



Perkuatan Struktur Beton Bertulang Dengan Metode FRP dan *Concrete Jacketing*

***Parmo, Abdul Hakim, Yusrianti, Bagus Gilbran Antoni Wicaksono**
Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya
*parmo_99@uinsa.ac.id

Received: 26 April 2025 Revised: 25 Juli 2025 Accepted: 4 Agustus 2025

Abstract

Applying the latest building earthquake resistance codes, SNI 1726:2019 to the reinforced concrete structure of the Islamic Center Building shows several column and beam elements that required strengthening, including beam B1, column K-Bordes, and column K3. This case study research aims to determine the appropriate strengthening method, the thickness of the additional column dimensions with the concrete jacketing method, and the number of FRP layers for columns and beams. Systematic steps in the study process starting from collecting existing data, field investigation, evaluation of structures in accordance with ASCE 41-17, structural modeling with SAP2000, and data analysis. The analysis showed that Column K-Bordes was confined with a thickness of 100 mm using concrete jacketing, Column K3 was strengthened with one layer of GFRP at the plastic hinge, and Beam B1 was strengthened with two layers of GFRP at the support area. Pull-off test showed GFRP adhesion strength values to concrete of 3.80 MPa (Beam B1) and 2.50 MPa (Column K3). This approach proves the effectiveness of the combined reinforcement method in increasing the structural capacity according to the latest earthquake codes.

Keywords: *Strengthening structure, SNI 1726:2019, ASCE 41-17, concrete jacketing, GFRP, pull-off test*

Abstrak

Penerapan peraturan terbaru mengenai ketahanan gempa bangunan, SNI 1726:2019 terhadap struktur beton bertulang bangunan Gedung Islamic Center menunjukkan bahwa terdapat beberapa elemen kolom dan balok yang memerlukan perkuatan, yakni balok B1, kolom K-Bordes, dan kolom K3. Penelitian studi kasus ini bertujuan menentukan metode perkuatan yang tepat, tebal penambahan dimensi kolom dengan metode concrete jacketing, serta jumlah lapisan FRP untuk kolom dan balok. Langkah langkah sistematis dalam proses studi mulai dari pengumpulan data eksisting, investigasi lapangan, evaluasi struktur berdasarkan ASCE 41-17, pemodelan struktur dengan SAP2000, dan analisis data. Hasil analisis menunjukkan bahwa Kolom K-Bordes diperkuat dengan concrete jacketing setebal 100 mm, Kolom K3 diperkuat dengan satu lapis GFRP pada sendi plastis, dan Balok B1 diperkuat dua lapis FRP di daerah tumpuan. Uji kuat lekat (pull-off test) menunjukkan nilai kekuatan lekat GFRP terhadap beton sebesar 3,80 MPa (Balok B1) dan 2,50 MPa (Kolom K3). Pendekatan ini membuktikan efektivitas kombinasi metode perkuatan dalam meningkatkan kapasitas struktur sesuai ketentuan gempa terbaru.

Kata kunci: *Perkuatan struktur, SNI 1726:2019, ASCE 41-17, Jacketing, GFRP, Pull-off test*

Pendahuluan

Hasil uji forensik dan asesmen terhadap Gedung *Islamic Center* di Jawa Timur, menunjukkan bahwa mutu beton yang digunakan masih memenuhi kualitas sesuai dengan perencanaan. Gedung ini pada tahap awal pembangunan hanya berupa struktur beton bertulang tanpa fasad dan telah berdiri lebih dari tiga tahun. Namun demikian, hasil

analisis struktur menggunakan standar terbaru perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung dan non gedung berdasarkan SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2019a), menunjukkan bahwa terdapat beberapa elemen struktur, khususnya balok dan kolom, yang tidak memenuhi kapasitas beban rencana dan memerlukan tindakan perkuatan. Elemen-elemen struktur yang memerlukan

perkuatan tersebut meliputi balok B1 pada lantai dasar dan lantai 1 (masing-masing pada elevasi +0,00 dan +6,43), kolom K-Bordes, serta kolom K3.

Uji forensik dan asesmen terhadap struktur bangunan pasca gempa, bangunan yang telah lama tidak difungsikan maupun bangunan yang akan dialih fungsikan diperlukan untuk mengevaluasi performa serta kemampuan layan struktur bangunan tersebut. Hasil asesmen tidak jarang menghasilkan rekomendasi perlunya dilakukan perkuatan terhadap elemen-elemen struktur tertentu.

Metode perkuatan struktur beton bertulang yang umum digunakan saat ini antara lain *concrete jacketing* dan perkuatan dengan metode *Fiber Reinforced Polymer* (FRP). Metode perkuatan beton bertulang dengan cara *concrete jacketing* yaitu perkuatan beton dengan cara menyelimuti beton eksisting dengan beton tambahan dilengkapi dengan tulangan baja tambahan (Habib *et al.*, 2020; Raza *et al.*, 2019). Sementara itu, metode FRP dilakukan dengan cara menempelkan material komposit berbahan serat (*fiber*) pada permukaan beton menggunakan perekat berbasis *epoxy resin* (Blikharsky *et al.*, 2023). Kedua metode perkuatan tersebut adalah untuk meningkatkan kapasitas kekuatan elemen struktur, baik dari kapasitas menahan gaya aksial (normal), momen lentur, gaya geser, serta meningkatkan daktilitas kolom dan balok melalui proses *strengthening* yang dilakukan.

Perubahan fungsi bangunan yang berdampak pada peningkatan beban yang melampaui desain awal dan perubahan zona gempa (peta gempa) dari tingkat risiko rendah ke risiko yang lebih tinggi, menuntut para pemangku kepentingan baik *engineer*, akademisi maupun *owner* untuk melakukan teknik perkuatan struktur bangunan (Harahap *et al.*, 2024). Seiring dengan dinamika geologi yang menyebabkan perubahan zona dan peta gempa pada suatu wilayah atau negara, Badan Standardisasi Nasional (BSN) telah melakukan penyesuaian terhadap standar perencanaan bangunan tahan gempa dari SNI 1726:2012 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2012) menjadi SNI 1726: 2019 (BSN, 2019) tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung.

