BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 165-177

Analisis Daktilitas dan Mekanisme Kegagalan Sambungan Balok-Kolom Pracetak Dengan Perkuatan Kombinasi Pelat BAJA-CFRP

Edo Prasetya Adi[1*], I Kadek Adit Putra Igmas[2], Muhammad Mahesa Ramadhan[3], Nika Devi Permata Wijaya[4], Satrio Cancer Avendi[5]

[1,2,3,4,5]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang, Kota Malang
*Email Korespondensi: prasetya.edo@unmer.ac.id

ABSTRAK

Sambungan balok-kolom pracetak tipe kering rentan mengalami kegagalan getas dan kehilangan daktilitas pada beban siklik, sehingga membutuhkan perkuatan yang efektif. Penelitian ini mengevaluasi retrofit kombinasi pelat baja eksternal, angkur, dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Sheet pada sambungan yang sebelumnya telah dibebani hingga rusak. Pengujian pembebanan quasi-siklik dilakukan pada benda uji eksisting dan retrofit dengan dua variasi pengangkuran, yaitu dua angkur (CP2) dan empat angkur (CP4). Daktilitas perpindahan (μΔ) dihitung dengan pendekatan s*ecant* dan tangensial. Retrofit memulihkan kapasitas beban lateral dan meningkatkan daktilitas dibandingkan kondisi eksisting. CP4 memberikan kapasitas beban tertinggi (Pmaks 17,72 kN dibandingkan 15,58 kN pada CP2), sedangkan CP2 memiliki μΔ lebih tinggi pada acuan Pmaks, baik *secant* (2,98 dibandingkan 2,71) maupun tangensial (9,53 dibandingkan 7,10). Peningkatan daktilitas *secant* terhadap kondisi eksisting mencapai 156,26% (CP2) dan 80,10% (CP4). Simpangan ultimit (Δu) diambil sebesar 45 mm karena pengujian dihentikan akibat gap pada sambungan, debonding, dan angkur mulai kendor sebelum beban turun 20% dari Pmaks, sehingga μΔ merupakan batas bawah. Perkuatan ini meningkatkan daktilitas sambungan pracetak, namun perbedaan antar-konfigurasi masih bersifat indikatif karena hanya satu benda uji per variasi.

Kata Kunci: CFRP, Daktilitas, Pelat Baja, Retrofit, dan Sambungan Balok-Kolom Pracetak.

ABSTRACT

Dry-type precast beam-to-column connections are prone to brittle failure and loss of ductility under cyclic loading, thus requiring effective reinforcement. This study evaluates a retrofit combination of external steel plates, anchors, and Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets on connections that had previously been loaded to failure. Quasi-cyclic loading tests were conducted on existing and retrofitted test specimens with two anchorage variations: two anchors (CP2) and four anchors (CP4). Displacement ductility (μΔ) was calculated using the secant and tangential approaches. The retrofit restored lateral load-carrying capacity and improved ductility compared to the existing condition. CP4 provided the highest load capacity (Pmax 17.72 kN compared to 15.58 kN for CP2), while CP2 had a higher μΔ at the Pmax reference, both secant (2.98 compared to 2.71) and tangential (9.53 compared to 7.10). The increase in secant ductility compared to the existing condition reached 156.26% (CP2) and 80.10% (CP4). The ultimate deflection (Δu) was taken as 45 mm because the test was stopped due to a gap in the joint, debonding, and the anchors beginning to loosen before the load dropped by 20% from Pmax; thus, μΔ represents the lower limit. This reinforcement improves the ductility of precast joints; however, differences between configurations are still indicative since only one test specimen was used per variation.

Keywords: *CFRP, Ductility, Steel Plate, Retrofit, and Precast Beam-Column Connection.*

1. PENDAHULUAN

Sambungan balok–kolom merupakan komponen penting guna menentukan kinerja sistem rangka dalam struktur beton bertulang, khususnya pada konstruksi beton pracetak. Berbeda dengan sistem sambungan basah (*wet connection*), sambungan pracetak dibentuk dari elemen yang diproduksi di pabrik dan dirakit di lapangan sehingga keberadaan bidang sambungan berpotensi menurunkan kemampuan deformasi inelastik serta kestabilan struktur saat menerima pembebanan lateral berulang akibat gempa [1]. Pada kondisi tersebut, sambungan harus mampu menahan kombinasi gaya lentur, geser, dan aksial secara siklik tanpa mengalami kegagalan tiba-

tiba. Tantangan ini semakin besar pada sambungan tipe kering (*dry connection*), karena mekanisme transfer gaya dipengaruhi oleh kontak permukaan, gaya gesek, dan sistem pengikat mekanis, seperti pelat baja, angkur, dan baut. Oleh karena itu, diperlukan metode perkuatan yang efektif untuk meningkatkan kapasitas deformasi dan daktilitas sambungan tanpa menambah beban struktur secara signifikan [2][3]. Salah satu metode perkuatan struktur beton bertulang yang mulai banyak dikembangkan adalah penggunaan material *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) sebagai sistem perkuatan eksternal. Material ini memiliki kuat tarik tinggi, bahan ringan, tahan korosi, dan mudah diaplikasikan. Di antara berbagai jenis FRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) paling banyak digunakan karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta kinerja yang stabil terhadap pengaruh lingkungan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perkuatan CFRP pada sambungan balok–kolom mampu meningkatkan kapasitas deformasi inelastik, daktilitas, dan kestabilan respons histeresis akibat pembebanan siklik. Penggunaan CFRP Sheet maupun pelat baja juga dilaporkan mampu meningkatkan kinerja sambungan beton bertulang [2], [4], [5].

