

ANALISIS KEKUATAN *FRAME* SEPEDA LISTRIK NGEBUTS MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Fadhli Dzil Ikram

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Teknologi Sumbawa
Prodi Teknik Mesin
fadhli.dzil.ikram@uts.ac.id

Erik

Mahasiswa S1
Universitas Teknologi Sumbawa
Prodi Teknik Mesin
tpmerik@gmail.com

Three hundred and ten million people are affected by global climate change caused by carbon dioxide gas. The internal combustion engine that dominates the transportation fleet is one of the contributors to the amount of carbon dioxide in the atmosphere. Research related to environmentally friendly vehicles, in this case, electric vehicles, needs to continue to be carried out followed by downstream research results in the industry. The hope is to reduce the amount of greenhouse gas emissions produced by internal combustion engine vehicles. This study aims to determine the strength of the electric bicycle frame by conducting a stress analysis using the finite element method. The geometry modeling, inputs (data of material properties, geometry, loads, boundary conditions), mesh, solve, and validation are the steps that are passed in this research. The results show that the maximum equivalent stress (von Mises) of 98.31 MPa occurs at the joint between the Seat Tube and Seat Stay, while the minimum stress of 0.01 MPa occurs at the top of the Head Tube. The maximum deformation that occurs at the top of the Seat Tube is 0.15 mm. The minimum safety factor value on the frame is 2.39. Based on this value, the electric bicycle frame can be said to be strong enough to withstand the load of the rider and the battery.

Keywords: *Climate Change, Frame, Electric Bicycle, Finite Element Method, Stress Analysis.*

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim dunia akhir-akhir ini memberikan dampak pada 310 juta orang seperti peristiwa kekeringan, kenaikan permukaan laut, banjir, dan pencairan lapisan es [1]. Hal tersebut disebabkan oleh “efek rumah kaca” dimana pemanasan yang terjadi karena atmosfer menangkap panas yang memancar dari Bumi ke luar angkasa. Salah satu gas yang berkontribusi terhadap efek rumah kaca yaitu karbon dioksida (CO₂) [2]. Rata-rata karbon dioksida di atmosfer secara global pada tahun 2020 adalah 412,5 ppm (*parts per million*). Tingkat karbon dioksida saat ini lebih tinggi daripada titik mana pun setidaknya dalam 800.000 tahun terakhir [3].

Sebanyak 14% emisi gas rumah kaca di atmosfer disumbang oleh sektor transportasi. Sisanya terbagi ke dalam sektor lain seperti energi, industri, bangunan, pertanian, kehutanan, dan penggunaan lahan lainnya [4]. Kendaraan pribadi bertanggung jawab atas 83% emisi CO₂ dari sektor transportasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, sektor transportasi dapat dianggap sebagai salah satu masalah utama kesehatan masyarakat di lingkungan perkotaan [5]. Berdasarkan laporan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) yang dipublikasikan pada tahun 2017, lebih dari seperempat kematian anak-anak di bawah 5 tahun disebabkan oleh pencemaran lingkungan. Penelesuran mendalam pada laporan tersebut mengungkapkan bahwa 570 ribu kematian disebabkan oleh infeksi saluran pernapasan [6].

Armada transportasi didominasi oleh mesin pembakaran internal yang menjadi salah satu kontributor banyaknya karbon dioksida di atmosfer. Penelitian terkait kendaraan ramah lingkungan dalam hal ini kendaraan listrik, perlu terus dilakukan diikuti dengan hilirisasi hasil penelitian di dunia industri. Harapannya dapat mengurangi jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan kendaraan bermesin pembakaran dalam.

Tren kendaraan listrik meningkat dari tahun ke tahun. Hal ini ditandai dengan tumbuhnya penjualan kendaraan listrik dari 450.000 pada tahun 2015 menjadi 2,1 juta pada tahun 2019 Hal ini disebabkan oleh

