

Pengembangan Perangkat Lunak Elemen Hingga untuk Keperluan Pendidikan

Development of a Finite Element Software for Educational Purposes

Agung Premono^{1*}, Ahmad Kholil¹, Hidayat², Dendy Saputra²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta, Indonesia.

² Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta, Indonesia.

*Corresponding author email: agung-premono@unj.ac.id



Kata Kunci:

metode elemen hingga;
pengembangan perangkat
lunak; truss; elemen
aksisimetri.

Keywords:

*finite element method;
software development;
truss; axisymmetric
element*

Abstrak

Metode elemen hingga adalah salah satu mata kuliah wajib pada hampir seluruh jurusan Teknik Mesin di Indonesia. Pembelajaran mata kuliah ini biasanya dibantu menggunakan perangkat lunak komersial. Tetapi, penggunaan perangkat lunak komersial menyebabkan mahasiswa hanya memahami bagaimana menggunakan perangkat lunak tanpa memahami persamaan matematika dan bagaimana proses penyelesaiannya. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan perangkat lunak yang memungkinkan mahasiswa tetap memahami prosedur penyelesaian secara matematika dalam menyelesaikan sebuah masalah. Pengembangan perangkat lunak dilakukan dengan bahasa pemrograman MATLAB. Elemen truss dan aksisimetri digunakan sebagai contoh untuk implementasi pengembangan perangkat lunak. Hasil perhitungan perangkat lunak divalidasi dengan hasil perhitungan yang dilakukan dengan perangkat lunak LISA. Hasil validasi menunjukkan bahwa hasil perhitungan perangkat lunak yang dikembangkan memiliki tingkat kesalahan dibawah 1% dibandingkan dengan hasil perhitungan perangkat lunak LISA. Dengan demikian maka perangkat lunak hasil pengembangan telah bekerja dengan benar.

Abstract

Finite element method is one of compulsory subjects in almost all mechanical engineering departments in Indonesia. Learning this course is usually assisted by a commercial software. However, the use of finite the commercial software can cause students know how to use the software but do not understand the equations of solving the problem. Many features in such commercial software are easy to use without knowing its theoretical background. The objective of this research is to develop a finite element software. This software allows students to understand mathematical procedures for solving engineering cases using the finite element software. This research is a software development using MatLab programming language. Truss and axisymmetric elements are used as an example to implement the results mathematically. Calculation results were validated using the LISA software. The results show that the developed software being developed has produced valid numbers compared to those of LISA software with an error of less than 1%.

PENDAHULUAN

Metode Elemen Hingga (MEH) merupakan suatu metode numerik yang sudah banyak digunakan untuk penyelesaian masalah *engineering* ada berbagai bidang seperti permasalahan mekanika benda padat untuk menentukan tegangan, mekanika fluida untuk mencari pola aliran, mencari distribusi temperature pada kasus konduksi panas, serta masih banyak fenomena lain yang dapat diselesaikan dengan MEH (Isworu, H., & Ansyah, 2018). Atas dasar inilah maka MEH menjadi mata kuliah wajib bagi mahasiswa Teknik Mesin di Universitas Negeri Jakarta (Luddin, 2016).

Aplikasi MEH dalam berbagai bidang ini tidak terlepas dari perkembangan teknologi informasi yang memungkinkan analisis MEH dilakukan dengan bantuan komputer. ANSYS, SIMSCALE, COMSOL, dan beberapa perangkat lunak komersial lain yang sudah biasa digunakan untuk menganalisis berbagai kasus teknik berbasis MEH (*Top 10 Finite Element Analysis Softwares Used By Engineers*, n.d.).

Dari beberapa perangkat lunak di atas, ada yang diajarkan bagi mahasiswa supaya pada saat mahasiswa lulus sudah memiliki kompetensi penguasaan MEH dengan bantuan perangkat lunak. Dalam perkembangannya, mahasiswa lebih sering menganalisis kasus teknik dengan bantuan perangkat lunak dibandingkan secara teoritis matematika. Kondisi ini menyebabkan mahasiswa kurang memahami alur penyelesaian kasus menggunakan metode elemen hingga secara matematis karena pemakai hanya diberikan akses menggunakan perangkat lunak dengan fitur yang sudah disediakan tanpa tahu proses penghitungan yang terdapat dalam perangkat lunak tersebut.