Namun, penelitian mengenai kombinasi pelat baja dan CFRP Sheet pada sambungan balok-kolom beton pracetak tipe kering masih terbatas. Pelat baja efektif meningkatkan kekakuan dan kapasitas geser, sedangkan CFRP memberikan kuat tarik tinggi, efek pengekangan, dan tambahan sifat daktail tanpa menambah berat struktur secara signifikan. Kombinasi kedua material ini diprediksi mampu menghasilkan kinerja sambungan yang lebih baik dibandingkan menggunakan perkuatan dengan material tunggal [6], [7]. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada investigasi sinergi mekanis antara pelat baja eksternal dan lembaran CFRP, serta evaluasi titik pengangkuran mekanis pada sambungan pracetak tipe kering yang belum banyak dieksplorasi secara mendalam. Pemilihan variasi penggunaan 2 angkur (CP2) dan 4 angkur (CP4) secara spesifik ditujukan untuk mengevaluasi efisiensi jumlah pengikat mekanis dalam mendistribusikan konsentrasi tegangan di area sendi plastis, sekaligus memitigasi fenomena terkelupasnya lekatan (*debonding*) prematur pada material komposit. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi perilaku sambungan balok–kolom kering beton pracetak yang diperkuat menggunakan kombinasi pelat baja dan lembaran CFRP melalui pembebanan berulang (quasi-siklik) akibat gempa. Evaluasi dilakukan terhadap kapasitas deformasi, perilaku daktilitas, pola retak, dan mekanisme keruntuhan untuk menilai efektivitas sistem perkuatan dalam meningkatkan kinerja sambungan beton pracetak yang tahan terhadap gempa [8], [9].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daktilitas dan Penentuan Titik Leleh Ekuivalen

Daktilitas (μ_Δ) merupakan salah satu parameter utama dalam mengevaluasi kinerja struktur penahan beban gempa, yang didefinisikan sebagai kemampuan elemen struktur untuk mengalami deformasi inelastik secara signifikan tanpa kehilangan kapasitas layan beban secara tiba-tiba. Kemampuan ini memungkinkan struktur tetap mempertahankan stabilitasnya setelah melewati batas elastis, sehingga keruntuhan bersifat bertahap. Secara matematis, daktilitas dievaluasi berdasarkan hubungan beban-perpindahan (*load-displacement*) dan dirumuskan sebagai rasio antara simpangan pada kondisi batas ultimit (Δu) terhadap simpangan pada saat leleh ekuivalen (Δy) [10]. Hubungan tersebut ditunjukkan pada Persamaan (1):

$$\mu\Delta = \Delta u/\Delta y \quad \text{..... (1)}$$

Keterangan:

μ_Δ : Daktilitas perpindahan (*displacement ductility*)

Δu : Simpangan ultimit, yaitu simpangan pada cabang pasca-puncak saat beban turun 20% dari Pmaks (0,8 Pmaks), atau simpangan maksimum yang dicapai bila pengujian dihentikan sebelum penurunan tersebut (mm)

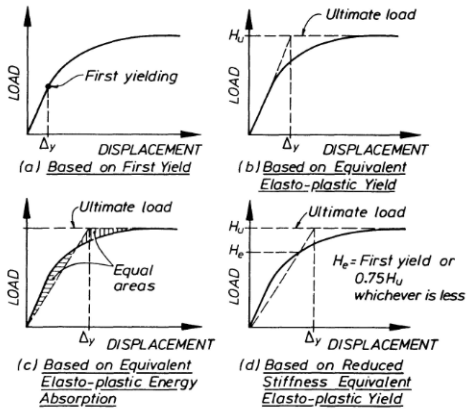
Δy : Simpangan leleh ekuivalen (mm)

Secara umum dikenal dua jenis daktilitas, yaitu daktilitas perpindahan ($\mu\Delta$) dan daktilitas kelengkungan ($\mu\varphi$). Penelitian ini menggunakan $\mu\Delta$ karena hanya tersedia data global hubungan beban–simpangan. Pada pengujian elemen struktur beton pracetak yang tidak dilengkapi instrumen regangan (*strain gauge*) pada tulangan utama, titik leleh (*yield point*) dapat ditentukan

melalui pendekatan geometris pada kurva *backbone* [11]. Oleh karena itu, perpindahan leleh (Δy) tidak dapat diidentifikasi hanya melalui pengamatan visual terhadap retak pertama. Metode analitis yang paling umum dan rasional adalah menggunakan pendekatan geometris pada *backbone curve*.

2.2 Daktilitas Secant dan Daktilitas Tangensial

Dalam mengevaluasi perilaku inelastik struktur akibat pembebanan siklik, daktilitas *Secant* dan tangensial digunakan untuk merepresentasikan parameter stabilitas yang berbeda [12]. Daktilitas s*ecant* mengukur kapasitas deformasi makro global dengan membandingkan simpangan puncak terhadap batas leleh elastisnya, yang menjadi acuan utama dalam desain seismik berbasis perpindahan [13][12]. Garis s*ecant* ditarik dari titik awal menuju titik di mana beban mencapai sekitar 0,75 darzi kapasitas beban maksimum (Pmaks). Garis lurus elastis tersebut kemudian diekstrapolasikan hingga memotong proyeksi garis horizontal dari beban Pmaks. Titik perpotongan inilah yang diproyeksikan ke sumbu absis untuk menentukan nilai perpindahan leleh ekuivalen (Δy). Pendekatan ini merepresentasikan sistem elasto-plastis ekuivalen dengan kekakuan yang telah direduksi akibat respons nonlinier dan retak pada beton [11]. Selanjutnya, indeks daktilitas perpindahan ditentukan sebagai rasio antara perpindahan ultimit (Δu) dan perpindahan leleh (Δy).



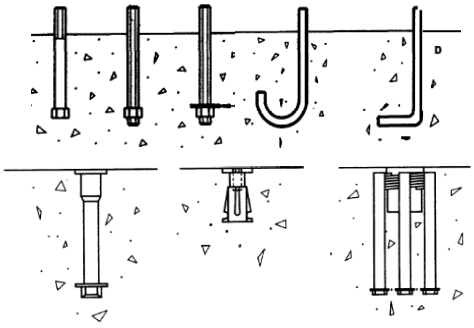
Gambar 1. Pendekatan geometris perpindahan leleh pada *backbone curve*

Sementara itu, metode tangensial menentukan titik leleh berdasarkan pendekatan *equivalent elasto-plastic yield*, yaitu dengan merepresentasikan kurva respons aktual ke dalam sistem elastoplastik ekuivalen untuk memperoleh perpindahan leleh. Pada metode ini, garis kekakuan awal diperpanjang hingga memotong garis horizontal beban Pmaks, dan titik potongnya diproyeksikan ke sumbu simpangan sebagai Δy (Gambar 1- b). Pendekatan tangensial dan *secant* dapat menghasilkan nilai perpindahan leleh dan indeks daktilitas yang berbeda karena menggunakan idealisasi respons struktur yang berbeda. Pada sambungan balok–kolom beton pracetak dengan *dry connection*. Cahyani dkk. [14] menerapkan kedua pendekatan tersebut untuk mengevaluasi daktilitas sambungan dan menentukan kondisi ultimit pada tiga kondisi, yaitu saat mencapai beban maksimum (*peak load*), saat beban menurun sebesar 5% dari beban maksimum, dan pada akhir pengujian. Dengan demikian, perbedaan metode penentuan perpindahan leleh perlu dipertimbangkan secara konsisten dalam perhitungan daktilitas. Ling dkk. [12] menegaskan bahwa berbagai metode penentuan daktilitas dapat menghasilkan nilai yang berbeda untuk benda uji yang sama, sehingga perbandingan antar benda uji harus dilakukan menggunakan metode yang sama.