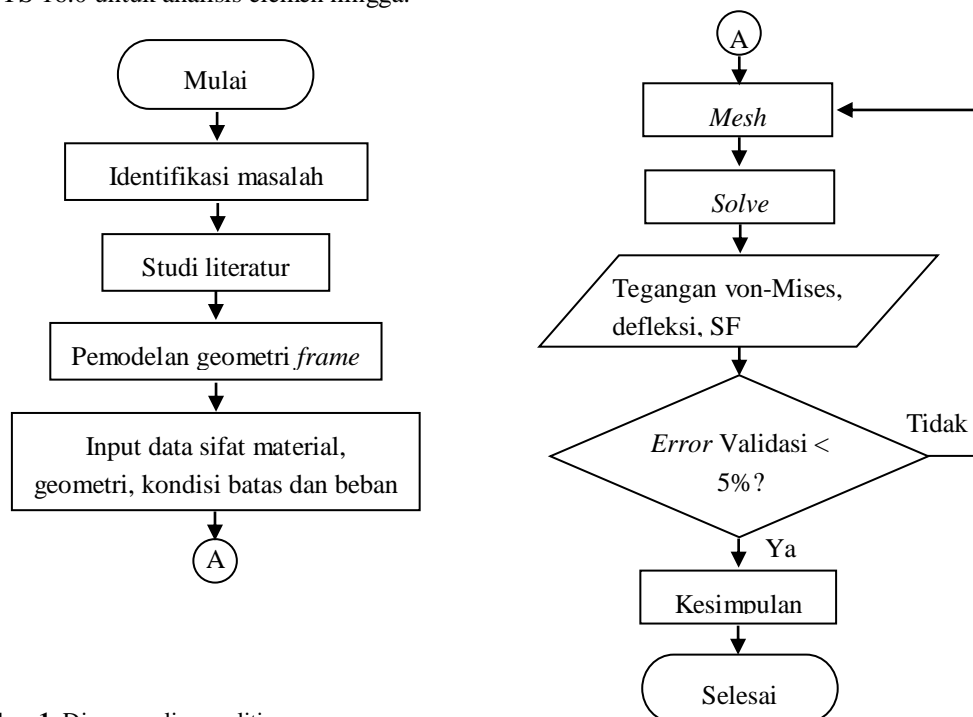
harga baterai yang turun, kapasitas baterai meningkat untuk jarak tempuh yang lebih jauh, dan pemasangan infrastruktur daya terus berlanjut. Secara global, penjualan akan meningkat menjadi 8,5 juta pada tahun 2025, 26 juta pada tahun 2030 dan 54 juta pada tahun 2040 [7].

Kendaraan listrik terdiri dari tiga komponen utama, yaitu baterai yang menyediakan energi, motor listrik yang menggerakkan roda, dan pengontrol yang mengatur aliran energi ke motor [8, 9]. Sepeda listrik ngebUTS yang diinisiasi oleh tim dari Universitas Teknologi Sumbawa hadir sebagai alternatif kendaraan listrik. Seperti halnya kendaraan listrik pada umumnya, sepeda listrik ngebUTS memiliki baterai, motor listrik dan pengontrol. Selain tiga komponen utama itu, ada satu komponen penting yang tidak dapat dipandang sebelah mata, yaitu *frame*. Komponen ini merupakan bagian yang sangat krusial dari sepeda listrik karena menopang beban pengendara dan baterai. *Frame* dipersyaratkan harus kuat dalam menahan beban-beban yang terjadi dan cukup ringan sehingga daya jelajah sepeda listrik dapat lebih jauh.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan *frame* dengan melakukan analisis tegangan menggunakan metode elemen hingga. Riset sebelumnya yang telah dilakukan Ningtyas, *et al.* [10] berupa simulasi analisis elemen hingga dari model *frame* sepeda listrik roda tiga sebagai instrumen bantu transportasi bagi orang difabel. Material yang dipakai *steel* dengan beban bervariasi mulai dari 60 kg, 75 kg dan 90 kg. Hasil simulasi menunjukkan tegangan maksimum sebesar 20,026 MPa, perpindahan paling besar 0,045 mm dan faktor keamanan sebesar 10,337. Penelitian lain terkait analisis tegangan von Mises dan faktor keamanan pada *chassis* kendaraan listrik tipe in-wheel dengan material baja AISI 1018 HR oleh Budiman *et al.* [11] telah dilakukan. Tegangan maksimum yang terjadi pada *chassis* sebesar 20,33 MPa, perpindahan maksimum sebesar 0,22 mm serta faktor keamanan minimum yang diperoleh yaitu 12,3. Sutikno [12] melakukan analisis tegangan akibat pembebanan statis pada desain *carbody* TeC *Railbus* dengan metode elemen hingga. Dari tiga kasus pembebanan, tegangan yang terjadi masih berada di bawah tegangan *yield* material sehingga dapat disimpulkan desain konstruksi *carbody* TeC *Railbus* dapat menahan beban yang terjadi saat beroperasi. Dalam simulasi yang lain, oleh Indoba [13] tegangan von Mises bernilai maksimum dengan magnitudo 16,64 MPa pada daerah sambungan *top tube*, *down tube* dan *head tube* untuk kasus dengan pembebanan pada bagian dudukan atau *saddle* sepeda. Defleksi yang terjadi akibat beban tersebut sebesar 0,018 mm. Kasus pembebanan yang kedua dikenakan pada batang kemudi, *saddle*, dan batang pedal sepeda. Akibat beban tersebut terjadi tegangan von Mises dan defleksi maksimum sebesar 17,25 MPa dan 0,033 mm.

