

DESAIN PERKUATAN STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG AKIBAT PERUBAHAN FUNGSI DAN UMUR BANGUNAN MENGGUNAKAN CFRP SHEET

Muttaqin Hasan¹, Mahlil² dan Azzaki Mubarak³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111

email: muttaqin@unsyiah.ac.id; mahlil.civ05@gmail.com; azzakimubarak12@gmail.com

Abstract: *The Aceh Teachers Association Office Building in the Aceh Civil Service Agency Office wants to be changed into the Archive Building, so that the required live load becomes greater than the design live load. In addition, the age of the building is 30 years, which caused the degradation of the material strength in its structures. Changing the standard of earthquake resistant design of building structures from SNI 03-1726-1989 (standard at the time of design) to SNI 1726:2012 caused the earthquake load acting on the building structures to become greater. Therefore, the structures of the building need to be strengthened so that it can serve the load acting at the moment. For this purpose, the measurements of structural elements (i.e. first story columns, second story columns, floor beams, slab, and ring beams) dimensions as well as compressive strength tests have been conducted. The number of reinforcing bars as well as their arrangements and diameters in the structural elements were measured using a profometer. Based on the results of these measurements and tests, an analysis is carried out to obtain the design strengths of first story columns, second story columns, floor beams, slab, and ring beams. Based on the dead load, live load and earthquake load working at the moment, a structural analysis is also carried out to obtain the required strength of the structural elements. The analysis results show that the building structure elements are not able to serve the current working load, therefore the structure is strengthened. Structural strengthening is designed by using an externally wrapping system of a layer 1.2 mm thick Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheet material. After structural strengthening, the structural elements are strong enough to serve the working load.*

Keywords : *structure strengthening, CFRP sheet, design strength, required strength*

Abstrak: *Gedung Kantor Ikatan Guru Aceh pada Kantor Badan Kepegawaian Aceh ingin dirubah fungsinya menjadi Gedung Arsip, sehingga beban hidup yang akan bekerja menjadi lebih besar dari beban hidup desain. Disamping itu, gedung tersebut telah berumur 30 tahun, sehingga sudah terjadi degradasi kekuatan sebagian material pembentuk strukturnya. Berubahnya standar perencanaan struktur bangunan tahan gempa dari SNI 03-1726-1989 (standar pada saat desain) menjadi SNI 1726:2012 menyebabkan beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan tersebut menjadi lebih besar. Oleh karena itu, struktur gedung tersebut perlu diperkuat sehingga mampu melayani beban yang bekerja pada saat ini. Untuk maksud ini, maka telah dilakukan pengukuran dimensi elemen struktur dan pengujian kuat tekan beton pada elemen struktur kolom lantai satu, kolom lantai dua, balok lantai, pelat lantai dan ring balok menggunakan hammer test. Jumlah tulangan, arrangement tulangan serta diameter tulangan pada elemen struktur tersebut diukur menggunakan alat profometer. Berdasarkan hasil pengukuran dan pengujian tersebut dilakukan analisis untuk mendapatkan kekuatan tersedia dari balok lantai, pelat lantai, ring balok dan kolom. Berdasarkan beban yang bekerja pada saat ini, juga dilakukan analisis struktur untuk mendapatkan kekuatan perlu dari elemen struktur tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur bangunan tersebut tidak mampu melayani beban yang bekerja saat ini, sehingga dilakukan perkuatan struktur. Perkuatan struktur didesain dengan cara menggunakan externally wrapping system menggunakan material Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheet setebal 1,2 mm sebanyak satu lapis. Setelah dilakukan perkuatan struktur, elemen struktur tersebut sudah cukup kuat melayani beban yang bekerja.*

Kata kunci : perkuatan struktur, CFRP sheet, kekuatan tersedia, kekuatan perlu.

1. PENDAHULUAN

Perkuatan struktur beton bertulang biasanya dilakukan karena sudah terjadi degradasi kekuatan material beton atau baja tulangan karena faktor usia bangunan dan pengaruh

lingkungan [1], [2]. Faktor-faktor tersebut bisa menyebabkan retak-retak pada material beton dan korosi pada baja tulangan [3],[4].

Perkuatan struktur juga dilakukan untuk meningkatkan

kemampuannya dalam menahan gempa, karena ada riwayat gempa kuat yang terjadi selama umur rencana yang melebihi beban gempa desain [5]–[7]. Hal ini biasanya diikuti dengan perubahan standar beban gempa yang perlu diperhitungkan dalam mendesain struktur bangunan. Perubahan fungsi bangunan yang menyebabkan beban hidup menjadi lebih besar dari beban hidup rencana juga merupakan salah satu faktor yang memerlukan perkuatan struktur [8]. Faktor lelah (*fatigue*) dari material akibat beban yang bekerja berulang-ulang, walaupun bebannya masih jauh lebih kecil dari kapasitas struktur juga bisa menyebabkan degradasi kekuatan material yang memerlukan perkuatan struktur [9]–[11].

Menurut [8] salah satu metode perkuatan struktur adalah dengan menggunakan *fiber reinforced polymer* (FRP) sheet yang dilekatkan pada bagian luar elemen struktur dengan menggunakan epoxy resin. Salah satu jenis FRP adalah yang terbuat dari bahan karbon yang sering disebut dengan *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP). Material CFRP ini mempunyai kuat tarik yang sangat tinggi dan bersifat elastis sampai titik putusnya [12].

Perkuatan lentur balok dan pelat beton bertulang dengan CFRP sheet dapat dilakukan dengan cara melekatkan CFRP sheet pada bagian serat terluar tarik beton, sehingga dapat memberikan gaya tarik yang besar pada bagian itu, sehingga kekuatan lentur balok dan pelat dapat meningkat. Kekuatan lentur balok dan pelat beton bertulang yang diperkuat dengan CFRP sheet dihitung dengan keseimbangan gaya-gaya dan momen yang bekerja pada penampang balok atau pelat [13], [14].

Perkuatan geser balok beton bertulang dapat dilakukan dengan melekatkan CFRP sheet pada badan balok dalam arah vertikal ataupun miring dengan jarak tertentu sesuai kebutuhan. Besarnya kekuatan geser balok yang diperkuat dengan CFRP sheet ditentukan berdasarkan rumus-rumus empirik yang didapat dari sejumlah penelitian eksperimental [15]–[17].