2.3 Perilaku Sambungan dry-Joint dan Perkuatan CFRP–Pelat Baja

Sambungan kering (*dry-joint*) pada struktur beton pracetak pada Gambar 2 mentransfer gaya melalui mekanisme mekanis seperti kontak, friksi, baut, angkur, dan elemen baja [15]. Pada pembebanan lateral siklik, mekanisme tersebut dapat menghasilkan slip, pembukaan dan penutupan celah (*gap opening–closing*), serta konsentrasi tegangan yang memengaruhi kapasitas deformasi dan mekanisme kegagalan sambungan [16][17]. Penggunaan *steel connector* pada

sambungan balok-kolom pracetak dapat menghasilkan perilaku daktail melalui deformasi inelastis pada komponen baja serta memengaruhi kapasitas deformasi dan disipasi energi sambungan [17]. Penelitian lain mengenai sambungan pracetak dengan pelat baja juga menunjukkan bahwa konfigurasi dan dimensi pelat berpengaruh terhadap respons histeresis dan daktilitas sambungan [18].



Gambar 2. Model pengangkuran beton pracetak

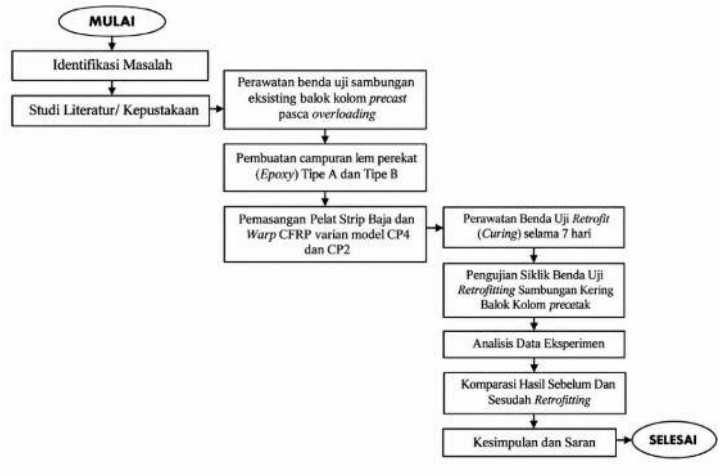
2.4 Perkuatan Komponen Struktur

Perkuatan struktur (*structural strengthening*) merupakan metode rehabilitasi yang bertujuan meningkatkan kapasitas dan kinerja struktur beton bertulang akibat degradasi, perubahan fungsi, kesalahan desain, maupun beban ekstrem. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Fiber Reinforced Polymer* (FRP), khususnya *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, tahan korosi, dan relatif mudah diaplikasikan. CFRP dapat digunakan dalam bentuk *Sheet*, *plate/laminate*, maupun *Near Surface Mounted* (NSM) dan telah diterapkan untuk meningkatkan kapasitas serta kemampuan deformasi elemen beton [19][20]. Pada sambungan balok-kolom, efektivitas perkuatan CFRP dipengaruhi oleh konfigurasi pemasangan dan meliputi mekanisme transfer gaya. Beberapa metode retrofit sambungan balok-kolom beton bertulang terhadap pembebanan siklik yang telah dikaji meliputi CFRP *laminate*, kombinasi CFRP *laminate*–CFRP *Sheet*, pelat baja, serta tulangan tambahan yang dikombinasikan dengan CFRP *Sheet*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi perkuatan memengaruhi respons siklik, kapasitas, daktilitas, dan mekanisme kerusakan sambungan [21]. Pada sambungan pracetak, Xian Rong dkk. [17] menunjukkan bahwa *steel connector* dapat mengalami deformasi inelastis dan berkontribusi terhadap perilaku daktail sambungan. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa kombinasi pelat baja dan CFRP dapat digunakan pada retrofit beam-column joint untuk meningkatkan kapasitas dan kemampuan deformasi sambungan. Penelitian terdahulu tersebut menunjukkan bahwa CFRP dan komponen baja memiliki potensi yang berbeda dalam meningkatkan kinerja sambungan, tetapi penerapan kombinasi pelat baja-CFRP pada sambungan balok-kolom pracetak tipe *dry-joint* masih terbatas. Khususnya, kajian yang memfokuskan kombinasi tersebut terhadap daktilitas dan mekanisme kegagalan akibat pembebanan siklik masih perlu dikembangkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis daktilitas dan mekanisme kegagalan sambungan balok-kolom pracetak dengan perkuatan kombinasi pelat baja-CFRP.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Secara keseluruhan, tahapan pelaksanaan penelitian ini dilakukan secara sistematis mulai dari tahap persiapan hingga penarikan kesimpulan. Rangkaian tahapan penelitian tersebut disajikan secara ringkas dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.

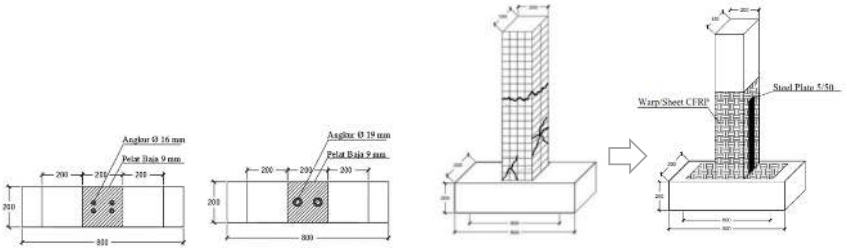


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3.2 Detail Benda Uji

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan melakukan *retrofitting* pada benda uji eksisting berupa sambungan balok-kolom pracetak metode sambungan kering seperti pada Gambar 4. Benda uji balok pracetak memiliki dimensi penampang 150x200 mm dengan panjang 1000 mm, sedangkan kolom berdimensi 200x200 mm dengan panjang 800 mm. Mutu beton (f'c) yang digunakan untuk kedua elemen adalah 25 MPa, dengan tegangan leleh baja tulangan (fy) sebesar 366,94 MPa. Penulangan utama menggunakan baja berdiameter 12 mm dan sengkang berdiameter 8 mm. Konfigurasi sambungan menggunakan pelat baja penahan setebal 9 mm dengan variasi penggunaan 2 dan 4 buah angkur berdiameter 16 mm dan 19 mm. Benda uji eksisting telah melewati tahap pembebanan quasi-siklik hingga mencapai kondisi *overloading*, yang ditandai dengan penurunan kapasitas beban sebesar 20% setelah melewati titik puncak (*peak*). Untuk model variasi benda dijabarkan sebagaimana berikut:

a. Model CP4: Perkuatan kombinasi pelat baja dan CFRP *Sheet* dengan menggunakan 4 buah angkur pada area sambungan.
b. Model CP2: Perkuatan kombinasi pelat baja dan CFRP *Sheet* dengan menggunakan 2 buah angkur pada area sambungan