Penelitian ini ditujukan untuk mengembangkan perangkat lunak MEH yang dapat digunakan oleh mahasiswa untuk menganalisis kasus teknik menggunakan komputer dan juga memahami alur penyelesaian dari perangkat lunak tersebut. Pengembangan aplikasi ini juga ditujukan agar pemakai memahami perhitungan analisis metode elemen hingga yang juga diaplikasikan pada *commercial software*. Beberapa peneliti sebelumnya juga telah mengembangkan *software* sejenis baik untuk kasus analisis mekanika benda padat (Pratama et al., 2020), struktur batang (Adha et al., 2019), struktur truss (Satria, 2009), struktur cangkang (Dolu & Hasan, 2010) perpindahan panas (Hanifah et al., 2019), dan struktur berbentuk silinder yang dimodelkan menjadi elemen *axisymmetric* (Ferreira, 2019).

Perangkat lunak ini dikembangkan dengan perangkat lunak MATLAB. Pemilihan MATLAB merujuk kepada beberapa kemudahan MATLAB untuk pemrograman MEH (Mueller, 2005). Truss dan elemen *axisymmetric* dua dimensi menjadi studi yang dijadikan sampel dalam perhitungan teknik pengembangan perangkat lunak ini. Hasil perhitungan luaran perangkat lunak divalidasi dengan perhitungan yang dihasilkan dari perangkat lunak LISA 8.0 (LISA 8.0.0, n.d.)

METODE PENELITIAN

Metode penyelesaian MEH yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode langsung dengan pendekatan metode perpindahan nodal (*the displacement method*). Metode ini lebih sering digunakan karena lebih sederhana untuk penyelesaian permasalahan mekanika benda padat atau analisis struktur. Seluruh alur penyelesaian dalam penelitian ini mengacu pada buku MEH (Logan, 2007). Persamaan dasar yang digunakan dalam pendekatan perpindahan nodal dalam MEH adalah:

$$F = k \cdot x \tag{1}$$

dengan: F = gaya luar (N), x = perpindahan nodal dan k = matrik kekakuan elemen. Untuk struktur batang dua dimensi, nilai k dapat dihitung dengan persamaan dasar:

$$K = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} C^2 & CS & -C^2 & -CS \\ CS & S^2 & -CS & -S^2 \\ -C^2 & -CS & C^2 & CS \\ -CS & -S^2 & CS & S^2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

dengan: A = luas penampang (m^2), E = modulus elastisitas (N/m^2), dan L = panjang benda (m), $C = \cos \theta$, $S = \sin \theta$, dengan θ = sudut kemiringan batang terhadap sumbu x positif. Dalam pendekatan perpindahan nodal, variable x (perpindahan nodal) diperoleh pertama kali dari hasil perhitungan. Perhitungan selanjutnya adalah mencari nilai regangan menggunakan persamaan:

$$\varepsilon = (L' - L_0)/L_0 \tag{3}$$

dengan: L' : panjang batang akhir (m) dan L_0 : panjang batang mula-mula (m). Regangan yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung tegangan menggunakan persamaan:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

dengan: σ : tegangan normal.

Dalam kasus truss dua dimensi, persamaan (4) menjadi:

$$\sigma = E \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} \quad (5)$$

dengan: u_i dan v_i adalah koordinat titik pangkal batang pada sumbu x dan y , dan u_j dan v_j adalah koordinat titik ujung batang pada sumbu x dan y .

Sedangkan untuk elemen *axisymmetric* dengan kondisi *plane stress*, persamaan (4) menjadi:

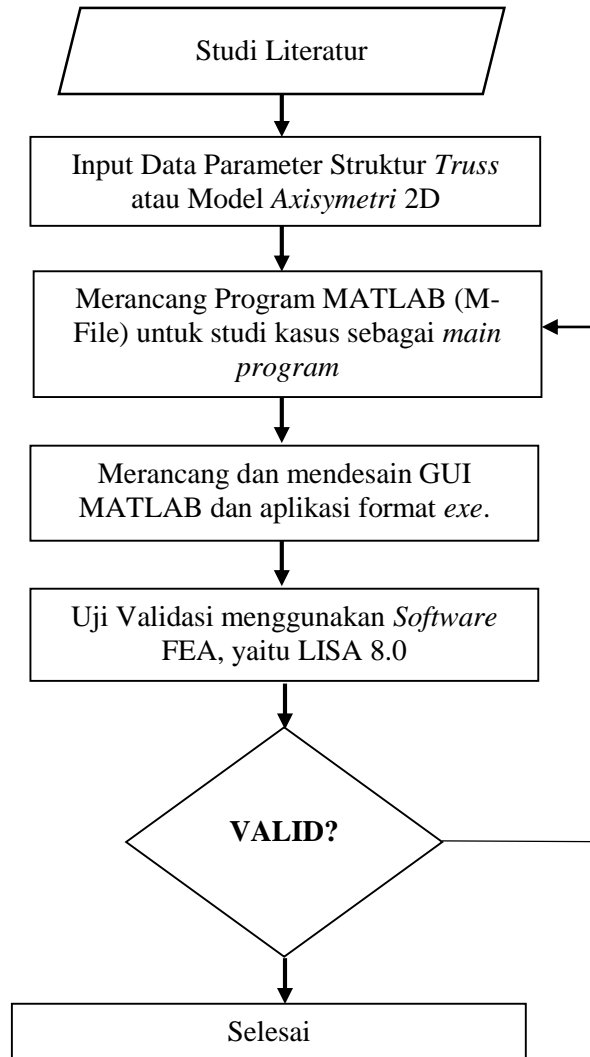
$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

dengan: ν = rasio Poisson; ε_r = regangan arah radial; ε_z = regangan arah sumbu-z; ε_θ = regangan arah tangensial.

Adapun tahapan metode elemen hingga menggunakan metode langsung melalui pendekatan perpindahan titik nodal adalah sebagai berikut.

1. Membagi domain menjadi sub-domain dan pemilihan tipe elemen;
2. Memilih fungsi perpindahan yang dalam setiap elemen;
3. Mendefinisikan hubungan perpindahan-regangan dan regangan-tegangan;
4. Membangun matrik kekakuan elemen;
5. Menyusun matrik kekakuan global untuk memperoleh persamaan keseluruhan elemen dan menerapkan kondisi batas;
6. Menyelesaikan persamaan dasar untuk memperoleh nilai perpindahan;
7. Mencari nilai regangan dan tegangan untuk setiap elemen;
8. Menginterpretasikan hasil.

Pengembangan perangkat lunak dalam penelitian ini dilakukan dengan bahasa pemrograman MATLAB mengacu kepada tahapan di atas serta persamaan (1) sampai dengan (6). Diagram alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Validasi hasil perhitungan MEH pada perangkat lunak baru hasil pengembangan menggunakan perangkat lunak LISA.



Gambar 1. Alur Penelitian

Adapun kasus yang digunakan dalam pengujian adalah permasalahan truss dan axisymmetri dua dimensi. Truss pada pengujian menggunakan *Warren Truss Bridge* sedangkan elemen axisymetri dengan pelat pada tabung yang terkena beban tekan merata pada bagian dalam tabung.

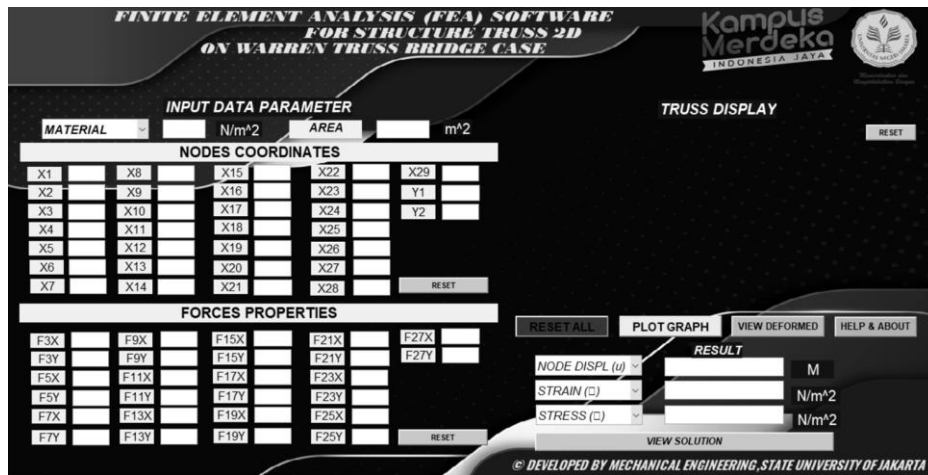
Elemen yang digunakan pada struktur truss adalah batang persegi dua dimensi dengan tumpuan menggunakan tumpuan pin (baut). Setiap node memiliki dua derajat kebebasan yaitu pergeseran arah x dan y tanpa ada momen ataupun rotasi. Sementara untuk elemen aksisimetri pada bagian irisan tabung menggunakan pelat tipis (*shell*) dua dimensi dengan tumpuan jepit. Hasil perhitungan yang ditampilkan adalah displacement (perpindahan nodal) untuk setiap nodal dan tegangan serta regangan untuk setiap elemen.

