*Journal of Infrastructure and Construction Technology* (2024), **2(2)**, 59–65
doi:10.56208/jictech.2.2.59-65

ARTICLE

# Tinjauan Komparatif Aplikasi *Finite Element Method* (FEM) Untuk Pemodelan Dan Analisis Perilaku Struktur Kompleks

Adli Shahzada Putra* and Arya Ardhana

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Jl HR Subrantas KM 12 Pekanbaru 28293, Indonesia
*Corresponding author. Email: arya.ardhana2904@student.unri.ac.id

(Received 15 April 2024; revised 30 Juni 2024; accepted 10 Juli 2024; first published online 25 Juli 2024)

**Abstract**

This literature review presents a comparative analysis of various applications of the Finite Element Method (FEM) in the modeling and analysis of civil engineering structures, with a specific focus on cold-formed steel (CFS) connections and reinforced concrete columns. The primary aim of this research is to evaluate the precision and reliability of computational simulations in replicating complex structural behaviors under diverse loading conditions. The review methodology was conducted through a systematic selection of studies published between 2015 and 2025 that examine the effectiveness of FEM in comparison to analytical and experimental approaches. Aggregate results indicate that FEM exhibits a deviation of 25–29% from experimental outcomes in modeling Haunched Gusset Plate (HGP) connections within CFS structures, while effectively predicting bolt hole failure modes. In reinforced concrete columns, modeling using the Concrete Damage Plasticity (CDP) approach demonstrates an increase in axial capacity by 115–121% due to variations in stirrup configurations. Overall, this review confirms that FEM is an accurate and efficient predictive tool for analyzing the nonlinear behavior of structures and plays a vital role in structural optimization and enhancing the design reliability of modern engineering.

**Keywords:** Finite Element Method (FEM), Cold-Formed Steel (CFS), Reinforced Concrete Columns, Concrete Damage Plasticity (CDP), Structural Nonlinear Analysis

## 1. Pendahuluan

Metode Elemen Hingga (MEH) adalah pendekatan utama dalam bidang rekayasa untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial (PDP) secara numerik (Chairunnisa et al. 2023). Dengan MEH, domain analisis dibagi menjadi komponen kecil yang saling terhubung, yang memungkinkan pemodelan yang akurat terhadap fenomena fisik seperti distribusi tegangan, deformasi struktural, dan perpindahan panas (Prayogo 2015). Metode ini pertama kali digunakan untuk menganalisis masalah struktur pesawat pada tahun 1956. Dalam sepuluh tahun, kemungkinan metode ini dapat menyelesaikan berbagai masalah ilmu terapan dan teknik mulai diketahui (Erhunmwun and Ikponmwosa 2017). Analisis struktur adalah bagian penting dari rekayasa sipil dan mesin untuk memahami

© 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.

respons struktur terhadap beban statis, dinamis, dan kondisi batas. Metode *Finite Element* (FEM) mendiskritisasi struktur menjadi elemen-elemen kecil agar perilaku dapat dianalisis lebih detail dan realistis. Ini dilakukan karena kompleksitas geometri, sifat material nonlinier, dan kombinasi pembebanan membuat penyelesaian analitik sulit dilakukan (Hoyali et al. 2024). Dengan pengembangan program seperti SAP200, ETABS, MIDAS Civil, ANSYS, dan Abaqus, analisis menjadi lebih cepat, akurat, dan efisien. Ini karena program ini sekarang dapat membantu pemodelan, input material, kondisi batas, dan simulasi dalam satu sistem (Bargess, Lesmana, and Tallar 2019).