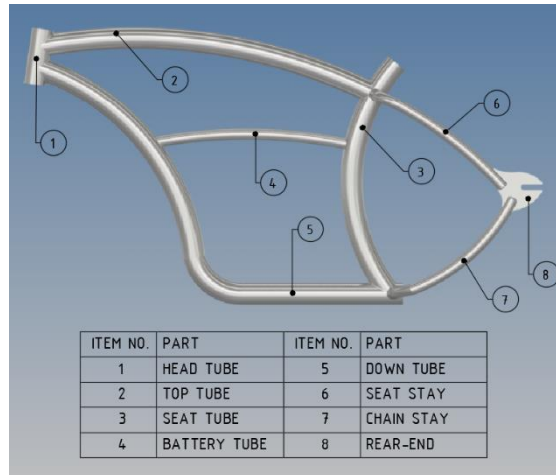
2. METODE DAN BAHAN

Langkah-langkah yang dilalui dalam penelitian ini tergambar di diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1. Perangkat lunak utama yang digunakan adalah Autodesk Inventor 2020 untuk pemodelan geometri dan ANSYS 16.0 untuk analisis elemen hingga.



Gambar 1: Diagram alir penelitian

Penelitian dimulai dari identifikasi masalah yang ingin dipecahkan terkait dengan kekuatan *frame* sepeda listrik ngebUTS. Tahap berikutnya berupa studi literatur, dimana referensi dari buku, laporan ilmiah, maupun hasil penelitan terkait dikumpulkan, untuk dijadikan bahan rujukan yang mendukung penelitian ini. Langkah selanjutnya yaitu geometri *frame* dimodelkan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2018. Pemodelan geometri diawali dari membuat sketsa berupa profil area tertutup dengan dimensi yang telah ditentukan. Sketsa tersebut diubah menjadi 3 dimensi dengan fitur *extrude* dan *sweep*. Setelah model *frame* terbentuk, fitur *fillet* diberikan antar sambungan untuk merepresentasikan sambungan las. Model 3D *frame* yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2: Model 3D *frame* sepeda listrik ngebUTS

Frame terdiri dari delapan *part* berawal dari *Head Tube* hingga *Rear-End*. Nama *part* beserta ukurannya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Ukuran masing-masing *part frame*

PART	UKURAN	SATUAN
<i>Head Tube</i>	OD=42.7, ID=38.1	mm
<i>Top Tube</i>	OD=42.7, ID=38.1	mm
<i>Seat Tube</i>	OD=42.7, ID=38.1	mm
<i>Battery Tube</i>	OD=21.7, ID=17.7	mm
<i>Down Tube</i>	OD=42.7, ID=38.1	mm
<i>Seat Stay</i>	OD=21.7, ID=17.7	mm
<i>Chain Stay</i>	OD=21.7, ID=17.7	mm
<i>Rear-End</i>	Thickness=3	mm

