat dan pola retak yang diasumsikan berdasarkan pada penggunaan sistem FRP terhadap kapasitas geser. Maka dari itu, nilai V_f dijabarkan sebagai berikut:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (4)$$

2.4. Metode Perkuatan Menggunakan Cara Konvensional

Salah satu cara perbaikan konvensional adalah dengan penambahan profil baja berupa profil kanal, profil WF atau plat baja. Penambahan profil baja pada beton bertulang akan meningkatkan kekuatan dalam menahan beban yang bekerja. Pada Peraturan Baja Indonesia SNI 1729:2015, didefinisikan kapasitas

lentur penampang terbesar / *ultimate* sebagai perkalian dari nilai tegangan leleh (f_y) dengan modulus plastis penampang untuk sumbu-x (Z_x).

$$M_n = M_p = f_y \times Z_x \quad (5)$$

Untuk mendapatkan nilai modulus plastis penampang yang dijadikan sebagai acuan pemilihan ukuran plat baja yang akan digunakan dijabarkan sebagai berikut:

$$Z_x = \frac{bd^2}{6} \quad (6)$$

Kekuatan geser balok beton bertulang dengan perkuatan plat baja didapatkan dengan menambahkan kuat geser dari beton, kuat geser dari tulangan geser, serta kuat geser dari plat baja eksternal (Adhikary & Mutsuyoshi, 2006). Kuat geser nominal balok dengan plat baja adalah sebagai berikut:

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (7)$$

Diperlukan sambungan antara balok beton dengan plat baja berupa penghubung geser (*shear connector*) sehingga tidak terjadi slip. Untuk mencari jumlah penghubung geser yang diperlukan, gaya geser horizontal dibagi dengan kuat nominal dari satu penghubung geser. Perumusan dapat dilihat sebagai berikut:

$$N = \frac{Vh}{Q_n} \quad (8)$$

Gaya geser horizontal (Vh) bekerja ada pada daerah yang dibatasi oleh titik-titik momen maksimum dan momen nol. Suatu bentangan balok mempunyai momen tumpuan (negatif) dan lapangan (positif), dimana masing-masing daerah tersebut mempunyai gaya geser horizontal yang berbeda. Perbedaan tersebut selanjutnya akan dibahas pada metodologi penelitian. Kekuatan geser nominal satu angkur *steel headed stud* yang ditanam pada balok beton *solid* tidak boleh lebih besar dari syarat berikut:

$$Q_n \leq R_g R_p A_{sa} F_u \quad (9)$$

Dimana, A_{sa} adalah luas penampang dari angkur *steel headed stud* dan F_u adalah kekuatan tarik minimum angkur *steel headed stud*. Terdapat koefisien untuk menghitung efek *group stud* (R_g) dan faktor efek posisi untuk *shear stud* (R_p) yang nilainya diambil dari SNI 1729:2015 pasal I8.2a. Faktor tersebut diambil pada kondisi balok tanpa dek.

2.5. Perkuatan Menggunakan Metode Grouting

Grouting adalah proses dimana suatu cairan campuran semen dan air diinjeksikan dengan tekanan kedalam rongga, pori, rekahan dan retakan batuan yang selanjutnya cairan tersebut dalam waktu tertentu menjadi padat secara fisika maupun kimiawi. Metode ini adalah sesuatu cara perbaikan retak beton yang bertujuan untuk mengisi ruang kosong agar menjadi satu kesatuan kembali (homogen). Material *grouting* yang digunakan yaitu berbahan dasar semen. Ada berbagai macam merek *grouting* yang ada dipasaran, salah satunya Sika *Grout*.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Informasi Data Bangunan

Bangunan yang akan diteliti merupakan bangunan yang sudah ada (*existing building*). Dimana bangunan tersebut merupakan bangunan gedung 7 lantai memiliki luas 36 x 42 m² dengan tinggi 33.3 meter. Struktur pada lantai 2, 3, 4, dan 5 memiliki ketinggian yang sama yaitu 5 meter, sedangkan tinggi lantai 6 adalah 3 meter dan tinggi lantai 6.5 menuju ke lantai atap adalah 4 meter. Mutu beton yang digunakan adalah K-225 ($f_c' = 18.68$ MPa), mutu baja adalah 240 MPa, mutu tulangan baja ulir adalah 400 MPa, dan mutu tulangan baja polos adalah 300 MPa.

