

ANALISIS KEKUATAN PADA RANGKA SEPEDA MOTOR LISTRIK DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Sri Hastuti¹, Wahyuchandra Ramadhani^{1*}, Nani Mulyaningsih¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

*Corresponding author : dani.wcr99@gmail.com

Diterima: 11 April 2022

Direvisi: 16 Mei 2022

Disetujui: 21 Mei 2022

Terbit online: 27 Mei 2022

ABSTRAK

Kebutuhan kendaraan ramah lingkungan membuat inovasi peralihan dari sepeda motor bensin menjadi motor listrik meningkat. Sepeda motor bensin dan listrik memiliki komponen yang hampir sama, perbedaan terletak pada mesin sehingga diperlukan sedikit penyesuaian pada bagian rangka. Perancangan dan pengujian rangka diperlukan untuk memastikan rangka dapat digunakan dengan aman. Penelitian bertujuan untuk mengetahui kekuatan terbaik variasi desain rangka sepeda motor listrik. Metode penelitian menggunakan metode komparatif dengan membandingkan tiga desain rangka sepeda motor listrik terhadap hasil simulasi tegangan *von mises* maksimum terendah, total deformasi maksimum terendah dan faktor keamanan minimum tertinggi. Simulasi rangka menggunakan material AISI 4130 dengan beban yang terdiri dari baterai, motor listrik, dan pengontrol. Desain rangka didesain menggunakan *Solidworks* dan simulasi rangka menggunakan *Ansys Workbench*. Hasil simulasi pada desain satu didapatkan tegangan *von mises* 23,199 MPa, total deformasi 0,036 mm, dan faktor keamanan 17,889. Desain dua didapatkan tegangan *von mises* 13,256 MPa, total deformasi 0,046 mm, dan faktor keamanan 31,306. Desain tiga didapatkan tegangan *von mises* 17,253 MPa, total deformasi 0,049 mm, dan faktor keamanan 24,054. Desain 2 memiliki kekuatan terbaik dengan tegangan *von mises* terendah, total deformasi terendah dan faktor keamanan tertinggi.

Kata kunci: tegangan *von mises*, total deformasi, rangka sepeda motor

ABSTRACT

The need for environmentally friendly vehicles makes the innovation of the transition from gasoline motorbikes to electric motorbikes increase. Gasoline and electric motorcycles have almost the same components, the difference lies in the engine so that a little adjustment is needed in the frame. Frame design and testing is necessary to ensure the frame can be used safely. This study aims to determine the best strength of variations in the design of the electric motorcycle frame. The research method uses a comparative method by comparing three electric motorcycle frame designs to the simulation results of the lowest maximum von mises stress, the lowest maximum total deformation and the highest minimum safety factor. The frame simulation uses AISI 4130 material with a load consisting of a battery, electric motor, and controller. The truss design was designed using Solidworks and the truss simulation was using Ansys Workbench. The simulation results in design one obtained a von mises stress of 23,199 MPa, a total deformation of 0.036 mm, and a safety factor of 17.889. Design two obtained von mises stress of 13,256 MPa, total deformation of 0.046 mm, and a factor of safety of 31.306. Design three obtained von mises stress of 17.253 MPa, total deformation of 0.049 mm, and a factor of safety of 24.054. Design 2 has the best strength with the lowest von mises stress, the lowest total deformation and the highest safety factor.

Keywords: von mises stress, total deformation, motorcycle frame

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya kesadaran akan kendaraan ramah lingkungan menciptakan inovasi sepeda motor listrik. Sepeda motor listrik yang menggunakan sumber daya listrik sebagai tenaga utama untuk menggerakkan sepeda motor dikenal ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polusi [1]. Perbedaan komponen sepeda motor bensin dan sepeda motor listrik tidak jauh berbeda, perbedaan hanya terdapat pada mesin penggerak. Pada sepeda motor listrik menggunakan pengontrol, baterai berbentuk paket, dan motor listrik sebagai komponen utama mesin penggerak sepeda motor [2]. Sehingga dalam peralihan dari sepeda motor bensin ke sepeda motor listrik hanya perlu penyesuaian sedikit terutama pada rangka untuk mesin penggerak. Dalam perkembangannya rangka sepeda motor maupun sepeda listrik tidak hanya dibuat dengan batang pipa besi yang disambungkan dengan pengelasan, namun dapat menggunakan metode *casting monocoque* pada rangka tunggal [3] dengan kekuatan perancangan dapat dianalisa menggunakan simulasi komputer.

Perkembangan teknologi komputer serta perangkat lunak yang semakin tinggi, membantu pekerjaan manusia untuk melakukan pekerjaan proses perancangan semakin mudah dan cepat [4]. *Solidworks* sebagai salah satu program desain tiga dimensi yang memudahkan dalam proses perancangan produk atau objek dibuat semakin mudah dan cepat dengan menggunakan sistem parametrik, dimana perancangan desain dapat dilakukan modifikasi pada tahap sebelumnya sehingga dapat dilakukan secara efisien [5]. Perancangan rangka sepeda motor listrik yang perlu mempertimbangkan berbagai hal dapat dibuat dengan lebih cepat dan meringankan biaya produksi dibandingkan dengan membuatnya secara langsung.

Desain yang dirancang perlu dilakukan analisis untuk memastikan bahwa rangka yang dirancang dapat memenuhi kebutuhan pengguna. Menggunakan program metode elemen hingga melalui pendekatan analisis numerik untuk mensimulasikan fisika terhadap perancangan desain rangka memastikan kondisi yang terjadi mendekati sebenarnya. Salah satu program metode elemen hingga yaitu *Ansys Workbench* yang mampu melakukan analisis struktur, perpindahan panas, dinamika fluida, dan elektromagnetik [6].

Hasil simulasi akan didapatkan nilai fisika seperti tegangan, deformasi, dan faktor keamanan yang kemudian dapat dijadikan bahan analisis rangka. Analisis rangka diperlukan untuk mengetahui kekuatan struktur rangka untuk memastikan berada pada batas aman melalui pengujian untuk mendapatkan tegangan serta deformasi [7]. Berbagai macam variasi rangka akan mendapatkan desain dengan kekuatan terbaik.

Berdasarkan latar belakang di atas, penulis akan merancang tiga konstruksi rangka sepeda motor listrik dengan *Solidworks*. Setiap perancangan rangka akan dilakukan pengujian dan analisis rangka menggunakan *Ansys Workbench* untuk mendapatkan kekuatan rangka terhadap beban komponen. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kekuatan rangka sepeda motor listrik terhadap variasi rangka menggunakan *Ansys Workbench 16.2* dengan parameter tegangan, total deformasi, dan faktor keamanan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan sepeda motor bensin sebagai ukuran dasar modifikasi rangka sepeda motor listrik, alat ukur, *Solidworks*, dan *Ansys Workbench*. Penelitian diawali dengan mengukur rangka sepeda motor bensin dengan alat ukur dan akan digambar pada *Solidworks*. Pembuatan variasi desain dengan mempertimbangkan konstruksi komponen listrik. Variasi desain rangka akan disimulasikan menggunakan *Ansys Workbench* dengan jenis analisis sistem yaitu *static structural*. *Solve* yang digunakan untuk analisis kekuatan rangka menggunakan parameter tegangan *von mises*, total deformasi, serta perhitungan faktor keamanan. Material yang digunakan pada simulasi *Ansys Workbench* adalah AISI 4130. Tabel 1 menunjukkan karakteristik material AISI 4130. Sifat mekanik akan diisi pada *engineering data Ansys* untuk menyelaraskan material simulasi dengan material yang digunakan.

Tabel 1. Sifat mekanik material AISI 4130 [7]

<i>Density</i> (massa jenis)	7850 kg/m ³
<i>Yield strength</i> (kekuatan luluh)	415 N/mm ²
<i>Tensile strength</i> (kekuatan tarik)	670 N/mm ²
<i>Shear modulus</i> (modulus geser)	80000 N/mm ²
<i>Modulus of elasticity</i> (modulus elastisitas)	2,05 x 10 ⁵ N/mm ²
<i>Poisson ratio</i> (rasio poisson)	0,29

Simulasi variasi rangka sepeda motor listrik menggunakan jenis simulasi *static structural* karena menggunakan beban statis. Jenis pembebanan yang digunakan pada simulasi menggunakan beban vertikal mengikuti arah gravitasi bumi atau menggunakan sumbu -y. Beban terdiri dari baterai dengan massa 7 kg, motor listrik dengan massa 7,3 kg, dan pengontrol dengan massa 1,9 kg. Proses simulasi pada *Ansys Workbench* melalui tahap sebagai berikut:

1. Melakukan penyederhanaan bagian dengan menggabungkan banyak bagian menjadi beberapa bagian.
2. Melakukan verifikasi material AISI 4130 terhadap seluruh bagian rangka.
3. Melakukan *meshing* yaitu pembentukan elemen-elemen dalam bentuk kecil untuk memudahkan komputer untuk menghitung kejadian fisika. Dalam penelitian ini, desain 1, 2, dan 3 menggunakan metode *tetrahedrons* dengan ukuran (*sizing*) mesh 10 mm.
4. Menentukan penggunaan *support* atau tumpuan pada desain rangka. *support* atau tumpuan menggunakan jenis *fixed support* atau tumpuan jepit dengan posisi pada poros kemudi dan dua poros *shockbreaker*.
5. Menerapkan beban komponen yang terdiri dari baterai (7 kg), pengontrol (1,9 kg), dan motor listrik (7,3 kg) pada bagian bidang desain sesuai peletakan jenis komponen. Satuan massa yaitu kilogram diubah dalam bentuk satuan *Newton* untuk memudahkan dalam memasukan nilai gaya. Arah gaya yang diterapkan pada simulasi adalah gaya vertikal sehingga arah gaya pada sumbu y atau mengarah kebawah atau sesuai dengan arah gaya gravitasi.
6. Menentukan solusi simulasi untuk dapat digunakan sebagai bahan analisis. Dalam penelitian ini, *solve* yang digunakan adalah tegangan *von mises* dan total deformasi.
7. Proses *solve* adalah proses melaksanakan dan memecahkan masalah perhitungan fenomena fisika dengan menggunakan metode elemen hingga dilakukan setelah mengatur proses *meshing*, tumpuan, beban, dan solusi.

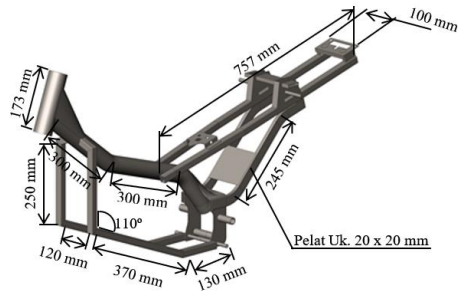
Proses *solve* yang telah selesai, maka akan didapatkan hasil simulasi dari variasi desain rangka. Hasil simulasi berupa gradasi warna yang menunjukkan besaran kejadian fisika baik dalam bentuk tegangan dan total deformasi. Faktor keamanan dapat dicari menggunakan tegangan *von mises* dan tegangan luluh material. Tegangan *von mises* hasil simulasi dapat dijadikan bahan untuk menghitung faktor keamanan dengan menggunakan persamaan 1 [8] sebagai berikut :

$$N = \frac{\sigma_y}{\sigma_{aktual}} \dots\dots\dots (1)$$

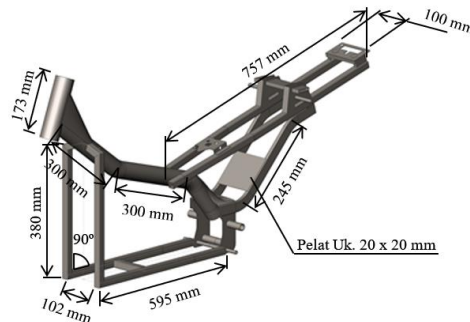
dimana, N = Faktor keamanan
 σ_y = Tegangan luluh material
 σ_{aktual} = Tegangan yang terjadi

Hasil simulasi berupa tegangan *von mises* dan total deformasi akan dianalisis dan mencari faktor keamanan untuk mengetahui serta membandingkan kekuatan rangka. Desain terpilih adalah desain dengan nilai tegangan *von mises* maksimum terendah, total deformasi maksimum terendah, dan faktor keamanan minimum tertinggi.

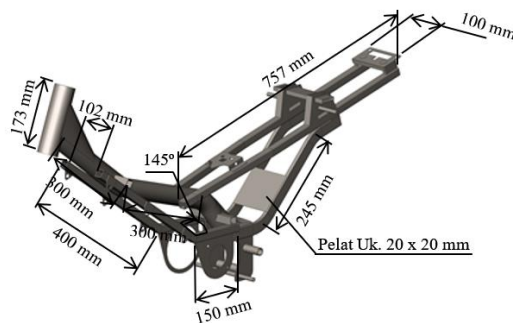
3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 1. Desain rangka 1