Gambar 4. Model *Dry-joint* Balok-Kolom dan Model *Retrofitting*

3.3 Spesifikasi Material Perkuatan

Material utama yang diaplikasikan untuk perkuatan sambungan meliputi lembaran *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dan pelat baja strip. Perekatan material menggunakan resin epoxy dua komponen (dasar dan *hardener*). Lem perekat (*epoxy*) meresap ke dalam serat FRP sehingga memberikan efek ikat yang kuat. Semua metode dan pengaplikasian epoxy dirangkum dalam [22]. Detail spesifikasi disajikan pada Tabel 1. Sebelum tahap perkuatan, seluruh benda uji eksisting telah melewati tahap pengujian pembebanan quasi-siklik hingga mencapai fase kegagalan (*overloading*). Riwayat kerusakan awal secara kuantitatif ditetapkan berdasarkan kurva histeresis penelitian sebelumnya, di mana benda uji eksisting E4 (4 angkur) dibebani hingga mencapai beban puncak rata-rata sebesar 14,79 kN, sedangkan benda uji E2 (2 angkur) mencapai 12,51 kN. Pembebanan terus dilanjutkan hingga mengalami penurunan

kekuatan sebesar 20% dari beban puncak, yakni menjadi sekitar 11,83 kN untuk varian E4 dan 10,01 kN untuk varian E2. Pada fase ini, terbentuk retak lentur dominan yang diikuti dengan pembukaan celah (*gap opening*) pada antarmuka pertemuan sambungan balok-kolom. Sebagai respons atas kerusakan tersebut, sistem perkuatan diaplikasikan dengan menempatkan pelat baja melintasi area retakan yang memiliki panjang penyaluran (*development length*) sejauh 500 mm secara vertikal pada penampang kolom. Area pelat baja tersebut kemudian dibungkus menggunakan lilitan CFRP *Sheet* secara parsial yang dikhususkan pada zona kritis sambungan (pertemuan balok dan kolom) untuk memberikan gaya kekangan (*confinement*) yang terpusat tanpa menyelubungi keseluruhan elemen struktur.

Tabel 1. Spesifikasi Material Perkuatan dan Perekat

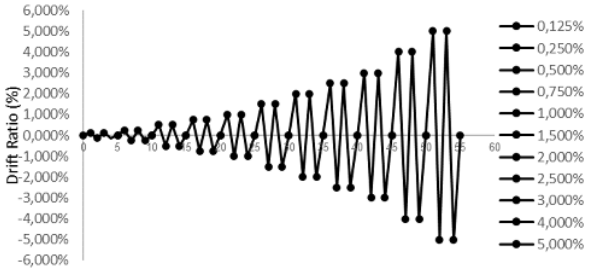
Jenis Material	Merk / Tipe	Fungsi dan Spesifikasi
FRP Lembaran	SikaWrap 231C	Berbentuk *CFRP Wrap* untuk menahan gaya geser sambungan.
Pelat Baja Strip	Baja Strip 5x50 mm	Dipasang pada area balok sebagai penahan gaya lentur dan menambah kekakuan.
Epoxy Tipe A:B	SikaDur 30	Perekat pelat baja strip (rasio komponen A dan B = 3:1)
Epoxy Tipe A:B	SikaDur 330	Perekat CFRP *Sheet* (rasio komponen A dan B = 4:1).
Grouting	Sika-grout	Penambal retakan/pecahan beton eksisting pasca-kerusakan.

3.4 Prosedur Pengujian

Setelah proses perkuatan selesai, benda uji menjalani masa perawatan (*curing*) selama 7 hari untuk memastikan material perekat epoxy mencapai kekuatan lekat yang optimal. Pengujian kemudian dilakukan menggunakan aktuator hidrolik berkapasitas tinggi dengan memberikan beban lateral quasi-siklik guna mensimulasikan gaya gempa. Pengujian mengadopsi standar ACI374.1 [23] dengan mengaplikasikan beban quasi-siklik berdasarkan kontrol simpangan (*displacement control*). Pembebanan dimulai dengan drift ratio 0,125%, kemudian dinaikkan menjadi 0,25% dan 0,50%, lalu dengan interval 0,25% hingga 1,00%, interval 0,50% hingga 3,00%, dan interval 1,00% hingga 5,00%. Setiap tahap terdiri atas dua siklus. Detail siklus dan pola pembebanan lateral tersebut disajikan pada Tabel 2 dan diilustrasikan pada Gambar 5.

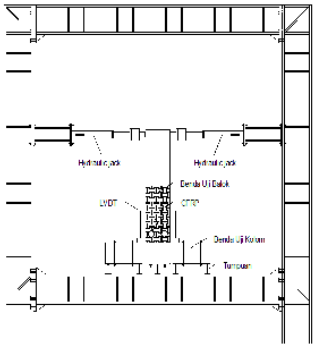
Tabel 2. Siklus pembebanan *quasi-siklik*

Tahap	Simpangan (mm)		*Drift Ratio*
	(+)	(-)	(%)
1	1,13	1,13	0,125%
2	2,25	2,25	0,25%
3	4,50	4,50	0,50%
4	6,75	6,75	0,75%
5	9,00	9,00	1,00%
6	13,50	13,50	1,50%
7	18,00	18,00	2,00%
8	22,50	22,50	2,50%
9	27,00	27,00	3,00%
10	36,00	36,00	4,00%
11	45,00	45,00	5,00%



Gambar 5. Pola Pembebanan

Guna memperoleh data deformasi presisi, permukaan spesimen dipetakan dengan grid berukuran 50 mm x 50 mm. Titik acuan ditetapkan pada perpotongan as kolom dan permukaan balok. Berdasarkan acuan tersebut, aktuator hidrolik dan LVDT lateral diletakkan sejajar pada ketinggian 850 mm. Dua dial gauge dipasang menyilang di area joint dengan pusat persilangan setinggi 300 mm. Dua LVDT vertikal menumpu pada balok berjarak 150 mm dari as kolom (Gambar 6). Data dari load cell dan LVDT direkam otomatis melalui data logger. Karena menggunakan spesimen eksisting tanpa strain gauge, evaluasi difokuskan pada analisis visual serta pendekatan analitis daktilitas secant dan tangensial yang diturunkan dari respons global struktur pada pengujian quasi-siklik balok-kolom pracetak ini.:



Gambar 6. *Setting* alat pembebanan quasi-siklik

3.5 Analisa Data

Kurva *backbone* (hubungan beban–simpangan) dibentuk dari titik-titik puncak siklus pada arah beban yang memberikan Pmaks lebih besar (sisi positif untuk CP4 dan sisi negatif untuk CP2). Nilai daktilitas *secant* dan tangensial ditentukan dengan mempertimbangkan dua kondisi beban acuan berikut, yaitu Py1 dan Pmaks seperti yang dijelaskan di bawah ini:

a) Beban pada belokan pertama kurva (leleh pertama)

Titik ini adalah belokan pertama pada kurva *backbone*, yaitu pada simpangan 18 mm (drift ratio 2%), tempat kurva mulai berubah dari perilaku hampir linier menuju perilaku nonlinier. Karena benda uji tidak dilengkapi *strain gauge*, titik ini ditentukan dari bentuk kurva *backbone*, bukan dari regangan. Beban pada titik ini disebut beban leleh pertama (Py1) dan dipakai sebagai beban acuan untuk menentukan perpindahan leleh ekuivalen (Δy).

b) Beban maksimum (Pmaks) pada ujung kurva

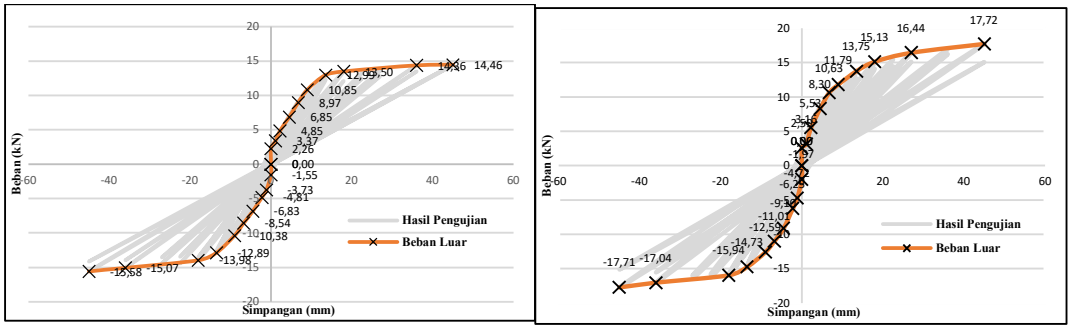
Titik ini adalah beban maksimum (Pmaks) pada ujung kurva *backbone*, yaitu pada simpangan 45 mm. Pada kedua benda uji, kuat lateral belum turun hingga 0,8 Pmaks ketika pengujian dihentikan, sehingga Δu diambil pada simpangan maksimum yang dicapai (45 mm) dan μΔ yang dilaporkan merupakan batas bawah (konservatif).

Perpindahan leleh ekuivalen (Δy) pada kedua kondisi acuan (Py1 dan Pmaks) ditentukan secara geometris dari kurva *backbone* dengan dua idealisasi (Gambar 1). Pada metode s*ecant* (Gambar 1d), garis ditarik dari titik awal melalui titik backbone pada 0,75 dari beban acuan (0,75 Py1 atau 0,75 Pmaks; diperoleh dengan interpolasi linear antar titik puncak siklus), diperpanjang hingga memotong garis horizontal beban acuan tersebut, kemudian titik potongnya diproyeksikan ke sumbu simpangan. Pada metode tangensial (Gambar 1b), garis kekakuan awal ditarik dari titik awal melalui titik backbone pertama (1,13 mm), diperpanjang hingga memotong garis horizontal beban acuan, kemudian diproyeksikan dengan cara yang sama. Perpindahan ultimit (Δu) didefinisikan sebagai simpangan pada cabang pasca-puncak saat beban turun 20% dari Pmaks. Pada pengujian ini, beban belum turun hingga nilai tersebut ketika pengujian dihentikan pada simpangan 45 mm akibat gap pada sambungan, debonding, dan angkur mulai kendor, sehingga cabang pasca-puncak tidak terekam. Karena itu Δu benda uji retrofit diambil sebesar 45 mm dan μΔ yang dilaporkan merupakan batas bawah. Δu benda uji eksisting diambil sesuai hasil pengujian, yaitu pada kondisi pengujian yang berbeda, sehingga perbandingannya bersifat indikatif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kurva Histeresis

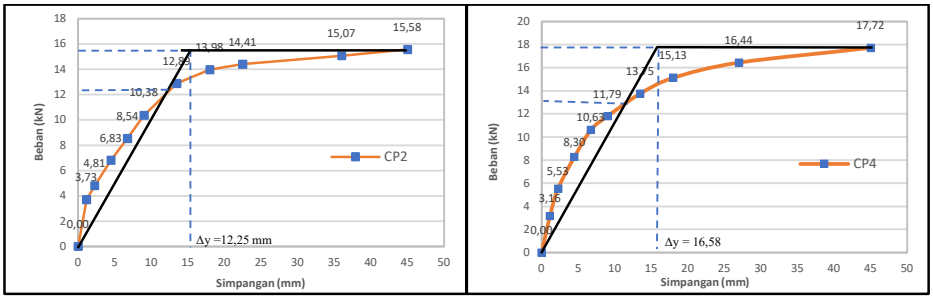
Pengujian sambungan balok–kolom beton pracetak dengan sistem sambungan kering yang diperkuat menggunakan kombinasi material Pelat Baja dan CFRP *Sheet* dilakukan melalui metode pembebanan quasi-siklik untuk mengevaluasi sifat, karakteristik, serta respons struktur akibat beban berulang secara mendalam. Data primer hasil pengujian yang berupa hubungan dinamis antara beban (*load*) dan simpangan (*displacement*) kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk kurva histeresis. Selanjutnya, kurva histeresis tersebut dijadikan dasar utama dalam analisis perilaku struktur dengan membentuk kurva *backbone* atau kurva selubung. Pembentukan kurva ini dilakukan dengan menghubungkan titik-titik respons puncak yang terjadi pada setiap siklus, baik pada arah pembebanan positif maupun negatif, sehingga memberikan gambaran visual mengenai degradasi kekuatan dan stabilitas struktur. Analisis kurva *backbone* sangat krusial untuk menentukan parameter leleh, kapasitas ultimit, serta tingkat daktilitas sambungan pasca-perkuatan. Adapun hasil plot kurva histeresis dan kurva *backbone* yang merepresentasikan perilaku mekanis benda uji dari seluruh rangkaian pengujian tersebut disajikan secara detail pada hasil Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Hasil kurva histeresis benda uji retrofit 4 angkur (kiri) 2 angkur (kanan)