Peningkatan gaya aksial tekan kolom beton bertulang dapat dilakukan dengan membungkus kolom tersebut dengan CFRP sheet, sehingga memberikan efek kekangan pada beton di dalamnya. Kekangan ini menyebabkan kuat tekan dan regangan ultimit beton meningkat, sehingga menyebabkan pen-

ingkatan kekuatan kolom dalam menahan beban tekan sentris [18]–[21]. Membungkus elemen struktur dengan CFRP sheet juga bisa meningkatkan kekuatan elemen struktur yang memiliki kombinasi gaya aksial tekan dan lentur [19], [20], [22]–[30].

Gedung Kantor Ikatan Guru Aceh yang terletak dalam Kompleks Perkantoran Kantor Badan Kepegawaian Aceh (BKA) ingin dialihfungsikan oleh Pemerintah Aceh menjadi Gedung Arsip BKA. Oleh karena itu, beban hidup yang akan dilayani oleh lantai gedung tersebut yang semula sebesar 2,5 kN/m² menjadi 4,0 kN/m² [31], [32]. Disamping itu umur bangunan yang sudah mencapai 30 tahun kemungkinan telah menyebabkan degradasi kekuatan sebagian material pembentuk strukturnya. Berubahnya standar perencanaan bangunan tahan gempa dari [33] pada saat dilakukan desain dan konstruksi bangunan menjadi [34] pada saat ini telah menyebabkan aturan yang mengatur analisis beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan ini berubah. Oleh karena itu, maka perlu dilakukan perkuatan struktur bangunan ini disamping melakukan rehabilitasi aspek arsitekturalnya.

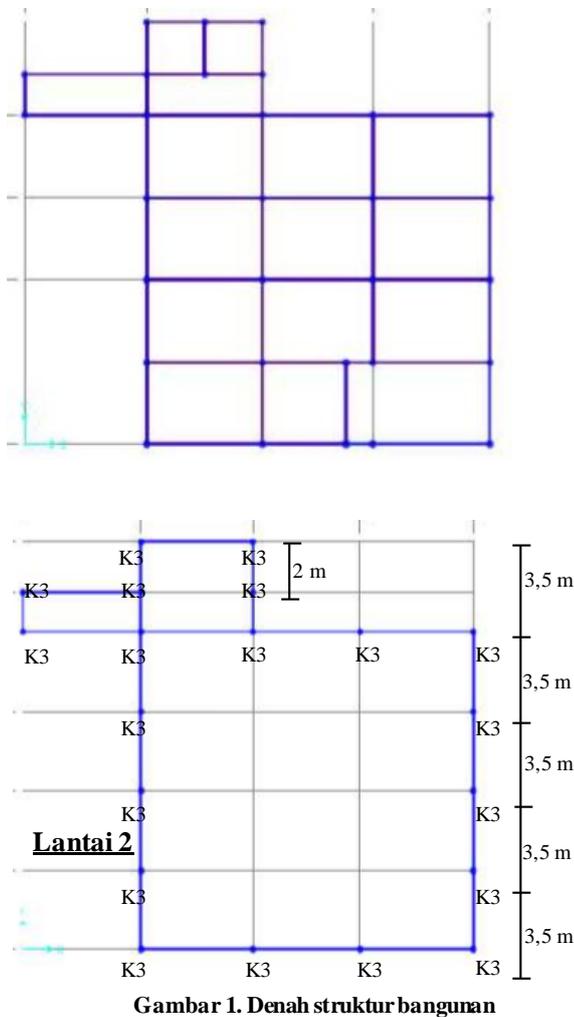
Artikel ini memaparkan desain perkuatan struktur bangunan Gedung BKA dengan menggunakan CFRP sheet. Bagian-bagian yang diperkuat adalah bagian-bagian struktur kolom, balok lantai dan pelat lantai. Studi ini bermanfaat sebagai acuan dalam melakukan perkuatan struktur bangunan ini dan juga sebagai referensi dalam melakukan perkuatan struktur bangunan lainnya.

2. METODE

Assesment Struktur Eksisting

Berhubung as built drawing dari gedung yang dianalisis tidak ada, maka langkah awal assessment struktur eksisting dilakukan dengan cara mengukur ukuran bangunan, mengukur ukuran penampang elemen struktur, mengukur tinggi tingkat bangunan dan mengukur jumlah, arrangement dan diameter baja tulangan. Pengukuran ukuran bangunan, penampang elemen struktur dan tinggi tingkat bangunan dilakukan dengan menggunakan meteran, sedangkan jumlah, arrangement dan diameter baja tulangan dilakukan dengan menggunakan profometer. Hasil pengukuran digambarkan

dalam bentuk denah struktur bangunan (Gambar 1). Ukuran penampang balok dan kolom serta tebal pelat lantai beserta tulangannya diperlihatkan pada Tabel 1. Tinggi tingkat satu dan dua bangunan adalah sama, yaitu 4 m.



Gambar 1. Denah struktur bangunan

Selanjutnya diamati kondisi beton eksisting, berupa retak, delaminasi, *spalling* selimut beton serta kondisi baja tulangan apakah sudah terjadi korosi atau tidak. Mutu beton diuji dengan metode hammer test menggunakan alat Schmidt Hammer. Mutu baja diuji dengan mengambil sampel baja di lapangan dan dilakukannya uji tarik di laboratorium.

Pemodelan dan Analisis Struktur Eksisting

Struktur kerangka bangunan eksisting dimodelkan sebagai portal ruang (*space frame*). Pelat lantai dianggap sebagai diafragma kaku dalam analisis beban gempa. Kekuatan dinding bata tidak diperhitungkan, jadi kerangka bangunan dianalisis

sebagai portal terbuka. Pemodelan struktur dilakukan dengan menggunakan bantuan software SAP2000.

Tabel 1. Ukuran penampang struktur dan baja tulangan

Struktur	Ukuran Penampang	Baja Tulangan	
Kolom K1	Diameter = 30 cm	Memanjang	$A_{st} = 8\phi 16$ mm
		Sengkang	$(\phi 6 - 200)$ mm
Kolom K2	25 x 25 cm ²	Memanjang	$A_{st} = 8\phi 16$ mm
		Sengkang	$(\phi 6 - 200)$ mm
Kolom K3	18 x 25 cm ²	Memanjang	$A_{st} = 4\phi 16$ mm
		Sengkang	$(\phi 6 - 250)$ mm
Balok lantai	21 x 52 cm ²	Momen positif	$A_s = 2\phi 16$ mm $A'_s = 2\phi 16$ mm
		Momen negatif	$A_s = 2\phi 16$ mm $A'_s = 2\phi 16$ mm
		Sengkang	$(\phi 6 - 250)$ mm
Ring balok	20 x 30 cm ²	Momen positif	$A_s = 2\phi 16$ mm $A'_s = 2\phi 16$ mm
		Momen negatif	$A_s = 2\phi 16$ mm $A'_s = 2\phi 16$ mm
		Sengkang	$(\phi 6 - 250)$ mm
Pelat lantai	Tebal = 12 cm	Momen positif	$(\phi 6 - 100)$ mm
		Momen negatif	$(\phi 6 - 100)$ mm

