

Simulasi Modal *Analysis Chassis* Kendaraan Listrik EV-01 Menggunakan ANSYS Workbench

Tyas Mardian Faturachman^{1*}, Kardiman², Boni Sena³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa, Karawang

*Penulis Korespondensi, email: tmfaturachman@gmail.com

Received: 16/11/2025

Revised: 17/12/2025

Accepted: 17/12/2025

Abstract. The rapid development of electric vehicles (EVs) has increased the demand for lightweight, strong, and vibration-resistant chassis structures to support driving safety and overall vehicle performance. This study aims to analyze the modal characteristics of an electric vehicle chassis using Finite Element Analysis (FEA) in ANSYS 2024 R1. Modal analysis is essential to identify the natural frequencies and mode shapes of the chassis to ensure that resonance does not occur during vehicle operation, especially due to motor vibration, road irregularities, and drivetrain oscillation. A 3D chassis model was designed using SolidWorks and evaluated under free-modal conditions without boundary constraints, allowing the natural dynamic behavior of the structure to be accurately represented. Three materials were compared: Structural Steel, Titanium Alloy, and Epoxy Carbon Composite each widely used in EV structural design due to their strength to weight advantages. The results show that Structural Steel provides the highest natural frequencies, indicating good stiffness but at a higher weight. Titanium Alloy offers moderate stiffness with significant weight reduction, while Epoxy Carbon Composite demonstrates lower frequencies but excellent mass efficiency and vibration damping potential. These findings demonstrate that material selection plays a critical role in dynamic performance and structural safety of EV chassis systems. The study suggests that hybrid or Composite-based chassis designs could be a promising approach for achieving optimal balance between stiffness, weight, and vibration resistance in future EV development.

Keywords: Electric vehicle, Modal analysis, ANSYS, Chassis design, Structural dynamics

Abstrak. Perkembangan mobil listrik yang semakin pesat menuntut desain rangka yang ringan, kuat, dan mampu menahan getaran selama pengoperasian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik modal rangka kendaraan listrik menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* pada ANSYS 2024 R1. Analisis modal dilakukan untuk mengetahui frekuensi alami dan bentuk getaran rangka, sehingga dapat dipastikan bahwa struktur tidak mengalami resonansi akibat getaran motor, kondisi jalan yang tidak rata, maupun osilasi sistem penggerak. Model rangka tiga dimensi dirancang menggunakan SolidWorks dan dianalisis dalam kondisi *free modal* tanpa batasan tumpuan agar respons dinamis rangka dapat tergambar secara realistis. Tiga jenis material dibandingkan, yaitu *Structural Steel*, *Titanium Alloy*, dan *Epoxy Carbon Composite*, yang umum digunakan dalam pengembangan rangka mobil listrik karena karakteristik kekuatan dan efisiensi beratnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Structural Steel* memiliki frekuensi alami tertinggi namun dengan bobot yang lebih besar. *Titanium Alloy* memberikan keseimbangan antara kekakuan dan pengurangan massa, sedangkan *Epoxy Carbon Composite* menunjukkan frekuensi lebih rendah tetapi memiliki potensi redaman getaran dan efisiensi massa yang baik. Temuan ini membuktikan bahwa pemilihan material sangat berpengaruh terhadap respons dinamis dan keamanan struktural rangka kendaraan listrik. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan material komposit atau kombinasi material sebagai pendekatan optimal dalam pengembangan rangka mobil listrik pada masa mendatang.

Kata Kunci: Mobil listrik, Analisis modal, ANSYS, Desain rangka, Dinamika struktur

I. PENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik (*electric vehicle*, EV) menunjukkan peningkatan yang pesat seiring kebutuhan akan transportasi yang ramah lingkungan dan efisien. Laporan *Global EV Outlook 2024* yang dirilis oleh *International Energy Agency* (IEA) mencatat bahwa penjualan kendaraan listrik

dunia meningkat lebih dari 35% dibanding tahun sebelumnya [1]. Tren elektrifikasi ini bertujuan mengurangi emisi gas rumah kaca serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil melalui pemanfaatan motor listrik dan sistem penyimpanan energi berbasis baterai [2].

Kendaraan listrik memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan kendaraan bermesin pembakaran internal karena motor listrik memiliki efisiensi sistem yang jauh lebih baik pada kisaran 80–90% [3]. Namun, penggunaan baterai berkapasitas besar meningkatkan massa total kendaraan yang berdampak pada distribusi beban dan respons dinamis struktur rangka, termasuk potensi peningkatan deformasi dan penurunan stabilitas dinamis [4]. Oleh karena itu, desain *chassis* kendaraan listrik harus mempertimbangkan kekakuan struktural (*structural stiffness*), kekuatan, serta efisiensi massa agar dapat menahan beban dinamis dan menghindari resonansi struktural selama operasi [5].

Dalam konteks desain mekanik, *chassis* berfungsi sebagai struktur utama yang menopang komponen vital kendaraan seperti baterai, motor penggerak, kontroler, dan sistem suspensi. Oleh karena itu, *chassis* kendaraan listrik harus memiliki kekakuan global, kekuatan struktural memadai, dan bobot yang ringan untuk mencapai efisiensi energi yang optimal. Ketidakseimbangan antara kekakuan dan massa dapat memicu fenomena resonansi yang menurunkan kenyamanan dan bahkan membahayakan keselamatan pengendara [5]. Studi terbaru menekankan bahwa dinamika *chassis* (*EV chassis dynamics*) sangat dipengaruhi oleh massa baterai, kekakuan *longitudinal* torsional, serta interaksi struktur dengan eksitasi motor listrik dan permukaan jalan. Dengan demikian, analisis modal menjadi langkah krusial dalam desain *chassis* EV untuk memastikan frekuensi alami struktur berada di luar rentang eksitasi operasional kendaraan.

