

PERENCANAAN PERKUATAN STRUKTUR GEDUNG RSUD SURADADI AKIBAT PENAMBAHAN LANTAI DENGAN FIBER REINFORCED POLYMER

STRUCTURAL REINFORCEMENT PLANNING FOR THE SURADADI REGIONAL GENERAL HOSPITAL DUE TO THE ADDITION OF A FLOOR USING FIBER-REINFORCED POLYMER

Irkham Fauzi¹, Antonius², Abdul Rochim²

¹ Mahasiswa Prodi Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung

² Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung

Email: irkhamfauzi85@gmail.com¹

ABSTRACT

This study analyzes the structural performance of the Suradadi Regional General Hospital (RSUD) ICU–PICU–NICU building following an expansion from three to five stories and determines the strengthening requirements using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Modeling was conducted using ETABS v20.10 in accordance with SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, and SNI 1726:2019. Analysis results indicate a 48%–52% increase in column axial loads due to the additional stories; this caused the demand-to-capacity ratios of columns K1, K2, and K3 to exceed 1.0, meaning the existing structure no longer met strength requirements. The application of CFRP via a confinement mechanism was shown to increase column axial capacity by 23.5%–30.6%, depending on the number of layers; consequently, the demand-to-capacity ratio dropped below 1.0, restoring the elements to a safe condition. Configuration evaluations revealed that the required number of CFRP layers varied by column type, depending on the initial demand-to-capacity ratio. Thus, CFRP strengthening is considered capable of addressing element failure resulting from the additional stories and is a viable solution for ensuring structural safety, noting that this study was limited to column elements and did not analyze the foundation or other structural elements in detail.

Keywords: CFRP, additional stories, ETABS, strengthening, column

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis kinerja struktur Gedung ICU–PICU–NICU RSUD Suradadi akibat penambahan lantai dari tiga menjadi lima lantai serta menentukan kebutuhan perkuatan menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Pemodelan dilakukan dengan ETABS v20.10 mengacu pada SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 1726:2019. Hasil analisis menunjukkan peningkatan gaya aksial kolom sebesar 48%–52% akibat penambahan lantai, yang menyebabkan rasio kapasitas (*demand-to-capacity ratio*) kolom K1, K2, dan K3 melampaui 1,0 sehingga struktur eksisting tidak lagi memenuhi persyaratan kekuatan. Penerapan CFRP melalui mekanisme *confinement* terbukti meningkatkan kapasitas aksial kolom sebesar 23,5%–30,6% tergantung jumlah lapisan, sehingga rasio kapasitas turun menjadi kurang dari 1,0 dan elemen kembali ke kondisi aman. Evaluasi konfigurasi menunjukkan bahwa jumlah lapisan CFRP yang dibutuhkan berbeda antar tipe kolom, bergantung pada tingkat rasio kapasitas awal. Dengan demikian, perkuatan CFRP dinilai mampu mengatasi kegagalan elemen akibat penambahan lantai dan layak diterapkan untuk memastikan keamanan struktur, dengan catatan bahwa penelitian ini terbatas pada elemen kolom dan tidak menganalisis fondasi serta elemen struktur lainnya secara rinci.

Kata kunci: CFRP, penambahan lantai, ETABS, perkuatan, kolom

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk dan aktivitas sosial ekonomi yang semakin pesat. Dalam konteks tersebut, kebutuhan terhadap ruang vertikal menjadi semakin penting karena ketersediaan lahan yang terbatas di kawasan perkotaan (Park & Paulay, 1991). Peningkatan jumlah lantai bangunan merupakan salah satu solusi efisien untuk memenuhi kebutuhan ruang tanpa perlu memperluas tapak bangunan. Namun demikian, penambahan lantai juga menimbulkan konsekuensi terhadap kinerja struktur bangunan karena meningkatnya beban mati, beban hidup, dan gaya lateral seperti angin serta gempa (SNI 1726:2019; SNI 1727:2020). Dalam konteks perencanaan wilayah dan kota, penambahan lantai pada bangunan eksisting menjadi alternatif yang lebih efisien dibandingkan ekspansi horizontal, terutama pada kawasan padat dengan keterbatasan lahan. Namun, keputusan *vertical extension* harus disertai evaluasi struktur yang memadai agar keberlanjutan fungsi bangunan tetap terjamin.

