Journal of Infrastructure and Construction Technology (2024), **2(2)**, 73–80
doi:10.56208/jictech.2.2.73-80

ARTICLE

Evaluasi Hasil Analisis FEM Manual dan Komputasi pada Struktur Rangka Ruang dan Portal 3D: Studi Literatur

Elsa Yuliawana* and Dang Fadhlan Ali

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Jl HR Subrantas KM 12 Pekanbaru 28293, Indonesia
*Corresponding author. Email: elsa.yuliawana1484@student.unri.ac.id

(Received 28 Mei 2024; revised 15 September 2024; accepted 30 Oktober 2024; first published online 5 November 2024)

Abstract

The Finite Element Method (FEM) is essential for analyzing complex structures, but a knowledge gap exists regarding result differences found between transparent manual/script methods (Excel, MATLAB) and automated commercial software (SAP2000, ETABS). This comparison is vital to address the need for transparent validation practices, especially for learning and design optimization. This study's objective is to compare key FEM outputs (nodal displacements, member forces, support reactions) using a literature review with a descriptive-analytic method. Main findings show two patterns: high consistency (results reported as "same" or <5% difference) for axial-dominated truss structures, attributed to decimal rounding ; however, large discrepancies were found specifically in bending moment components for portal frames. A data contradiction (10.89% displacement error vs. <0.1% force error) also highlighted manual implementation risks. It is concluded that FEM results are generally reliable. The practical implication is recommending transparent manual methods for learning purposes and algorithm validation , while commercial software is suited for complex professional design due to high computational efficiency..

Keywords: Structural Analysis, Finite Element Method, Space Truss, SAP2000, Microsoft Excel

1. Pendahuluan

Perkembangan analisis struktur modern telah mengalami pergeseran yang signifikan dari metode mekanika klasik menuju Metode Elemen Hingga (MEH) sebagai pendekatan utama dalam rekayasa struktur. Pergeseran ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan untuk menganalisis struktur statis tak tentu, geometri kompleks, serta model tiga dimensi berskala besar yang tidak dapat diselesaikan secara efisien menggunakan metode klasik (Liang 2022). Dalam penerapannya, MEH umumnya digunakan melalui dua pendekatan utama, yaitu pendekatan transparan yang masih dapat ditelusuri proses perhitungannya (seperti lembar kerja Excel atau skrip MATLAB), serta pendekatan otomatis menggunakan perangkat lunak komersial yang menawarkan efisiensi tinggi, seperti SAP2000, ETABS, dan Mstower.

Meskipun seluruh pendekatan berlandaskan prinsip MEH yang sama, perbedaan hasil analisis sering ditemukan antara perhitungan manual, program buatan sendiri, dan perangkat lunak komersial (Abdelaty, Reisinger, and Zehetner 2021). Perbedaan ini menimbulkan permasalahan praktis yang

© 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.

cukup penting, terutama terkait dengan validasi hasil analisis dan keandalan metode yang digunakan. Dalam konteks akademik maupun profesional, ketidakkonsistenan hasil dapat menyebabkan kesulitan dalam memastikan akurasi model, memahami penyebab deviasi nilai, serta membangun kepercayaan terhadap hasil desain yang dihasilkan.

Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan pengetahuan terkait praktik pemodelan dan validasi hasil analisis menggunakan MEH. Diperlukan suatu pendekatan yang transparan dan terverifikasi agar pengguna dapat menilai tingkat keakuratan, memahami sumber perbedaan hasil, serta menentukan strategi pemodelan yang sesuai dengan kebutuhan. Kejelasan dalam proses ini menjadi penting tidak hanya untuk tujuan pembelajaran, tetapi juga dalam konteks optimasi desain dan validasi hasil pada tahap rekayasa.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan komparatif terhadap implementasi MEH menggunakan berbagai pendekatan. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil antara metode perhitungan manual (Excel atau MATLAB) dan perangkat lunak komersial (SAP2000). Fokus utama pembahasan meliputi hasil perpindahan, gaya dalam, dan reaksi tumpuan, yang kemudian digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi, kelebihan, serta keterbatasan dari masing-masing pendekatan.

