



Simulasi Kekuatan Rangka Trainer Sepeda Listrik sebagai Media Pembelajaran SMK dengan Metode Analisis Elemen Hingga

Finite Element Analysis (FEA) of an Electric Bicycle Trainer Frame as a Vocational Learning Medium

Wendika Okvianda^{1*}, Ahmad Arif¹, Wawan Purwanto¹, M. Yasep Setiawan¹, Jheri Hermanto²

Abstrak

Penelitian ini menganalisis kekuatan struktural rangka trainer sepeda listrik sebagai media pembelajaran di SMK. Rangka dirancang dari pipa baja dan dianalisis menggunakan simulasi *Finite Element Analysis* pada perangkat lunak SolidWorks 2021. Tiga material dibandingkan, yaitu Baja *Chromoly* SAE 4130, Aluminium 6061-T6, dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015). Pembebanan statis 120 kg diterapkan pada titik dudukan pengendara, dengan tumpuan tetap pada titik hubung rangka sehingga diperoleh distribusi tegangan *von Mises*, *displacement*, dan *safety factor*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Baja *Chromoly* SAE 4130 memiliki kombinasi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan paling baik, sedangkan Aluminium 6061-T6 menghasilkan *displacement* terbesar dan *Hi-Ten Steel* memiliki margin keamanan terendah. Nilai *Safety Factor Minimum* seluruh material masih kurang dari satu, sehingga desain rangka perlu dioptimasi. Temuan ini menjadi dasar pemilihan material dan perbaikan desain rangka trainer sepeda listrik di lingkungan pendidikan vokasi untuk mendukung pembelajaran berbasis praktik rekayasa.

Kata Kunci

Trainer sepeda listrik; rangka; analisis elemen hingga; tegangan von Mises; faktor keamanan; Baja Chromoly SAE 4130; SolidWork

Abstract

This study analyzes the structural strength of an electric bicycle trainer frame used as an instructional medium in vocational high schools. The frame is constructed from steel pipes and evaluated through Finite Element Analysis simulation using SolidWorks 2021. Three materials are compared, namely Chromoly Steel SAE 4130, Aluminum 6061-T6, and Hi-Ten Steel (AISI 1015). A static load of 120 kg is applied at the rider's seat with fixed supports at frame joints to obtain the distribution of Von Mises Stress, displacement, and safety factor. The results indicate that Chromoly Steel SAE 4130 provides the most favorable combination of Stress, deformation, and structural safety, while Aluminum 6061-T6 exhibits the largest displacement and Hi-Ten Steel the lowest safety margin. The minimum safety factor of all materials is still below one, so the frame design requires optimization. These findings guide material selection and frame redesign for engineering practice-oriented vocational education.

Keywords

Electric bicycle trainer; frame; Finite Element Analysis; Von Mises Stress; safety factor; Chromoly steel SAE 4130; SolidWorks simulatio

¹ Departemen Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jln. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar, Padang Sumatera Barat, Indonesia

² Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau

* wendika.okvianda@gmail.com

Dikirimkan: 7 Oktober 2025. Diterima: 10 November 2025. Diterbitkan: 28 November 2025.

PENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik menjadi salah satu solusi atas permasalahan lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan bahan bakar fosil. Sepeda listrik hadir sebagai alternatif transportasi ramah lingkungan dengan keunggulan bebas emisi dan hemat energi [1]. Salah satu komponen vital pada sepeda listrik adalah sasis, yang berfungsi menopang beban pengendara sekaligus menentukan tingkat kenyamanan dan keselamatan berkendara [2]. Struktur rangka pada sepeda listrik memegang peran krusial dalam menopang seluruh beban kendaraan. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang cermat dan tepat guna memastikan performa rangka yang optimal, baik dari segi kekuatan maupun kenyamanan penggunaan [3]. Saat ini terdapat berbagai jenis rangka yang dibedakan berdasarkan bentuk desain dan bahan pembuatannya, di mana masing-masing memiliki keunggulan dan fungsi yang berbeda sesuai dengan kebutuhan penggunaan [4].

Implementasi trainer sepeda listrik sebagai media belajar merupakan strategi progresif dalam mengintegrasikan pendekatan pendidikan modern dengan pemanfaatan teknologi praktis [5]. Trainer sepeda listrik digunakan dalam pembelajaran di SMK untuk memperkenalkan sistem kendaraan listrik secara langsung kepada peserta didik. Agar aman digunakan, rangka trainer harus memiliki kekuatan dan ketahanan yang memadai terhadap beban dinamis maupun statis [6].

Salah satu pendekatan yang efisien untuk menganalisis kekuatan suatu rangka adalah metode *Finite Element Analysis* (FEA). Metode ini berfungsi sebagai alat analisis numerik yang mampu memprediksi respons struktur terhadap beban yang bekerja, sehingga distribusi tegangan, regangan, serta perpindahan pada setiap titik simpul dapat dihitung dan divisualisasikan secara akurat [7]. *Finite Element Analysis* (FEA) memungkinkan evaluasi terperinci terhadap kekuatan dan perilaku struktur. Pemanfaatan FEA dalam perangkat lunak SolidWorks memungkinkan analisis tegangan, deformasi, serta faktor keamanan dilakukan secara lebih sistematis dan akurat [8].

