

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, akan dijelaskan mengenai teori dasar yang menjadi acuan penelitian yang dilaksanakan. Penjelasan meliputi penelitian tedahulu, konsep dasar kendaraan rangka mobil listrik, teori dasar mekanika struktur, *safety factor* serta *finite element analysis* (FEA).

2.1 Penelitian Terdahulu

(Arun et al., 2021) menunjukkan bahwa variasi material dan desain penampang berpengaruh signifikan terhadap kekuatan dan massa rangka, di mana aluminium alloy mampu menurunkan berat hingga sekitar 50% tanpa melampaui batas luluh material.

(Supriyanto et al., 2023) dan (Saefudin et al., 2023) menunjukan bahwa tubular space frame mobil listrik berada dalam batas aman berdasarkan nilai tegangan, defleksi, dan *safety factor* hasil analisis statis.

(Lei Yang & Qiang Li, 2017), (Chun Ren & Xiang Guo, 2022) serta (P Baskara Sethupathi et al., 2018) membuktikan bahwa optimasi desain rangka mampu mengurangi massa struktur secara signifikan tanpa meningkatkan tegangan melebihi batas aman.

(Wu et al., 2025) juga menunjukkan bahwa optimasi berbasis FEM menghasilkan penurunan berat rangka sebesar 10,7% dengan distribusi tegangan yang tetap memenuhi kriteria kekuatan.

2.2 Mobil Listrik

Mobil listrik merupakan kendaraan yang digerakkan oleh satu atau beberapa motor listrik, dengan sumber energi berasal dari baterai isi ulang atau media penyimpanan energi lainnya. Motor listrik pada mobil ini menghasilkan torsi secara instan, sehingga mampu memberikan akselerasi yang cepat dan mulus (Kusuma et al., 2025).

Kemajuan teknologi dalam beberapa dekade terakhir, terutama dalam hal baterai dan sistem pengisian daya telah membuat mobil listrik semakin menarik bagi konsumen dan produsen. Ilustrasi mobil listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2.1 Mobil listrik

(OONA, 2026)

2.2.1 Rangka Mobil Listrik

Sasis adalah bagian yang terletak di bagian bawah mobil yang menopang dan membawa semua komponen yang ditempatkan di atasnya, seperti mesin, sistem kemudi, jok, dan beban pengemudi. Sasis yang biasa digunakan pada kendaraan yaitu, *backbone chassis frame*, *ladder chassis*, *tubular space frame*, dan *monocoque*

(Saefudin et al., 2023). Rangka mobil listrik diperlihatkan pada Gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 Sasis mobil

(Otospector, 2016)

2.3 Mobil KMLI

Kompetisi Mobil Listrik Indonesia (KMLI) adalah ajang kompetisi mahasiswa tingkat nasional yang rutin diadakan sejak 2009, terutama oleh Politeknik Negeri Bandung (POLBAN). Kompetisi ini diadakan sebagai upaya untuk menampung dan meningkatkan kreativitas mahasiswa di bidang teknologi transportasi, selain itu kompetisi ini bertujuan untuk meningkatkan kesadaran dalam menanggapi isu global tentang lingkungan hidup dan energi yaitu mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) untuk mengurangi kerusakan lapisan ozon dengan cara menciptakan teknologi yang ramah lingkungan dan mengurangi pemakaian bahan bakar minyak. Melalui kegiatan kompetisi ini diharapkan dapat mengarahkan minat mahasiswa kepada kegiatan yang positif, produktif, inovatif, dan kompetitif dengan tetap mempertahankan silaturahmi antar mahasiswa dari berbagai Perguruan Tinggi dan disiplin ilmu demi kesuksesan mereka di masa depan.

2.3.1 Regulasi KMLI

Pada penyelenggaraan KMLI XIV Tahun 2026, panitia menetapkan sejumlah regulasi teknis yang menjadi acuan wajib dalam perancangan dan pembuatan rangka mobil listrik, dengan tujuan menjamin keseragaman dimensi antar peserta, keselamatan pengemudi, serta kelayakan konstruksi kendaraan yang dikompetisikan. Berdasarkan Pasal 1 Peraturan KMLI XIV Tahun 2026, *chassis*/rangka didefinisikan sebagai struktur material yang menjadi penopang seluruh komponen dan pengemudi pada mobil listrik.