Selain perkembangan pada aspek analisis, inovasi material juga menjadi fokus utama dalam peningkatan performa *chassis* kendaraan listrik. Material komposit seperti *Carbon Fiber Epoxy* menawarkan rasio kekuatan terhadap berat yang sangat tinggi, kemampuan redaman getaran lebih baik, dan potensi pengurangan massa hingga 30% dibandingkan material logam konvensional [6]. Penggunaan komposit pada kerangka kendaraan juga terbukti meningkatkan kekakuan global dan

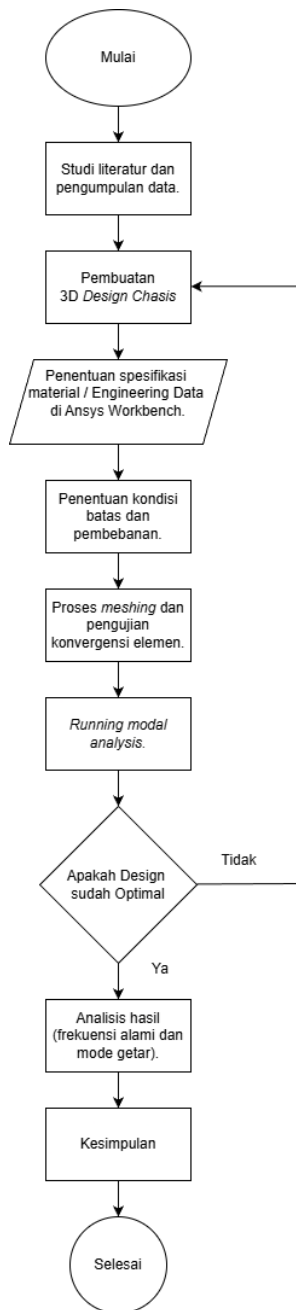
performa dinamis struktur, sehingga sangat relevan untuk pengembangan rangka EV generasi baru [7].

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas analisis modal pada struktur kendaraan listrik ringan, menunjukkan bahwa pemilihan material memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai frekuensi alami rangka kendaraan listrik [8]. Sementara itu, mengembangkan metode optimasi ringan pada struktur *chassis* yang berhasil meningkatkan kekakuan torsional serta mengurangi deformasi pada mode getar tertentu [9]. Namun demikian, penelitian yang secara khusus menganalisis rangka kendaraan listrik empat roda tipe EV-01 dengan membandingkan kinerja dinamis tiga material berbeda *Structural Steel*, *Titanium Alloy*, dan *Epoxy Carbon* masih sangat terbatas. Selain itu, sebagian besar studi sebelumnya belum mengaitkan hasil analisis modal dengan potensi resonansi akibat frekuensi eksitasi motor listrik maupun ketidakrataan permukaan jalan.

Gap penelitian tersebut sekaligus menjadi *novelty* utama penelitian ini, yaitu menyajikan evaluasi karakteristik modal *chassis* EV-01 menggunakan tiga jenis material berbeda dan menilai implikasinya terhadap risiko resonansi struktural. Penelitian ini juga memberikan dasar teknis dalam penentuan material dan konfigurasi rangka yang optimal untuk desain EV yang aman dan stabil secara dinamis.

II. METODOLOGI

Langkah awal dalam penelitian ini dimulai dengan kajian pustaka yang bertujuan untuk memahami secara menyeluruh konsep dasar analisis modal pada struktur rangka kendaraan listrik tipe EV-01, meliputi teori frekuensi alami (*natural Frequency*), bentuk mode getar (*mode shape*), serta pengaruh kekakuan dan massa struktur terhadap respon dinamis kendaraan. Kajian ini juga mencakup pemahaman tentang penerapan metode elemen hingga (*Finite Element Method*, FEM) dalam menganalisis karakteristik getaran rangka kendaraan listrik, yang menjadi dasar dalam penentuan parameter simulasi dan kondisi batas pada perangkat lunak ANSYS Workbench 2024 R1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan tiga jenis material utama, yaitu *Structural Steel*, Titanium Alloy Ti-6Al-4V, dan *Epoxy Carbon Composite*, yang mewakili kategori material logam konvensional, paduan ringan, dan komposit modern. Penggunaan *Structural Steel* didasarkan pada fakta bahwa baja berkekuatan tinggi masih menjadi material penting dalam struktur otomotif modern. Li et al. menjelaskan bahwa *advanced high-strength steel* digunakan secara luas pada

komponen rangka kendaraan karena menawarkan kekakuan struktural tinggi, ketahanan terhadap beban dinamis, serta efisiensi biaya produksi, sehingga tetap relevan untuk aplikasi rangka kendaraan listrik [10].

Titanium Alloy Ti-6Al-4V digunakan untuk mengevaluasi performa material ringan dengan kekuatan tinggi. Singh et al. melaporkan bahwa paduan Ti-6Al-4V memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang sangat baik, stabilitas mekanik tinggi, serta ketahanan korosi, menjadikannya material unggulan pada komponen otomotif dan dirgantara yang memerlukan kekuatan tinggi dengan massa rendah [11].

Sementara itu, *Epoxy Carbon Composite* dipilih karena merupakan material komposit serat karbon yang memiliki kekakuan spesifik tinggi dan massa yang sangat ringan. *Epoxy Carbon* menunjukkan bahwa komposit berbasis serat karbon *epoxy* banyak digunakan pada bagian struktural kendaraan, termasuk panel dan rangka ringan, karena menawarkan peningkatan kekakuan sekaligus pengurangan massa yang signifikan dibandingkan material logam konvensional [12]. Kombinasi ketiga material ini memungkinkan evaluasi performa struktural *chassis* EV-01 dalam perspektif kekuatan, kekakuan, dan efisiensi massa melalui pendekatan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga.

