

Evaluasi Kinerja Seismik Bangunan Eksisting Beton Bertulang Dengan Perkuatan FRP Wrapping Berdasarkan ASCE 41-17

I Gusti Arsyia Pramudya¹, Nazla Nabilla Majid¹, Rafi Haidar Roesyana¹, Rajendra Octarodisca^{1,*}, Siti Nurasiyah¹

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

Email korespondensi: rajendraoctarodisca19@upi.edu

Abstrak

Indonesia merupakan wilayah rawan gempa, sehingga banyak bangunan beton bertulang eksisting berisiko mengalami kerusakan struktural. Retrofitting dengan FRP (Fiber Reinforced Polymer) menjadi solusi untuk meningkatkan kinerja seismik, namun evaluasi berbasis standar internasional seperti ASCE 41-17 masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan beton bertulang eksisting sebelum dan sesudah retrofitting dengan FRP wrapping berdasarkan standar ASCE 41-17. Metode yang digunakan adalah studi literatur kasus pada gedung tinggi 12 lantai di Los Angeles. Evaluasi dilakukan dengan analisis nonlinier statik (pushover analysis) menggunakan software ETABS untuk membandingkan kapasitas struktur sebelum dan sesudah perkuatan, serta menilai tingkat kinerja (IO, LS, CP). Hasil menunjukkan bahwa sebelum retrofit, struktur memiliki defisiensi kapasitas geser hingga 30% dan distribusi sendi plastis yang tidak ideal. Setelah penerapan skema full-wrap FRP dengan ankur, terjadi peningkatan signifikan pada kapasitas geser, daktilitas (rotasi inelastis mencapai 0,038 rad), dan disipasi energi (meningkat 108% dibandingkan U-wrap tanpa ankur). Mode kegagalan berubah dari geser getas menjadi lentur daktil. Retrofitting dengan full-wrap FRP terbukti efektif meningkatkan kinerja seismik bangunan eksisting, memenuhi kriteria Life Safety berdasarkan ASCE 41-17, dan menawarkan solusi detailing inovatif yang relevan secara internasional.

Kata Kunci: ASCE 41-17, FRP, Kinerja Seismik, Retrofitting, Struktur Beton Bertulang.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan daerah dengan tingkat kerawanan gempa yang cukup tinggi karena terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik aktif (Damayanti dkk., 2020), sehingga banyak bangunan khususnya bangunan yang sudah tua atau dibangun sebelum adanya standar gempa dengan kondisi gempa terbaru memiliki risiko tinggi mengalami kegagalan struktur ketika terjadinya gempa. Seiring bertambahnya usia bangunan, kekuatan bangunan dapat saja menurun akibat faktor lingkungan, *fatigue*, ataupun degradasi alami struktur. Sehingga evaluasi dan perkuatan struktur kembali menjadi hal yang penting untuk menjaga keselamatan dan fungsi bangunan. Pemilihan metode retrofit sebagai langkah dalam perkuatan struktur kembali menjadi hal yang bergantung kepada kondisi bangunan, lokasi, dan efisiensi implementasi dalam hal biaya dan waktu (Hartman dkk., 2025).

Sejalan dengan hal tersebut, studi oleh (Masri dkk., 2024) yang mengaplikasikan evaluasi bangunan berdasarkan standar GreenShip GBCI v1.2 pada Gedung Munara 99 Sabilulungan, menguatkan pentingnya suatu kerangka evaluasi yang terstruktur dan terstandarisasi untuk menilai kinerja sebuah bangunan eksisting. Kajian literatur yang lain menunjukkan bahwa penggunaan *Fiber*

Reinforced Polymer (FRP) sebagai metode perbaikan retrofit yang telah terbukti efektif meningkatkan kapasitas, kekuatan dan daktilitas struktur terhadap beban gempa (Hidayati dkk., 2021). Penelitian terdahulu melaporkan peningkatan kapasitas *drift*, kekakuan, dan daktilitas pada elemen struktur yang diperkuat dengan metode FRP. Namun dalam pelaksanaannya yang menggunakan pendekatan ASCE 41-17, khususnya dengan analisis nonlinear pushover dan time history masih sangat terbatas (Pranata, 2017).

