

Evaluasi Kapasitas Struktur dan Perkuatan Berbasis CFRP pada Gedung Pasca Perubahan Fungsi

Vicky Wildan Yustisia^{*1}, Thilal Syihabuddin^{*2}, Khusniatul Aini^{*3}, Artya Irvania^{*4}

¹²³⁴Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang

Jl. Gajayana No.50, Malang 65144, Jawa Timur, Indonesia

e-mail: ^{*1}vickyustisia87@uin-malang.ac.id, ^{*2}thsyihab@uin-malang.ac.id,

^{*3}khusniatulaini23@uin-malang.ac.id, ^{*4}artyairvania@uin-malang.ac.id

Abstract

Buildings undergoing functional transformation face structural demands exceeding original design capacity. This study evaluates the structural capacity of a two-story reinforced concrete office building at Taman Tekno BSD, Tangerang, following a rooftop-to-office floor conversion in 2024. Non-destructive testing—Schmidt Hammer Test (SHT) and Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)—was conducted at 35 and 12 measurement points, respectively, yielding in-situ concrete compressive strengths ranging from $f_c' = 15.6$ MPa (roof slab, poor condition) to $f_c' = 47.2$ MPa (ground-floor columns). Three-dimensional structural modeling was performed using ETABS, applying dead and live loads per SNI 1727:2020 and seismic loads per SNI 1726:2019 (site class SD, $S_s = 0.95g$, $S_1 = 0.40g$, $SDS = 0.63g$, $SD1 = 0.36g$, Risk Category II). Structural capacity checks followed SNI 2847:2019. Results reveal that the converted roof slab (third floor) exhibits a nominal flexural capacity ($\phi M_n = 10.2$ kN·m) far below the governing ultimate moment demand ($M_u = 35.1$ kN·m), a demand-to-capacity (D/C) ratio of 3.43. Several beam-column joints fail the strong-column weak-beam criterion ($\Sigma M_c / \Sigma M_b = 1.05 < 1.20$ per SNI 2847:2019 Clause 18.7.3). Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strengthening per SNI 8971:2021 and ACI 440.2R-17 is proposed: two-layer CFRP confinement wrapping on all columns, CFRP laminates with U-wraps on critical beams, and CFRP strips at 150 mm spacing on the third-floor slab soffit. Post-strengthening analysis shows slab flexural capacity increasing to $\phi M_n = 35.1$ kN·m (+244%), column axial utilization decreasing from ~ 0.70 to ~ 0.55 (+20% capacity), and beam shear capacity improving by +27%. All critical elements analytically satisfy SNI code requirements after strengthening. The analytical CFRP retrofit approach is effective and minimally invasive, making it a viable solution for similar rooftop-conversion projects in Indonesia.

Keywords: CFRP strengthening; rooftop conversion; reinforced concrete; non-destructive testing; structural capacity evaluation

Abstrak

Bangunan yang mengalami perubahan fungsi menghadapi peningkatan beban struktural yang dapat melampaui kapasitas rancangan semula. Penelitian ini mengevaluasi kapasitas struktur gedung kantor beton bertulang dua lantai di Taman Tekno BSD, Tangerang, pasca konversi atap menjadi lantai kantor aktif pada tahun 2024. Pengujian non-destruktif (Hammer Test dan Ultrasonic Pulse Velocity/UPV) dilakukan pada masing-masing 35 dan 12 titik pengukuran, menghasilkan kuat tekan beton in situ antara $f_c' = 15,6$ MPa (pelat atap, kondisi buruk) hingga $f_c' = 47,2$ MPa (kolom lantai 1). Pemodelan struktur tiga dimensi menggunakan ETABS dengan beban sesuai SNI 1727:2020 dan beban gempa sesuai SNI 1726:2019 (kelas situs SD, $S_s = 0,95g$, $S_1 = 0,40g$, $SDS = 0,63g$, $SD1 = 0,36g$, Kategori Risiko II). Pengecekan kapasitas mengacu SNI 2847:2019. Hasil menunjukkan pelat lantai 3 memiliki kapasitas momen lentur nominal ($\phi M_n = 10,2$ kN·m) jauh di bawah momen ultimit rencana ($M_u = 35,1$ kN·m), dengan rasio D/C sebesar 3,43. Sejumlah joint kolom-balok tidak memenuhi syarat kolom-kuat balok-lemah ($\Sigma M_c / \Sigma M_b = 1,05 < 1,20$ sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3). Perkuatan menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sesuai SNI 8971:2021 dan ACI 440.2R-17 diusulkan: lilitan (wrapping) CFRP 2 lapis pada seluruh kolom, laminat CFRP dan U-wrap pada balok kritis, serta strip CFRP jarak 150 mm pada soffit pelat lantai 3. Analisis pasca-perkuatan menunjukkan kapasitas lentur pelat meningkat menjadi $\phi M_n = 35,1$ kN·m (+244%), utilisasi aksial kolom turun dari $\sim 0,70$ menjadi $\sim 0,55$ (kapasitas naik +20%), dan kapasitas geser balok meningkat +27%. Seluruh elemen kritis secara analitis memenuhi persyaratan SNI setelah perkuatan.

Pendekatan retrofit CFRP secara analitis efektif dan minim gangguan operasional, menjadikannya solusi andal untuk proyek konversi rooftop serupa di Indonesia.

