

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Sepeda Motor Listrik

Sepeda motor listrik adalah kendaraan roda dua yang menggunakan energi listrik sebagai sumber utama penggeraknya serta digerakkan oleh motor listrik dan baterai. Berbeda dengan sepeda motor pada umumnya yang menggunakan Bahan Bakar Minyak (BBM) dan minyak sebagai sumber penggerak. Sepeda motor listrik merupakan alternatif ramah lingkungan untuk kendaraan bermotor konvensional yang menggunakan bensin (Avero Azhar et al., 2023).

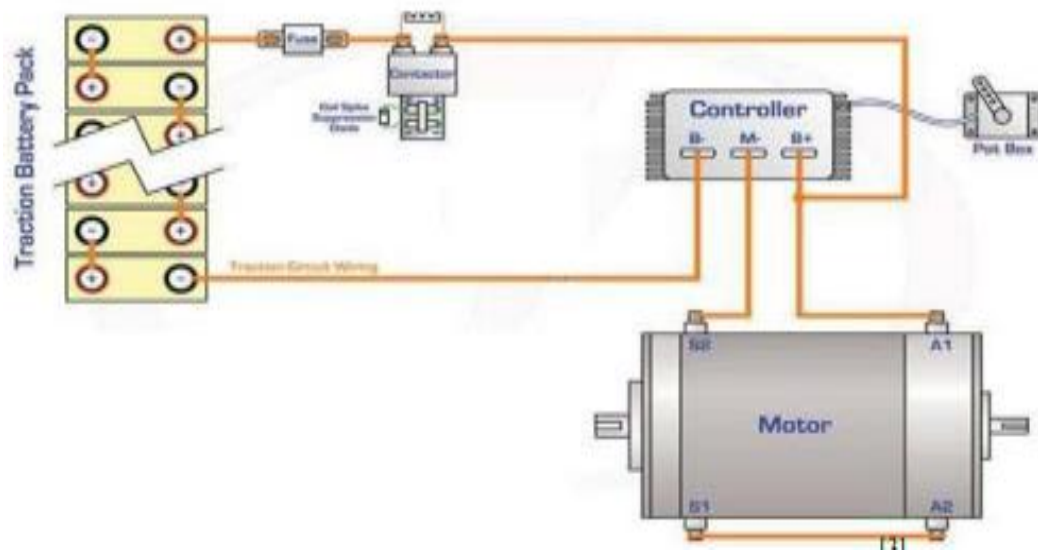


Gambar 2. 1 Ilustrasi sepeda motor listrik yang di simulasikan

Sumber : PT. Viar Motor

Sepeda Motor Listrik mempunyai prinsip kerja yaitu dengan cara yang sama dengan motor listrik lainnya. Baterai yang terisi daya yang dapat menyediakan energi listrik untuk motor listrik. Motor listrik kemudian menghasilkan torsi yang memutar roda, sehingga sepeda motor listrik tersebut dapat bergerak.

Dalam penelitian sepeda motor listrik ini, sumber tenaga yang digunakan adalah daya Motor Brushless DC (BLDC), sehingga motor listrik dengan bantuan baterai tersebut sebagai sumber energi listrik sehingga kendaraan roda dua dapat berputar dan di hubungkan ke roda belakang menggunakan gir rantai. Sedangkan sistem kelistrikan yang di rancang untuk sepeda motor listrik ini terlihat pada gambar 2.2 (Avero Azhar et al., 2023).



Gambar 2. 2 Sistem kelistrikan pada sepeda motor listrik

Sumber : Azhar et al., 2023

2.1.2 Tegangan Pada Rangka Sepeda Motor Listrik

Tegangan adalah intensitas gaya dalam pada elemen struktur sebagai reaksi terjadinya deformasi yang timbul akibat bekerjanya beban luar, pada umumnya

intensitas gaya ini berarah miring pada bidang potongan. Dalam praktek keteknikan intensitas gaya tersebut diuraikan menjadi tegak lurus dan sejajar dengan irisan yang sedang dianalisis.

Deformasi yang terjadi pada elemen batang yang menerima beban luar tergantung pada ukuran awal penampang, sehingga lebih tepat jika dinyatakan dalam bentuk regangan yang merupakan nilai banding perubahan dimensi per satuan ukuran terhadap dimensi awalnya, regangan dapat juga didefinisikan sebagai ekspresi non-dimensional dari deformasi (L.A.N. Wibawa, 2020).

Desain rangka/*chassis* sepeda motor listrik yang telah dirancang dengan menggunakan *solidworks* akan dilakukan analisis pada pengukuran tegangan pada setiap *frame/body* sepeda motor listrik untuk memastikan bahwa rangka yang telah dirancang dapat memenuhi kebutuhan konsumen atau pengendara serta telah diuji kekuatan materialnya. Menggunakan program metode *finite element* melalui pendekatan analisis numerik untuk mensimulasikan fisika terhadap perancangan desain rangka/*chassis* tersebut memastikan kondisi yang terjadi mendekati sebenarnya. Salah satu program atau software metode *finite element* yaitu *ansys workbench* yang mampu melakukan analisis struktur, perpindahan panas, dinamika fluida, dan elektromagnetik.

2.1.3 Pembebanan Pada Rangka Sepeda Motor Listrik

Pembebanan merupakan letak beban yang diletakkan pada suatu daerah pengujian. Berdasarkan daerah beban, pembebanan terbagi menjadi dua yaitu pembebanan merata dan pembebanan terpusat. Pembebanan merata merupakan pembebanan yang terjadi pada seluruh atau sebagian penampang. