

ANALISIS PERKUATAN FERROCEMENT TERHADAP SAMBUNGAN BALOK KOLOM MENGGUNAKAN MIDAS FEA

Arif Sandjaya^{1*}, Sunarjo Leman¹, dan Nichoulas Bagas Aryobimo Saputra¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
^{*}arifs@ft.untar.ac.id

Masuk: 09-12-2025, revisi: 23-12-2025, diterima untuk diterbitkan: 05-01-2026

ABSTRACT

This study evaluates the structural behavior of reinforced concrete beam-column joints strengthened with ferrocement using nonlinear finite element analysis performed in MIDAS FEA. Beam-column joints are critical regions in reinforced concrete structures, particularly under seismic loading, where strength and ductility demands are significant. Five numerical models were analyzed, consisting of one unstrengthened control model and four strengthened models with variations in wire mesh diameter, number of wire mesh layers, and mortar compressive strength. The analysis focused on the load-displacement response, ultimate load capacity, ductility, and failure mechanisms of the joints. The results show that ferrocement strengthening significantly improves joint performance by increasing the initial cracking load and ultimate load by approximately 35–40% compared to the unstrengthened model. Among the strengthened configurations, the model with higher mortar compressive strength (f_{c45}) exhibited the highest ultimate capacity and ductility, accompanied by a more stable post-cracking response and delayed crushing of the core concrete. Overall, the findings confirm that ferrocement is an effective strengthening technique for enhancing the strength, ductility, and crack control of reinforced concrete beam-column joints, with mortar compressive strength having a more dominant influence than the number of wire mesh layers.

Keywords: Beam-column joint; ferrocement; nonlinear analysis; ductility; MIDAS FEA

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi perilaku struktural sambungan balok-kolom beton bertulang yang diperkuat menggunakan *ferrocement* melalui analisis elemen hingga nonlinier dengan perangkat lunak MIDAS FEA. Sambungan balok-kolom merupakan elemen kritis dalam struktur beton bertulang, khususnya terhadap beban gempa, sehingga peningkatan kapasitas dan daktilitasnya menjadi aspek yang penting. Dalam penelitian ini dianalisis lima model numerik, yang terdiri dari satu model tanpa perkuatan sebagai pembandingan dan empat model dengan perkuatan *ferrocement* yang divariasikan berdasarkan diameter *wiremesh*, jumlah lapisan *wiremesh*, serta mutu mortar. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi respons beban-perpindahan, kapasitas *ultimit*, *daktilitas*, serta mekanisme keruntuhan sambungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan *ferrocement* mampu meningkatkan beban retak awal dan kapasitas *ultimit* sambungan hingga sekitar 35–40% dibandingkan dengan model tanpa perkuatan. Model dengan mutu mortar lebih tinggi (f_{c45}) menunjukkan kinerja terbaik dengan kapasitas *ultimit* dan *daktilitas* tertinggi, disertai mekanisme keruntuhan berupa *crushing* beton inti yang terjadi secara lebih terkendali. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa *ferrocement* merupakan metode perkuatan yang efektif dalam meningkatkan kapasitas, daktilitas, dan kontrol retak pada sambungan balok-kolom beton bertulang, dengan konfigurasi *optimal* diperoleh pada penggunaan *wiremesh* Ø6 mm dan mutu mortar tinggi.

Kata kunci: Sambungan balok-kolom; *ferrocement*; analisis nonlinier; daktilitas; MIDAS FEA

1. PENDAHULUAN

Daerah sambungan balok-kolom merupakan titik kritis dalam sistem rangka beton bertulang karena seluruh gaya internal antara balok dan kolom bertemu dan ditransfer melalui zona yang relatif sempit. Ketika struktur menerima beban gravitasi atau beban lateral akibat gempa, daerah sambungan mengalami kombinasi tegangan yang kompleks dan sering kali lebih besar dibandingkan elemen lain. Kegagalan pada daerah sambungan dapat menyebabkan keruntuhan struktur secara tiba-tiba, terutama pada kondisi pembebanan gempa (Paulay & Priestley, 1992). Kondisi tersebut dapat memicu retak geser dini, penurunan kekakuan, hingga kegagalan lokal, terutama pada bangunan yang dibangun dengan detail penulangan yang tidak mengikuti ketentuan modern atau telah mengalami degradasi material selama masa layanan (Basha et al., 2021; ACI Committee 549, 2020).