Interpretasi baru terhadap fenomena ini terletak pada evaluasi kinerja seismik bangunan beton bertulang eksisting sebelum dan sesudah diperkuat dengan FRP Wrapping berdasarkan ASCE 41-17, dengan fokus analisis nonlinear pushover dan time history yang jarang dilakukan pada penelitian sebelumnya.

Permasalahan yang diangkat meliputi pemahaman konsep retrofiting pada bangunan eksisting, identifikasi jenis – jenis retrofit, penerapan metode retrofit untuk memperkuat elemen struktur terhadap beban gempa, serta perbandingan kinerja struktur sebelum dan sesudah metode retrofit wrapping.

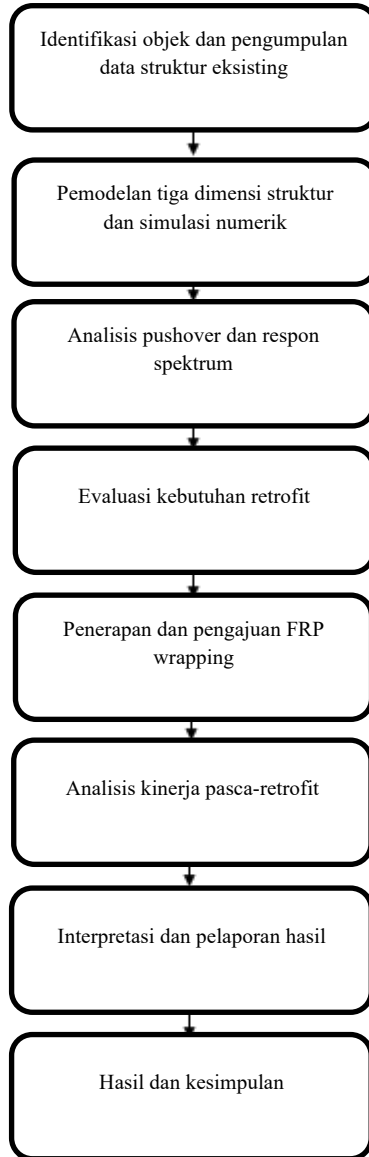
Tujuan adanya kajian literatur ini untuk mengetahui efektivitas metode FRP Wrapping dalam meningkatkan kinerja seismik bangunan beton bertulang eksisting berdasarkan standar ASCE 41-17, sehingga dapat memberikan rekomendasi strategis bagi perkuatan struktur terutama di daerah rawan gempa.

Standar ASCE 41-17 dan ATC-40 menggunakan pendekatan *capacity spectrum* untuk menilai performa struktural bangunan. Metode ini mengonversi kurva kapasitas statik nonlinier bangunan menjadi kurva spektrum respons sehingga ini memberikan peran penting dalam mengevaluasi respon bangunan yang telah diperkuat dengan sistem retrofit untuk setiap perlakuan yang berbeda (Balkaya, 2024).

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada kajian literatur ini adalah pendekatan studi kasus pada gedung beton bertulang 12 lantai di Los Angeles Amerika Serikat, untuk mengevaluasi efektivitas metode retrofit FRP Wrapping berdasarkan standar ASCE 41-17. Objek yang dipakai yaitu elemen struktur berupa beton bertulang dengan menggunakan tiga variasi perlakuan yaitu full wrap, U-wrap dengan ankur, dan U-wrap tanpa ankur. Untuk mengetahui kinerja sebelum dan sesudah penggunaan FRP dilakukan beberapa pengujian seperti displacement history, load protocol, kapasitas lentur dan geser, serta pengujian FRP laminate dan anchor. Pengujian tersebut dengan melakukan pemodelan tiga dimensi menggunakan aplikasi ETABS yang nantinya disimulasikan menggunakan analisis pushover dan respon spektrum. Hasil atau output yang dihasilkan setelah pemodelan tersebut yaitu perbandingan kinerja struktur sebelum dan sesudah retrofit, perbandingan output kapasitas struktur dengan hasil analisis respon spektrum, serta tingkat kinerja bangunan terhadap gempa mengacu pada batas deviasi pada tingkat kinerja struktur ATC-40 dan ASCE 41-17 yaitu IO (Immediate Occupancy), LS (Life Safety), CP (Collapse Prevention) dan SS (Structural Stability) (Zebua & Koespiadi, 2022).