Sebagai kontribusi, penelitian ini disusun dalam bentuk studi kepustakaan dengan pendekatan deskriptif-analitik, yang bertujuan untuk menyintesis berbagai studi perbandingan antara platform MEH. Melalui identifikasi pola konsistensi dan variasi hasil analisis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan dan rekomendasi praktis bagi pengguna MEH, baik dalam ranah akademis untuk proses pembelajaran maupun dalam praktik rekayasa professional.

2. Tinjauan Pustaka

Berbagai penelitian menunjukkan perbandingan antara metode perhitungan manual/skrip dan perangkat lunak komersial telah dilakukan pada berbagai jenis struktur, utamanya rangka ruang (truss) dan portal. Sebuah pola yang muncul dari studi-studi ini, untuk struktur yang didominasi gaya aksial (rangka batang/truss), penelitian secara konsisten melaporkan kesesuaian yang sangat tinggi. Sebaliknya, perbandingan pada struktur yang melibatkan lentur (portal) menunjukkan gambaran yang lebih kompleks.

Secara umum, kesenjangan penelitian ini terletak pada perlunya melakukan validasi terhadap perangkat lunak komersial yang proses perhitungannya sering kali tidak dapat dilihat secara langsung oleh pengguna. Baik dari sisi akademik maupun praktis, penting untuk memahami penyebab dan lokasi terjadinya perbedaan hasil analisis. Oleh karena itu, diperlukan metode perhitungan yang bersifat transparan, seperti menggunakan Excel atau MATLAB, yang dapat berfungsi sebagai alat untuk memvalidasi algoritma perhitungan sekaligus menjadi sarana pembelajaran konsep MEH secara lebih jelas.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kepustakaan. Kajian literatur ini dimaknai sebagai penelaahan kritis terhadap pengetahuan dan temuan yang tersedia dalam sumber-sumber akademik, dengan tujuan menguraikan kontribusi teoretis serta pendekatan metodologis terhadap suatu gagasan.

Sumber data untuk kajian ini diperoleh melalui pengumpulan buku dan artikel jurnal dari berbagai sumber diantaranya yaitu Jurnal Sipilsains, Researchgate, Jurnal Teknik Sipil, Jurnal Polinema, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Technoscientia, Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain, ASTONJADRO, dan RACIC. Kriteria seleksi utama bersifat topikal yang dimana studi ini secara khusus memanfaatkan sepuluh referensi dari jurnal yang relevan dalam sepuluh tahun terakhir yang terkait langsung dengan topik inti, yaitu perbandingan analisis rangka batang dan portal menggunakan metode elemen hingga (manual vs perangkat lunak).

Table 1. Perbandingan Penelitian

Struktur	Metode 1 (Transparan)	Metode 2 (Komersial)	Ouput Dibandingkan	Temuan Selisih Hasil	Referensi
Portal 3D	MS Excel (Manual)	SAP2000	Perpindahan, Reaksi, dan Momen	Selisih relatif kecil pada perpindahan dan reaksi, perbedaan lebih besar pada momen arah sumbu ke-3	Manubulu, Mooy, and Da Grus (2023)
Rangka Ruang (*Space Truss*)	MATLAB	SAP2000	Perpindahan, Reaksi, dan Momen	Hasil hampir sama (selisih < 5%); perbedaan disebabkan pembulatan angka desimal	Widyawaty, Husni, and Suyadi (2016)
Space Truss Sederhana	Perhitungan Manual	ETABS and Mstower	Gaya Batang, Reaksi Perletakan	Hasil yang sama di ketiga metode; menunjukkan konsistensi hasil analisis	Toga Sitompul and Pariatmono (2022)
Rangka Batang 3D	MS Excel (Manual)	SAP2000	Perpindahan, Gaya Aksial, Reaksi	Selisih 10,89% pada perpindahan; selisih < 0,1% pada gaya aksial dan reaksi	Manubulu (2022)
Rangka Batang 3D	Perhitungan Manual	Abaqus/CAE	Gaya, Reaksi, Deformasi	Menunjukkan kecocokan hasil yang tinggi antara analisis manual dan numerik	Saputra (2020)

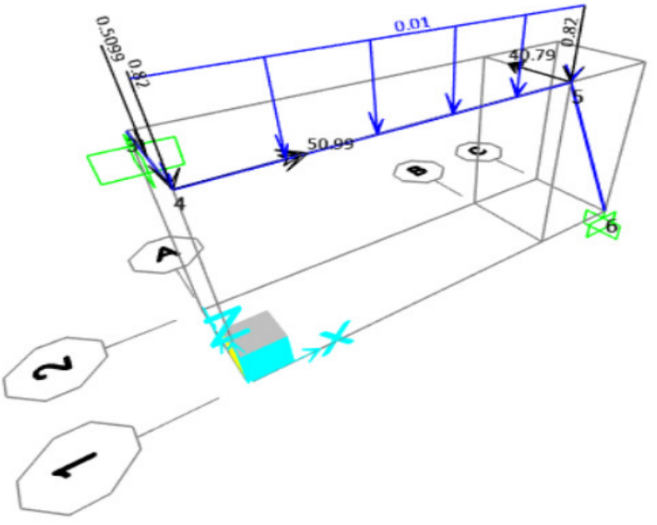
Pendekatan yang digunakan adalah deskriptif-analitik yang dimana data dari literatur yang terpilih disajikan secara sistematis. Analisis data kemudian dilakukan secara:

1. Komparatif: Membandingkan secara langsung temuan (output, selisih) dari studi-studi yang berbeda untuk melihat kesamaan atau perbedaan
2. Kuantitatif: Menganalisis data numerik yang dilaporkan, seperti nilai perpindahan, gaya, dan persentase selisih yang ditemukan dalam tabel-tabel hasil
3. Kualitatif & Tematik: Menganalisis mengapa perbedaan terjadi (misalnya, "pembulatan bilangan desimal" vs "momen pada arah sumbu ke-3") dan mengidentifikasi pola atau tren yang konsisten di seluruh literatur (misalnya, temuan pada struktur rangka batang vs struktur portal).

4. Hasil dan Pembahasan

Manubulu, Mooy, and Da Grus (2023) memodelkan struktur dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000 yang disesuaikan untuk model portal tiga dimensi yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil pemodelan dan pembebanan dapat dilihat pada Gambar 1.

Berdasarkan 2, terlihat bahwa selisih antara hasil analisis menggunakan metode elemen hingga secara manual dan hasil analisis dengan Program SAP2000 relatif kecil.



(Manubulu, Mooy, and Da Grus 2023)

Figure 1. Pemodelan struktur Portal 3D Program SAP2000

Table 2. Perpindahan Nodal

(Manubulu, Mooy, and Da Grus 2023)

	Perpindahan)	
No Nodal	**Manual**	**SAP2000**
1	−0.0017	−0.0016
2	−0.0062	−0.0061
3	0	0
4	0.0045	0.0043
5	−0.0012	−0.0011
6	0.0008	0
13	−0.0017	−0.0016
14	−0.0009	−0.0009
15	0.0038	0.0038
16	0.002	0.0022
17	−0.0009	−0.0009
18	0.0016	0.0018

Berdasarkan 3, terlihat pada member 1 selisih nilai terbesar antara hasil manual dan SAP2000 terjadi pada gaya nomor 6 dan 12, yang merupakan akibat momen arah sumbu ke-3. Tabel 4 menunjukkan bahwa pada member 2, perbedaan terbesar antara hasil manual dan SAP2000 terdapat pada gaya nomor 6 dan 18, yang berasal dari momen arah sumbu ke-3.

Pada Tabel 5, terlihat bahwa pada member 3 selisih nilai terbesar antara hasil manual dan SAP2000 terjadi pada gaya nomor 24 dan 18, yang merupakan momen arah sumbu ke-3. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan besarnya nilai perpindahan nodal, hasil secara manual dan software SAP2000 tidak menunjukkan perbedaan yang besar, namun hasil analisis gaya pada member 1, 2, dan 3 menunjukkan perbedaan yang besar khususnya pada hasil analisa momen pada arah sumbu 3.