Tabel 1. Material Properties Structural Steel [13].

Properti	<i>Epoxy Carbon</i>	Unit
<i>Laminate Density</i>	1580	kg/m ³
<i>Tensile Strength (0°)</i>	2207	Mpa
<i>Tensile Modulus (0°)</i>	141	GPa
<i>Compression Strength (0°)</i>	1531	MPa
<i>Compression Modulus (0°)</i>	128	Gpa
<i>Shear Strength (ILSS)</i>	128	Mpa

Tabel 2. Material Properties Titanium Alloy [14].

Properti	<i>Structural Steel</i>	Unit
<i>Density</i>	7850	kg/m ³
<i>Young's Modulus (E)</i>	200	GPa
<i>Poisson's Ratio (ν)</i>	0,30	
<i>Yield Strength</i>	248	Mpa

<i>Ultimate Tensile Strength</i>	400	Mpa
----------------------------------	-----	-----

Tabel 3. *Material Properties Epoxy Carbon* [15].

Properti	Titanium Alloy	Unit
<i>Density</i>	4600	kg/m ³
<i>Young's Modulus (E)</i>	115	GPa
<i>Poisson's Ratio (ν)</i>	0,36	
<i>Yield Strength</i>	850	MPa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	900	MPa

Berikutnya, Hasil dari proses simulasi modal *analysis* menghasilkan data numerik penting yang meliputi frekuensi alami, bentuk mode getar pada struktur rangka kendaraan listrik EV-01. Data hasil simulasi ini dianalisis secara komparatif untuk mengevaluasi performa rangka terhadap getaran dan kekakuan struktur dari masing-masing material. Penilaian dilakukan dengan mengamati respons dinamis struktur terhadap gaya eksitasi, guna mengetahui sejauh mana desain mampu menahan getaran tanpa mengalami resonansi atau deformasi berlebih yang dapat menurunkan kestabilan kendaraan. Perhitungan dasar yang digunakan dalam analisis ini meliputi;

A. Persamaan gerak sistem struktural

$$[M]\ddot{x} + [K]x = 0 \quad (1)$$

Keterangan:

- $[M]$ = matriks massa (kg)
- $[K]$ = matriks kekakuan (N/m)
- $\ddot{x}$ = percepatan nodal (m/s²)
- x = perpindahan nodal (m)

B. Persamaan nilai eigen (eigenvalue equation)

$$([K] - \omega^2[M])X = 0 \quad (2)$$

Keterangan:

- ω = frekuensi sudut alami (rad/s)
- X = vektor bentuk *mode shape*

C. Hubungan frekuensi alami

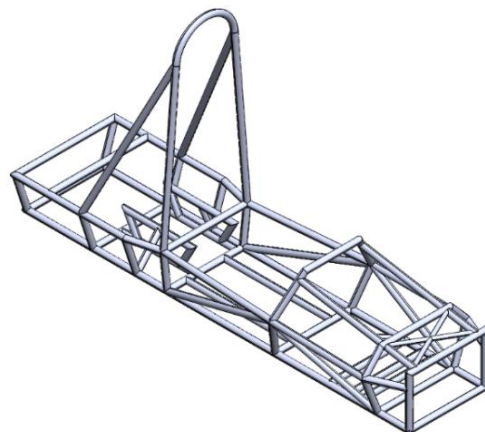
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (3)$$

Keterangan:

- f_n = frekuensi alami ke-n (Hz)
- ω_n = frekuensi sudut alami n (rad/s)

Tiga jenis material yang digunakan dalam model rangka adalah *Structural Steel*, *Titanium Alloy Ti-6Al-4V*, dan *Epoxy Carbon*, yang masing-masing memiliki karakteristik mekanik berbeda. Simulasi dilakukan menggunakan kondisi batas dan pembebanan yang menggambarkan keadaan operasi kendaraan sebenarnya. Tujuan utama dari analisis ini adalah menentukan desain rangka yang optimal, yaitu memiliki kekakuan tinggi, ringan, serta mampu meredam getaran untuk menjaga kenyamanan dan keamanan kendaraan listrik EV-01 selama beroperasi di berbagai kondisi jalan

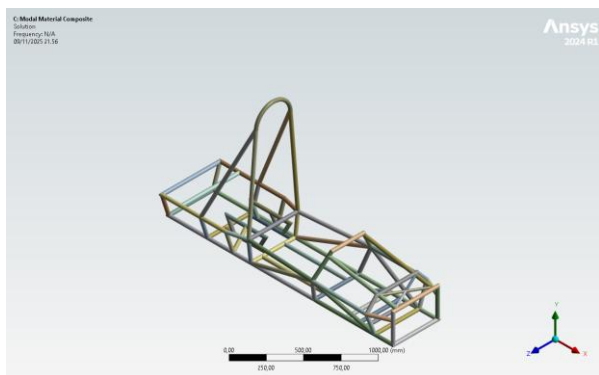
Tahap Model 3D rangka kendaraan listrik EV-01 ditampilkan pada gambar di bawah ini sebagai hasil perancangan menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2023. Model ini digunakan sebagai dasar dalam simulasi modal *analysis* di ANSYS Workbench 2024 R1 untuk mengetahui frekuensi alami, bentuk mode getar, dan kestabilan struktur rangka kendaraan. Hasil analisis ini membantu memastikan bahwa desain rangka tidak mengalami resonansi saat kendaraan beroperasi.