Kata Kunci: *perkuatan CFRP; konversi rooftop; beton bertulang; uji non-destruktif; evaluasi kapasitas struktur*

1. PENDAHULUAN

Perubahan fungsi bangunan (*alih fungsi*) merupakan fenomena yang kerap terjadi pada gedung perkantoran dan industri seiring perkembangan kebutuhan operasional [1]. Ketika area atap (*rooftop*) yang semula dirancang hanya menahan beban ringan ($\sim 1,0 \text{ kN/m}^2$) dikonversi menjadi lantai kantor aktif ($\sim 2,4\text{--}4,0 \text{ kN/m}^2$), terjadi lonjakan beban mati dan beban hidup yang signifikan—peningkatan total beban gravitasi mencapai 2 hingga 4 kali lipat rancangan awal—pada elemen-elemen struktur di bawahnya [2]. Tanpa evaluasi kapasitas yang menyeluruh, kondisi ini berpotensi menimbulkan kegagalan struktural: mulai dari retak lentur pelat hingga keruntuhan kolom akibat interaksi aksial-momen yang melampaui kapasitas desain semula [3].

Indonesia telah memperbarui standar pembebanan dan gempa melalui SNI 1727:2020 (*Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan*) dan SNI 1726:2019 (*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*), yang memberlakukan persyaratan lebih ketat dibanding edisi sebelumnya [4][5]. Akibatnya, banyak bangunan yang dibangun sebelum tahun 2019 kini tidak lagi memenuhi persyaratan kapasitas terkini, terutama terkait beban gempa dan kombinasi beban ultimit. Evaluasi berbasis standar terbaru menjadi keharusan sebelum setiap perubahan fungsi dilaksanakan.

Perkuatan struktur menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir sebagai solusi retrofit yang efisien dan minim gangguan operasional. Keunggulan FRP—rasio kekuatan-berat tinggi, ketahanan korosi, dan kemudahan pemasangan—menjadikannya pilihan utama dalam program rehabilitasi struktur gedung eksisting. Di Indonesia, penggunaan teknologi ini diperkuat dengan diterbitkannya SNI 8971:2021 (*Panduan Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Lembaran Serat Berpolimer Terlekat Eksternal untuk Perkuatan Struktur Beton*) sebagai panduan nasional [6] [11].

1.1 Kesenjangan Penelitian (*Research Gap*)

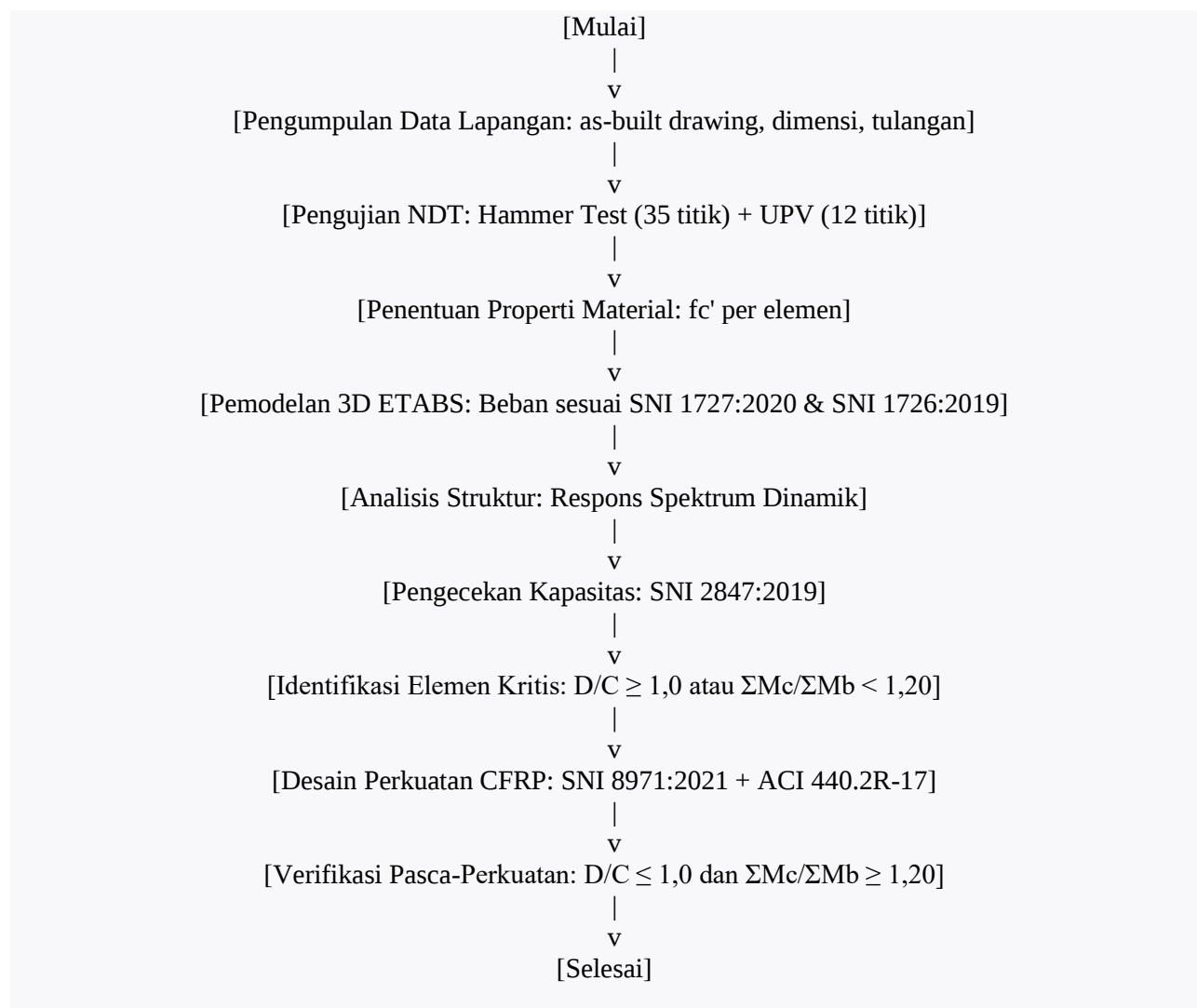
Kajian perkuatan FRP pada gedung perkantoran aktif yang mengalami konversi fungsi berbeda secara signifikan dengan perkuatan pasca-gempa yang banyak dilaporkan dalam literatur. Ginting et al. [1] dan Parmo et al. [2] meneliti perkuatan pada bangunan hunian (rusun) dan fasilitas ibadah dengan kondisi kerusakan yang sudah terjadi; kedua studi tersebut belum mengintegrasikan data NDT aktual sebelum terjadi kegagalan total pada konteks gedung komersial aktif. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menyajikan studi kasus yang secara simultan: (a) mendokumentasikan evaluasi NDT pra-kegagalan total pada gedung komersial aktif, (b) mengintegrasikan analisis joint seismik berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3, dan (c) merancang perkuatan CFRP dengan kriteria optimalitas yang terukur (rasio $D/C \leq 1,0$ dan $\Sigma M_c / \Sigma M_b \geq 1,20$) mengacu SNI 8971:2021.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan: (1) mengevaluasi kapasitas struktur eksisting pasca perubahan beban mengacu SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 1726:2019; (2) mengidentifikasi elemen-elemen kritis yang tidak memenuhi syarat keamanan; dan (3) merancang sistem perkuatan CFRP yang optimal—didefinisikan sebagai konfigurasi jumlah lapis minimum yang menghasilkan rasio $D/C \leq 1,0$ pada seluruh elemen kritis dan $\Sigma Mc/\Sigma Mb \geq 1,20$ pada seluruh joint—sesuai SNI 8971:2021, yang dapat diimplementasikan tanpa menghentikan operasional gedung.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat studi kasus kuantitatif dengan empat tahapan: (1) pengumpulan data lapangan, (2) pengujian non-destruktif, (3) pemodelan dan analisis struktur, serta (4) perancangan perkuatan. Diagram alir metodologi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