Beban tambahan akibat penambahan lantai dapat menimbulkan ketidakseimbangan sistem struktur, khususnya pada elemen kolom dan pondasi yang berperan utama dalam menahan gaya aksial vertikal. Jika tidak dilakukan evaluasi dan perkuatan yang memadai, hal ini dapat mengakibatkan penurunan kapasitas struktur, deformasi berlebih, hingga potensi keruntuhan (Tandelilin et al., 2018). Oleh karena itu, diperlukan suatu metode perkuatan yang tidak hanya meningkatkan kapasitas beban tetapi juga mempertahankan integritas struktur eksisting tanpa mengganggu fungsi bangunan. Pada bangunan rumah sakit, gangguan fungsi bangunan akibat perkuatan menjadi perhatian khusus karena pelayanan kesehatan harus tetap berjalan. Perkuatan dengan CFRP memiliki keunggulan dalam hal ini karena tidak memerlukan perubahan dimensi elemen secara signifikan, sehingga ruang fungsional bangunan tidak banyak berkurang.

Seiring dengan perkembangan teknologi material, inovasi dalam bidang rekayasa struktur telah menghasilkan berbagai jenis material baru dengan kekuatan spesifik yang tinggi, salah satunya adalah *Fiber Reinforced Polymer* (FRP). Material ini terdiri dari serat dengan matriks polimer yang memiliki sifat ringan, tahan korosi, serta memiliki kekuatan tarik tinggi (Ketut Sudarsana et al., 2008). Penggunaan FRP dalam perkuatan struktur beton bertulang semakin meluas karena keunggulannya dibandingkan baja, terutama dalam hal ketahanan terhadap lingkungan agresif dan kemudahan aplikasi di lapangan (Christiawan, 2009; Kumar, 2016).

Dalam penerapannya, *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) merupakan jenis FRP yang paling banyak digunakan karena memiliki modulus elastisitas dan kekuatan tarik yang tinggi dibandingkan dengan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) atau *Aramid Fiber Reinforced Polymer* (AFRP) (Bayu Saputra & Rusli Ahyar, 2023). Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa pemasangan CFRP pada elemen struktur beton mampu meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan daktilitas, khususnya pada kolom yang dikekang (Parikh & Patel, 2016; Rao & Husain, 2016). Selain itu, CFRP juga dapat berfungsi sebagai *confinement* yang efektif untuk meningkatkan kekuatan tekan kolom tanpa menambah dimensi elemen (Hioe, 2017). Mekanisme *confinement* ini bekerja dengan memberikan tekanan lateral pada beton melalui serat CFRP, sehingga beton berada dalam kondisi tegangan triaksial yang meningkatkan kuat tekan dan daktilitasnya. Pemahaman terhadap mekanisme ini penting untuk menjelaskan mengapa CFRP dapat meningkatkan kapasitas kolom meskipun tidak menambah dimensi penampang.

Bangunan yang menjadi objek penelitian ini adalah Gedung ICU–PICU–NICU RSUD Suradadi di Kabupaten Tegal, yang direncanakan mengalami penambahan jumlah lantai dari tiga menjadi lima lantai. Perubahan ini menimbulkan peningkatan beban aksial yang signifikan pada elemen kolom dan pondasi, sehingga memerlukan analisis ulang terhadap kemampuan struktur eksisting untuk menahan beban tambahan tersebut. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan lantai tanpa perkuatan dapat menyebabkan struktur kolom dan pondasi tidak mampu menahan beban tambahan, sehingga perkuatan struktur menjadi kebutuhan mutlak (Horse & Saputra, 2024). Namun, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada bangunan komersial atau hunian, sementara bangunan rumah sakit memiliki karakteristik beban dan tingkat kepentingan yang berbeda. Bangunan rumah sakit termasuk dalam kategori risiko gempa yang lebih tinggi dibandingkan bangunan biasa karena fungsi pelayanan kesehatan yang harus tetap berjalan pasca-bencana. Selain itu, ruang ICU–PICU–NICU memiliki beban peralatan medis dan tuntutan akustik serta kebersihan yang lebih tinggi dibandingkan ruang biasa.

Berdasarkan sintesis penelitian terdahulu, terdapat beberapa kesenjangan yang belum banyak dibahas. Pertama, sebagian besar penelitian perkuatan CFRP berfokus pada bangunan gedung umum, sementara kajian pada bangunan rumah sakit dengan tingkat kepentingan khusus masih terbatas. Kedua, penelitian yang ada umumnya menyajikan hasil perkuatan secara deskriptif tanpa menjelaskan mekanisme *confinement* secara rinci dan tanpa membandingkan hasil dengan standar desain internasional seperti ACI 440.2R

atau *fib* Bulletin 14. Ketiga, optimasi jumlah lapisan CFRP berdasarkan tingkat rasio kapasitas awal elemen belum banyak dibahas secara sistematis. Keempat, keterkaitan antara kekuatan struktur dan keberlanjutan fungsi bangunan publik di kawasan perkotaan belum banyak diangkat dalam literatur teknik sipil.