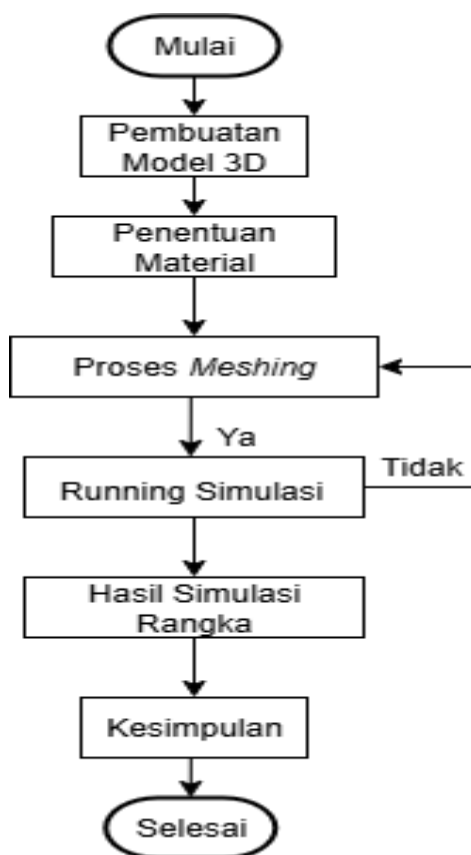
Rangka sepeda motor merupakan struktur utama yang menjamin kestabilan kendaraan dengan menanggung beban seluruh komponen serta berat pengendara. Selain itu, rangka dirancang agar mampu menghadapi beban tambahan yang muncul akibat kondisi jalan yang buruk [9]. Konstruksi rangka yang kuat sangat diperlukan, namun tetap harus ringan agar energi dari sistem penggerak dapat dimanfaatkan secara optimal [10]. Untuk mengetahui ketahanan rangka, digunakan metode analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*) yang dapat dijalankan melalui berbagai aplikasi simulasi, salah satunya Autodesk Inventor Simulation Mechanical [11]. SolidWorks termasuk dalam kategori perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) yang dirancang untuk membantu pengguna dalam membuat, memvisualisasikan, dan menganalisis model tiga dimensi dengan presisi tinggi, serta dikenal memiliki antarmuka yang ramah pengguna. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh SolidWorks Corporation, yang saat ini berada di bawah naungan *Dassault Systèmes*, dan telah menjadi salah satu alat penting dalam pengembangan teknologi, khususnya dalam bidang desain teknik dan rekayasa [12].

Penelitian ini bertujuan menganalisis performa rangka trainer sepeda listrik berbasis simulasi FEA dengan membandingkan tiga jenis material, yaitu Baja *Chromoly* SAE 4130, Aluminium 6061-T6, dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015). Baja *Chromoly* SAE 4130 memiliki karakteristik ulet dan tahan terhadap paparan panas, sehingga banyak digunakan dalam pembuatan rangka sepeda motor, kendaraan performa tinggi, serta pesawat berukuran ringan [13]. Material Aluminium 6061-T6 mudah diproduksi serta dapat dibentuk menjadi berbagai jenis produk, misalnya strip, lembaran, pelat, batang, kawat, pipa, tabung, bagian ekstrusi, hasil tempa, hingga komponen struktural yang diaplikasikan pada sepeda [14]. Baja tarik tinggi (*Hi-Ten*) merupakan paduan yang didominasi karbon dengan sedikit tambahan mangan serta

elemen minor lainnya. Melalui perlakuan tertentu, baja ini dirancang agar memiliki kekuatan lebih tinggi, kelenturan yang baik, dan keuletan yang memadai [15]. Novelty penelitian ini terletak pada penerapan FEA untuk pemilihan material terbaik dalam pengembangan trainer sepeda listrik sebagai media pembelajaran di SMK.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen, yaitu metode penelitian yang dilakukan secara sistematis untuk menguji hubungan sebab-akibat antara variabel-variabel tertentu [16]. Dalam konteks penelitian ini, eksperimen dilakukan secara virtual melalui simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA). Objek penelitian adalah rangka trainer sepeda listrik yang dikonstruksi dari pipa baja dengan diameter luar 17-49 mm dan tebal 2 mm. Model rangka yang dianalisis merupakan representasi rangka trainer yang digunakan sebagai media pembelajaran di SMK. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2021. Secara umum, tahapan penelitian ditunjukkan pada Diagram Alur Penelitian ([Gambar 1](#)), yang dimulai dari pembuatan model rangka hingga penarikan kesimpulan. Tahapan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Pembuatan model 3D rangka

Tahap awal diawali dengan (Mulai) pemodelan geometri rangka trainer sepeda listrik dalam bentuk model tiga dimensi (3D). Pemodelan dilakukan dengan mengacu pada dimensi aktual rangka dan konfigurasi sambungan pipa. Model 3D ini menjadi dasar untuk seluruh proses analisis selanjutnya.

Penentuan material uji

Setelah model rangka selesai, dilakukan penentuan material yang akan diuji, yaitu Baja *Chromoly* SAE 4130, Aluminium 6061-T6, dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015). Sifat mekanik masing-masing material (modulus elastisitas, kekuatan luluh, dan kekuatan tarik maksimum) dimasukkan ke dalam basis data material SolidWorks. Penentuan material ini sesuai dengan tahapan “Penentuan Material” pada [Gambar 1](#).

Penentuan pembebanan dan tumpuan

Pada tahap ini, diterapkan beban statis sebesar 120 kg pada titik dudukan pengendara untuk merepresentasikan beban pengendara beserta perlengkapan yang dibawa. Kondisi batas (tumpuan tetap) diberikan pada titik-titik penghubung rangka dengan *shock absorber*, *swing arm*, dan sistem kemudi, sehingga rangka diasumsikan tertahan secara kinematis pada titik tersebut. Tahapan ini memastikan bahwa kondisi operasi nyata rangka dapat terwakili dalam model simulasi.

Proses meshing

Model 3D rangka kemudian didiskretisasi menjadi elemen-elemen hingga melalui proses *meshing* (“Proses *Meshing*” pada [Gambar 1](#)). Kualitas *mesh* diperiksa berdasarkan kriteria tertentu (misalnya kontinuitas dan kehalusan elemen). Jika kualitas *mesh* belum memenuhi kriteria, proses *meshing* diulang kembali (alur “Tidak” pada [Gambar 1](#)) sampai diperoleh *mesh* yang dianggap memadai (alur “Ya”).

Running simulasi

Setelah *mesh* dinyatakan layak, dilakukan *Running* simulasi FEA di SolidWorks (“*Running* Simulasi” pada [Gambar 1](#)). Pada tahap ini program menghitung respon struktural rangka terhadap beban dan kondisi batas yang telah ditetapkan.

Pengambilan dan analisis hasil simulasi

Hasil simulasi berupa distribusi tegangan *von Mises*, *displacement* (perpindahan), dan *safety factor* pada rangka trainer (“Hasil Simulasi Rangka” pada [Gambar 1](#)). Nilai maksimum dari masing-masing parameter diambil untuk tiap material dan kemudian dibandingkan.

Penarikan kesimpulan

Tahap akhir adalah interpretasi hasil simulasi dan penarikan kesimpulan (“Kesimpulan” – “Selesai” pada [Gambar 1](#)) mengenai material yang paling layak digunakan untuk rangka trainer sepeda listrik.

Metode analisis yang digunakan adalah pendekatan deskriptif kuantitatif, yakni dengan membandingkan hasil numerik tiap material terhadap kriteria kelayakan struktur rangka kendaraan, sehingga diperoleh material dengan kombinasi kekuatan, kekakuan, dan faktor keamanan yang paling sesuai untuk aplikasi trainer sepeda listrik [16].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil simulasi FEA pada rangka trainer sepeda listrik dengan pembebanan statis 120 kg dan kondisi tumpuan sebagaimana dijelaskan pada bagian metode penelitian disajikan pada [Tabel 1](#). Tabel ini memuat nilai tegangan *von Mises* maksimum, *displacement* maksimum, serta nilai faktor keamanan minimum dan maksimum untuk masing-masing material yang diuji, yaitu Baja *Chromoly* SAE 4130, Aluminium 6061-T6, dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015).

Tabel 1. Hasil Simulasi

Material	Von Mises Stress (MPa)	Displacement (mm)	Safety Factor Min	Safety Factor Max
Baja <i>Chromoly</i> SAE 4130	891	12,1	0,516	3
Aluminium 6061-T6	551	21,3	0,499	3
<i>Hi-Ten Steel</i> (AISI 1015)	889	12,1	0,366	3

Berdasarkan Tabel 1, tegangan *von Mises* maksimum tertinggi terjadi pada rangka dengan material Baja *Chromoly* SAE 4130 sebesar 891 MPa, diikuti oleh *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) sebesar 889 MPa. Sementara itu, Aluminium 6061-T6 menghasilkan tegangan *von Mises* maksimum yang lebih rendah, yaitu 551 MPa. Perbedaan nilai tegangan ini menunjukkan adanya variasi respons struktur terhadap beban yang sama pada setiap jenis material, yang berkaitan dengan sifat mekanik dan kekakuan masing-masing material.

Dari sisi deformasi, material Aluminium 6061-T6 menunjukkan *displacement* maksimum terbesar, yakni 21,3 mm. Nilai ini hampir dua kali lipat *displacement* yang terjadi pada Baja *Chromoly* SAE 4130 dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015), yang keduanya memiliki *displacement* maksimum 12,1 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa rangka dengan material aluminium mengalami lendutan yang lebih besar di bawah pembebanan yang sama, sehingga kekakuan global struktur menjadi lebih rendah dibandingkan dua material baja yang diuji.