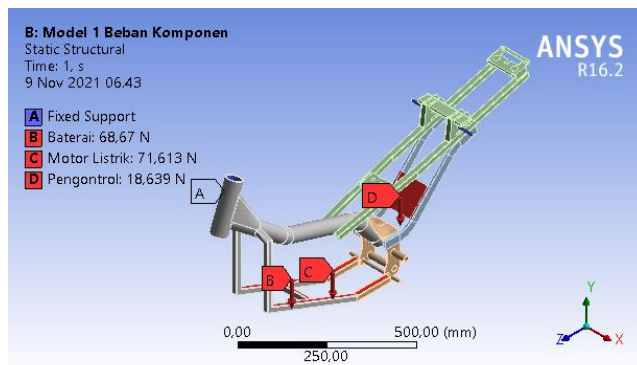


Gambar 2. Desain rangka 2



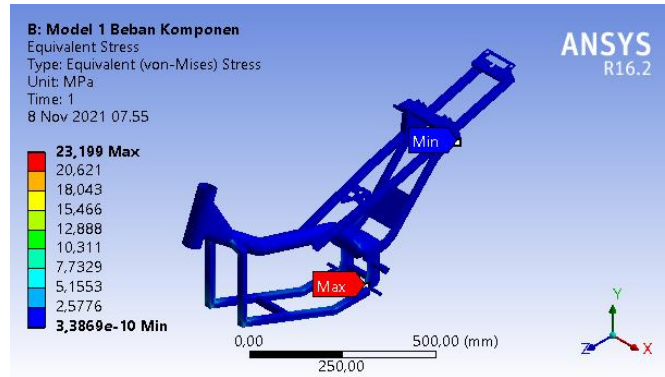
Gambar 3. Desain rangka 3

Hasil pengukuran rangka sepeda motor bensin akan digambar dengan *Solidworks* dan dirancang untuk mendapatkan desain rangka yang dapat disematkan komponen listrik. Perancangan rangka sepeda motor listrik menggunakan 3 variasi rangka berdasarkan konstruksi rangka. Berturut-turut pada gambar 1, 2, dan 3 merupakan desain 1, desain 2, dan desain 3.

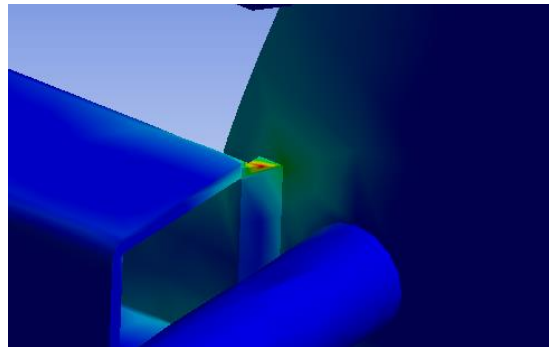


Gambar 4. Letak tumpuan dan beban desain 1

Gambar 4 menunjukkan tumpuan jepit (*fixed support*) desain 1 pada poros kemudi dan poros *shockbreaker* belakang. Beban baterai ditempatkan pada bagian miring rangka komponen. Beban motor listrik pada bagian datar rangka komponen. Sedangkan beban pengontrol pada bagian bidang miring antara rangka penyangga tempat duduk.

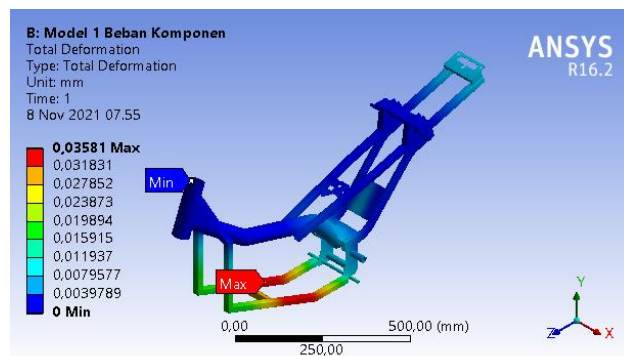


Gambar 5. Tegangan *von mises* desain 1



Gambar 6. Konsentrasi tegangan desain 1

Hasil simulasi tegangan desain 1 pada gambar 5 menunjukkan gradasi dari warna biru tua ke warna merah yang mengindikasikan peralihan tegangan minimum ke tegangan maksimum. Didapatkan tegangan *von mises* maksimum 23,199 MPa berada pada bagian sambungan rangka lengan ayun dan rangka komponen. Setiap lekukan rangka komponen terdapat tegangan yang kecil ditandai dengan warna biru muda. Pada gambar 6, konsentrasi tegangan ditandai dengan bagian warna biru muda hingga hijau dengan titik berwarna kuning hingga merah pada sekitar sambungan sehingga diperlukan penebalan las atau penambahan penyangga rangka. Tegangan yang terjadi berada dibawah tegangan luluh material AISI 4130 yaitu 415 MPa, sehingga konstruksi rangka dikatakan aman.