Diagram alir pada Gambar 1 menggambarkan tahapan metodologi penelitian yang meliputi identifikasi objek dan pengumpulan data struktur eksisting, pemodelan tiga dimensi dan simulasi numerik, analisis pushover dan respon spektrum, evaluasi kebutuhan retrofit, hingga analisis kinerja struktur setelah penerapan *retrofit FRP wrapping* dan penarikan kesimpulan.



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

3. Hasil Analisis dan Pembahasan

3.1 Hasil

Evaluasi seismik tahun 2011 mengungkapkan bahwa struktur gedung downtown Los Angeles California Amerika Serikat yang dirancang berdasarkan standar tahun 1996 tidak lagi memenuhi persyaratan daktilitas dan kinerja seismik modern. Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung gagal mencapai tingkat kinerja Life Safety (LS) pada gempa rencana. Secara umum, kelemahan utama struktur eksisting meliputi:

- 1) kapasitas geser yang tidak mencukupi, dengan kelebihan tegangan sekitar 30 % pada ujung balok T-MRF, sehingga berpotensi menyebabkan kegagalan geser getas sebelum kapasitas lentur tercapai;
- 2) detailing tulangan yang tidak sesuai, karena konfigurasi sengkang tunggal tanpa pengikat silang dan jarak yang tidak sesuai di sekitar bukaan, sehingga menurunkan ketahanan geser; serta
- 3) distribusi sendi plastis yang tidak ideal, yang berpotensi menghambat terbentuknya mekanisme disipasi energi inelastik selama gempa.

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Grelle dan Sneed, yang menegaskan bahwa kurangnya kapasitas geser dan detailing pengikat silang sering menjadi faktor utama penyebab kegagalan getas pada sistem moment frame beton bertulang lama. Keterbatasan detailing pada struktur eksisting tersebut mengindikasikan kebutuhan mendesak akan metode retrofit yang mampu meningkatkan kapasitas geser dan daktilitas tanpa mengubah konfigurasi struktural utama (Grelle & Sneed, 2013).

Penerapan sistem full-wrap Fiber Reinforced Polymer (FRP) dengan anchored strips pada spesimen S5 menunjukkan peningkatan signifikan terhadap kapasitas struktural dan performa seismik. Metode ini dirancang untuk mengatasi defisiensi geser sekaligus memperkuat perilaku daktil struktur beton bertulang. Hasil pengujian siklik berskala besar memperlihatkan bahwa:

- 1) Kapasitas geser meningkat hingga 30 %, disertai peningkatan rotasi inelastis hingga 0,034 rad (3,4 % drift) pada beban puncak, dan 0,038 rad (3,8 % drift) pada awal kehilangan kekuatan. Nilai ini sekitar 30 % lebih tinggi dari batas rotasi Life Safety yang ditetapkan ASCE 41 (ASCE, 2017).
- 2) Kemampuan disipasi energi meningkat signifikan, di mana sistem full-wrap (S5) mampu meningkatkan disipasi energi hysteretic sebesar 108 % dibanding U-wrap tanpa angkur (S1A), serta 45 % lebih tinggi dibanding U-wrap dengan angkur konvensional (S1B).
- 3) Mode kegagalan berubah menjadi lebih daktil, berkat penggunaan saw-cut grooves yang menginduksi retakan lentur di antara strip-strip FRP, sehingga mencegah debonding hingga drift 3 %.

