

DESAIN DAN ANALISIS KEKUATAN SERTA GETARAN RANGKA SEPEDA MOTOR LISTRIK JENIS UNDERBONE MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Fatih Al Hakim¹, Ojo Kurdi², Achmad Widodo²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: fatihalhakim349@gmail.com

Abstrak

Perkembangan kendaraan listrik mendorong kebutuhan akan desain rangka yang kuat, stabil, dan aman. Penelitian ini menganalisis kekuatan statik, respon akibat beban akselerasi dan deselerasi, respon beban dinamis, serta frekuensi alami rangka sepeda motor listrik tipe *underbone* dengan variasi material baja AISI 1020, AISI 4130, dan AISI 4340 menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa material AISI 4340 memiliki performa terbaik dibandingkan dua material lainnya. Pada pembebanan statik maupun dinamis, material ini menghasilkan deformasi dan tegangan yang lebih rendah serta faktor keamanan yang lebih tinggi. Respon pada kondisi akselerasi dan deselerasi juga menunjukkan tren serupa, dengan AISI 4340 tetap unggul dalam ketahanan beban. Analisis modal memperlihatkan bahwa ketiga material memiliki frekuensi alami yang cukup tinggi dan aman dari resonansi akibat getaran jalan raya. Dengan demikian, AISI 4340 direkomendasikan sebagai material rangka sepeda motor listrik tipe *underbone* karena memberikan kombinasi kekuatan, ketahanan dinamis, dan stabilitas getaran yang optimal.

Kata Kunci: aisi 1020; aisi 4130; aisi 4340; fem; frekuensi alami; rangka *underbone*; sepeda motor listrik

Abstract

The development of electric vehicles drives the demand for strong, stable, and safe frame designs. This study analyzes the static strength, responses under acceleration and deceleration loads, dynamic load responses, and natural frequencies of an underbone-type electric motorcycle frame using different steel materials: AISI 1020, AISI 4130, and AISI 4340, through the Finite Element Method (FEM). The simulation results show that AISI 4340 demonstrates superior performance compared to the other two materials. Under both static and dynamic loading, this material produces lower deformation and stress while maintaining a higher safety factor. Similar trends are observed under acceleration and deceleration conditions, with AISI 4340 consistently outperforming in load resistance. Modal analysis indicates that all three materials have sufficiently high natural frequencies, ensuring safety from resonance due to road-induced vibrations. Therefore, AISI 4340 is recommended as the optimal material for the underbone-type electric motorcycle frame, offering the best combination of strength, dynamic durability, and vibration stability.

Keywords: aisi 1020; aisi 4130; aisi 4340; fem; electric motorcycle; natural frequency; underbone frame

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi transportasi saat ini didorong oleh isu lingkungan dan kebutuhan energi berkelanjutan. Kendaraan listrik, termasuk sepeda motor listrik, hadir sebagai solusi ramah lingkungan dengan efisiensi energi lebih tinggi, biaya operasional rendah, serta emisi dan kebisingan yang minim dibandingkan kendaraan berbahan bakar fosil. Keunggulan-keunggulan ini menjadikan motor listrik sebagai alternatif transportasi masa depan yang potensial untuk dikembangkan secara luas [1].

Selain aspek motor penggerak dan baterai, rangka merupakan komponen penting yang menentukan kekuatan, stabilitas, dan kenyamanan berkendara. Rangka harus mampu menahan beban statik maupun dinamik serta memiliki frekuensi alami yang cukup tinggi agar aman dari resonansi akibat getaran jalan. Desain rangka yang tidak optimal dapat menimbulkan deformasi berlebih, kerusakan akibat kelelahan material, hingga kegagalan struktural yang berpotensi membahayakan keselamatan.

