Journal of Infrastructure and Construction Technology (2025), **3(1)**, 21–29
doi:10.56208/jictech.3.1.21-29

ARTICLE

Studi Komparatif Analisis Struktur Portal 3D Dan Rangka Batang 3D Menggunakan Metode Elemen Hingga dan SAP2000

Dian Nanda Islami[1] and Muhammad Rifal Fan Putra[*,2]

[1]PT. P3SM Riau
[2]PT. Wahana Mitra Amerta – HIK (KSO)
*Corresponding author. Email: rifalputra98@gmail.com

(Received 28 November 2024; revised 28 Januari 2025; accepted 15 Februari 2025; first published online 10 Maret 2025)

Abstract

The comparative accuracy of different structural models under Finite Element Method (FEM) computation remains a relevant issue, particularly when manual, spreadsheet-based formulations are compared with professional engineering software. This article integrates the findings of both studies as a basis for comparative analysis, namely (1) 3D portal analysis using MS Excel-based FEM validated with SAP2000, and (2) 3D truss analysis using a similar approach. This study aims to assess the consistency of manual analysis results based on Excel with the numerical results of modern software, as well as to understand the advantages and limitations of the method in the context of different structures. The results of the study show that in 3D portals, the displacement difference is relatively small (<5%), but the internal moment force shows a significant difference. Conversely, in 3D truss structures, axial forces and support reactions were almost identical to SAP2000, while displacement had a considerable deviation (±10%). This confirms that Excel-based MEH is effective as a simple educational and verification tool, but in professional practice, analysis software is still needed to ensure accuracy, especially for internal force analysis in 3D portals.

Keywords: Finite Element Method, 3D Portal, 3D Truss, SAP2000, Structural Analysis

1. Pendahuluan

Analisis struktur merupakan salah satu tahapan paling krusial dalam perancangan bangunan sipil, baik itu gedung, jembatan, maupun infrastruktur lainnya. Melalui analisis struktur, insinyur dapat memprediksi besarnya deformasi, gaya dalam, maupun reaksi tumpuan yang terjadi pada suatu sistem akibat pembebanan. Ketepatan analisis sangat menentukan keamanan, kenyamanan, serta efisiensi biaya konstruksi.

Metode Elemen Hingga (MEH) adalah salah satu pendekatan matematis yang paling luas digunakan dalam analisis struktur modern. Prinsip MEH adalah membagi struktur besar menjadi elemen-elemen kecil dengan perilaku sederhana, kemudian menghubungkan elemen tersebut melalui

© 2025. 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.

node sehingga membentuk sistem matriks kekakuan global. Dengan pendekatan ini, struktur kompleks dapat dianalisis secara sistematis, baik secara manual maupun dengan bantuan perangkat lunak komputer.

Perangkat lunak seperti SAP2000 telah menjadi standar dalam rekayasa struktur karena mampu memberikan solusi cepat, akurat, dan efisien untuk berbagai jenis struktur. Namun, kemudahan dan otomatisasi komputasi yang ditawarkan perangkat lunak tersebut memiliki konsekuensi: banyak mahasiswa dan praktisi muda yang hanya mengandalkan *software* tanpa memahami secara mendalam tahapan matematis dan logika komputasi MEH yang berada di balik proses perhitungan. Ketidaktahuan terhadap tahapan tersebut berpotensi mengurangi pemahaman terhadap perilaku struktur dan menyebabkan kesalahan interpretasi hasil analisis. Dalam konteks inilah MS Excel menjadi solusi edukatif yang relevan. Excel memungkinkan implementasi MEH secara *manual-terstruktur*, sehingga setiap langkah perhitungan—mulai dari penyusunan matriks kekakuan elemen, perakitan matriks global, hingga solusi sistem persamaan—dapat ditelusuri secara transparan. Dengan demikian, Excel tidak hanya berfungsi sebagai alat hitung, tetapi juga sebagai sarana pembelajaran konseptual yang menjembatani teori dan aplikasi.