Melihat kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada perencanaan kekuatan struktur gedung RSUD Suradadi akibat penambahan lantai menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Analisis dilakukan untuk mengetahui dasar pertimbangan pemilihan jenis CFRP yang tepat, menilai kinerja material tersebut terhadap peningkatan beban, serta merencanakan kekuatan optimal pada elemen kolom. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis struktur dengan optimasi jumlah lapisan CFRP berdasarkan tingkat kritis masing-masing kolom, serta penekanan pada keberlanjutan fungsi bangunan rumah sakit sebagai bagian dari infrastruktur perkotaan. Penelitian ini juga diharapkan memberikan kontribusi praktis bagi perencanaan kekuatan bangunan eksisting pada kawasan perkotaan dengan keterbatasan lahan, di mana *vertical extension* menjadi alternatif yang lebih efisien dibandingkan pembangunan baru.

a) Tinjauan Pustaka

Perkuatan struktur dibutuhkan apabila terdapat penambahan kuantitas elemen struktur, seperti penambahan lantai bangunan. Penambahan lantai mengakibatkan pembebanan menjadi lebih besar dari kapasitas beban rencana sebelumnya, sehingga gaya-gaya dalam yang bekerja juga semakin besar. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan struktur, terkhusus struktur kolom. Agar sistem *strong column weak beam* tetap bekerja dengan baik, diperlukan inovasi terbaru di mana penambahan dimensi tidak dapat dilaksanakan. Seiring berkembangnya teknologi, nilai ekonomis FRP menjadi semakin tinggi (Tandelilin et al., 2018). Pemasangan FRP pada struktur kolom dapat berupa *confinement* yang dapat menambah kuat tekan dan daktilitas kolom yang dikekangnya. Oleh karena itu, kekuatan ultimit dari suatu kolom yang diberi FRP terhadap gaya aksial yang ditimbulkan akibat penambahan lantai menjadi fokus utama pada penelitian ini.

1) Jenis–Jenis Fiber Reinforced Polymer

Secara umum, bahan serat yang digunakan pada FRP ada 3 jenis serat yaitu carbon, aramid dan glass (Christiawan, 2009). Penggunaan FRP sebagai perkuatan pada balok beton bertulang telah diklarifikasi melalui eksperimen dan hasilnya bahwa penggunaan

material FRP baik CFRP, AFRP dan GFRP mampu meningkatkan kapasitas balok tersebut (Kumar, 2016; Lakshmi, 2016) (Parikh & Patel, 2016; Rao & Husain, 2016; Sallal & Rajan, 2016; Syofyan, 2016).

Jenis serat FRP yang dipakai pada gedung objek penelitian ini adalah serat *carbon*. Berikut ini adalah 3 (tiga) jenis produk *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (Hioe, 2017) :

- *Plate (strip)*
- *Fabric (wrap)*
- *Rod (tulangan)*

Perkuatan struktur bangunan harus dipertimbangkan ketika sebuah bangunan mengalami perubahan atau penambahan dalam segi pembebanan yang dapat berupa penambahan lantai gedung, alih fungsi bangunan, perubahan tata ruang bangunan. Hal ini dapat menyebabkan beban tambahan pada elemen struktur bangunan eksisting seperti kolom, balok, dan pondasi. Metode yang digunakan pada penelitian yaitu pemodelan dengan bantuan aplikasi ETABS v20.10. Hasil penelitian menunjukkan elemen struktur kolom dan pondasi tidak mampu menahan beban tambahan dan diperlukan perkuatan (Horse & Saputra, 2024).

Dari ketiga jenis *Fiber Reinforced Polymer* diatas, yang dapat difungsikan sebagai *confinement* yang bisa menambah kuat tekan dan daktilitas kolom yang dikekang adalah jenis Produk CFRP *Fabric (wrap)*. CFRP *Fabric (wrap)* adalah anyaman serat carbon 2 arah untuk proses aplikasi kering. Diproduksi dengan serat anyaman menyilang yang rapat dan ketat menjadi lembaran yang stabil. Penggunaan CFRP akan lebih populer dibandingkan dengan jenis FRP lainnya seperti glass dan aramid (Bayu Saputra & Rusli Ahyar, 2023)

Namun pada penelitian ini, penulis menggunakan SNI 8971:2021 sebagai rujukan teknis yang dapat digunakan sebagai panduan perancangan dan pelaksanaan sistem lembaran serat berpolimer terlekat eksternal (*strip* dan *wrap*) untuk perkuatan struktur beton.

2) Spesifikasi Teknis CFRP Plate (strip) dan Fabric (wrap)

CFRP *Plate (strip)* dan *Fabric (wrap)* mempunyai kuat tarik yang lebih besar dari baja tulangan, yaitu senilai 2800 MPa, serta memiliki kekakuan yang tinggi, dimana modulus elastisitasnya (E) 234.000 MPa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan ringan dengan berat 1,5 g/cm³

jika dibandingkan dengan berat jenis baja adalah 7850 kg/m³, serta mudah pemasangannya.

