

Aplikasi Metode Elemen Hingga untuk Penyelesaian Persamaan Diferensial Parsial dalam Rekayasa Struktur dan Material

Lailatul Hoyali¹, Mahsup², Abdillah³, Syaharuddin⁴

^{1,2,3,4}Prodi Pendidikan Matematika, Universitas Muhammadiyah Mataram, Indonesia

Lailatuhoyali07@gmail.com¹, mahsup.math@gmail.com², abdillahahmad24041983@gmail.com³, syaharuddin.ntb@gmail.com⁴

Keywords:

Finite Element Method (FEM),
Partial Differential Equations (PDEs),
Structural Engineering,
Materials Engineering.

Abstract: A systematic literature review sourced from Google Scholar, DOAJ, and Scopus publications between 2014 to 2024 examined the application of Finite Element Method (FEM) for solving Partial Differential Equations (PDEs) in structural and material engineering. The review highlighted a comparative analysis between Maximum Entropy Method (MEH) without meshes and FEM, revealing complementary yet distinct approaches. FEM, particularly through Domain Decomposition Method (DDM), demonstrated effectiveness in enhancing analysis accuracy for complex scenarios such as seismic responses and structural component behavior. Conversely, MEH stood out for its focus on energy relaxation and its ability to delve into microstructure-property relationships crucial for tailored material development. This synthesis underscores the diverse strengths of both numerical methods in advancing engineering solutions and material innovations.

Kata Kunci:

Metode Elemen Hingga (FEM),
Persamaan Diferensial Parsial (PDP),
Rekayasa Struktur,
Material,

Abstrak: Sebuah tinjauan literatur sistematis yang menggunakan sumber dari Google Scholar, DOAJ, dan Scopus pada periode 2014-2024 telah menginvestigasi aplikasi Metode Elemen Hingga (FEM) untuk menyelesaikan Persamaan Diferensial Parsial (PDP) dalam bidang rekayasa struktur dan material. Tinjauan ini menyoroti analisis perbandingan antara Metode Entropi Maksimum (MEH) tanpa jala dengan FEM, yang mengungkapkan pendekatan yang komplementer namun berbeda secara signifikan. FEM, khususnya melalui Metode Dekomposisi Domain (DDM), terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi analisis untuk situasi kompleks seperti respons terhadap gempa dan perilaku komponen struktural. Di sisi lain, MEH menonjol karena fokusnya pada relaksasi energi dan kemampuannya untuk memahami hubungan mikrostruktur dan sifat material yang sangat penting dalam pengembangan material yang disesuaikan. Tinjauan ini menegaskan kekuatan beragam dari kedua metode numerik tersebut dalam mengembangkan solusi rekayasa dan inovasi material.

Article History:

Received: 19-08-2024

Online : 20-08-2024



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



A. LATAR BELAKANG

Metode Elemen Hingga (MEH) adalah pendekatan utama dalam bidang rekayasa untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial (PDP) secara numerik (Chairunnisa et al., 2023). Dengan MEH, domain analisis dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung, memungkinkan pemodelan yang akurat terhadap fenomena fisik seperti distribusi tegangan, deformasi struktural, dan perpindahan panas (Prayogo, 2015). Dimulai sejak pertengahan abad ke-20, MEH dikembangkan sebagai solusi yang lebih efektif untuk masalah rekayasa yang semakin kompleks, terutama dengan kemajuan teknologi komputer yang mendukung simulasi numerik yang lebih maju. Keunggulan MEH terletak pada fleksibilitasnya dalam menangani geometri yang

kompleks dan variasi kondisi batas, menjadikannya fondasi utama untuk inovasi dalam desain produk dan pengembangan material di berbagai industri teknologi modern.

Penerapan Metode Elemen Hingga (MEH) dalam analisis kekuatan struktur telah terbukti sangat efektif dalam berbagai bidang rekayasa (Rahmawati, 2019). Sebagai contoh, dalam desain jembatan modern, MEH memungkinkan insinyur untuk memodelkan setiap komponen struktural secara detail. Dengan membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung, MEH dapat menghitung dengan akurat distribusi tegangan, deformasi, dan respons struktural di titik-titik kritis. Pendekatan ini tidak hanya membantu meramalkan kekuatan total struktur, tetapi juga memfasilitasi evaluasi terhadap kondisi batas seperti beban dinamis dan lingkungan (Amalia et al., 2023). Studi kasus dalam penerapan MEH pada jembatan telah berhasil mengoptimalkan desain untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, serta mengurangi biaya dan waktu pengembangan konstruksi (Azhar & Kristiyono, 2019). Dengan demikian, MEH menjadi alat penting dalam menganalisis kekuatan struktural kompleks dan berkontribusi besar dalam kemajuan rekayasa infrastruktur.

Metode Elemen Hingga (MEH) berperan penting dalam analisis sifat-sifat material dalam rekayasa (SAPUTRA, 2022). MEH memungkinkan untuk memprediksi respons material terhadap berbagai kondisi beban dan lingkungan melalui simulasi numerik. Contohnya, dalam pengujian kekuatan material, MEH dapat mensimulasikan distribusi tegangan dan deformasi pada skala mikrostruktur, memberikan pemahaman tentang perilaku material di tingkat atomik atau sub-mikro. Selain itu, MEH juga digunakan dalam pengembangan material baru dan peningkatan kualitas material yang ada dengan memperkirakan kinerja material dalam berbagai situasi operasional (ABDILLAH, 2020). Studi kasus menunjukkan bahwa MEH tidak hanya meningkatkan pemahaman tentang sifat mekanis, termal, dan reologi material, tetapi juga mendukung perancangan komponen yang lebih optimal dengan mempertimbangkan interaksi material dengan lingkungannya. Dengan demikian, MEH berperan penting dalam analisis material dalam rekayasa modern dan mendukung inovasi material yang lebih lanjut (Umi Sholikati, 2019).