3.2 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa skema full-wrap FRP dengan anchored strips merupakan strategi retrofit yang sangat efektif dalam meningkatkan kapasitas geser dan daktilitas tanpa mengubah massa maupun kekakuan struktur eksisting secara signifikan. Material FRP memiliki kekuatan tarik tinggi, ringan, serta tahan terhadap korosi, menjadikannya alternatif ideal untuk peningkatan performa seismik pada bangunan eksisting (Kabashi, 2025).

Selain itu, karena sistem FRP ditempel secara eksternal, penerapannya dapat dilakukan tanpa pembongkaran besar, sehingga tidak mengganggu operasional gedung. Hal ini sesuai dengan temuan Anacleto-Lupianez pada tahun 2024, bahwa penggunaan full-wrap dengan anchored strips pada balok T-MRF gedung tinggi mampu memberikan peningkatan signifikan pada kapasitas rotasi dan disipasi energi tanpa menambah beban struktural secara berarti.

Meskipun efektif secara teknis, penerapan sistem full-wrap FRP menghadapi beberapa kendala praktis. Pertama, metode ini menuntut akses penuh pada sisi atas dan bawah balok, yang dapat menghambat kegiatan konstruksi di bangunan yang masih beroperasi. Kedua, kualitas pekerjaan sangat menentukan hasil akhir; kesalahan dalam preparasi permukaan, saturasi resin, atau pembuatan chamfer dapat menurunkan kinerja sistem hingga 20–40 % (Grelle & Sneed, 2013). Ketiga, dari sisi ekonomi, kebutuhan material dan tenaga kerja yang tinggi menjadikan biaya retrofit ini lebih mahal dibandingkan metode U-wrap konvensional.

Walaupun demikian, hasil jangka panjang berupa peningkatan daktilitas, umur struktur, dan keselamatan seismik dinilai sepadan dengan biaya tambahan yang dikeluarkan. Secara global, penelitian ini memberikan kontribusi empiris penting terhadap database eksperimental sistem FRP pada elemen balok-kolom T-MRF yang mengalami pembebanan dengan ukuran yang realistis dan dikenai gaya gempa bolak-balik yang intens untuk mendapatkan data kinerja seismik yang akurat dan

representatif. Data semacam ini masih terbatas di literatur teknik sipil internasional (Anacleto-Lupianez, 2024).

Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi masukan bagi pengembangan pedoman desain internasional seperti ACI 440.2R dan FIB Bulletin 90, khususnya dalam pengaturan penggunaan anchored FRP systems untuk aplikasi seismik. Pendekatan kombinasi antara anchored strips, splice anchors, dan crack-control joints yang diperkenalkan dalam studi ini juga dapat menjadi referensi desain inovatif bagi para insinyur dalam merancang sistem retrofit yang lebih efisien dan tahan gempa (Kamgar, 2019).

Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi antara peningkatan kapasitas geser dan daktilitas dalam perencanaan retrofit seismik. Penerapan sistem FRP dengan detail penyaluran gaya yang tepat memungkinkan peralihan mode kegagalan dari geser ke lentur, sehingga memberikan mekanisme deformasi plastis yang lebih terkendali. Dalam konteks bangunan eksisting yang masih beroperasi, sistem retrofit eksternal seperti full-wrap FRP menawarkan solusi ringan, tahan korosi, dan minim gangguan operasional, sehingga relevan untuk penerapan di wilayah seismik aktif seperti Indonesia.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem full-wrap FRP dengan anchored strips secara signifikan meningkatkan kinerja seismik elemen balok pada sistem Moment Resisting Frame (MRF). Hasil pengujian eksperimental mengindikasikan peningkatan kapasitas geser hingga mengatasi defisiensi awal sebesar 30%, serta peningkatan daktilitas dengan rotasi inelastis mencapai 0,034–0,038 rad, melampaui batas kinerja *Life Safety (LS)* yang ditetapkan ASCE 41. Selain itu, sistem ini memberikan peningkatan disipasi energi hingga 108% dibandingkan konfigurasi U-wrap tanpa ankur.