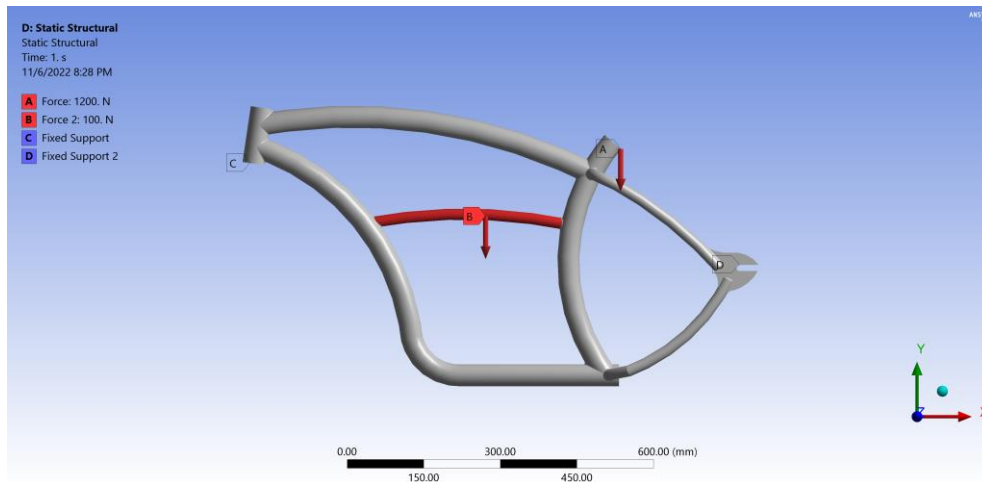
Hampir keseluruhan material *frame* yang digunakan adalah pipa baja karbon JIS G 3444 grade STK400 untuk struktur umum. Pipa tersebut merupakan baja karbon rendah dengan komposisi kimia 0,25% karbon (C), 0,04% fosforus (P), dan 0,04% sulfur (S) [14]. Sifat dari material ini ditunjukkan pada Tabel 2 [15].

Tabel 2: Sifat Pipa Baja Karbon JIS G 3444 grade STK400

NO.	SIFAT	NILAI	SATUAN
1	Densitas	7850	kg m ⁻³
2	Koefisien Ekspansi Termal	1,3E-05	C ⁻¹
3	Modulus Young's	2E+05	MPa
4	Rasio Poisson's	0,29	
5	Modulus Geser	8,2E+04	MPa

NO.	SIFAT	NILAI	SATUAN
6	Kekuatan Luluh Tarik	235	MPa
7	Kekuatan Tarik Maksimum	400	MPa

Beban berupa gaya akibat berat pengendara sebesar 1200 N ditempatkan di atas *Seat Tube* dengan arah vertikal ke bawah. Sedangkan gaya yang disebabkan oleh berat baterai sebesar 100 N terdistribusi merata di atas *Battery Tube*. Kondisi batas diterapkan pada *Rear-End / Dropout* dan bagian bawah *Head Tube* dengan kondisi *fixed* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Pembebanan dan kondisi batas

Setelah input parameter yang diperlukan selesai, proses *mesh* dilakukan. *Mesh* membagi suatu *object* geometri menjadi elemen yang saling bertautan yang jumlahnya berhingga. Jenis elemen yang digunakan adalah tetrahedral10 sebanyak 362.550 elemen.

Solve adalah suatu proses untuk menyelesaikan variabel yang tidak diketahui dari model sistem dengan menggunakan algoritma yang dikembangkan dari masing-masing pembuat perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Untuk kasus ini, ANSYS menggunakan *Mechanical APDL solver*. Sebuah model sistem biasanya terdiri dari sejumlah persamaan aljabar yang dapat ditulis dalam bentuk matriks seperti persamaan (1) [16], dimana $\{F\}$ adalah vektor gaya nodal global, $[K]$ adalah matriks kekakuan global struktur, $\{d\}$ adalah vektor derajat kebebasan atau perpindahan nodal baik yang diketahui maupun tidak diketahui. Kondisi batas yang memadai memastikan model sistem dapat dipecahkan [17].

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Informasi berupa distribusi tegangan von Mises, defleksi, dan *Safety Factor (SF)* dapat diekstrak setelah proses *solve* berakhir. Tegangan ekuivalen (von Mises), defleksi pada struktur dengan tumpuan *fixed* pada kedua ujungnya, dan faktor keamanan, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan **Error! Reference source not found.** [18], (3) [16], (4) [19], (5) [20].