Pengujian aplikasi MEH untuk kasus truss dilakukan dengan menggunakan pembebanan statis dengan gaya sebesar 2 kN ke arah sumbu y negative pada semua nodal bagian bawah (lantai) truss tersebut. Material yang digunakan adalah baja dengan modulus elastitas (E) = 200 GPa , $\nu = 0,3$ luas area penampang batang (A) = $0,0025\text{ m}^2$. Material yang digunakan pada elemen *axisymmetric* sama seperti truss dengan dimensi tabung adalah jari-jari dalam sebesar $0,025\text{ m}$, jari-jari luar $0,075\text{ m}$, dengan tinggi tabung $0,1016\text{ m}$. Tekanan yang diberikan pada bagian dalam tabung sebesar 1000 Pa ke arah positif sumbu x positif.

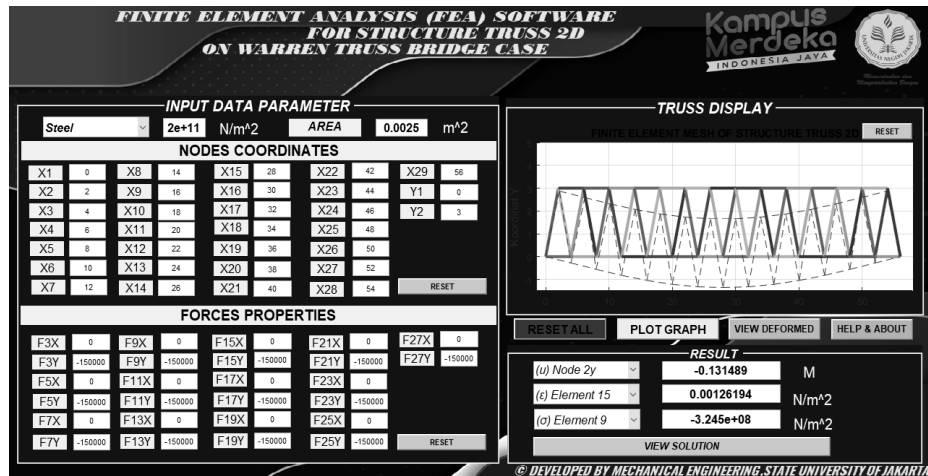
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengembangan perangkat lunak MEH terdiri atas dua bagian yaitu *frontend* yang merupakan *interface* antara pengguna dengan bagian pemrosesan (*backend*). Tampilan *frontend* pada aplikasi MEH untuk struktur truss dapat dilihat pada Gambar 2 ketika belum dijalankan dan Gambar 3 setelah diberikan semua masukan dan dijalankan. Sementara itu, untuk kasus elemen *axisymmetric* dapat dilihat pada Gambar 4. Pengguna hanya diminta untuk memasukkan koordinat nodal sebagai pembentuk elemen. Setelah pengguna memasukkan semua informasi yang diperlukan yaitu koordinat nodal, material, tumpuan, dan gaya maka proses selanjutnya adalah perhitungan. Pada aplikasi MEH ini, pengguna cukup menekan tombol yang sudah disediakan dan aplikasi akan memberikan informasi bahwa perhitungan sudah selesai jika semua informasi yang diberikan benar. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5 tentang diagram alir penggunaan aplikasi.