Ferrocement telah banyak dilaporkan sebagai metode perkuatan yang efektif untuk meningkatkan kapasitas geser dan kendali retak pada elemen beton. Material ini terdiri dari mortar berkekuatan tinggi yang diperkuat lapisan *wiremesh* berdiameter kecil, memberikan kombinasi kuat tarik tinggi, deformabilitas baik, dan kemampuan membatasi lebar retak dengan signifikan (Al-Salloum et al., 2020; El-Sayed & Elsanadedy, 2023). Keunggulan lain *ferrocement*, seperti ketebalan perkuatan yang minimal, kemudahan pemasangan, dan kompatibilitas dengan beton eksisting, menjadikannya alternatif yang menarik dibandingkan metode perkuatan lain seperti FRP atau jacketing beton konvensional (Al-Salloum et al., 2020).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa *ferrocement* dapat meningkatkan kekuatan lentur dan geser elemen struktural, termasuk balok, kolom, dan panel (El-Sayed & Elsanadedy, 2023). Namun, studi mengenai penerapannya pada sambungan balok–kolom masih terbatas, terutama terkait pengaruh variasi jumlah lapisan *wiremesh*, diameter *wiremesh*, dan mutu mortar terhadap perilaku sambungan yang memiliki kondisi tegangan kompleks. Karena pengujian eksperimental *joint* cukup rumit dan mahal, pemodelan elemen hingga menjadi pendekatan yang efisien untuk mengevaluasi perilaku nonlinier sambungan, termasuk retak, redistribusi tegangan, dan mekanisme keruntuhan (Chen et al., 2022).

Penelitian ini menggunakan pemodelan nonlinear pada MIDAS FEA untuk mengevaluasi lima variasi konfigurasi sambungan balok–kolom yang diperkuat *ferrocement*. Analisis *displacement-controlled* digunakan untuk menangkap respons hingga mendekati keruntuhan. Kajian ini berkontribusi dalam memperjelas sejauh mana diameter *wiremesh*, mutu *ferrocement*, dan jumlah lapisan memengaruhi kapasitas, kekakuan pasca-retak, pola retak, dan daktilitas sambungan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar teknis yang kuat untuk perkuatan sambungan balok–kolom pada bangunan eksisting.

Namun demikian, sebagian besar penelitian *ferrocement* masih berfokus pada elemen balok dan pelat, sementara kajian spesifik pada sambungan balok–kolom, khususnya dengan variasi diameter *wiremesh*, jumlah lapisan, dan mutu mortar, masih terbatas. Selain itu, pengaruh parameter *ferrocement* terhadap karakteristik pasca-retak dan mekanisme keruntuhan sambungan belum dievaluasi secara komprehensif melalui pendekatan numerik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis secara sistematis pengaruh konfigurasi *ferrocement* terhadap kapasitas, kekakuan, daktilitas, dan pola keruntuhan sambungan balok–kolom menggunakan analisis nonlinier MIDAS FEA.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan numerik menggunakan metode elemen hingga untuk menganalisis pengaruh variasi konfigurasi *ferrocement* pada sambungan balok–kolom beton bertulang. Perkuatan dilakukan menggunakan *ferrocement* yang terdiri dari *wiremesh* baja dan mortar semen sebagai material matriks (ACI Committee 549, 2020). *Detail* sambungan dan konfigurasi panel *joint* mengacu pada rekomendasi standar perancangan sambungan balok–kolom beton bertulang (ACI Committee 352, 2021). Model geometri sambungan dibangun dalam skala penuh menggunakan MIDAS FEA dengan konfigurasi balok dan kolom yang seragam pada seluruh variasi. Lima model dianalisis, terdiri dari satu model tanpa perkuatan sebagai referensi dan empat model dengan perkuatan *ferrocement* yang dibedakan berdasarkan diameter *wiremesh*, mutu mortar, dan jumlah lapisan. Seluruh model dirancang memiliki detail penulangan yang sama sehingga perbedaan respons yang muncul dapat dihubungkan secara langsung dengan variasi sistem perkuatan *ferrocement*.