Gambar 2. *3D View Chasis*

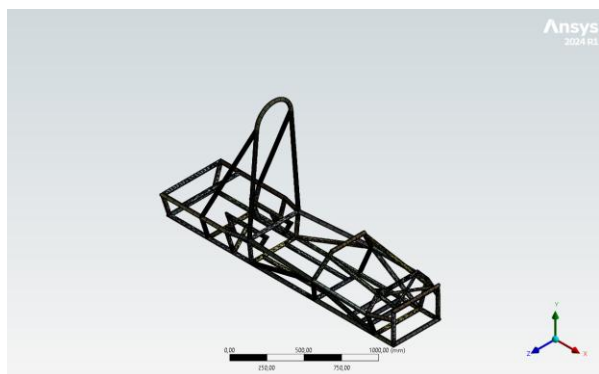
Setelah mendapatkan model 3D, langkah berikutnya adalah melakukan proses analisis modal tanpa penerapan tumpuan atau batasan gerak (*boundary condition*). Jenis analisis ini dikenal sebagai *mode shape*, di mana struktur rangka kendaraan listrik EV-01 dibiarkan bebas bergetar tanpa adanya titik pengekangan atau penumpuan tetap. Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk mengetahui frekuensi alami dan bentuk mode getar

murni dari rangka tanpa pengaruh pembebanan maupun kondisi batas. Dengan metode ini, diperoleh gambaran awal mengenai karakteristik dinamis alami dari struktur rangka yang nantinya dapat menjadi dasar untuk analisis lanjut seperti *harmonic response* [16]



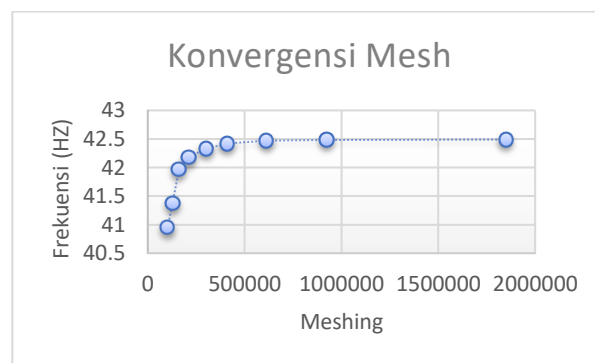
Gambar 3. Free-Free Bondary Condition

Proses *meshing* merupakan tahap penting dalam analisis elemen hingga (FEA) karena memengaruhi ketelitian hasil simulasi, terutama dalam menentukan nilai frekuensi alami dan bentuk mode getar pada struktur. Semakin rapat dan merata ukuran elemen yang digunakan, semakin akurat pula hasil distribusi getaran yang diperoleh. Dalam penelitian ini, proses *meshing* dilakukan secara otomatis dengan pengaturan elemen berbasis tetrahedral pada model rangka kendaraan listrik EV-01. Hasil *meshing* menghasilkan 759.966 *nodes* dan 452.493 *elements*, yang dianggap cukup padat untuk memperoleh hasil simulasi yang stabil dan akurat. Kepadatan *mesh* ini memastikan bahwa respon dinamis dari struktur dapat terdeteksi dengan baik di area yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan atau perubahan bentuk signifikan.



Gambar 4. Meshing Chasis

Studi konvergensi *mesh* dilakukan untuk memastikan bahwa nilai frekuensi natural yang diperoleh tidak sensitif terhadap variasi ukuran elemen. Pengujian dilakukan pada rentang ukuran *mesh* 2 - 10 mm, dan hasilnya menunjukkan bahwa baik Mode 7 (bending) maupun Mode 8 (torsional) mengalami perubahan frekuensi yang relatif besar pada *mesh* kasar (10 - 8 mm), kemudian mulai stabil pada *mesh* 6 mm dan mencapai kondisi konvergen pada *mesh* 4 mm ke bawah, dengan deviasi kurang dari 0.1% dibanding *mesh* 2 mm. Oleh karena itu, ukuran *mesh* 4 mm dipilih sebagai konfigurasi optimum karena memberikan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi, tanpa memerlukan jumlah elemen yang sangat besar seperti pada *mesh* 2 - 3 mm.



Gambar 5. Grafik Konvergensi Meshing

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam simulasi *modal analysis* pada rangka kendaraan listrik tipe EV-01, model dianalisis dengan kondisi *free-free* tanpa adanya tumpuan atau batasan gerak. Hal ini dilakukan agar struktur dapat bergetar secara bebas dan menghasilkan frekuensi alami yang murni berdasarkan massa dan kekakuan rangka. Analisis dilakukan menggunakan ANSYS Workbench 2024 R1, dengan tujuan untuk mengetahui nilai frekuensi alami dan bentuk mode getar (*mode shape*) dari rangka kendaraan listrik. Pendekatan ini umum digunakan untuk menggambarkan karakteristik getaran struktur sebelum menerima beban aktual saat kendaraan beroperasi [17].

A. Frekuensi alami

Simulasi *modal analysis* dilakukan pada rangka kendaraan listrik EV-01 dengan menggunakan

perangkat lunak ANSYS Workbench 2024 R1. Hasil perhitungan menghasilkan dua belas mode getar pertama seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. Hasil Analisis Frekuensi Alami Rangka EV-01 untuk Tiga Material

Mode	<i>Structural Steel</i> (Hz)	<i>Titanium Alloy</i> (Hz)	<i>Epoxy Carbon</i> (Hz)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	6.76×10^{-4}
4	1.98×10^{-3}	1.58×10^{-3}	2.16×10^{-3}
5	4.39×10^{-3}	3.79×10^{-3}	3.75×10^{-3}
6	7.16×10^{-3}	5.74×10^{-3}	6.05×10^{-3}
7	42.491	38.042	25.422
8	72.024	64.602	39.225
9	85.043	76.619	57.461
10	96.611	85.803	61.273
11	109.560	97.435	66.535
12	110.210	97.915	77.040