A. Spesifikasi Dimensi dan Berat Kendaraan

Berdasarkan regulasi KMLI XIV 2026 pada pasal 9 dan pasal 24 menetapkan batasan dimensi dan berat yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Ketentuan dimensi dan berat

No.	Parameter	Ketentuan
1	Lebar kendaraan	120-140 cm
2	Jarak sumbu roda	≥ 2 m
3	Berat total kendaraan (tanpa pengemudi)	Min 125 kg
4	Minimal berat pengemudi	Min 50 kg

B. Spesifikasi Kelistrikan

Perancangan sistem kelistrikan mobil listrik pada penelitian ini mengacu pada Peraturan Kompetisi Mobil Listrik Indonesia (KMLI) XIV Tahun 2026, khususnya Pasal 9 tentang Spesifikasi Mobil Listrik. Batasan teknis kelistrikan yang ditetapkan oleh panitia adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Ketentuiuan kelistrikan kendaraan

No.	Parameter	Batasan
1.	Jenis baterai	Kering/basah/semi kering komersial (disarankan lipo)
2.	Tegangan baterai maksimum	46 Volt
3.	Kapasitas baterai maksimum	2.2 kWh
4.	Daya motor maksimum	2 kW

C. Spesifikasi Roll Bar dan Keselamatan Struktur

Sebagai bagian dari upaya menjamin keselamatan pengemudi, Pasal 10 regulasi KMLI XIV 2026 mengatur ketentuan konstruksi *roll bar* sebagai berikut:

- Minimal tinggi *roll bar* adalah 5 cm dari helm pengemudi.
- Material *roll bar* berupa pipa besi tanpa sambungan berdiameter minimal 1 inch dengan ketebalan minimal 2 mm.
- Penyambungan *roll bar* ke rangka utama dapat dilakukan dengan pengelasan langsung atau menggunakan mekanisme baut dengan total pengunci minimal 4×M10.

Selain itu, mobil harus memiliki konstruksi yang memadai untuk melindungi pengemudi, dengan bagian bahu hingga kepala pengemudi tetap terlihat dan tidak terhalang oleh body kendaraan.

2.4 Teori Dasar Mekanika Struktur

Mekanika struktur mempelajari hubungan antara gaya luar, tegangan, regangan, dan deformasi pada suatu struktur. Tegangan lentur, geser, dan torsi merupakan jenis tegangan utama yang bekerja pada rangka kendaraan. Hubungan antara tegangan dan

regangan mengikuti hukum *Hooke* selama material berada pada daerah elastis.

2.4.1 Tegangan

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai intensitas gaya yang bekerja pada suatu material per satuan luas penampang. Dalam analisis rangka mobil listrik, baik kondisi statis dan dinamis, salah satu parameter penting yang mempengaruhi distribusi tegangan dan deformasi adalah luas penampang dari komponen yang menerima beban. Tegangan dapat dicari menggunakan persamaan 2.1 (Santoso et al., 2022).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Keterangan :

σ = Tegangan Normal (Pa, N/m^2)

F = Gaya (N, lbf, kgf)

A = Luas penampang (cm^2 , $inch^2$, mm^2)

Von mises stress adalah tegangan yang nilainya didapat dari teori kegagalan karena energi distorsi. Pengujian tegangan *von mises* bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan kritis yang terjadi pada material saat diberikan beban pada titik tertentu serta menentukan kegagalan material atau tidak. Jika tegangan *von mises* yang dihasilkan pada suatu titik melebihi batas kekuatan material dari bahan tersebut, maka dapat diindikasikan bahwa benda tersebut berpotensi mengalami deformasi permanen atau bahkan kegagalan. Tegangan *von mises* dapat dicari dengan persamaan 2.2 (Santoso et al., 2022).

$$\sigma_y = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_2\sigma_3)^2 + (\sigma_2\sigma_3)^2 + (\sigma_3\sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Keterangan:

σ_y = Tegangan *Von Mises* (Mpa)

$\sigma_{1,2,3}$ = Tegangan Prinsipal (Mpa)

Tegangan dibedakan menjadi 2 yaitu tegangan normal dan tegangan geser.

1. Tegangan Normal

Tegangan normal merupakan intensitas gaya yang bekerja pada suatu material per satuan luas penampang. Untuk pembahasan aksial (tarik/tekan) pada batang lurus, besar tegangan normal rata-rata dirumuskan yang dijelaskan pada persamaan 2.1.

2. Tegangan Geser

Tegangan geser adalah gaya per satuan luas yang bekerja sejajar terhadap permukaan penampang material. Umumnya pada struktur rangka mobil listrik KMLI menggunakan pipa baja atau aluminium dengan penampang yang dianalisis berbentuk lingkaran berlubang (*hollow circular section*). Dalam mencari tegangan geser pada suatu penampang dapat menggunakan persamaan 2.3 (Santoso et al., 2022) :

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} \quad (2.3)$$

Keterangan:

τ = Tegangan geser (Pa)

V = Gaya geser (N)

Q = Momen pertama pada bidang

I = Momen inersia

b = Lebar Penampang

Dalam analisis statis, rumus ini digunakan untuk memeriksa kemampuan rangka

dalam menahan torsi akibat beban lateral atau gaya dari suspensi dan mesin, sedangkan pada analisis dimanis, tegangan geser pada penampang lingkaran berlubang mejadi penting dalam simulasi getaran torsi.