Gambar 7. Total deformasi desain 1

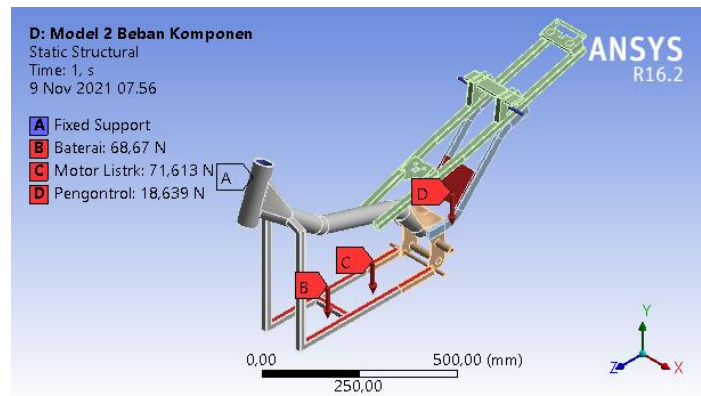
Total deformasi maksimum pada hasil simulasi desain rangka 1 yang ditunjukkan pada gambar 7 mendapatkan 0,036 mm yang terletak pada lekukan rangka komponen yang menopang beban baterai dan motor listrik. Rangka bagian belakang terutama tempat duduk mengalami deformasi akibat menahan beban baterai dan motor listrik melalui rangka penyangga tempat duduk. Deformasi yang terjadi masih dalam kategori kecil mengingat tegangan yang terjadi berada dibawah tegangan luluh material.

Perhitungan nilai faktor keamanan desain rangka 1 dapat dihitung melalui persamaan 1 sebagai berikut.

$$N = \frac{415}{23,199}$$

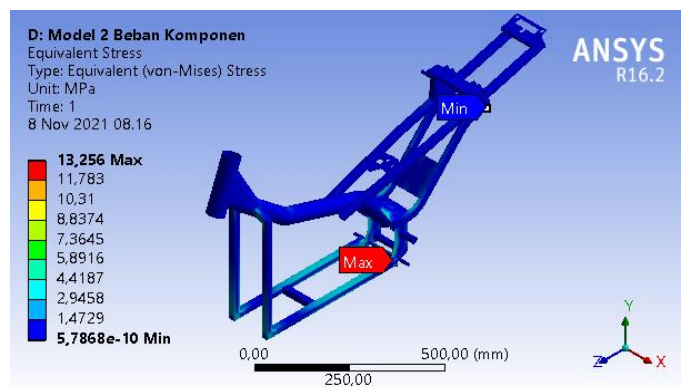
$$N = 17,889$$

Telah didapatkan faktor keamanan pada desain 1 adalah 17,889. Faktor keamanan didapatkan >2,5 sehingga berada pada batas aman untuk digunakan. Nilai 17,889 tergolong sangat tinggi sehingga diperlukan efisiensi material dengan mengganti jenis material yang tegangan luluh lebih rendah. Material dengan kekuatan yang tinggi membuat biaya produksi juga tinggi.

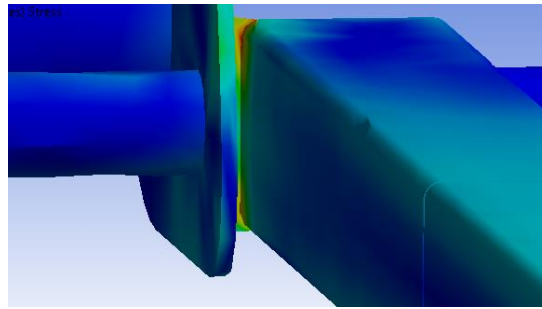


Gambar 8. Letak tumpuan dan beban desain 2

Gambar 8 menunjukkan letak tumpuan jepit (*fixed support*) desain 2 pada poros kemudi dan poros *shockbreaker* belakang. Beban baterai terletak pada bagian datar rangka komponen bagian depan. Beban motor listrik terdapat pada bagian datar dan berdekatan dengan rangka lengan ayun. Sedangkan beban pengontrol pada bagian bidang miring antara rangka penyangga tempat duduk.