3.2. Modeling Struktur

Dilakukan 3 permodelan struktur menggunakan program SAP2000 yaitu pada kondisi struktur pertama, struktur dimodelkan dan diberikan beban awal sesuai dengan yang direncanakan, untuk kondisi struktur kedua, struktur diberi beban tambahan sesuai yang terjadi di lapangan, dan pada kondisi struktur ketiga, kerusakan yang terjadi di lapangan dimodelkan ke dalam program dengan mereduksi inersia elemen struktur menggunakan acuan SNI 2847:2013. Beban tambahan dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Beban Tambahan

	Initial Load (T)	Current Load (T)
Lantai 2	17.25	66.92
Lantai 3	23.82	41.87
Lantai 4	108.17	236.89
Lantai 5	56.08	94.15
Lantai 6	40.4	78.35
Lantai 6.5	15.4	33.4
Lantai 7	16.2	98

3.3. Pengecekan Struktur

Pengecekan pola keruntuhan dilakukan untuk mengetahui elemen struktur yang mana saja mengalami pola keruntuhan tekan (*over-reinforced*). Dimana elemen struktur dengan pola keruntuhan tekan tidak dapat menggunakan metode perkuatan *fiber reinforced polymer*. Pengecekan pola keruntuhan balok menggunakan persamaan berikut:

$$0.75 \left[\frac{0.85f_c'}{f_y} \beta_1 \left(\frac{600}{600+f_y} \right) \right] \quad (10)$$

Dimana jika persamaan tersebut lebih besar daripada A_s/bd maka pola keruntuhan tersebut adalah keruntuhan tarik, tetapi jika persamaan tersebut lebih kecil daripada A_s/bd maka pola keruntuhan tersebut adalah keruntuhan tekan. Selanjutnya, diperlukan pengecekan *strengthening limit* untuk menentukan batas perkuatan yang dapat diterima, agar mencegah runtuhnya elemen struktur jika ikatan atau kegagalan lain yang terjadi akibat kerusakan atau penyebab lain dari sistem FRP. Pengecekan batasan ini berdasarkan acuan dari ACI 440.2R-17 pasal 9.2. Dimana persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\phi R_n \geq 1.1 \text{ dead load} + 0.75 \text{ live load} \quad (11)$$

Setelah itu, dilakukan pengecekan geser balok menggunakan persamaan berikut ini:

$$V_u < \left[\phi V_c + \phi \left(\frac{2\sqrt{f_c'}}{3} \right) b_w d \right] \quad (12)$$

Dari hasil pengecekan diatas jika salah satu pengecekan tidak memenuhi syarat, maka perkuatan akan menggunakan cara konvensional dan jika syarat diatas terpenuhi maka perkuatan akan menggunakan *carbon fiber reinforced polymer*.

3.4. Perkuatan Struktur Menggunakan *Fiber Reinforced Polymer*

Perkuatan yang dilakukan pada struktur kolom berupa perkuatan *joint shear*. Perhitungan jumlah lapisan FRP yang akan digunakan menggunakan persamaan berikut:

$$V_f = \frac{V_s}{\psi_f} \quad (13)$$

Dimana V_f adalah kuat geser yang disumbang FRP, V_s adalah gaya geser ultimate, dan ψ_f adalah faktor reduksi. Dan persamaan akan dilanjutkan dengan mencari luas FRP yang akan digunakan untuk mengetahui jumlah lapisan FRP yang dibutuhkan.

$$A_f = \frac{V_f}{\epsilon_f E_f d_f} \quad (14)$$

$$n = \frac{A_f}{2t_f} \quad (15)$$

Dimana ϵ_f adalah regangan efektif FRP, E_f adalah modulus elastisitas, dan d_f adalah tinggi penampang.

