Journal of Infrastructure and Construction Technology (2024), **2(2)**, 66–72
doi:10.56208/jictech.2.2.66-72

ARTICLE

Perbandingan Pemodelan Struktur Menggunakan Metode Elemen Hingga: Studi Literatur Dari Berbagai Aplikasi Struktur Sipil Dan Mekanik

Kevin Arsenta*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Jl HR Subrantas KM 12 Pekanbaru 28293, Indonesia
*Corresponding author. Email: kevin.arsenta5349@student.unri.ac.id

(Received 20 Mei 2024; revised 25 Agustus 2024; accepted 12 September 2024; first published online 2 November 2024)

Abstract

The Finite Element Method (FEM) is one of the most significant numerical approaches in structural analysis within civil engineering. FEM is widely used to analyze the behavior of complex structures by discretizing them into smaller elements. This article presents a literature review of nine studies that applied FEM to various structural objects: dams, various reinforced concrete (RC) structures, including infrastructure elements, high-rise buildings, and steel-based components. The review findings indicate that FEM is capable of providing accurate predictions of stresses, deflections, and failure patterns. However, its accuracy strongly depends on geometric modeling, material assumptions, boundary conditions, and validation against field data steel structures, and machine components. This article provides an in-depth understanding of the advantages, limitations, and future prospects of FEM in civil engineering applications.

Keywords: Finite Element Method, reinforced concrete, structural analysis, numerical modeling

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi dalam bidang analisis struktur menuntut penggunaan metode yang mampu merepresentasikan perilaku struktur secara lebih akurat dan komprehensif. Metode analitis klasik, seperti metode mekanika struktur konvensional, sering kali mengalami keterbatasan dalam menangani permasalahan dengan geometri yang kompleks, kondisi batas yang bervariasi, serta sifat material yang nonlinier. Untuk menjawab tantangan tersebut, metode numerik berkembang pesat, salah satunya adalah Finite Element Method (FEM). FEM memungkinkan proses diskretisasi suatu struktur yang rumit menjadi elemen-elemen kecil yang terhubung melalui titik nodal, sehingga respon struktur dapat dimodelkan secara mendekati kondisi nyata di lapangan (Bargess, Lesmana, and Tallar 2019).

Dengan memanfaatkan FEM, berbagai aspek perilaku struktur dapat diprediksi, mulai dari deformasi, distribusi tegangan, hingga pola kerusakan yang sebelumnya sulit diperoleh dengan pendekatan analitis klasik. Keunggulan utama FEM terletak pada fleksibilitasnya dalam menangani beragam jenis struktur dan material (Erhunmwun and Ikponmwosa 2017). Oleh karena itu, FEM

© 2024. This is an Open Access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution licence (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

banyak diterapkan dalam bidang teknik sipil, khususnya pada analisis bendung, gedung bertingkat, jembatan, pelat lantai, balok beton bertulang, serta pada desain rangka kendaraan modern (Risqy 2025).

Berbagai penelitian telah menunjukkan efektivitas FEM dalam menganalisis struktur sipil dengan kompleksitas yang tinggi. Misalnya, Bargess, Lesmana, and Tallar (2019) melakukan analisis pada struktur Bendung Cilemer menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk meninjau kestabilan dan kinerja struktur terhadap beban eksternal. Sementara itu, Pratama and Walujodjati (2023) mengevaluasi gedung Banten Islamic Center dengan memanfaatkan perangkat lunak ETABS yang berbasis FEM guna mengidentifikasi respon dinamis dan ketahanan gedung terhadap beban gempa. Penelitian lain oleh Septiadi, Rosidawani, and Aminuddin (2025) berfokus pada perilaku sambungan haunched gusset plate dengan penampang dobel kanal, di mana FEM digunakan untuk memahami distribusi tegangan dan kapasitas sambungan.