Pengembangan pendekatan komputasi yang efektif untuk menangani masalah kompleks, seperti memaksimalkan pengaruh dalam jaringan (Liu et al., 2024), pemodelan sifat konstitutif jaringan lunak dalam simulasi biomekanik (Zhang et al., 2019), pengobatan lintas-diagnostik untuk PTSD dan gangguan psikopatologis yang berkaitan dengan trauma (Gutner & Presseau, 2019), optimisasi parameter dalam pembangkit listrik termal (Kler et al., 2016) yang berkelanjutan, serta perhitungan jumlah reproduksi dasar dalam model epidemi (Yang & Xu, 2019), sangatlah penting dalam berbagai bidang. Pendekatan ini melibatkan penggunaan teknik-teknik mutakhir seperti pembelajaran penguatan dalam-dalam, model konstitutif yang efektif, pendekatan pengobatan lintas-diagnostik, optimisasi berbasis solusi akhir, dan formulasi eksplisit untuk mengevaluasi jumlah reproduksi dasar. Dengan memanfaatkan metode komputasi ini, para peneliti dapat meningkatkan kualitas solusi, meningkatkan efisiensi komputasi, mengatasi berbagai tantangan yang ada, serta mencapai kinerja yang unggul dalam menyelesaikan permasalahan kompleks di berbagai bidang.

Beberapa penelitian terbaru telah menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH) dalam menganalisis sifat-sifat struktural dan material. (Abbas et al., 2020) menerapkan MEH untuk merancang dan mengevaluasi kekuatan rangkaian ruang tabung sebagai sasis mobil listrik, sedangkan (Zainur Rahman et al., 2022) menggunakannya untuk menganalisis kinerja batang penghubung yang terbuat dari baja paduan. (Kurniawan et al., 2022) memanfaatkan MEH untuk mengevaluasi perilaku sleeper beton pra-tegang dalam rel kereta api, dan (Agustinus & Lesmana, 2019) melakukan perbandingan efektivitas berbagai metode penguatan untuk pelat lantai. Studi-studi ini secara bersama-sama menunjukkan keluwesan dan keefektifan MEH dalam berbagai aplikasi rekayasa.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan materi dan alat pengajaran yang relevan untuk Pendidikan Matematika, Fisika, dan Teknik. (Effendi et al., 2021) dan (Chandra & Hidayati, 2023) masing-masing fokus pada pengembangan Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) Matematika dengan pendekatan yang berbeda, di mana Effendi menggunakan metode Pembelajaran Berbasis Masalah dan Chandra mengadopsi pendekatan Pendidikan Matematika Realistik. Sementara itu,

(Muslim et al., 2020) dan (Sabaryati & Isnaini, 2018) berkonsentrasi pada pengembangan modul praktis untuk Pendidikan Fisika serta media pembelajaran berbasis komputer untuk Pendidikan Teknik. Studi-studi ini menunjukkan bahwa produk-produk yang dikembangkan memiliki kevalidan dan kepraktisan yang baik, dan terbukti efektif dalam meningkatkan pembelajaran mahasiswa, khususnya dalam memperkuat karakter ilmiah mereka. Dengan demikian, penelitian-penelitian ini secara keseluruhan berkontribusi signifikan dalam pengembangan kurikulum dan pengajaran di bidang Pendidikan Matematika, Fisika, dan Teknik.

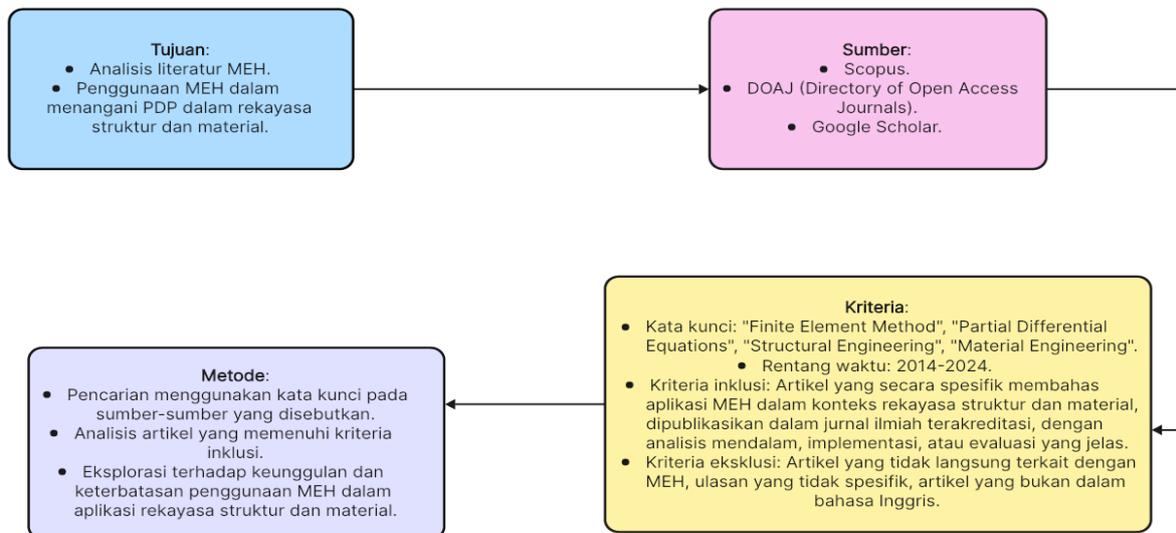
Melalui tinjauan literatur, teridentifikasi beberapa kesenjangan dalam penggunaan Metode Elemen Hingga (MEH) untuk menyelesaikan Persamaan Diferensial Parsial (PDP) dalam rekayasa struktur dan material. Meskipun MEH efektif dalam menganalisis sifat-sifat struktural dan material, perlu peningkatan integrasi dengan pemodelan sifat konstitutif material, terutama dalam simulasi biomekanik. Pentingnya penerapan MEH dalam optimisasi parameter pembangkit listrik termal yang berkelanjutan juga perlu ditekankan untuk meningkatkan efisiensi solusi. Di sisi pendidikan Matematika, Fisika, dan Teknik, pengembangan bahan ajar efektif berhasil, namun kurangnya integrasi MEH dalam pengembangan alat pembelajaran yang memperkuat keterampilan praktis mahasiswa tetap menjadi tantangan. Penelitian ini bertujuan mengintegrasikan MEH dalam pemodelan sifat konstitutif material dan strategi optimisasi parameter untuk meningkatkan aplikasi MEH dalam menyelesaikan PDP serta mendukung pendidikan teknik dan ilmu pengetahuan.

B. METODE

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis sistematis terhadap literatur mengenai penggunaan Metode Elemen Hingga (MEH) dalam menangani Persamaan Diferensial Parsial (PDP) dalam konteks rekayasa struktur dan material. Fokusnya adalah untuk mengidentifikasi pendekatan-pendekatan yang berbeda, teknik aplikasi yang digunakan, serta hasil-hasil dari studi yang telah dilakukan menggunakan MEH. Tujuan utama penelitian ini juga mencakup eksplorasi terhadap keunggulan dan keterbatasan dari penggunaan MEH dalam aplikasi rekayasa tersebut.