2.4.2 Regangan

Regangan merupakan perubahan bentuk persatuan panjang pada suatu batang. Regangan terjadi akibat adanya dua gaya yang sama besar dan saling berlawanan arah sehingga terjadi perubahan bentuk atau ukuran. Regangan dapat dicari menggunakan hukum *hooke*, dimana Hukum *hooke* menggunakan persamaan tegangan berbanding lurus dengan nilai regangan. Elastisitas material yang berhubungan antara tegangan dan regangan akibat beban yang diterima didefinisikan sebagai hukum *hooke*. Regangan dapat dihitung menggunakan rumus persamaan 2.4 (Callister William D et al. 2020) dibawah ini:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

Keterangan:

ε = Regangan

L_0 = Panjang mula-mula (m)

L = Panjang setelah diberi gaya (m)

ΔL = Panjang atau penambahan panjang (m)

2.4.3 Deformasi

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau ukuran suatu material akibat gaya eksternal yang bekerja padanya. Dalam mekanika material, deformasi biasanya dinyatakan dalam bentuk regangan (*strain*), yaitu perbandingan antara perubahan

panjang terhadap panjang awal suatu elemen struktur. Deformasi dapat dibedakan menjadi deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis terjadi ketika material masih berada dalam batas elastis sehingga mampu kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan, sedangkan deformasi plastis bersifat permanen karena material telah melampaui batas elastisnya (Gere & Goodno, 2013).

Elastisitas bahan sangat ditentukan oleh modulus elastisitas. Modulus elastisitas suatu bahan didapat dari hasil bagi antara tegangan dan regangan. Dapat juga diketahui menggunakan rumus persamaan 2.5 (Callister William D et al. 2020) dibawah ini:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ atau } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.5)$$

Keterangan:

E = Modulus elastisitas

ε = Regangan

σ = Tegangan

2.5 Hukum Newton

Hukum newton merupakan dasar utama dalam mekanika klasik yang menjadi acuan untuk memahami gerak benda serta interaksi gaya. Hukum Newton I, dikenal sebagai hukum inersia, menyatakan bahwa suatu benda akan tetap diam atau bergerak lurus beraturan apabila tidak ada gaya yang bekerja padanya (Halliday & Resnick, 2014).

Dalam konteks sepeda motor listrik, rangka akan tetap stabil tanpa mengalami deformasi apabila tidak ada gaya luar yang diberikan. Namun, saat kendaraan menerima beban dari pengendara, komponen, maupun kondisi jalan, rangka mengalami reaksi berupa tegangan dan deformasi yang dapat dianalisis melalui

simulasi statis. Hukum Newton II menjelaskan hubungan antara gaya, massa, dan percepatan yang dirumuskan pada persamaan 2.6 (Halliday & Resnick, 2014).

$$\sum F = m \times a \quad (2.6)$$

Keterangan :

F = Gaya (N)

m = massa (Kg)

a = percepatan m/s^2

Prinsip ini relevan dalam menganalisis pembebanan dinamis pada rangka sepeda motor listrik, terutama saat mengalami akselerasi maupun deselerasi. Gaya yang timbul akibat deselerasi kendaraan ketika pengereman akan menimbulkan beban tambahan pada rangka yang perlu diperhitungkan dalam simulasi. Dengan simulasi dinamis berbasis metode elemen hingga (FEA), dapat dianalisis distribusi tegangan dan perubahan deformasi rangka ketika menerima gaya transien akibat kondisi operasional yang berubah

2.6 Gaya Hambat Aerodinamis (*Aerodynamic Drag Force*)

Gaya hambat aerodinamis merupakan gaya perlawanan yang dialami suatu benda saat bergerak melewati fluida. Pada kendaraan bermotor, gaya hambat udara bekerja berlawanan dengan arah gerak kendaraan dan menjadi salah satu komponen beban eksternal yang signifikan, terutama pada kecepatan tinggi. Dalam kondisi pengereman, gaya hambat udara bersifat aditif terhadap gaya perlambatan sehingga harus diperhitungkan untuk memperoleh analisis pembebanan yang komprehensif pada rangka kendaraan (Hucho, 1987).

Gaya hambat aerodinamis (F_D) dihitung menggunakan persamaan 2.7 berikut (Barnard, 2009):

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho \times C_D \times A \times V^2 \quad (2.7)$$

Keterangan:

F_D = Gaya hambat aerodinamis (N).