Metode perkuatan struktur bangunan diperlukan sebagai upaya untuk menaikkan kapasitas kekuatan menahan beban serta daktilitas struktur bangunan (Parmo *et al.*, 2022). Salah satu metode perkuatan yang umum digunakan adalah melalui pengekangan eksternal (*external confinement*) dengan beberapa cara antara lain: *concrete jacketing*, *steel jacketing*, *steel plate bonding*, dan *fiber reinforced polymer* (FRP). Untuk teknik perkuatan tersebut, ACI

Committee 440 telah menerbitkan standar perkuatan eksternal struktur beton menggunakan metode FRP (ACI Committee 440, 2008). Lebih lanjut, studi mengenai opsi-opsi perkuatan beton bertulang telah banyak dilakukan dalam dekade terakhir, baik di luar negeri (Belal *et al.*, 2015; Firmo *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2023; Naser *et al.*, 2019) maupun di Indonesia (Derianto Rahmahadi Pranata *et al.*, 2022; Khoeri, 2020; Tavio *et al.*, 2014; Tumadir *et al.*, 2022).

Evaluasi ulang terhadap struktur bangunan eksisting yang sebelumnya direncanakan dengan SNI 1726:2002 dan dilakukan penyesuaian dengan SNI 1726:2019 dan mengacu pada standar ASCE 41-17 juga telah dilakukan (Septia Irawati *et al.*, 2024). Beberapa studi telah membuktikan bahwa perkuatan kolom dengan material FRP yang diuji dengan beban aksial-siklik, sebagai representasi beban gempa, menunjukkan kapasitas performa struktur yang signifikan (Tavio *et al.*, 2014). Kapasitas beban aksial maksimum (P_{max}), nilai simpangan lateral maksimum (δ_{max}), dan momen maksimum (M_{max}) naik sebesar 33,52%, 6,65%, meningkat sebesar 32,41% dengan perkuatan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) dibandingkan dengan kolom kontrol. Nilai daktilitas perpindahan ($\mu\delta$) dan daktilitas kurvatur meningkat sebesar 118.68% dan 122.73% dengan material perkuatan yang sama. Penelitian oleh Zeng *et al.* (2023) pada kolom beton bertulang yang diperkuat dengan dua lapis GFRP juga menunjukkan peningkatan kapasitas menahan beban (*load-bearing capacity*) sebesar 53% dibandingkan kolom tanpa perkuatan. Investigasi oleh Li *et al.* (2023) pada beton mutu tinggi dan *engineered cementitious concrete* juga menunjukkan peningkatan kapasitas regangan maksimum (*ultimate strain*) sebesar 5- 33%.

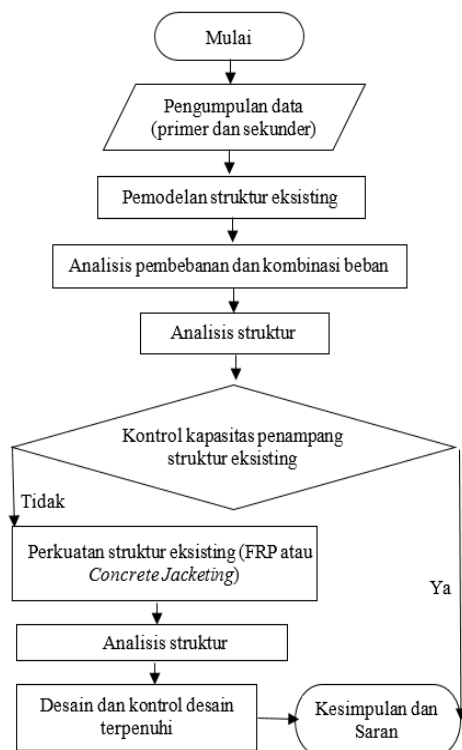
Hasil investigasi Zhang *et al.* (Zhang *et al.*, 2023) menunjukkan bahwa perkuatan balok beton bertulang dengan GFRP memberikan peningkatan kapasitas lentur sebesar 89,23% saat retak awal dan 42,73% pada saat beban maksimum. Sementara itu, menurut Tumadir *et al.* (2022), momen terfaktor balok tanpa perkuatan adalah 3,37 kN, dengan perkuatan CFRP meningkat menjadi 6,19 kN atau 2,12 kali dan dengan pelat baja meningkat menjadi 9,99 kN atau 2,74 kali dari balok kontrol.

Dari beberapa laporan studi terdahulu terhadap kolom beton bertulang tersebut dapat disimpulkan bahwa FRP memiliki potensi untuk perkuatan kolom beton bertulang. Studi kasus ini bertujuan untuk menentukan metode perkuatan struktur yang tepat, menetapkan tebal penambahan dimensi kolom melalui metode perkuatan *concrete jacketing*, dan menentukan jumlah lapisan (*layer*) material GFRP yang diperlukan untuk perkuatan

kolom dan balok. Evaluasi yang dilakukan berdasarkan ASCE 41-17 (Tier 1 dan Tier 2). Penerapan dari standar SNI 1726:2019 mengenai perencanaan ketahanan gempa menunjukkan bahwa studi ini merujuk pada kaidah mutakhir yang berlaku di Indonesia. Pendekatan yang terintegrasi dalam pemilihan metode perkuatan, yaitu penggunaan FRP dan *concrete jacketing*, dan pengujian kekuatan lekat (*pull-off test*) secara langsung memberikan data empiris performa lekatan (*bonding*) material FRP dengan beton.

Metode

Studi kasus ini dalam prosesnya dilakukan dengan *langkah langkah sistimatis* sebagai Gambar 1, yaitu pengumpulan data teknis bangunan eksisting, investigasi lapangan, analisis dan evaluasi kapasitas struktur berdasarkan ASCE 41-17 (ASCE/SEI 41-17, 2017) Tier 1 dan Tier 2. Pemodelan struktur dilakukan dengan bantuan software SAP 2000 mengacu pada *as built drawing* dan laporan pengujian tegangan leleh baja tahap pelaksanaan pembangunan.



Gambar 1. Bagan alir penelitian studi kasus

Dari gambar *as-built drawing*, pengujian *rebar detector* dan laporan uji tegangan leleh baja tulangan, diperoleh informasi detail penulangan struktur dan mutu baja bangunan eksisting. Melalui

teknik *sampling*, data yang diperoleh dari gambar dan laporan pengujian kemudian dicocokkan dengan struktur eksisting di lapangan. Data lainnya diperoleh melalui investigasi lapangan, yang meliputi asesmen forensik terhadap mutu beton menggunakan metode *non-destructive test* (*Schmidt Hammer Test*, dan *Ultrasonic Pulse Velocity*). Hasil investigasi lapangan kemudian dilakukan verifikasi dengan hasil uji laboratorium pada saat pelaksanaan konstruksi yang diperoleh dari laporan pengujian mutu beton. Sementara itu, data sekunder diperoleh melalui kajian literatur yang mencakup teori-teori, standar atau kode rujukan (*codes*), serta referensi dari jurnal ilmiah dan sumber lain yang relevan.