Keterangan: A_{st} = tulangan total; A_s = tulangan tarik, dan A'_s = tulangan tekan

Dalam analisis struktur eksisting diperhitungkan reduksi kekakuan, yaitu 0,3 EI untuk balok dan 0,7 EI untuk kolom [35]. Analisis respon spektrum digunakan untuk memperhitungkan beban gempa. Parameter gempa yang digunakan adalah: koefisien modifikasi respons (R) = 5; faktor kuat lebih sistem (Ω_0) = 3; dan faktor pembesaran defleksi (C_d) = 4,5 [34]. Periode fundamental struktur (T_a) = 0,33 detik, berada antara $T_{a,min} = 0,30$ detik dan $T_{a,max} = 0,45$ detik. Berat total bangunan adalah 5700 kN.

Analisis Kekuatan Perlu

Kekuatan perlu dari setiap elemen struktur bangunan didapat dengan terlebih dahulu menghitung besarnya beban yang bekerja. Beban yang diperhitungkan adalah beban mati, beban hidup dan beban gempa. Perhitungan beban didasarkan pada [32], dimana beban hidup untuk gedung arsip adalah sebesar 4 kN/m².

Analisis statis digunakan untuk mendapatkan kekuatan perlu dari struktur bangunan akibat beban mati dan beban hidup. Untuk mendapatkan kekuatan perlu akibat beban gempa

pa dilakukan analisis dinamis respon spektrum berdasarkan [34]. Baik analisis statis maupun analisis dinamis respon spektrum dilakukan dengan bantuan software SAP 2000. Jenis tanah yang digunakan dalam analisis adalah tanah sedang sesuai dengan data sifat tanah pada lokasi bangunan.

Sifat material yang digunakan dalam analisis adalah sesuai dengan hasil pengujian struktur eksisting. Modulus elastisitas beton tergantung pada kuat tekannya dan dihitung dengan persamaan berikut [36]:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

dimana: E_c = modulus elastisitas beton (MPa) dan f'_c = kuat tekan beton (MPa).

Hasil analisis struktur dilakukan kombinasi kekuatan perlu yang berupa momen lentur berfaktor, gaya geser berfaktor dan gaya aksial berfaktor dari setiap elemen struktur. Kombinasi beban berfaktor dilakukan berdasarkan [32].

Analisis Kekuatan Tersedia Struktur Eksisting

Kekuatan tersedia setiap elemen struktur eksisting dianalisis berdasarkan [36]. Kekuatan tersedia pelat lantai dihitung dengan persamaan berikut:

$$\phi M_n = 0,85\phi f'_c b a \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (2)$$

dimana ϕM_n = kekuatan lentur tersedia, f'_c = kuat tekan beton, b = lebar penampang, a = tinggi blok tegangan persegi, d = tinggi efektif penampang dan ϕ = faktor reduksi kekuatan. Nilai tinggi blok tegangan persegi dihitung sebagai berikut:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} \quad (3)$$

dimana: A_s = luas penampang tulangan tarik dan f_y = tegangan leleh baja tulangan.

Kekuatan tersedia balok lantai dalam menahan lenturan dihitung dengan persamaan berikut [36]:

$$\phi M_n = 0,85\phi f'_c b a \left(d - \frac{a}{2}\right) + \phi A'_s f'_s (d - d') \quad (4)$$

dimana A'_s = luas penampang tulangan tekan dan f'_s = tegangan tekan baja tulangan. Bila tulangan baja belum leleh, maka tegangan baja tulangan dihitung dengan hukum Hooke. Dan tinggi blok tegangan persegi dihitung dengan cara coba-coba. Bila tulangan baja sudah leleh, maka tegangan baja tulangan diambil sebesar tegangan leleh baja dan tinggi blok tegangan

persegi dihitung dengan persamaan berikut:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0,85 f'_c b} \quad (5)$$

Kekuatan tersedia balok lantai dalam menahan geser dihitung dengan persamaan berikut [36]:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) \quad (6)$$

$$V_c = 1/6 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (7)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (8)$$

dimana ϕV_n = kekuatan geser tersedia, V_c = kekuatan geser sumbu beton, V_s = kekuatan geser sumbu baja tulangan, b_w = lebar badan balok, A_v = luas penampang sengkang, s = jarak antar sengkang.

Kekuatan tersedia kolom dalam menahan kombinasi gaya aksial tekan dan momen lentur dianalisis dengan menggambar diagram interaksi kekuatan kolom dengan cara menghitung kekuatan perlu lentur mumi, kekuatan perlu dalam menahan gaya aksial tekan sentris, kekuatan perlu dalam kondisi regangan seimbang dan beberapa titik kekuatan perlu kombinasi gaya aksial tekan dan momen lentur pada sembarang nilai gaya aksial tekan.

Kekuatan perlu lentur mumi dihitung dengan persamaan berikut:

$$\phi M_n = 0,85\phi f'_c b a \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}\right) + \phi \sum A_{si} f_{si} \left(\frac{h}{2} - d_i\right) + \phi \sum A'_{si} f'_{si} \left(\frac{h}{2} - d'_i\right) \quad (9)$$

dimana: h = tinggi total penampang, A_{si} = luas penampang baja tulangan tarik ke i , f_{si} = tegangan baja tulangan tarik ke i , d_i = jarak tulangan tarik ke i dari serat luar penampang, A'_{si} = luas penampang baja tulangan tekan ke i , f'_{si} = tegangan baja tulangan tekan ke i , d'_i = jarak tulangan tekan ke i dari serat luar penampang.

Kekuatan aksial sentris tersedia (ϕP_c) dihitung dengan persamaan berikut:

$$\phi P_c = \phi (0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y) \quad (10)$$

dimana:

Kekuatan tersedia dalam kondisi regangan seimbang dihitung dengan mengkondisikan regangan tekan ultimit beton terjadi bersamaan dengan regangan tarik baja yang berada pada sisi terluar dan menggunakan persamaan keseimbangan gaya-gaya dalam dan keseimbangan momen. Kekuatan perlu

pada keadaan sembarang nilai gaya aksial didapat dengan mengambil beberapa nilai $\phi P_n < \phi P_c$ dan melakukan analisis keseimbangan momen untuk mendapatkan ϕM_n pada masing-masing keadaan tersebut. Titik-titik tersebut selanjutnya diplot dalam sebuah grafik $\phi P_n - \phi M_n$ untuk mendapatkan diagram interaksi kekuatan kolom.

