Journal of Infrastructure and Construction Technology (2024), **2(2)**, 81–89
doi:10.56208/jictech.2.2.81-89

ARTICLE

Pemodelan Analisis Struktur Menggunakan Aplikasi Berbasis Elemen Hingga: Artikel Review

Aditya Warman* and Muhammad Arifuddin

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Jl HR Subrantas KM 12 Pekanbaru 28293, Indonesia
*Corresponding author. Email: aditya.warman2888@student.unri.ac.id

(Received 28 Agustus 2024; revised 1 November 2024; accepted 20 November 2024; first published online 15 Desember 2024)

Abstract

The rapid advancement of technology has significantly influenced structural engineering, particularly in the design of complex geometries and the analysis of irregular load distributions. Conventional manual calculations often fail to provide precise and reliable results, especially when dealing with large-scale or intricate structural systems. To address these limitations, numerical methods such as the Finite Element Method (FEM) have been developed and widely implemented. FEM divides a structure into smaller elements interconnected through nodal points, enabling detailed analysis of displacements, stresses, and reactions. Alongside theoretical development, FEM has been integrated into computer-based applications that provide more efficient, accurate, and user-friendly tools for structural analysis and design. This paper reviews several widely used FEM-based applications, including SAP2000, ETABS, ANSYS, and ABAQUS. This article utilizes the Literature Review method to review and synthesize findings from four previous studies. Each software offers unique strengths: SAP2000 and ETABS are widely applied in building and general infrastructure design; ANSYS and ABAQUS are well-suited for nonlinear and advanced multiphysics analysis. By comparing these applications, this review confirms the key finding that software specialization (SAP2000/ETABS for infrastructure vs. ANSYS/ABAQUS for advanced non-linear analysis) is crucial. Ultimately, FEM-based applications not only improve the accuracy and efficiency of structural analysis but also enhance safety, reliability, and sustainability in modern construction practices.

Keywords: Finite Element Method (FEM), Structural Analysis, Numerical Modeling, Software Specialization, Nonlinear Analysis

1. Pendahuluan

Kemajuan teknologi yang begitu pesat pada era modern saat ini membawa pengaruh besar dalam berbagai aspek bidang teknik sipil dan konstruksi. Salah satu dampak yang sangat menonjol adalah perubahan dalam desain geometri bangunan yang semakin kompleks dan tidak lagi sederhana seperti pada masa lalu. Struktur bangunan modern sering kali dirancang dengan bentuk yang unik, futuristik, dan penuh variasi, baik dari segi tampilan arsitektural maupun fungsi. Kompleksitas bentuk tersebut membuat proses perencanaan dan analisis struktur menjadi lebih menantang.

© 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.

Selain itu, kondisi pembebanan yang bekerja pada bangunan juga tidak selalu seragam. Faktor-faktor seperti beban mati, beban hidup, beban angin, gempa bumi, hingga pengaruh lingkungan eksternal dapat menimbulkan kondisi yang tidak stabil pada struktur. Jika hanya mengandalkan perhitungan manual, sering kali hasil analisis yang diperoleh tidak cukup presisi dan tidak sepenuhnya menggambarkan kondisi nyata di lapangan. Hal ini tentu berpotensi menimbulkan risiko ketidakamanan apabila tidak dilakukan dengan tingkat ketelitian yang tinggi.

Untuk menjawab tantangan tersebut, para ahli teknik mengembangkan metode numerik sebagai sarana untuk melakukan analisis struktur dengan tingkat ketepatan yang lebih tinggi (Wati and Ghozi 2023). Salah satu metode yang sangat populer dan banyak digunakan hingga saat ini adalah Metode Elemen Hingga (MEH) atau yang lebih dikenal secara internasional sebagai *Finite Element Method* (FEM). Prinsip kerja MEH adalah dengan membagi suatu struktur yang kompleks menjadi elemen-elemen kecil yang disebut mesh. Setiap elemen saling terhubung melalui titik-titik nodal, di mana pada titik tersebut dapat dihitung besaran penting seperti perpindahan, tegangan, regangan, maupun gaya reaksi (Wati and Ghozi 2023). Dengan cara ini, permasalahan struktur yang awalnya rumit dapat dipecahkan secara bertahap melalui analisis komputasi.