Salah satu objek kajian yang banyak dianalisis adalah struktur rangka batang (*truss*). Pada struktur sederhana, metode statika dasar seperti titik simpul atau potongan masih memadai, namun pada struktur statis tak tentu pendekatan manual menjadi rumit. FEM unggul karena dapat diaplikasikan pada struktur statis tertentu maupun tak tentu untuk menghitung deformasi, gaya dalam, hingga distribusi tegangan. Beberapa penelitian bahkan mengembangkan program FEM sederhana dan membandingkannya dengan perangkat lunak komersial seperti SAP2000 untuk mengevaluasi akurasi sekaligus efisiensi biaya (Wati and Ghozi 2023). FEM juga digunakan dalam bidang transportasi, terutama untuk analisis kekuatan rangka bus. Misalnya, studi simulasi uji pendulum menunjukkan bagaimana FEM dapat menggambarkan kondisi kecelakaan ekstrem untuk menilai tingkat keamanan sesuai dengan standar internasional. Hasil distribusi tegangan dan displacement digunakan sebagai dasar untuk evaluasi kelayakan desain, menunjukkan bahwa FEM adalah alat untuk perencanaan awal dan validasi standar keselamatan. Kolom beton bertulang, yang sangat penting dalam konstruksi, banyak dianalisis menggunakan software berbasis FEM untuk mempelajari respons terhadap beban, retak, dan pengoptimalan material ramah lingkungan (Risqy 2025). *Cold-Formed Steel* (CFS) juga menjadi perhatian karena ringan, ramah lingkungan, dan mudah dipasang, namun rentan tekuk lokal. FEM dengan software seperti ANSYS dan Abaqus membantu menganalisis perilaku sambungan, seperti *gusset plate*, yang kompleks secara nonlinier (Ng et al. 2022). Oleh karena itu, FEM adalah metode prediksi yang akurat dan murah. Menurut penelitian di berbagai bidang, FEM telah menjadi fondasi penting untuk analisis struktur kontemporer yang fleksibel, akurat, dan terintegrasi tinggi, baik di dunia bisnis maupun akademis. Ini karena FEM memiliki kemampuan untuk mewakili kondisi dunia nyata sekaligus meningkatkan pengetahuan yang diperlukan untuk mengevaluasi, membandingkan, dan mengoptimalkan sistem struktur (Septiadi, Rosidawani, and Aminuddin 2025).

*Cold-Formed Steel* (CFS) juga menjadi perhatian karena ringan, ramah lingkungan, dan mudah dipasang, namun rentan tekuk lokal. FEM dengan *software* seperti ANSYS dan Abaqus membantu menganalisis perilaku sambungan, seperti *gusset plate*, yang kompleks secara nonlinier (Ng et al. 2022). Oleh karena itu, FEM adalah metode prediksi yang akurat dan murah. Menurut penelitian di berbagai bidang, FEM telah menjadi fondasi penting untuk analisis struktur kontemporer yang fleksibel, akurat, dan terintegrasi tinggi, baik di dunia bisnis maupun akademis. Ini karena FEM memiliki kemampuan untuk mewakili kondisi dunia nyata sekaligus meningkatkan pengetahuan yang diperlukan untuk mengevaluasi, membandingkan, dan mengoptimalkan sistem struktur (Septiadi, Rosidawani, and Aminuddin 2025). Tujuan dari artikel review ini adalah untuk merangkum, menganalisis, dan membandingkan berbagai aplikasi Metode Elemen Hingga (FEM) dalam bidang rekayasa sipil dan mekanika struktur, serta meninjau perkembangan perangkat lunak yang mendukung analisis berbasis FEM untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi perancangan.

## 2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dan review sistematis terhadap berbagai penelitian tentang penerapan *Finite Element Method* (FEM) dalam analisis struktur teknik sipil. Pendekatan ini bertujuan mengidentifikasi pola penelitian, membandingkan efektivitas FEM antar jenis struktur, serta mengevaluasi efisiensinya dibanding metode konvensional.

### *2.1 Pengumpulan dan Seleksi Literatur*

Literatur dikumpulkan dari basis data ilmiah seperti Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, dan ResearchGate menggunakan kata kunci *Finite Element Method* (FEM), *Structural Analysis*, *Concrete Column*, dan *Steel Connection*.