Artikel ini merupakan *studi literatur komparatif* yang menganalisis dua penelitian sebelumnya yang menggunakan pendekatan serupa, yaitu:

1. Analisis Elemen Hingga *Line Element* pada Portal 3D (Manubulu, Mooy, and Da Grus 2023)
2. Rangka Batang 3D Menggunakan Analisa Metode Elemen Hingga dan SAP2000 (Manubulu 2022)

Kedua penelitian tersebut menggunakan basis metode yang sama, yaitu MEH berbasis Excel yang dibandingkan dengan SAP2000. Perbedaan terletak pada objek struktur yang dianalisis: portal 3D (*frame*) dan rangka batang 3D (*truss*). Artikel ini melakukan studi komparatif terhadap kedua penelitian tersebut, dengan tujuan untuk mengidentifikasi akurasi hasil, kelebihan, serta keterbatasan pendekatan manual berbasis Excel dibandingkan perangkat lunak numerik modern.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (MEH) merupakan pendekatan numerik yang berfungsi untuk menyelesaikan masalah mekanika kontinu, termasuk analisis struktur dalam bidang teknik sipil. Konsep utamanya adalah memecah suatu struktur yang kompleks menjadi elemen-elemen sederhana, yang kemudian dihubungkan pada titik-titik sambung (*node*). Elemen-elemen ini memiliki persamaan kekakuan lokal yang dapat ditransformasikan ke dalam sistem koordinat global. Setelah matriks kekakuan global terbentuk, dilakukan penyelesaian sistem persamaan untuk memperoleh perpindahan, gaya dalam, serta reaksi perletakan.

Menurut Liang (2022), keunggulan MEH adalah fleksibilitas dan *skalabilitasnya*, yang membuat metode ini dapat diaplikasikan pada hampir semua jenis struktur: mulai dari rangka batang, portal, pelat, cangkang, hingga struktur tiga dimensi kompleks. MEH memungkinkan integrasi antara metode manual (misalnya menggunakan MS Excel) dan perangkat lunak komputer, sehingga dapat berfungsi baik sebagai alat edukasi maupun sarana analisis profesional. Selain itu, Jian et al. (2025) menunjukkan bahwa MEH sangat relevan dalam kajian seismik, karena dapat memodelkan interaksi gaya dinamis pada sambungan portal. Hal ini membuktikan bahwa MEH tidak hanya terbatas pada analisis statis, melainkan juga dapat diadaptasi untuk studi perilaku nonlinier dan dinamis.

2.2 Analisis Struktur Portal 3D

Portal 3D atau *frame space* adalah sistem struktur yang umum digunakan dalam gedung bertingkat dan jembatan rangka. Elemen portal dapat memikul gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur secara simultan, sehingga menjadikannya struktur yang lebih kompleks dibandingkan *truss*. Perhitungan

portal 3D memerlukan formulasi matriks kekakuan yang lebih rumit, karena melibatkan momen inersia, konstanta torsi, serta rotasi tiga dimensi pada setiap *node*.

Penelitian oleh Manubulu (2022) menunjukkan bahwa analisis portal 3D menggunakan MS Excel mampu menghasilkan *displacement* yang relatif akurat dibandingkan SAP2000. Namun, gaya internal seperti momen pada sumbu tertentu memperlihatkan perbedaan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena momen internal sangat sensitif terhadap kondisi batas, distribusi beban, dan perbedaan asumsi dalam formulasi matriks kekakuan.

Firdiansyah and Irwandi (2017) memperkuat temuan ini dengan membandingkan penggunaan SAP2000 dan Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Hasilnya menunjukkan bahwa perangkat lunak mampu memberikan perhitungan gaya internal yang lebih stabil dan realistis, terutama pada portal dengan elemen tipis yang rentan mengalami efek sekunder (*second order effect*). Dengan demikian, Excel lebih tepat digunakan sebagai sarana pembelajaran dan verifikasi *displacement*, sementara perangkat lunak numerik modern lebih diandalkan untuk desain akhir yang membutuhkan akurasi tinggi.

2.3 Analisis Struktur Truss 3D

Berbeda dengan portal, rangka batang 3D (*space truss*) hanya menahan gaya aksial berupa tarik dan tekan. Elemen *truss* dianggap sendi di ujung-ujungnya, sehingga tidak memikul momen lentur atau gaya geser. Dengan asumsi ini, distribusi gaya internal dalam *truss* lebih sederhana, linier, dan mudah diverifikasi.

Manubulu (2022) menunjukkan bahwa hasil perhitungan gaya aksial dan reaksi tumpuan pada *truss* menggunakan Excel sangat konsisten dengan hasil SAP2000. Namun, *displacement* menunjukkan deviasi yang lebih besar. Hal ini wajar, karena perhitungan deformasi global sangat dipengaruhi oleh akurasi perumusan matriks kekakuan dan asumsi numerik yang digunakan dalam penyelesaian manual.