Seiring dengan berkembangnya teknologi komputer, metode elemen hingga tidak hanya dipelajari dalam bentuk teori matematis semata, tetapi juga telah diintegrasikan ke dalam perangkat lunak berbasis analisis numerik. Aplikasi-aplikasi ini dirancang untuk membantu insinyur sipil, arsitek, maupun perencana struktur agar dapat melakukan simulasi dengan lebih cepat, akurat, dan efisien. Beberapa perangkat lunak yang berbasis MEH antara lain SAP2000, ETABS, ANSYS, ABAQUS, dan lain sebagainya (Premono et al. 2022). Masing-masing aplikasi memiliki keunggulan tertentu sesuai dengan kebutuhan analisis, baik itu untuk gedung bertingkat, jembatan, terowongan, maupun struktur infrastruktur lainnya. Kehadiran perangkat lunak berbasis elemen hingga ini tidak hanya mempercepat proses perhitungan, tetapi juga memberikan visualisasi yang lebih jelas mengenai perilaku struktur, sehingga perencana dapat mengambil keputusan desain dengan lebih tepat dan terukur. Pada artikel ini akan dibahas penggunaan aplikasi berbasis elemen hingga untuk pemodelan struktur serta meninjau penerapan dan hasil pada masing – masing software.

2. Tinjauan Pustaka

Metode Elemen Hingga (MEH) merupakan salah satu pendekatan numerik yang digunakan secara luas dalam menganalisis perilaku struktur, baik dalam bidang teknik sipil, teknik mesin, maupun cabang teknik lainnya. Prinsip dasar FEM adalah membagi suatu struktur yang kompleks menjadi sejumlah elemen kecil yang lebih sederhana (*discretization*). Elemen-elemen tersebut saling terhubung pada titik-titik tertentu yang disebut nodal point, sehingga perilaku global struktur dapat diprediksi dengan menghitung respons pada tiap elemen. Melalui proses ini, distribusi tegangan, regangan, gaya reaksi, maupun perpindahan dapat diperoleh secara lebih detail dan mendekati kondisi nyata dibandingkan metode analisis konvensional (Wati and Ghozi 2023).

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi komputer, metode elemen hingga tidak lagi hanya dilakukan dengan perhitungan manual yang memerlukan waktu lama dan rawan kesalahan. Saat ini, FEM telah dikemas dalam bentuk perangkat lunak (software) dengan algoritma komputasi yang canggih, sehingga memungkinkan analisis struktur berukuran besar dan kompleks dilakukan secara cepat, akurat, dan efisien (Wati and Ghozi 2023). Implementasi FEM dalam software tidak hanya mendukung perhitungan linear elastis, tetapi juga mampu melakukan simulasi nonlinier material, nonlinier geometrik, hingga analisis dinamik struktur. Hal ini menjadikan FEM sebagai metode yang sangat penting dalam mendukung praktik rekayasa modern.

Berbagai perangkat lunak berbasis FEM telah dikembangkan dengan karakteristik, fitur, serta orientasi penggunaan yang berbeda. SAP2000 misalnya, banyak digunakan untuk analisis struktur umum karena fleksibilitasnya dalam memodelkan berbagai jenis bangunan, mulai dari gedung hingga jembatan. ETABS lebih difokuskan pada bangunan bertingkat tinggi dengan kemampuan analisis

gempa yang lebih spesifik. Di sisi lain, ANSYS dan ABAQUS digunakan secara luas dalam penelitian maupun industri yang membutuhkan simulasi lebih kompleks, seperti interaksi multi-fisika, analisis nonlinier, maupun pemodelan kerusakan material. Hal ini menekankan bahwa penggunaan metode elemen hingga berbasis komputer sangat membantu insinyur sipil dalam memperoleh solusi yang lebih cepat, efisien, dan akurat pada berbagai permasalahan struktural.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dengan tujuan untuk meninjau, membandingkan, dan menganalisis berbagai perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang banyak digunakan dalam analisis dan desain struktur. Jurnal yang dipilih untuk dianalisis difokuskan pada perbandingan hasil atau analisis multidisiplin, serta mencakup representasi dari keempat perangkat lunak (SAP2000, ETABS, ANSYS, dan ABAQUS) yang direview.

4. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan tinjauan terhadap berbagai perangkat lunak berbasis metode elemen hingga, dapat dilihat bahwa setiap aplikasi memiliki keunggulan, keterbatasan, serta bidang spesialisasi yang berbeda. Secara umum, semua perangkat lunak tersebut dirancang untuk mempermudah proses analisis struktur dengan prinsip FEM, namun penerapannya bervariasi sesuai dengan kebutuhan pengguna.