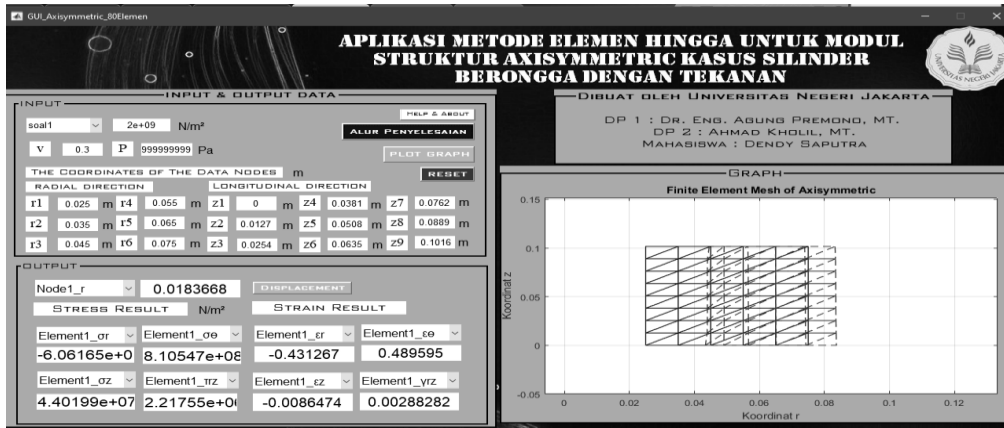
Hasil simulasi dengan perangkat lunak hasil penelitian maupun LISA dirangkum pada Tabel 1. Data menunjukkan bahwa tingkat perbedaan perhitungan yang diperoleh dari perangkat lunak hasil penelitian sangat kecil dibandingkan dengan perhitungan yang dihasilkan perangkat lunak LISA. Tingkat kesalahan yang dihasilkan rata-rata di bawah 1%. Dengan demikian aplikasi yang dikembangkan sudah memenuhi persyaratan perhitungan MEH.



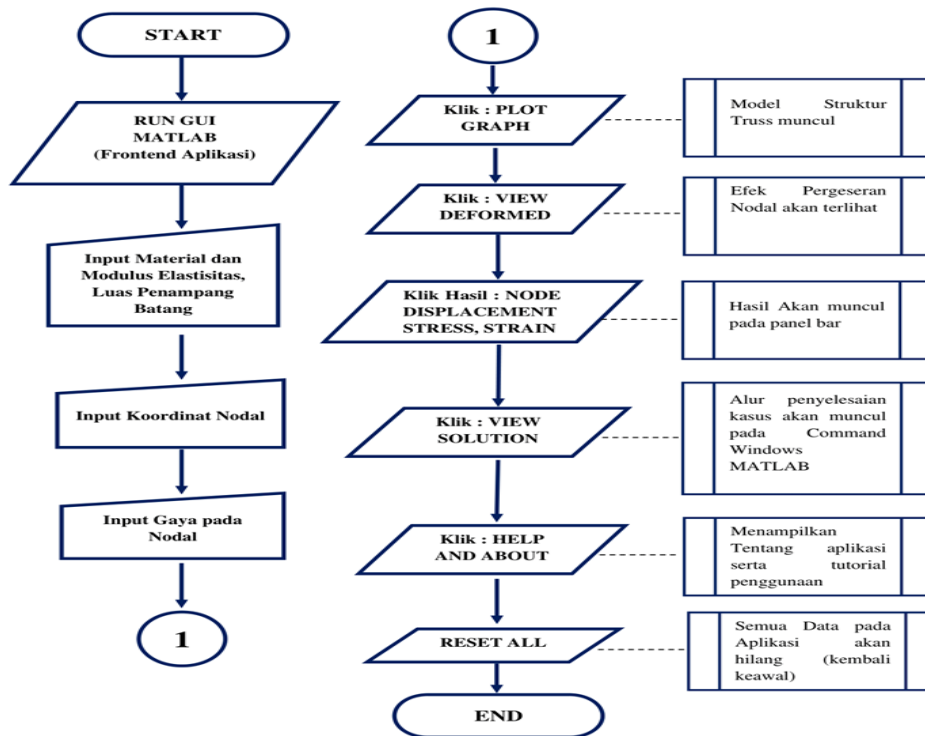
Gambar 2. Tampilan perangkat lunak MEH struktur truss sebelum dijalankan



Gambar 3. Tampilan perangkat lunak MEH struktur truss setelah dijalankan



Gambar 4. Tampilan perangkat lunak MEH struktur elemen aksisimetri setelah dijalankan



Gambar 5. Diagram alir penggunaan perangkat lunak MEH

Tabel 1. Validasi hasil perhitungan antara perangkat lunak MEH hasil penelitian dengan perangkat lunak LISA