Table 3. Hasil Analisis Elemen 1

(Manubulu, Mooy, and Da Grus 2023)

	Elemen 1)	
No Nodal	**Manual**	**SAP2000**
7	18.4351	19.239
8	29.9654	29.252
9	0.6547	1.061
10	−50.7413	−50.4952
11	34.4397	33.6089
12	−3.2206	−0.0395
1	−18.4351	−19.239
2	−24.9654	−24.252
3	−0.6547	−1.061
4	−4.1895	−3.0088
5	2.4306	4.8694
6	3.2206	0.0395

Table 4. Hasil Analisis Elemen 2

(Manubulu, Mooy, and Da Grus 2023)

	Elemen 1)	
No Nodal	**Manual**	**SAP2000**
1	18.4351	19.239
2	16.9654	16.252
3	0.6547	1.061
4	9.1895	8.0088
5	−2.4306	−4.8694
6	−3.2206	−0.0395
13	−18.4351	−19.239
14	23.0346	23.748
15	−0.6547	−1.061
16	−9.1895	−8.0088
17	−0.1882	0.6256
18	−8.9177	−14.9527

Dalam penelitiannya, Widyawaty, Husni, and Suyadi (2016) melakukan perbandingan analisis rangka ruang dengan menggunakan SAP2000 dan MATLAB melalui pembuatan script programming. Proses ini dilakukan dengan menginput jenis profil, luas penampang, modulus elastisitas, koordinat setiap titik, elemen rangka ruang, jenis tumpuan, serta beban yang bekerja pada struktur. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dirumuskan beberapa kesimpulan. Pengembangan program MATLAB untuk analisis rangka ruang secara signifikan mempermudah dan meningkatkan efisiensi perhitungan dalam menentukan perpindahan titik, reaksi tumpuan, dan gaya pada elemen batang. Perbandingan hasil MATLAB dan SAP2000 memperlihatkan selisih di bawah 5% yang disebabkan oleh pembulatan bilangan desimal. Selain itu, agar MATLAB beroperasi sesuai tujuan dan menghasilkan nilai yang valid, struktur input harus disusun sesuai ketentuan yang ditetapkan.

Toga Sitompul and Pariatmono (2022) menelaah keandalan sebuah model truss, ruang sederhana digunakan dalam analisis ini untuk memvalidasi hasil analisis struktural manual terhadap program

Table 5. Hasil Analisis Elemen 3

(Manubulu, Mooy, and Da Grus 2023)

	Elemen 1)	
No Nodal	**Manual**	**SAP2000**
19	−18.4351	19.239
20	31.0346	−31.748
21	−0.6547	1.061
22	−11.8083	8.0088
23	−1.4976	−0.6256
24	−1.2463	10.9527
13	18.4351	−19.239
14	−31.0346	31.748
15	0.6547	−1.061
16	9.1895	−12.2526
17	0.1882	−1.4963
18	12.9177	2.5079

ETABS v9.7.4 dan MStower V6.20.1.11 serta membandingkan hasilnya. Pengembangan data beban dapat diperkirakan dengan rentang nilai yang kecil sehingga dapat menentukan kombinasi beban yang mungkin terjadi. Data kombinasi beban disimulasikan pada struktur, kemudian kapasitas struktur dalam setiap kombinasi diperoleh sehingga probabilitas kegagalan dan keandalan struktur diperoleh sebagai referensi dalam pengambilan data.

Berdasarkan hasil analisis struktural dalam studi ini, rasio tekanan tarik dan tekan dari member dengan kegagalan pada anggota BE diperoleh. Perlu dicatat bahwa untuk sistem semacam itu, kegagalan satu elemen setara dengan kegagalan seluruh struktur (Mochocki, Obara, and Radoń 2020). Dalam penelitian sebelumnya, evaluasi kegagalan struktural pada elemen tunggal adalah bidang penelitian yang penting. Analisis elemen tunggal yang gagal dapat dilakukan untuk penilaian keselamatan struktural (Mochocki and Radoń 2019). Kegagalan struktural didefinisikan jika satu komponen gagal dalam sistem struktural sehingga struktur tidak dapat berfungsi dengan baik atau tidak dapat digunakan. Dalam simulasi pertama, beban terdiri dari nilai pada setiap arah beban seperti ditunjukkan pada Gambar 2, nilai beban dalam pemodelan ini adalah 100 kN dengan arah pada sumbu z dan 60 kN dengan arah pada sumbu x sebagai acuan dalam memperkirakan kemungkinan beban yang akan terjadi.