Berbagai perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (FEM) memiliki keunggulan, keterbatasan, serta bidang spesialisasi yang berbeda. Secara umum, semua perangkat lunak tersebut dirancang untuk mempermudah proses analisis struktur dengan prinsip FEM, namun penerapannya bervariasi sesuai dengan kebutuhan pengguna. SAP2000 dan ETABS, yang sama-sama dikembangkan oleh Computers and Structures Inc. (CSI), lebih berfokus pada struktur bangunan gedung. SAP2000 bersifat lebih umum dengan fleksibilitas untuk menganalisis berbagai tipe struktur, sementara ETABS lebih spesifik untuk gedung bertingkat dan analisis beban gempa. Keduanya memiliki antarmuka yang mudah digunakan dan banyak dipakai di dunia profesional maupun akademik. Di sisi lain, ANSYS dan ABAQUS memiliki cakupan yang lebih luas karena tidak hanya digunakan pada teknik sipil, tetapi juga pada bidang teknik mesin, kelistrikan, hingga aerodinamika. ANSYS unggul dalam simulasi multiphysics yang melibatkan interaksi lintas disiplin, sedangkan ABAQUS lebih menekankan pada kemampuan analisis nonlinier dan kondisi material kompleks, seperti keretakan atau kegagalan material. Hal ini membuat keduanya lebih sering digunakan dalam penelitian dan proyek industri berskala besar.

4.1 Tinjauan Fungsionalitas Aplikasi FEM

Sebagai tinjauan komparatif, berikut adalah deskripsi singkat mengenai fungsionalitas utama dari empat perangkat lunak berbasis FEM yang dibahas dalam artikel ini:

1. SAP2000. SAP2000 merupakan perangkat lunak analisis dan desain struktur yang dikembangkan oleh Computers and Structures Inc. (CSI). Aplikasi ini banyak digunakan karena fleksibilitasnya dalam menganalisis berbagai jenis struktur, mulai dari gedung bertingkat, jembatan, hingga struktur infrastruktur lainnya. SAP2000 dilengkapi dengan antarmuka grafis yang intuitif, pemodelan geometri yang relatif mudah, serta mendukung analisis dinamik seperti analisis gempa dan angin. Perangkat lunak ini ideal untuk analisis umum struktur dengan berbagai tipe elemen.
2. ETABS. ETABS juga dikembangkan oleh CSI, namun aplikasi ini lebih difokuskan pada analisis dan desain gedung bertingkat tinggi. Keunggulan ETABS adalah kemampuannya dalam memodelkan sistem struktur bangunan secara terintegrasi, termasuk interaksi antar elemen vertikal (kolom, dinding geser) dan horizontal (balok, pelat lantai). ETABS sangat efektif digunakan

untuk analisis dinamik struktur bangunan tinggi terhadap beban gempa, menjadikannya standar industri untuk desain gedung.

3. ANSYS. ANSYS merupakan perangkat lunak berbasis FEM yang memiliki cakupan sangat luas, tidak hanya pada teknik sipil, tetapi juga pada bidang teknik mesin, kelistrikan, dan aerodinamika. Dalam bidang struktur, ANSYS mampu melakukan analisis nonlinier, analisis termal-struktural, serta simulasi dengan kompleksitas tinggi. Aplikasi ini banyak digunakan pada penelitian maupun proyek rekayasa yang membutuhkan analisis multidisiplin, serta dikenal memiliki kemampuan kustomisasi elemen yang ekstensif.
4. ABAQUS. ABAQUS dikenal sebagai perangkat lunak FEM yang unggul dalam analisis nonlinier dan permasalahan dengan kondisi material yang kompleks. ABAQUS banyak digunakan dalam penelitian akademis maupun industri, khususnya pada simulasi kerusakan material, analisis kelelahan, serta interaksi kontak antar elemen struktur. Keunggulan ABAQUS terletak pada tingkat akurasinya yang tinggi dalam memodelkan kondisi nonlinier geometrik maupun material.