Untuk memastikan keandalan rangka, metode analisis numerik seperti Finite Element Method (FEM) banyak digunakan karena mampu mengevaluasi deformasi, distribusi tegangan, serta karakteristik getaran secara virtual tanpa uji fisik yang mahal dan memakan waktu. Penelitian ini difokuskan pada analisis rangka sepeda motor listrik tipe *underbone* menggunakan FEM dengan tujuan mengevaluasi kekuatan statik, respons terhadap beban akselerasi, deselerasi, dan impact, serta karakteristik getarannya. Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung pengembangan rangka motor listrik yang aman, andal, dan sesuai prinsip transportasi berkelanjutan.

2. Dasar Teori

Sepeda motor merupakan kendaraan bermotor beroda dua yang digerakkan oleh mesin pembakaran dalam maupun motor listrik. Rangka berfungsi sebagai struktur utama yang menyatukan seluruh komponen dan berperan penting terhadap performa, keamanan, dan kenyamanan berkendara [2]. Analisis rangka umumnya menggunakan Finite Element Analysis (FEA) untuk memodelkan beban statik maupun dinamik. Metode ini dapat menghitung deformasi, tegangan von Mises, serta frekuensi alami rangka, yang berperan penting dalam stabilitas kendaraan dan kenyamanan pengendara. Analisis modal juga digunakan untuk mengidentifikasi getaran berlebih yang berpotensi menyebabkan kerusakan struktural [3].

Pemilihan material rangka ditentukan oleh sifat mekanik seperti kekuatan, kekakuan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap kelelahan. Baja paduan, khususnya high-tensile steel, banyak digunakan karena kuat, tahan lama, mudah difabrikasi, serta ekonomis [4][5]. Material rangka berpengaruh pada karakteristik handling, ketahanan terhadap getaran, dan kemampuan menahan beban statis maupun impact. Salah satu jenis rangka yang banyak digunakan adalah underbone, dengan desain step-through yang praktis, ringan, dan cukup kokoh untuk mobilitas harian meski tidak sekuat rangka sport [5].

Beban pada rangka dapat berupa beban statis, dinamis, maupun impact. Beban statis bekerja konstan sesuai prinsip keseimbangan $\Sigma F=0$ dan $\Sigma M=0$ [6], sedangkan beban dinamis berubah terhadap waktu dan menimbulkan respons inersia [7]. Beban impact terjadi akibat tumbukan singkat yang menghasilkan gaya lebih besar dibandingkan beban statis. Tegangan (stress) didefinisikan sebagai gaya per luas penampang, sedangkan regangan (strain) adalah perubahan dimensi relatif terhadap panjang awal [8][9]. Hubungan keduanya mengikuti Hukum Hooke, $\sigma=E \cdot \varepsilon$, pada daerah elastis. Tegangan Von Mises digunakan untuk mengevaluasi kegagalan akibat energi distorsi; bila melebihi tegangan luluh, struktur dianggap gagal [10]. Faktor keamanan (SF) didefinisikan sebagai rasio antara tegangan luluh dan tegangan kerja aktual.

Frekuensi alami adalah frekuensi getar bebas suatu sistem setelah diberi gangguan, penting untuk menghindari resonansi akibat getaran dari jalan maupun motor listrik. Modus getar menggambarkan pola deformasi pada frekuensi alami tertentu, misalnya lenturan akibat massa baterai atau torsi pada head tube akibat gaya kemudi. Analisis ini dapat diprediksi menggunakan metode elemen hingga (FEM), yang memecah struktur menjadi elemen-elemen kecil dengan sifat material tertentu, sehingga menghasilkan sistem persamaan yang dapat diselesaikan secara numerik untuk mengetahui respons struktur terhadap beban.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan simulasi numerik dengan *Finite Element Method (FEM)*. Tahapan penelitian dimulai dari pembuatan model tiga dimensi rangka sepeda motor listrik tipe underbone menggunakan perangkat lunak CAD berdasarkan data dimensi dan spesifikasi komponen utama kendaraan. Model yang telah disusun kemudian diimpor ke dalam perangkat lunak analisis untuk dilakukan simulasi kekuatan dan getaran. Proses ini bertujuan untuk mengevaluasi respon rangka terhadap berbagai kondisi pembebanan yang mungkin terjadi dalam penggunaan nyata, meliputi beban statis, beban akibat akselerasi dan deselerasi, serta beban *impact* dengan tiga skenario arah benturan yaitu depan, samping, dan belakang.