Pemodelan material beton dilakukan dengan menggunakan pendekatan nonlinier pada domain tarik dan tekan. Pada kondisi tarik, digunakan model tension-softening Hordijk karena sifatnya yang mampu menggambarkan proses perambatan retak secara bertahap berdasarkan energi fraktur beton (Hordijk, 1991). Model ini menghasilkan penurunan tegangan yang halus setelah mencapai puncak, sesuai dengan fenomena retak geser dan lentur yang umum terjadi pada daerah sambungan. Selain itu, model Hordijk memberikan stabilitas numerik yang lebih baik pada mesh berukuran kecil, sehingga cocok untuk menganalisis *joint* yang memiliki gradien tegangan tinggi dan pola retak kompleks. Pada kondisi tekan, perilaku beton dimodelkan dengan fungsi Parabolic. Model ini dipilih karena mampu menunjukkan transisi yang realistis antara fase elastis, puncak kekuatan, dan degradasi tekan (Popovics, 1973). Bentuk kurva yang mulus mendukung konvergensi numerik pada analisis nonlinier, terutama pada *joint* yang mengalami kombinasi tekanan dua arah dan confinemen lokal dari tulangan transversal.

Elemen tulangan longitudinal dan sengkang dimasukkan sebagai elemen *embedded* dengan model plastis berbasis kriteria luluh von Mises. *Wiremesh ferrocement* dan angkur dimodelkan sebagai elemen *truss* yang bekerja terutama pada tarik, sementara lapisan mortar *ferrocement* direpresentasikan sebagai beton mutu menengah dengan ketebalan sesuai variasi. Kondisi batas ditetapkan berupa perletakan sendi pada ujung balok dan kolom untuk memberikan representasi realistis terhadap pekekangan rotasi yang umum terjadi pada sistem rangka beton.

Pembebanan diberikan melalui displacement-controlled loading sebesar –50 mm pada arah X, yang dibagi ke dalam 100 increment untuk memastikan respons elastis hingga nonlinier dapat terekam secara detail. Metode ini

memungkinkan identifikasi retak awal, degradasi kekakuan, dan kapasitas maksimum secara bertahap tanpa mengalami ketidakstabilan numerik yang umum terjadi pada *load-controlled* analysis. Seluruh hasil pemodelan dianalisis berdasarkan kurva beban–perpindahan, kapasitas retak awal dan kapasitas puncak, kekakuan awal dan pasca-retak, daktilitas, pola retak, dan distribusi tegangan pada elemen beton maupun baja. Melalui kombinasi pendekatan nonlinier dan variasi konfigurasi *ferrocement*, metodologi ini mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai efektivitas perkuatan *ferrocement* pada sambungan balok–kolom.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi berdasarkan setiap modelnya:

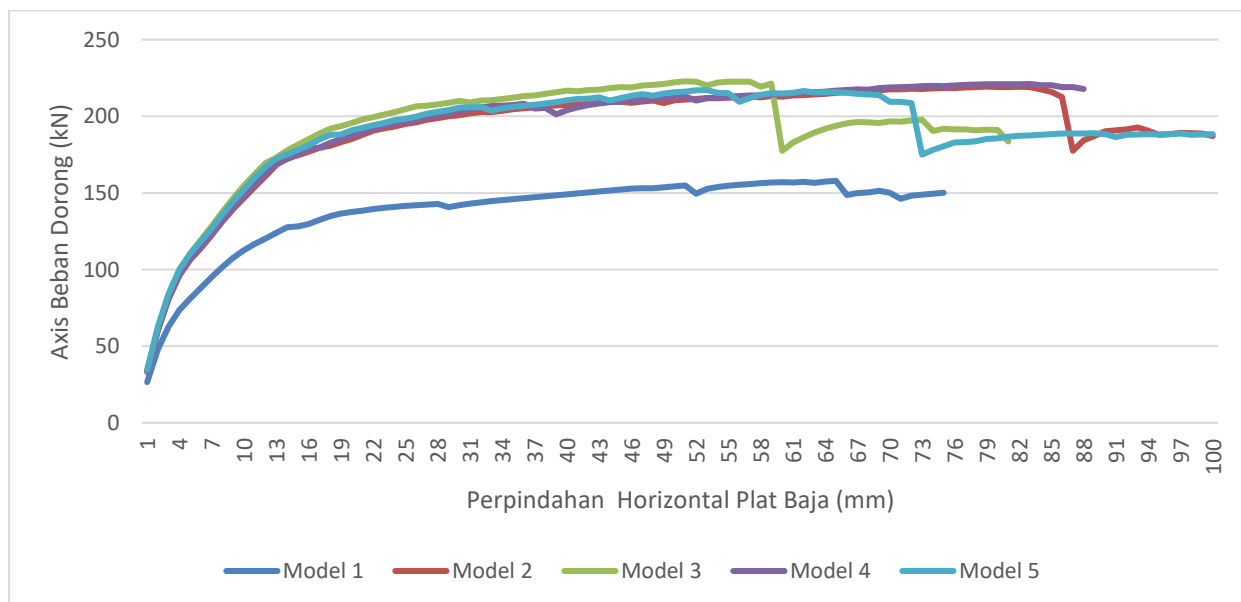
Tabel 1 ini menyajikan variasi parameter perkuatan *ferrocement* yang digunakan pada masing-masing model. Perbedaan antar model difokuskan pada diameter wiremesh, mutu mortar, dan jumlah lapisan, sementara geometri, detail penulangan, dan kondisi batas dibuat identik untuk memastikan bahwa perubahan respons struktural hanya dipengaruhi oleh konfigurasi perkuatan.

Tabel 1. Spesifikasi berdasarkan model

Model	Diameter <i>Wiremesh</i> (mm)	Fc	Lapisan <i>Wiremesh</i>
Model 1	-	-	-
Model 2	6	40	3
Model 3	8	40	3
Model 4	6	45	3
Model 5	6	40	4

Kurva hubungan beban–perpindahan (*load–displacement curve*)

Gambar 1 menunjukkan hubungan beban–perpindahan pada seluruh model sambungan balok–kolom. Model dengan perkuatan *ferrocement* memperlihatkan peningkatan kapasitas maksimum dan deformasi ultimit dibandingkan model tanpa perkuatan, dengan perbedaan karakteristik pasca-retak yang dipengaruhi oleh konfigurasi wiremesh dan mutu mortar.



Gambar 1. Kurva beban-perpindahan

Identifikasi nilai P_{cr} , P_u , dan karakteristik kapasitas

Tabel 2 merangkum nilai beban retak awal (P_{cr}), beban ultimit (P_u), dan perpindahan ultimit (Δ_u) untuk setiap model. Model dengan *ferrocement* menunjukkan peningkatan signifikan baik pada P_{cr} maupun P_u , yang mengindikasikan kemampuan perkuatan dalam menunda retak awal dan meningkatkan kapasitas maksimum sambungan. Peningkatan

kapasitas dan daktilitas tersebut sejalan dengan hasil studi numerik terbaru pada sambungan balok–kolom beton bertulang yang diperkuat material berbasis semen (Li et al., 2024).

Tabel 2. Ringkasan kapasitas sambungan

Model	Pu (kN)	Δu (mm)	Pcr (kN)
Model 1	157,9017441	32,5	142,8703154
Model 2	219,386498	39,5	209,5174531
Model 3	222,8201973	25,5	210,0149648
Model 4	221,1354551	41,5	208,2809404
Model 5	217,1360098	26,5	206,0231055

Analisis kekakuan (*stiffness analysis*)

Tabel 3 menyajikan perbandingan kekakuan awal dan kekakuan pasca-retak dari seluruh model. Kehadiran ferrocement meningkatkan kekakuan awal sambungan dan mempengaruhi tingkat degradasi kekakuan setelah retak, yang bergantung pada diameter wiremesh, mutu mortar, dan jumlah lapisan perkuatan.

Tabel 3. Ringkasan Kekakuan

Model	K_initial (kN/mm)	K_post-crack (kN/mm)	Penurunan Kekakuan (%)
Model 1	43,22535742	0,9735	2,252150%
Model 2	54,46888	1,021	1,874465%
Model 3	56,43158	1,7905	3,172869%
Model 4	54,97302	1,256	0,000023%
Model 5	57,07156	1,476	0,000026%

Perilaku deformasi dan daktilitas

Tabel 4 menunjukkan nilai perpindahan leleh (Δy), perpindahan ultimit (Δu), dan daktilitas (μ) pada masing-masing model. Perkuatan ferrocement secara umum meningkatkan daktilitas sambungan dengan memperpanjang fase deformasi inelastis, meskipun efektivitasnya berbeda tergantung konfigurasi perkuatan.




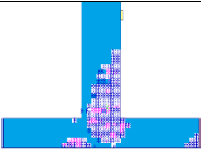

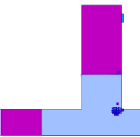

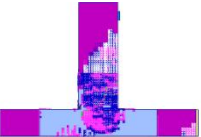
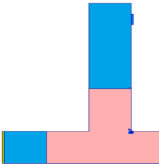
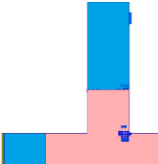
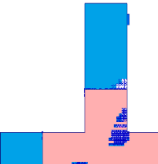


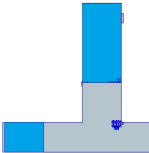
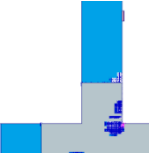