Berdasarkan gambaran kurva histeresis yang dihasilkan dari pengujian beban quasi-siklik pada Gambar 7, terlihat adanya perbedaan karakteristik visual pada mekanisme respon struktural yang dipengaruhi secara langsung oleh efektivitas sistem perkuatan pada area sambungan. Bentuk dan tingkat kepadatan kurva tersebut mencerminkan kemampuan sistem kombinasi dalam perkuatan struktur sambungan kering balok-kolom untuk mendistribusikan tegangan secara merata, sekaligus mempertahankan integritas komponen selama proses pembebanan berulang berlangsung. Selain itu, luasan serta kelandaian kurva histeresis yang terbentuk mengindikasikan tingkat kapasitas disipasi energi gempa dan ketahanan spesimen uji terhadap fenomena degradasi kekakuan lateral. Guna memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perbandingan performa antar variabel antara kondisi eksisting dan objek retrofit, rincian hasil pengujian kuantitatif, nilai parameter daktilitas, serta analisis mendalam terkait perilaku mekanis pasca-leleh struktur tersebut akan dijabarkan secara sistematis pada poin-poin penjelasan berikut ini:

a) Daktilitas Secant acuan Py1 dan Pmaks



Gambar 8. Kurva *Backbone* Daktilitas *Secant* benda uji retrofit 4 angkur (kiri) 2 angkur (kanan)

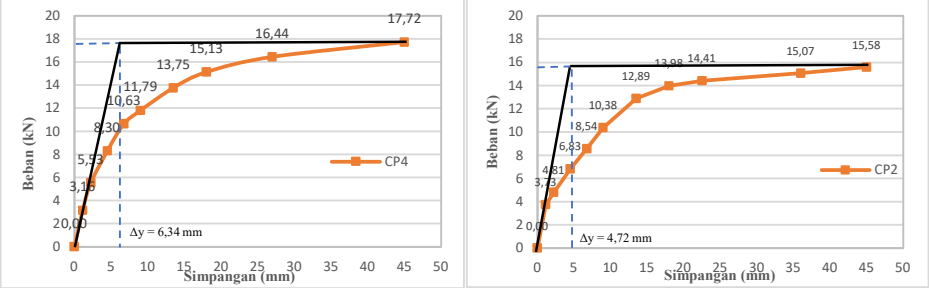
Tabel 3. Daktilitas *secant* dengan acuan Py1 dan Pmaks (Δu = 45 mm)

Daktilitas *Secant*, Acuan Py1				
Benda Uji	Py1 (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	15,13	45,00	10,84	4,15
CP2	13,98	45,00	12,25	3,67
Daktilitas *Secant*, Acuan Pmaks				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	16,58	2,71
CP2	15,58	45,00	15,12	2,98

Hasil analisis daktilitas s*ecant* pada Tabel 3 menunjukkan bahwa konfigurasi CP4 (empat angkur) memberikan μΔ lebih tinggi daripada CP2 pada acuan Py1 (4,15 berbanding 3,67), sedangkan pada acuan Pmaks CP2 sedikit lebih tinggi daripada CP4 (2,98 berbanding 2,71). Δu yang dipakai adalah 45 mm untuk kedua benda uji (simpangan akhir pengujian), sehingga nilai μΔ merupakan batas bawah. Nilai daktilitas s*ecant* ini merepresentasikan rasio simpangan ultimit terhadap simpangan leleh ekuivalen, yang menjadi indikator kemampuan struktur menyerap energi tanpa kehilangan stabilitas kekakuan secara mendadak. Urutan antara CP4 dan CP2 berbeda menurut acuan beban yang dipakai dan selisihnya relatif kecil, dengan satu benda uji untuk tiap variasi. Oleh karena itu pengaruh jumlah angkur terhadap distribusi gaya dan daktilitas masih bersifat indikatif dan perlu diverifikasi dengan jumlah benda uji yang lebih banyak.

Peningkatan kapasitas deformasi pasca-leleh tersebut turut didorong oleh mekanisme kekangan (*confinement*) dari CFRP *Sheet* yang bekerja sinergis dengan pelat baja eksternal dalam menahan ekspansi lateral beton. Pada fase mendekati beban puncak, CFRP membantu membatasi perambatan retak diagonal dan menunda kegagalan lekat (*debonding*) pada pelat baja, sehingga struktur mampu mengembangkan kapasitas deformasi pasca-leleh yang lebih besar. Meskipun demikian, *debonding*, gap pada sambungan, dan angkur yang mulai kendor tetap terjadi menjelang simpangan 45 mm, sehingga pengujian dihentikan pada simpangan tersebut.

b) Daktilitas Tangensial acuan Py1 dan Pmaks



Gambar 9. Kurva *Backbone* Daktilitas Tangensial benda uji retrofit 4 angkur (kiri) 2 angkur (kanan)

Tabel 4. Daktilitas tangensial dengan acuan Py1 dan Pmaks (Δu = 45 mm)

Daktilitas Tangensial, Acuan Py1				
Benda Uji	Py1 (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	15,13	45,00	5,41	8,32
CP2	13,98	45,00	4,24	10,62
Daktilitas Tangensial, Acuan Pmaks				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	6,34	7,10
CP2	15,58	45,00	4,72	9,53

Analisis daktilitas tangensial melengkapi evaluasi s*ecant* dengan idealisasi perpindahan leleh yang berbeda, sehingga nilai indeksnya tidak dapat dibandingkan langsung dengan hasil s*ecant*. Pada acuan Py1, CP2 mencatat μΔ lebih tinggi daripada CP4 (10,62 berbanding 8,32),

dan pola yang sama terlihat pada acuan Pmaks (9,53 untuk CP2 dan 7,10 untuk CP4; Tabel 4; Gambar 9). Perbedaan ini berasal dari perpindahan leleh tangensial CP2 yang lebih kecil (Δy = 4,72 mm dibandingkan 6,34 mm untuk CP4 pada acuan Pmaks) dengan Δu yang sama (45 mm). Sebaliknya, CP4 mencapai Pmaks yang lebih tinggi (17,72 kN dibandingkan 15,58 kN). Nilai Δy tangensial sensitif terhadap cara penarikan garis kekakuan awal, sedangkan kurva backbone sudah melengkung sejak titik pertama, sehingga selisih antar-konfigurasi perlu ditafsirkan dengan hati-hati. Karena benda uji belum dilengkapi pengukuran regangan lokal dan hanya terdapat satu benda uji untuk tiap variasi, peran jumlah angkur masih bersifat indikatif. Pada kedua konfigurasi, μΔ tangensial retrofit pada acuan Pmaks (7,10–9,53) jauh melampaui kondisi eksisting (3,00–3,46; Tabel 6), sehingga efektivitas sistem perkuatan tetap terkonfirmasi.