3.5. Perkuatan Struktur Menggunakan *Steel Plate Jacketing*

Acuan yang digunakan untuk perkuatan lentur menggunakan *steel plate* adalah Peraturan Baja Indonesia SNI 1729:2015, yang dapat dilihat pada landasan teori. Menurut Adhikary & Mutsuyoshi (2006), kuat geser yang dihasilkan oleh plat baja eksternal (V_p) didapatkan dari perkalian antara faktor modifikasi (κ), tegangan leleh plat baja (f_{yp}), dengan tinggi plat (h_p) serta ketebalan plat (t_p).

$$V_p = \frac{1}{3} \kappa f_{yp} h_p t_p \quad (16)$$

Plat baja tidak sepenuhnya komposit dengan beton seperti tulangan geser internal (sengkang), sehingga plat tidak dapat berfungsi maksimal. Oleh karena itu, diperlukan faktor modifikasi (κ) yang dapat dihitung pada persamaan berikut:

$$\kappa = 0.68 - 0.27\rho_v + 0.28\left(\frac{h_p}{h}\right) - 1.95\left(\frac{t_p}{b_w}\right) - 0.007\left(\frac{f_{yp}}{f'_c}\right) \quad (17)$$

Dimana, ρ_v adalah rasio tulangan geser, h adalah tinggi balok beton, b_w adalah lebar balok beton, dan f'_c adalah kuat tekan beton.

3.6. Penghubung Geser (*Shear Connector*)

Gaya geser horizontal bekerja pada daerah yang dibatasi oleh titik-titik momen maksimum dan momen nol. Untuk daerah momen positif, gaya geser horizontal (Vh) diambil nilai terkecil dari $0,85 f'_c A_c$ dan $f_y A_s$. Dimana, A_c adalah luas penampang beton dan A_s adalah luas penampang melintang baja. Untuk daerah momen negatif, gaya geser horizontal (Vh) diambil nilai $f_{ysr} A_{sr}$. Dimana, f_{ysr} adalah tegangan leleh baja tulangan dan A_{sr} adalah luas baja tulangan longitudinal pada beton. Kekuatan geser nominal satu angkur yang ditanam pada suatu balok beton *solid* ditentukan sebagai berikut:

$$Q_n = 0,5 A_{sa} \sqrt{f'_c E_c} \quad (18)$$

$$E_c = 0,043 W_c^{1,5} \sqrt{f'_c} \quad (19)$$

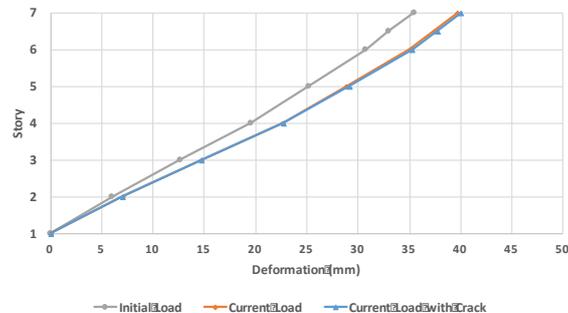
Dimana, A_{sa} adalah luas penampang *stud*, E_c adalah modulus elastisitas beton, dan W_c adalah berat beton per satuan volume. Ada pula persyaratan jarak minimum dan jarak maksimum antar *shear connector*. Untuk spasi pusat ke pusat minimum sumbu transversal yaitu harus lebih besar atau sama dengan empat kali diameter *stud*. Untuk spasi pusat ke pusat sumbu longitudinal, yaitu:

$$6d_{stud} \leq S \leq 8t_{balok} \text{ atau } 900 \text{ mm} \quad (20)$$

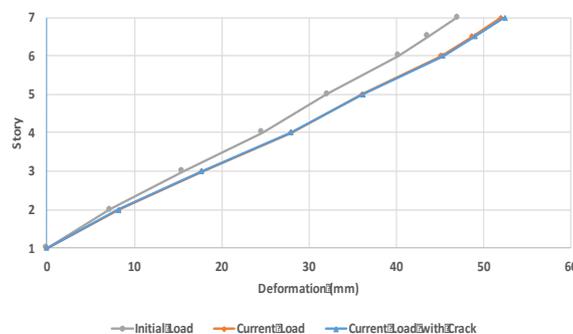
4. HASIL DAN ANALISA

4.1. Hasil *Global Deformation*

Analisa ketiga kondisi struktur didapatkan bahwa hasil deformasi terbesar terjadi pada permodelan struktur yang mempertimbangkan atau memperhitungkan kerusakan struktur yang terjadi. Dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**, hasil deformasi yang terjadi pada ketiga kondisi struktur. Pengecekan terhadap nilai simpangan antar lantai pada ketiga kondisi berada pada batas aman.

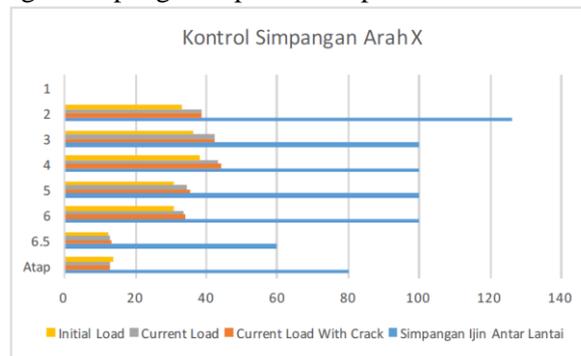


Gambar 1. Deformasi Arah X

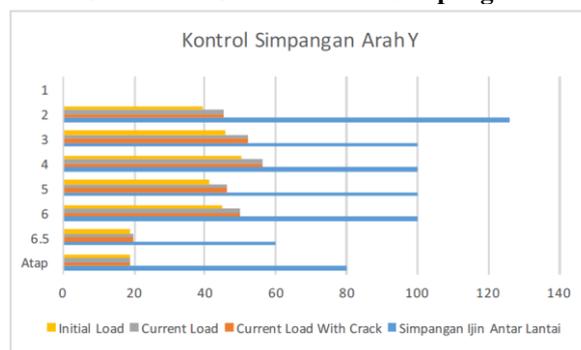


Gambar 2. Deformasi Arah Y

Simpangan merupakan syarat kontrol kinerja struktur berdasarkan kondisi kinerja pada batas ultimit. Nilai simpangan yang ditinjau adalah nilai terbesar dari hasil analisa struktur pada program dalam arah x dan arah y. Hasil perhitungan simpangan dapat dilihat pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.



Gambar 3. Grafik Kontrol Simpangan



Gambar 4. Grafik Kontrol Simpangan

4.1. Analisa Perkuatan *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

Didapatkan hasil bahwa terdapat 2 struktur balok dan 55 struktur kolom yang mengalami kegagalan struktur. Kegagalan yang terjadi diakibatkan karena adanya syarat yang tidak terpenuhi yaitu syarat *strong column weak beam*, *joint shear*, dan kapasitas geser akibat gaya geser dan torsi. Kegagalan *strong column weak beam* dikarenakan jumlah momen nominal kolom berdasarkan tulangan terpasang yang bertemu pada sebuah *joint* tidak lebih besar dari 1,2 kali jumlah momen nominal balok yang bertemu pada sebuah *joint* yang sama. Rekapitulasi data dari hasil analisa struktur yang dilakukan pada program dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tabel 3. Hasil Analisa Struktur Balok dengan Mempertimbangkan Kerusakan yang Terjadi

Lantai	Nama	Code	Balok				Keterangan	
			V _u (kN)	M _u (kNm)	Phi V _n (kN)	Phi M _n (kNm)	Phi V _n ≥ V _u	Phi M _n ≥ M _u
2	947	B6	246.842	29.532	232.614	263.050	NOT OK	OK
4	116	G9	617.603	600.852	118.699	732.638	NOT OK	OK

Setelah mendapatkan hasil analisa struktur yang perlu diperkuat dengan CFRP, didapatkan bahwa elemen struktur kolom saja yang dapat diperkuat menggunakan metode ini. Untuk rekapitulasi data perkuatan untuk kolom dapat dilihat pada **Tabel 5**.