3) Sifat Fisik

Secara umum, CFRP tersedia dalam dua bentuk utama, yaitu CFRP Plate (strip) dan CFRP Fabric (wrap). Kedua jenis material tersebut memiliki fungsi dan karakteristik yang berbeda dalam aplikasi struktural. CFRP Plate umumnya digunakan untuk memperkuat elemen struktur lentur seperti balok atau pelat, sedangkan CFRP Fabric digunakan dengan metode pembungkus (*wrapping*) untuk meningkatkan kapasitas geser, daktilitas, atau ketahanan terhadap beban siklik pada kolom maupun elemen struktural lainnya.

Dengan memahami sifat, keunggulan, serta teknik aplikasi dari kedua jenis material ini, perencana dan pelaksana proyek dapat memilih solusi perkuatan yang tepat sesuai kebutuhan struktur dan kondisi lapangan.

a) Massa Jenis Material CFRP Plate (strip) dan Fabric (wrap)

CFRP Plate (*strip*) dan *Fabric (wrap)* memiliki massa jenis empat hingga enam kali lebih ringan dibandingkan dengan baja.

Tabel 1. Massa Jenis Material CFRP Plate (strip) dan Fabric (wrap)

Baja (g/cm ³)	Kaca (GFRP) (g/cm ³)	Karbon (CFRP) (g/cm ³)	Aramid (AFRP) (g/cm ³)
7,9	1,2 s/d 2,1	1,5 s/d 1,6	1,2 s/d 1,5

Sumber: (SNI 8971, 2021)

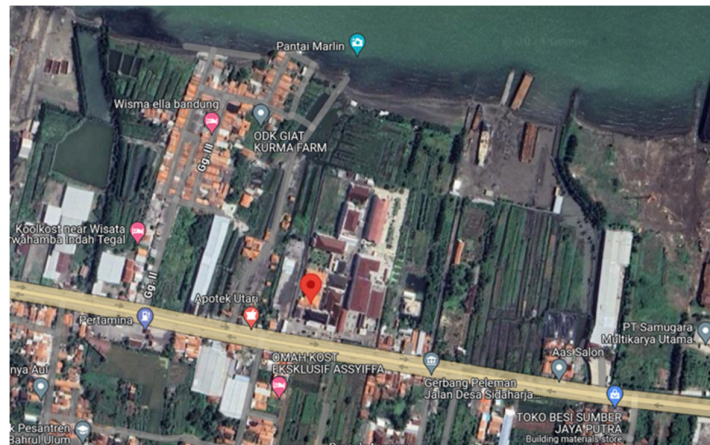
b) Pengaruh Suhu Terhadap CFRP Plate (strip) dan Fabric (wrap)

Di atas suhu transisi gelas T_g , modulus elastisitas polimer berkurang secara signifikan karena struktur molekulnya berubah. Nilai T_g tergantung dari jenis resin yang dipakai, biasanya nilainya berkisar antara 60 hingga 82°C. Dalam material komposit FRP, serat yang menunjukkan sifat termal yang lebih baik daripada resin dapat lebih baik untuk menahan beberapa beban longitudinal sampai ambang suhu serat tercapai. Ambang ini tercapai jika suhu melebihi 1000°C untuk serat karbon. Namun, karena berkurangnya transfer gaya antara serat melalui lekatan ke resin, sifat tarik dari keseluruhan material komposit FRP berkurang. Hasil pengujian telah menunjukkan bahwa suhu 250°C – suhu yang jauh lebih tinggi dari T_g resin - akan mengurangi kekuatan tarik GFRP dan CFRP lebih dari 20 persen (Kumahara et al., 1993). Sifat lain yang dipengaruhi oleh penyaluran geser melalui resin, seperti kekuatan lentur, berkurang secara signifikan pada suhu yang

lebih rendah (Ningyun & Evans, 1995). Untuk sistem FRP dengan aplikasi lekatan yang kritis, sifat-sifat polimer pada antar muka serat beton sangat penting dalam menjaga lekatan antara FRP dan beton. Pada suhu yang dekat dengan T_g -nya, sifat mekanis polimer berkurang secara signifikan dan akan mulai kehilangan kemampuannya untuk mentransfer tegangan dari beton ke serat.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis numerik untuk mengevaluasi perubahan kinerja struktur akibat penambahan lantai serta menentukan kebutuhan dan konfigurasi perkuatan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Analisis dilakukan melalui integrasi pemodelan struktur menggunakan ETABS v20.10 dan desain perkuatan menggunakan Sika FRP *Structural Strengthening Design Software*. Penelitian ini berlokasi di Gedung ICU–PICU–NICU RSUD Suradadi, yang terletak di Jl. Raya Tegal–Pemalang KM 12, Kecamatan Suradadi, Kabupaten Tegal, Provinsi Jawa Tengah.