Pencarian literatur dilakukan melalui basis data ilmiah terkemuka seperti Scopus, DOAJ, dan Google Scholar dengan menggunakan kata kunci yang relevan seperti "Finite Element Method", "Partial Differential Equations", "Structural Engineering", dan "Material Engineering". Rentang waktu pencarian artikel berkisar dari tahun 2014 hingga 2024 untuk memastikan keterkaitan dengan penelitian terkini dan relevan dalam bidang ini.

Kriteria inklusi yang digunakan meliputi artikel-artikel yang secara spesifik membahas aplikasi MEH dalam menyelesaikan PDP dalam konteks rekayasa struktur dan material, yang dipublikasikan dalam jurnal ilmiah terakreditasi. Artinya, artikel-artikel tersebut harus memberikan analisis mendalam, implementasi, atau evaluasi yang jelas terkait penerapan MEH. Sementara itu, artikel yang tidak langsung terkait dengan MEH, ulasan yang tidak spesifik, serta artikel yang bukan dalam bahasa Inggris dikecualikan dari penelitian ini.



Gambar 1. Flow Chart Prosedur Penelitian

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berbagai penelitian telah menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam penggunaan Metode Elemen Terbatas (FEM) dan Metode Entropi Maksimum tanpa Jala (MEH) dalam rekayasa struktural dan material. FEM, seperti yang ditunjukkan oleh Liang (2022), Soloviev & Kirichevsky (2022), dan Ureña et al. (2023), telah terbukti efektif dalam menangani Persamaan Diferensial Parsial (PDP) yang kompleks, memungkinkan analisis yang akurat terhadap gaya struktural, perpindahan, dan respons terhadap beban mekanis. Sementara itu, MEH, seperti yang diamati dalam penelitian ALDIYAH (2021) dan Sekkak & Modares (2019), menawarkan pendekatan inovatif dalam analisis energi santai struktural, yang memperkuat pengembangan material dengan integrasi teknologi canggih.

Tabel 1. Perbandingan Kontribusi Penelitian Metode Numerik dalam Rekayasa Struktural dan Material

No	Bidang atau Fokus	Nama-nama Penulis yang se-Bidang	Insight atau Variabel Riset
1	Metode Elemen Terbatas (FEM) dalam Rekayasa Struktural	Liang (2022), Soloviev & Kirichevsky (2022), Ureña et al. (2023), Abbas et al. (2020), Nasution (2019), Harahap (2020), Agustinus & Lesmana (2019), Kurniawan et al. (2022), Zainur Rahman et al. (2022)	FEM digunakan untuk menyelesaikan PDE kompleks dengan akurasi tinggi dalam analisis gaya struktural, perpindahan, dan respons terhadap beban seperti gempa atau beban mekanis lainnya.
2	Penggunaan Metode Elemen Terbatas (FEM) di berbagai konteks rekayasa	Kurniawan et al. (2022), Hamzah (2021), Nasution (2019), Abbas et al. (2020)	FEM efektif dalam analisis bantalan rel, struktur grid, respons gempa pada bangunan, dan desain rangka tabung untuk aplikasi otomotif.
3	Penyelesaian PDP menggunakan metode matematis dan pembelajaran mesin	Abuasbeh et al. (2023), Sheta et al. (2022), Kausar et al. (2022), Tiwari & Bhatnagar (2021), Fernandez-Zelaia et al.	Penggunaan fungsi Mittag-Leffler, jaringan saraf, dan teknik pembelajaran mendalam untuk menyelesaikan PDP dalam berbagai konteks fisika,

			menghasilkan model dan solusi numerik yang efisien dan akurat.
4	Pengembangan teknik struktural dan material dengan MEH	ALDIYAH (2021), Hardanti et al. (2024), Sekkak & Modares (2019), SAVRUKOĞLU & ASLANTAS (2023)	MEH menunjukkan potensi dalam integrasi dengan teknologi canggih untuk analisis struktural dan pengembangan material, meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam menyelesaikan PDP.

Hasil-hasil penelitian ini secara komprehensif menggambarkan berbagai aplikasi dan kemampuan FEM serta MEH dalam konteks rekayasa modern. Penelitian-penelitian tersebut mencakup analisis struktural yang mendalam seperti respons terhadap gempa dan analisis bantalan rel, serta pendekatan baru dalam menyelesaikan PDP dengan teknik pembelajaran mesin dan matematis. Ini menunjukkan pentingnya pengembangan metode numerik untuk mengatasi tantangan kompleks dalam pemodelan dan simulasi di bidang rekayasa struktural dan material, dengan fokus pada akurasi, efisiensi, dan adaptabilitas terhadap berbagai scenario teknis.

1. Aplikasi Metode Elemen Hingga (MEH) Telah Dikembangkan dan Digunakan dalam Penyelesaian Persamaan Diferensial Parsial (PDP) dalam Konteks Rekayasa Struktur

Metode Elemen Terbatas (FEM) telah banyak digunakan dalam rekayasa struktural untuk menyelesaikan Persamaan Diferensial Parsial (PDE) karena kemampuannya dalam memberikan solusi yang akurat untuk masalah-masalah yang kompleks (Liang, 2022). FEM melibatkan memecah domain kontinu menjadi elemen-elemen terbatas untuk mendekati solusi dari serangkaian PDE secara simultan, menjadikannya alat yang berharga dalam menganalisis gaya struktural dan perpindahan dengan tingkat keakuratan yang tinggi (Soloviev & Kirichevsky, 2022). Metode ini telah memainkan peran yang penting dalam berbagai bidang, termasuk mekanika salju, di mana telah digunakan selama beberapa dekade untuk menganalisis tekanan di atas salju dan sistem mekanis lainnya (Ureña et al., 2023). Selain itu, FEM telah diterapkan dalam studi struktur yang bersifat periodik, seperti pelat dan cangkang yang diperkuat, yang memberikan wawasan tentang analisis getaran dan perambatan gelombang melalui kisi periodik. Kegunaan dan efektivitas metode ini menjadikannya dasar utama dalam analisis numerik masalah-masalah struktural dalam teknik sipil dan disiplin terkait.