1. Kriteria inklusi:
   - Publikasi tahun 2015–2025.
   - Menggunakan FEM untuk struktur teknik sipil (sambungan baja ringan dan kolom beton bertulang).
   - Memuat hasil analisis numerik atau perbandingan dengan metode analitik/eksperimen.
2. Kriteria ekslusi:
   - Tidak menggunakan FEM, tidak relevan dengan struktur teknik sipil, atau tidak menyajikan data kuantitatif

### *2.2 Klasifikasi Tematik dan Analisis*

Literatur yang lolos seleksi diklasifikasikan menjadi dua fokus utama berdasarkan jenis struktur dan pendekatan pemodelannya.

1. FEM pada Sambungan Baja Ringan (*Cold-Formed Steel*). Meninjau perilaku nonlinier sambungan baja seperti *gusset plate* dan *haunched connection* menggunakan software FEM (ANSYS, Abaqus). Analisis difokuskan pada distribusi tegangan, rotasi, momen, dan validasi hasil terhadap eksperimen (Septiadi, Rosidawani, and Aminuddin 2025).
2. FEM pada Kolom Beton Bertulang. Mengkaji pemodelan perilaku beton bertulang nonlinier dengan model *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) untuk menilai kapasitas aksial, efek retak, dan interaksi tulangan-beton (Anam, Sutriono, and Trimurtiningrum 2020). Kajian ini menunjukkan efektivitas FEM dalam memprediksi respon plastis dan peningkatan kekuatan struktur.

### *2.3 Analisis Komparatif*

Hasil tiap kategori dianalisis berdasarkan:

- Akurasi hasil FEM terhadap metode analitik/eksperimen.
- Efisiensi komputasi dan kompleksitas model.
- Kesesuaian terhadap standar desain (SNI, AISC, Eurocode).
- Kemampuan software dalam simulasi dan validasi struktur.

Pendekatan ini memberikan gambaran menyeluruh tentang keunggulan dan keterbatasan FEM sebagai alat analisis modern dalam berbagai jenis struktur teknik sipil.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### *3.1 Pemodelan Sambungan Baja Ringan (Cold-Formed Steel)*

Struktur baja ringan (*Cold-Formed Steel* / CFS) sangat bergantung pada kekuatan sambungannya. Salah satu tipe sambungan yang banyak diteliti adalah *Haunched Gusset Plate* (HGP), yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga (FEM) berbasis ANSYS Workbench (Septiadi, Rosidawani, and Aminuddin 2025). Model penelitian menggunakan balok dan kolom berpenampang C30024, pelat *gusset* setebal 10 mm, serta baut M12 sebagai penghubung.

Hasil analisis menggunakan aplikasi Ansys Worbench diperoleh bahwa deformasi terbesar terjadi di ujung balok, menunjukkan area tersebut menerima beban dominan dan menjadi zona kritis sambungan. Pola ini konsisten dengan hasil eksperimen, di mana terbentuk celah antara balok dan kolom akibat kombinasi gaya tarik dan lentur.

Hasil analisis menunjukkan hubungan beban–lendutan antara hasil FEM dan uji eksperimen. Nilai deformasi maksimum hasil FEM sebesar 29,5 mm, lebih kecil dibandingkan hasil eksperimen 35,2 mm. Deviasi sebesar 25,32% pada momen dan 28,89% pada kekakuan sambungan menunjukkan bahwa FEM sedikit lebih kaku dibandingkan kondisi nyata. Menurut hasil analisis, mode kegagalan (failure mode) terjadi pada sambungan, di mana celah terbentuk antara balok dan kolom karena deformasi dan kegagalan pada tumpuan, yang menyebabkan lubang baut rusak. Hasil analisis FEM lebih kecil dari hasil eksperimen, 35,2 mm, dengan deformasi 29,5 mm. Hasil FEM dianggap cukup realistis untuk memprediksi perilaku sambungan, meskipun ada perbedaan.

Perbedaan ini terutama disebabkan oleh penyederhanaan kondisi batas dan asumsi material dalam model FEM. Dalam simulasi, kontak antarpermukaan dianggap ideal tanpa adanya slip atau deformasi lokal di sekitar baut, sementara pada eksperimen terdapat gesekan, kelonggaran baut, dan variasi penempatan beban yang mempengaruhi deformasi. Selain itu, ukuran elemen mesh dan pemodelan baut sebagai elemen kaku juga dapat menyebabkan hasil numerik menunjukkan deformasi lebih kecil.