4.2 Analisis Struktur Rangka Baja Menggunakan SAP2000

Penelitian yang dilakukan oleh Iman, Nelfia, and Manurung (2023) mengenai pemodelan struktur rangka atap 2D menggunakan aplikasi SAP2000 memberikan perbandingan hasil analisis antara perangkat lunak berbasis metode elemen hingga dengan metode manual Direct Stiffness Method (DSM). Pemodelan ini difokuskan pada evaluasi nilai displacement serta gaya batang yang terjadi pada struktur akibat beban tarik dan tekan. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai displacement maupun gaya batang yang diperoleh melalui aplikasi SAP2000 cenderung lebih besar dibandingkan dengan perhitungan DSM. Perbedaan hasil tersebut menghasilkan nilai error sebesar 0,31%–22,02% untuk beban tarik dan 4,63%–22,03% untuk beban tekan.

Faktor utama yang menyebabkan perbedaan nilai tersebut adalah penggunaan luas penampang melintang yang tidak sama. SAP2000 menggunakan profil penampang yang tersedia secara bawaan dalam perangkat lunak, sedangkan DSM merujuk pada tabel profil baja PT. Gunung Garuda. Hal ini menunjukkan bahwa variasi pada pemilihan penampang secara signifikan memengaruhi hasil analisis akhir.

Penelitian ini menegaskan bahwa meskipun SAP2000 dapat memberikan hasil yang lebih praktis dan efisien, validitas hasil analisis tetap sangat dipengaruhi oleh parameter masukan, khususnya luas penampang. Oleh karena itu, insinyur perlu memastikan kesesuaian data profil yang digunakan dalam perangkat lunak dengan kondisi aktual di lapangan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan representatif. Pada metode DMS digunakan persamaan 1 sampai 5.

$$[k] = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\left[K_g^{(e)}\right] = \left[T^{(e)}\right]^T \left[k_l^{(e)}\right] \left[T^{(e)}\right] \tag{2}$$

$$[F] = [K]\,[U] \tag{3}$$

Dalam persamaan stiffness elemen truss pada 1, E adalah Modulus Elastisitas material, A adalah Luas Penampang batang, dan L adalah Panjang batang, serta $[k]$ merupakan Matriks Kekakuan Elemen Lokal. Persamaan 2 sampai ?? adalah langkah kunci dalam Direct Stiffness Method (DSM) untuk menghitung gaya dan perpindahan. Secara khusus, Persamaan 3 , $[F] = [K]\,[U]$, adalah hubungan antara Vektor Gaya Nodal Global F , Matriks Kekakuan Global K [, dan Vektor Perpindahan Nodal Global U . Persamaan 1 sampai 3 berperan sebagai dasar perhitungan analitis atau manual yang menjadi tolok ukur (benchmarking) untuk memvalidasi hasil analisis FEM dari SAP2000.Perbandingan hasil analisis disajikan ulang dalam format Tabel 1 di bawah ini:

Table 1. Perbandingan Gaya Batang (Tarik dan Tekan): SAP2000 vs. DSM

(Iman, Nelfia, and Manurung 2023)

Frame	Tension Load (N) - SAP2000	Tension Load (N) - DSM	Error (%) - Tension	Compression Load (N) - SAP2000	Compression Load (N) - DSM	Error (%) - Compression
1	21135, 02	21070	0, 31	–	–	–
2	–	–	–	24432, 67	27557, 1	12, 79
3	–	–	–	0	0	0
4	–	–	–	19602, 48	23920	22, 03
5	–	0	–	4773, 55	1973	58, 67
6	21135, 02	21070	0, 31	–	–	–
7	2394, 98	1879	21, 54	–	–	–
8	–	0	–	14715, 99	19397	31, 81
9	–	0	–	6527, 23	10328	58, 23
10	17005, 75	20751	22, 02	–	–	–
11	9863, 23	1183	88, 01	–	–	–

Table 2. Perbandingan Perpindahan (Displacement) Nodal: SAP2000 vs. DSM

(Iman, Nelfia, and Manurung 2023)