No.	Parameter	Hasil Penelitian	Hasil dari LISA	Selisih (% LISA)
1	TRUSS			
	a. Tegangan maksimal (N/m ²)	4,81 x 10 ⁵	4,80 x 10 ⁵	0,21 %
	b. Regangan maksimal	4.27 x 10 ⁻⁵	4.27 x 10 ⁻⁵	0
	c. Perpindahan nodal maksimal (<i>displacement</i>) (m)	0,002427	0,002426	0,041%
2	ELEMEN AKSISIMETRI			
	a. Tegangan maksimal (N/m ²)	1,093 x 10 ³	1,093 x 10 ³	0 %
	b. Regangan maksimal	8,7561 x 10 ⁻¹⁰	8,7559 x 10 ⁻¹⁰	0,002 %
	c. Perpindahan nodal maksimal (<i>displacement</i>) (m)	2,33586 x 10 ⁻¹⁰	2,33587 x 10 ⁻¹⁰	0 %

KESIMPULAN

Aplikasi perangkat lunak MEH pada kasus truss dan elemen aksisimetri berhasil dikembangkan dengan tingkat kesalahan perhitungan dibawah 1%. Tampilan aplikasi meliputi fitur masukan (*input*) dan luaran (*output*) telah dapat ditampilkan dan digunakan secara mudah. Hasil ini menunjukkan bahwa aplikasi ini sudah dapat digunakan sebagai alat bantu pembelajaran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Jakarta yang telah mendanai penelitian pengembangan aplikasi pembelajaran MEH melalui hibah penelitian BLU dengan kontrak Nomor 482/SP/2017 tertanggal 5 Mei 2017.

REFERENSI

- Adha, A. N., Abdi, F. N., & Sutanto, H. (2019). Analisis struktur rangka batang 2d dengan metode matriks kekakuan menggunakan aplikasi matlab. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Sipil*, 3(2), 15–18.
- Dolu, A., & Hasan, H. (2010). Metode elemen hingga dengan program matlab dan aplikasi Sap 2000 untuk analisis struktur cangkang. *SMARTek*, 8(2), 153–168.
- Ferreira, T. (2019). *Numerical Analysis of Axisymmetric Solids by the Finite Element Method: Use in Concrete, Steel and Mixed Steel-Concrete Elements, Numerical Analysis of Axisymmetric Solids by the Finite Element Method Use in Concrete, Steel and Mixed Steel-Concrete Elemen*. https://www.scipedia.com/public/Ferreira_2019a
- Hanifah, M. A., Premono, A., & Sukarno, R. (2019). Pengembangan alat bantu pembelajaran analisis metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak Matlab untuk kasus perpindahan panas pada batang satu dimensi. *Seminar Nasional Efisiensi Energi Untuk Peningkatan Daya Saing Industri Manufaktur & Otomotif Nasional (SNEEMO) 2019*, (pp.12–15).
- Iswordo, H., & Ansyah, P. R. (2018). *Metode elemen hingga*. Universitas Lambung Mangkurat.
- LISA 8.0.0. (n.d.). <https://www.lisafea.com/index.html>
- Logan, D. L. (2007). *A first course in the finite element method* (Fourth Edition). Thomson.
- Luddin, M. R. (2016). *Buku pedoman akademik 2016/2017 Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta*. Universitas Negeri Jakarta.
- Mueller, D. W. J. (2005). An introduction to the finite element method using MATLAB. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 33(3), 260–277. <https://doi.org/10.7227%2FIJMEE.33.3.8>
- Pratama, A., Premono, A., & Syaefudin, E. A. (2020). Pengembangan alat bantu media pembelajaran metode elemen hingga untuk kasus mekanika benda padat 2 dimensi | Pratama | KoPeN: Konferensi Pendidikan Nasional, (pp.24-27) http://ejurnal.mercubuana-yogya.ac.id/index.php/Prosiding_KoPeN/article/view/1072.
- Satria, A. (2009). *Aplikasi program metode elemen hingga pada rangka ruang (space truss) dengan program Matlab*, Tugas Akhir, Universitas Sumatera Utara.
- Top 10 Finite Element Analysis Softwares Used By Engineers*. (n.d.). Retrieved October 1, 2021, from <https://mechanicalbase.com/top-10-finite-element-analysis-software-used-by-engineers/>.