Penelitian oleh Yang, Li, and Sun (2023) mengenai optimasi struktur jembatan rangka baja menggunakan MEH menegaskan keunggulan metode ini dalam menghitung distribusi gaya aksial. Sementara itu, Rahim et al. (2024) menunjukkan bahwa MEH dapat digunakan untuk merancang *truss* optimal melalui variasi konfigurasi batang, sehingga memungkinkan efisiensi material dan biaya. Hal ini membuktikan bahwa analisis *truss* dengan MEH tidak hanya relevan dalam konteks edukasi, tetapi juga dalam desain rekayasa modern.

2.4 Perangkat Lunak Analisis Struktur

Perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga (MEH) telah menjadi standar dalam praktik rekayasa sipil modern. Beberapa *software* yang paling banyak digunakan adalah SAP2000, ETABS, STAAD.Pro, MIDAS Civil, ABAQUS, dan ANSYS. Keunggulan utama perangkat lunak ini adalah kemampuannya menyelesaikan perhitungan struktur dengan skala besar, mengakomodasi geometri kompleks, serta memproses analisis nonlinier maupun dinamis yang sulit dilakukan dengan metode manual. Menurut Liang (2022), perangkat lunak berbasis MEH berperan penting dalam menjembatani kebutuhan antara akurasi analisis numerik dan efisiensi waktu komputasi dalam rekayasa struktur.

SAP2000 merupakan salah satu perangkat lunak paling populer dalam analisis struktur karena memiliki *interface* yang sederhana namun mendukung analisis kompleks, seperti analisis linier, nonlinier, statis, dinamis, hingga *response* gempa. Nabil et al. (2023) menegaskan bahwa penggunaan SAP2000 dalam perancangan ulang struktur gedung terbukti meningkatkan kecepatan perhitungan sekaligus menghasilkan nilai yang lebih presisi dibandingkan metode manual. *Software* ini juga dilengkapi dengan *database* material dan beban standar internasional, sehingga sangat mendukung penerapan dalam desain praktis.

Sementara itu, ETABS lebih difokuskan pada analisis dan desain gedung bertingkat. Fitur-fitur seperti analisis *pushover*, analisis *time history* nonlinier, serta integrasi dengan standar desain internasional membuat ETABS menjadi perangkat wajib dalam desain struktur tahan gempa. Penggunaannya di Indonesia pun meluas seiring dengan tuntutan peraturan gempa nasional yang semakin ketat, seperti SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung.

STAAD.Pro digunakan secara luas untuk analisis struktur baja, terutama jembatan dan rangka industri. Keunggulannya terletak pada kemampuan memodelkan elemen batang dalam berbagai konfigurasi, termasuk rangka ruang tiga dimensi. Joseph and Henderson (2023) menekankan bahwa perangkat lunak seperti STAAD.Pro atau SAP2000 sangat relevan dalam perancangan jembatan modern yang menggunakan kombinasi baja dan beton bertulang, karena mampu memodelkan interaksi material yang kompleks serta pengaruh beban dinamis lalu lintas.

Di sisi lain, perangkat lunak numerik tingkat lanjut seperti ABAQUS dan ANSYS banyak digunakan dalam penelitian karena mendukung analisis nonlinier geometri, material, serta kondisi batas. Perangkat lunak ini mampu memodelkan fenomena yang sangat detail seperti retak beton, tekuk *elastoplastis* baja, hingga analisis berbasis kontak antar komponen. Jian et al. (2025) menunjukkan bahwa ABAQUS dapat digunakan untuk memodelkan kinerja sambungan *hybrid* portal bentang panjang di bawah pengaruh gempa, dengan hasil yang konsisten terhadap eksperimen laboratorium.

Selain aspek teknis, perangkat lunak juga memiliki peran dalam efisiensi biaya proyek. Wahyuni (2012) menekankan bahwa penggunaan perangkat lunak sangat membantu dalam analisis portal ruang dengan elemen tipis, karena *manual calculation* sulit memperhitungkan efek tekuk dan kestabilan global. Dengan adanya perangkat lunak, insinyur dapat dengan cepat mengevaluasi beberapa alternatif desain, sehingga diperoleh solusi yang aman sekaligus ekonomis.