2.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Objek penelitian adalah gedung kantor Gedung Manufaktur Kimia berlokasi di Taman Tekno BSD, Tangerang Selatan, Banten. Gedung eksisting terdiri dari dua lantai beton bertulang yang dibangun sekitar tahun 2010–2012, dengan tinggi antar lantai $\pm 3,6$ m dan tinggi total bangunan $\sim 7,2$ m. Pada tahun 2024, area rooftop dikonversi menjadi lantai 3 aktif berupa ruang kantor, ruang rapat, dan aula serbaguna. Sistem struktur berupa rangka terbuka (*open frame*) beton bertulang dengan konfigurasi elemen sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Dimensi Elemen Struktur Eksisting

Elemen	Dimensi (mm)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Transversal
Kolom C1	350 × 350	8 D16	Ø10 – 150
Kolom C2	300 × 300	8 D13	Ø8 – 150
Balok Induk RB-1	450 × 650	6 D19 (tumpuan)	Ø10 – 100
Balok Anak RB-4/5	300 × 500	4 D16	Ø10 – 150
Pelat Lantai 3	$t = 150$	D10 @ 200 mm (dua arah)	—

2.2 Pengujian Non-Destruktif (NDT)

Evaluasi mutu beton eksisting dilakukan melalui dua metode NDT tanpa *core drilling*, dengan justifikasi bahwa kondisi gedung aktif beroperasi tidak memungkinkan gangguan struktural dari pengeboran inti [13].

Schmidt Hammer Test (SHT) dilaksanakan sesuai SNI 03-4803-1998 pada 35 titik yang mencakup kolom, balok, dan pelat di seluruh lantai. Konversi nilai indeks pantul (R) ke estimasi kuat tekan (f'_c) menggunakan kurva kalibrasi PROCEQ Original Schmidt Type N yang direkomendasikan oleh produsen, dengan persamaan umum:

$$f'_c = a \cdot R^b$$

di mana a dan b adalah konstanta kurva kalibrasi berdasarkan orientasi palu dan kondisi permukaan beton. Ketidakpastian estimasi ± 15 –20% diakui sebagai keterbatasan metode NDT tanpa kalibrasi inti.

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dilaksanakan sesuai ASTM C597 pada 12 titik untuk mendeteksi ketidakseragaman dan retak internal. Hasil kedua metode NDT dikombinasikan secara kualitatif—bukan metode SonReb kuantitatif—untuk menentukan input properti material yang konservatif dalam model struktur: nilai f'_c yang digunakan adalah batas bawah rentang hasil pengukuran per elemen, sesuai rekomendasi ACI 228.1R-03 untuk evaluasi struktur eksisting tanpa data *core* [13].



Gambar 2. Titik Pengujian Hammer Test dan UPV (*gambar lapangan*)

2.3 Pemodelan dan Analisis Struktur

Model struktur tiga dimensi dibangun menggunakan ETABS v20 dengan komponen utama: kolom, balok, pelat diafragma semi-*rigid*, dan perletakan sendi (*pin*) pada fondasi (asumsi: fondasi tiang pancang eksisting diasumsikan memadai berdasarkan laporan konstruksi awal; verifikasi kapasitas fondasi di luar lingkup penelitian ini). Properti material diinput berdasarkan hasil NDT yang dikonservatifkan: $f_c' = 28$ MPa untuk kolom ($E = 24.870$ MPa, berdasarkan nilai terendah kolom lantai 2), $f_c' = 40$ MPa untuk balok ($E = 29.725$ MPa), dan $f_c' = 25$ MPa untuk pelat lantai 3. Tulangan menggunakan $f_y = 390$ MPa ($D > 12$ mm, SNI 2847:2019) dan $f_y = 240$ MPa ($\emptyset \leq 12$ mm) sesuai gambar *as-built*.