Analisis Kekuatan Tersedia Struktur Setelah Diperkuat

Struktur eksisting diperkuat dengan menggunakan CFRP sheet. Pemilihan CFRP sheet untuk perkuatan struktur ini dikarenakan mudah dalam implementasi tanpa perlu pembongkaran elemen non struktural. Disamping itu juga CFRP sheet mempunyai kuat tarik yang sangat tinggi. Kekuatan tersedia setiap elemen struktur setelah diperkuat dianalisis berdasarkan [8]. Kuat tarik dan regangan tarik ultimit desain direduksi dengan suatu factor pengaruh lingkungan sebagai berikut [8]:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (11)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (12)$$

dimana f_{fu} = tegangan tarik desain dari CFRP sheet, ε_{fu} = regangan tarik desain ultimit dari CFRP sheet, dan C_E = faktor pengaruh lingkungan yang besarnya 0,95 untuk struktur di dalam ruangan dan 0,85 untuk struktur di luar ruangan.

Untuk mencegah kegagalan debonding antara CFRP sheet dan permukaan beton yang diperkuat, maka regangan efektif dari CFRP sheet dibatasi sampai ε_{fd} sebagaimana dinyatakan dalam persamaan di bawah [8], [19], [20], [37]:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (13)$$

dimana: n = jumlah lapis CFRP sheet.

Tegangan efektif CFRP (f_e) didapat dengan mengalikan modulus elastisitas CFRP (E_f) dengan regangan efektif CFRP (ε_{fe}) yang besarnya ditentukan sebagai berikut [8]:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (14)$$

dimana: ε_{cu} = regangan ultimit beton, d_f = tinggi efektif CFRP, c = jarak garis netral dari serat tekan terluar beton dan ε_{bi} = regangan awal dari substrat.

Regangan baja (ε_s) dihitung sebagai berikut [8]:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) \quad (15)$$

Letak garis netral (c) dihitung sebagai berikut [8]:

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (16)$$

dimana A_f = luas penampang CFRP yang nilainya sama dengan $n b t_f$, α_1 dan β_1 = parameter blok tegangan persegi.

Besarnya kekuatan lentur tersedia balok dan pelat lantai setelah diperkuat dengan CFRP sheet dihitung dengan persamaan [8]:

$$\phi M_n = \phi A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \phi \phi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (17)$$

dimana: ϕ_f = faktor reduksi kekuatan CFRP = 0,85.

Besarnya kekuatan geser tersedia setelah diperkuat dengan CFRP sheet dihitung dengan persamaan [8]:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \phi_f V_f) \quad (18)$$

$$V_f = \frac{A_f v f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f v}{s_f} \quad (19)$$

dimana α = sudut kemiringan pemasangan CFRP sheet pada badan balok, d_f = jarak dari pusat tulangan baja ke ujung teratas dari CFRP dan s_f = jarak pusat ke pusat antara CFRP.

Kekuatan tekan sentris tersedia dari struktur kolom setelah diperkuat dengan CFRP dihitung dengan persamaan [8]:

$$\phi P_n = 0,8 \phi [0,85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (20)$$

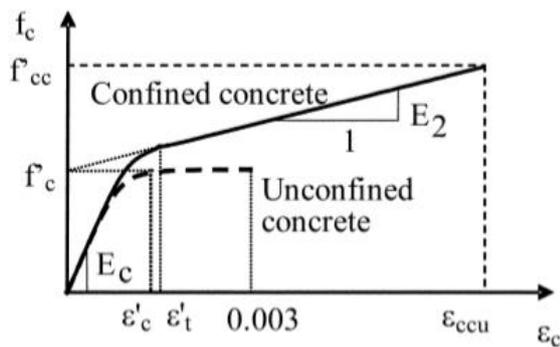
Model hubungan tegangan-regangan beton terkekang dengan CFRP yang diusulkan oleh [19], [20] seperti pada Gambar 2 digunakan dalam analisis ini. Hubungan tersebut dapat ditulis sebagai berikut [19], [20]:

$$f_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4 f'_c} \varepsilon_c^2 ; \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon'_t \quad (21)$$

$$f_c = f'_c + E_2 \varepsilon_c ; \quad \varepsilon'_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \quad (22)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (23)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2 f'_c}{E_c - E_2} \quad (24)$$



Gambar 2. Model tegangan-regangan beton yang dikekang dengan CFRP sheet

Kuat tekan maksimum beton terkekang dengan CFRP (f'_{cc}) dan tekanan kekangan maksimum (f_l) dihitung sebagai berikut [20]:

$$f'_{cc} = f'_c + \varphi_f 3,3 \kappa_a f_l \quad (25)$$

$$f_l = \frac{2E_f t_f \varepsilon_{fe}}{D} \quad (26)$$

dimana κ_a = faktor efisiensi kekangan dan D = diameter penampang kolom untuk kolom lingkaran. Untuk kolom persegi nilai D dihitung sebagai berikut:

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (27)$$

dimana: b dan h = lebar dan tinggi penampang kolom. Nilai κ_a untuk penampang lingkaran diambil sebesar 1,0 dan untuk penampang lingkaran dihitung sebagai berikut:

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (28)$$

Nilai φ_f sebesar 0,95 sebagaimana direkomendasikan oleh [8] digunakan dalam analisis ini. Nilai A_e/A_c dihitung sebagai berikut:

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b - 2r_c)^2}{3A_g} \right] - \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (29)$$

dimana: r_c = radius sudut dan ρ_g = rasio tulangan memanjang.

Regangan efektif kolom terkekang (ε_{fe}) dihitung sebagai berikut [39]:

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_\varepsilon \varepsilon_{fu} \quad (30)$$

dimana κ_ε = faktor untuk memperhitungkan kegagalan premature dari CFRP. Dalam analisis ini nilai diambil sebesar 0,58 [40].