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta_{MAX} = \frac{wL^4}{384 EI} \quad (4)$$

$$N = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_w} \quad (5)$$

Dimana

- σ' = tegangan von Mises (N/m²)
- σ_x = tegangan normal arah x (N/m²)
- σ_y = tegangan normal arah y (N/m²)
- σ_z = tegangan normal arah z (N/m²)
- τ_{xy} = tegangan geser arah y pada bidang x (N/m²)
- τ_{yz} = tegangan geser arah z pada bidang y (N/m²)
- τ_{zx} = tegangan geser arah x pada bidang z (N/m²)
- ϵ_x = regangan normal arah x
- ϵ_y = regangan normal arah y
- ϵ_z = regangan normal arah z
- γ_{xy} = regangan geser arah y pada bidang x
- γ_{yz} = regangan geser arah z pada bidang y
- γ_{zx} = regangan geser arah x pada bidang z
- E = modulus Young's / elastisitas (Pa)
- ν = rasio poisson's
- Δ_{max} = defleksi maksimum (mm)
- w = beban terdistribusi (N/m)
- L = panjang struktur (m)
- I = momen inersia (m⁴)
- N = faktor keamanan
- σ_{yield} = tegangan / kekuatan luluh tarik (MPa)
- σ_w = tegangan kerja (MPa).

Hasil yang diperoleh perlu dilakukan validasi melalui perhitungan analitik untuk memastikan solusi dari model elemen hingga mendekati solusi sesungguhnya. *Error* validasi (ϵ) dapat dihitung melalui persamaan (6) [17] dimana harga mutlak dari selisih nilai maksimum perhitungan analitik $z_{max}^{analytical}$ dengan nilai maksimum perhitungan simulasi $z_{max}^{simulation}$ dibagi dengan nilai maksimum perhitungan analitik $z_{max}^{analytical}$.

$$\epsilon = \left| \frac{z_{max}^{analytical} - z_{max}^{simulation}}{z_{max}^{analytical}} \right| \quad (6)$$

Perhitungan analitik defleksi menggunakan data teknis sebagaimana yang ada di Tabel 3.

Tabel 3: Data teknis perhitungan defleksi

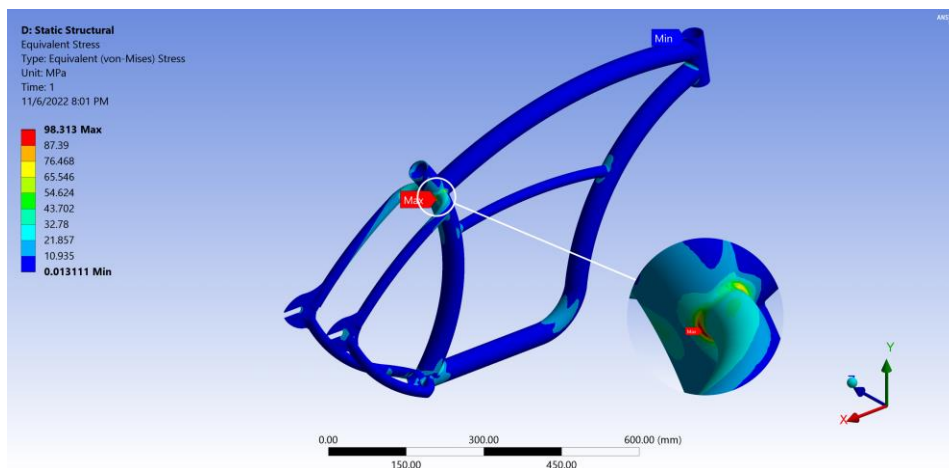
PARAMETER	NILAI	SATUAN
Beban terdistribusi (w)	299,4	N/m
Panjang Battery Tube (L)	0,334	m
Modulus Young's (E)	2E+11	Pa
Momen Inersia (I)	6,067E-9	m ⁴

Apabila kesalahan validasi kurang dari 5%, maka dilanjutkan ke tahap berikutnya. Jika lebih dari nilai itu, maka akan kembali ke proses mesh untuk dilakukan perbaikan.

Penelitian diakhiri dengan kesimpulan yang dapat ditarik setelah melakukan analisis tegangan menggunakan metode elemen hingga dan rekomendasi terhadap rencana penelitian selanjutnya.