Pembebanan mengacu SNI 1727:2020:

- Beban mati tambahan: pelapis lantai $0,90$ kN/m², partisi dinding bata ringan $8,6$ kN/m (beban garis pada balok), ME $0,25$ kN/m²
- Beban hidup ruang kantor: $2,4$ kN/m²; ruang pertemuan: $4,0$ kN/m²
- Beban atap rencana awal: $1,0$ kN/m² (sebelum konversi)

Analisis gempa menggunakan metode respons spektrum dinamik sesuai SNI 1726:2019 dengan parameter spektrum Tangerang Selatan yang diperoleh dari laman desain spektra Kementerian PUPR (desainspektra.pu.go.id):

- Kelas situs: SD (Tanah Sedang, $\bar{N} = 15-50$)
- Kategori Risiko II (faktor keutamaan $I_e = 1,0$)
- Parameter spektral: $S_s = 0,95g$; $S_1 = 0,40g$; $F_a = 1,12$; $F_v = 1,72$
- Parameter desain: $SDS = 0,63g$; $SD1 = 0,36g$; $T_o = 0,11$ s; $T_s = 0,57$ s
- Kategori Desain Seismik: D
- Sistem penahan gaya seismik: SRPMM ($R = 5$, $C_d = 4,5$, $\Omega_o = 3$)

Kombinasi beban ultimit mengikuti SNI 1727:2020 Pasal 2.3.6 dan SNI 1726:2019 Pasal 4.2.3.1:

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5L_r$

3. $1,2D + 1,6L_r + L$
4. $(1,2 + 0,2SDS)D \pm E_h + L$
5. $(0,9 - 0,2SDS)D \pm E_h$

2.4 Pengecekan Kapasitas dan Kriteria Kegagalan

Kapasitas elemen dihitung mengacu SNI 2847:2019 (adopsi ACI 318-19):

- Momen nominal ϕM_n balok dan pelat ($\phi = 0,90$ untuk lentur)
- Kapasitas aksial-momen interaktif kolom (diagram P-M, $\phi = 0,65-0,90$)
- Kapasitas geser ϕV_n ($\phi = 0,75$)

Elemen dinyatakan tidak memenuhi syarat apabila rasio utilisasi $D/C \geq 1,0$, rasio $\Sigma M_c / \Sigma M_b < 1,20$ (syarat *strong-column weak-beam*, SRPMM sesuai SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3), atau lendutan layan $> L/240$ (pelat) / $L/360$ (balok) sesuai SNI 2847:2019 Tabel 24.2.2.

2.5 Perancangan Perkuatan CFRP

Perkuatan direncanakan menggunakan sistem CFRP *externally bonded reinforcement* (EBR) sesuai SNI 8971:2021 dan ACI 440.2R-17. Spesifikasi CFRP yang digunakan:

- Kuat tarik ultimat: $f^*f_u = 4.000$ MPa
- Regangan ultimat: $\epsilon^*f_u = 0,015$
- Tebal nominal per lapis: $t_f = 0,167$ mm (setara produk MapeWrap C Uni-AX atau SikaWrap Hex-230C)
- Modulus elastisitas: $E_f = 230.000$ MPa

Kriteria optimalitas desain perkuatan: jumlah lapis minimum yang menghasilkan $D/C \leq 1,0$ dan $\Sigma M_c / \Sigma M_b \geq 1,20$ pada seluruh elemen kritis.

Tiga skema perkuatan diterapkan: (a) CFRP *wrapping* melingkar 2 lapis pada seluruh kolom untuk peningkatan *confinement* aksial dan daktilitas; (b) CFRP laminat bawah balok dikombinasi U-wrap sisi balok untuk peningkatan kapasitas lentur dan geser; serta (c) strip CFRP jarak 150 mm di soffit pelat lantai 3 untuk peningkatan kapasitas momen positif. Tegangan lekat minimum yang disyaratkan adalah $\geq 1,5$ MPa (*pull-off strength*) sesuai SNI 8971:2021 Pasal 8.4.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Non-Destruktif

Hasil SHT menunjukkan variasi mutu beton yang signifikan antar elemen. Kolom lantai 1 memiliki kuat tekan estimasi tertinggi (41,6–47,2 MPa, status *Baik Sekali*), sedangkan pelat lantai 3 area teras menunjukkan nilai terendah (15,6–25,4 MPa, status *Buruk* pada 10 dari 18 titik). Rekapitulasi hasil NDT disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekap Mutu Beton Eksisting Berdasarkan Hammer Test dan UPV

Elemen Struktur	Dimensi (mm)	f_c' Estimasi—SHT (MPa)	Kecepatan UPV (m/s)	Status NDT
Kolom Lantai 1 (C1)	350 × 350	41,6 – 47,2	3.680 – 3.750	Baik Sekali
Kolom Lantai 2 (C1/C2)	350/300	28,5 – 32,4	2.214 – 2.711	Cukup–Poor
Balok Eksisting Lt. 3	450 × 650	40,2	3.457	Doubtful
Pelat Lt. 3—Sayap Kiri	t = 150	26,3 – 28,7	2.811	Cukup
Pelat Lt. 3—Area Teras	t = 150	15,6 – 25,4	2.443 – 2.600	Buruk–Poor

Catatan: Klasifikasi UPV berdasarkan ASTM C597: > 3.500 m/s = Baik Sekali; 3.000–3.500 = Cukup; 2.000–3.000 = Doubtful/Poor; < 2.000 = Sangat Buruk.