Nilai regangan maksimum beton yang terkekang dengan CFRP (ε_{ccu}) dihitung sebagai berikut:

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1,50 + 12 \kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \quad (31)$$

$$\varepsilon_{ccu} \leq 0,01 \quad (32)$$

dimana κ_b adalah faktor yang tergantung pada bentuk penampang. Untuk penampang lingkaran $\kappa_b = 1,0$; sedangkan untuk penampang persegi κ_b dihitung sebagai berikut:

$$\kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^{0,5} \quad (28)$$

Diagram interaksi kekuatan kolom yang diperkuat dengan CFRP dihitung dan digambarkan dengan memperhatikan kompatibilitas regangan dan keseimbangan gaya-gaya dan menggunakan model hubungan tegangan-regangan dalam Gambar 11. Nilai regangan efektif CFRP dibatasi sebesar:

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq \kappa_\varepsilon \varepsilon_{fu} \quad (29)$$

3. HASIL PEMBAHASAN

Hasil Assesment Struktur Eksisting

Hasil assessment struktur di lapangan diperoleh bahwa tidak ada retak pada beton, tidak ada selimut beton yang terkelupas dan kondisi baja tulangan masih bagus (tidak ada korosi). Hasil pengujian di lapangan dan di laboratorium adalah berupa kekuatan beton dan baja tulangan struktur eksisting sebagai berikut:

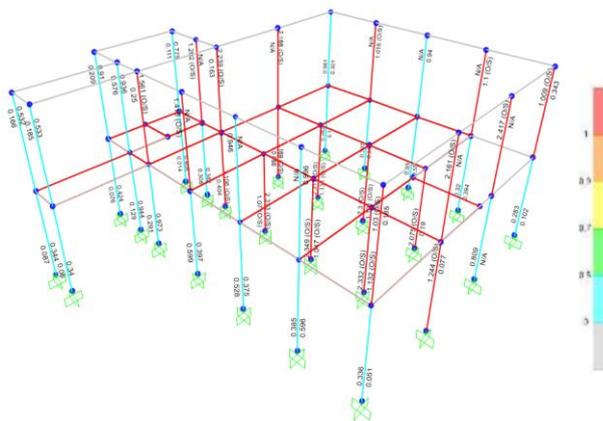
- Kuat tekan beton kolom lantai satu = 25,40 MPa.
- Kuat tekan beton kolom lantai dua = 13,05 MPa.
- Kuat tekan beton balok lantai = 23,40 MPa.
- Kuat tekan ring balok = 25,62 MPa.
- Kuat tekan pelat lantai = 20,93 MPa.
- Kuat tarik baja = 245 MPa.
- Modulus elastisitas baja = 201.023 MPa

Kuat tekan beton kolom lantai satu, balok lantai dan ring balok masih memenuhi persyaratan kuat tekan beton struktural yang disyaratkan dalam [36]. Kuat tekan kolom lantai dua lebih rendah dari yang disyaratkan dalam [36]. Besarnya kuat tekan minimal beton struktural menurut [36] adalah 17,5 MPa. Untuk ini maka kolom lantai dua perlu diberi kekangan untuk meningkatkan kuat tekan betonnya.

Perbandingan Kekuatan Perlu dan Kekuatan Tersedia Struktur Eksisting

Berdasarkan hasil analisis struktur dan hasil perhitungan kekuatan tersedia dari setiap elemen struktur dapat dihitung *stress ratio*, yaitu perbandingan antara kekuatan perlu dibandingkan dengan kekuatan tersedia. Besarnya *stress ratio* dari setiap kolom dan balok diperlihatkan pada Gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa besarnya *stress ratio* untuk kolom dan balok lantai lebih besar dari 1,0 yang berarti bahwa kekuatan perlu struktur lebih besar dari kekuatan tersedia. Hal ini menunjukkan bahwa struktur kolom dan balok lantai tidak kuat menahan beban yang bekerja, jadi struktur kolom dan balok lantai harus diperkuat. Dari Gambar 3 tersebut juga terlihat bahwa besarnya *stress ratio* untuk ring balok lebih kecil dari 1,0 yang berarti bahwa kekuatan perlu struktur balok lantai lebih kecil dari kekuatan tersedia. Hal ini menunjukkan bahwa struktur ring balok masih kuat menahan beban yang bekerja, jadi tidak diperlukan perkuatan struktur.

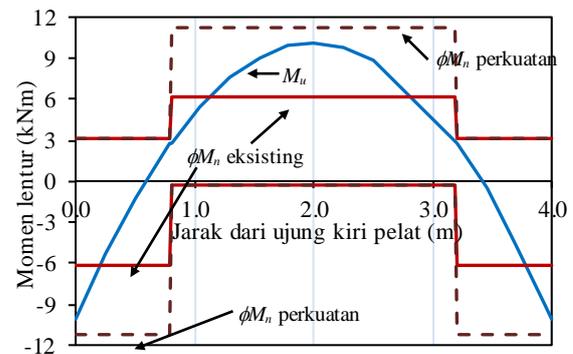
Perbandingan antara kekuatan lentur perlu (M_u) dan kekuatan lentur tersedia pelat lantai (ϕM_n) sepanjang bentang pelat lantai diperlihatkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4, hanya satu bentang dengan momen berfaktor (M_u) yang paling besar yang ditampilkan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kekuatan lentur perlu pelat lantai lebih besar dari kekuatan lentur tersedia baik pada daerah momen positif maupun pada daerah momen negatif. Jadi diperlukan perkuatan lentur struktur pelat lantai.



Gambar 3. Stress ratio struktur kolom dan balok

Perbandingan antara kekuatan lentur perlu (M_u) dan

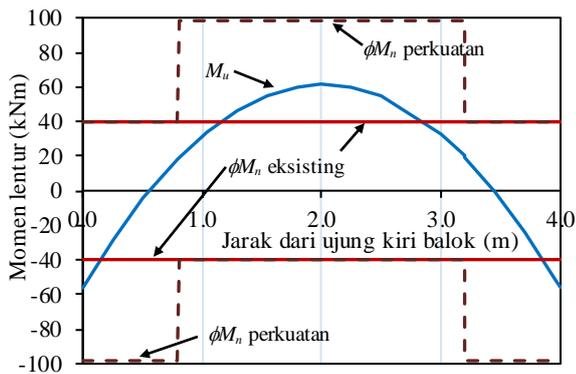
kekuatan lentur tersedia balok lantai (ϕM_n) sepanjang bentang balok lantai diperlihatkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5, hanya satu bentang dengan momen berfaktor (M_u) yang paling besar yang ditampilkan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kekuatan lentur perlu balok lantai lebih besar dari kekuatan lentur tersedia baik pada daerah momen positif maupun pada daerah momen negatif. Jadi diperlukan perkuatan lentur struktur balok lantai.