Lebih lanjut, Agustinus and Lesmana (2019) menekankan pada studi komparatif mengenai efektivitas perkuatan pelat beton dengan dua jenis material, yaitu Fiber Reinforced Polymer (FRP) dan profil baja IWF. Analisis dilakukan dengan Autodesk Nastran, yang mampu memperlihatkan perbedaan distribusi tegangan serta kapasitas daya dukung pasca-perkuatan. Penelitian lainnya oleh Anwar, Ridwan, and Yuniarto (2023) mengkaji perilaku balok beton bertulang dengan metode deep embedment menggunakan perangkat lunak ABAQUS, yang berfokus pada evaluasi kapasitas geser dan mekanisme retak. Sementara itu, Siregar (2020) membahas secara lebih umum mengenai analisis kinerja struktural beton bertulang dengan FEM, menunjukkan bahwa metode ini dapat menjadi alat yang handal untuk menilai ketahanan struktur dalam kondisi beban yang bervariasi. Sejalan dengan itu, Hoyali et al. (2024) menunjukkan bahwa FEM juga dapat diaplikasikan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial dalam rekayasa struktur dan material, memperluas pemanfaatannya di luar analisis struktural murni.

Dari berbagai studi tersebut, terlihat bahwa penerapan FEM dalam teknik sipil tidak hanya memperluas cakupan analisis struktur, tetapi juga memberikan pendekatan yang lebih realistis terhadap fenomena rekayasa yang kompleks. Dengan demikian, FEM menjadi salah satu pilar utama dalam pengembangan teknologi analisis struktur modern. Meskipun FEM banyak diterapkan, tinjauan komparatif yang sistematis antar studi dengan objek, perangkat lunak, dan fokus analisis yang bervariasi masih terbatas. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk menyintesis perbedaan pemodelan tersebut.

Meskipun aplikasi FEM sudah luas dan terbukti efektif, tinjauan komparatif yang sistematis dan komprehensif yang menyintesis bagaimana perbedaan parameter pemodelan seperti perbandingan model 2D versus 3D , pemilihan perangkat lunak , atau jenis perkuat secara menyeluruh memengaruhi hasil analisis pada struktur beton dan infrastruktur sipil masih terbatas. Kesenjangan ini membatasi pemahaman terperinci mengenai kondisi pemodelan optimal untuk berbagai objek struktur. Oleh karena itu, tujuan utama dari studi literatur ini adalah untuk mengkaji secara komparatif dan sistematis , dengan fokus pada sintesis perbedaan parameter pemodelan (model 2D vs 3D, pemilihan software, dan jenis perkuatan) guna mengidentifikasi dan membandingkan efektivitas pemodelan FEM pada berbagai struktur sipil. Hasil kajian ini diharapkan mampu menyajikan pemahaman mendalam mengenai kelebihan, keterbatasan, serta prospek FEM dalam analisis struktur modern.

2. Tinjauan Pustaka

Metode Elemen Hingga (Finite Element Method / FEM) merupakan salah satu pendekatan numerik yang paling berpengaruh dalam perkembangan ilmu rekayasa modern. Pada awalnya, FEM dikembangkan untuk menganalisis struktur pesawat terbang, terutama dalam mempelajari distribusi tegangan pada sayap dan fuselage yang memiliki geometri kompleks (Zienkiewicz and Taylor 2005). Seiring waktu, metode ini meluas penggunaannya ke berbagai bidang, termasuk teknik sipil, mekanika fluida, geoteknik, hingga biomekanika, karena kemampuannya dalam menyelesaikan

persoalan matematis yang rumit melalui pendekatan diskretisasi.

Prinsip dasar FEM adalah membagi suatu struktur yang besar menjadi elemen-elemen kecil (diskretisasi), yang masing-masing memiliki fungsi interpolasi tertentu. Setiap elemen berkontribusi pada persamaan kesetimbangan global yang diperoleh melalui penyusunan matriks kekakuan. Dengan cara ini, FEM memungkinkan perhitungan deformasi, tegangan, dan gaya reaksi yang tidak mudah diperoleh dengan metode analitis klasik (Bargess, Lesmana, and Tallar 2019; Erhunmwun and Ikponmwosa 2017).