Lebih jauh, kemajuan perangkat lunak analisis struktur juga terkait dengan tren *Building Information Modeling (BIM)*. Integrasi SAP2000 dan ETABS dengan platform *BIM* memungkinkan transfer data geometri dan analisis secara otomatis, sehingga meminimalkan kesalahan input dan mempercepat proses desain. Hal ini sesuai dengan perkembangan industri konstruksi global yang mengedepankan digitalisasi dan efisiensi siklus hidup bangunan. Secara keseluruhan, perangkat lunak berbasis MEH tidak lagi hanya menjadi alat bantu, tetapi telah menjadi kebutuhan mutlak dalam rekayasa sipil modern.

2.5 Penelitian Terkini Terkait MEH

Kajian terkini menunjukkan bahwa MEH terus berkembang seiring dengan kebutuhan desain struktur yang lebih efisien dan aman. Jian et al. (2025) menyoroti penggunaan MEH untuk memodelkan kinerja sambungan portal terhadap beban gempa, dengan hasil bahwa model numerik mampu menggambarkan perilaku struktur mendekati eksperimen laboratorium. Hal ini penting mengingat tuntutan desain bangunan tahan gempa di berbagai negara, termasuk Indonesia.

He et al. (2024) meneliti perilaku balok rangka baja dengan sambungan beton melalui pendekatan eksperimental dan numerik, dan menunjukkan bahwa pemodelan MEH mampu merepresentasikan fenomena laboratorium dengan baik. Penelitian serupa oleh Pratiwi et al. (2025) pada balok beton bertulang dengan profil baja tambahan juga mengonfirmasi konsistensi antara hasil eksperimen dan pemodelan numerik. Sejalan dengan itu, studi oleh Wang et al. (2024) memperluas penerapan MEH pada teknologi *3D concrete printing*, dan menemukan bahwa penggunaan baja *truss* sebagai tulangan meningkatkan kapasitas lentur dengan hasil perhitungan yang sejalan dengan analisis elemen hingga.

Secara keseluruhan, kajian literatur memperlihatkan bahwa MEH tidak hanya relevan untuk pembelajaran dasar analisis struktur, tetapi juga sangat krusial dalam mendukung penelitian mutakhir terkait inovasi material, sistem sambungan, dan teknologi konstruksi baru. Dengan demikian, kombinasi antara metode manual berbasis Excel, perangkat lunak numerik, serta validasi eksperimen menjadi pendekatan yang ideal dalam pendidikan dan praktik rekayasa sipil.

3. Metode Penelitian

Metodologi penelitian ini bersifat *descriptive–comparative* dengan melakukan sintesis data dari dua penelitian terdahulu yang telah memodelkan struktur berbeda menggunakan pendekatan yang sama, yaitu Metode Elemen Hingga (MEH) berbasis MS Excel yang divalidasi menggunakan SAP2000. Karena penelitian ini merupakan *literature-based comparative study*, tidak dilakukan perhitungan ulang, melainkan membandingkan *output* hasil analisis yang sudah dipublikasikan pada kedua studi tersebut. Dengan demikian, fokus penelitian berada pada evaluasi tingkat konsistensi hasil Excel dan SAP2000 pada dua tipe struktur yang memiliki mekanisme kerja berbeda.

Objek yang dibandingkan dalam studi ini tidak bersifat identik, tetapi mirip dalam kerangka metodologis karena keduanya memanfaatkan formulasi MEH yang sama, namun diaplikasikan pada struktur dengan karakteristik berlawanan. Pada penelitian Manubulu dkk. (2022), struktur yang dianalisis adalah portal 3D dengan elemen *balok–kolom* yang mampu menahan gaya aksial, geser, dan momen. Struktur ini memiliki lebih banyak *node* serta elemen dengan properti momen inersia dan rotasi simpul yang berperan dalam pembentukan kekakuan lateral. Sebaliknya, penelitian Manubulu (2022) meninjau rangka batang 3D, yang hanya memikul gaya aksial dan diasumsikan memiliki sambungan sendi di setiap *node*, sehingga tidak terdapat momen maupun geser. Jumlah *node*, dimensi geometri, serta konfigurasi elemen dalam kedua studi tersebut tidak perlu identik karena tujuan komparatif adalah menilai bagaimana Excel-FEM berperilaku pada sistem struktur yang berbeda secara fundamental, bukan pada model dengan parameter yang sama.