Deskripsi dan data teknis bangunan

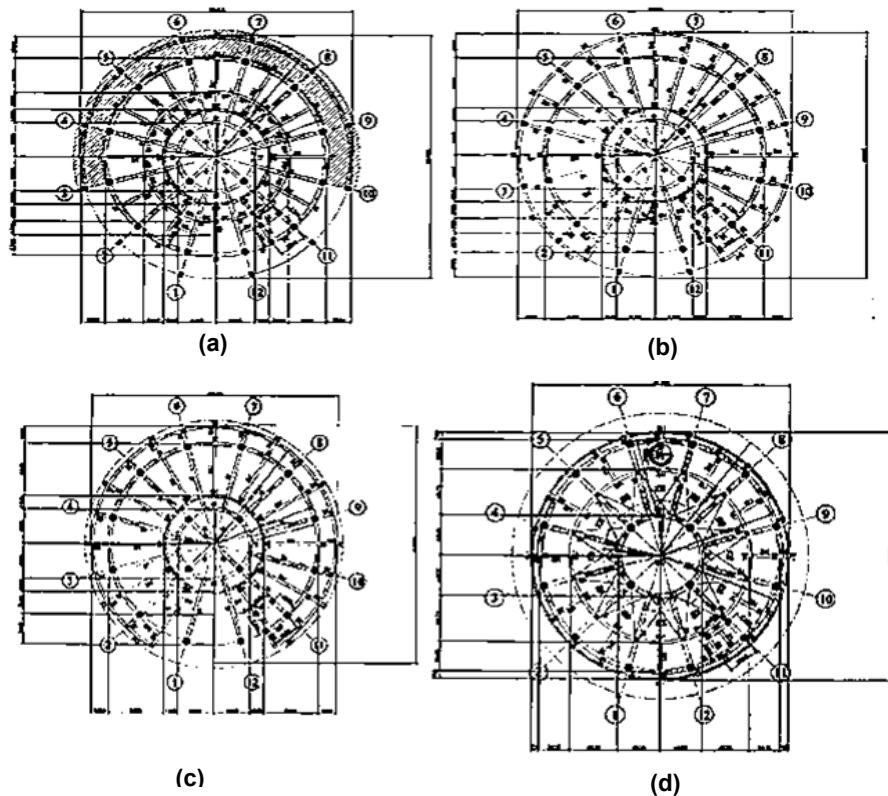
Gedung *Islamic Center* yang menjadi objek penelitian ini berlokasi di Kabupaten Gresik, Jawa Timur, Indonesia. Bangunan ini merupakan gedung berlantai empat dengan ketinggian 24 m. Bangunan eksisting masih berupa struktur rangka beton bertulang tanpa dilengkapi *façade* yang terdiri dari lantai 1, lantai 2, lantai 3, dan lantai atap. Struktur rangka atap baja terletak pada bagian tengah masa bangunan. Data teknis bangunan yang menjadi objek studi kasus adalah bangunan dengan fungsi sebagai fasilitas umum dan keagamaan, berada di zona gempa-3 dengan kategori resiko IV, struktur utama dan sekunder adalah beton bertulang, rangka atap baja, mutu beton 25 MPa, mutu baja tulangan utama 400 MPa, dan mutu baja tulangan sengkang 240 MPa. Dari data *as built drawing*, denah kolom dan balok disajikan pada Gambar 2, sedangkan dimensi, konfigurasi serta detail tulangan kolom dan balok ditunjukkan pada Tabel 1.

Kondisi tanah di lokasi bangunan

Hasil pengujian *standard penetration test* (SPT) pada tanah di lokasi pembangunan menunjukkan bahwa nilai rata-rata SPT hingga kedalaman 30 m adalah kurang dari 15 pukulan ($N_{SPT} < 15$). Berdasarkan hasil tersebut, klasifikasi jenis tanah pada lokasi bangunan termasuk dalam kelas SE (tanah lunak) sesuai dengan SNI 1726:2019 tabel 5 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2019a).

Parameter desain gempa dan respon spektrum

Parameter desain gempa untuk wilayah lokasi bangunan ditentukan berdasarkan ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2019a). Nilai-nilai parameter desain ditunjukkan pada Tabel 2. Dengan mengacu pada lokasi tersebut, didapat nilai analisis respon spektrum seperti pada Gambar 3.



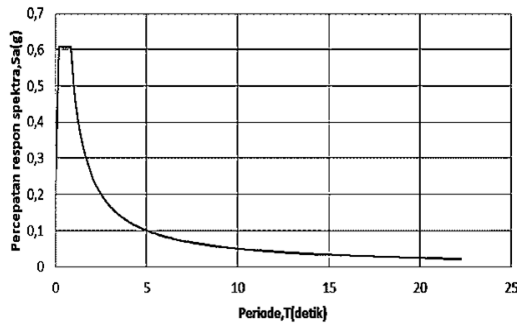
Gambar 2. Denah (a) balok lantai 1 Elv. -0.05, (b) balok lantai 2 Elv. +6.43, (c) balok lantai 3 Elv. 12.55, dan (d) balok lantai atap Elv. 18.55

Tabel 1. Dimensi, konfigurasi dan detail tulangan kolom dan balok

Elemen	Dimensi			Tulangan Longitudinal	Tulangan Sengkang
	Tinggi (mm)	Lebar (mm)	Diameter (mm)		
Kolom K1	-	-	700	16 D19	D13-150
Kolom K2	600	400	-	12 D19	D13-150
Kolom K3	300	300	-	8 D16	D13-150
Kolom K4	500	500	-	12 D19	D13-150
Kolom K-bordes	300	300	-	8 D16	D13-150
Balok B1 (Tumpuan)	700	450	-	10 D19 (atas) + 2 D16 (tengah) + 5 D19 (bawah)	D13-100
Balok B1 (Lapangan)	700	450	-	5 D19 (atas) + 2 D16 (tengah) + 10 D19 (bawah)	D13-150
Balok B2 (Tumpuan)	600	400	-	10 D19 (atas) + 2 D16 (tengah) + 5 D19 (bawah)	D13-100
Balok B2 (Lapangan)	600	400	-	5 D19 (atas) + 2 D16 (tengah) + 10 D19 (bawah)	D13-150
Balok B3 (Tumpuan)	500	300	-	5 D19 (atas) + 2 D16 (tengah) + 3 D19 (bawah)	Ø10-100
Balok B3 (Lapangan)	500	300	-	3 D19 (atas) + 2 D16 (tengah) + 5 D19 (bawah)	Ø10-150