Jenis elemen yang umum digunakan dalam FEM antara lain: (1) elemen batang/beam yang digunakan untuk memodelkan balok dan rangka; (2) elemen shell yang cocok untuk pelat dan dinding tipis; dan (3) elemen solid yang digunakan pada pemodelan tiga dimensi, misalnya bendung, balok tebal, atau massa beton besar (Siregar 2020). Pemilihan jenis elemen sangat memengaruhi akurasi hasil, sehingga diperlukan keahlian dalam mendefinisikan model.

Kelebihan FEM terletak pada fleksibilitasnya, baik dalam memodelkan geometri yang rumit, kondisi batas yang kompleks, maupun sifat material yang nonlinier (Pratama and Walujodjati 2023; Hoyali et al. 2024). Selain itu, FEM juga dapat digunakan untuk mengevaluasi perilaku struktur di bawah berbagai kombinasi pembebanan, termasuk beban statis, dinamis, maupun beban gempa. Namun demikian, FEM memiliki kelemahan berupa kebutuhan komputasi yang relatif besar, serta ketergantungan pada asumsi yang dibuat dalam proses pemodelan, baik terkait jenis elemen, mesh, maupun parameter material (Agustinus and Lesmana 2019).

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur (literature review) sebagai metode utama. Pendekatan ini dipilih karena fokus kajian terletak pada pemetaan perkembangan, penerapan, serta efektivitas Metode Elemen Hingga (FEM) dalam menganalisis struktur teknik sipil berdasarkan hasil-hasil penelitian sebelumnya. Studi literatur dipandang relevan karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai tren penelitian, kesenjangan pengetahuan, serta peluang pengembangan metode analisis struktur pada masa mendatang.

Proses penelitian dimulai dengan mengidentifikasi sumber-sumber literatur ilmiah yang berkaitan dengan penerapan FEM pada analisis struktur. Kriteria pemilihan artikel didasarkan pada relevansi topik, keterbaruan, serta kedalaman analisis. Dari hasil penelusuran, dipilih lima artikel utama yang secara representatif menggambarkan variasi objek penelitian, metode atau perangkat lunak yang digunakan, serta fokus analisis struktural. Artikel tersebut meliputi:

1. Bargess, Lesmana, and Tallar (2019) yang meneliti analisis struktur Bendung Cilemer dengan pendekatan FEM menggunakan perangkat lunak SAP2000.
2. Pratama and Walujodjati (2023) yang mengevaluasi kinerja struktur Gedung Banten Islamic Center melalui simulasi dengan perangkat ETABS berbasis FEM.
3. Agustinus and Lesmana (2019) yang membandingkan efektivitas perkuatan pelat lantai beton bertulang dengan material Fiber Reinforced Polymer (FRP) dan profil baja IWF menggunakan Autodesk Nastran.
4. Anwar, Ridwan, and Yuniarto (2023) yang melakukan analisis balok beton bertulang dengan metode perkuatan deep embedment menggunakan perangkat lunak ABAQUS.
5. Siregar (2020) yang membahas analisis kinerja struktural umum pada bangunan beton bertulang menggunakan perangkat lunak SAP2000 dan ETABS.
6. Risqy (2025) yang melakukan analisis kekuatan desain struktur rangka city bus menggunakan metode elemen hingga.
7. Erhunmwun and Ikponmwosa (2017) yang memberikan tinjauan mendalam tentang Metode Elemen Hingga.
8. Hoyali et al. (2024) yang mengaplikasikan Metode Elemen Hingga untuk analisis struktur rangka mesin press karet.

9. Septiadi, Rosidawani, and Aminuddin (2025) yang menganalisis perilaku sambungan haunched gusset plate dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS berbasis FEM.