Studi komparatif dilakukan dengan mengumpulkan dan mensintesis parameter hasil analisis dari masing-masing penelitian, meliputi:

1. *displacement node*
2. gaya dalam (aksial, geser, dan momen), dan
3. reaksi tumpuan

Data hasil perhitungan Excel dibandingkan dengan hasil validasi SAP2000 untuk melihat pola konsistensi dan deviasi pada masing–masing tipe struktur. Pendekatan ini memungkinkan penilaian akurasi Excel–FEM secara lebih objektif karena mekanisme internal kedua struktur—*flexure-dominated* pada portal dan *axial-dominated* pada *truss*—memiliki sensitivitas matematis yang berbeda.

Dengan desain metodologi ini, penelitian mampu menjelaskan di mana Excel berbasis FEM dapat bekerja dengan baik, dan di mana Excel mulai memiliki keterbatasan, sehingga memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk penggunaan *spreadsheet* FEM sebagai alat edukasi sekaligus verifikasi awal dalam rekayasa struktur.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisis Portal 3D

Hasil analisis pada portal 3D menunjukkan bahwa nilai *displacement* yang diperoleh dari perhitungan manual berbasis MS Excel memiliki perbedaan relatif kecil dibandingkan dengan hasil perangkat lunak SAP2000, yakni berada pada kisaran kurang dari 5%. Hal ini dapat diartikan bahwa metode elemen hingga berbasis matriks kekakuan cukup andal untuk memprediksi perpindahan global struktur, terutama ketika deformasi didominasi oleh lendutan akibat beban lateral maupun beban gravitasi. Perbedaan kecil tersebut masih dapat ditoleransi karena berada dalam rentang akurasi yang wajar untuk metode numerik sederhana.

Namun, jika ditinjau lebih jauh pada gaya dalam, khususnya momen pada sumbu 3, terlihat adanya deviasi yang cukup signifikan antara hasil MS Excel dan SAP2000. Besarnya perbedaan ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, formulasi manual dalam Excel cenderung menyederhanakan aspek geometri maupun kondisi batas, sehingga sensitivitas perhitungan momen yang sangat bergantung pada momen inersia, konstanta torsi, serta interaksi gaya lentur–geser tidak sepenuhnya terakomodasi dengan baik. Kedua, SAP2000 menggunakan algoritma numerik yang lebih kompleks

dan stabil dalam pembentukan serta reduksi matriks kekakuan, sehingga hasil yang diperoleh lebih mendekati kondisi riil struktur.

Selain itu, portal 3D memiliki karakteristik *redundansi* struktural yang cukup tinggi, artinya beban tidak hanya ditahan oleh satu elemen, tetapi juga didistribusikan ke elemen lain melalui interaksi nodal. Distribusi gaya internal ini membuat prediksi gaya momen menjadi lebih kompleks. Pada analisis manual, kesalahan kecil dalam transformasi matriks lokal ke global atau dalam perhitungan rotasi elemen dapat berpengaruh besar terhadap nilai momen yang dihasilkan.

Perbedaan ini juga menunjukkan bahwa meskipun *displacement* dapat dihitung dengan cukup baik, perilaku internal struktur (*internal forces*) memerlukan perangkat analisis yang lebih presisi. Dalam praktik rekayasa, kesalahan prediksi gaya momen dapat berimplikasi serius pada desain penulangan beton bertulang maupun penentuan profil baja. Oleh karena itu, walaupun MS Excel memberikan gambaran konseptual yang jelas, penggunaan perangkat lunak analisis terintegrasi seperti SAP2000 tetap penting dalam perancangan portal 3D yang sebenarnya.

Dengan demikian, dari hasil portal 3D dapat disimpulkan bahwa MEH berbasis Excel lebih sesuai digunakan sebagai alat bantu edukasi untuk memahami konsep perpindahan struktur, tetapi memiliki keterbatasan ketika diaplikasikan untuk analisis gaya dalam yang membutuhkan ketelitian tinggi.

4.2 Analisis Rangka Batang 3D

Hasil analisis pada rangka batang 3D menunjukkan adanya perbedaan *displacement* yang relatif lebih besar dibandingkan dengan portal 3D, yakni berkisar antara 10,85–10,89% antara perhitungan berbasis MS Excel dengan SAP2000. Besarnya deviasi ini dapat dipahami karena dalam sistem rangka batang, deformasi global struktur sangat dipengaruhi oleh panjang elemen, kekakuan aksial, serta geometri konfigurasi *truss*. Perbedaan kecil dalam perhitungan matriks arah kosinus, transformasi koordinat, atau asumsi panjang elemen dapat menyebabkan hasil *displacement* berbeda cukup signifikan.