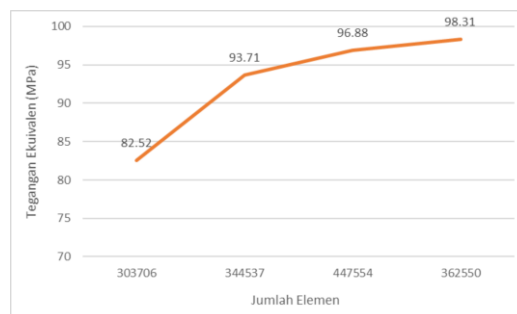
3. HASIL DAN DISKUSI

Tegangan ekuivalen (von Mises) maksimum sebesar 98,31 MPa terjadi di sambungan antara *Seat Tube* dengan *Seat Stay* sedangkan tegangan minimum sebesar 0,01 MPa terjadi di bagian atas *Head Tube* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Tegangan maksimum terjadi di daerah itu karena sambungan berada dekat dengan beban dari pengendara yaitu sebesar 1200 N dan sambungan memiliki luas penampang yang lebih kecil daripada sambungan *Top Tube* dengan *Seat Tube* sehingga secara teori tegangan terbesar akan terjadi disana. Selain itu, tegangan minimum terjadi di bagian atas *Head Tube* karena daerah itu paling jauh dari daerah pembebanan dan memiliki luas penampang yang lebih besar dibandingkan dengan sambungan antara *Seat Tube* dengan *Seat Stay*.



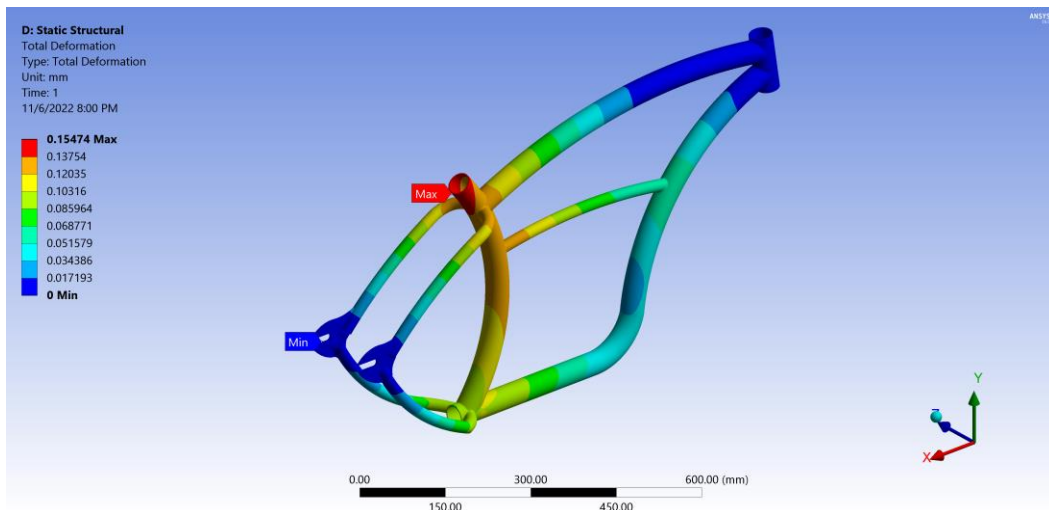
Gambar 4: Distribusi tegangan von-Mises

Untuk mengevaluasi dampak jumlah elemen terhadap akurasi simulasi digunakan studi konvergensi. Hasil studi konvergensi ini dapat dilihat pada Gambar 5. Perubahan nilai tegangan pada awal penambahan jumlah elemen mencapai 11,94%, menjadi 3,27% ketika diskritisasi yang selanjutnya dan terakhir berada di angka 1,46%. Tegangan ekuivalen (von Mises) konvergen ketika jumlah elemen yang digunakan dalam analisis elemen hingga mencapai 362.550 buah.