Dalam analisis, digunakan tiga variasi material baja, yaitu AISI 1020, AISI 4130, dan AISI 4340. Pemilihan variasi material ini dilakukan untuk membandingkan pengaruh sifat mekanik material terhadap kekuatan struktural dan karakteristik dinamis rangka. Setiap material dimasukkan ke dalam model dengan parameter sifat mekanik yang sesuai, seperti *modulus of elasticity*, densitas, dan *yield strength*. Kondisi batas (*boundary condition*) ditetapkan dengan asumsi bahwa titik tumpuan suspensi depan dan belakang berfungsi sebagai *fixed support*. Beban statis dihitung dari kombinasi berat pengendara, rangka, motor, dan baterai, sedangkan beban dinamis ditentukan berdasarkan kondisi akselerasi dan deselerasi kendaraan. Pada analisis *impact*, beban ditetapkan dengan asumsi percepatan setara 2g sebagai kondisi terburuk (*worst case*).

Tahapan simulasi dibagi menjadi dua jenis, yaitu analisis statik struktural dan analisis modal. Analisis statik struktural dilakukan untuk memperoleh distribusi deformasi, tegangan von Mises, serta nilai *safety factor* pada berbagai kondisi pembebanan. Analisis modal dilakukan untuk mengetahui nilai *natural frequency* dan pola *mode shape* rangka, yang sangat penting dalam menilai potensi resonansi akibat eksitasi jalan. Untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi, dilakukan *grid independence test* dan evaluasi kualitas *mesh* guna memastikan hasil perhitungan tidak dipengaruhi oleh jumlah elemen.

Seluruh hasil simulasi kemudian dianalisis secara komparatif antar variasi material untuk menentukan material dengan performa terbaik. Melalui tahapan ini, penelitian tidak hanya memberikan gambaran mengenai respon struktural rangka underbone pada berbagai kondisi pembebanan, tetapi juga menghasilkan rekomendasi material yang paling sesuai untuk digunakan dalam desain sepeda motor listrik yang aman, kuat, dan nyaman.

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi material rangka berpengaruh signifikan terhadap deformasi, tegangan von Mises, dan faktor keamanan. Pada pembebanan statik, material AISI 4340 menunjukkan performa paling baik dengan deformasi paling kecil, tegangan von Mises terendah, dan faktor keamanan jauh di atas batas aman. Sebaliknya, material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan deformasi dan tegangan lebih tinggi, sehingga faktor keamanannya relatif lebih rendah.

Pada kondisi dinamis, baik akselerasi maupun deselerasi, kecenderungan yang sama juga terlihat. Material AISI 4340 tetap menghasilkan deformasi dan tegangan paling rendah dengan faktor keamanan yang tetap berada di atas standar, menegaskan kemampuannya menjaga kestabilan struktural meskipun terjadi perubahan beban mendadak.

Pada simulasi beban impact, skenario benturan samping menjadi kondisi paling kritis karena menghasilkan faktor keamanan terendah dibandingkan skenario benturan depan maupun belakang. Namun, material AISI 4340 tetap mampu meredam gaya impact dengan lebih baik dibandingkan material lain, sehingga masih dapat dikategorikan aman untuk penggunaan sehari-hari.

Analisis modal menunjukkan bahwa ketiga material memiliki frekuensi alami yang relatif tinggi dan jauh di atas rentang frekuensi eksitasi akibat getaran jalan raya. Hal ini menandakan rangka aman dari risiko resonansi. Pola modus getar memperlihatkan konsentrasi getaran pada bagian tengah dan sambungan rangka, yang perlu menjadi perhatian dalam proses desain maupun penguatan struktur.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa AISI 4340 merupakan material paling optimal untuk rangka sepeda motor listrik tipe underbone. Material ini tidak hanya unggul pada aspek kekuatan statik dan dinamik, tetapi juga memberikan stabilitas getaran yang lebih baik sehingga meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengendara.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis kekuatan statik, respon akibat beban dinamis, serta karakteristik getaran rangka sepeda motor listrik tipe underbone dengan variasi material baja AISI 1020, AISI 4130, dan AISI 4340 menggunakan metode elemen hingga. Hasil simulasi menunjukkan bahwa material AISI 4340 memiliki kinerja paling unggul dibandingkan dua material lainnya. Pada pembebanan statik maupun dinamik, AISI 4340 menghasilkan deformasi dan tegangan von Mises lebih rendah dengan faktor keamanan yang tetap berada di atas batas aman.

Analisis beban impact mengungkapkan bahwa benturan samping merupakan kondisi paling kritis, namun material AISI 4340 tetap mampu memberikan faktor keamanan dalam kategori aman untuk operasional harian. Sementara itu, analisis modal memperlihatkan bahwa semua variasi material memiliki frekuensi alami yang cukup tinggi, sehingga rangka aman dari risiko resonansi akibat eksitasi jalan.

Secara keseluruhan, material AISI 4340 direkomendasikan sebagai pilihan terbaik untuk rangka sepeda motor listrik tipe underbone karena mampu memberikan kombinasi optimal antara kekuatan, ketahanan terhadap beban dinamis, serta stabilitas getaran, sehingga mendukung kenyamanan dan keselamatan pengendara.

6. Daftar Pustaka

- [1] Luiz Carlos Daemme, Penteadó, R., Schneider, P.S., Pacheco, B., Bernardo, Errera, M.R. and Corrêa, S.M. (2017). Study of the Energy Efficiency and Greenhouse Emissions from Motorcycles Powered by Electric and Internal Combustion Engines. *SAE technical papers on CD-ROM/SAE technical paper series*. doi:<https://doi.org/10.4271/2017-36-0155>.
- [2] Routaray, R. (2017). Modelling Techniques for Noise and Vibration Control of the Body and Chassis. *SAE Technical Paper Series*. doi:<https://doi.org/10.4271/2017-01-1855>.
- [3] Dai, H.-M., Chen, B.-H., Hsu, C.-M. and Yang, C.-F. (2022). Design and Analysis of New Electric Motorcycle: Analysis of Bending Moment Stiffness. *Sensors and Materials*, 34(5), p.1733. doi:<https://doi.org/10.18494/sam3819>.
- [4] Callister, W. D. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9th Edition. John Wiley & Sons.
- [5] Cossalter, V. (2006). *Motorcycle Dynamics*. Lulu Press.
- [6] Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering Mechanics: Statics*. 14th Edition. Pearson Education.
- [7] Meriam, J. L., & Kraige, L. G. (2012). *Engineering Mechanics: Dynamics* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- [8] Dearní, R., Suryanita, R. & Ismediyanto, 2019. Analisis Sifat Mekanik Bata Ringan Cellular Lightweight Concrete Menggunakan Program LUSAS V17. *Sainstek*, 7(2), pp. 73 -79.
- [9] Arini, R. N. & Pradana, R., 2021. Analisa Regangan pada Balok dengan Menggunakan Software Abaqus CAE V6.14. *Artesis*, 1(2), pp. 193-198.

-
- [10] Kamiela, B. P., Nugraha, . G. A. & Sunardi, 2018. Perancangan dan Analisis Kekuatan Frame Sepeda Lipat Menggunakan Autodesk Inventor. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur* , 2(2), pp. 126-135.