Tabel 4. Parameter daktilitas

Model	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Daktilitas (μ)	Karakteristik
Model 1	2,447502	32,5	13,27884264	Retak lebih awal, kapasitas moderat, daktilitas sedang.
Model 2	2,698586	39,5	14,63729557	Retak tertunda, <i>hardening</i> stabil, daktilitas meningkat.
Model 3	2,645496	25,5	9,639023372	Retak lebih cepat, peningkatan pasca-retak terbatas, daktilitas rendah.
Model 4	2,695154	41,5	15,39800692	Retak tertunda, kapasitas puncak tertinggi, daktilitas sangat tinggi.
Model 5	2,549100	26,5	10,39582505	Retak tertunda, kapasitas menengah, daktilitas moderat.

Pola retak (*crack pattern analysis*)

Tabel 5 memperlihatkan perkembangan pola retak pada setiap model dari tahap awal pembebanan hingga kondisi mendekati kegagalan. Model tanpa perkuatan mengalami retak geser lebih awal, sedangkan model dengan ferrocement menunjukkan retak yang lebih terkontrol dan terdistribusi sebelum mencapai kondisi ultimit.

Tabel 5. Pola retak

Model	Pola Retak Increment 1	Pola Retak Increment 2	Pola Retak Increment 3	Pola Retak Setelah Gagal
Model 1				
Model 2				
Model 3				
Model 4				
Model 5				

Mekanisme keruntuhan (*failure mechanism*)

Tabel 6 merangkum mekanisme keruntuhan dan lokasi kegagalan dominan pada masing-masing model. Variasi mekanisme keruntuhan menunjukkan bahwa konfigurasi ferrocement tidak hanya mempengaruhi kapasitas, tetapi juga mengubah distribusi tegangan dan mode kegagalan pada sambungan balok-kolom.

Tabel 6. Mekanisme keruntuhan

Model	Mekanisme Keruntuhan	Lokasi
Model 1	Kegagalan geser diagonal pada <i>joint</i> setelah retak awal berkembang cepat, diikuti degradasi kekakuan signifikan.	Zona inti panel <i>joint</i> (<i>interface</i> balok–kolom).
Model 2	<i>Post-crack hardening</i> terjadi; keruntuhan didominasi retak geser diagonal yang tertahan oleh <i>wiremesh</i> hingga mendekati puncak.	<i>Interface ferrocement</i> –beton pada sisi <i>joint</i> (<i>tension side</i>).
Model 3	Kegagalan geser lokal akibat konsentrasi tegangan pada tepi <i>joint</i> ; pengekangan tidak optimal karena mesh lebih kaku → retak propagasi lebih cepat.	Tepi <i>joint</i> , tepat di zona peralihan antara beton inti dan <i>ferrocement</i> .
Model 4	<i>Crushing</i> pada beton inti setelah kapasitas maksimum tercapai, karena mortar lebih kuat sehingga menahan retak geser.	Beton inti <i>joint</i> (zona tekan).
Model 5	Retak diagonal pada lapisan luar <i>ferrocement</i> diikuti slip lokal pada <i>interface</i> ; kapasitas meningkat moderat namun daktilitas tidak setinggi model fc45.	Lapisan luar <i>ferrocement</i> dan <i>interface</i> permukaan <i>joint</i> .

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat ditarik beberapa kesimpulan mengenai pengaruh perkuatan ferrocement terhadap kinerja sambungan balok–kolom beton bertulang.