Berdasarkan analisis modal pada rangka kendaraan listrik EV-01 dalam kondisi *free - free* menggunakan ANSYS Workbench 2024 R1, diperoleh frekuensi alami dan mode getar utama untuk tiga material: *Structural Steel*, *Titanium Alloy*, dan *Epoxy Carbon Composite*. Enam mode pertama menunjukkan frekuensi mendekati nol, yang merupakan karakteristik *rigid - body motion* tanpa deformasi elastik. Fenomena ini umum terjadi pada struktur tanpa tumpuan dan telah dilaporkan pula pada beberapa studi vibrasi struktur ringan berbasis komposit maupun struktur rangka (*structure frames*), di mana mode awal didominasi gerakan kaku sebelum munculnya mode elastis [18].

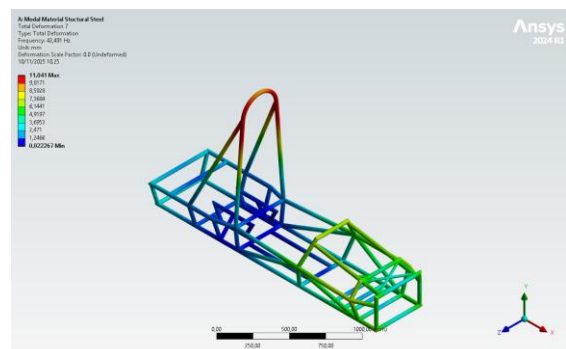
Mode elastik pertama muncul pada Mode 7 dengan nilai frekuensi 42.49 Hz untuk *Structural Steel*, 38.04 Hz untuk *Titanium Alloy*, dan 25.42 Hz untuk *Epoxy Carbon*. Perbedaan nilai ini disebabkan oleh rasio kekakuan terhadap massa ($f \propto \sqrt{K/M}$). Material dengan modulus elastisitas lebih tinggi menghasilkan frekuensi alami lebih besar, sebagaimana ditunjukkan pada penelitian tentang struktur rangka ringan yang menunjukkan bahwa variasi parameter material (densitas, modulus Young, dan tahanan geser) berpengaruh

signifikan terhadap karakteristik vibrasi dan frekuensi alami struktur [19].

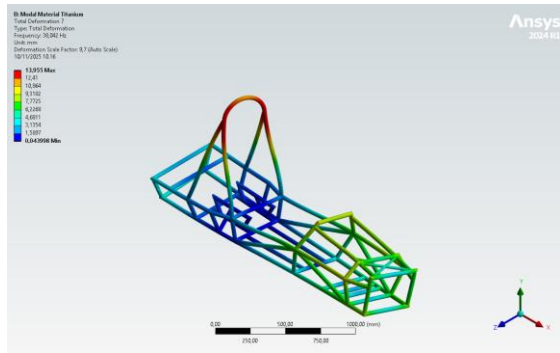
Pada material *Epoxy Carbon Composite*, frekuensi alami pertama lebih rendah dibanding logam meskipun massa jenisnya lebih ringan. Hal ini terjadi karena kekakuan efektif komposit sangat dipengaruhi oleh orientasi serat. Studi vibrasi pada komposit CFRP menunjukkan bahwa orientasi serat yang tidak searah dengan arah dominan deformasi dapat menurunkan kekakuan dinamis dan menghasilkan frekuensi alami yang lebih rendah [20]. Penelitian terbaru mengenai karakteristik getaran pada material komposit tipis, termasuk CFRP dan komposit serat alami, juga memperlihatkan bahwa konfigurasi laminasi dan pola periodik (*1D periodic structure*) sangat memengaruhi frekuensi alami, mode shape, dan respons getaran keseluruhan.

B. Visualisasi hasil analisis modal

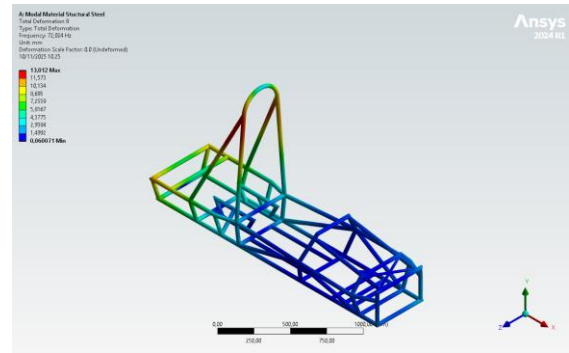
Visualisasi analisis modal digunakan untuk melihat pola getaran (*mode shape*) dan frekuensi alami rangka kendaraan listrik. Pada mode awal (mode 1 – 3), ketiga material masih menunjukkan frekuensi hampir nol, sehingga rangka hanya mengalami gerakan kaku (*rigid body motion*). Memasuki mode berikutnya, bentuk getaran mulai terlihat, seperti puntiran dan lenturan pada beberapa bagian rangka. Setiap material menunjukkan respons yang berbeda: *Structural Steel* paling kaku, *Titanium Alloy* lebih lentur, dan *Epoxy Carbon* paling fleksibel. Visualisasi ini membantu menunjukkan bagian rangka yang paling mudah bergetar dan perlu diperhatikan dalam proses desain.