Secara keseluruhan, FEM tetap mampu memprediksi mode kegagalan yang sama dengan eksperimen, yaitu kerusakan pada lubang baut dan terbentuknya celah di zona tarik. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi FEM cukup representatif untuk menggambarkan perilaku struktural sambungan HGP secara realistis, meskipun terdapat perbedaan kuantitatif akibat idealisasi dalam model numerik.

**Table 1.** Sintesis Perbandingan Kapasitas Aksial Kolom Beton Bertulang

| Parameter | Eksperimen | FEM | Deviasi (%) | Interpretasi |
|---|---|---|---|---|
| Deformasi maksimum | $35,2mm$ | $29,5mm$ | $16,2\%$ | Modem FEM lebih kaku |
| Kapasitas momen | $100\%$ | $74,7\%$ | $25,3\%$ | Slip maut tidak dimodelkan |
| Kekakuan rotasi | $100\%$ | $71,7\%$ | $28,9\%$ | Kontak dan gesekan tidak ideal |

### *3.2 Pemodelan Kolom Beton Bertulang*

Pemodelan kolom beton bertulang dilakukan menggunakan Abaqus/CAE dengan pendekatan *Concrete Damage Plasticity* (CDP) untuk menangkap perilaku nonlinier beton. Geometri kolom dimodelkan dalam bentuk penampang persegi dengan variasi dimensi dan tinggi sesuai kebutuhan penelitian. Beton dimodelkan dengan kuat tekan $f_c^{'}$ tertentu, sedangkan tulangan longitudinal dan transversal dimodelkan sebagai elemen batang (*truss element*) yang di-embed ke dalam elemen beton.

Kondisi batas ditetapkan dengan tumpuan jepit penuh di bagian bawah kolom, sementara beban aksial serta kombinasi beban aksial–momen diaplikasikan pada bagian atas kolom. Proses meshing menggunakan elemen solid untuk beton dan elemen batang untuk tulangan, sehingga interaksi beton–baja dapat dimodelkan dengan baik.

Penampang model uji kolom dengan dilakukan dengan 5 model variasi konfigurasi sengkang. Analisis dilakukan dalam tiga tahapan utama, yaitu preprocessing, simulasi, dan postprocessing. Salah satu parameter penting untuk mendapatkan hasil yang konvergen adalah penentuan parameter *Concrete Damage Plasticity* (CDP), yang berpengaruh pada hasil distribusi tegangan dan perilaku kerusakan beton.

Perbedaan utama antara Tabel 2 dan Tabel 3 terletak pada penerapan faktor reduksi terhadap hasil simulasi numerik. Tabel 1 menampilkan gaya aksial dan displacement hasil simulasi langsung dari Abaqus/CAE tanpa modifikasi, sehingga nilai gaya yang diperoleh merupakan hasil analisis numerik murni untuk setiap model kolom (A–E) pada berbagai nilai displacement. Sementara itu, Tabel 4 menunjukkan gaya aksial dan displacement yang telah diberi faktor reduksi kekuatan material,

**Table 2.** Gaya Aksial dan *Displacement* Hasil Analisis Abaqus/CAE

| Displacement (mm) | Force (kN) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Model A | Model B | Model C | Model D | Model E |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2976 | 4511 | 4546 | 4550 | 4468 |
| 4 | 5424 | 6951 | 7046 | 7063 | 6798 |
| 6 | 6663 | 7675 | 8014 | 8038 | 7458 |
| 8 | 4049 | 6051 | 4787 | 4560 | 5332 |
| 10 | 3151 | 4680 | 4165 | 4137 | 4179 |
| 12 | 2772 | 3983 | 4080 | 4141 | 3925 |
| 14 | 2607 | 3714 | 4004 | 4196 | 3775 |
| 16 | 2565 | 3606 | 3994 | 4138 | 3873 |
| 18 | 2529 | 3588 | 4033 | 4100 | 3771 |
| 20 | 2458 | 3592 | 4065 | 4125 | 3660 |