Penerapan metode full-wrap FRP terbukti efektif untuk mengalihkan mode kegagalan dari geser getas menuju lentur daktil, sehingga meningkatkan kapasitas deformasi dan kemampuan redaman energi struktur. Meskipun implementasinya menuntut tingkat presisi tinggi serta biaya yang lebih besar, keunggulan dalam daya tahan, fleksibilitas penerapan di lapangan, dan dampak minimal terhadap massa struktur menjadikannya solusi retrofit yang layak diterapkan pada bangunan eksisting di wilayah rawan gempa.

Dengan demikian, strategi ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan praktik retrofit seismik yang efisien dan berkelanjutan, sekaligus menjadi dasar bagi pembaruan panduan desain internasional terkait penggunaan FRP anchored full-wrap system pada elemen MRF beton bertulang.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung dan berkontribusi dalam penyusunan makalah ini. Secara khusus, penulis menyampaikan penghargaan kepada:

- 1) Universitas Pendidikan Indonesia, yang telah memberikan fasilitas dan lingkungan akademik yang kondusif.
- 2) Dosen Pembimbing atau pengajar mata kuliah terkait, atas bimbingan, masukan, dan saran berharga selama proses penelitian dan penulisan.
- 3) Keluarga dan rekan-rekan sejawat dari Program Studi Teknik Sipil, atas dukungan moral, diskusi konstruktif, serta semangat kolaborasi yang diberikan.
- 4) Berbagai sumber literatur dan peneliti terdahulu yang karyanya telah dirujuk, sehingga memperkaya dasar teoretis dan analitis dalam studi ini.

Daftar Pustaka

- Anacleto-Lupianez, S. H. (2024). Seismic retrofit case study of shear-critical RC moment-frame T-beams strengthened with full-wrap FRP anchored strips in a high-rise building. *Preprint*.
- ASCE. (2017). *ASCE 41-17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. American Society of Civil Engineers.
- Balkaya, C. (2024). Testing and modelling of building envelope retrofit system for rapid seismic strengthening of important RC buildings. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2024(1), 22. <https://doi.org/10.1155/2024/6730349>
- Damayanti, C., Yamko, A., Souisa, C., Barends, W., & Naroly, I. (2020). Pemodelan segmentasi Mentawai-Pagai: Studi kasus gempa megathrust di Indonesia. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2020.v1i2.56>
- Grelle, S. V., & Sneed, L. H. (2013). Review of anchorage system for externally bonded FRP laminates. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 17–33.
- Hartman, G., Anondho, B., Waty, M., & Thedja, J. (2025). Studi perbandingan biaya-manfaat retrofitting struktur bangunan eksisting berdasarkan Tier 1 analysis ASCE 41-17. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(3), 951–958. <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i3.34115>
- Hidayati, N., Priyosulistyo, H., & Triwiyono, A. (2021). Evaluasi dan retrofit struktur gedung beton bertulang akibat kebakaran. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil*, 17(1), 57–67. <https://doi.org/10.21831/inersia.v17i1.35888>
- Kabashi, N. M. (2025). Advancements in fiber-reinforced polymer (FRP) retrofitting techniques for seismic resilience of reinforced concrete structures. *Buildings*, 15(4), 587.
- Kamgar, R. B. (2019). A new formulation for prediction of the shear capacity of FRP in strengthened reinforced concrete beams. *Soft Computing*, 24, 6871–6887.
- Masri, R. M., Purwaamijaya, I. M., Vitada, V., & Hapsari, A. S. (n.d.). Evaluation and implementation of green building in office building (Case study: Munara 99 Sabilulungan building). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(6), 1573–1580.
- Pranata, G. (2017). Analisis pengaruh friction damper terhadap upaya retrofitting bangunan di Jakarta. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran dan Ilmu Kesehatan*, 1(1), 293–301. <https://doi.org/10.24912/jmstkik.v1i1.442>
- Zebua, D., & Koespiadi. (2022). Performance evaluation of high-rise building structure based on pushover analysis with ATC-40 method. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 3(02), 54–63. <https://doi.org/10.32722/arcee.v3i02.4334>