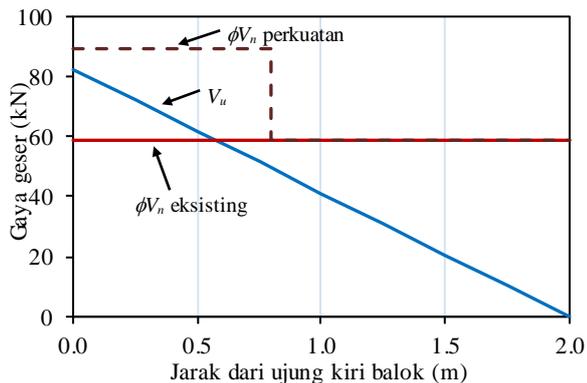
Gambar 4. Perbandingan kekuatan lentur perlu, kekuatan lentur tersedia pelat lantai eksisting dan kekuatan lentur tersedia pelat lantai perkuatan

Perbandingan antara kekuatan geser perlu (V_u) dan kekuatan geser tersedia balok lantai (ϕV_n) sepanjang setengah bentang balok lantai diperlihatkan pada Gambar 6. Pada Gambar 6, hanya bentang dengan gaya geser berfaktor (V_u) yang paling besar yang ditampilkan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kekuatan geser perlu balok lantai lebih besar dari kekuatan geser tersedia pada daerah dekat tumpuan. Jadi diperlukan perkuatan geser struktur balok lantai pada daerah dekat tumpuan.

Karena struktur kolom memiliki kombinasi momen lentur dan gaya aksial tekan, maka kekuatan tersedia struktur kolom dinyatakan dalam bentuk diagram interaksi kolom. Gambar 7 dengan garis penuh adalah diagram interaksi kolom K2 eksisting. Pada gambar tersebut juga diplot besarnya kombinasi momen lentur dan gaya aksial tekan hasil analisis struktur (kekuatan perlu). Terlihat dari gambar tersebut bahwa kekuatan perlu struktur kolom lebih besar dari kekuatan tersedia, sehingga diperlukan perkuatan struktur kolom K2. Hal yang sama juga terjadi pada kolom K1 dan kolom K3.



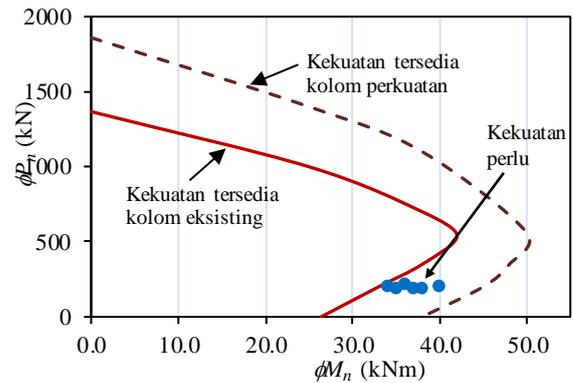
Gambar 5. Perbandingan kekuatan lentur perlu dan kekuatan lentur tersedia balok lantai eksisting dan balok lantai perkuatan



Gambar 6. Perbandingan kekuatan geser perlu dan kekuatan geser tersedia balok lantai eksisting dan balok lantai perkuatan

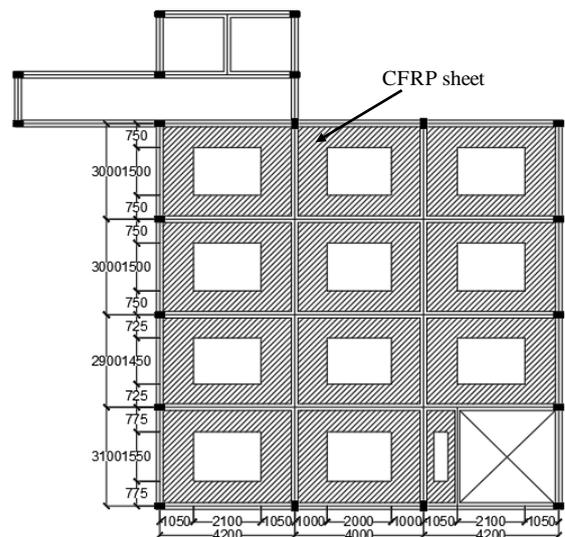
Desain Perkuatan Struktur

Spesifikasi material CFRP sheet yang digunakan untuk perkuatan struktur bangunan ini adalah sebagai berikut: tebal sheet (t_f) = 1,2 mm; kuat tarik rata-rata = 3.100 MPa; kuat tarik 5 % fractile value (f_{fu}^*) = 2.900 MPa; modulus elastisitas rata-rata (E_f) = 165.000 MPa; dan regangan tarik putus (ϵ_{fu}^*) = 1,8 %.

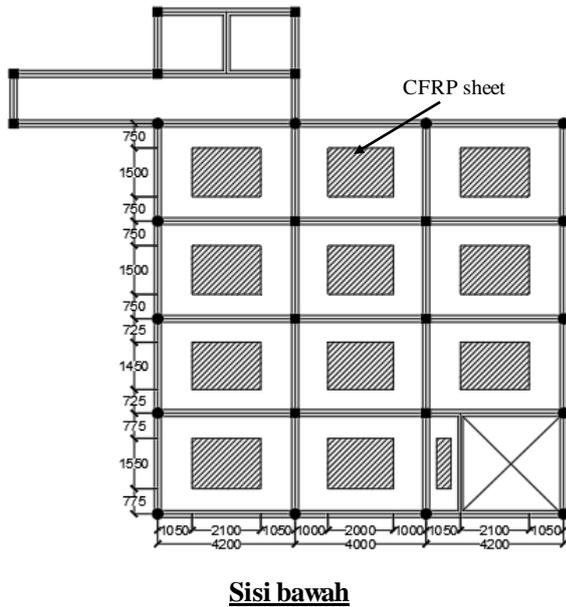


Gambar 7. Diagram interaksi kolom K2 eksisting dan kolom K2 dengan perkuatan

Desain perkuatan struktur pelat lantai dan perkuatan lentur balok lantai dilakukan dengan cara menempelkan CFRP sheet sebanyak satu lapis menggunakan epoxy resin pada bagian yang kekuatan lentur perlunya melebihi kekuatan lentur tersedia. Pada daerah yang memikul momen positif CFRP sheet ditempelkan pada sisi bawah pelat lantai, sedangkan pada daerah yang memikul momen negatif CFRP sheet ditempelkan pada sisi atas pelat lantai. Perkuatan lentur struktur pelat dan balok lantai diperlihatkan pada Gambar 8 dan 9.