**Table 3.** Gaya Aksial dan *Displacement* Dengan Faktor Reduksi; 0,85 untuk Kolom Bulat dan 0,80 untuk Kolom Persegi

| Displacement (mm) | Force (kN) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Model A | Model B | Model C | Model D | Model E |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 2023 | 3068 | 3091 | 3094 | 3217 |
| 4 | 3688 | 4726 | 4791 | 4803 | 4895 |
| 6 | 4531 | 5219 | 5449 | 5466 | 5370 |
| 8 | 2753 | 4115 | 3255 | 3101 | 3839 |
| 10 | 2143 | 3182 | 2832 | 2813 | 3009 |
| 12 | 1885 | 2708 | 2774 | 2816 | 2826 |
| 14 | 1772 | 2525 | 2723 | 2853 | 2718 |
| 16 | 1744 | 2452 | 2716 | 2814 | 2789 |
| 18 | 1720 | 2440 | 2742 | 2788 | 2715 |
| 20 | 1672 | 2442 | 2765 | 2805 | 2635 |

yaitu 0,85 untuk kolom bulat (Model E) dan 0,80 untuk kolom persegi (Model A–D). Penerapan faktor reduksi ini bertujuan untuk menyesuaikan hasil numerik dengan kondisi aktual di lapangan, karena simulasi Abaqus/CAE umumnya menghasilkan nilai kekuatan yang lebih tinggi akibat asumsi material ideal dan distribusi tegangan yang homogen.

Faktor reduksi 0,85 digunakan untuk kolom dengan penampang bulat karena jenis penampang ini memiliki distribusi tegangan yang lebih merata dan efisien dalam menahan beban aksial. Hal ini sesuai dengan rekomendasi SNI 2847:2019 serta literatur desain beton bertulang yang menyatakan bahwa penampang bulat memiliki efisiensi struktural lebih baik dibandingkan penampang persegi. Sementara itu, faktor reduksi 0,80 diterapkan untuk kolom persegi (Model A–D) guna memperhitungkan pengaruh konsentrasi tegangan di area sudut yang menyebabkan distribusi tegangan tidak seragam. Nilai reduksi ini juga mempertimbangkan penurunan kapasitas akibat retak geser serta efek confinement yang lebih terbatas dibandingkan kolom bulat. Dengan demikian, penerapan faktor reduksi ini memberikan hasil yang lebih mendekati kondisi aktual dan meningkatkan kesesuaian antara hasil analisis numerik dan hasil eksperimental.

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2, kapasitas aksial kolom meningkat secara signifikan dengan adanya penambahan sengkang. Kolom B mengalami peningkatan kapasitas sebesar 115% dibandingkan kolom A tanpa sengkang, sementara kolom C, D, dan E masing-masing menunjukkan peningkatan 120%, 121%, dan 119%. Hasil ini menegaskan bahwa penggunaan sengkang mampu meningkatkan kekakuan kolom serta mengendalikan retak geser akibat beban aksial tinggi. Selain itu, hasil simulasi dengan model *Concrete Damage Plasticity* (CDP) dalam Abaqus/CAE berhasil merepresentasikan kerusakan beton seperti retak tekan dan spalling yang konsisten dengan fenomena yang terjadi pada pengujian eksperimental. Dengan demikian, hasil FEM menunjukkan validitas yang baik terhadap teori desain beton bertulang dan hasil uji laboratorium.

## 4. Kesimpulan dan Saran

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*/FEM) terbukti menjadi pendekatan numerik yang efektif dan andal dalam menganalisis perilaku berbagai sistem struktur teknik sipil. Berdasarkan hasil tinjauan literatur, FEM mampu memodelkan distribusi tegangan, deformasi, dan mode kegagalan dengan tingkat akurasi tinggi, serta memberikan hasil yang sebanding dengan metode analitik dan eksperimental. Keunggulan utama FEM terletak pada kemampuannya untuk menangani geometri kompleks, perilaku material nonlinier, serta berbagai kondisi batas yang sulit diselesaikan dengan cara konvensional.