Gambar 1. Lokasi Gedung ICU PICU NICU RSUD Suradadi

a) Analisis Kinerja Proyek

Pemodelan dilakukan untuk dua kondisi, yaitu: (1) Model 1: struktur eksisting (tiga lantai); (2) Model 2: struktur setelah penambahan lantai (lima lantai). Informasi dasar model struktur disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Pemodelan Struktur

Parameter	Nilai / Acuan
Jenis struktur	Beton bertulang
Mutu beton (f_c')	25 MPa
Mutu baja tulangan (f_y)	420 MPa
Analisis	Linear statik & respons spektrum
Standar	SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, SNI 1726:2019

Pembebanan yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel berikut:

Tabel 3. Pembebanan Struktur

Jenis Beban	Simbol	Nilai / Keterangan
Beban mati	D	Berat sendiri + finishing
Beban hidup	L	1,92 – 3,83 kN/m ² (fungsi ruang RS)
Beban gempa	E	Analisis respons spektrum

Output utama dari analisis ETABS meliputi gaya aksial, momen, dan gaya geser.

b) Identifikasi Elemen Kritis

Identifikasi elemen yang memerlukan perkuatan dilakukan berdasarkan rasio kapasitas struktur terhadap beban ultimit.

Tabel 4. Parameter Evaluasi Elemen Struktur

Parameter	Parameter	Parameter
Gaya aksial	P_u	Dari ETABS
Kapasitas aksial	P_n	Perhitungan SNI 2847
Rasio kapasitas	P_u/P_n	$> 1,0 \rightarrow$ tidak aman

Elemen dengan nilai rasio $> 1,0$ dikategorikan sebagai elemen kritis dan menjadi target perkuatan.

c) Perancangan Perkuatan CFRP

Perancangan dilakukan menggunakan Sika FRP Structural Strengthening Design Software dengan input dari hasil analisis ETABS.

Tabel 5. Parameter Evaluasi Elemen Struktur

Parameter	Keterangan
Dimensi kolom	$b \times h$
Mutu beton	f_c'
Tulangan eksisting	As
Gaya dalam	P_u, M_x, M_y
Jenis CFRP	Wrap / Plate
Properti CFRP	E_f, f_u, t_f

Perancangan dilakukan dengan beberapa variasi:

- Jumlah lapisan CFRP (1–3 lapis)
- Metode wrapping (*full wrap*)
- Arah serat (melintang untuk *confinement*)

d) Evaluasi Efektivitas Perkuatan

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kapasitas struktur sebelum dan sesudah perkuatan.

Tabel 6. Parameter Evaluasi Perkuatan

Parameter	Sebelum CFRP	Setelah CFRP
Kapasitas aksial	P_n	$P_{n,FRP}$
Rasio kapasitas	$>1,0$	$<1,0$
Deformasi	Δ	Δ (menurun)

Efektivitas perkuatan dihitung menggunakan:

$$Efektivitas = \frac{P_{n,FRP} - P_n}{P_n} \times 100\% \quad (1)$$

Perkuatan dinyatakan berhasil apabila:

- Kapasitas $\geq$ beban ultimit
- Rasio kapasitas $\leq 1,0$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan melalui pemodelan struktur eksisting dan struktur setelah penambahan lantai menggunakan ETABS v20.10, kemudian dilanjutkan dengan evaluasi kapasitas elemen berdasarkan SNI 2847:2019. Fokus analisis diarahkan pada perubahan gaya aksial kolom sebagai elemen utama penahan beban vertikal. Elemen dengan rasio kapasitas melebihi batas izin diidentifikasi sebagai elemen kritis dan selanjutnya dirancang perkuatannya menggunakan Sika FRP Structural Strengthening Design

Software. Hasil yang diperoleh kemudian dibandingkan untuk menilai peningkatan kapasitas dan efektivitas sistem perkuatan CFRP.

a) Hasil Analisis Struktur Eksisting dan Penambahan Lantai

Analisis struktur dilakukan menggunakan ETABS pada dua kondisi, yaitu struktur eksisting dan struktur setelah penambahan lantai. Hasil menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada gaya dalam, khususnya gaya aksial kolom.