Joint	U1 (mm) - SAP2000	U1 (mm) - DSM	Error (%) - U1	U3 (mm) - SAP2000	U3 (mm) - DSM	Error (%) - U3
1	0	0	0	0	0	0
2	0, 77	0, 33	56, 90	−1, 85	−1, 09	40, 93
3	0, 20	0, 02	89, 86	−1, 85	−1, 09	40, 93
4	0, 80	0, 28	65, 14	−2, 33	−1, 43	38, 74
5	0, 39	0, 04	89, 86	−2, 36	−1, 46	38, 26
6	0, 55	0, 04	92, 77	−2, 22	−1, 33	40, 07
7	0, 55	0, 02	96, 38	−2, 41	−1, 51	37, 26
8	0, 30	0, 21	30, 63	−2, 33	−1, 46	37, 46
9	0, 71	0	100, 00	−2, 36	−1, 49	36, 99
10	0, 34	0, 27	20, 65	−1, 85	−1, 14	38, 22
11	0, 91	0, 02	97, 80	−1, 85	−1, 14	38, 22
12	1, 11	0, 09	–	0	0	–

Penelitian ini menegaskan bahwa meskipun SAP2000 dapat memberikan hasil yang lebih praktis dan efisien, validitas hasil analisis tetap sangat dipengaruhi oleh parameter masukan, khususnya luas penampang. Oleh karena itu, insinyur perlu memastikan kesesuaian data profil yang digunakan dalam perangkat lunak dengan kondisi aktual di lapangan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan representatif.

4.3 Analisis Respons Seismik Gedung dengan ETABS

Selanjutnya Jain and Ambarkar (2023) melakukan penelitian analisis waktu pada beton bertulang yang diberikan gaya gempa untuk mengevaluasi respons seismik bangunan dalam bentuk perpindahan antar lantai (story displacement), gaya geser lantai (story shear), serta simpangan antar lantai (story drift) pada aplikasi ETABS.

Penelitian ini dilakukan dengan metode analisis numerik menggunakan time history analysis,

yaitu suatu pendekatan yang menilai respons struktur terhadap rekaman gempa nyata atau gempa sintetis sepanjang waktu. Model bangunan dibuat terlebih dahulu dalam bentuk model struktur 3D, kemudian diberikan input berupa data percepatan gempa (ground motion records).

Dalam metode elemen hingga, bangunan RCC dimodelkan dengan membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil seperti balok, kolom, dinding geser, dan pelat. Setiap elemen dihubungkan melalui titik-titik nodal yang berfungsi sebagai tempat dihitungnya perpindahan, gaya, dan tegangan. Proses ini memungkinkan analisis struktur yang kompleks dapat diselesaikan dalam bentuk sistem persamaan yang lebih sederhana.

Time history analysis membutuhkan input berupa riwayat percepatan gempa yang bekerja pada struktur. Dengan FEM, beban gempa ini diaplikasikan pada nodal sehingga sistem persamaan dinamis dapat diselesaikan dalam domain waktu. Perhitungan ini memungkinkan peneliti mengetahui bagaimana tiap lantai bangunan mengalami perpindahan, geser, maupun simpangan antar lantai seiring berjalannya waktu.

Hasil analisis respons dinamik menunjukkan tren yang jelas pada gaya geser dan simpangan antar lantai (story drift) ketika struktur dikenai riwayat gempa yang berbeda. Data menunjukkan bahwa di bawah catatan gempa Altadena, struktur mengalami gaya geser lantai maksimum yang jauh lebih besar (mencapai sekitar 200.000 hingga 400.000 satuan gaya) dibandingkan dengan catatan gempa El Centro, yang menunjukkan intensitas beban seismik yang berbeda. Peningkatan gaya geser ini sejalan dengan peningkatan perpindahan antar lantai. Simpangan antar lantai mencapai puncaknya (sekitar 0,07 hingga 0,09) di bawah rekaman gempa Altadena, sementara simpangan maksimum di bawah El Centro relatif lebih rendah (sekitar 0,02 hingga 0,03). Data ini menegaskan bahwa pemilihan rekaman gempa (input) sangat memengaruhi respons struktural, dan simpangan tinggi menekankan perlunya desain seismik yang ketat dan penggunaan tulangan yang memadai.

4.4 Analisis Termal dan Struktural Komponen Mekanis dengan ANSYS

Penelitian lainnya menggunakan aplikasi Ansys oleh Sateesh (2024) dengan bahasan pokok evaluasi perilaku piston akibat beban kerja nyata dengan metode elemen hingga. Hasil simulasi menunjukkan adanya tegangan maksimum pada bagian kepala piston (upper end). Tegangan tersebut terjadi akibat akumulasi tegangan (stress concentration) yang dipicu oleh tingginya tekanan pembakaran dan suhu bahan bakar. Analisis juga menyinggung berbagai bagian piston seperti kepala piston, bore, skirt, ring groove, dan piston ring yang semuanya berperan dalam menerima beban.