Gambar 5: Grafik studi konvergensi

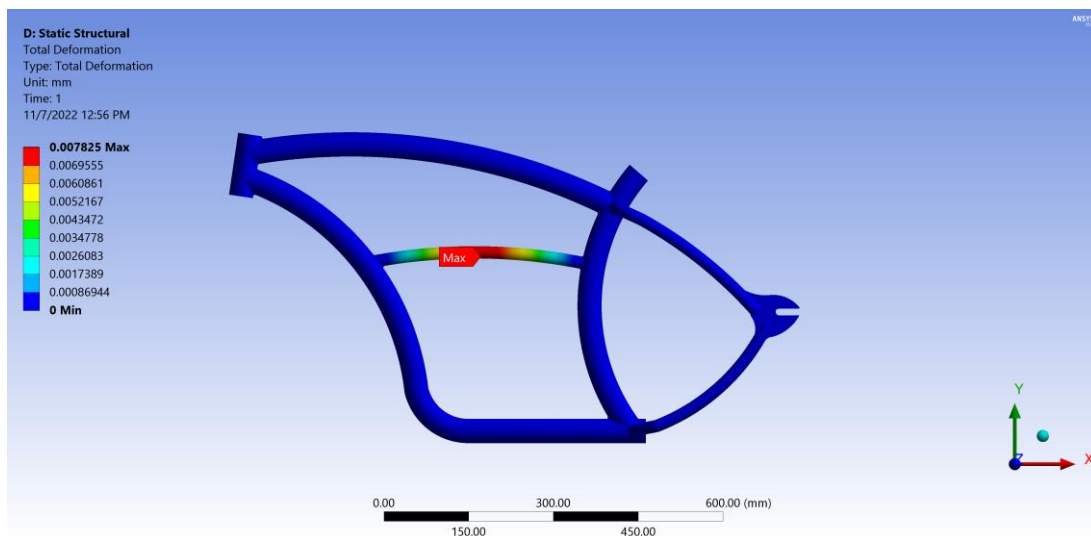
Hasil distribusi deformasi / defleksi total dapat dilihat di Gambar 6.



Gambar 6: Distribusi deformasi/defleksi total

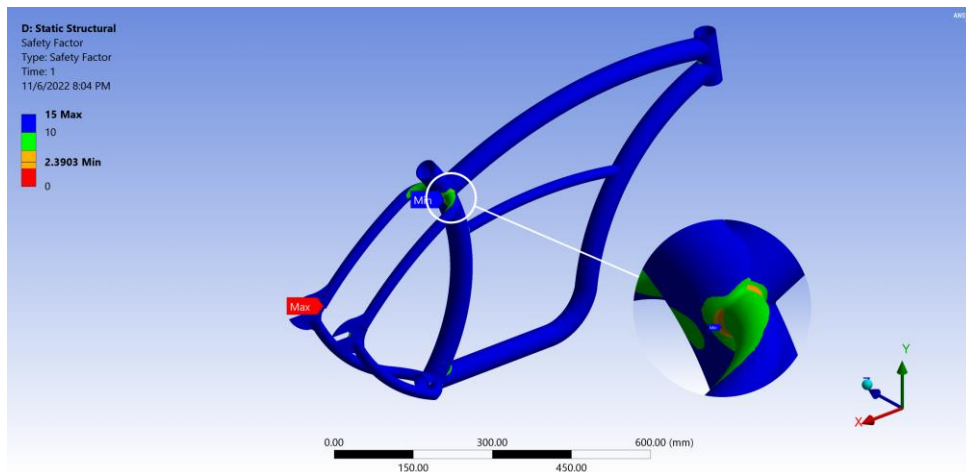
Deformasi maksimum terjadi di bagian atas *Seat Tube* sebesar 0,15 mm karena bagian ini yang terkena langsung dengan beban pengendara. Sedangkan pada *Rear-End* tidak terjadi deformasi karena bagian ini jauh dari pembebanan dan merupakan letak tumpuan *fixed* diterapkan.

Pada Gambar 7 terlihat deformasi akibat beban dari baterai. Nilai maksimum defleksi pada *Battery Tube* yang berhasil digali dengan metode elemen hingga sebesar 0,007825 mm sedangkan perhitungan analitik menunjukkan nilai sebesar 0,007997 mm yang diperoleh menggunakan rumus yang ada pada persamaan (4). *Error* validasi 2,15% setelah melalui perhitungan melalui persamaan (6) sudah cukup menunjukkan bahwa model elemen hingga yang dibuat mendekati solusi sebenarnya.



Gambar 7: Defleksi / deformasi akibat beban baterai

Faktor keamanan pada *frame* sepeda listrik ngebUTS memiliki nilai minimal 2,39 pada bagian sambungan antara *Seat Tube* dengan *Seat Stay* sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 8. Posisi nilai minimum faktor keamanan sesuai dengan posisi dimana terjadi tegangan von mises maksimum. Nilai ini diperoleh menggunakan rumus yang ada di persamaan (5). Dengan nilai seperti ini, dapat dikatakan *frame* aman terhadap beban yang bekerja padanya.