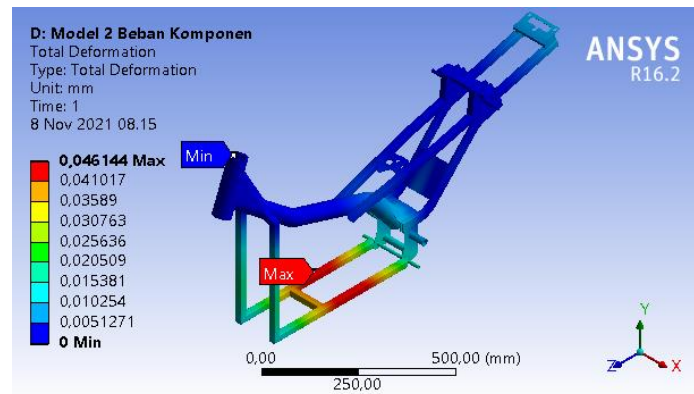


Gambar 9. Tegangan *von mises* desain 2



Gambar 10. Konsentrasi tegangan desain 2

Hasil simulasi tegangan desain 2 pada gambar 9 didapatkan tegangan *von mises* maksimum 13,256 MPa berada pada bagian sambungan rangka lengan ayun dan rangka komponen. Pada lekukan rangka komponen terdapat tegangan *von mises* rendah ditandai dengan warna biru muda karena menahan beban baterai dan motor listrik. Pada gambar 10, konsentrasi tegangan ditandai dengan bagian warna biru muda hingga hijau dengan titik berwarna kuning hingga merah. Bagian tersebut perlu tambahan las untuk memperkuat bagian tersebut dan mendistribusikan tegangan secara merata. Tegangan yang terjadi berada dibawah tegangan luluh material AISI 4130 yaitu 415 MPa sehingga desain 2 dikatakan aman.



Gambar 11. Total deformasi desain 2

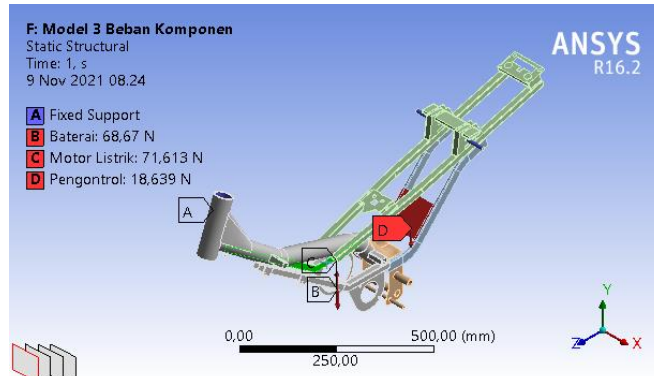
Total deformasi maksimum pada hasil simulasi desain rangka 2 yang ditunjukkan pada gambar 11 mendapatkan 0,046 mm yang terletak pada sambungan antara rangka komponen dan poros lengan ayun. Deformasi yang terjadi masih dalam kategori kecil mengingat tegangan yang terjadi berada pada tegangan luluh. Rangka bagian belakang terutama tempat duduk mengalami deformasi akibat menahan beban baterai dan motor listrik melalui rangka penyangga tempat duduk. Deformasi yang terjadi masih dalam kategori kecil mengingat tegangan yang terjadi berada dibawah tegangan luluh.

Perhitungan nilai faktor keamanan desain rangka 2 dapat dihitung melalui persamaan 1 sebagai sebagai berikut:

$$N = \frac{415}{13,256}$$

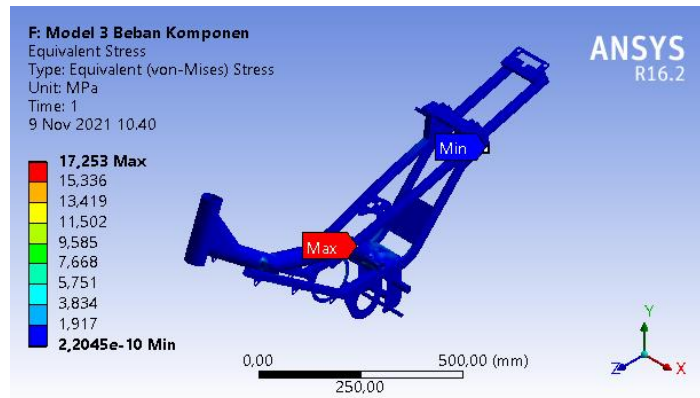
$$N = 31,306$$

Didapatkan faktor keamanan pada desain 2 yaitu 31,306. Faktor keamanan didapatkan >2,5 sehingga berada pada batas aman untuk digunakan. Nilai 31,306 tergolong sangat tinggi sehingga diperlukan efisiensi material dengan mengganti jenis material yang tegangan luluh lebih rendah. Material dengan kekuatan yang tinggi membuat biaya produksi juga tinggi.