Metode Elemen Hingga (FEM) telah sukses diterapkan dalam berbagai konteks rekayasa, termasuk analisis bantalan trek kereta api (Kurniawan et al., 2022), struktur grid (Hamzah, 2021), respons bangunan multi-lantai terhadap gempa bumi (Nasution, 2019), dan desain serta analisis rangka ruang tabung untuk sasis mobil (Abbas et al., 2020). Studi-studi ini menunjukkan kemampuan FEM yang serbaguna dan efektif dalam menyelesaikan masalah-masalah kompleks dalam rekayasa struktural. Aplikasi MEH dalam penyelesaian PDP dalam konteks rekayasa struktur menunjukkan fleksibilitasnya dalam menangani masalah-masalah yang kompleks. Dengan membagi domain menjadi elemen-elemen terbatas, MEH memungkinkan untuk memodelkan berbagai fenomena fisik seperti gaya struktural, perpindahan, tekanan salju, analisis getaran, dan respons terhadap gempa bumi. Kemampuannya dalam memberikan solusi yang akurat dan terukur membuat MEH menjadi pilihan utama dalam menganalisis perilaku struktur yang kompleks dan sistem mekanis. MEH telah berhasil diterapkan dalam berbagai konteks rekayasa struktural, termasuk analisis bantalan trek kereta api, respons bangunan multi-lantai terhadap gempa bumi, dan desain rangka ruang untuk mobil. Studi-studi ini menunjukkan bahwa MEH tidak hanya efektif dalam menyelesaikan PDP, tetapi juga dalam menghadapi tantangan yang berkaitan dengan dinamika struktural, kondisi lingkungan yang berubah-ubah, dan beban

eksternal yang kompleks. Keakuratannya telah terbukti dalam berbagai aplikasi praktis, menghasilkan solusi yang dapat diandalkan untuk desain dan analisis struktur.

2. Jenis-Jenis Persamaan Diferensial Parsial yang Umumnya Diselesaikan Menggunakan MEH dalam Studi-Studi Yang Telah Ditinjau

Dalam penelitian yang dikaji, berbagai jenis Persamaan Diferensial Parsial (PDP) umumnya diselesaikan dengan menggunakan metode matematis seperti fungsi Mittag-Leffler, pembelajaran mendalam, dan jaringan saraf yang berbasis fisika. Metode-metode ini khususnya diterapkan dalam menyelesaikan PDP yang memodelkan fenomena dalam ilmu pengetahuan dan teknik, seperti Persamaan Navier-Stokes dengan turunan pecahan waktu, deskripsi fisika pada skala yang berbeda, serta sistem alam dan rekayasa yang kompleks. Penggunaan teknik-teknik ini memfasilitasi pengembangan PDP baru, pembentukan model reduksi urutan, dan representasi solusi operator yang efisien untuk berbagai PDP, memudahkan analisis dan solusi numeriknya (Abuasbeh et al., 2023).

Rangkuman penelitian yang telah ditinjau mencakup berbagai topik, mulai dari perbandingan profil analgesia selama persalinan (Lee et al., 2023) hingga eksplorasi Perencanaan Tata Ruang Laut (MSP) beserta tantangannya (Ramadhan & Salim, 2019). Pentingnya pemahaman dan pelaksanaan studi kasus yang tepat ditekankan (Nurahma & Hendriani, 2021), serta pemanfaatan meta-analisis untuk mengidentifikasi gen-gen yang terkait dengan gangguan perkembangan. Keseluruhan studi ini menggambarkan berbagai aplikasi dari tinjauan sistematis dan meta-analisis di berbagai bidang studi.

Penggunaan MEH menunjukkan pendekatan matematis yang kuat untuk menyelesaikan PDP dengan turunan pecahan waktu. Pembelajaran mendalam dan jaringan saraf berbasis fisika mengilustrasikan penerapan teknik modern untuk menghadapi tantangan dalam analisis dan solusi PDP, terutama di bidang yang melibatkan kompleksitas yang tinggi. Kombinasi dari MEH, pembelajaran mendalam, dan jaringan saraf berbasis fisika menunjukkan perkembangan positif dalam pemahaman dan penyelesaian PDP yang kompleks. Namun, kelemahan mungkin terjadi dalam kompleksitas implementasi dan interpretasi hasil yang diperoleh dari metode-metode ini.

3. Keunggulan dan Keterbatasan MEH dalam Memodelkan Perilaku Material dan Struktur dalam Rekayasa

Pemodelan bahan energik multi-skala dengan jaringan saraf membantu dalam mengembangkan struktur mikro stokastik dan hubungan struktur-properti-kinerja untuk bahan energik heterogen dan komposit lainnya (Bonatti & Mohr, 2021). Pengembangan kerangka jaringan saraf berulang, seperti Sel Keadaan Minimal, memungkinkan reproduksi akurat respons tegangan-regangan untuk berbagai jenis material, dapat disesuaikan dengan aplikasi rekayasa (Li et al., 2022). Pemanfaatan bahan elemen multi-utama (MPEM) menyoroti keunggulan mekanik seperti ketangguhan pada suhu rendah, kekuatan tinggi pada suhu tinggi, dan ketahanan terhadap korosi (Roy et al., 2022). Advokasi metode numerik dalam rekayasa kayu memungkinkan pemodelan komprehensif produk dan struktur kayu, memperhatikan sifat mekanik dan stabilitas dimensi elemen kayu (Bader & Ormarsson, 2023). Meskipun memberikan keuntungan dalam memprediksi perilaku material, tantangan utama adalah dalam memprediksi sifat material bahan nano kompleks dengan akurasi, memerlukan pengembangan teknik simulasi multiskala yang lebih handal (Fermeglia et al., 2020).

Penggunaan Metode Elemen Hingga (FEM) dalam bidang rekayasa telah diteliti dalam beberapa studi, masing-masing dengan tantangan dan batasannya sendiri. (Kurniawan et al., 2022) menerapkan FEM untuk menganalisis perilaku bantalan rel kereta api, sementara (Harahap, 2020) menggunakannya untuk mensimulasikan pembebanan pada shakel. (Abbas et al., 2020) menggunakan FEM untuk merancang dan mengevaluasi kekuatan rangka ruang tabung untuk sasis mobil, sedangkan (Agustinus & Lesmana, 2019) membandingkan efektivitas berbagai metode penguatan untuk pelat lantai. Secara bersama-sama, studi-studi ini menyoroti potensi FEM dalam rekayasa, tetapi juga menekankan perlunya penelitian lanjutan untuk mengatasi

keterbatasan-keterbatasannya, seperti kebutuhan akan data yang komprehensif dan potensi biaya yang tinggi.

Keunggulan utama FEM terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan solusi numerik yang akurat untuk berbagai masalah struktural dan material dalam rekayasa. FEM memungkinkan analisis yang detail terhadap respons tegangan-regangan, distribusi beban, dan perilaku kelelahan material. Dengan menggunakan elemen diskrit, FEM dapat memodelkan struktur kompleks dengan tingkat presisi yang tinggi, yang penting untuk desain dan evaluasi kinerja komponen rekayasa. Meskipun memiliki banyak keunggulan, FEM juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah ketergantungan pada data input yang komprehensif dan akurat, seperti properti material dan kondisi batas. Ketidakakuratan dalam data ini dapat mengarah pada hasil yang tidak representatif. Selain itu, aplikasi FEM memerlukan keahlian teknis yang mendalam untuk menyusun model yang tepat dan menginterpretasikan hasilnya dengan benar. Biaya komputasi juga bisa menjadi masalah, terutama untuk simulasi dengan resolusi tinggi atau model yang kompleks.

4. Kontribusi Terbaru dan Literatur dalam Mengembangkan Teknik-Teknik Baru atau Memperbaiki Pendekatan Eksisting dalam Menggunakan MEH Untuk PDP

Pemanfaatan sel punca pluripoten yang diinduksi manusia (hiPSC) untuk studi Parkinson telah menghasilkan kemajuan besar dalam pengembangan teknik untuk model penyakit dan penyaringan terapi potensial. Fokus penelitian adalah pada penyempurnaan protokol diferensiasi hiPSC menjadi neuron dopaminergik menggunakan neurogenin-2 dan kit diferensiasi otak tengah untuk menciptakan neuron dopaminergik yang diinduksi (iDA) secara efisien (Sheta et al., 2022). Penggunaan sel iPS juga meningkatkan pemahaman tentang patogenesis PD, pengembangan obat baru, dan desain terapi personal (Kausar et al., 2022). Integrasi teknik pencitraan molekuler seperti PET dan SPECT telah memungkinkan studi PD pada pasien hidup, mengeksplorasi akumulasi α -synuclein dan jalur molekuler lain yang relevan (Tiwari & Bhatnagar, 2021). Pendekatan ini menunjukkan strategi multidimensi dalam memajukan penelitian PD dengan teknologi dan model inovatif.

Belakangan ini, kontribusi dan literatur terbaru dalam pengembangan teknik baru atau peningkatan pendekatan yang ada dalam penggunaan MEH untuk PDP telah difokuskan pada berbagai aspek. (ALDIYAH, 2021) dan (Hardanti et al., 2024) keduanya menekankan pentingnya mengintegrasikan teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten dalam pengembangan materi pembelajaran, seperti penggunaan LKPD dan e-modul. Integrasi ini juga didukung oleh (Gustiawati et al., 2019) dan (Irmita & Atun, 2017), yang menyoroti pentingnya teknik evaluasi inovatif seperti Teknik Perubahan yang Paling Signifikan, serta penggunaan TPACK dalam meningkatkan literasi sains siswa. Studi-studi ini secara keseluruhan menegaskan perlunya pendekatan holistik yang menggabungkan teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten untuk meningkatkan efektivitas PDP.

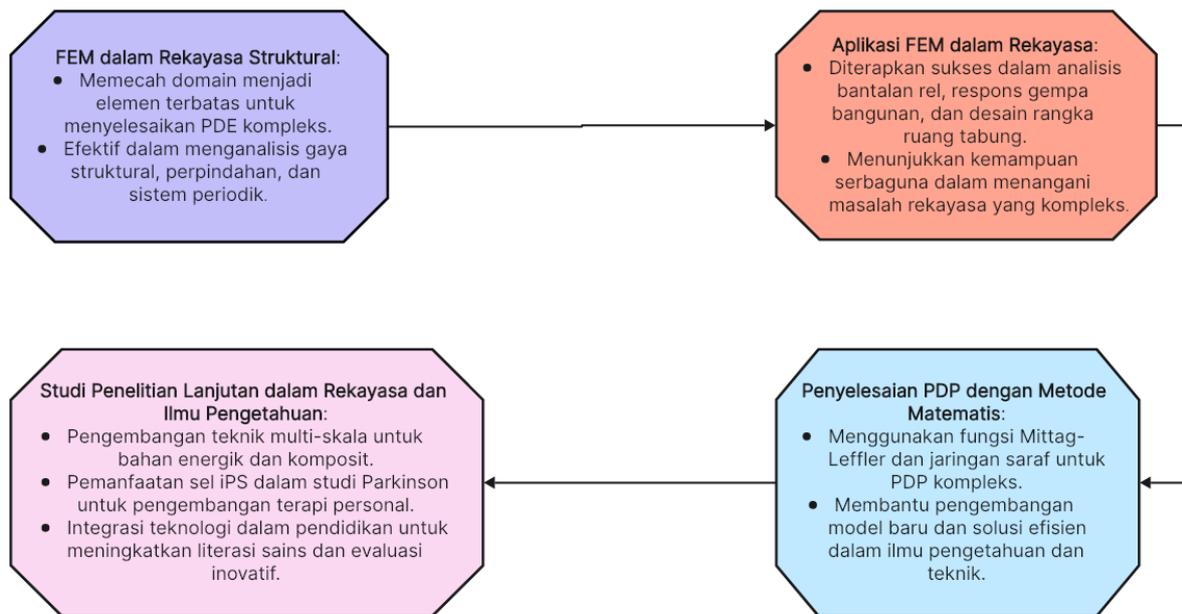
Pendekatan holistik yang menggabungkan teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten dalam Pendidikan PDP menawarkan potensi besar dalam meningkatkan efektivitas pembelajaran. Penggunaan LKPD dan e-modul memberikan alternatif yang efektif dalam mengintegrasikan teknologi dalam proses pembelajaran, sementara teknik evaluasi inovatif seperti Teknik Perubahan yang Paling Signifikan dan TPACK membantu dalam mengevaluasi dan meningkatkan pemahaman siswa terhadap materi sains. Meskipun pendekatan holistik ini menawarkan banyak keunggulan, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi. Integrasi teknologi, pedagogi, dan pengetahuan konten memerlukan kerja sama yang erat antara pengajar dan pengembang kurikulum untuk menciptakan bahan pembelajaran yang relevan dan bermutu tinggi. Pengembangan LKPD dan e-modul memerlukan investasi waktu dan sumber daya yang signifikan dalam hal pengembangan dan pemeliharaan konten yang mutakhir. Selain itu, implementasi teknik evaluasi inovatif seperti Teknik Perubahan yang Paling Signifikan dapat memerlukan pelatihan tambahan bagi pengajar untuk memastikan interpretasi dan penggunaannya yang benar.