ρ = Massa jenis udara (kg/m³).

C_D = Koefisien hambat aerodinamis.

A = Luas penampang frontal kendaraan (m²).

v = Kecepatan kendaraan sebelum pengereman (m/s).

Bersama dengan gaya inersia pengereman, gaya hambat aerodinamis memperbesar total beban longitudinal yang diterima rangka pada saat pengereman, sehingga memberikan gambaran kondisi pembebanan yang lebih realistis dan komprehensif.

2.7 *Safety factor*

Safety factor merupakan perbandingan antara kekuatan maksimum struktur dengan beban yang sebenarnya. Fungsi dari *safety factor* adalah untuk menghindari kegagalan sebuah struktur sehingga tidak terjadi hal yang tidak diinginkan. Berikut ini nilai dari faktor-*safety factor*, yaitu:

1. Nilai 1,25 hingga 2,0 didapatkan dalam struktur dan beban statis dengan kepastian nilai tang tinggi pada perancangan data.
2. Nilai 2,0 hingga 2,5 didapatkan pada struktur statis dan beban dinamis dengan kepastian nilai rata-rata terhadap perancangan data.

3. Nilai 2,5 hingga 4,0 didapatkan pada struktur statis dan beban dinamis dengan ketidakpastian beban, material, dan lingkungan.
4. Nilai > 4,0 didapatkan pada struktur statis dengan beban dinamis yang memiliki variasi beban, material, dan lingkungan. (Nani Mulyaningsih et al., 2023).

Adapun rumus yang digunakan untuk mengetahui *safety factor* dari suatu material dalam perencanaan elemen mesin dirumuskan pada persamaan 2.8 berikut:

$$sf = \frac{\sigma_y}{\sigma_{actual}} \quad (2.8)$$

Keterangan:

Sf = *Safety factor*

σ_y = Tegangan luluh material

σ_{actual} = Tegangan kerja aktual

2.8 Optimasi Desain

Optimasi diartikan sebagai suatu bentuk mengoptimalkan sesuatu hal yang sudah ada, ataupun merancang dan membuat sesuatu secara optimal. Optimasi desain sendiri merupakan perancangan yang bertujuan memperoleh desain rangka yang paling optimal dengan mempertimbangkan berbagai kinerja struktural (Thanh Tam et al., 2023). Dalam konteks mobil listrik KMLI, optimasi desain rangka harus mempertimbangkan batasan regulasi kompetisi, kondisi pembebanan aktual, serta kemudahan manufaktur.

2.9 Finite Element Analysis (FEA)

Dalam perancangan rangka kendaraan listrik, FEA berperan penting sebagai alat evaluasi desain untuk memastikan bahwa struktur rangka mampu menahan beban

statik maupun dinamik yang bekerja selama kondisi operasional. (Wu et al., 2025) menyatakan bahwa penerapan FEA pada rangka kendaraan listrik memungkinkan perancang untuk mengidentifikasi daerah kritis yang mengalami konsentrasi tegangan dan deformasi berlebih, sehingga dapat dilakukan perbaikan desain secara efisien tanpa meningkatkan massa struktur secara signifikan.

2.9.1 Analisa Konvergensi, Uji Grid Independence dan Mesh Quality

Hasil analisis tegangan pada rangka mobil KMLI sangat dipengaruhi oleh pemilihan tipe meshing dan jumlah elemen yang digunakan dalam proses diskritisasi struktur. Salah satu parameter yang umum digunakan untuk mengevaluasi kualitas mesh adalah nilai *skewness* (Gunawan et al., 2021). Uji konvergensi dilakukan dengan membandingkan hasil analisis dari beberapa variasi mesh pada objek yang sama. Apabila perbedaan hasil yang diperoleh masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima, maka mesh tersebut dapat dikatakan telah mendiskritisasi struktur dengan baik atau berada pada kondisi *konvergen*. Kualitas mesh juga dapat dievaluasi berdasarkan nilai *skewness* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 *Skewness mesh metrics spectrum*

<i>Skewness Mesh Metrics Spretum</i>	
Katagori	Rentang Nilai
<i>Excellent</i>	0 – 0.25
<i>Very Good</i>	0,25 – 0.50
<i>Good</i>	0.50 – 0.80
<i>Acceptable</i>	0.80 – 0.94
<i>Bad</i>	0.95 – 0.97

Grid independence test merupakan tahapan penting dalam validasi simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (*finite element method* / FEM), termasuk yang dilakukan menggunakan *numerical software*. Tujuan utama dari pengujian ini adalah memastikan bahwa hasil simulasi, baik pada analisis statis maupun dinamis, tidak bergantung pada ukuran atau kerapatan elemen mesh yang digunakan.