- *Ferrocement* terbukti meningkatkan kapasitas dan daktilitas sambungan dibanding model tanpa perkuatan. Model 1 (tanpa *ferrocement*) menunjukkan kapasitas ultimit dan daktilitas paling rendah, dengan retak geser yang terjadi lebih awal dan penurunan kekakuan yang cepat. Penambahan *ferrocement* pada model 2–5 secara konsisten memperlambat onset retak dan memperpanjang fase deformasi inelastis.
- Model *ferrocement* fc45 (Model 4) memberikan kinerja struktural terbaik. Dengan mutu mortar lebih tinggi (fc45), Model 4 menunjukkan kapasitas ultimit tertinggi dan daktilitas paling besar. Keruntuhan bergeser dari mekanisme geser–retak menjadi *crushing* pada beton inti, menandakan tingkat confinement yang lebih baik.
- Diameter *wiremesh* besar (Ø8 mm pada Model 3) tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja. Model 3 menunjukkan bahwa *wiremesh* yang lebih kaku membuat peralihan gaya kurang merata sehingga retak terjadi lebih cepat dan terlokalisasi. Akibatnya, daktilitas dan kapasitas ultimit turun dibanding model 2, meskipun mutu *ferrocement* sama.
- Penambahan jumlah lapisan *wiremesh* (Model 5) meningkatkan kekakuan tetapi tidak secara signifikan meningkatkan daktilitas. Empat lapisan *wiremesh* memang memberikan retak awal yang lebih terlambat, namun peningkatan kapasitas ultimit hanya moderat dan daktilitas tidak melebihi Model 4. Hal ini terjadi karena penambahan lapisan meningkatkan *stiffness*, tetapi tidak memperkuat beton inti seperti peningkatan mutu mortar (fc45).
- Mekanisme keruntuhan tiap model berbeda sesuai tingkat perkuatan.
 - Model 1 mengalami retak geser diagonal cepat pada panel *joint*.
 - Model 2 mengalami geser diagonal tertahan oleh *ferrocement*.
 - Model 3 mengalami geser lokal di tepi *joint*.
 - Model 4 mengalami *crushing* pada beton inti akibat confinement tinggi.
 - Model 5 mengalami retak diagonal pada lapisan luar *ferrocement*.

Perbedaan mekanisme ini menunjukkan bahwa penggunaan *ferrocement* mengubah pola distribusi tegangan dan zona keruntuhan secara signifikan.

- Penambahan *ferrocement* paling efektif jika memanfaatkan kombinasi ketebalan moderat, *wiremesh* yang deformable (Ø6 mm), dan mutu mortar tinggi (fc45). Konfigurasi tersebut (Model 4) memberikan keseimbangan antara kekakuan awal, kemampuan menahan retak, dan deformabilitas pasca-retak—sehingga menghasilkan respons struktural paling optimal.
- Parameter hasil analisis nonlinear (P_{cr} , P_u , Δy , Δu , daktilitas) memperkuat bahwa pengaruh *ferrocement* paling signifikan pada fase *post-cracking*. Peningkatan daktilitas hingga lebih dari 14–15 pada Model 4

menunjukkan kemampuan disipasi energi yang jauh lebih unggul dibanding Model 1 (sekitar 13), sedangkan Model 3 dan 5 hanya menunjukkan kemajuan terbatas.

- Secara keseluruhan, *ferrocement* efektif sebagai metode perkuatan sambungan balok–kolom, dan desain optimal bergantung pada kombinasi mutu mortar serta deformabilitas *wiremesh*, bukan hanya jumlah lapisan atau diameter tulangan.
- Penambahan jumlah lapisan *wiremesh* pada perkuatan *ferrocement* tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja sambungan. Dalam penelitian ini, konfigurasi tiga lapis *wiremesh* menunjukkan kinerja keseluruhan yang lebih optimal dibandingkan empat lapis *wiremesh* dengan parameter material yang sama, yang mengindikasikan adanya batas optimum pengeangan *ferrocement* pada sambungan balok–kolom.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 352. (2021). *Recommendations for design of beam–column connections in monolithic reinforced concrete structures* (ACI 352R-21).
- ACI Committee 549. (2020). *Guide to ferrocement* (ACI 549R-20).
- Al-Salloum, Y. A., Siddiqui, N. A., Elsanadedy, H. M., Abadel, A. A., & Aqel, M. A. (2020). Behavior of reinforced concrete beam–column joints strengthened using cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 262, 120737.
- Basha, S. H., Kumar, P. S., & Reddy, M. J. (2021). Numerical investigation on seismic performance of reinforced concrete beam–column joints strengthened with ferrocement composites. *Engineering Structures*, 245, 112897. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112897>
- Chen, Z., Zhou, J., & Wu, Y. (2022). Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete beam–column joints under cyclic loading. *Structures*, 38, 784–798. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.034>
- El-Sayed, T. A., & Elsanadedy, H. M.-S. (2023). Strengthening of reinforced concrete joints using cement-based composite materials: Numerical and experimental assessment. *Construction and Building Materials*, 368, 130398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130398>
- Hordijk, D. A. (1991). Local approach to fatigue of concrete (Doctoral dissertation). *Delft University of Technology*.
- Li, J., Wu, Y., & Chen, Z. (2024). Numerical study on ductility enhancement of reinforced concrete beam–column joints strengthened with cementitious composites. *Structures*, 52, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.12.021>
- Paulay, T., & Priestley, M. J. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons.
- Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress–strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5), 583–599. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3)