4.2. Analisa Perkuatan *Steel Plate Jacketing*

Perkuatan balok yang dilakukan menggunakan metode pelapisan plat baja (*steel plate*) terhadap balok *existing*. Diambil data gaya M_u dan V_u serta M_n dan V_n *existing* dari program SAP2000, untuk dilihat perbandingan beban *ultimate* dengan kapasitasnya seperti pada **Tabel 6**.

Analisa perkuatan geser balok anak B6 dan balok induk G9 dengan *steel plate* dilakukan dengan pemasangan plat pada kedua sisi balok. Perkuatan geser dengan plat baja dapat dihitung seperti pada **Tabel 7**.

Tabel 4. Hasil Analisa Struktur Kolom dengan Mempertimbangkan Kerusakan yang Terjadi

Lantai	Nama	Code	Kolom								Vu (kN)	Phi Vc (kN)	Keterangan
			Mc/Mb		Mc/Mb ≥ 1.2		Mc/Mb		Mc/Mb ≥ 1.2				
			Clockwise		Counter Clockwise		Counter Clockwise		Counter Clockwise				
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y			
6,5	185	7-C3B	0.587	0.587	NOT OK	NOT OK	0.330	0.330	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK
	49	7-C3B	0.504	0.585	NOT OK	NOT OK	0.504	0.326	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK
	98	7-C3B	0.921	1.235	NOT OK	OK	0.582	1.235	NOT OK	OK	1472.622	1317.803	NOT OK
	39	6-C3A	1.194	2.387	NOT OK	OK	1.194	2.387	NOT OK	OK	164.326	164.326	OK
40	6-C3A	1.189	2.379	NOT OK	OK	1.189	2.379	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
41	6-C3A	1.190	2.379	NOT OK	OK	1.190	2.379	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
42	6-C3A	1.191	2.382	NOT OK	OK	1.191	2.382	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
43	6-C3A	1.191	2.382	NOT OK	OK	1.191	1.637	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
281	6-C3A	1.641	1.194	OK	NOT OK	2.389	1.194	OK	NOT OK	736.311	1317.803	OK	
283	6-C3	0.932	0.740	NOT OK	NOT OK	0.808	0.468	NOT OK	NOT OK	1227.185	1317.803	OK	
284	6-C3	0.988	0.737	NOT OK	NOT OK	0.988	0.466	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
285	6-C3	0.987	0.987	NOT OK	NOT OK	0.987	0.987	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
287	6-C3	0.469	0.994	NOT OK	NOT OK	0.742	0.994	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
288	6-C3	0.736	0.629	NOT OK	NOT OK	0.465	0.465	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
282	6-C3A	2.391	0.974	OK	NOT OK	2.391	1.196	OK	NOT OK	490.874	1317.803	OK	
273	6-C3	0.991	0.991	NOT OK	NOT OK	0.991	0.991	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
274	6-C3	0.983	0.463	NOT OK	NOT OK	0.983	0.734	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
275	6-C3A	2.384	0.889	OK	NOT OK	2.384	0.562	OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
612	6-C3A	1.189	2.379	NOT OK	OK	1.189	2.379	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
615	6-C3A	1.192	2.384	NOT OK	OK	1.192	2.384	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
618	6-C3A	2.349	0.724	OK	NOT OK	2.349	1.397	OK	OK	490.874	1317.803	OK	
264	5-C3	1.735	1.397	OK	OK	1.735	1.178	OK	NOT OK	1267.783	1317.803	OK	