5. Bagaimana Perbandingan Kinerja MEH dengan Metode Numerik Lainnya dalam Menyelesaikan PDP Dalam Konteks Rekayasa Struktur dan Material

Dalam bidang teknik struktural dan material, perbandingan kinerja Metode Entropi Maksimum tanpa Jala (MEH) dengan teknik numerik lainnya dalam menangani proses displacement Phase-Field (PDP) memiliki signifikansi yang penting. Penelitian menunjukkan bahwa, sementara Metode Elemen Terbatas (FEM) menghadapi tantangan dalam menyesuaikan diri dengan berbagai scenario (Kumar et al., 2020), MEH terbukti lebih efektif dalam pendekatan terhadap energi santai dalam analisis struktural (Sekkak & Modares, 2019). Fernandez-Zelaia dan rekan-rekannya juga menyoroiti kebutuhan akan pendekatan pembelajaran mesin untuk mengekstraksi hubungan mikrostruktur-properti dari data simulasi elemen terbatas, yang menunjukkan potensi MEH untuk mengintegrasikan teknologi canggih tersebut dalam pengembangan material yang disesuaikan (SAVRUKOĞLU & ASLANTAS, 2023). Dengan demikian, integrasi MEH dengan metode numerik lainnya dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam menyelesaikan PDP, terutama dalam konteks aplikasi rekayasa struktural dan material.

Perbandingan performa Metode Elemen Terbatas (FEM) dengan metode numerik lain dalam menyelesaikan masalah dalam rekayasa struktural dan material menunjukkan bahwa FEM, khususnya saat diterapkan dengan Metode Dekomposisi Domain (DDM), dapat secara signifikan meningkatkan akurasi analisis (Premono, 2014). Hal ini terlihat dalam aplikasinya untuk memprediksi respons gedung bertingkat terhadap peristiwa gempa bumi (Nasution, 2019) dan menganalisis perilaku bantalan rel (Kurniawan et al., 2022). Selain itu, FEM telah berhasil digunakan untuk menganalisis kinerja batang sambungan dari baja paduan, menunjukkan hasil yang positif (Zainur Rahman et al., 2022). Penelitian-penelitian ini secara bersama-sama menegaskan efektivitas FEM, terutama ketika digabungkan dengan DDM, dalam mengatasi berbagai tantangan rekayasa.

Penelitian menunjukkan bahwa MEH sering kali lebih efektif dalam pendekatan terhadap energi santai dalam analisis struktural. Pendekatan ini memungkinkan untuk integrasi yang lebih baik dengan teknologi canggih seperti pembelajaran mesin untuk ekstraksi hubungan mikrostruktur-properti dari data simulasi elemen terbatas. Di sisi lain, FEM, terutama saat digabungkan dengan Metode Dekomposisi Domain (DDM), menunjukkan peningkatan signifikan dalam akurasi analisis, terutama dalam konteks aplikasi untuk respons struktural kompleks seperti gedung multi-lantai dan bantalan rel. MEH menawarkan pendekatan yang inovatif dengan fokus pada energi santai dan integrasi teknologi modern, yang berpotensi meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam analisis struktural. Namun, tantangan MEH juga muncul dalam menyesuaikan diri dengan berbagai scenario dan kondisi permasalahan yang kompleks. Sementara itu, FEM, terutama dengan dukungan DDM, telah terbukti efektif dalam menangani berbagai aplikasi rekayasa struktural seperti respons terhadap gempa bumi dan analisis material.



Gambar 2. Flow Chart Perkembangan Variabel Riset

Studi Finite Element Method (FEM) dalam rekayasa struktural memecahkan PDE kompleks dengan membagi domain menjadi elemen terbatas, efektif untuk menganalisis gaya struktural, perpindahan, dan sistem periodik. Aplikasinya telah sukses dalam analisis bantalan rel, respons gempa bangunan, dan desain rangka ruang tabung, menunjukkan kemampuan serbaguna dalam menangani masalah rekayasa yang kompleks. Penyelesaian PDP dengan metode matematis seperti fungsi Mittag-Leffler dan jaringan saraf membantu pengembangan model baru dan solusi efisien dalam ilmu pengetahuan dan teknik. Penelitian lanjutan fokus pada pengembangan teknik multi-skala untuk bahan energik dan komposit, serta pemanfaatan sel iPS dalam studi Parkinson untuk terapi personal, sambil mengintegrasikan teknologi dalam pendidikan untuk meningkatkan literasi sains dan inovasi evaluasi.

D. SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan evaluasi terhadap perbandingan kinerja Metode Entropi Maksimum tanpa Jala (MEH) dengan Metode Elemen Terbatas (FEM) dalam menyelesaikan Persamaan Diferensial Parsial (PDP) dalam konteks rekayasa struktur dan material, terungkap bahwa kedua metode numerik ini menawarkan pendekatan yang berbeda namun komplementer. FEM, khususnya dengan Metode Dekomposisi Domain (DDM), telah terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi analisis untuk situasi kompleks seperti respons terhadap gempa dan perilaku komponen struktural. Di sisi lain, MEH menonjol karena pendekatannya yang fokus pada energi santai dan kemampuannya untuk mendalami hubungan mikrostruktur-properti material, yang krusial dalam pengembangan material yang disesuaikan.

Namun, terdapat beberapa kesenjangan yang perlu diatasi untuk mengoptimalkan penggunaan MEH dalam rekayasa struktural dan material. Pertama, kompleksitas implementasi MEH yang memerlukan pemrosesan data yang intensif dan kemampuan komputasi yang tinggi menimbulkan tantangan teknis yang signifikan. Selanjutnya, integrasi teknologi pembelajaran mesin dan data simulasi menjadi kunci untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi MEH dalam memprediksi perilaku material. Selain itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi kelemahan dalam adaptasi MEH terhadap variasi geometri dan kondisi batas yang kompleks, yang sering kali menjadi fokus utama dalam aplikasi rekayasa struktural yang praktis.