Elemen hingga digunakan untuk mempelajari distribusi tegangan dan perilaku piston menerima beban. Elemen hinggga memungkinkan analisis distribusi tegangan, deformasi, perpindahan, serta reaksi gaya pada piston akibat beban kerja nyata (tekanan, gaya, suhu). Dengan metode ini, masalah geometri kompleks yang sulit diselesaikan secara analitik dapat dianalisis secara numerik. Metode Elemen Hingga menjadi alat utama dalam penelitian ini karena memungkinkan analisis detail pada komponen piston dengan geometri kompleks, beban mekanis dan termal yang ekstrem, serta kebutuhan optimasi desain. Tanpa MEH, analisis semacam ini sulit dilakukan secara manual atau analitik.

4.5 Evaluasi Beban Ledakan pada Reservoir Beton Menggunakan ABAQUS

Penggunaan software ABAQUS dalam pemodelan dan analisis dilakukan pada penelitian (Rahimi 2015). Penelitian ini berfokus pada perlindungan ledakan (explosion protection) untuk bangunan dan infrastruktur sipil, khususnya struktur reservoir beton bertulang bawah tanah. Reservoir merupakan fasilitas vital yang digunakan untuk penyimpanan air maupun produk minyak bumi, sehingga kegagalannya akibat ledakan berpotensi menimbulkan kerugian besar. Selain kerugian ekonomi, keruntuhan reservoir dapat menyebabkan krisis pasokan air, kebocoran zat berbahaya, dan risiko pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan model analisis dan desain reservoir yang aman terhadap beban ledakan menjadi tujuan utama penelitian ini.

Tujuan penelitian adalah untuk mempelajari perilaku reservoir beton bertulang terhadap beban ledakan dengan mempertimbangkan interaksi antara tanah, struktur, dan fluida. Maksud dari kajian ini adalah mengembangkan pemodelan numerik yang mampu merepresentasikan kondisi nyata ketika gelombang ledakan merambat melalui tanah dan mengenai dinding reservoir. Hal ini menjadi penting karena pengujian langsung terhadap ledakan di lapangan memiliki keterbatasan biaya, risiko keselamatan, serta kompleksitas teknis. Hasil simulasi numerik menggunakan Finite Element Method (FEM) menunjukkan bahwa perilaku struktur reservoir beton bertulang terhadap beban ledakan sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah serta karakteristik struktur itu sendiri. Hasil ini diperoleh melalui analisis elemen hingga, di mana reservoir, tanah, dan fluida dimodelkan menjadi elemen-elemen kecil (meshing). Dengan FEM, peneliti dapat mengidentifikasi lokasi regangan plastis, deformasi maksimum, serta titik konsentrasi tegangan yang tidak mungkin didapatkan hanya dengan perhitungan teoritis. Hal ini membuktikan bahwa FEM sangat penting dalam merancang reservoir tahan ledakan, terutama untuk memahami interaksi antara tanah, struktur, dan fluida secara detail.

Dalam dua dekade terakhir, solusi numerik semakin diandalkan untuk menganalisis dampak ledakan. Perangkat lunak berbasis Finite Element Method (FEM), seperti ABAQUS, memungkinkan simulasi kondisi dinamis pada material padat, cair, maupun gas. FEM dapat mempertimbangkan perilaku material yang non-linear, termasuk plastisitas, pengerasan (hardening), pelemahan regangan (strain softening), hingga keruntuhan. Dengan ABAQUS, penelitian ini mengasumsikan adanya ledakan permukaan dengan intensitas tertentu pada jarak tertentu, kemudian menganalisis bagaimana gelombang ledakan merambat melalui tanah menuju reservoir dan berinteraksi dengan cairan yang disimpan.

Metode Elemen Hingga berperan penting karena reservoir memiliki geometri kompleks dan material heterogen yang tidak dapat diselesaikan hanya dengan pendekatan teoritis sederhana. Melalui proses meshing, FEM memungkinkan pembagian struktur, tanah, dan fluida menjadi elemen-elemen kecil untuk memperoleh distribusi tegangan, regangan, perpindahan, serta kemungkinan retak. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan dasar teoritis tentang ketahanan reservoir beton bertulang terhadap ledakan, tetapi juga menghadirkan model numerik yang dapat dijadikan rujukan praktis bagi desain struktur yang lebih aman dan tahan bencana.