4.2 Perbandingan Nilai Daktilitas Retrofitting dan Eksisting

Untuk merangkum evaluasi parameter inelastik sebelumnya, hasil perhitungan dari masing-masing model dibandingkan secara langsung dengan kondisi awalnya (eksisting). Perbandingan ini bertujuan untuk membuktikan secara nyata seberapa efektif sistem perkuatan kombinasi dalam mendongkrak kinerja sambungan pracetak. Melalui penyajian data ini, peran jumlah angkur dapat terlihat lebih jelas, terutama pengaruhnya dalam menahan beban lateral dan menekan laju penurunan kekakuan struktur. Perbandingan dilakukan pada acuan Pmaks, dan Δu benda uji eksisting serta retrofit diambil pada kondisi pengujian yang berbeda (Tabel 5 dan 6). Secara terperinci, kapasitas deformasi struktur secara keseluruhan (daktilitas s*ecant*) dirangkum pada Tabel 5, sedangkan tingkat stabilitas struktur setelah melewati fase leleh (daktilitas tangensial) disajikan pada Tabel 6 berikut:

Tabel 5. Perbandingan Daktilitas Eksisting dan *Retrofit*ting Metode *Secant* di titik P Maks

Metode *Secant*				
Benda Uji Eksisting				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
E4	14,79	18,00	11,94	1,51
E2	12,51	27,00	23,25	1,16
Benda Uji *Retrofit*				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	16,58	2,71
CP2	15,58	45,00	15,12	2,98
E4 – CP4	Rasio Kenaikan eksisting dan pasca retrofit (%)			80,10
E2 – CP2				156,26

Tabel 6. Perbandingan Daktilitas Eksisting dan *Retrofit*ting Metode Tangensial di titik P Maks

Metode Tangensial				
Benda Uji Eksisting				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
E4	14,79	18,00	5,20	3,46
E2	12,51	27,00	9,00	3,00
Benda Uji *Retrofit*				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	6,34	7,10
CP2	15,58	45,00	4,72	9,53
E4 – CP4	Rasio Kenaikan eksisting dan pasca retrofit (%)			105,12
E2 – CP2				217,65

Perbandingan pada Tabel 5 menegaskan efektivitas perkuatan kombinasi pelat baja–CFRP Sheet dalam meningkatkan daktilitas sambungan dibandingkan kondisi eksisting. Secara nilai mutlak, CP2 mencatat μΔ *secant* tertinggi (2,98), sedangkan peningkatan terhadap eksisting mencapai 156,26% untuk CP2 dan 80,10% untuk CP4, karena kondisi awal E2 paling rendah (μΔ = 1,16). Pola ini menunjukkan bahwa perkuatan meningkatkan daktilitas sambungan pada kedua konfigurasi, terlepas dari jumlah angkur yang digunakan.

Pada Tabel 6, metode tangensial memberikan pola yang sejalan: CP2 mencatat μΔ tertinggi (9,53 berbanding 7,10 untuk CP4) dan rasio kenaikan tertinggi (217,65% berbanding 105,12% untuk CP4) terhadap kondisi eksistingnya. Konsistensi pola antara kedua metode ini memperkuat temuan, meskipun besaran indeksnya berbeda karena perbedaan idealisasi titik leleh. Karena selisih antar-konfigurasi tidak besar, pengujian belum dilengkapi strain gauge, dan tiap variasi hanya terdiri atas satu benda uji, kontribusi jumlah angkur terhadap distribusi gaya lokal masih bersifat indikatif dan perlu diverifikasi dengan jumlah benda uji yang lebih banyak. Secara keseluruhan, kedua metode memvalidasi efektivitas retrofit dalam meningkatkan daktilitas sambungan pracetak terhadap ancaman beban seismik; nilai μΔ retrofit merupakan batas bawah karena pengujian dihentikan pada simpangan 45 mm.

4.3 Pola Retak dan Mekanisme Keruntuhan



Gambar 10. Pola Retak Benda Uji *Retrofit* CP4

Analisis visual terhadap pola retak pada benda uji CP4 (Gambar 10) menunjukkan bahwa kegagalan didominasi oleh retak lentur yang muncul pada area balok tepat di atas batas lembaran CFRP *Sheet*. Fenomena pembukaan celah (*gap opening*) pada permukaan sambungan balok-kolom mulai teramati saat simpangan mencapai 18 mm atau pada tahap ke-7 (drift ratio 2%). Pembukaan celah, debonding, dan angkur yang mulai kendor berkembang hingga simpangan 45 mm (drift ratio 5%), yang menjadi alasan pengujian dihentikan. Pola retak ini mengindikasikan bahwa sistem perkuatan kombinasi dapat menggeser konsentrasi tegangan dari pusat sambungan ke area balok, sehingga integritas inti sambungan tetap terjaga. Mekanisme ini menunjukkan keberhasilan metode *retrofit* dalam meningkatkan kinerja struktural sambungan kering melalui pendistribusian regangan yang lebih merata.