Berdasarkan perbandingan tiga metode analisis struktural, hasil dari parameter yang ditinjau memperoleh nilai yang sama sehingga analisis menggunakan ETABS dan MStower dapat diandalkan. Berdasarkan dua percobaan metode penghasilan variabel acak, hasil probabilitas keduanya mendekati nilai aktual sehingga metode yang lebih sederhana dipilih, yaitu penghasilan angka acak menggunakan fitur di Ms Excel. Secara umum, prosedur untuk analisis ketahanan struktural adalah penentuan kriteria kegagalan dengan kata lain, batas kapasitas beban struktur dan data beban yang akan ditopang oleh struktur agar dapat digunakan sebagai acuan dalam menganalisis probabilitas kegagalan dan ketahanan struktur.

Dalam penelitiannya, Manubulu (2022) memformulasikan tahapan analisis rangka batang tiga dimensi (space truss) dengan memanfaatkan Ms Excel, serta melakukan perbandingan hasil analisis tersebut dengan SAP2000. Langkahnya meliputi menggambar diagram struktur, penomoran sambungan dan batang, menentukan koordinat tiap titik, menghitung panjang dan arah setiap batang, menyusun matriks kekakuan elemen, merakit matriks kekakuan global, memasukkan beban, lalu menyelesaikan persamaan untuk memperoleh perpindahan dan gaya.

Sintesis hasil dari berbagai literatur menunjukkan adanya pola yang konsisten terkait perbandingan antara metode perhitungan manual atau skrip (seperti Excel dan MATLAB) dengan perangkat lunak komersial (seperti SAP2000, ETABS, dan MStower). Analisis ini tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga menelaah lebih dalam penyebab terjadinya perbedaan hasil yang ditemukan. Faktor-faktor penyebab tersebut dapat dikaitkan dengan perbedaan formulasi teori MEH, sifat numerik dalam komputasi, serta karakteristik struktur yang dianalisis.

Hasil tinjauan menunjukkan tiga pola utama. Pola pertama pada struktur dengan gaya aksial dominan, seperti rangka ruang (truss), menunjukkan tingkat kesesuaian hasil tinggi antara manual dan software. Widyawaty, Husni, and Suyadi (2016) dan Toga Sitompul and Pariatmono (2022) melaporkan bahwa perbedaan nilai yang muncul umumnya sangat kecil, bahkan kurang dari 5%. Hal ini dapat dijelaskan secara teoritis karena elemen rangka batang merupakan formulasi dasar dalam MEH yang hanya melibatkan gaya aksial, dengan matriks kekakuan yang baku dan identik. Metode matriks kekakuan dirancang untuk direpresentasikan dalam sistem koordinat global sehingga mudah diprogram, perakitan matriks kekakuan global dari matriks kekakuan setiap batang dan perakitan beban ekivalen merupakan inti prosedurnya (yazid et al. 2023). Oleh karena itu, selisih yang muncul lebih disebabkan oleh pembulatan angka dan perbedaan numerik minor, bukan oleh perbedaan metodologi perhitungan.

Sebaliknya, pola kedua menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada struktur dengan gaya lentur dominan, seperti portal 3D. Manubulu, Mooy, and Da Grus (2023) melaporkan bahwa meskipun nilai perpindahan dan reaksi global antara Excel dan SAP2000 relatif konsisten, terdapat selisih yang cukup besar pada nilai momen lentur sumbu ke-3 (output lokal). Perbedaan ini mengindikasikan adanya perbedaan formulasi elemen yang digunakan. Perhitungan manual umumnya mengabaikan deformasi geser, sedangkan SAP2000 mempertimbangkan efek geser dan deformasi sekunder. Perbedaan asumsi teoretis ini secara langsung memengaruhi hasil momen lentur dan menjadi penyebab utama ketidaksesuaian hasil antar platform.

Selanjutnya, pola ketiga menyoroti munculnya ketidakkonsistenan data yang mencerminkan risiko penggunaan metode manual. Dalam penelitian Manubulu (2022) pada struktur rangka batang 3D, didapat bahwa gaya aksial dan reaksi tumpuan menunjukkan kesesuaian di atas 99,9%, namun perpindahan nodal memiliki perbedaan hingga 10,89%. Dalam sistem linear $F = kd$, hasil seperti ini tidak konsisten secara matematis yang disebabkan oleh kesalahan input data atau kesalahan formula pada perhitungan spreadsheet. Temuan ini menegaskan bahwa perbedaan bukan berasal dari kelemahan metode MEH itu sendiri, tetapi dari implementasi manual yang rentan terhadap kesalahan numerik maupun kesalahan manusia.