Tabel 7. Perbandingan Gaya Dalam Kolom

Elemen Kolom	Pu Eksisting (kN)	Pu Setelah Penambahan (kN)	Δ Pu (%)
K1	1250	1850	48,0%
K2	1320	2010	52,3%
K3	1180	1765	49,6%

Terlihat bahwa terjadi peningkatan gaya aksial berkisar 48%–52%, yang secara langsung memengaruhi kapasitas tekan kolom. Peningkatan ini disebabkan oleh bertambahnya beban mati dan beban hidup dari dua lantai tambahan yang diteruskan ke kolom di bawahnya. Peningkatan gaya aksial terbesar terjadi pada K2 (52,3%), yang mengindikasikan bahwa K2 menerima beban tambahan paling besar dibandingkan kolom lainnya. Hal ini dapat disebabkan oleh posisi K2 dalam konfigurasi struktur yang menerima tributari area lantai lebih besar, atau oleh perbedaan kekakuan relatif antar kolom yang memengaruhi distribusi beban.

b) Evaluasi Kinerja Struktur

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan gaya aksial terhadap kapasitas kolom berdasarkan SNI 2847:2019.

Tabel 8. Evaluasi Kapasitas Kolom

Kolom	Pu (kN)	Pn (kN)	Rasio (Pu/Pn)	Status
K1	1850	1700	1,09	Tidak aman
K2	2010	1800	1,12	Tidak aman
K3	1765	1650	1,07	Tidak aman

Hasil menunjukkan seluruh kolom yang dianalisis memiliki rasio $> 1,0$, sehingga tidak memenuhi kapasitas izin dan memerlukan perkuatan. Rasio tertinggi terjadi pada K2 (1,12), yang konsisten dengan peningkatan gaya aksial terbesar pada kolom tersebut.

Kondisi ini menegaskan bahwa struktur eksisting tidak lagi memenuhi persyaratan kekuatan pasca-penambahan lantai, sehingga perkuatan menjadi kebutuhan mutlak.

c) Hasil Perancangan Perkuatan CFRP

Perkuatan dilakukan menggunakan metode full wrapping CFRP pada kolom dengan bantuan Sika FRP Software. Variasi jumlah lapisan digunakan untuk mendapatkan konfigurasi optimal.

Tabel 9. Hasil Desain CFRP

Kolom	Jumlah Lapis	Pn Awal (kN)	Pn Setelah CFRP (kN)	Peningkatan (%)
K1	2 lapis	1700	2100	23,5%
K2	3 lapis	1800	2350	30,6%
K3	2 lapis	1650	2050	24,2%

Perkuatan CFRP memberikan peningkatan kapasitas aksial sebesar 23,5%–30,6%, tergantung jumlah lapisan. Peningkatan kapasitas ini terjadi melalui mekanisme *confinement*, di mana CFRP memberikan tekanan lateral pada beton sehingga beton berada dalam kondisi tegangan triaksial. Dalam kondisi ini, kuat tekan beton meningkat dan daktilitasnya bertambah. Jumlah lapisan CFRP yang lebih banyak memberikan tekanan lateral yang lebih besar, sehingga peningkatan kapasitas juga lebih tinggi. Namun, peningkatan tersebut tidak bersifat linear terhadap jumlah lapisan, karena efektivitas *confinement* juga dipengaruhi oleh kekakuan serat dan dimensi penampang kolom.

Perbedaan jumlah lapisan CFRP antar kolom ditentukan berdasarkan tingkat rasio kapasitas awal. K2 yang memiliki rasio kapasitas tertinggi (1,12) memerlukan tiga lapis CFRP, sementara K1 dan K3 yang memiliki rasio kapasitas lebih rendah (1,09 dan 1,07) cukup dengan dua lapis. Pendekatan ini merupakan optimasi desain, di mana jumlah lapisan CFRP disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing elemen, bukan diterapkan seragam pada seluruh kolom.

d) Evaluasi Efektivitas Perkuatan

Setelah dilakukan perkuatan, dilakukan evaluasi ulang terhadap rasio kapasitas.

Tabel 10. Evaluasi Kapasitas Kolom

Kolom	Pu (kN)	Pn,FRP (kN)	Rasio (Pu/Pn)	Status
K1	1850	2100	0,88	Aman
K2	2010	2350	0,86	Aman
K3	1765	2050	0,86	Aman

Hasil menunjukkan bahwa seluruh kolom telah memenuhi kriteria keamanan dengan rasio $< 1,0$, yang berarti perkuatan CFRP efektif dalam meningkatkan kapasitas struktur. Setelah perkuatan, rasio kapasitas seluruh kolom berada pada kisaran 0,86-0,88, yang menunjukkan bahwa elemen memiliki cadangan kapasitas yang memadai. Namun, perlu diperhatikan bahwa peningkatan kapasitas kolom juga dapat mengubah distribusi gaya dalam pada struktur secara keseluruhan. Elemen lain yang sebelumnya tidak kritis dapat menjadi kritis setelah perkuatan kolom. Oleh karena itu, evaluasi ulang terhadap seluruh elemen struktur disarankan untuk penelitian lanjutan.

e) Pembahasan

Peningkatan jumlah lantai menyebabkan peningkatan signifikan pada beban aksial yang diterima kolom, sehingga kapasitas struktur eksisting menjadi tidak mencukupi. Hal ini ditunjukkan oleh nilai rasio kapasitas yang melebihi batas izin pada seluruh elemen yang dianalisis. Temuan ini konsisten dengan penelitian Horse & Saputra (2024) yang menunjukkan bahwa penambahan lantai tanpa perkuatan dapat menyebabkan struktur kolom dan pondasi tidak mampu menahan beban tambahan.