Analisis dilakukan dengan cara membandingkan empat aspek utama yang relevan dengan penggunaan FEM, yaitu:

- Objek penelitian, yang meliputi jenis struktur yang dianalisis (misalnya bendung, gedung bertingkat, pelat lantai, balok, maupun bangunan beton bertulang secara umum).
- Metode atau perangkat lunak yang digunakan, karena perbedaan software FEM dapat memengaruhi hasil analisis baik dari sisi keakuratan maupun efisiensi perhitungan.
- Fokus analisis, mencakup aspek yang ditinjau dalam setiap penelitian, seperti tegangan, lendutan, kapasitas geser, hingga efektivitas perkuatan.
- Hasil utama dan diskusi, yang merangkum temuan-temuan penting dari masing-masing penelitian serta perbandingan antar studi.

Melalui pendekatan ini, penelitian tidak hanya menyajikan ringkasan hasil dari masing-masing artikel, tetapi juga membangun sintesis yang lebih luas. Sintesis tersebut diharapkan mampu menunjukkan bagaimana FEM telah berkembang menjadi alat analisis yang serbaguna dalam rekayasa sipil, sekaligus menyoroti kelebihan dan keterbatasannya. Dengan demikian, metode penelitian berbasis literatur ini tidak hanya berfungsi sebagai telaah deskriptif, tetapi juga sebagai dasar analisis komparatif yang dapat memperkuat kesimpulan serta memberikan rekomendasi bagi penelitian lanjutan. Berdasarkan penelitian ini, tujuan utama dari studi literatur ini adalah untuk mengkaji secara komparatif dan sistem.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisis Kritis Literatur, Research Gap, dan Potensi Kebaruan

Berdasarkan kajian literatur yang dirangkum pada tabel, dapat diamati bahwa metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) telah digunakan secara luas dan mapan dalam analisis struktur beton bertulang, baik pada level elemen (balok dan pelat) maupun sistem struktur secara keseluruhan (gedung dan rangka). Mayoritas penelitian berfokus pada evaluasi respons elastis dan nonlinier struktur menggunakan perangkat lunak komersial seperti SAP2000, ETABS, ABAQUS, dan ANSYS, dengan tujuan utama memvalidasi kinerja struktur terhadap kriteria kekuatan dan deformasi.

Namun demikian, sebagian besar studi terdahulu masih menempatkan FEM sebagai alat verifikasi numerik, bukan sebagai sarana eksplorasi mekanisme perilaku struktur secara mendalam. Penelitian oleh Bargess, Lesmana, and Tallar (2019) dan Siregar (2020), misalnya, menekankan perbandingan hasil FEM dengan perhitungan manual atau pendekatan teoritis klasik. Meskipun hasil menunjukkan kesesuaian yang baik, kajian tersebut belum menginvestigasi secara detail sensitivitas model terhadap variasi parameter material, kondisi batas, atau asumsi pemodelan yang berpotensi memengaruhi akurasi hasil.

Selain itu, penelitian terkait struktur gedung bertingkat (Pratama and Walujodjati 2023) masih terbatas pada evaluasi kapasitas momen dan gaya dalam pada kondisi pembebanan statik atau quasi-statik. Aspek perilaku dinamik nonlinier, seperti degradasi kekakuan, disipasi energi, dan interaksi antara elemen struktural pada kondisi gempa kuat, belum dieksplorasi secara komprehensif. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian terkait pemodelan FEM yang mampu menangkap respons struktur secara realistis pada kondisi beban ekstrem.

Pada skala elemen, studi oleh Agustinus and Lesmana (2019) serta Anwar, Ridwan, and Yuniarto (2023) telah menunjukkan keunggulan FEM dalam memprediksi perilaku retak dan efektivitas perkuatan beton bertulang. Namun, model yang digunakan umumnya masih bersifat deterministik dan berbasis asumsi material homogen. Variabilitas sifat material beton dan baja, ketidakpastian geometrik, serta pengaruh degradasi material akibat beban berulang belum menjadi fokus utama, sehingga membatasi kemampuan model dalam merepresentasikan kondisi struktur aktual di lapangan.