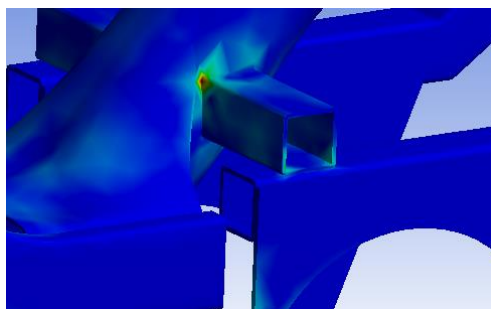


Gambar 12. Letak tumpuan dan beban desain 3

Gambar 12 menunjukkan tumpuan jepit (*fixed support*) pada poros kemudi dan poros *shockbreaker* belakang. Beban baterai ditempatkan padaudukan seperti anting sehingga baterai dalam posisi menggantung. Beban motor listrik ditempatkan pada *bracket* dekat dengan lengan ayun. Sedangkan beban pengontrol pada bagian bidang miring antara rangka penyangga tempat duduk.

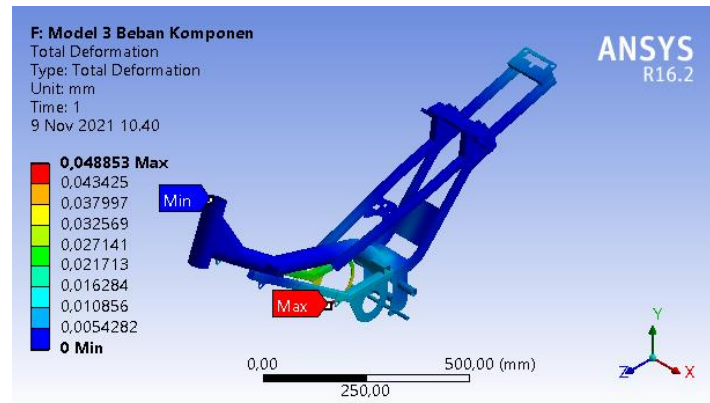


Gambar 13. Tegangan *von mises* desain 3



Gambar 14. Konsentrasi tegangan desain 3

Hasil simulasi tegangan pada gambar 13 didapatkan tegangan *von mises* maksimum 17,253 MPa berada pada bagian sambungan rangka lengan ayun dan rangka komponen. Pada gambar 14, konsentrasi tegangan ditandai dengan bagian warna biru muda hingga hijau dengan titik berwarna kuning hingga merah pada penyangga beban motor listrik. Tegangan yang terjadi berada dibawah tegangan luluh material AISI 4130 yaitu 415 MPa, sehingga desain 3 dikatakan aman.



Gambar 15. Total deformasi desain 3

Total deformasi maksimum pada hasil simulasi desain rangka 3 yang ditunjukkan pada gambar 15 mendapatkan 0,049 mm yang terletak pada *bracket* motor listrik. Deformasi yang terjadi masih dalam kategori kecil mengingat tegangan *von mises* desain 3 dibawah tegangan luluh. Deformasi dijadikan sebagai representasi skala akibat pemberian beban pada objek [9]. Oleh karena itu, diperlukan tambahan penyangga atau memodifikasi *bracket* motor listrik untuk mengurangi deformasi.

Perhitungan nilai faktor keamanan desain rangka 3 dapat dihitung melalui persamaan 1 sebagai sebagai berikut.

$$N = \frac{415}{17,253}$$

$$N = 24,054$$

Didapatkan faktor keamanan pada desain 3 adalah 24,054. Faktor keamanan didapatkan >2,5 sehingga berada pada batas aman untuk digunakan. Nilai 24,054 tergolong sangat tinggi sehingga diperlukan efisiensi material dengan mengganti jenis material yang tegangan luluh lebih rendah.

Desain rangka terpilih

Tabel 2. Rekapitulasi hasil simulasi variasi desain

	Desain 1	Desain 2	Desain 3
Tegangan <i>Von Mises</i> Maksimum (MPa)	23,199	13,256	17,253
Total Deformasi Maksimum (mm)	0,036	0,046	0,049
Faktor Keamanan	17,889	31,306	24,054

Desain terpilih sebagai rangka sepeda motor listrik yaitu desain dengan hasil simulasi tegangan *von mises* maksimum terendah, total deformasi maksimum terendah, dan faktor keamanan tertinggi. Berdasarkan tabel 2, desain 2 memiliki tegangan terendah yaitu 13,256 MPa dan faktor keamanan tertinggi yaitu 31,306. Sedangkan desain 1 memiliki total deformasi maksimum terendah yaitu 0,036. Sehingga desain 2 terpilih sebagai desain rangka sepeda motor listrik dibanding dengan desain 1 dan 3. Kekuatan serta struktur rangka desain 2 dapat mendistribusikan tegangan dan deformasi dengan lebih baik. Deformasi merupakan indikator kekuatan rangka dimana semakin kuat struktur, maka nilai deformasi didapatkan kecil. Semakin lemah struktur, maka deformasi yang didapatkan besar [10]. Dengan nilai faktor keamanan yang sangat tinggi dimungkinkan untuk mengganti material yang kekuatannya lebih rendah, dikarenakan semakin tinggi nilai faktor keamanan maka biaya produksi akan semakin tinggi atau mahal.