Penerapan CFRP sebagai sistem perkuatan eksternal terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas tekan kolom melalui mekanisme *confinement*, yang meningkatkan kuat tekan beton efektif. Mekanisme ini bekerja dengan memberikan tekanan lateral pada beton melalui serat CFRP, sehingga beton berada dalam kondisi tegangan triaksial. Dalam kondisi ini, kuat tekan beton meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi uniaxial. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Tandelilin et al. (2018) dan Hioe (2017) yang menunjukkan bahwa CFRP *confinement* mampu meningkatkan kapasitas dan daktilitas kolom beton bertulang. Peningkatan kapasitas yang diperoleh dalam penelitian ini (23,5%–30,6%) berada dalam rentang yang wajar dibandingkan penelitian terdahulu, meskipun besaran pastinya dipengaruhi oleh parameter desain seperti kekakuan serat, jumlah lapisan, dan dimensi penampang.

Semakin banyak lapisan CFRP yang digunakan, semakin besar peningkatan kapasitas yang dihasilkan. Namun, peningkatan tersebut tidak bersifat linear terhadap

jumlah lapisan, sehingga diperlukan optimasi desain. Optimasi jumlah lapisan CFRP berdasarkan tingkat rasio kapasitas awal elemen merupakan salah satu kontribusi penelitian ini. Dengan pendekatan ini, jumlah lapisan CFRP dapat disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing elemen, sehingga penggunaan material menjadi lebih efisien.

Selain itu, penggunaan CFRP memiliki keunggulan teknis, yaitu tidak menambah dimensi elemen struktur secara signifikan dan memiliki berat yang ringan, sehingga cocok untuk perkuatan bangunan eksisting tanpa mengganggu fungsi bangunan. Pada bangunan rumah sakit, keunggulan ini menjadi sangat penting karena pelayanan kesehatan harus tetap berjalan selama proses perkuatan. CFRP juga tidak memerlukan perubahan tata ruang yang signifikan, sehingga efisiensi ruang bangunan tetap terjaga. Dalam konteks perencanaan infrastruktur perkotaan, perkuatan CFRP mendukung keberlanjutan fungsi bangunan publik dan efisiensi pemanfaatan bangunan eksisting dibandingkan pembangunan baru.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi analisis ETABS dan desain menggunakan Sika FRP *Software* mampu memberikan solusi perkuatan yang efektif, efisien, dan aplikatif untuk kasus penambahan lantai pada bangunan eksisting. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan. Pertama, analisis difokuskan pada elemen kolom; elemen balok, pelat, dan fondasi tidak dianalisis secara rinci. Kedua, parameter material eksisting, yang mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual. Ketiga, validasi model terbatas pada kontrol internal, tanpa pengujian eksperimental atau lapangan. Keempat, analisis gempa disajikan secara terbatas pada parameter yang tersedia. Keterbatasan ini membuka peluang untuk penelitian lanjutan yang menggabungkan analisis seluruh elemen struktur, validasi eksperimental, serta evaluasi respons gempa secara lebih lengkap.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penambahan jumlah lantai pada bangunan menyebabkan peningkatan signifikan terhadap gaya aksial kolom, dengan kenaikan berkisar 48%–52%. Peningkatan beban tersebut mengakibatkan kapasitas struktur eksisting tidak lagi memenuhi persyaratan, yang ditunjukkan oleh nilai rasio kapasitas (P_u/P_n) lebih dari 1,0 pada beberapa elemen kolom. Perkuatan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas tekan kolom melalui mekanisme *confinement*. Hasil

perancangan menunjukkan bahwa penggunaan CFRP mampu meningkatkan kapasitas aksial kolom sebesar 23,5%–30,6%, sehingga nilai rasio kapasitas dapat diturunkan menjadi kurang dari 1,0 dan memenuhi kriteria keamanan struktur.