Kajian metodologis yang dilakukan oleh Erhunmwun and Ikponmwosa (2017) dan Hoyali et al. (2024) menegaskan fleksibilitas FEM dibandingkan metode numerik lainnya seperti FDM dan DDM. Meski demikian, penelitian-penelitian tersebut masih bersifat deskriptif dan belum mengevaluasi secara kuantitatif efisiensi komputasi, stabilitas numerik, maupun tingkat konvergensi model FEM pada analisis struktur berskala besar atau kompleks. Dengan meningkatnya kebutuhan analisis nonlinier dan berbasis performa, aspek ini menjadi semakin krusial.

Lebih lanjut, penelitian terkini oleh Septiadi, Rosidawani, and Aminuddin (2025) dan Husaini et al. (2023) menunjukkan integrasi FEM dengan metode analisis rangka klasik, seperti metode matriks kekakuan dan plastic hinge method. Walaupun deviasi hasil relatif kecil, pendekatan ini masih mengandalkan formulasi sendi plastis ideal dan belum mempertimbangkan transisi bertahap dari perilaku elastis ke plastis serta interaksi lokal–global secara simultan. Hal ini membuka peluang untuk mengembangkan model hibrida yang lebih representatif terhadap perilaku struktur pasca-elastis.

4.2 Research Gap

Meskipun metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) telah digunakan secara luas dalam analisis struktur beton bertulang, hasil tinjauan literatur menunjukkan bahwa penerapannya masih didominasi oleh pendekatan konvensional yang berorientasi pada verifikasi hasil analitis atau evaluasi kinerja struktur secara global. Sebagian besar penelitian terdahulu memanfaatkan FEM sebagai alat bantu numerik untuk membandingkan hasil perhitungan manual atau metode klasik, tanpa mengeksplorasi secara mendalam mekanisme perilaku struktur yang terjadi pada tingkat elemen dan sistem secara simultan. Kondisi ini mengindikasikan adanya keterbatasan dalam pemanfaatan potensi penuh FEM sebagai alat analisis perilaku struktur yang komprehensif.

Selain itu, sebagian besar penelitian masih mengasumsikan parameter material dan geometri struktur bersifat deterministik. Variasi sifat material beton dan baja, ketidakpastian dimensi elemen, serta pengaruh kondisi batas idealisasi jarang dipertimbangkan dalam pemodelan FEM. Padahal, ketidakpastian tersebut memiliki pengaruh signifikan terhadap respons struktur, khususnya pada kondisi pembebanan nonlinier dan mendekati batas keruntuhan. Ketiadaan analisis sensitivitas dan ketidakpastian ini menjadi salah satu celah utama dalam penelitian-penelitian yang ada.

Pada skala sistem struktur, studi terkait gedung bertingkat dan rangka bangunan umumnya masih berfokus pada analisis statik atau respons elastis. Aspek perilaku dinamik nonlinier, seperti degradasi kekakuan, redistribusi gaya internal, dan disipasi energi akibat pembebanan siklik atau gempa kuat, belum dianalisis secara menyeluruh. Akibatnya, kemampuan model FEM yang ada dalam memprediksi kinerja struktur berbasis performa (performance-based design) masih terbatas.

Pada level elemen struktural, penelitian mengenai balok dan pelat beton bertulang telah menunjukkan kemampuan FEM dalam memprediksi pola retak dan distribusi tegangan. Namun, kajian tersebut umumnya masih menggunakan model material homogen dan belum mempertimbangkan degradasi progresif material akibat beban berulang. Interaksi antara retak lokal, plastisitas tulangan, dan respons global struktur juga belum terintegrasi secara konsisten dalam satu kerangka pemodelan numerik.

Lebih lanjut, meskipun terdapat penelitian yang mengombinasikan FEM dengan metode analisis rangka klasik, seperti metode matriks kekakuan dan plastic hinge method, pendekatan ini masih mengandalkan idealisasi sendi plastis yang bersifat diskrit. Pendekatan tersebut belum sepenuhnya mampu merepresentasikan transisi bertahap dari perilaku elastis ke plastis serta mekanisme keruntuhan yang terjadi secara progresif pada struktur nyata. Selain itu, evaluasi efisiensi komputasi, stabilitas numerik, dan konvergensi solusi FEM pada analisis struktur kompleks juga masih jarang dilaporkan secara sistematis dalam literatur.