Gambar 8: Faktor keamanan pada *frame* sepeda listrik ngebUTS

4. KESIMPULAN

Tegangan ekuivalen (von Mises) maksimum sebesar 98,31 MPa terjadi di sambungan antara *Seat Tube* dengan *Seat Stay* sedangkan tegangan minimum sebesar 0,01 MPa terjadi di bagian atas *Head Tube*. Deformasi maksimum terjadi di bagian atas *Seat Tube* sebesar 0,15 mm dan minimum 0 mm pada *Rear-End*. Nilai faktor keamanan minimal pada *frame* adalah 2,39. Dengan nilai ini, *frame* sepeda listrik ngebUTS dapat dikatakan kuat dalam menahan beban pengendara dan baterai. Untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan uji lelah dan uji kejut sebagaimana persyaratan yang harus dilengkapi sesuai dengan standar SNI 1049:2008.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] DARA, THE CLIMATE VULNERABLE FORUM, *Climate vulnerability monitor 2nd edition : a guide to the cold calculus of a hot planet*, 2nd ed., Madrid, Fundación DARA Internacional, 2012.
- [2] YORO, K.O., DARAMOLA, M.O. “CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect”, In: Rahimpour, M.R., Farsi, M., Makarem, M.A. (eds), *Advances in Carbon Capture*, 1 ed., chapter 1, Duxford, UK, Woodhead Publishing, 2020.
- [3] LINDSEY, R., Climate Gov, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>. Diakses: January 2022.
- [4] LAMB, W.F., *et al.*, “A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018”, *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 7. pp. 1-31, June. 2021.
- [5] ARCOS, A., VARGAS, *The role of the electric vehicle in the energy transition*, 1 ed., Cham, Springer International Publishing, 2021.
- [6] WHO, *Don't pollute my future! The impact of the environment on children's health*, World Health Organization, Switzerland, 2017.
- [7] ALAM, M.S., KRISHNAMURTHY, M., *Electric Vehicle Integration in a Smart Microgrid Environment*, 1 ed., Boca Raton, CRC Press, 2021.
- [8] ENGE, P., ENGE, N., ZOEPF, S., *Electric Vehicle Engineering*, 1 ed., New York, Mc Graw Hill, 2021.
- [9] LEITMAN, S., BRANT, B., *Build Your Own Electric Vehicle*, 3 ed., New York, McGraw-Hill Education, 2013.
- [10] NINGTYAS, A.H.P., HIDAYAT, ROFIYANTO, P.N., “Analisis desain *frame* sepeda listrik roda tiga sebagai alat bantu transportasi bagi penyandang disabilitas menggunakan software Autodesk Inventor”, *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, v. 16, n. 1, pp. 7–11, Oct. 2021.
- [11] BUDIMAN, F.A., SEPTIYANTO, A., SUDIYONO, MUSYONO, A.D.N.I., SETIADI, R., “Analisis tegangan von Mises dan safety factor pada chassis kendaraan listrik tipe in-wheel”, *Rekayasa Mesin*, v. 16, n. 1, pp. 100–108, Mei. 2021.
- [12] SUTIKNO, E., “Analisis tegangan akibat pembebanan statis pada desain carbody TeC railbus dengan metode elemen hingga”, *Rekayasa Mesin*, v. 2, n. 1, pp. 65–81, Mei 2011.
- [13] INDOBA, S., *Analisis Struktur Sepeda Gunung Hardtail Pacific Tractor DHX 3.0 dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*, S.T., Universitas Sriwijaya, Palembang, 2021.
- [14] Steel JIS: Japanese Steels and Alloys, http://steeljis.com/jis_steel_datasheet.php?name_id=203. Diakses: January 2022.
- [15] Matmatch, <https://matmatch.com/materials/minfm39733-jis-g3444-grade-stk400>. Diakses: January

2022.

- [16] LOGAN, D.L., *A first course in the finite element method*, 6 ed., Boston, Cengage Learning, 2017.
- [17] BI, Z., *Finite element analysis applications*, 1st ed., London, Academic Press, 2018.
- [18] BUDYNAS, R.G., NISBETT, J.K., *Shigley's mechanical engineering design*, 11th ed., New York, McGraw-Hill Education, 2020.
- [19] LEET, K.M., UANG, C.M., LANNING, J.T., GILBERT, A.M., *Fundamentals of structural analysis*, 5 ed., New York, McGraw-Hill Education, 2018.
- [20] CALLISTER, W.D., RETHWISCH, D.G., *Materials science and engineering : an introduction*, 10th ed., Hoboken, Wiley, 2018.