4. KESIMPULAN

Hasil simulasi menggunakan *Ansys* pada desain satu didapatkan tegangan von mises 23,199 MPa, total deformasi 0,036 mm, dan faktor keamanan 17,889. Desain dua didapatkan tegangan von mises 13,256 MPa, total deformasi 0,046 mm, dan faktor keamanan 31,306. Desain tiga didapatkan tegangan von mises 17,253 MPa, total deformasi 0,049 mm, dan faktor keamanan 24,054. Desain 2 menjadi desain rangka sepeda motor listrik yang terpilih karena memiliki kekuatan terbaik dengan tegangan *von mises* terendah, total deformasi terendah dan faktor keamanan tertinggi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. F. Nugraha, A. Estiyono, and A. Kurniawan, "Implementasi Rangka Untuk Sepeda Motor Sport Elektrik Setara 250cc," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 9, no. 1, 2020.
- [2] R. J. Delgado Ojeda, "Motorcycle frame design and optimization," *Bachelor's thesis*, vol. Universita, pp. 1–87, 2016.
- [3] KTM Bike Industries : Technologies. Available from : (<https://www.ktm-bikes.at/service/technologies>). (diakses pada 14 Mei 2022).
- [4] S. Mubarak, "Pengaruh Variasi Material Dan Beban Keamanan Pada Desain Pencakar Inner Puller Bearing Berbasis Simulasi Menggunakan," 2019.
- [5] I. N. A. A. Saputra, K. R. Dantes, and I. N. P. Nugraha, "Analisis Tegangan Statik pada Rancangan Frame Mobil Listrik Ganesha Sakti (Gaski) Menggunakan Software Solidworks 2014," *JJTM*, vol. 6, no. 2, pp. 113–120, 2018.
- [6] A. Harahap, "Simulasi Pembebanan Pada Shackle Menggunakan Perangkat Lunak Ansys APDL 15.0," *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 74–84, Jun. 2020
- [7] A. H. Soesilo, Fadelan, and W. T. Putra, "Perancangan dan Analisi Carbody Lokomotif dengan Metode Elemen Hingga," pp. 8–18, 2020.
- [1] N. A. F. Nugraha, A. Estiyono, and A. Kurniawan, "Implementasi Rangka Untuk Sepeda Motor Sport Elektrik Setara 250cc," *J. Sains dan Seni ITS*, vol. 9, no. 1, 2020.
- [2] R. J. Delgado Ojeda, "Motorcycle frame design and optimization," *Bachelor's thesis*, vol. Universita, pp. 1–87, 2016.
- [3] KTM Bike Industries : Technologies. Available from : (<https://www.ktm-bikes.at/service/technologies>). (diakses pada 14 Mei 2022).
- [4] S. Mubarak, "Pengaruh Variasi Material Dan Beban Keamanan Pada Desain Pencakar Inner Puller Bearing Berbasis Simulasi Menggunakan," 2019.
- [5] I. N. A. A. Saputra, K. R. Dantes, and I. N. P. Nugraha, "Analisis Tegangan Statik pada Rancangan Frame Mobil Listrik Ganesha Sakti (Gaski) Menggunakan Software Solidworks 2014," *JJTM*, vol. 6, no. 2, pp. 113–120, 2018.
- [6] A. Harahap, "Simulasi Pembebanan Pada Shackle Menggunakan Perangkat Lunak Ansys APDL 15.0," *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 74–84, Jun. 2020
- [7] A. H. Soesilo, Fadelan, and W. T. Putra, "Perancangan dan Analisi Carbody Lokomotif dengan Metode Elemen Hingga," pp. 8–18, 2020.

- [8] M. M. Yusup, “Perancangan Rangka Tubular Space Frame Kendaraan Listrik Fcae-Itk Ditinjau Dari Simulasi Finite Element Analysis (FEA),” *Dr. Diss.*, pp. 8–45, 2019.
- [9] Wibawa, L. A. N., 2019, Desain dan Analisis Kekuatan Rangka Lemari Perkakas di Balai LAPAN Garut Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Machine: Jurnal Teknik Mesin*, 5(2), 45-50.
- [10] Wibawa, L. A. N., 2020, Simulasi umur fatik rangka main landing gear menggunakan metode elemen hingga, *Din. Tek. Mesin*, 10(2).