Pada sambungan baja ringan (*Cold-Formed Steel*/CFS), hasil review menunjukkan bahwa simulasi FEM mampu memprediksi deformasi maksimum dan momen rotasi dengan deviasi hasil 25–29% terhadap uji eksperimen. Analisis ini juga berhasil mengidentifikasi mode kegagalan dominan, seperti kerusakan lubang baut dan celah pada zona tarik, yang menunjukkan kesesuaian antara model numerik dan kondisi nyata. Sementara itu, pada kolom beton bertulang, pendekatan *Concrete Damage Plasticity* (CDP) melalui Abaqus/CAE menunjukkan peningkatan kapasitas aksial hingga 115–121% akibat variasi konfigurasi sengkang. Hasil ini menegaskan bahwa FEM mampu memprediksi perilaku nonlinier beton dengan akurasi tinggi dan mendukung optimalisasi desain struktural.

Secara keseluruhan, FEM berperan penting sebagai alat analisis dan validasi dalam pengembangan desain struktur modern yang efisien, aman, dan berkelanjutan. Melalui integrasi dengan teknologi kecerdasan buatan dan machine learning, potensi FEM dapat ditingkatkan untuk menghasilkan optimasi desain yang lebih cepat dan cerdas. Dengan demikian, FEM bukan hanya metode analisis numerik, tetapi juga fondasi penting bagi inovasi teknik sipil di era digital dan rekayasa berbasis simulasi.

Untuk pengembangan penelitian dan aplikasi lebih lanjut, disarankan:

- Memperluas eksplorasi material dan variasi pembebanan untuk simulasi yang lebih komprehensif.
- Mengintegrasikan AI dan machine learning untuk optimasi desain yang lebih cerdas dan efisien.
- Meningkatkan validasi eksperimental skala penuh guna memastikan keandalan hasil simulasi.
- Mengembangkan software FEM yang lebih terjangkau dan user-friendly.
- Memanfaatkan FEM untuk analisis sustainability guna mendukung desain yang berkelanjutan.

## References

Anam, Syaiful, Bantot Sutriono, and Retno Trimurtiningrum. 2020. Studi perbandingan kinerja gedung beton bertulang srpmk 6 lantai dengan menggunakan metode pushover dan nonlinear time history analysis. *Jurnal Ilmiah Mitsu (Media Informasi Teknik Sipil Universitas Wiraraja)* 8 (1): 33–41. https://doi.org/10.24929/ft.v8i1.922.

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.

Chairunnisa, Nursiah, Ade Yuniati Pratiwi, Arya Rizki Darmawan, Ratni Nurwidayati, Wiku Adhiwicaksana Krasna, Ahmad Cahyadi, and Muhammad Zackyudin. 2023. Pendampingan teknis pengujian tidak merusak dengan ultrasonic pulse velocity dan hammer test pada struktur beton bertulang bangunan kantor di banjarbaru. *Jurnal Pengabdian ILUNG (Inovasi Lahan Basah Unggul)* 3 (1): 146–156. https://doi.org/10.20527/ilung.v3i1.9523.

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.

Ng, Aloysius Yoke Khing, Yeong Huei Lee, Tina Chui Huon Ting, Cher Siang Tan, and Shahrin Mohammad. 2022. Finite element analysis of gusset plate connection design for cold-formed steel frames. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology* 13, no. 1 (April): 59–68. https://doi.org/10.33736/jcest.4484.2022.

Prayogo, Jodie. 2015. Pemodelan konstruksi portal rangka baja berbasis finite element method (fem). Bachelor's Thesis, Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.

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.

Wati, Dini Eka, and Mohammad Ghozi. 2023. Program aplikasi fem untuk analisis struktur rangka baja 2d. *INTER TECH* 1 (1): 1–8. https://doi.org/10.54732/i.v1i1.1007.