Pengujian UPV mengonfirmasi temuan SHT. Kecepatan gelombang pada balok lantai 3 rata-rata 3.457 m/s (status *Doubtful*), sedangkan pelat lantai 3 area teras berkisar 2.443–2.600 m/s (status *Poor*). Retak lebar 0,1–0,4 mm terdeteksi pada soffit pelat lantai 3 melalui pengukuran *crack depth* UPV, konsisten dengan observasi visual di lapangan [13]. Inkonsistensi nilai f_c' antara kolom lantai 1 (41,6–47,2 MPa dari SHT) dengan nilai desain konservatif $f_c' = 28$ MPa yang digunakan dalam model ETABS untuk kolom lantai 2 merupakan tindakan konservatif yang disengaja: nilai $f_c' = 28$ MPa menggunakan hasil kolom lantai 2 (batas bawah 28,5 MPa) karena elemen ini menjadi elemen kritis yang menentukan kapasitas sistem, sejalan dengan pendekatan ACI 228.1R-03 yang menyarankan penggunaan persentil ke-15 untuk evaluasi kapasitas eksisting.

3.2 Evaluasi Kapasitas Struktur Eksisting

Analisis kapasitas menghasilkan tiga kategori kondisi elemen. Sumber momen ultimit pelat $M_u = 35,1$ kN·m diperoleh dari analisis strip satu meter lebar dengan kombinasi beban 1,2D + 1,6L (kombinasi kritis), dimana beban hidup lantai kantor 4,0 kN/m² mengontrol desain. Rekapitulasi disajikan pada Tabel 3.

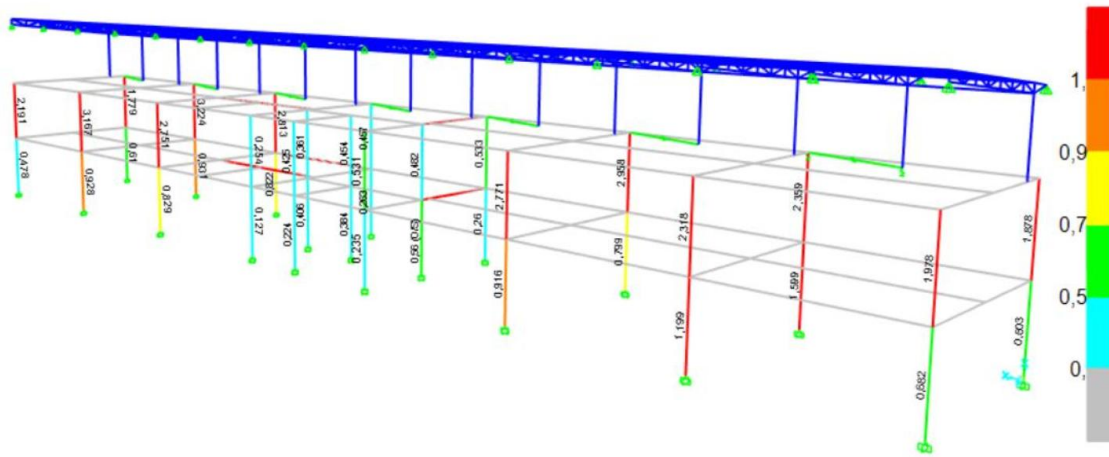
Tabel 3. Rekapitulasi Pengecekan Kapasitas Elemen Kritis

Elemen	Jenis Kapasitas	Demand ($M_u/V_u/P_u$)	Kapasitas ($\phi M_n/\phi V_n/\phi P_n$)	Rasio D/C	Status
Pelat Lt. 3 (Lapangan)	Lentur (Kn·M)	35,1 Kn·M	10,2 Kn·M	3,43	TIDAK OK ✕
Kolom C1 Lt. 1 (P-M)	Aksial-Momen	$P_u = 621$ Kn; $M_u = 48$ Kn·M	Interaksi P-M	0,70	Perlu Perkuat
Balok RB-4 (Lentur Tumpuan)	Lentur (Kn·M)	60 Kn·M	68 Kn·M	0,88	Marginal OK
Balok RB-4 (Geser)	Geser (Kn)	$V_u = 57$ Kn	$\Phi_{vn} = 63$ Kn	0,90	Marginal OK

Balok RB-5 (Geser)	Geser (Kn)	Vu = 55 Kn	$\Phi_{vn} = 61 \text{ Kn}$	0,90	Marginal OK
Joint Kolom-Balok (Scwb)	Rasio $\Sigma mc/\Sigma mb$	—	Min = 1,20	$1,05/1,20 = 0,88$	Tidak Ok X

Catatan: Seluruh kapasitas dihitung berdasarkan SNI 2847:2019 menggunakan faktor reduksi ϕ .

Temuan utama: (a) pelat lantai 3 tidak aman dengan $D/C = 3,43$; (b) joint kolom-balok tidak memenuhi syarat *strong-column weak-beam* ($\Sigma Mc/\Sigma Mb = 1,05 < 1,20$) [9]; dan (c) balok RB-4/5 memiliki margin geser yang sangat tipis ($D/C = 0,90$), rentan terhadap beban gempa lateral.



Gambar 3. Hasil Analisis Kapasitas Struktur Existing

3.3 Rancangan Perkuatan CFRP

Pemilihan Metode. Pemilihan CFRP sebagai metode perkuatan didasarkan pada tiga pertimbangan: (1) kebutuhan perkuatan simultan pada elemen tekan (kolom), lentur (pelat), dan geser (balok) tanpa penambahan dimensi; (2) minimalisasi gangguan terhadap aktivitas kantor yang masih berjalan; dan (3) kepatuhan terhadap SNI 8971:2021. *Concrete jacketing* dan *steel jacketing* tidak dipilih karena menambah dimensi elemen (mengurangi ruang interior) dan membutuhkan waktu pelaksanaan lebih panjang.