Tabel 2. Nilai-nilai parameter desain

Parameter	Simbol	Nilai
Parameter respons spektral percepatan gempa terpetakan (MCER) untuk periode pendek	S_s	0,70
Parameter respons spektral percepatan gempa terpetakan (MCER) untuk periode 1 detik	S_1	0,25
Faktor keutamaan gempa sesuai kategori risiko bangunan	I_e	1,0
Koefisien situs untuk periode pendek	F_a	1,3
Koefisien situs untuk periode panjang	F_v	3,0
Parameter spektrum respons percepatan untuk periode pendek	S_{MS}	0,91
Parameter spektrum respons percepatan untuk periode 1 detik	S_{M1}	0,75
Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek	S_{DS}	0,607
Parameter percepatan spektral desain untuk periode 1 detik	S_{D1}	0,50
Periode batasan percepatan maksimum untuk periode pendek	T_0	0,165
Periode batasan percepatan maksimum untuk periode panjang	T_1	0,165
Spektrum respons percepatan desain	S_a	0,2427



Gambar 3. Hasil respon spektrum

Teknik analisis data

Teknik analisis data pada penelitian kasus ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis, yang meliputi:

Tahap pemodelan struktur eksisting

Pemodelan struktur eksisting merupakan tahap awal dalam proses analisis untuk menentukan model struktur yang akan dianalisis. Data awal yang diperoleh dari hasil observasi lapangan, seperti mutu beton, mutu baja tulangan, serta konfigurasi bentuk dan sistem rangka struktur, digunakan sebagai dasar dalam membangun model struktur yang merepresentasikan kondisi eksisting. Gambar *as-built drawing* digunakan sebagai referensi utama, kemudian diverifikasi melalui pengukuran langsung di lapangan guna memastikan kesesuaian dimensi serta detail penulangan pada elemen-elemen struktur seperti balok T (*T-beam*), kolom, balok induk, serta pelat lantai dan atap. Seluruh data ini selanjutnya dimasukkan ke dalam perangkat lunak analisis struktur SAP2000 versi 22 untuk membentuk model struktur digital.

Tahap analisis pembebanan

Teknik analisis pembebanan dilakukan untuk menentukan besarnya gaya-gaya yang bekerja pada struktur serta kombinasi pembebanan yang sesuai dengan kondisi aktual bangunan. Beban-beban yang digunakan mengacu pada ketentuan dalam SNI 1727:2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (Badan Standardisasi Indonesia, 2020), sementara beban gempa dihitung berdasarkan standar terbaru, SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non-Gedung (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2019a). Kombinasi beban gravitasi dan beban lateral akibat gempa digunakan dalam proses analisis struktur untuk memperoleh respons yang realistis dari sistem struktur eksisting.

Tahap analisis struktur

Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak SAP2000 v.22 untuk mengevaluasi gaya-gaya dalam yang terjadi pada elemen struktur, seperti gaya geser, gaya aksial (normal), dan momen lentur. Data tulangan yang digunakan dalam analisis diperoleh dari *as-built drawing* dan diverifikasi langsung di lapangan untuk memastikan akurasi terhadap kondisi eksisting, baik dari segi jumlah, jenis, maupun diameter tulangan. Proses perencanaan struktur beton bertulang merujuk pada SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2019b).

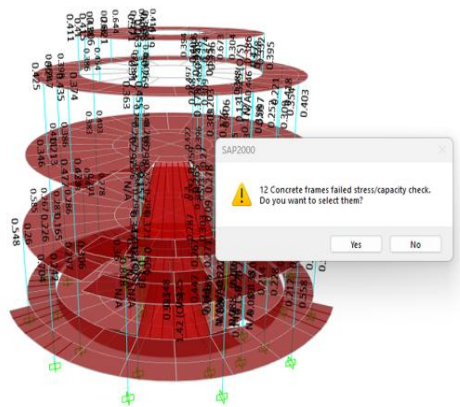
Tahap penentuan metode perkuatan

Dari hasil analisis, elemen-elemen struktur yang tidak memenuhi kapasitas desain terhadap momen, gaya aksial, maupun gaya geser, dievaluasi ulang. Evaluasi tersebut dilakukan dengan dua pendekatan: Jika elemen masih memungkinkan diperkuat melalui peningkatan dimensi dan letak elemen struktur secara metode pelaksanaan masih mudah untuk dilakukan penebalan dimensi (contoh kolom lt. 1), maka dilakukan pemodelan ulang dengan menambahkan dimensi penampang, dan apabila hasilnya memenuhi syarat desain, maka elemen tersebut direkomendasikan untuk diperkuat menggunakan metode *concrete jacketing*. Namun, untuk elemen-elemen yang tidak memungkinkan diperbesar dimensinya karena keterbatasan ruang, posisi dilantai paling atas atau pertimbangan teknis lainnya, dilakukan analisis terpisah untuk menentukan jumlah lapis (*layer*) material GFRP yang diperlukan sebagai metode perkuatan eksternal. Pengujian kekuatan lekat material GFRP dengan beton lama dilakukan melalui uji *pull-off* sesuai dengan standar pengujian ASTM D7522/D7522M-21 (ASTM International, 2021).

Hasil dan Pembahasan

Analisis struktur bangunan

Proses analisis struktur bangunan eksisting dimulai dengan melakukan pemodelan, kemudian seluruh beban yang bekerja dimasukkan ke dalam model struktur, langkah selanjutnya adalah melakukan kombinasi beban sesuai dengan jenis dan kondisi pembebanannya. Proses ini kemudian dilanjutkan dengan analisis struktur untuk memeriksa apakah setiap elemen rangka (*frame*) pada bangunan mengalami tegangan yang melebihi kapasitasnya. Hasil dari analisis struktur tersebut dapat dilihat pada Gambar 4



Gambar 4. Analisis struktur bangunan

Pada Gambar 4 menunjukkan bahwa dengan struktur yang telah dimodelkan, pembebanan yang telah diterapkan dan dilakukan analisis, terdapat beberapa elemen struktur yang tidak mampu menahan beban yang direncanakan. Sesuai sistem kerja masing-masing beban yang terjadi dapat ditunjukkan dengan keterangan: “12 concrete frames failed the stress/capacity check”, yang berarti sebanyak 12 elemen rangka struktur beton bertulang tidak memenuhi persyaratan tegangan terhadap kapasitasnya. Program bantu SAP2000 menyediakan fitur untuk menganalisis penyebab kegagalan desain pada elemen-elemen struktur. Fitur ini sangat penting, karena setiap kegagalan struktur memiliki karakteristik yang berbeda dan memerlukan metode penanganan serta perkuatan yang spesifik sesuai dengan jenis dan fungsi elemen yang terdampak.