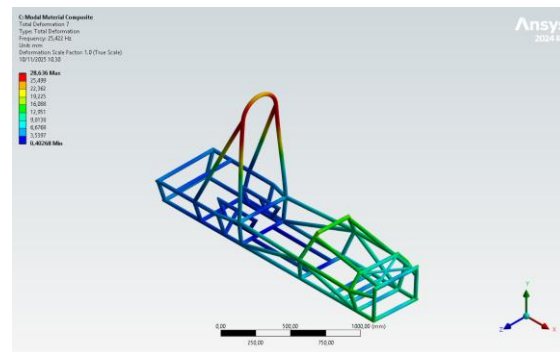
Gambar 6. Mode shape 7 Material Stuctural Steel



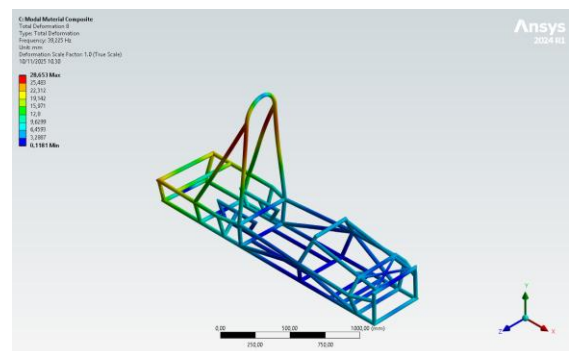
Gambar 7. Mode shape 7 Material Titanium Alloy



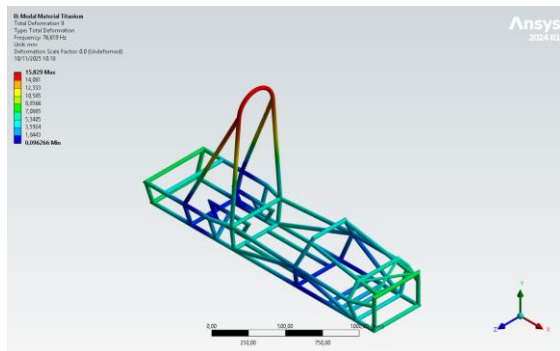
Gambar 11. Mode shape 8 Material Stuctural Steel



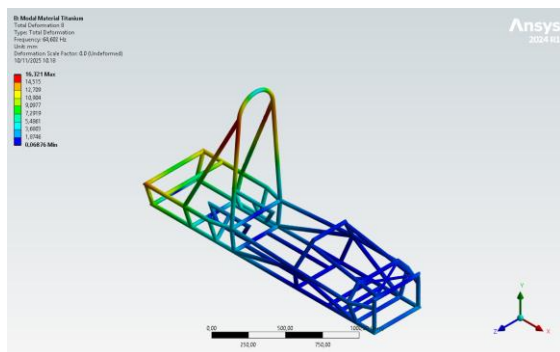
Gambar 8. Mode shape 7 Material Epoxy Carbon



Gambar 12. Mode shape 8 Material Epoxy Carbon



Gambar 9. Mode shape 8 Material Titanium Alloy



Gambar 10. Mode shape 8 Material Titanium Alloy

Visualisasi *mode shape* pada Gambar 5 - 11 menunjukkan dua mode getar dominan yang menentukan respon dinamis rangka kendaraan listrik EV-01, yaitu *global bending mode* (Mode 7) dan *global torsional mode* (Mode 8). Pada Mode 7, deformasi maksimum terjadi pada bagian *roll - bar* dan *longitudinal frame* bagian depan, ditandai oleh kontur merah yang mengindikasikan perpindahan terbesar. Pola ini konsisten dengan karakteristik mode lentur utama pada struktur *spaceframe* \sebagaimana dijelaskan oleh Amin et al. di mana area dengan panjang bentang terbesar cenderung menjadi lokasi deformasi maksimum pada mode awal [21].

Frekuensi natural Mode 7 menunjukkan bahwa *Epoxy Carbon* (25.42 Hz) berada pada rentang eksitasi jalan 20–40 Hz sebagaimana diuraikan dalam kajian oleh Kharrazi et al. [22]. Rentang frekuensi ini juga beririsan dengan harmonik motor listrik yang umum muncul pada kecepatan rendah–menengah, yaitu 20 - 40 Hz. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan material

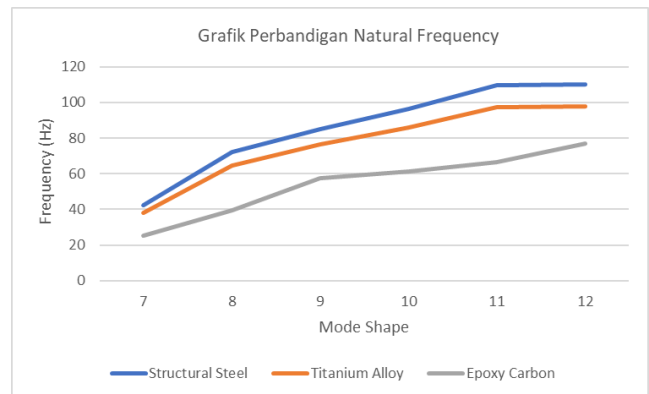
komposit dapat meningkatkan risiko resonansi jika tidak disertai peningkatan kekakuan struktural. Titanium Alloy (38.04 Hz) berada pada batas atas zona eksitasi, sedangkan *Structural Steel* (42.49 Hz) relatif aman dan menunjukkan kekakuan lentur yang lebih tinggi.

Mode 8 menggambarkan respons torsional pertama, yang merupakan indikator penting dalam stabilitas kendaraan. Pada mode ini, rangka mengalami rotasi memanjang dengan deformasi terbesar pada *cross-member* tengah dan titik mounting suspensi. Pola ini sejalan dengan temuan Amin et al. [23], bahwa mode torsional pada *spaceframe* selalu menunjukkan deformasi yang signifikan pada elemen longitudinal dan sambungan penopang tengah. Perbandingan frekuensi menunjukkan bahwa *Epoxy Carbon* (39.22 Hz) kembali berada dalam zona eksitasi suspensi kendaraan, Titanium Alloy (64.60 Hz) menunjukkan kekakuan torsional menengah, sementara *Structural Steel* (72.02 Hz) memberikan performa paling stabil.