4.3 Potensi Kebaruan

Berdasarkan celah penelitian yang telah diidentifikasi, penelitian ini berpotensi memberikan kontribusi kebaruan dalam pengembangan dan penerapan metode elemen hingga pada analisis struktur beton bertulang. Kebaruan utama yang ditawarkan adalah pengembangan model FEM nonlinier yang mampu mengintegrasikan respons lokal elemen struktur—seperti retak beton, distribusi tegangan, dan plastisitas tulangan—dengan respons global sistem struktur secara simultan. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap mekanisme perilaku struktur dari tahap elastis hingga pasca-elastis.

Selain itu, penelitian ini menawarkan kebaruan melalui penerapan analisis sensitivitas dan ketidakpastian parameter dalam pemodelan FEM. Dengan mempertimbangkan variasi sifat material, geometri, dan kondisi batas, model yang dikembangkan diharapkan memiliki tingkat reliabilitas dan robustnes yang lebih tinggi dalam memprediksi kinerja struktur aktual. Pendekatan ini juga dapat memberikan dasar kuantitatif dalam pengambilan keputusan desain struktur.

Kebaruan lainnya terletak pada penggunaan model material beton dan baja yang mempertimbangkan degradasi kekakuan dan kerusakan progresif akibat pembebanan siklik atau dinamik. Dengan demikian, perilaku struktur di bawah beban gempa atau beban berulang dapat direpresentasikan secara lebih realistis dibandingkan model elastis-plastis ideal. Hal ini sangat relevan dalam konteks desain berbasis performa dan evaluasi ketahanan struktur terhadap beban ekstrem.

Penelitian ini juga berpotensi mengembangkan pendekatan hibrida dengan mengintegrasikan FEM dan formulasi plastisitas terdistribusi (distributed plasticity), sehingga transisi dari kondisi elastis ke plastis dapat dimodelkan secara bertahap dan kontinu. Pendekatan ini diharapkan mampu mengatasi keterbatasan model sendi plastis diskrit yang umum digunakan dalam analisis struktur rangka.

Terakhir, kebaruan penelitian ini juga mencakup evaluasi komprehensif terhadap akurasi, stabilitas numerik, dan efisiensi komputasi model FEM yang dikembangkan, dibandingkan dengan metode analisis konvensional maupun numerik lainnya. Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya memberikan kontribusi teoritis, tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam pengembangan metode analisis dan desain struktur beton bertulang yang lebih andal dan efisien.

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan kajian literatur dan analisis kritis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) merupakan pendekatan numerik yang sangat andal dan telah banyak digunakan dalam analisis struktur beton bertulang, baik pada tingkat elemen maupun sistem struktur secara keseluruhan. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa FEM mampu memberikan estimasi respons struktur yang akurat, khususnya dalam memprediksi distribusi gaya dalam, deformasi, serta pola tegangan dan retak pada elemen struktural.

Namun demikian, hasil tinjauan pustaka juga mengungkapkan bahwa penerapan FEM pada penelitian-penelitian sebelumnya masih memiliki sejumlah keterbatasan. Sebagian besar studi masih berfokus pada analisis deterministik dan verifikasi hasil terhadap metode konvensional, dengan perhatian yang terbatas terhadap analisis nonlinier, ketidakpastian parameter, serta integrasi antara respons lokal dan global struktur. Selain itu, pemodelan perilaku dinamik dan degradasi material akibat pembebanan berulang belum dieksplorasi secara komprehensif, sehingga membatasi kemampuan FEM dalam memprediksi kinerja struktur secara realistis pada kondisi beban ekstrem.