265	5-C3	1.689	1.366	OK	OK	1.689	1.147	OK	NOT OK	1267.783	1317.803	OK	
354	4-C2	1.910	0.955	OK	NOT OK	1.910	0.955	OK	NOT OK	490.874	1317.803	OK	
132	4-C2	0.981	0.793	NOT OK	NOT OK	0.981	0.793	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
133	4-C2	0.983	0.800	NOT OK	NOT OK	0.983	0.983	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
357	4-C2	0.985	0.802	NOT OK	NOT OK	0.985	0.985	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
358	4-C2	1.904	0.776	OK	NOT OK	1.904	0.776	OK	NOT OK	490.874	1317.803	OK	
1108	4-C2	0.947	1.893	NOT OK	OK	0.947	1.893	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
134	4-C2	0.950	1.899	NOT OK	OK	0.950	1.899	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
1113	4-C2	0.948	1.895	NOT OK	OK	0.948	1.895	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
323	3-C2	1.128	1.128	NOT OK	NOT OK	1.128	1.128	NOT OK	NOT OK	2023.169	1317.803	NOT OK	
65	3-C2	1.135	1.135	NOT OK	NOT OK	1.135	1.100	NOT OK	NOT OK	2023.043	1317.803	NOT OK	
945	3-C2	1.123	1.123	NOT OK	NOT OK	1.123	1.123	NOT OK	NOT OK	2022.754	1317.803	NOT OK	
1086	3-C2	0.890	1.657	NOT OK	OK	0.890	1.657	NOT OK	OK	1294.393	1317.803	OK	
69	3-C2	0.898	1.673	NOT OK	OK	0.898	3.039	NOT OK	OK	1294.093	1317.803	OK	
1094	3-C2	0.893	1.664	NOT OK	OK	0.893	3.022	NOT OK	OK	1294.093	1317.803	OK	
904	2-C1	2.053	0.590	OK	NOT OK	1.091	0.618	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
1082	2-C1	2.059	0.674	OK	NOT OK	1.095	0.675	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
1146	2-C1	1.125	0.668	NOT OK	NOT OK	2.116	0.676	OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
1154	2-C1	2.114	0.687	OK	NOT OK	1.124	0.675	NOT OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
1187	2-C1	1.030	1.030	NOT OK	NOT OK	1.939	OK	OK	OK	381.748	1317.803	OK	
1189	2-C1	1.934	1.028	OK	NOT OK	1.028	1.934	NOT OK	OK	381.748	1317.803	OK	
790	I-CIA	0.692	0.692	NOT OK	NOT OK	0.449	0.486	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1017	I-CIA	0.695	0.695	NOT OK	NOT OK	0.550	0.600	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1116	I-CIA	1.047	0.683	NOT OK	NOT OK	1.369	0.683	OK	NOT OK	381.748	1317.803	OK	
1118	I-CIA	0.693	0.693	NOT OK	NOT OK	0.693	0.693	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1122	I-CIA	0.699	0.699	NOT OK	NOT OK	0.699	0.699	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1127	I-CIA	0.713	0.713	NOT OK	NOT OK	0.713	0.713	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1134	I-CIA	0.690	0.690	NOT OK	NOT OK	0.690	0.690	NOT OK	NOT OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1156	I-CIA	1.018	1.018	NOT OK	NOT OK	1.915	1.915	OK	OK	381.748	1317.803	OK	
1166	I-CIA	0.681	1.043	NOT OK	NOT OK	1.962	1.962	NOT OK	OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1172	I-CIA	0.679	1.040	NOT OK	NOT OK	0.679	1.957	NOT OK	OK	1472.622	1317.803	NOT OK	
1175	I-CI	0.689	1.055	NOT OK	NOT OK	0.689	1.964	NOT OK	OK	1472.622	1317.803	NOT OK	