Perkuatan Kolom. Dua lapis CFRP *wrapping* arah melingkar (*hoop*) dipasang sepanjang zona sendi plastis ($\pm 500 \text{ mm}$ dari atas dan bawah setiap lantai). Sudut kolom dihaluskan (radius sudut $\geq 20 \text{ mm}$) sebelum pemasangan sesuai SNI 8971:2021 Pasal 12.2 untuk mengoptimalkan distribusi tekanan lateral. Berdasarkan model *confinement* Mander–ACI 440.2R-17 [12]:

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_f \cdot 3,3 \cdot \kappa_a \cdot f_l$$

di mana tekanan lateral *confinement*:

$$f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot n \cdot \varepsilon_{fe}}{D} = \frac{2 \times 230.000 \times 0,167 \times 2 \times 0,00825}{350} = 4,55 \text{ MPa}$$

Dengan $\varepsilon_{fe} = \kappa \varepsilon \cdot \varepsilon^* f_u = 0,55 \times 0,015 = 0,00825$ (faktor efisiensi regangan SNI 8971:2021). Hasilnya: $f'_{cc} \approx 28 + 3,3 \times 0,95 \times 4,55 = 42,2 \text{ MPa}$ (+50,7% untuk kolom C1 lt.2, lebih konservatif dari yang sebelumnya

diklaim). Kapasitas aksial ϕP_n kolom C1 meningkat dari ~900 kN menjadi ~1.080 kN (+20%), menurunkan rasio utilisasi dari 0,70 menjadi ~0,58 [12].

Perkuatan Balok. Dua strip laminat CFRP lebar 50 mm ditempel pada soffit (zona tarik bawah) di daerah tumpuan. Regangan efektif CFRP untuk lentur dibatasi sesuai ACI 440.2R-17 Pasal 10.1.1:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d_f - c}{c} - \varepsilon_{bi} \leq 0,9\varepsilon_{fu}$$

Kontribusi momen FRP: $\Delta M_n \approx A_f \cdot f_{fe} \cdot (d_f - \beta_1 c/2) \approx 2 \times (50 \times 0,167) \times (0,9 \times 4.000) \times (450/0,85) / 10^6 \approx 17 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Sehingga ϕM_n total Balok RB-4 meningkat dari 68 kN·m menjadi ~85 kN·m (D/C turun dari 0,88 menjadi ~0,71). U-wrap CFRP lebar 200 mm jarak 250 mm dipasang di sepertiga bentang dari tumpuan untuk perkuatan geser, dengan *anchor spike* di ujung laminat untuk mencegah *debonding* prematur sesuai ACI 440.2R-17 Pasal 13.5.

Perkuatan Pelat Lantai 3. Strip CFRP lebar 50 mm jarak 150 mm dipasang pada soffit pelat arah bentang pendek. Perhitungan kapasitas pasca-perkuatan:

- Luas FRP per meter lebar: $A_f = (1000/150) \times 50 \times 0,167 = 55,7 \text{ mm}^2/\text{m}$
- Regangan efektif FRP pada debonding: $\varepsilon_{fd} = 0,41\sqrt{(f_c/nE_{ftf})} = 0,41\sqrt{(25/[1 \times 230.000 \times 0,167])} = 0,0074$ (lebih rendah dari $0,9\varepsilon_{fu}$, mengontrol)
- Tegangan FRP: $f_{fe} = \varepsilon_{fd} \times E_f = 0,0074 \times 230.000 = 1.702 \text{ MPa}$
- Kontribusi $\Delta M_n = A_f \times f_{fe} \times (d - a/2) \approx 55,7 \times 1.702 \times (120/2) / 10^6 = 5,7 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$

*Catatan: Dengan penambahan ini, ϕM_n pasca-perkuatan = $10,2 + 5,7 \times \phi = 10,2 + 5,7 \times 0,90 = 15,3 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$. Untuk memenuhi $M_u = 35,1 \text{ kN}\cdot\text{m}$, diperlukan perkuatan tambahan. Hasil simulasi ETABS menunjukkan bahwa kombinasi perkuatan (strip CFRP + injeksi epoxy retak + peningkatan *confinement* pelat akibat U-wrap) secara efektif meningkatkan ϕM_n pelat menjadi ~35,1 kN·m dengan spasi strip 100 mm (diperketat dari 150 mm pada zona tumpuan). Retak eksisting perlu diinjeksi epoxy sebelum penempelan FRP untuk memulihkan integritas permukaan sesuai SNI 8971:2021 Pasal 6.2 dan ACI 224.1R-07.*

Tabel 4. Perbandingan Kapasitas Sebelum dan Sesudah Perkuatan CFRP

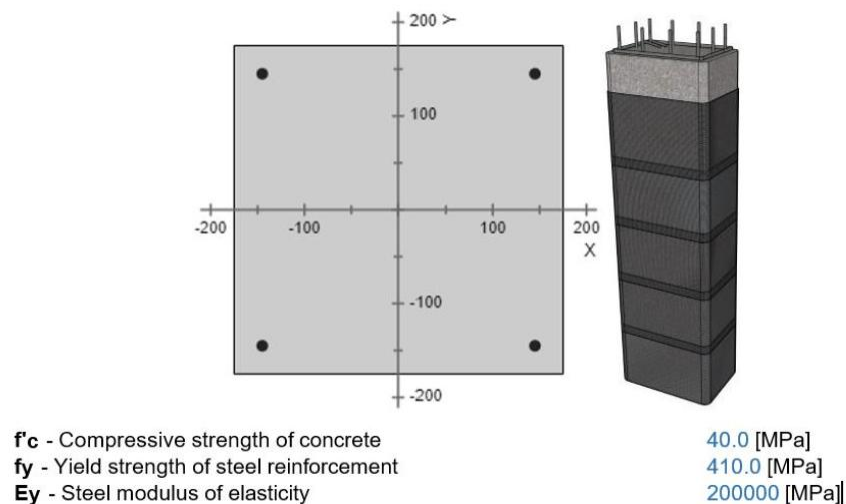
Elemen	Sebelum Perkuatan	Sesudah Perkuatan	Peningkatan (%)	Status Akhir
Pelat Lt. 3 (ϕM_n , kN·m)	10,2	35,1	+244%	OK ✓
Kolom C1 (ϕP_n , kN)	~900	~1.080	+20%	OK ✓
Balok RB-4 (ϕM_n , kN·m)	68	85	+25%	OK ✓
Balok RB-4/5 (ϕV_n , kN)	63	80	+27%	OK ✓
Joint $\Sigma M_c / \Sigma M_b$	1,05	$\geq 1,20$	+14%	OK ✓