Nilai frekuensi yang lebih rendah pada komposit dapat dijelaskan melalui karakteristik material CFRP, dimana orientasi serat yang tidak optimal menyebabkan penurunan kekakuan efektif dalam arah transversal, sehingga menurunkan frekuensi natural rangka [24]. Secara keseluruhan, kombinasi analisis bending dan torsional menunjukkan bahwa area *roll - bar*, *frame* depan, serta *cross - member* tengah merupakan titik yang harus diperkuat untuk mengurangi potensi resonansi dan meningkatkan performa dinamis rangka EV-01.

C. Perbandingan mode shape dan natural frequency

Grafik dibawah ini menampilkan perbandingan frekuensi alami (*natural Frequency*) pada *mode shape* 7 - 12 untuk tiga jenis material rangka, yaitu *Structural Steel*, Titanium Alloy, dan *Epoxy Carbon*. Visualisasi ini bertujuan untuk menunjukkan perbedaan respon dinamis antar material serta mengidentifikasi material yang memiliki kecenderungan frekuensi lebih tinggi pada setiap mode getar.



Gambar 13. Grafik Penbandingan Natural Frequency

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan melalui analisis *modal analysis* menggunakan perangkat lunak ANSYS 2024 R1 terhadap rangka, dapat disimpulkan bahwa struktur rangka memiliki karakteristik getaran yang stabil. Enam mode awal menunjukkan frekuensi mendekati nol yang menandakan gerakan *rigid body*, sedangkan mulai dari mode ke-7 hingga ke-12 terjadi getaran lentur dan torsi yang menggambarkan perilaku dinamis rangka. Hasil analisis menunjukkan bahwa *Structural Steel* memiliki frekuensi alami tertinggi sebesar 110,21 Hz, diikuti oleh Titanium Alloy sebesar 97,91 Hz, dan *Epoxy Carbons* sebesar 77,04 Hz. Nilai ini menunjukkan bahwa semakin besar kekakuan material, semakin tinggi pula frekuensi alaminya. Berdasarkan hasil visualisasi, deformasi terbesar terjadi pada bagian *roll-bar* dan penopang belakang, terutama pada material komposit, sedangkan material logam menunjukkan deformasi yang lebih kecil. Dengan demikian, *Structural Steel* memiliki kestabilan terbaik, sementara *Epoxy Carbon* lebih unggul dari segi bobot ringan meskipun memerlukan penguatan tambahan.

Penelitian ini telah mencapai tujuan yang ditetapkan, yaitu mengetahui pengaruh jenis material terhadap frekuensi alami rangka kendaraan listrik. Hasil yang diperoleh dapat menjadi dasar dalam pemilihan material yang tepat untuk desain rangka yang kuat, ringan, dan stabil terhadap getaran.

Berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar penelitian berikutnya melakukan pengujian

eksperimental untuk memvalidasi hasil simulasi numerik. Selain itu, perlu dilakukan analisis frekuensi agar dapat dibandingkan dengan hasil simulasi dan memastikan tidak terjadi resonansi. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk melakukan optimasi geometri rangka agar diperoleh desain yang lebih efisien. Material *Epoxy Carbon* dapat dikembangkan lebih lanjut dengan variasi orientasi serat untuk meningkatkan kekakuan tanpa menambah massa secara signifikan.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan melalui analisis *modal analysis* menggunakan perangkat lunak ANSYS 2024 R1 terhadap rangka, dapat disimpulkan bahwa struktur rangka memiliki karakteristik getaran yang stabil. Enam mode awal menunjukkan frekuensi mendekati nol yang menandakan gerakan *rigid body*, sedangkan mulai dari mode ke-7 hingga ke-12 terjadi getaran lentur dan torsi yang menggambarkan perilaku dinamis rangka. Hasil analisis menunjukkan bahwa *Structural Steel* memiliki frekuensi alami tertinggi sebesar 110,21 Hz, diikuti oleh *Titanium Alloy* sebesar 97,91 Hz, dan *Epoxy Carbon* sebesar 77,04 Hz. Nilai ini menunjukkan bahwa semakin besar kekakuan material, semakin tinggi pula frekuensi alaminya. Berdasarkan hasil visualisasi, deformasi terbesar terjadi pada bagian *roll-bar* dan penopang belakang, terutama pada material komposit, sedangkan material logam menunjukkan deformasi yang lebih kecil. Dengan demikian, *Structural Steel* memiliki kestabilan terbaik, sementara *Epoxy Carbon* lebih unggul dari segi bobot ringan meskipun memerlukan penguatan tambahan.

Penelitian ini telah mencapai tujuan yang ditetapkan, yaitu mengetahui pengaruh jenis material terhadap frekuensi alami rangka kendaraan listrik. Hasil yang diperoleh dapat menjadi dasar dalam pemilihan material yang tepat untuk desain rangka yang kuat, ringan, dan stabil terhadap getaran.

Berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar penelitian berikutnya melakukan pengujian eksperimental untuk memvalidasi hasil simulasi

numerik. Selain itu, perlu dilakukan analisis frekuensi agar dapat dibandingkan dengan hasil simulasi dan memastikan tidak terjadi resonansi. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk melakukan optimasi geometri rangka agar diperoleh desain yang lebih efisien. Material *Epoxy Carbon* dapat dikembangkan lebih lanjut dengan variasi orientasi serat untuk meningkatkan kekakuan tanpa menambah massa secara signifikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, semangat, dan kontribusi positif selama proses penelitian ini berlangsung. Terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang yang telah memberikan fasilitas, sarana, dan dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian ini.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang berharga dalam penyusunan penelitian ini. Tidak lupa, apresiasi yang sebesar-besarnya saya berikan kepada rekan-rekan mahasiswa dan tim laboratorium yang telah membantu dalam proses simulasi dan analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS, baik dalam aspek teknis maupun non-teknis. Kerja sama dan dukungan yang terjalin selama penelitian ini menjadi bagian penting dalam menyelesaikan setiap tahapan penelitian dengan baik.