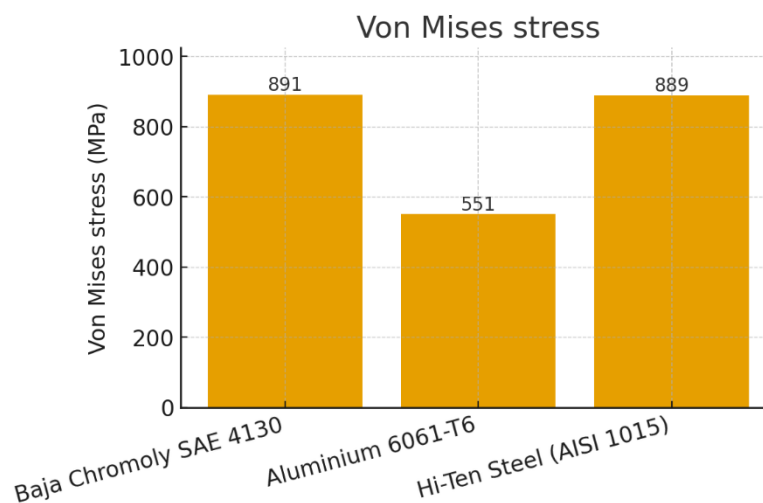
Nilai *safety factor* maksimum untuk ketiga material adalah sama, yakni 3, yang merepresentasikan batas atas faktor keamanan yang digunakan dalam simulasi. Namun, *Safety Factor Minimum* menunjukkan perbedaan yang cukup jelas. Material Baja *Chromoly* SAE 4130 memiliki nilai minimum tertinggi, yaitu 0,516, diikuti Aluminium 6061-T6 dengan nilai 0,499, sedangkan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) menunjukkan nilai minimum terendah, yaitu 0,366. Perbedaan nilai faktor keamanan minimum ini mengindikasikan bahwa, pada titik-titik kritis rangka, material *Hi-Ten Steel* bekerja lebih dekat dengan batas kekuatannya dibandingkan dua material lainnya.

Secara keseluruhan, data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa kombinasi antara tegangan *von Mises*, *displacement*, dan faktor keamanan memberikan gambaran komprehensif mengenai performa struktural rangka trainer sepeda listrik untuk masing-masing material. Hasil ini selanjutnya menjadi dasar dalam pembahasan untuk menentukan material yang paling sesuai digunakan pada rangka trainer sepeda listrik.

Pembahasan

Von Mises Stress

Analisis simulasi menunjukkan adanya perbedaan kemampuan masing-masing material dalam menahan tegangan akibat pembebanan statis 120 kg pada rangka trainer sepeda listrik. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, nilai tegangan *von Mises* maksimum tertinggi diperoleh pada material Baja *Chromoly* SAE 4130 sebesar 891 MPa, diikuti *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) sebesar 889 MPa, sedangkan Aluminium 6061-T6 menghasilkan tegangan maksimum yang lebih rendah, yaitu 551 MPa. Pola ini mengindikasikan bahwa untuk geometri rangka dan kondisi pembebanan yang sama, material dengan kekakuan lebih tinggi (baja) cenderung mentransfer beban dalam bentuk tegangan internal yang lebih besar, sementara material yang lebih elastis (aluminium) menunjukkan tegangan lebih rendah tetapi diikuti deformasi yang lebih besar, sebagaimana telah terlihat pada bagian hasil simulasi *displacement*.



Gambar 2. Hasil Pengujian *Von Mises Stress*

Dari sudut pandang kekuatan material, nilai tegangan *von Mises* maksimum ini menggambarkan sejauh mana tegangan kerja mendekati batas luluh masing-masing material. Baja *Chromoly* SAE 4130 dikenal memiliki kekuatan luluh dan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan Aluminium 6061-T6 dan *Hi-Ten Steel* AISI 1015. Dengan demikian, meskipun nilai tegangan *von Mises* pada Baja *Chromoly* dan *Hi-Ten Steel* hampir sama, Baja *Chromoly* masih memiliki cadangan kekuatan yang relatif lebih baik. Sebaliknya, tegangan 551 MPa pada Aluminium 6061-T6 dapat berada di atas atau sangat mendekati batas luluhnya, sehingga secara teoritis berpotensi memicu deformasi plastis apabila rangka menerima beban yang berulang atau lebih besar dari kondisi uji.

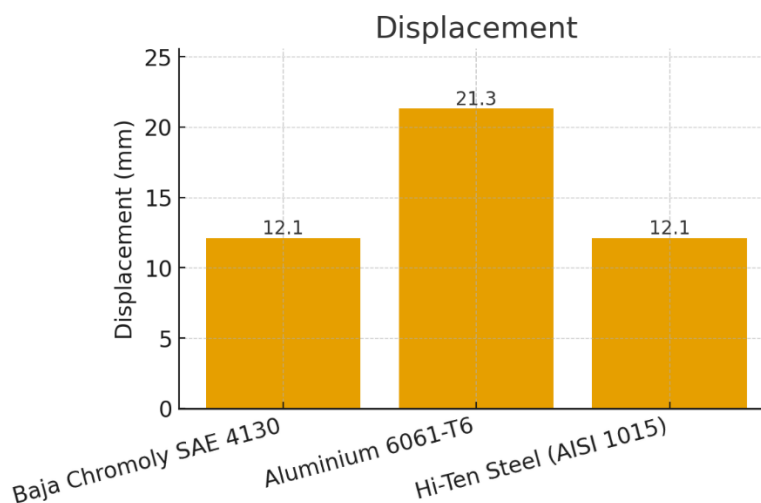
Secara struktural, tingginya tegangan *von Mises* mengindikasikan adanya area kritis pada rangka, terutama di sekitar titik tumpuan dan sambungan pipa yang menyalurkan beban dari dudukan pengendara ke *shock absorber*, *swing arm*, dan sistem kemudi. Pada area ini biasanya terjadi konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri (misalnya di sambungan las, perubahan diameter pipa, atau titik pertemuan beberapa elemen rangka). Jika tidak dioptimasi, area-area tersebut berpotensi menjadi titik awal kerusakan, seperti retak lelah (*fatigue*) maupun deformasi permanen ketika rangka digunakan secara berulang dalam jangka waktu panjang.