4.6 Sintesis Hasil Literatur Terhadap Penelitian Terdahulu

Untuk memberikan gambaran yang lebih sistematis dan terstruktur mengenai hasil penelitian terdahulu, diperlukan penyajian ringkas yang memuat aspek utama dari setiap kajian. Penyajian ini bertujuan untuk memudahkan dalam menganalisis secara komparatif antar penelitian serta memahami relevansinya terhadap focus review literatur saat ini. Oleh karena itu, ringkasan dari keempat penelitian yang telah dibahas sebelumnya disajikan dalam Tabel 3 berikut.

Dari ringkasan pada Tabel 3 terlihat bahwa setiap perangkat lunak berbasis metode elemen hingga memiliki keunggulan dan orientasi penggunaan yang berbeda. SAP2000 dan ETABS terbukti efektif dalam analisis struktur bangunan gedung terutama untuk mengevaluasi kinerja terhadap beban gravitasi dan gempa, sementara ANSYS dan ABAQUS lebih banyak digunakan pada analisis dengan kompleksitas tinggi seperti beban termal, mekanis, maupun kondisi ekstrem ledakan.

5. Kesimpulan dan Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya dapat berfokus pada perbandingan benchmarking antara ANSYS dan ABAQUS dalam kasus nonlinier geometrik yang sama, untuk mengidentifikasi perbedaan akurasi dan efisiensi komputasi. Penelitian lanjutan juga dapat mengeksplorasi integrasi perangkat lunak FEM dengan teknologi BIM (Building Information Modeling) untuk meningkatkan interoperabilitas antara desain arsitektur dan analisis struktural.

Table 3. Ringkasan Hasil Penelitian Terdahulu

Nama Penulis	Judul Artikel	Metode	Tujuan	Hasil & Pembahasan
Iman, Nelfia, and Manurung (2023)	Analisis kekuatan rangka atap baja 2D dengan SAP2000 & DSM	SAP2000 vs DSM	Membandingkan hasil displacement dan gaya batang	Perbedaan hasil $0,31 - 22\%$ akibat perbedaan pemilihan profil
Jain and Ambarkar (2023)	Time History Analysis of RCC Building Using ETABS	ETABS, analisis time history	Menilai respons seismik gedung RCC 12 lantai	Terjadi peningkatan displacement, shear, dan drift pada intensitas gempa lebih tinggi
Sateesh (2024)	Thermal and Structural Analysis of Piston by ANSYS	ANSYS, analisis termal & struktural	Membandingkan material piston (Al A380 vs Al-Graphite MMC)	Piston MMC lebih ringan ($-9,16\%$), deformasi lebih kecil, dan konduktivitas lebih baik
Rahimi (2015)	Evaluation of Explosion Loading Effects on Concrete Infrastructures Using ABAQUS	ABAQUS, FEM simulasi ledakan	Mengkaji dampak ledakan pada reservoir beton bertulang	Tegangan plastis signifikan, deformasi terbesar di atap dan sudut, dipengaruhi kondisi tanah

References

Iman, Miftahul, Lisa Okri Nelfia, and Edison Hatoguan Manurung. 2023. Analisis kekuatan struktur rangka baja atap menggunakan metode elemen hingga 2d. *Indonesian Journal Of Construction Engineering and Sustainable Development (CESD)* 6, no. 2 (December). https://doi.org/10.54732/i.v1i1.1007.

Jain, Niket V, and Swati Ambarkar. 2023. Time history analysis of rcc building using etabs software. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science* 5, no. 7 (July). https://doi.org/10.56726/IRJMETS43279.

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.

Premono, Agung, Ahmad Kholil, Hidayat Hidayat, and Dendy Saputra. 2022. Pengembangan perangkat lunak elemen hingga untuk keperluan pendidikan. *Semesta Teknika* 25, no. 1 (April): 1–7. https://doi.org/10.18196/st.v25i1.13632.

Rahimi, Abolfazl. 2015. Evaluation of explosion loading effects on concrete infrastructures using abaqus software. *International Journal of Engineering & Technology* 4 (1): 161.

Sateesh, Nallapu. 2024. Thermal and structural analysis of piston by ansys. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences (IJIES)* 11, no. 12 (December). https://doi.org/10.35940/ijies.B1010.11121224.

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.

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.

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.