Tabel 5. Hasil Perhitungan Jumlah Lapisan FRP

Lantai	Nama	Jumlah Lapisan FRP
6,5	185	2
	49	2
	98	2
6	287	2
	288	2
3	923	7
	65	7
	945	7
1	790	2
	1017	2
	1118	2
	1122	2
	1127	2
	1134	2
	1166	2
1172	2	
1175	2	

Tabel 6. Perbandingan Beban dan Kapasitas

Balok	Lantai	Kode	Existing		Mu ≤ φMn	Existing		Vu ≤ φVn
			Mu (kNm)	φMn (kNm)		Vu (kN)	φVn (kN)	
B6	2	947	29.532	263.050	OK	246.842	232.614	NOT OK
G9	4	116	600.852	732.638	OK	617.603	118.699	NOT OK

Tabel 7. Hasil Perhitungan Kebutuhan Steel Plate

Kode	h plat (mm)	t plat (mm)	fy plat (MPa)	A plat (mm ²)	ρv	κ	φVp (kN)	φVn SAP (kN)	φVn (kN)
B6	200	6	240	1200	0.007	0.653	47.047	232.614	279.661
G9	520	25	240	13000	0.011	0.656	511.579	118.699	630.278

Analisa penghubung geser (*shear connector*) balok anak B6 dan balok induk G9 dengan *steel headed stud* pada kedua sisi balok. Gaya geser horizontal pada momen positif dan momen negatif dapat dihitung seperti pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Gaya Geser Horizontal

Kode	L (mm)	L efektif (mm)	Ac (mm ²)	f _c (MPa)	V' _v =0.85 f _c Ac (kN)	V' _v =fy As (kN)	V _{h+} (kN)	d Tul. Utama	Fysr (MPa)	Asr (mm ²)	V' _v =Fysr Asr (kN)	V _{h-} (kN)
B6	2000	1700	850000	18.68	13496.30	288	288	25	400	490.87	196.35	196.35
G9	6000	5275	3692500	18.68	58629.52	3120	3120	25	400	490.87	196.35	196.35

Jumlah penghubung geser pada momen positif dan momen negatif, dihitung seperti pada **Tabel 9**.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Jumlah Shear Connector

Kode	Ec (MPa)	d stud (mm)	Asa (mm ²)	Qn (kN)	Rg	Rp	Fu (MPa)	Rg Rp Asa Fu	Cek	Daerah Vh+		Daerah Vh-	
										N	N stud	N	N stud
B6	21851.1	12	84.3	26.93	1	1	420	35.41	OK	18.23	19.00	7.29	8.00
G9	21851.1	20	245	78.26	1	1	420	102.90	OK	6.27	7.00	2.51	3.00

5. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, telah dilakukan *assessment* struktur dan kekuatan struktur. Kesimpulan yang didapatkan adalah:

1. Deformasi terbesar terjadi pada permodelan struktur ketiga pada lantai 7 sebesar 40.078 mm dalam arah x dan 52.393 mm dalam arah y.
2. Nilai simpangan antar lantai pada ketiga kondisi struktur masih pada batas aman.
3. Kolom yang mengalami kegagalan struktur akibat tidak terpenuhinya syarat *joint shear* menggunakan metode kekuatan *carbon fiber reinforced polymer*. Sedangkan untuk balok menggunakan metode kekuatan *steel plate jacketing*.
4. Perkuatan pada kolom menggunakan metode *carbon fiber reinforced polymer* berhasil dilakukan sehingga dapat menggunakan jumlah lapisan yang telah diperhitungkan.
5. Perkuatan pada balok B6 dan G9 menggunakan metode *steel plate* dengan *shear connector* berhasil dilakukan sehingga dapat digunakan ukuran plat baja yang telah diperhitungkan.

6. DAFTAR REFERENSI

- ACI Committee 440. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Adhikary, B. B., & Mutsuyoshi, H. (2006). Shear Strengthening of RC Beams with Web-Bonded Continuous Steel Plates. *Construction and Building Materials*, 20, 296-307.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, SNI 1726–2012. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, SNI 2847–2013. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, SNI 1729–2015. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Hadi, M. N. S., Pham, T. M., & Xu, Lei. (2013). New Method of Strengthening Reinforced Concrete Square Columns by Circularizing and Wrapping with Fiber-Reinforced Polymer or Steel Straps. *Journal of Composites for Construction*, 17(2), 229–238.

- Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., & Abdel-Aziz, M. I. (1998). Contribution of Externally Bonded FRP to the Shear Capacity of RC Flexural Members. *Journal of Composites for Construction*, 2(4), 195–202.
- Melchers, R. E. (2001). Assessment of Existing Structures-Approaches and Research Needs. *Journal of Structural Engineering*, 127(4), 406-411.
- Sahafnia, M. (2018). *Concrete Structures Durability and Repair*. Master's Thesis, Kansas State University, Manhattan.