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa integrasi analisis struktur menggunakan ETABS dengan optimasi jumlah lapisan CFRP berdasarkan tingkat rasio kapasitas awal elemen. Pendekatan ini memungkinkan penggunaan material CFRP secara lebih efisien, karena jumlah lapisan disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing kolom. Selain itu, penelitian ini juga memberikan kontribusi praktis bagi perencanaan perkuatan bangunan eksisting, khususnya pada bangunan rumah sakit yang memiliki tingkat kepentingan khusus. Penggunaan CFRP yang tidak menambah dimensi elemen secara signifikan mendukung keberlanjutan fungsi bangunan dan efisiensi ruang, sehingga relevan dengan perencanaan infrastruktur perkotaan yang berkelanjutan.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, analisis difokuskan pada elemen kolom; elemen balok, pelat, dan fondasi tidak dianalisis secara rinci. Kedua, parameter material eksisting tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual. Ketiga, validasi model terbatas pada kontrol internal, tanpa pengujian eksperimental atau lapangan. Keempat, analisis gempa disajikan secara terbatas pada parameter yang tersedia. Kelima, penelitian ini tidak menganalisis perubahan respons struktur secara menyeluruh, seperti periode getar, simpangan antarlantai, dan *base shear*.

Penelitian lanjutan disarankan untuk: (1) menganalisis seluruh elemen struktur termasuk balok, pelat, dan fondasi; (2) memvalidasi model terhadap data pengujian eksperimental atau lapangan; (3) menyajikan analisis respons gempa secara lengkap; (4) mengevaluasi perubahan distribusi gaya dalam setelah perkuatan; (5) membandingkan efektivitas CFRP dengan metode perkuatan lain seperti *jacketing* beton atau penambahan dimensi.

REFERENSI

- Bayu Saputra, R., & Rusli Ahyar, M. (2023). Sistem Perkuatan Struktur menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Pada Gedung 4 Lantai. Jurnal Ilmiah Sultan Agung. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung.
- Christiawan, I. (2009). Perkuatan (Strengthening) Struktur Beton Dengan Fiber Reinforced Polymer (FRP). METANA, 6 (01).
- Hioe, H. (2017). Perkuatan struktur dengan carbon fiber reinforced polymer. Idn.Sika.Com/Content/Dam/Indonesia/Main/Strengthening/Document/Perkuatan-Struktur-Dengan-Cfrp.

- Horse, V., & Saputra, A. J. (2024). Analisis Dampak Penambahan Lantai Terhadap Perkuatan Struktur Kolom dan Pondasi Bangunan Ruko 9 Lantai. *Jurnal TESLINK: Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 6 (1), 142–156.
- Ketut Sudarsana, I., Bagus, I., & Widiarsa, R. (2008). Perilaku Runtuh Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat Dengan Lapis Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP). In *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil* (Vol. 12, Issue 1).
- Kumahara, S., Masuda, Y., Tanano, H., & Shimizu, A. (1993). Tensile strength of continuous fiber bar under high temperature. *Special Publication*, 138, 731–742.
- Kumar, M. (2016). Structural rehabilitation, retrofitting and strengthening of reinforced concrete structures. *International Journal of Structural And Construction Engineering*, 10 (1), 37–41.
- Lakshmi, T. I. (2016). Reinforced Concrete Beams With Glass Fibre Reinforced Polymer Stirrups. *International Conference on Current Research in Engineering Science and Technology (ICCREST-2016)*, 28–34.
- Ningyun, W., & Evans, J. T. (1995). Collapse of continuous fibre composite beams at elevated temperatures. *Composites*, 26 (1), 56–61.
- Parikh, K. B., & Patel, N. S. (2016). Review on Analytical Study on Strengthening of Beam by FRP. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5 (1), 11–14.
- Park, R., & Paulay, T. (1991). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- Rao, P. S., & Husain, M. M. (2016). Prediction analysis on mechanical properties of hygrothermal ageing GFRP composite laminates. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 23 (4), Pp. 288–296.
- Sallal, A. K., & Rajan, A. (2016). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthening with glass fiber reinforced polymer (GFRP) at different sides. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5 (5), 1837–1843.
- SNI 1726. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*.
- SNI 1727. (2020). *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*.
- SNI 8971. (2021). *Pedoman Perancangan Dan Pelaksanaan Sistem Serat Berperkat Polimer Terlekat Eksternal Untuk Beton*.
- Syofyan, E. R. (2016). Perbaikan Struktur Bangunan Pasca Gempa dengan Menggunakan Serat Karbon (Studi Kasus Gedung Kantor Bea dan Cukai Teluk Bayur Padang). *Jurnal Ilmiah Poli Rekayasa*, 11 (2), 32–41.
- Tandelilin, R. K., Sanjaya, S., Pudjisuryadi, P., & Wijaya, G. B. (2018). Program Desain Perkuatan Kolom Dengan Menggunakan Frp Confinement Sesuai Aci 440.2 R-17. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 7 (2), 241–248.