Implikasi utama dari hasil ini adalah bahwa pemilihan material rangka trainer sepeda listrik tidak dapat hanya mempertimbangkan nilai tegangan *von Mises* yang lebih rendah, tetapi harus dilihat secara terpadu dengan kekuatan luluh material, *displacement*, dan faktor keamanan. Dalam konteks penelitian ini, Baja *Chromoly* SAE 4130 menunjukkan kombinasi performa yang paling menguntungkan: tegangan relatif tinggi namun masih didukung oleh kekuatan material yang lebih besar dan *displacement* yang rendah, sehingga secara komparatif lebih aman dan kaku dibandingkan Aluminium 6061-T6 dan *Hi-Ten Steel* AISI 1015. Dengan demikian, hasil analisis tegangan *von Mises* pada Gambar 2 memberikan dasar yang kuat untuk merekomendasikan Baja *Chromoly* SAE 4130 sebagai kandidat material yang lebih layak untuk rangka trainer sepeda listrik, sekaligus menjadi masukan bagi perancangan ulang geometri rangka guna menurunkan konsentrasi tegangan pada titik-titik kritis.

Displacement

Analisis deformasi rangka trainer sepeda listrik menunjukkan perbedaan yang jelas antar material. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, nilai *displacement* maksimum untuk material Baja *Chromoly* SAE 4130 dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) adalah sama, yaitu 12,1 mm, sedangkan Aluminium 6061-T6 mengalami *displacement* yang jauh lebih besar, yaitu 21,3 mm. Perbedaan ini menandakan bahwa rangka yang dibuat dari aluminium mengalami lendutan

hampir dua kali lipat dibandingkan rangka berbahan baja pada kondisi pembebanan dan tumpuan yang identik.



Gambar 3. Hasil Pengujian *Displacement*

Secara mekanika, besarnya *displacement* sangat dipengaruhi oleh modulus elastisitas material. Baja *Chromoly* SAE 4130 dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) memiliki modulus elastisitas sekitar 205 GPa, sedangkan Aluminium 6061-T6 hanya sekitar 68,9 GPa [13]. Nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi menunjukkan material yang lebih kaku; konsekuensinya, untuk gaya yang sama, deformasi yang terjadi akan lebih kecil. Sebaliknya, material dengan modulus elastisitas rendah akan lebih mudah mengalami regangan, sehingga lendutan global struktur menjadi lebih besar. Pola ini konsisten dengan hasil simulasi: kedua jenis baja menghasilkan *displacement* yang relatif kecil, sedangkan aluminium menunjukkan deformasi yang paling besar.

Temuan ini sejalan dengan studi Mustaqim dan Santoso yang melakukan evaluasi struktural rangka motor listrik menggunakan FEA. Mereka melaporkan bahwa rangka berbahan Steel *Chromoly* SAE 4130 menghasilkan deformasi total yang lebih kecil dibandingkan rangka Aluminium Alloy 6061-T6, sehingga memberikan kekakuan dan kestabilan struktural yang lebih baik, meskipun kedua material masih mampu menahan beban operasi yang disimulasikan. Kecenderungan serupa muncul pada penelitian ini: penggunaan baja *Chromoly* pada rangka trainer sepeda listrik menghasilkan lendutan yang lebih kecil dibanding aluminium, yang berarti respon strukturalnya lebih kaku dan stabil.

Dari sudut pandang performa rangka kendaraan, *displacement* yang besar dapat berdampak pada kestabilan geometrik rangka, perubahan sudut antara komponen (misalnya antaraudukan pengendara, garpu depan, dan titik tumpuan belakang), serta persepsi kenyamanan pengendara. Meskipun trainer sepeda listrik pada penelitian ini digunakan sebagai media pembelajaran dan tidak beroperasi di jalan raya, kekakuan rangka tetap penting untuk menjaga keakuratan posisi komponen, mengurangi getaran berlebih, dan memberikan representasi perilaku struktural yang mendekati kondisi nyata.

Dengan demikian, kombinasi *displacement* yang rendah pada Baja *Chromoly* SAE 4130 dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015), serta nilai modulus elastisitas yang tinggi, menunjukkan bahwa kedua material tersebut menawarkan kekakuan struktural yang lebih baik dibanding Aluminium 6061-T6. Namun, jika dibandingkan lebih lanjut dengan parameter lain seperti tegangan *von Mises* dan faktor keamanan, Baja *Chromoly* SAE 4130 cenderung memberikan kompromi paling optimal antara kekuatan, kekakuan, dan stabilitas rangka trainer sepeda listrik. Hasil analisis