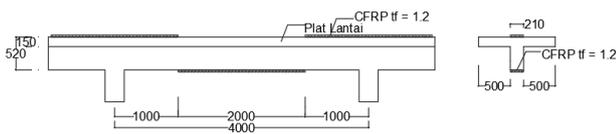


Sisi atas



Gambar 8. Perkuatan lentur pelat lantai

Dengan perkuatan lentur pelat lantai yang didesain ini, kekuatan lentur tersedia struktur pelat lantai meningkat dari 6,16 kNm menjadi 11,23 kNm. Kekuatan lentur tersedia pelat lantai yang telah diperkuat menjadi lebih besar dari kekuatan perlu (10,1 kNm untuk momen negatif; 8,1 kNm untuk momen positif), sehingga struktur pelat lantai sudah memenuhi ketentuan [36]. Perbandingan kekuatan lentur tersedia pelat lantai sebelum dan setelah diperkuat dengan kekuatan lentur perlu pelat lantai diperlihatkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4, kekuatan lentur pelat lantai dengan perkuatan adalah garis putus-putus.

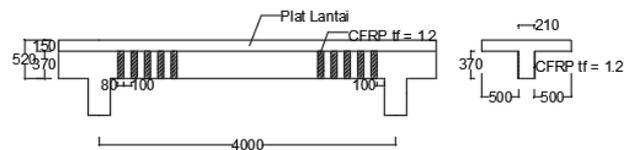


Gambar 9. Perkuatan lentur balok lantai

Dengan perkuatan lentur balok lantai yang didesain ini, kekuatan lentur tersedia (ϕM_n) struktur balok lantai meningkat dari 39,79 kNm menjadi 98,26 kNm. Kekuatan lentur tersedia pelat lantai yang telah diperkuat menjadi lebih besar dari kekuatan lentur perlu (M_u), yaitu 56,20 kNm untuk momen

negatif dan 61,60 kNm untuk momen positif, sehingga struktur balok lantai sudah memenuhi persyaratan kekuatan lentur menurut ketentuan [36]. Perbandingan kekuatan lentur tersedia dan kekuatan lentur perlu struktur balok lantai sebelum dan setelah diperkuat diperlihatkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5, kekuatan lentur balok lantai dengan perkuatan adalah garis putus-putus.

Desain perkuatan geser balok lantai dilakukan pada daerah yang kekuatan geser perlunya melebihi kekuatan geser tersedia dengan cara menempelkan CFRP sheet dengan lebar 80 mm dengan jarak as ke as antar sheet 180 mm (jarak bersih antar sheet = 100 mm) pada kedua badan balok menggunakan epoxyresin seperti diperlihatkan pada Gambar 10.

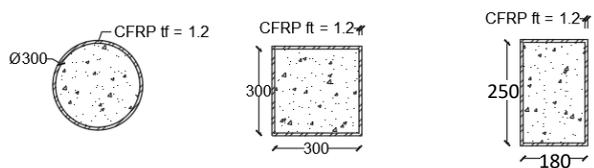


Gambar 10. Perkuatan geser balok lantai

Dengan perkuatan geser balok lantai yang didesain ini, kekuatan geser tersedia (ϕV_n) struktur balok lantai meningkat dari 58,79 kNm menjadi 89,29 kN. Kekuatan geser tersedia pelat lantai yang telah diperkuat menjadi lebih besar dari kekuatan geser maksimum perlu (V_u), yaitu 82,30 kN sehingga struktur balok lantai sudah memenuhi persyaratan kekuatan geser menurut ketentuan [36]. Perbandingan kekuatan geser tersedia dan kekuatan geser perlu struktur balok lantai sebelum dan setelah diperkuat sepanjang bentang balok diperlihatkan pada Gambar 6.

Perkuatan struktur kolom dilakukan dengan cara membalut kolom sepanjang bentangnya dengan menggunakan CFRP sheet. Perkuatan struktur kolom hanya digunakan pada kolom-kolom yang kekuatan perlunya melebihi kekuatan tersedia dan diperlihatkan pada Gambar 11. Perbandingan diagram interaksi kekuatan kolom sebelum dan sesudah diperkuat serta kekuatan perlunya diperlihatkan pada Gambar 7. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kekuatan tersedia struktur

kolom setelah diperkuat meningkat secara signifikan sehingga melewati kekuatan perlunya (struktur kolom menjadi aman setelah dilakukan perkuatan)



Kolom K1

Kolom K2

Kolom K3

Gambar 11. Perkuatan struktur kolom

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil pengamatan di lapangan, pengujian dan analisis yang dilakukan dalam penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Tidak terdapat retak pada beton dan korosi pada baja tulangan dari struktur Gedung Kantor Ikatan Guru Aceh. Mutu beton masih memenuhi persyaratan beton structural sesuai dengan [36] kecuali kolom lantai dua.
2. Berhubung fungsi bangunan berubah menjadi Gedung arsip dengan beban hidup yang lebih besar, dan juga telah terjadi perubahan standar untuk bangunan tahan gempa, maka struktur bangunan tersebut, baik kolom lantai satu, kolom lantai, balok lantai dan pelat lantai sudah tidak mampu menahan beban. Untuk ini diperlukan perkuatan strukturnya.
3. Perkuatan lentur dan geser struktur didesain dengan cara menempelkan CFRP sheet dengan menggunakan epoxy resin pada bagian dengan kekuatan perlu lebih besar dari kekuatan tersedia, sehingga kekuatan perlu struktur menjadi lebih kecil dari kekuatan tersedia.
4. Perkuatan kolom didesain dengan cara membalut kolom dengan CFRP sheet menggunakan epoxy resin, sehingga terjadi kekangan pada beton yang menyebabkan kuat tekannya meningkat.