Meski demikian, untuk parameter gaya aksial pada elemen batang, hasil perhitungan menunjukkan konsistensi yang sangat tinggi dengan SAP2000, yaitu dengan selisih hanya 0,00–0,08%. Hal ini dapat dijelaskan oleh karakteristik utama rangka batang 3D, di mana elemen-elemen *truss* hanya menahan gaya aksial (tarik atau tekan) tanpa memikul gaya geser atau momen. Sifat ini membuat distribusi gaya internal lebih sederhana dan linier, sehingga metode elemen hingga berbasis matriks kekakuan mampu merepresentasikannya dengan baik, bahkan ketika hanya menggunakan platform sederhana seperti MS Excel.

Begitu pula dengan reaksi tumpuan, perbedaan hasil analisis hanya mencapai 0,00–0,10%, yang menunjukkan tingkat kesesuaian hampir sempurna dengan SAP2000. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan gaya global pada struktur *truss* dapat terjaga dengan baik meskipun perhitungan dilakukan secara manual dengan Excel. Dengan kata lain, akurasi perhitungan untuk gaya aksial dan reaksi tumpuan tidak banyak dipengaruhi oleh kompleksitas komputasi, berbeda dengan *displacement* yang sangat bergantung pada detail numerik.

Dari sisi rekayasa struktur, perbedaan *displacement* yang cukup besar ini perlu dicermati. Dalam praktik desain, *displacement* (terutama lendutan) sering menjadi kriteria batas layan (*serviceability limit state*) yang tidak boleh terlampaui. Meskipun gaya aksial sangat akurat, kesalahan prediksi *displacement* dapat berdampak pada aspek kenyamanan, estetika, maupun integritas non-struktural bangunan (misalnya retak dinding pengisi akibat lendutan berlebih). Oleh karena itu, dalam konteks praktis, meskipun MEH berbasis Excel layak digunakan sebagai alat bantu verifikasi gaya internal, untuk evaluasi deformasi struktur tetap diperlukan perangkat lunak analisis yang lebih presisi.

Dari hasil ini juga dapat ditarik kesimpulan bahwa MS Excel lebih unggul dalam memberikan pemahaman konseptual mengenai distribusi gaya aksial dan kestabilan struktur *truss*, namun memiliki keterbatasan dalam menghitung *displacement* secara akurat. Hal ini wajar karena *displacement* bersifat akumulatif dari deformasi tiap elemen, sehingga sangat sensitif terhadap kesalahan kecil pada input

geometri maupun parameter elastisitas.

Dengan demikian, analisis rangka batang 3D memperlihatkan bahwa MEH berbasis Excel merupakan sarana edukasi yang efektif untuk memahami dasar mekanika struktur *truss*, tetapi penerapannya dalam desain profesional tetap harus dibarengi validasi menggunakan perangkat lunak analisis modern agar hasil *displacement* yang diperoleh benar-benar reliabel. Tabel 1 dan Gambar 1 berikut menyajikan perbandingan utama kedua penelitian.

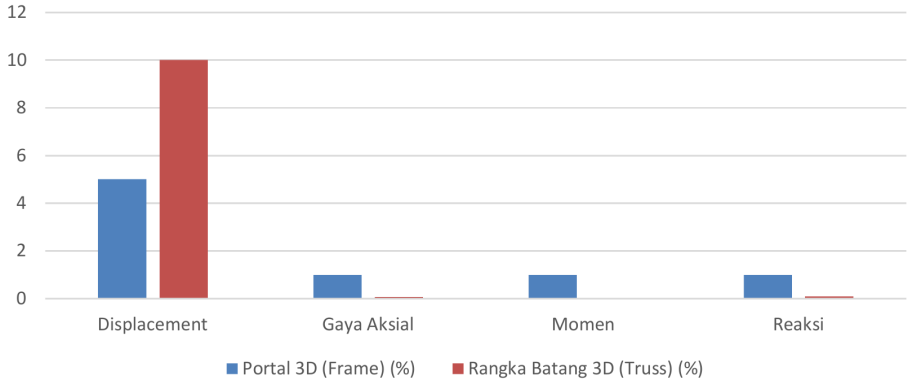

Figure 1. Rerata Persentase Deviasi Hasil Analisis MS Excel terhadap SAP2000 (%)