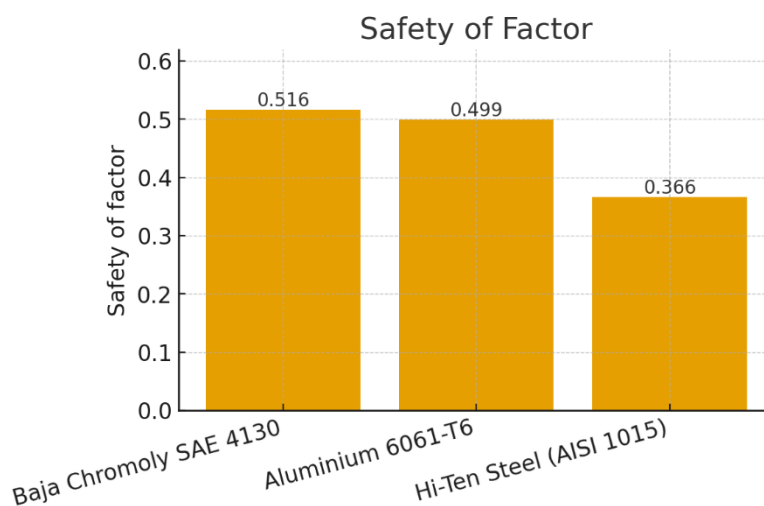
displacement pada [Gambar 3](#) karenanya memperkuat dasar pemilihan Baja *Chromoly* SAE 4130 sebagai kandidat material utama rangka trainer dalam konteks pembelajaran di SMK.

Safety of Factor

Analisis *safety factor* memberikan gambaran mengenai tingkat keamanan struktur rangka terhadap beban yang diberikan. Sebagaimana ditunjukkan pada [Gambar 4](#), nilai *Safety Factor Minimum* untuk material Baja *Chromoly* SAE 4130 adalah 0,516, untuk Aluminium 6061-T6 sebesar 0,499, dan untuk *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) sebesar 0,366. Ketiga material memiliki *safety factor* maksimum yang sama, yaitu 3, karena nilai tersebut merupakan batas atas yang ditetapkan pada pengaturan simulasi.

Dalam analisis berbasis FEA pada SolidWorks, *safety factor* dihitung sebagai rasio antara tegangan ijin (misalnya tegangan luluh material) terhadap tegangan ekuivalen *von Mises*. Nilai *safety factor* 1 menandakan bahwa tegangan operasi telah mencapai batas luluh material, sedangkan nilai < 1 menunjukkan bahwa pada lokasi tertentu struktur telah melampaui batas elastis dan berpotensi mengalami deformasi plastis permanen. Untuk struktur rangka kendaraan, literatur desain dan panduan simulasi SolidWorks umumnya merekomendasikan rentang *safety factor* 1,5–3 untuk menjamin kekuatan dan keandalan jangka panjang, dengan penyesuaian terhadap jenis beban dan lingkungan operasional [8].

Jika hasil simulasi pada [Gambar 4](#) dibandingkan dengan kriteria tersebut, terlihat bahwa seluruh material memiliki nilai *Safety Factor Minimum* di bawah 1, sehingga pada titik-titik kritis rangka, tegangan yang terjadi telah melampaui tegangan ijin. Artinya, untuk geometri rangka dan beban 120 kg yang digunakan dalam penelitian ini, desain rangka belum memenuhi kriteria keamanan struktural yang direkomendasikan. Meskipun demikian, perbedaan nilai *Safety Factor Minimum* tetap penting sebagai dasar pemilihan material: Baja *Chromoly* SAE 4130 menunjukkan nilai tertinggi (0,516), diikuti Aluminium 6061-T6 (0,499), sedangkan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) memiliki margin keamanan paling rendah (0,366). Dengan kata lain, pada konfigurasi rangka yang sama, Baja *Chromoly* menyediakan cadangan kekuatan terbesar sebelum mencapai kondisi gagal, sementara *Hi-Ten Steel* bekerja paling mendekati bahkan melampaui batas kekuatannya.



Gambar 4. Hasil Pengujian *Safety of Factor*

Secara struktural, nilai *Safety Factor Minimum* yang rendah biasanya terkonsentrasi pada daerah perubahan geometri atau sambungan, seperti titik pertemuan beberapa pipa, daerah las, serta titik tumpuan dengan *shock absorber*, *swing arm*, dan sistem kemudi. Pada daerah ini,

kombinasi tegangan lentur, tarik, dan tekan cenderung membentuk konsentrasi tegangan tinggi. Mengacu pada pendekatan desain yang dijelaskan dalam panduan simulasi SolidWorks [8], hasil pemetaan *safety factor* ini seharusnya digunakan sebagai dasar untuk redesain lokal, misalnya dengan menambah pengaku (*gusset*), memperbesar diameter atau tebal pipa pada zona kritis, menghaluskan transisi geometri, atau mengubah jalur gaya agar distribusi tegangan menjadi lebih merata.