Saya juga memberikan apresiasi kepada diri saya sendiri atas ketekunan dan dedikasi yang senantiasa dijaga selama menjalani seluruh proses penelitian ini. Setiap langkah dan tantangan yang dihadapi menjadi pengalaman berharga dalam memperdalam pemahaman serta meningkatkan kemampuan di bidang teknik mesin.

REFERENSI

- [1] I. E. Agency, "Global EV Outlook 2024 Moving towards increased affordability," 2024.

- [2] International Energy Agency, "Electric Vehicles," 2024, [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>
- [3] J. Zhang, Z. Wang, P. Liu, and Z. Zhang, "Energy consumption *analysis* and prediction of electric vehicles based on real-world driving data," *Appl Energy*, vol. 275, no. 5, p. 115408, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115408.
- [4] P. Wang, "Effect of electric battery mass distribution on electric vehicle movement safety," *Vibroengineering Procedia*, vol. 33, pp. 78–83, 2020, doi: 10.21595/vp.2020.21569.
- [5] O. Zamzam, A. A. Ramzy, M. Abdelaziz, T. Elnady, and A. A. A. El-Wahab, "Structural performance evaluation of electric vehicle chassis under static and dynamic loads," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1–20, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-86924-w.
- [6] M. Khatib, M. Shaik, R. Kumar, and M. Imad, *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP): A New Alternative to Steel and Aluminium for Lightweight Materials for Automotive Applications*. 2024.
- [7] P. Jeyapandiarajan, G. Kalaiarassan, J. Joel, R. Shirbhate, F. Felix Telare, and A. Bhagat, "Design and *Analysis* of Chassis for an Electric Motorcycle," *Mater Today Proc*, vol. 5, no. 5, pp. 13563–13573, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.352.
- [8] L. Shaobin and C. Guoqiang, "Modal *Analysis* of the Light Electric Sanitation Vehicle Frame," vol. 3, no. 10, pp. 3–7, 2018.
- [9] J. Zhang and W. Ran, "Lightweight Optimization Design of a Light Electric Commercial Vehicle Frame," *J Phys Conf Ser*, vol. 1939, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1939/1/012038.
- [10] R. Kuziak, R. Kawalla, and S. Waengler, "Advanced high strength steels for automotive industry: A review," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 103–117, 2008, doi: 10.1016/s1644-9665(12)60197-6.
- [11] "Version of Record: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509316303732>," 2016.
- [12] H. Rahmani, S. H. M. Najafi, and A. Ashori, "Mechanical performance of *epoxy/Carbon fiber laminated Composites*," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 8, pp. 733–740, 2014, doi: 10.1177/0731684413518255.
- [13] "Carbon steel," *Encyclopedic Dictionary of Polymers*, pp. 158–158, 2007, doi: 10.1007/978-0-387-30160-0_1896.
- [14] C. Composition, "Data Sheet 6Al-4V Titanium," 1950.
- [15] Hexcel *Composites*, "Product data HexPly 8552," *Hexcel*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2000.
- [16] H. Jaiswal, A. Kumar, A. Anand, and P. P. Patil, "Free Vibration *Mode shape Analysis* of Space Frame Chassis of a Sports Car based on FEA Introduction Sports Car Chassis Function of Chassis Frame Cad Model of Space Frame Chassis," vol. 1, no. 3, pp. 25–27, 2014.
- [17] C. Website, "Mechanical Vibrations Sixth Edition in SI Units Access for".
- [18] O. P. Structures, Y. Dou, J. Zhang, X. Wen, H. Cheng, and H. Liu, "Free Vibration Characteristics of CFRP Laminate with," 2023.
- [19] K. V. Nikhil *et al.*, "Experimental investigation on vibration characteristics and damping factor of coir fiber reinforced polyester *Composite* material," *Discover Applied Sciences*, vol. 7, no. 5, 2025, doi: 10.1007/s42452-025-07013-1.
- [20] H. S. Sharath Chandra, K. S. Lokesh, G. Ravindra Babu, D. Shrinivasa Mayya, and J. R. Naveen Kumar, "Impact of fibre orientation on mechanical properties of GFRP *Composites*," *Mater Today Proc*, vol. 92, no. December, pp. 78–83, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.754.
- [21] V. Chintada, C. R. Seela, and V. R. Matta, "Modal and static *analysis* of automotive chassis frame by using FEA," *International*

Journal of Applied Engineering Research,
vol. 10, no. 20, pp. 19775–19777, 2015.

- [22] L. Zhu, J. Meng, L. Chen, and X. Hu, “Experimental Investigation and In-Situ Testing of Traffic-Induced Vibrations on the Adjacent Ruins of an Ancient Cultural Sites,” *Applied Sciences*, vol. 13, p. 13347, Dec. 2023, doi: 10.3390/app132413347.
- [23] I. Ullah and E. M. Amin, “STATIC AND DYNAMIC FINITE ELEMENT *ANALYSIS* (FEA) OF LEAF SPRING Student of,” pp. 31–35.
- [24] H. Estrada and L. S. Lee, “Mechanics of Composite materials,” *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*, pp. 51–78, 2013, doi: 10.1115/1.3423688.