Table 1. Rerata Persentase Deviasi Hasil Analisis MS Excel terhadap SAP2000 (%)

Aspek	Penulis	Portal 3D (Frame)
Jenis elemen	Menahan aksial, geser, momen	Menahan aksial saja
Perbedaan *Displacement*	Relatif kecil (<5%)	Cukup besar (±10%)
Perbedaan Gaya Aksial	Kecil	Hampir nol (0,00–0,08%)
Perbedaan Momen	Cukup signifikan, terutama sumbu 3	Tidak ada (tidak menahan momen)
Perbedaan Reaksi	Kecil	Hampir nol (0,00–0,10%)
Tingkat Akurasi	Baik pada *displacement*, kurang pada momen	Baik pada gaya aksial & reaksi, kurang pada *displacement*
Relevansi	Cocok untuk studi *frame*	Cocok untuk studi *truss*

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi komparatif antara analisis portal 3D dan rangka batang 3D menggunakan metode elemen hingga berbasis Excel yang divalidasi dengan SAP2000, dapat disimpulkan bahwa tingkat konsistensi dan akurasi hasil sangat bergantung pada jenis gaya internal dan parameter respons struktur yang dianalisis. Dengan kata lain, perbedaan karakteristik elemen struktur—apakah memikul momen, geser, atau hanya aksial—berpengaruh langsung terhadap kesesuaian hasil antara perhitungan manual dan perangkat lunak.

Pada portal 3D, nilai *displacement* yang diperoleh melalui perhitungan Excel menunjukkan tingkat akurasi yang baik dan mendekati hasil SAP2000. Namun, gaya internal, khususnya momen lentur, menunjukkan deviasi yang lebih besar. Hal ini menegaskan bahwa analisis portal yang melibatkan mekanisme lentur dan rotasi simpul membutuhkan dukungan perangkat lunak numerik dengan

algoritma yang lebih presisi, terutama karena elemen portal bersifat statis tidak tertentu dan sangat sensitif terhadap kekakuan elemen.

Sebaliknya, pada rangka batang 3D, gaya aksial dan reaksi tumpuan yang dihasilkan menunjukkan konsistensi yang sangat tinggi dengan SAP2000, dengan perbedaan yang sangat kecil. Namun, perbedaan yang lebih besar muncul pada nilai *displacement*, yang dapat mencapai deviasi ±10%. Kondisi ini terjadi karena model rangka batang tidak mempertimbangkan pengaruh momen dan geser, sehingga deformasi global lebih rentan terhadap perbedaan asumsi dan pendekatan numerik.

Secara umum, Excel memiliki peran penting sebagai media edukasi dan alat bantu verifikasi dalam analisis struktur, karena memberikan transparansi pada setiap tahapan perhitungan dan membantu memperkuat pemahaman konsep mekanika struktur. Namun, untuk kebutuhan rekayasa profesional pada struktur yang kompleks seperti portal 3D, perangkat lunak seperti SAP2000 tetap diperlukan guna memastikan reliabilitas hasil analisis. Kombinasi metode manual dan perangkat lunak dapat dianggap sebagai strategi optimal—di mana Excel digunakan untuk validasi konsep dan pembelajaran, sementara SAP2000 dijadikan acuan utama dalam pengambilan keputusan desain akhir.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, beberapa saran dapat diberikan. Bagi mahasiswa dan akademisi, penggunaan Excel dalam analisis struktur perlu terus dikembangkan sebagai media pembelajaran untuk meningkatkan pemahaman mengenai prinsip dasar metode elemen hingga. Bagi praktisi, hasil analisis berbasis Excel sebaiknya tidak dijadikan satu-satunya acuan dalam desain akhir, melainkan digunakan sebagai sarana verifikasi sederhana sebelum hasil akhir diproses dengan perangkat lunak profesional. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan memperluas objek analisis, misalnya pada struktur nonlinier, beban dinamik, atau analisis *pushover*, sehingga keunggulan dan keterbatasan masing-masing metode dapat dipetakan secara lebih komprehensif. Selain itu, pengembangan integrasi antara Excel dengan perangkat lunak analisis lain yang lebih canggih, seperti MATLAB atau Python, juga dapat menjadi alternatif yang menarik untuk mendukung proses pembelajaran sekaligus penelitian di bidang rekayasa struktur. Disarankan agar peneliti mempublikasikan kode atau *spreadsheet* Excel yang digunakan sebagai *supplementary material*, sehingga perhitungan manual dapat direplikasi dan diverifikasi oleh peneliti atau pembaca lain. Langkah ini akan meningkatkan transparansi, akurasi, serta validitas ilmiah dari penelitian.