Penelitian ini diharapkan dapat menjembatani celah tersebut dengan mengembangkan pendekatan FEM nonlinier yang lebih komprehensif dan representatif terhadap kondisi struktur aktual. Integrasi respons lokal dan global, penerapan analisis sensitivitas dan ketidakpastian, serta penggunaan model material yang mempertimbangkan degradasi kekakuan dan kerusakan progresif menjadi kontribusi utama yang ditawarkan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan akurasi prediksi perilaku struktur, tetapi juga memperkuat dasar analisis dalam konteks desain berbasis performa.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan baik dari sisi teoritis maupun praktis dalam bidang rekayasa struktur. Temuan yang diperoleh dapat menjadi referensi bagi pengembangan metode analisis dan desain struktur beton bertulang yang lebih andal, efisien, dan aman, khususnya dalam menghadapi tuntutan kinerja struktur terhadap beban dinamik dan kondisi ekstrem di masa mendatang.

References

Agustinus, Samuel, and Cindrawaty Lesmana. 2019. Perbandingan analisis perkuatan struktur pelat dengan metode elemen hingga. *Jurnal Teknik Sipil* 15, no. 1 (August): 1–25. https://doi.org/10.28932/jts.v15i1.1852.

Anwar, Muhammad, Ridwan Ridwan, and Enno Yuniarto. 2023. Analisis elemen hingga terhadap perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment. *Journal of Infrastructure and Construction Technology* 1, no. 1 (April): 10–19. https://doi.org/10.56208/jictech.1.1.10-19.

Bargess, Moch Fadhli, Cindrawaty Lesmana, and Robby Yussac Tallar. 2019. Analisis struktur bendung dengan metode elemen hingga. *Jurnal Teknik Sipil* 5, no. 1 (March): 1–21. https://doi.org/10.28932/jts.v5i1.1309.

Erhunmwun, I.D., and U.B. Ikponmwosa. 2017. Review on finite element method. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 21, no. 5 (November): 999–1002. https://doi.org/10.4314/jasem.v21i5.30.

Hoyali, Lailatul, Mahsup Mahsup, Abdillah Abdillah, and Syaharuddin Syaharuddin. 2024. Aplikasi metode elemen hingga untuk penyelesaian persamaan diferensial parsial dalam rekayasa struktur dan material. In *Seminar nasional paedagoria,* 4:293–304. 1.

Husaini, Rizki Ramadhan, Sukri Sukri, Deri Islami, Teddy Julio Gunawan, Muhammad Defri Wahyudi, et al. 2023. Analisis struktur rangka batang 2d dengan metode matriks kekakuan menggunakan aplikasi ptc mathcad dan analisis sap2000. *Racic: Rab Construction Research* 8 (2): 319–330. https://doi.org/10.36341/racic.v8i2.3813.

Pratama, Rama, and Eko Walujodjati. 2023. Evaluasi perilaku struktur gedung beton bertulang dengan metode elemen hingga proyek pembangunan banten islamic center. *Jurnal Konstruksi* 21, no. 2 (October): 187–195. https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.21-2.1357.

Risqy, Okta Dilla. 2025. Analisa kekuatan desain struktur rangka city bus menggunakan finite elemen analysis. *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)* 10, no. 1 (August): 1–6. https://doi.org/10.32486/jeecae.v10i1.769.

Septiadi, Irwandra, Rosidawani Rosidawani, and Kiagus Muhammad Aminuddin. 2025. Analisis metode elemen hingga (finite element method) perilaku sambungan haunched gusset plate dengan penampang dobel kanal. *Jurnal Ilmu Multidisiplin* 4, no. 2 (June): 812–822. https://doi.org/10.38035/jim.v4i2.961.

Siregar, M. 2020. Analisis kinerja struktural pada bangunan beton bertulang menggunakan metode elemen hingga. Bachelor's Thesis, Universitas Medan Area.

Zienkiewicz, Olgierd Cecil, and Robert Leroy Taylor. 2005. *The finite element method for solid and structural mechanics.* Elsevier.