Oleh karena itu, topik riset mendatang yang mendesak adalah pengembangan metode baru atau perbaikan pendekatan eksisting untuk mengintegrasikan MEH dengan teknologi canggih seperti pembelajaran mesin dan data simulasi dalam pengembangan material yang disesuaikan.

Penelitian ini dapat mencakup pengembangan algoritma MEH yang lebih efisien, pengoptimalan integrasi dengan teknologi pembelajaran mesin untuk ekstraksi informasi dari data simulasi, serta pengembangan teknik simulasi multiskala yang dapat menangani kompleksitas geometri dan variasi kondisi batas dalam model struktural dan material. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan aplikasi MEH dalam rekayasa struktural dan material secara lebih luas dan efektif di masa mendatang.

REFERENSI

- Abbas, H., Juma, D., & Jahuddin, M. R. (2020). Penerapan Metode Elemen Hingga Untuk Desain Dan Analisis Pembebanan Rangka Chassis Mobil Model Tubular Space Frame. *ILTEK: Jurnal Teknologi*. <https://doi.org/10.47398/iltek.v15i2.527>
- ABDILLAH, R. (2020). Implementasi Total Quality Management (Tqm) Dalam Pendidikan Islam. *Jurnal Pengelolaan Pendidikan*.
- Abuasbeh, K., Shafqat, R., Niazi, A. U. K., & Awadalla, M. (2023). Mild Solutions for the Time-Fractional Navier-Stokes Equations with MHD Effects. *Symmetry*. <https://doi.org/10.3390/sym15020280>
- Agustinus, S., & Lesmana, C. (2019). Perbandingan Analisis Perkuatan Struktur Pelat dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Sipil*. <https://doi.org/10.28932/jts.v15i1.1852>
- ALDIYAH, E. (2021). Lembar Kerja Peserta Didik (Lkpd) Pengembangan Sebagai Sarana Peningkatan Keterampilan Proses Pembelajaran Ipa Di Smp. *Teaching: Jurnal Inovasi Keguruan Dan Ilmu Pendidikan*. <https://doi.org/10.51878/teaching.v1i1.85>
- Amalia, R. A., Hidayat, M., & Daud, A. (2023). Pengaruh Analisis Beban Kerja, Deskripsi Pekerjaan Dan Kompetensi Terhadap Produktivitas Kerja Perawat Pada Puskesmas Buki Kepulauan Selayar. *Cendekia Akademika Indonesia*.
- Azhar, A., & Kristiyono, T. A. (2019). Identifikasi Faktor-Faktor yang Berpengaruh terhadap Harga Pembangunan Kapal Baru Berbasis Pentaple Bottom Line Plus R. *Prosiding Seminakel*.
- Bader, T. K., & Ormarsson, S. (2023). Modeling the Mechanical Behavior of Wood Materials and Timber Structures. In *Springer Handbooks*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_10
- Bonatti, C., & Mohr, D. (2021). One for all: Universal material model based on minimal state-space neural networks. *Science Advances*. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf3658>
- Chairunnisa, N., Pratiwi, A. Y., Darmawan, A. R., Nurwidayati, R., Krasna, W. A., Cahyadi, A., & Zackyudin, M. (2023). Pendampingan Teknis Pengujian Tidak Merusak dengan Ultrasonic Pulse Velocity dan Hammer Test Pada Struktur Beton Bertulang Bangunan Kantor di Banjarbaru. *Jurnal Pengabdian ILUNG (Inovasi Lahan Basah Unggul)*. <https://doi.org/10.20527/ilung.v3i1.9523>
- Chandra, A., & Hidayati, A. (2023). Pengembangan LKPD Berbasis Pendekatan Realistic Mathematics Education. *JIPM (Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika)*. <https://doi.org/10.25273/jipm.v11i2.14336>
- Effendi, R., Herpratiwi, H., & Sutiarso, S. (2021). Pengembangan LKPD Matematika Berbasis Problem Based Learning di Sekolah Dasar. *Jurnal Basicedu*. <https://doi.org/10.31004/basicedu.v5i2.846>
- Fermeglia, M., Mio, A., Aulic, S., Marson, D., Laurini, E., & Pricl, S. (2020). Multiscale molecular modelling for the design of nanostructured polymer systems: Industrial applications. In *Molecular Systems Design and Engineering*. <https://doi.org/10.1039/d0me00109k>
- Gustiawati, R., Fahrudin, F., Kurniawan, F., & Indah, E. P. (2019). Pengembangan Pendekatan Evaluasi The Most Significant Change Technique Dalam Pembelajaran Pendidikan Jasmani Olahraga Dan Kesehatan. *Multilateral Jurnal Pendidikan Jasmani Dan Olahraga*. <https://doi.org/10.20527/multilateral.v18i2.7624>
- Gutner, C. A., & Presseau, C. (2019). Dealing with Complexity and Comorbidity: Opportunity for Transdiagnostic Treatment for PTSD. In *Current Treatment Options in Psychiatry*. <https://doi.org/10.1007/s40501-019-00170-2>
- Hamzah, A. (2021). Penggunaan Metode Elemen Hingga Pada Struktur Grid Dengan Program