Analisis kolom K3

Kolom K3 berdimensi 30 cm x 30 cm dan terletak di bagian paling atas gedung atau lantai 3 yang menyangga pelat atap. Hasil analisis struktur pada kolom K3 ditemukan bahwa kolom K3 mengalami kegagalan terletak pada titik C+11 dengan elevasi +21.55 m. Hasil analisis dengan menggunakan program SAP2000 menunjukkan bahwa penyebab kegagalan disebabkan oleh rasio kapasitas momen,

yaitu rasio antara total momen yang bekerja dengan kapasitas momen nominal kolom, telah melebihi batas atau melebihi nilai yang disyaratkan.

SNI 2847:2019b, Pasal 18.7.3.2, mensyaratkan bahwa kekuatan lentur nominal kolom yang merangka ke dalam *joint* harus lebih besar satu koma dua (1,2) kali dari kekuatan lentur nominal balok (Persamaan 1). Hal ini merupakan penerapan prinsip “*Strong Column Weak Beam*” (SCWB) pada desain struktur tahan gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa rasio kapasitas lentur balok terhadap kolom pada sumbu minor melebihi nilai 1,2 yang berarti kolom K3 tidak mampu memenuhi prinsip SCWB karena beban momen dari balok melampaui kapasitas lentur kolom.

$$\Sigma M_{nc} \geq (1,2) \Sigma M_{nb} \quad (1)$$

Dimana ΣM_{nc} merupakan jumlah kekuatan lentur nominal kolom, dan ΣM_{nb} merupakan jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam *joint*.

Analisis kolom K-Bordes

Kolom K-Bordes terletak di lantai 1 dan menyangga bordes tangga ke lantai 2. Kolom K-Bordes terdiri dari dua buah kolom dengan dimensi 30 x 30 cm, terletak pada titik C+1 dengan elevasi $\pm 0,00$ m. Hasil analisis menggunakan program SAP2000 menunjukkan bahwa kedua kolom mengalami kegagalan kapasitas lentur, yaitu rasio antara momen yang bekerja dan kapasitas nominal kolom telah melebihi batas yang diizinkan. Lebih lanjut, hasil analisis menunjukkan, jika momen yang dihasilkan oleh balok-balok yang menumpu pada kolom K-bordes tengah ataupun K-bordes tepi melebihi kapasitas maksimum momen yang mampu ditahan oleh kolom-kolom tersebut. Sehingga, kedua kolom tersebut belum mampu memenuhi konsep SCWB sebagaimana yang disyaratkan pada Pasal 18.7.3.1 SNI 2847:2019 (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2019b).

Tabel 3. Rekapitulasi hasil pengujian balok B1

Balok	Titik As	Elevasi	Jumlah	Gaya geser ultimit (kN)	Gaya geser rencana (kN)
B1	B2	+0.00	2	819,20	709,61
	B5	+0.00	1	760,57	665,84
	B8	+0.00	1	746,84	653,79
	B11	+0.00	2	738,37	642,08
	B2	+6.43	1	743,63	647,05
	B5	+6.43	1	815,14	712,19
	B8	+6.43	1	798,81	696,80

Analisis balok B1

Berdasarkan hasil analisis menggunakan SAP2000, ditemukan bahwa balok B1 mengalami kegagalan sebanyak 9 (sembilan) elemen, dengan rincian sebagai berikut: 2 buah pada titik B2 elevasi +0,00; 1 buah pada titik B5 elevasi +0,00; 1 buah pada titik B8 elevasi +0,00; 2 buah pada titik B11 elevasi +0,00; 1 buah pada titik B2 elevasi +6,43; 1 buah pada titik B5 elevasi +6,43 dan 1 buah pada titik B8 elevasi +6,43.

Balok-balok B1 tersebut mengalami kegagalan geser pada zona kritis khususnya di daerah tumpuan, dimana tegangan geser yang terjadi melampaui batas kapasitas geser yang diizinkan. Rekapitulasi hasil pengujian terhadap balok B1 yang mengalami kegagalan gaya geser dapat dilihat pada Tabel 3. Kondisi dimana elemen-elemen balok mengalami kegagalan geser pada zona kritis, khususnya di sekitar tumpuan, maka diperlukan tindakan perkuatan struktural pada titik-titik tumpuan tersebut agar mampu menahan gaya geser yang terjadi dan memastikan kinerja struktur sesuai dengan standar.

Solusi perkuatan Kolom K3 dan Balok B1 dengan metode FRP

Pada elemen balok B1 dan kolom lantai 3 (K3), berdasarkan pertimbangan metode pelaksanaan dan hasil studi literatur, maka dipilih metode perkuatan dengan FRP. Dalam analisis ini, digunakan material GFRP type TYFO® SEH51A yang diproduksi oleh FYFE ASIA PTE LTD. Sifat material (*material properties*) produk GFRP tersebut mengacu pada data teknis dari pabrikan, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

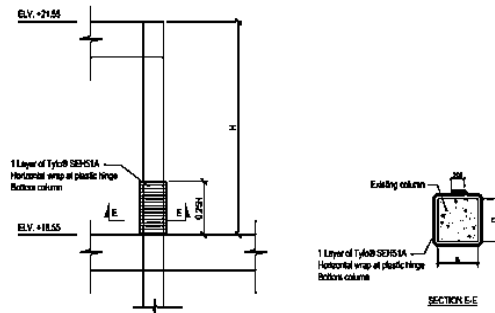
Tabel 4. Sifat material GFRP

Parameter	Nilai	Satuan
Tebal per layer (t_f)	1,3	mm
Kuat leleh ultimate (f_{fu})	460	N/mm ²
Regangan saat putus (ϵ_{fu})	0,02	mm/mm
Modulus elastisitas (E_f)	20900	N/mm ²

Berdasarkan hasil analisis dan mengacu pada *output* dari perhitungan SAP 2000, kolom K3 dimensi 300x300 mm memerlukan perkuatan GFRP sebanyak 1 (satu) layer untuk dapat menahan kapasitas aksial sebesar 7466,36 kN dan gaya geser pada daerah sendi plastis sebesar 172 kN. Balok dengan dimensi 450 x 700 mm membutuhkan 2 (dua) layer GFRP untuk menahan gaya geser sebesar 815,14 kN (Tabel 3, pada titik As B5, elevasi +6,43).