Gambar 11. Pola Retak Benda Uji *Retrofit* CP2

Berbeda dengan benda uji 4 buah angkur, mekanisme keruntuhan benda uji dengan 2 buah angkur yang diperkuat CFRP terjadi karena retakan dan terkelupasnya CFRP Sheet pada permukaan sambungan balok dan kolom (Gambar 11). Retakan pada permukaan bermula pada tahap ke-5 dengan *drift ratio* 1% (simpangan 9 mm) dan terus berlanjut hingga pengujian dihentikan. Saat memasuki tahap ke-7 dengan *drift ratio* 2% (simpangan 18 mm), CFRP Sheet mulai terkelupas dan angkur penahan sambungan mulai longgar akibat beban tekan dan tarik yang diterima benda uji secara terus-menerus selama pengujian. Kerusakan ini berkembang hingga simpangan 45 mm (*drift ratio* 5%), yaitu saat pengujian dihentikan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian eksperimental, retrofit kombinasi pelat baja dan CFRP Sheet terbukti efektif memulihkan kapasitas beban lateral dan meningkatkan daktilitas sambungan balok-kolom pracetak dibandingkan kondisi eksisting. Konfigurasi empat angkur (CP4) memberikan kapasitas beban tertinggi (Pmaks = 17,72 kN), sedangkan dua angkur (CP2) memberikan μΔ s*ecant* tertinggi pada acuan Pmaks (2,98 berbanding 2,71) dan peningkatan tertinggi terhadap kondisi eksisting (156,26%; CP4: 80,10%). Daktilitas tangensial menunjukkan pola serupa (CP2 = 9,53; CP4 = 7,10). Nilai μΔ merupakan batas bawah karena Δu diambil pada simpangan akhir 45 mm, saat pengujian dihentikan akibat gap pada sambungan, debonding, dan angkur mulai kendor sebelum beban turun 20% dari Pmaks. Hasil ini masih merupakan indikasi awal karena jumlah benda uji terbatas dan tidak ada *strain gauge*. Penelitian lanjutan disarankan mencakup pemodelan *Finite Element Analysis* untuk distribusi tegangan antar variasi angkur, evaluasi kekakuan dan disipasi energi per siklus, serta ketahanan jangka panjang perekat epoksi terhadap degradasi lingkungan dan beban siklik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Tarabia, S. Allam, E. Etman, and M. Aboelhassan, "Behavior of precast reinforced concrete beam-column external connections under cyclic loading," *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 185, p. PII-27-PII-43, 2019, doi: 10.2495/ERES190031.

[2] M. Rahmanpour, M. Zarrin, H. Afshin, P. Shakor, D. N. Qader, and F. Aslani, "Experimental study on repairing and retrofitting lightweight concrete external beam-column joint under cyclic loading using steel plates and CFRP," *Structures*, vol. 87, p. 111760, 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111760.

[3] Y. Zhong, F. Xiong, J. Chen, A. Deng, W. Chen, and X. Zhu, "Experimental study on a novel dry connection for a precast concrete beam-to-column joint," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 17, 2019, doi: 10.3390/su11174543.

[4] S. Tayfur, N. Alver, E. Türk, M. Menteşoğlu, and E. Ercan, "Failure Behavior of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Beam–Column Joints under Reversed-Cyclic Lateral Loading: Mechanical and Acoustic Emission Observations," *Structural Engineering International*, vol. 34, pp. 1–12, Feb. 2023, doi: 10.1080/10168664.2022.2164237.

[5] R. S. Prakash and N. Parthasarathi, "Experimental and numerical study on FRP-rehabilitated RC beam-column joints at high temperature with artificial neural network," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–26, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-16055-9.

[6] M. Assad, R. A. Hawileh, and J. A. Abdalla, "Flexural strengthening of reinforced concrete beams with CFRP laminates and spike anchors," *Composites Part C: Open Access*, vol. 13, no. February, p. 100443, 2024, doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100443.

[7] A. Ebanesar, H. Gladston, E. Noroozinejad Farsangi, and S. V. Sharma, "Strengthening of RC beam-column joints using steel plate with shear connectors: Experimental investigation," *Structures*, vol. 35, no. August 2021, pp. 1138–1150, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.042.

[8] R. Al-Rousan *et al.*, "Cyclic Behavior of FRP Strengthened Beam-Column Joints under Various Concrete Damage Levels," *Construction Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 38–61, 2023, doi: 10.3390/constrmater3010004.

[9] S. Singhal, A. Chourasia, and Y. Kajale, "Cyclic behaviour of precast reinforced concrete beam-columns connected with headed bars," *Journal of Building Engineering*, vol. 42, p. 103078, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103078.

[10] T. Paulay and M. J. N. Priestly, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. 2009. doi: 10.1002/9780470172841.

[11] Park.R, "Ductility Evaluation From Laboratory and Analytical Testing," *Procedings og ninth world conference on earthquake engineering*, 1988.

[12] J. H. Ling, Y. T. Lim, and E. Jusli, "Methods to Determine Ductility of Structural Members: A Review," *Journal of the Civil Engineering Forum*, vol. 9, no. May, pp. 181–194, 2023, doi: 10.22146/jcef.6631.

[13] G. M. Calvi, N. M. J. Priestley, and M. J. Kowalsky, "Displacement Based Seismic Design of Structures - MJN Priestley high resolution.pdf," *5th New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*, 2008.

[14] K. N. Cahyani, A. Soehardjono, and A. Wibowo, "Ductility of Precast Concrete Beam-Column Connection Using Dry Connection Method," 2019.

[15] American Concrete Institute, "ACI 355.1R-91 : Anchorage to Concrete," 1991.

[16] K. Y. C. *et al.*, "Seismic-Resistant Precast Concrete Structures: State of the Art," *Journal of Structural Engineering*, vol. 144, no. 4, p. 3118001, Apr. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001972.

[17] Xian Rong, Hongwei Yang, and Jianxin Zhang, "Experimental study of precast beam-to-column joints with steel connectors under cyclic loading," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 13, pp. 2822–2834, Oct. 2020, doi: 10.1177/1369433220920448.

[18] H. Ashad, "Experimental Study of Precast Beam Joints Using Steel Plates in Beam-Column Joints Due to Cyclic Loading," *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, vol. 8, no. 2, pp. 137–148, 2023, doi: 10.51557/pt_jiit.v8i1.2096.

[19] "440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," *440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, 2017, doi: 10.14359/51700867.

[20] K. Heiza, A. Nabil, N. N. Meleka, and T. M, "Strengthening of Reinforced Concrete Structures – Different Strengthening Techniques," *Sixth International Conference on Nano-Technology in Construction*, no. March, pp. 1–24, 2022.

[21] a K. Balasubramaniana, N. Lakshmananb, C. Antony Jeyasehare,G. Ramesha and B.H. Bharatkumar*, "EVALUATION OF PERFORMANCE OF RETROFITTED REINFORCED CONCRETE BEAM COLUMN JOINTS– A SIMPLIFIED MODEL K.," vol. 13, no. 6, pp. 783–803, 2012.

[22] ACI Committee 503, "ACI 503R-93. Use of epoxy compounds with concrete (Reapproved)," *American Concrete Institute (ACI)*, vol. 93, pp. 1–28, 1998.

[23] ACI374.1, "ACI CODE-374.1-05(19): Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (Reapproved 2019)," *American Concrete Institute*, pp. 1–9, 2019.