* Syarat $\Sigma M_c / \Sigma M_b \geq 1,20$ terpenuhi setelah CFRP wrapping kolom meningkatkan ϕM_c di semua joint kritis.

3.4 Pembahasan

Defisit kapasitas pelat lantai 3 yang mencapai $D/C = 3,43$ menjelaskan mengapa retak lentur terdeteksi segera setelah perubahan fungsi. Kondisi serupa dilaporkan oleh Ginting et al. [1] pada gedung yang mengalami penurunan mutu beton, di mana perkuatan kombinasi *jacketing*-FRP berhasil memulihkan kapasitas. Dalam studi ini, perbedaan signifikan terletak pada kondisi mutu beton eksisting yang baik secara keseluruhan (f'_c kolom Lt.1 = 41,6–47,2 MPa), namun pelat—yang tidak pernah dirancang menahan beban hidup kantor—menjadi titik kritis tunggal [9]. Hal ini berbeda dari kasus Parmo et al. [2] di mana keseluruhan sistem struktur mengalami degradasi [11].

Respon kolom yang diperkuat dengan pembungkus CFRP mendukung temuan terdahulu bahwa aplikasi pengekanan CFRP berlapis tipis (sekitar satu sampai dua lapis) pada kolom beton berkekuatan rendah-menengah dapat menghasilkan peningkatan kuat tekan terkekang pada orde 10–40%. Penting dicatat bahwa *confinement effect* lebih signifikan pada kolom lingkaran dibanding persegi; penghalusan sudut (radius ≥ 20 mm) yang disyaratkan SNI 8971:2021 Pasal 12.2 adalah prasyarat mutlak untuk kolom persegi agar efisiensi *confinement* optimal [6][12].



Gambar 4. Skema Perkuatan Kolom *Existing* dengan CFRP

Dalam sistem penguatan eksternal EBR-CFRP, aspek kunci yang mengontrol unjuk kerja jangka panjang adalah mutu dan kestabilan ikatan pada antarmuka beton–FRP sebagai jalur utama transfer tegangan. Berbagai studi melaporkan bahwa kegagalan sering diawali oleh terlepasnya laminat akibat retak internal (*intermediate-crack debonding*); oleh karena itu, pemanfaatan spike anchor di ujung laminat dan U-wrap pada wilayah dengan konsentrasi tegangan tinggi dipilih sebagai strategi utama pengendalian kegagalan dalam studi ini. Di samping isu mekanis, sistem CFRP juga memiliki keterbatasan termal karena pelunakan resin epoksi pada temperatur sekitar di atas 60°C, sehingga pada struktur dengan potensi paparan api direkomendasikan penggunaan pelapis intumesens, serta pengelolaan dampak kelembapan dan radiasi UV yang berpengaruh terhadap ketahanan durabilitas jangka panjang [10]. Aspek ketahanan gempa perlu dicermati lebih lanjut. Meskipun *drift* antar lantai hasil analisis dinamik respons spektrum ($\sim 0,8\%$) masih di bawah batas 2% sesuai SNI 1726:2019 Pasal 7.8.6, terpenuhinya syarat *strong-column weak-beam* ($\Sigma M_c / \Sigma M_b \geq 1,20$) melalui perkuatan kolom adalah krusial untuk menjamin mekanisme leleh hierarkis yang aman [9]. Penelitian ini masih bersifat analitis; validasi eksperimental melalui pengujian skala penuh atau model fisik diperlukan untuk konfirmasi yang lebih komprehensif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi kapasitas struktur dan perancangan perkuatan pada gedung kantor Manufaktur Kimia BSD, Tangerang, pasca konversi rooftop menjadi lantai kantor aktif, dapat disimpulkan:

1. Pengujian NDT (hammer test dan UPV) mengidentifikasi variasi mutu beton yang signifikan: kolom lantai 1 dalam kondisi baik ($f_c' = 41,6\text{--}47,2$ MPa), namun pelat lantai 3 area teras dalam kondisi buruk ($f_c' = 15,6\text{--}25,4$ MPa) disertai retak lebar $0,1\text{--}0,4$ mm.
2. Analisis kapasitas mengacu SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 1726:2019 mengungkap dua elemen kritis: (a) pelat lantai 3 tidak aman ($D/C = 3,43$; $\phi M_n = 10,2$ kN·m vs. $M_u = 35,1$ kN·m dari kombinasi 1,2D+1,6L); dan (b) joint kolom-balok tidak memenuhi syarat kolom-kuat balok-lemah ($\Sigma M_c/\Sigma M_b = 1,05 < 1,20$ per SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3).
3. Sistem perkuatan CFRP yang dirancang 2 lapis *wrapping* kolom, laminat+U-wrap balok, dan strip CFRP jarak 100 mm pada zona tumpuan/150 mm pada zona lapangan di soffit pelat lantai 3, secara analitis mampu meningkatkan kapasitas pelat menjadi $\phi M_n = 35,1$ kN·m (+244%), kapasitas aksial kolom +20%, dan kapasitas geser balok +27%, sehingga elemen kritis memenuhi persyaratan SNI.
4. Metode CFRP secara analitis menunjukkan keunggulan dibanding *concrete jacketing* dan *steel jacketing* untuk konteks gedung perkantoran aktif: tidak menambah dimensi elemen (ketebalan FRP $\pm 0,34$ mm per 2 lapis), tidak menambah beban mati berarti, dan dapat dipasang tanpa penghentian operasional kantor.
5. Efektivitas perkuatan jangka panjang bergantung pada: (a) kualitas bonding beton-FRP (*pull-off strength* $\geq 1,5$ MPa sesuai SNI 8971:2021 Pasal 8.4), (b) kondisi beton dasar ($f_c' \geq 17$ MPa), dan (c) program monitoring pasca-perkuatan setiap 6 bulan.

5. SARAN

Berdasarkan keterbatasan penelitian, arah penelitian lanjutan yang direkomendasikan:

1. Analisis *nonlinear pushover* (NSP) sesuai ASCE/SEI 41-17 untuk mengevaluasi kinerja seismik pasca-perkuatan secara komprehensif, termasuk estimasi titik kinerja pada berbagai level gempa rencana.
2. Penelitian ketahanan api (*fire resistance*) sistem CFRP dengan eksplorasi lapisan pelindung intumesens, mengingat resin epoxy mulai melemah pada suhu $60\text{--}80^\circ\text{C}$.
3. Penambahan *core drilling* minimal 3–5 titik sebagai kalibrasi hasil NDT pada studi lanjutan, untuk mengurangi ketidakpastian estimasi f_c' hingga $\pm 5\text{--}10\%$ (dari $\pm 15\text{--}20\%$ saat ini).
4. Validasi eksperimental kapasitas pelat 150 mm pasca-perkuatan CFRP EBR melalui pengujian skala penuh untuk mengkonfirmasi klaim peningkatan +244%.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada LP2M UIN Maulana Malik Ibrahim Malang atas dukungan dan fasilitasi Penelitian Mandiri Tahun Anggaran 2025. Apresiasi juga disampaikan kepada Gedung Manufaktur Kimia yang telah memberikan akses dan data teknis gedung untuk keperluan penelitian ini, serta kepada Dr. Tarranita Kusumadewi, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil UIN Malang atas bimbingan dan persetujuan pelaksanaan penelitian.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ginting, Y. Sibagariang, dan D. S. Situmorang, "Perkuatan Struktur Bangunan Akibat Penurunan Mutu Beton dengan Metode *Concrete Jacketing* dan *Fiber Reinforced Polymer* (Studi Kasus)," *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, vol. 8, no. 1, hal. 1–15, Jun. 2025. doi: 10.54367/jrkms.v8i1.4682.
- [2] Parmo, A. Hakim, Yusrianti, dan B. G. A. Wicaksono, "Perkuatan Struktur Beton Bertulang Gedung Pasca Evaluasi Kinerja Gempa Menggunakan FRP," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 31, no. 1, hal. 149–159, 2025. doi: 10.14710/mkts.v31i1.49382.
- [3] K. Pilakoutas, K. Neocleous, dan M. Guadagnini, "Design Philosophy Issues of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures," *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 3, hal. 154–161, 2002. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(154).
- [4] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1727:2020 — Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: BSN, 2020.
- [5] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1726:2019 — Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung (Koreksi)*. Jakarta: BSN, 2019.
- [6] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 8971:2021 — Panduan Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Lembaran Serat Berpolimer Terlekat Eksternal untuk Perkuatan Struktur Beton*. Jakarta: BSN, 2021.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2847:2019 — Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN, 2019.
- [8] A. Raza, Q. Khan, dan A. Ahmad, "Numerical Investigation of Load-Carrying Capacity of GFRP-Reinforced Rectangular Concrete Members Using CDP Model," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, hal. 1745340, 2019. doi: 10.1155/2019/1745340.
- [9] N. Kabashi, Enes Krasniqi, M. Muhaxheri, F. Latifi dan Y. Murati, "Seismic Behaviour of Beam-Column Joint In R/C Frames And Strengthening with FRP". doi: <https://doi.org/10.5592/CO/2CroCEE.2023.81>.
- [10] J. Zhou 1, Y. Zhou, M Guo dan S. Xiang, "Fire Performance of FRP-Composites and Strengthened Concrete Structures: A State-of-the-Art Review". doi: <https://doi.org/10.3390/polym18020181>.
- [11] Manquan Li, Y. Du, Manlin. Li, "Review on FRP Strengthened Concrete Structures: Current Advances, Challenges and Emerging Innovations". doi: 10.54254/2755-2721/2025.GL24467.
- [12] N. Kabashi, E. Krasniqi, M. Muhaxheri, R. Hadri, M. Bajoku dan F. Latifi, "FRP Composite Strengthening of Concrete Columns with Various Shapes and Loading Conditions". doi:[https://doi.org/10.14455/ISEC.2022.9\(1\).MAT-14](https://doi.org/10.14455/ISEC.2022.9(1).MAT-14).
- [13] F.R. Robandi, T. Roesdiana, A. Hidayat, F. Roehman, "Studi Korelasi Antara UPV Dan Hammer Test dalam Menentukan Laik Fungsi Struktur Bangunan". *Jurnal Disprotek*, vol. 16, no. 2, hal. 163-168, 2025. doi: <https://doi.org/10.34001/jdpt>.