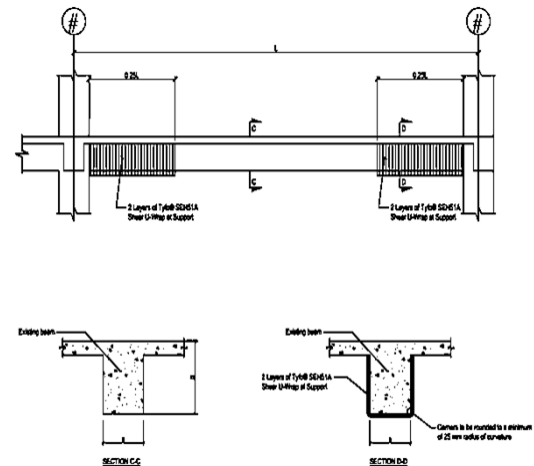
Analisis perhitungan kebutuhan material GFRP dilakukan dengan menggunakan data sifat material yang dikeluarkan oleh pabrikan (Tabel 4) dan

mengacu pada standar ACI 440.2R-17 (ACI Committee 440, 2017). Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan perkuatan kolom K3 dan balok B1 menggunakan material GFRP



TYPICAL COLUMN STRENGTHENING HORIZONTAL WRAP DETAIL

Gambar 5. Detail perkuatan Kolom K3 elevasi +18,55 s/d +21,55 dengan Horizontal-Wrap FRP.



Gambar 6. Detail Perkuatan Balok B1 ELV. -0,05 dengan U-Wrap FRP

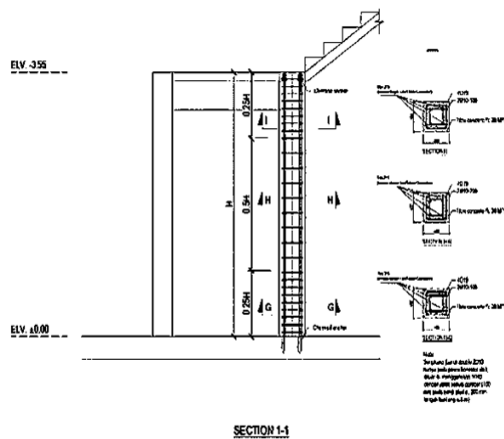
Analisis dan solusi perkuatan kolom K-bordes dengan metode *concrete jacketing*.

Kolom K-Bordes mengalami momen lentur yang diterima melebihi kapasitas momen maksimumnya. Sehingga, solusi yang diterapkan berdasarkan analisis adalah dengan memperbesar dimensi kolom dari semula 300 x 300 mm menjadi 400 x 400 mm (dalam perhitungan telah memenuhi syarat). Selain memperbesar kolom, juga menambahkan tulangan longitudinal 4D19 mm, tulangan sengkang daerah sendi plastis D10-100 mm dan D10-200 mm di luar area sendi plastis kolom.

Letak kolom K-Bordes yang berada di area lantai 1, akses yang mudah dan tidak mengganggu pelaksanaan pekerjaan lain selama proses perkuatan, menjadikan *concrete jacketing* sebagai pilihan metode perkuatan. Hal ini juga karena pertimbangan oleh biaya yang lebih murah jika

dibandingkan dengan biaya apabila perkuatan menggunakan FRP.

Penambahan ketebalan sebesar 100 mm pada semua sisi-sisi kolom selain mempertimbangkan faktor teknis kecukupan kolom menerima beban, faktor kemudahan masuknya aggregate kedalam cetakan dan ketersediaan selimut beton menjadi perhatian penting. Ketersediaan ruang selimut beton minimum 50 mm merupakan faktor penting untuk menjaga baja tulangan baru dari risiko korosi. Gambar 7 menunjukkan detail perkuatan kolom K-Bordes dengan menggunakan metode *concrete jacketing*.



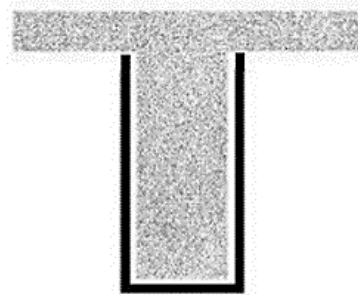
Gambar 7. Detail perkuatan Kolom K-Bordes ELV. +1,20 s/d +6,43 dengan concrete jacketing. Metode pelaksanaan perkuatan dengan FRP, uji pull-off dan pelaksanaan concrete jacketing.

Pelaksanaan pekerjaan perkuatan struktur dengan menggunakan FRP dilakukan sesuai dengan prosedur teknis yang telah ditentukan oleh aplikator atau produsen material. Pada studi kasus ini, metode perkuatan yang digunakan adalah metode *Wet Lay-Up*. Proses ini melibatkan pencampuran resin dua komponen, yaitu komponen A dan komponen B, dengan perbandingan campuran 1000:450.

Permukaan struktur beton harus dipastikan kering dan bersih, sebelum resin diaplikasikan. Pembersihan dilakukan terhadap lapisan acian serta dilakukan pemeriksaan adanya kerusakan seperti retak halus atau retak besar (*spalling*). Pada kondisi retak halus, permukaan beton terlebih dahulu dilakukan proses injeksi dengan material khusus untuk menutup retakan. Sedangkan kerusakan atau retak besar (*spalling*), beton terlebih dahulu harus ditangani dengan grouting kemudian dibiarkan mengering sempurna sebelum pelapisan.