Dari sudut pandang rekayasa untuk rangka trainer sepeda listrik sebagai media pembelajaran, implikasi praktisnya adalah:

1. Pemilihan material
Secara relatif, Baja *Chromoly* SAE 4130 tetap menjadi kandidat terbaik karena memiliki *Safety Factor Minimum* tertinggi dan sekaligus *displacement* yang rendah, sehingga menawarkan kompromi terbaik antara kekuatan dan kekakuan.
2. Kebutuhan optimasi desain
Nilai *Safety Factor Minimum* yang masih di bawah batas aman menunjukkan bahwa, terlepas dari material yang digunakan, geometri rangka perlu dioptimasi apabila trainer dirancang untuk mewakili kondisi operasional nyata dengan faktor keamanan yang memadai.
3. Nilai edukatif
Dari perspektif pembelajaran di SMK, hasil ini memberikan contoh konkret bagaimana analisis *safety factor* digunakan dalam proses desain rekayasa, mulai dari interpretasi hasil simulasi hingga pengambilan keputusan untuk pemilihan material dan modifikasi desain.

Dengan demikian, pembahasan *safety factor* pada [Gambar 4](#) tidak hanya menegaskan bahwa Baja *Chromoly* SAE 4130 menunjukkan performa paling unggul di antara tiga material yang diuji, tetapi juga menyoroti pentingnya integrasi antara pemilihan material dan optimasi geometri rangka agar rancangan akhir memenuhi standar keamanan struktur kendaraan yang direkomendasikan.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Penelitian ini telah berhasil menganalisis performa rangka trainer sepeda listrik berbasis simulasi FEA dengan membandingkan tiga material, yaitu Baja *Chromoly* SAE 4130, Aluminium 6061-T6, dan *Hi-Ten Steel* (AISI 1015), pada kondisi pembebanan statis 120 kg. Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa Baja *Chromoly* SAE 4130 memberikan kinerja struktural paling baik, diikuti *Hi-Ten Steel* (AISI 1015), sedangkan Aluminium 6061-T6 menunjukkan performa paling rendah dibandingkan dua material lainnya. Ditinjau dari kombinasi tegangan *von Mises*, *displacement*, dan *safety factor*, Baja *Chromoly* SAE 4130 mampu menghasilkan tegangan yang tinggi namun masih didukung oleh kekakuan yang baik dan *displacement* yang relatif kecil, sehingga memberikan kestabilan geometrik rangka yang lebih baik dibandingkan Aluminium 6061-T6. *Hi-Ten Steel* (AISI 1015) menunjukkan perilaku deformasi yang serupa dengan Baja *Chromoly*, namun memiliki margin keamanan yang lebih rendah. Aluminium 6061-T6, meskipun menghasilkan tegangan *von Mises* paling kecil, mengalami *displacement* paling besar sehingga kurang menguntungkan dari sisi kekakuan rangka. Analisis faktor keamanan mengindikasikan bahwa nilai *Safety Factor Minimum* ketiga material masih berada di bawah rentang standar yang lazim digunakan untuk struktur rangka kendaraan (1,5–3). Hal ini menunjukkan bahwa, untuk geometri rangka dan kondisi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini, desain rangka trainer sepeda listrik belum sepenuhnya memenuhi kriteria keamanan struktural yang direkomendasikan. Dengan demikian, pemilihan Baja *Chromoly* SAE

4130 sebagai material utama perlu diikuti dengan optimasi desain rangka, khususnya pada area-area konsentrasi tegangan, misalnya melalui modifikasi dimensi, penambahan pengaku, atau perbaikan konfigurasi sambungan. Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan dasar teknis bagi pengembangan trainer sepeda listrik sebagai media pembelajaran di SMK. Pemilihan material dan desain rangka yang lebih tepat diharapkan tidak hanya meningkatkan keselamatan dan keawetan trainer, tetapi juga memberikan contoh nyata kepada peserta didik mengenai penerapan analisis numerik dalam proses perancangan rekayasa. Penelitian lanjutan disarankan untuk: (1) melakukan optimasi geometri rangka hingga tercapai faktor keamanan yang memenuhi standar, (2) mempertimbangkan pembebanan dinamis dan siklus kelelahan, serta (3) melakukan verifikasi eksperimental terhadap hasil simulasi FEA untuk meningkatkan validitas model yang digunakan.