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil perbandingan analisis struktur secara manual baik melalui Ms Excel dan MATLAB menunjukkan hasil yang konsisten dengan perangkat lunak komersial seperti SAP2000, Abaqus, ETABS, dan MStower. Nilai perpindahan sendi dan reaksi perletakan pada rangka batang 3D menunjukkan perbedaan yang sangat kecil. Namun, selisih yang lebih nyata ditemukan pada gaya dalam elemen tertentu, terutama pada momen lentur, yang menunjukkan adanya perbedaan formulasi perhitungan manual dan perangkat lunak komersial. Hasil ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang juga melaporkan kesesuaian tinggi antara hasil perhitungan manual dan perangkat lunak untuk sistem struktur sederhana.

Artikel ini berkontribusi sebagai studi deskriptif-analitik yang menyintesis berbagai hasil perbandingan antara manual dan perangkat lunak komersial. Hasil sintesis menunjukkan adanya pola perbedaan yang sistematis, yaitu:

- Konsistensi tinggi pada sistem dengan dominasi gaya aksial (seperti rangka batang).
- Perbedaan signifikan pada sistem dengan dominasi momen lentur (seperti portal).

Temuan ini memberikan validasi empiris terhadap kedua pendekatan dan menegaskan pentingnya pemilihan alat analisis yang sesuai dengan tujuan penggunaannya baik untuk pembelajaran konsep dasar FEM maupun penerapan profesional dalam desain struktur. Rekomendasi penggunaan software dan pendekatan manual:

- Pendekatan Manual (Ms Excel / MATLAB). Direkomendasikan untuk keperluan pembelajaran dan validasi algoritma karena memiliki transparansi penuh dalam tahapan perhitungan, sehingga memudahkan pengguna memahami konsep dasar FEM. Keterbatasan pendekatan ini terletak pada efisiensi waktu yang rendah dan potensi kesalahan numerik, seperti pembulatan atau kesalahan input data.
- Perangkat Lunak Komersial (SAP2000, ETABS, dan sejenisnya). Lebih sesuai digunakan untuk analisis struktur kompleks dan skala besar karena menawarkan efisiensi komputasi tinggi dan kemudahan dalam pemodelan struktur. Namun, proses perhitungannya bersifat tertutup, sehingga kesalahan input mungkin tidak terdeteksi secara langsung.

References

Abdelaty, Ahmed, Christian Reisinger, and Christian Zehetner. 2021. A comparison between commercial and open-source software for finite element analysis of elasto-plastic bending. In *Complas 2021,* edited by David Brown and Susan Green, 17:1–12. 16th International Conference on Computational Plasticity 1. Barcelona, Spain: CIMNE Congress Bureau, CIMNE, September.

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.

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.

Mochocki, Wojciech, Paulina Obara, and Urszula Radoń. 2020. Impact of the wind load probability distribution and connection types on the reliability index of truss towers. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 58 (2). https://doi.org/10.15632/jtam-pl/118525.

Mochocki, Wojciech, and Urszula Radoń. 2019. Analysis of basic failure scenarios of a truss tower in a probabilistic approach. *Applied Sciences* 9 (13). ISSN: 2076-3417. https://doi.org/10.3390/app9132662.

Saputra, Hadi. 2020. Statics analysis of planar trusses structure with finite element software. *Jurnal Teknologi Technoscientia* 13, no. 2 (November): 131–137. https://doi.org/10.34151/technoscientia.v13i2.3166.

Toga Sitompul, Sang, and Pariatmono Pariatmono. 2022. Reliability of simple space truss structure. *ASTONJADRO* 11, no. 3 (September): 600–607. https://doi.org/10.32832/astonjadro.v11i3.7399.

Widyawaty, Oktaviany, Hasti Riakara Husni, and Suyadi Suyadi. 2016. Analisis perhitungan gaya internal rangka ruang dengan menggunakan metode elemen hingga. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain (JRSDD)* 4, no. 1 (March): hal. 51 –58. https://doi.org/10.23960/jrsdd.v4i1.346.

yazid, Muhammad, Rizki Ramadhan Husaini, Sukri Sukri, Deri Islami, Teddy Julio Gunawan, and Muhammad Defri Wahyudi. 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/0.36341/racic.v8i2.3813.