Prosedur pelapisan material FRP sangat menentukan kualitas material dalam meningkatkan performa material. Lapisan pertama berupa lapisan tipis *epoxy resin* dioleskan pada struktur beton,

kemudian disiapkan serat fiber dalam bentuk anyaman (*woven*) dengan panjang dan lebar sesuai dengan kebutuhan. Lembaran ini dipasangkan pada permukaan struktur beton yang diberi perkuatan. Untuk menghindari terbentuknya gelembung udara dan memastikan resin meresap sempurna ke dalam lembaran serat fiber, rol khusus digunakan sebagai alat pengaplikasian. Rol ini akan memberikan tekanan pada resin sehingga menembus ke dalam serat dan digunakan sampai permukaan serat jenuh yang mengindikasikan telah terjadi pembasahan secara sempurna. Setelah itu, dilakukan pelapisan kedua menggunakan resin pada permukaan FRP yang telah terpasang.



Gambar 8. Perkuatan FRP pada struktur balok untuk menahan lentur dan geser.

Untuk menghindari geser dan *debonding*, digunakan *overlap* antar lembaran FRP sepanjang 200 mm. Pada elemen balok yang menyatu secara *monolit* dengan pelat lantai di atasnya, lembaran FRP dipasang dalam bentuk “U”, yaitu menutup bagian bawah dan kedua sisi balok. Gambar 8 menunjukkan aplikasi FRP pada balok, sedangkan Gambar 9 memperlihatkan proses pemasangan FRP untuk perkuatan balok terhadap geser.



Gambar 9. Aplikasi perkuatan balok dengan FRP pada lokasi proyek

Gambar 10 menunjukkan pelaksanaan pengujian *pull-off* di lokasi studi kasus. Pengujian *pull-off* bertujuan untuk mengetahui seberapa kuat ikatan antara material FRP dan beton, mengingat kekuatan lekat ini merupakan parameter penting dalam

menentukan efektivitas sistem perkuatan struktur secara keseluruhan. Ikatan yang tidak optimal dapat menyebabkan kegagalan sistem perkuatan sebelum kapasitas struktur tercapai.



Gambar 10. Uji *pull-off* untuk mengevaluasi kuat lekat FRP (a) pada balok, dan (b) pada kolom yang dilakukan perkuatan

Nilai kekuatan lekat (*bond strength*) diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_p = \frac{4F_p}{\pi D^2} \quad (2)$$

Dimana σ_p adalah kekuatan lekat *pull-off* (MPa),

F_p merupakan gaya tarik alat *pull-off* (N) dan D merupakan diameter permukaan *dolly* logam alat uji tarik *pull-off* (mm)

Proses pengujian *pull-off* dimulai dengan persiapan permukaan beton pada elemen balok dan kolom, yaitu dengan memastikan permukaan dalam kondisi bersih serta memiliki tingkat kekasaran yang sesuai. Setelah itu, dilakukan pemasangan lapisan FRP menggunakan *epoxy resin*, dengan material yang sama seperti yang digunakan pada sistem perkuatan utama (Tayeh *et al.*, 2013). Setelah *epoxy resin* mengeras secara sempurna, sebuah *dolly* logam berdiameter 50 mm ditempelkan ke permukaan FRP dengan perekat yang sama. *Dolly* tersebut kemudian dibiarkan menempel minimal selama 24 jam untuk memastikan ikatan antara *dolly* logam dan lapisan FRP telah optimal.

Pengujian dilanjutkan dengan penarikan *dolly* secara tegak lurus terhadap permukaan FRP menggunakan alat uji *pull-off* hingga terjadi kegagalan (*failure*). Kegagalan ini dapat berupa lepasnya lapisan FRP dari beton, terlepasnya resin, atau kerusakan pada lapisan *interface*. Pada penelitian studi kasus ini, hasil dari pengujian *pull-off* lapisan FRP dan beton pada balok diperoleh nilai kuat lekat sebesar 3,80 Mpa dan pada kolom diperoleh nilai kuat lekat sebesar 2,50 Mpa.

Dalam pelaksanaan perkuatan struktur beton dengan metode *concrete jacketing*, terdapat

beberapa aspek teknis penting yang perlu diperhatikan untuk memastikan efektivitas dan keamanan struktur yang diperkuat. Tulangan longitudinal pada *concrete jacketing* sebaiknya dipasang minimal pada keempat sudut elemen struktur, dengan diameter tulangan minimum 12 mm. Tulangan sengkang yang digunakan harus memiliki diameter minimum 8 mm, dengan ujung tulangan dibengkokkan 135 derajat dan panjang bengkokkan minimal sepuluh kali diameter tulangan sengkang. Ketebalan minimum lapisan *concrete jacketing* adalah 100 mm untuk menjamin ketahanan dan keterikatan struktur baru terhadap struktur eksisting. Selain itu, diameter tulangan sengkang tidak boleh kurang dari sepertiga diameter tulangan longitudinal. Jarak pemasangan sengkang pun diatur, yaitu 100 mm pada daerah tumpuan dan 200 mm pada daerah lapangan, guna memastikan kinerja struktural yang optimal.

Tahapan pelaksanaan pekerjaan *concrete jacketing* dimulai dengan pembobokan pada permukaan beton eksisting untuk membuka permukaan beton dan tulangan lama. Setelah itu, dilakukan pembersihan menyeluruh pada permukaan beton untuk menghilangkan kotoran, debu, atau material lepas lainnya yang dapat mengganggu lekatan beton baru. Tahap berikutnya adalah persiapan material, termasuk pemilihan tulangan, bekisting, serta beton mutu khusus. Dilanjutkan dengan pengeboran pada beton eksisting untuk pemasangan angkur atau *dowel*, yang berfungsi mengikat tulangan baru dengan tulangan eksisting.

Tulangan penghubung kemudian dipasang dan dilakukan pengelasan jika diperlukan, terutama apabila menggunakan sistem *dowel*. Selanjutnya, dilakukan pemasangan tulangan longitudinal dan sengkang sesuai dengan rencana teknis. Setelah seluruh tulangan terpasang dengan baik, bekisting dan perancah disiapkan untuk proses pengecoran. Beton yang digunakan adalah beton jenis *self-compacting concrete* yang memiliki kemampuan mengalir tanpa pemadatan manual, sangat sesuai untuk area sempit pada lapisan perkuatan. Setelah beton dicor dan mengeras, bekisting serta perancah dilepas, dan pekerjaan diakhiri dengan *finishing* pada permukaan struktur untuk mendapatkan hasil akhir yang rapi dan sesuai spesifikasi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktur yang dilakukan menggunakan perangkat lunak bantu SAP2000 terhadap seluruh elemen struktur Gedung *Islamic Center* di Jawa Timur, mempertimbangkan pembebanan gempa terbaru sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019 dan evaluasi berdasarkan ASCE 41-17, ditemukan beberapa elemen struktur

yang memerlukan tindakan perkuatan. Dari hasil evaluasi dan analisis dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