- Freemat. *Rang Teknik Journal*. <https://doi.org/10.31869/rtj.v4i1.2040>
- Harahap, A. (2020). Simulasi Pembebanan Pada Shackle Menggunakan Perangkat Lunak Ansys APDL 15.0. *Journal Of Mechanical Engineering Manufactures Materials And Energy*. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v4i1.3811>
- Hardanti, P., Murtinugraha, R. E., & Arthur, R. (2024). Studi Literatur: Pemanfaatan Pendekatan TPACK (Technological, Pedagogical, And Content Knowledge) pada Pengembangan E-Modul Pembelajaran. *Jurnal Teknologi Pendidikan*. <https://doi.org/10.47134/jtp.v1i3.307>
- Irmita, L. U., & Atun, S. (2017). Pengembangan Perangkat Pembelajaran Menggunakan Pendekatan Tpack Untuk Meningkatkan Literasi Sains. *JTK (Jurnal Tadris Kimiya)*. <https://doi.org/10.15575/jta.v2i1.1363>
- Kausar, S., Sonekar, S., & Mane, P. (2022). Developing PDP model by using malware detection techniques for securing cloud storage data using cryptanalysis. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0076895>
- Kler, A. M., Zharkov, P. V., & Epishkin, N. O. (2016). An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants. *Thermophysics and Aeromechanics*. <https://doi.org/10.1134/S0869864316020165>
- Kumar, S., Vidyasagar, A., & Kochmann, D. M. (2020). An assessment of numerical techniques to find energy-minimizing microstructures associated with nonconvex potentials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1002/nme.6280>
- Kurniawan, M. A., Adi Perwira, D., & Leliana, A. (2022). Analisis Perilaku Struktur Bantalan Kereta Api dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*. <https://doi.org/10.37367/jpi.v6i1.172>
- Lee, J. V., Vinsky, E., Sutanto, R., Sabran, M. Z., Lee, J. B., & Widiastuti, M. (2023). Perbandingan Antara Ropivacaine-Dexmedetomidine versus Ropivacaine-Sufentanil untuk Analgesia Persalinan Normal: Tinjauan Sistematis dan Meta-Analisis Uji Acak Terkontrol. *JAI (Jurnal Anestesiologi Indonesia)*. <https://doi.org/10.14710/jai.v0i0.57636>
- Li, J., Xu, S., & Asle Zaeem, M. (2022). Editorial: Modeling and Simulation of the Mechanical Behavior of Multi-Principal Element Materials. In *Frontiers in Materials*. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.942523>
- Liang, C. (2022). Application and Prospect of Analysis of Structures Based on Finite Element Method. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.54097/hset.v28i.4059>
- Liu, C., Fan, C., & Zhang, Z. (2024). Finding Influencers in Complex Networks: An Effective Deep Reinforcement Learning Approach. *Computer Journal*. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxac187>
- Muslim, M., Zulherman, Z., & Ariska, M. (2020). Pengembangan Modul Praktikum Elektronika Dasar Berbasis Proyek Untuk Meningkatkan Pemahaman Konsep Mahasiswa Pendidikan Fisika. *Jurnal Inovasi Dan Pembelajaran Fisika*. <https://doi.org/10.36706/jipf.v7i2.12711>
- Nurahma, G. A., & Hendriani, W. (2021). Tinjauan sistematis studi kasus dalam penelitian kualitatif. *Mediapsi*. <https://doi.org/10.21776/ub.mps.2021.007.02.4>
- Prayogo, J. (2015). Pemodelan Konstruksi Portal Rangka Baja Berbasis Finite Element Method (FEM). In *Makassar: Universitas Hasanudin*.
- Premono, A. (2014). Studi Numerik Struktur Linear Elasticity Menggunakan Domain Decomposition Method (DDM). *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*. <https://doi.org/10.21009/jkem.1.3.1>
- Rahmawati, S. (2019). Bunga Rampai : Pendidikan Agama Islam. *Ilmu Pengetahuan Dalam Pandangan Islam*.
- Ramadhan, A., & Salim, W. A. (2019). Mencapai Keberlanjutan Ekosistem Laut Melalui Marine Spatial Planning (Msp): Mungkinkah? *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*. <https://doi.org/10.15578/jksekp.v9i1.7420>
- Roy, S., Nguyen, Y. T., Neal, C., Baek, S., & Udaykumar, H. S. (2022). Meso-scale simulation of energetic materials. I. A method for generating synthetic microstructures using deep feature

- representations. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/5.0065294>
- Sabaryati, J., & Isnaini, M. (2018). Pengembangan Media Pembelajaran Mekanika Berbasis Komputerisasi Untuk Membentuk Karakter Ilmiah Mahasiswa. *Orbita: Jurnal Kajian, Inovasi Dan Aplikasi Pendidikan Fisika*. <https://doi.org/10.31764/orbita.v4i2.577>
- SAPUTRA, A. (2022). Analisis Getaran Bebas Balok Kantilever Berbahan Komposit Serat Sabut Kelapa Menggunakan Metode Elemen Hingga Berbasis Software Abaqus. *Skripsi FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN GOWA*.
- SAVRUKOĞLU, İ., & ASLANTAS, K. (2023). Investigation of Numerical Methods SPH, ALE, Coupled MM-ALE with LBE and CONWEP Empirical method for Simulation of the Spherical Free Air Blast Loading with Using LS Dyna. *Journal of Materials and Mechatronics: A*. <https://doi.org/10.55546/jmm.1206695>
- Sekkak, H., & Modares, M. (2019). A comparison between probabilistic and possibilistic numerical schemes for structural uncertainty analysis. *ISEC 2019 - 10th International Structural Engineering and Construction Conference*. <https://doi.org/10.14455/isec.res.2019.2>
- Sheta, R., Teixeira, M., Idi, W., Pierre, M., de Rus Jacquet, A., Emond, V., Zorca, C. E., Vanderperre, B., Durcan, T. M., Fon, E. A., Calon, F., Chahine, M., & Oueslati, A. (2022). Combining NGN2 programming and dopaminergic patterning for a rapid and efficient generation of hiPSC-derived midbrain neurons. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22158-4>
- Soloviev, A. N., & Kirichevsky, R. V. (2022). Development of a Finite Element Method and Its Application in a CAD. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2021-19-4-67-84>
- Tiwari, V., & Bhatnagar, C. (2021). A survey of recent work on video summarization: approaches and techniques. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10977-y>
- Umi Sholikati. (2019). Dakwah Bil Hal Di Pondok Pesantren Miftahul Ulum Jogoloyo Wonosalam Demak. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*.
- Ureña, F., García, Á., & Vargas, A. M. (2023). Preface to “Applications of Partial Differential Equations in Engineering.” In *Mathematics*. <https://doi.org/10.3390/math11010199>
- Yang, J., & Xu, F. (2019). The Computational Approach for the Basic Reproduction Number of Epidemic Models on Complex Networks. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2898639>
- Zainur Rahman, R., Dwi Putra, A., & Cornelia Tjiptady, B. (2022). Analisis Kinerja Connecting Rod Menggunakan MEH (Metode Elemen Hingga) dengan Material Baja Paduan. *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*. <https://doi.org/10.33379/metrotech.v1i2.1299>
- Zhang, W., Zakerzadeh, R., Zhang, W., & Sacks, M. S. (2019). A material modeling approach for the effective response of planar soft tissues for efficient computational simulations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.09.016>