Saran

Dari hasil analisis ini dapat disarankan agar pada saat melakukan rehab Gedung ini, terlebih dahulu dilakukan

perkuatan struktur pelat lantai, balok lantai dan kolom. Perkuatan struktur dilakukan dengan cara menempelkan satu lapis CFRP sheet dengan spesifikasi sebagai berikut: tebal sheet = 1,2 mm, kuat tarik rata-rata = 3.100 MPa, kuat tarik 5 % fractile value = 2.900 MPa, modulus elastisitas rata-rata = 165.000 MPa dan regangan tarik putus = 1,8 %.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. El Maaddawy, A. Chahrour, dan K. Soudki, "Effect of fiber-reinforced polymer wraps on corrosion activity and concrete cracking in chloride-contaminated concrete cylinders," *J. Compos. Constr.*, 2006.
- [2] S. Raza, M. K. I. Khan, S. J. Menegon, H. H. Tsang, dan J. . Wilson, "Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns by Jacketing: Start-of-the-Art Review," *Sustainability*, vol. 11, pp. 1–31, 2019.
- [3] M. Chemrouk, "The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete," in *Procedia Engineering*, 2015.
- [4] S. A. Alghamdi dan S. Ahmad, "On Durability of Reinforced Concrete Structures: A Design Methodology for RC Beams and Columns in Corrosive Environments," *Arab. J. Sci. Eng.*, 2018.
- [5] E. Choi, Y. S. Chung, C. Park, dan D. J. Kim, "Seismic performance of circular RC columns retrofitted with prefabricated steel wrapping jackets," *Mag. Concr. Res.*, 2013.
- [6] M. Fakharifar, G. Chen, C. Wu, A. Shamsabadi, M. A. Elgawady, dan A. Dalvand, "Rapid Repair of Earthquake-Damaged RC Columns with Prestressed Steel Jackets," *J. Bridg. Eng.*, 2016.
- [7] L. Wang, R. K. L. Su, B. Cheng, L. Z. Li, L. Wan, dan Z. W. Shan, "Seismic behavior of preloaded rectangular RC columns strengthened with precambered steel plates under high axial load ratios," *Eng. Struct.*, 2017.
- [8] ACI Committee 440, *ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems*. 2008.
- [9] S. Masoud, K. Soudki, dan T. Topper, "CFRP-strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads," *J. Compos. Constr.*, 2001.
- [10] Y. J. Kim dan P. J. Heffernan, "Fatigue behavior of externally strengthened concrete beams with fiber-reinforced polymers: State of the art," *J. Compos. Constr.*, 2008.
- [11] J. F. Dong, Q. Y. Wang, dan Z. W. Guan,

- “Structural behaviour of RC beams externally strengthened with FRP sheets under fatigue and monotonic loading,” *Eng. Struct.*, 2012.
- [12] M. Morgan, *Carbon Fiber and Their Composites*. Boca Raton: Taylor & Francis., 2005.
- [13] J. A. O. Barros, S. J. E. Dias, dan J. L. T. Lima, “Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams,” *Cem. Concr. Compos.*, 2007.
- [14] R. Kotynia, H. A. Baky, K. W. Neale, dan U. A. Ebead, “Flexural strengthening of RC beams with externally bonded CFRP systems: Test results and 3D nonlinear FE analysis,” *J. Compos. Constr.*, 2008.
- [15] A. Li, J. Assih, dan Y. Delmas, “Shear Strengthening of RC Beams with Ex-ternally Bonded CFRP Sheets,” *J. Struct. Eng.*, vol. 127, no. 4, 2001.
- [16] M. J. Chajes, T. F. Januszka, D. R. Mertz, T. A. Thomson, dan W. W. Finch, “Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics,” *ACI Struct. J.*, 1995.
- [17] T. Norris, H.] Saadatmasesh, dan M. Ehsani, “Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets,” *J. Struct. Eng.*, vol. 123, no. 7, pp. 903–9011, 1997.
- [18] A. Belouar, A. Laraba, R. Benzaïd, dan N. Chikh, “Structural performance of square concrete columns wrapped with CFRP sheets,” in *Procedia Engineering*, 2013.
- [19] L. Lam dan J. G. Teng, “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete,” in *Construction and Building Materials*, 2003.
- [20] L. Lam dan J. G. Teng, “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2003.
- [21] I. A. E. M. Shehata, L. A. V. Cameiro, dan L. C. D. Shehata, “Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets,” *Mater. Struct. Constr.*, 2002.
- [22] G. Elnabesy dan M. Saatcioglu, “Seismic Retrofit of Circular and Square Bridge Columns with CFRP Jackets,” in *FRP Composites In Civil Engineering - Proceedings Of The International Conference On Frp Composites In Civil Engineering Held December 2001, Hong Kong - Volume I*, 2001.
- [23] S. N. Bousias, T. C. Triantafillou, M. N. Fardis, L. Spathis, dan B. A. O’Regan, “Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without corrosion,” *ACI Struct. J.*, 2004.
- [24] O. Chaallal dan M. Shahawy, “Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading,” *ACI Struct. J.*, 2000.
- [25] M. H. Harajli dan A. A. Rteil, “Effect of Confinement Using Fiber-Reinforced Polymer or Fiber-Reinforced Concrete on Seismic Performance of Gravity Load-Designed Columns,” *ACI Struct. J.*, 2004.
- [26] R. D. Iacobucci, S. A. Sheikh, dan O. Bayrak, “Retrofit of Square Concrete Columns with Carbon Fiber-Reinforced Polymer for Seismic Resistance,” *ACI Struct. J.*, 2003.
- [27] M. S. Memon dan S. A. Sheikh, “Seismic resistance of square concrete columns retrofitted with glass fiber-reinforced polymer,” *ACI Struct. J.*, 2005.
- [28] K. . Nosh, “Retrofit of Rectangular Reinforced Concrete Column using Carbon Fiber,” University of Washington, 1996.
- [29] H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, dan L. Jin, “Seismic strengthening of circular bridge pier models with fiber composites,” *ACI Struct. J.*, 1996.
- [30] S. A. Sheikh dan G. Yau, “Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers,” *ACI Struct. J.*, 2002.
- [31] Anonim, *SNI 03-1727-1989. Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [32] SNI 1727-2013, “Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain,” *Bandung Badan Stand. Indones.*, 2013.
- [33] Anonim, *SNI 03-1726-1989 Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung*. Jakarta: Departemen PU.
- [34] SNI 1726: 2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. 2012.
- [35] American Society of Civil Engineers, *ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17, seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. 2017.
- [36] SNI 2847:, “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung,” *Bandung Badan Stand. Indones.*, 2013.
- [37] J. G. Teng, X. Z. Lu, L. P. Ye, dan J. J. Jiang, “Recent Research on Intermediate Crack Induced Debonding in FRP Strengthening Beams,” in *Proceeding of the 4th International Conference on Advanced Composite Materi-als for Bridges and Structures, Calgary, AB, Canada.*, 2004.
- [38] J. G. Teng, S. T. Smith, J. Yao, dan J. F. Chen, “Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs,” in *Construction and Building Materials*, 2003.
- [39] S. Pessiki, K. A. Harries, J. T. Kestner, R. Sause, dan J. M. Ricles, “Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets,” *J. Compos. Constr.*, 2001.
- [40] K. A. Harries dan S. A. Carey, “Shape and ‘gap’ effects on the behavior of variably confined concrete,” *Cem. Concr. Res.*, 2003.