Pemilihan metode perkuatan pada elemen-elemen struktur didasarkan pada kemudahan dan efisiensi pelaksanaan, serta efektivitas penggunaan material perkuatan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Perkuatan kolom K3 diperlukan karena kapasitas momen dan gaya geser yang ditimbulkan akibat beban melebihi kapasitas yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, bagian sendi plastis kolom diperkuat menggunakan satu lapisan material FRP sebagai pengekang eksternal. Adapun pada kolom K-Bordes, perkuatan diperlukan karena momen lentur akibat balok-balok yang bertumpu pada kolom tersebut melampaui kapasitas maksimumnya. Solusi yang diterapkan adalah *concrete jacketing* dengan peningkatan dimensi kolom dari ukuran semula 300x300 mm menjadi 400x400 mm. Sementara itu, elemen balok B1 ditemukan bahwa gaya geser yang diterima pada daerah tumpuan melampaui kapasitas geser yang dapat ditahan oleh penampang balok. Oleh karena itu, perkuatan eksternal dengan dua lapis material FRP diaplikasikan untuk meningkatkan kapasitas geser balok tersebut.

Pengujian kekuatan lekat antara material FRP dengan permukaan beton dilakukan melalui uji tarik lepas (*pull-off test*). Hasil pengujian menunjukkan nilai kekuatan lekat sebesar 3,80 MPa untuk elemen balok dan 2,50 MPa untuk elemen kolom. Nilai ini menunjukkan tingkat adhesi yang cukup baik dan mendukung kinerja sistem perkuatan secara keseluruhan.

Daftar Pustaka

- ACI Committee 440. (2008). ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems. In *American Concrete Institute ACI Committee 440*.
- ACI Committee 440. (2017). ACI 440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. In *American Concrete Institute* (pp. 1–110).
<https://doi.org/10.14359/51700867>
- ASCE/SEI 41-17. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. In *American Society of Civil Engineers* (pp. 1–623). American Society of Civil Engineers.
- ASTM International. (2021). *ASTM D7522/D7522M-21: Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete or Masonry Substrates* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1520/D7522>
- Badan Standardisasi Indonesia. (2020). SNI 1727:2020 Beban desain minimum dan Kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. *Jakarta*, 8, 1–336.
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2012). *SNI 1726: 2012 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung* (pp. 1–132). Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2019a). *SNI 1726: 2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2019b). *SNI 2847: 2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015). Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket. *HBRC Journal*, 11(2), 201–212.
<https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.05.002>
- Blikharsky, Y., Selejdak, J., Vashkevych, R., Kopyika, N., & Blikharsky, Z. (2023). Strengthening RC eccentrically loaded columns by CFRP at different levels of initial load. *Engineering Structures*, 280(January), 115694.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115694>
- BSN. (2019). *SNI 1726: 2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung* (pp. 1–253). Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- Derianto Rahmahadi Pranata, Budi Witjaksana, & Hanie Teki Tjendani. (2022). Analisis Perkuatan Struktur Beton Dengan Menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Dan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Terhadap Biaya. *Prosiding Senakama*, 1, 35–46.
- Firmo, J. P., Correia, J. R., & Bisby, L. A. (2015). Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*, 80, 198–216.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.045>
- Habib, A., Yildirim, U., & Eren, O. (2020). Column repair and strengthening using RC jacketing: a brief

- state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3), 75. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00329-4>
- Harahap, S., Putri, P. Y., Putra, R. R., & Atika, L. (2024). Perkuatan Struktur Beton Dengan Metode Frp Pada Bangunan Gedung. *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research Volume*, 4(3), 9200–9214.
- Hu, L., Feng, P., Yang, J. Q., & Li, Z. (2023). Shear behaviour of FRP-confined concrete/UHPC core-encased rebar: Experimental investigation and design method. *Engineering Structures*, 284(September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115951>
- Khoeri, H. (2020). Pemilihan Metode Perbaikan dan Perkuatan Struktur Akibat Gempa (Studi Kasus Pada Bank Sulteng Palu). *Konstruksia*, 12, 93–104.
- Li, S., Chan, T. M., & Young, B. (2023). Experimental investigation on axial compressive behavior of novel FRP-ECC-HSC composite short column. *Composite Structures*, 303(September 2022), 116285. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116285>
- Naser, M. Z., Hwileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2019). State-of-the-Art Review on the use of Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Constructions. *Engineering Structures*, 198, 109542.
- Parmo, P., Achmad, K., & Sulistiawan, A. (2022). *FRP: Perkuatan dan Retrofit Kolom Beton Bertulang*. Deepublish.
- Raza, S., Khan, M. K. I., Menegon, S. J., Tsang, H. H., & Wilson, J. L. (2019). Strengthening and repair of reinforced concrete columns by jacketing: State-of-the-art review. *Sustainability*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/su11113208>
- Septhia Irawati, I., Heriawati, I., & Setiawan, A. F. (2024). Evaluasi Seismik Gedung Perkuliahan 3 Dan 6 Lantai Eksisting Di Kota Yogyakarta. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(1), 39–50. <https://doi.org/10.24002/jts.v18i1.10168>
- Tavio, T., Achmad, K., Parmo, P., & Sulistiawan, A. (2014). Strength and Ductility of RC Columns Retrofitted by FRP under Cyclic Loading. *Journal of Proceeding Series*, 1(2), 379.
- Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., & Megat Johari, M. A. (2013). Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(5), 743–753. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9931-1>
- Tumadir, A. B., Ashda, H., Rahman, M. J., & BP, M. S. (2022). Kajian Kapasitas Lentur Balok Beton Dengan Perkuatan Luar. *Journal Flyover (JFO)*, 2(02), 136–146.
- Zeng, J.-J., Liang, Q.-J., Cai, W.-J., Liao, J., Zhou, J.-K., Zhu, J.-Y., & Zhang, L. (2023). Strengthening RC square columns with UHP-ECC section curvilinearization and FRP confinement: Concept and axial compression tests. *Engineering Structures*, 280, 115666. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.115666>
- Zhang, Z., Wu, X., Zhang, J., Sun, Q., Tian, P., & Hu, G. (2023). Numerical investigation on the flexural behavior of GFRP reinforced concrete beams with CFRP grid-reinforced engineered cementitious composites. *Engineering Structures*, 288, 116163. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116163>