References

Firdiansyah, Agus, and Irwandi Irwandi. 2017. Analisis struktur portal 3D menggunakan program Autodesk Robot Structural Analysis Professional serta SAP2000. *Jurnal MEDIA INOVASI Teknik Sipil Unidayan* 6 (2): 140–151.

He, Junlong, Fanlei Kong, Pingming Huang, and Kuihua Mei. 2024. Experimental and numerical investigation on behavior of rectangular closed section steel truss beams with concrete-filled joints. *Buildings* 14 (12). ISSN: 2075-5309. https://doi.org/10.3390/buildings14123857.

Jian, Bin, Xiang Chen, Shuai Yang, and Pengcheng Li. 2025. Study on finite element modeling method and seismic performance of hybrid connection joints of large-span frames. *Buildings* 15 (17). ISSN: 2075-5309. https://doi.org/10.3390/buildings15172992.

Joseph, Jane Regita, and Jane Helena Henderson. 2023. Concrete–filled steel tube truss girders—a state-of-the-art review. *Journal of Engineering and Applied Science* 70, no. 1 (May): 49. https://doi.org/10.1186/s44147-023-00220-w.

Liang, Chen. 2022. Application and prospect of analysis of structures based on finite element method. *Highlights in Science, Engineering and Technology* 28 (December): 53–60. https://doi.org/10.54097/hset.v28i.4059. https://drpress.org/ojs/index.php/HSET/article/view/4059.

Manubulu, Christiani Chandra. 2022. Rangka batang 3D menggunakan analisa metode elemen hingga dan SAP 2000. *Eternitas: Jurnal Teknik Sipil* 2, no. 1 (October): 11–20. https://doi.org/10.30822/eternitas.v2i1.1723.

Manubulu, Christiani Chandra, Merzy Mooy, and Efraim Cristiano Da Grus. 2023. Analisis elemen hingga line elemen pada portal 3D. *Prokons: Jurnal Teknik Sipil* 17, no. 1 (February): 52–60.

Nabil, Fajar, Muhammad Ramadhan Bagaskoro, Asri Nurdiana, and Bambang Setiabudi. 2023. Penerapan software SAP2000 pada re-design struktur gedung terpadu psikologi olahraga universitas negeri surabaya. *Jurnal Sipil dan Arsitektur* 1 (2): 23–35. ISSN: 2988-5973. https://doi.org/10.14710/pilars.1.2.2023.23-35.

Pratiwi, Ade Yuniati, Hari Afriyono, Nursiah Chairunnisa, Wiku Adhiwicaksana Krasna, Ratni Nurwidayati, and Ahmad Fahreza. 2025. Experimental assessment of flexural performance in concrete beams reinforced with angle steel profiles: a comparative study against typical reinforcement systems. *Journal of Applied Engineering Science* 23 (1): 90–98. https://doi.org/10.5937/jaes0-53742.

Rahim, Nur Liza, J. Ang, M. Z. A. M. Zahid, T. Imjai, S. Salehuddin, N. M. Ibrahim, A. R. A. Karim, M. A. Rahim, and L. A. Sofri. 2024. Structural optimization of 2-dimensional steel truss beams with different truss members using finite element analysis. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 18, no. 4 (December): 10391–10406. https://doi.org/10.15282/jmes.18.4.2024.11.0817.

Wahyuni, Wahyuni. 2012. Kajian kolom tipis sebagai elemen struktural portal rangka ruang. *Jurnal Teknik Sipil* 1 (1).

Wang, Qiang, Wenwei Yang, Li Wang, Dan Zhang, Zhijian Li, and Guowei Ma. 2024. Flexural performance of the integrated steel truss reinforced 3D printed concrete beams: experimental and numerical analysis. *Journal of Building Engineering* 97:110794. ISSN: 2352-7102. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110794.

Yang, Xuran, Xirui Li, and Puyu Sun. 2023. Structural analysis and optimization of steel truss bridge based on finite element method. *Applied and Computational Engineering* 25, no. 1 (November): 133–141. https://doi.org/10.54254/2755-2721/25/20230750.