Saran

Dalam konteks penerapan pada rangka trainer sepeda listrik maupun rangka sepeda listrik secara umum, Baja *Chromoly* SAE 4130 direkomendasikan sebagai material utama karena menunjukkan kombinasi terbaik antara kekuatan, kekakuan, dan keamanan struktural. Hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi perancang dan pendidik dalam proses pemilihan material pada tahap desain rangka, khususnya pada pengembangan media pembelajaran di SMK yang menekankan pada aspek performa struktural. Namun demikian, pemilihan Baja *Chromoly* SAE 4130 perlu diimbangi dengan kajian lebih lanjut terhadap berat total rangka dan implikasinya terhadap efisiensi operasional kendaraan. Oleh karena itu, pada penelitian berikutnya disarankan untuk melakukan optimasi desain, misalnya melalui penyesuaian diameter dan ketebalan pipa, penambahan atau pengurangan elemen pengaku, serta kajian ulang konfigurasi sambungan, hingga diperoleh faktor keamanan yang memenuhi standar tanpa meningkatkan massa secara berlebihan. Selain itu, diperlukan validasi eksperimental terhadap hasil simulasi FEA melalui pengujian prototipe fisik, baik untuk pembebanan statis maupun dinamis. Kajian terhadap respons rangka pada kondisi dinamis seperti beban kejut, getaran, ataupun pembebanan berulang akan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai keandalan rangka dalam aplikasi nyata. Penelitian lanjutan juga dapat mengkaji perbandingan dengan jenis material lain yang lebih ringan atau lebih mudah diproses, sehingga dihasilkan desain rangka trainer sepeda listrik yang tidak hanya aman dan kaku, tetapi juga efisien dan mudah diimplementasikan di lingkungan pendidikan.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] S. Anisa, "Implementasi Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 45 Tahun 2020 tentang Kendaraan Tertentu dengan Menggunakan Penggerak Motor Listrik (Studi Kasus Pelajar Sebagai Pengguna Sepeda Listrik) di Kecamatan," *Jurnal Kebijakan Publik (PPJ)*, vol. 2, no. 3, 2025. [Online]. Available: <https://stiaamuntai.ac.id/ojs/index.php/ppj/article/view/959>. Accessed: Nov. 7, 2025.
- [2] J. T. Santoso, *Sepeda Listrik: Perencanaan, Perakitan dan Perbaikan*. Yayasan Prima Agus Teknik, 2022, ISBN 9786235734828.
- [3] M. Awwaluddin, "Analisa Kekuatan Rangka Sepeda Listrik Menggunakan Software SolidWorks," *Piston: Journal of Technical Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 5–16, 2019, doi: 10.32493/pjte.v3i1.7486.
- [4] PT Steel Pipe Industry Indonesia Tbk, "Mengenal Berbagai Jenis-Jenis Rangka Sepeda Motor dan Fungsinya," SPINDO. [Online]. Available: <https://www.spindo.com/mengenal-berbagai-jenis-jenis-rangka-sepeda-motor-dan-fungsinya/>
- [5] M. Z. Falah, W. T. Handoko, A. I. Syah, F. M. Triana, G. F. Al'alam, and F. I. Kusuma, "Utilization of Electric Bicycle Trainers as Learning Media to Support the Challenges of the Industrial Revolution 4.0 at SMK N 2 Probolinggo," *Bulletin of Community Engagement*,

- vol. 4, no. 3, pp. 355–365, 2024. [Online]. Available: <https://attractivejournal.com/index.php/bce/>
- [6] UIN Suska Riau, “BAB II: Dasar Teori,” 2016.
- [7] M. A. Nabil and A. Faizin, “Analisis Pengaruh Dimensi dan Ketebalan Hollow ST 37 terhadap Kekuatan Rangka Sepeda Motor Listrik dengan Metode Elemen Hingga (FEM),” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 3, p. 11, Jul. 2025, doi: 10.47134/jme.v2i3.4794.
- [8] SolidWorks Corporation, “Designing for Strength and Durability: How Strong Is the Bike Frame?,” *SOLIDWORKS Blog*, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2023/09/getting-started-with-simulation-on-the-3dexperience-platform-4-how-strong-is-the-frame.html>
- [9] H.-M. Dai, B.-H. Chen, C.-M. Hsu, C.-L. Lin, and C.-F. Yang, “Analyses of Full-load, Modal, and Fatigue Life of Electric Motorcycle Frame Using Finite Element Software ANSYS,” *Sensors and Materials*, vol. 35, no. 8, pp. 2817–2829, 2023, doi: 10.18494/SAM4461.
- [10] F. A. Budiman, A. Septiyanto, Sudiyono, A. D. N. I. Musyono, and R. Setiadi, “Analisis Tegangan *von Mises* dan *Safety factor* pada Chassis Kendaraan Listrik,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 1, pp. 100–108, 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.016.01.14.
- [11] G. E. Pramono, A. Hidayat, and R. Waluyo, “Perancangan dan Simulasi Desain Rangka Sepeda Motor Listrik Tipe Trellis Menggunakan *Finite Element Analysis*,” *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 5, no. 2, pp. 319–326, 2020, doi: 10.31544/jtera.v5.i2.2020.319-326.
- [12] A. Mutiara, “SolidWorks: pengertian, fungsi, jenis,” Telkom University—D3 Teknologi Telekomunikasi. [Online]. Available: <https://dte.telkomuniversity.ac.id/solidworks-pengertian-fungsi-jenis/>
- [13] M. D. Mustaqim and D. T. Santoso, “Design and Structural Evaluation of an Electric Motorcycle Frame Using FEA,” *Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*, vol. 4, no. 3, pp. 168–178, Sep. 2025, doi: 10.70609/metrotech.v4i3.7249.
- [14] I. Muhlisin and N. Feblidiyanti, “Comparison of strength and stability of bicycle frames made from 6061-T6 Aluminum (SS) and Commercially Pure CP-Ti UNS R50700 Grade 4 (SS) materials,” *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 20, no. 1, pp. 132–140, 2024, doi: 10.62870/tjst.v20i1.24163.
- [15] Artizono, “Baja *Hi-Ten* vs Baja *Chromoly*: Apa Perbedaannya?,” Artizono, May 24, 2025. [Online]. Available: <https://artizono.com/id/Hi-Ten-steel-vs-Chromoly-steel-apa-bedanya>
- [16] D. W. Rachmawati, B. Nasution, H. Firmansyah, S. Asiah, and A. Ridho, *Teori & Konsep Pedagogik*. Cirebon, Indonesia: Penerbit Insania, 2021, ISBN 6235770316.

Halaman ini sengaja dikosongkan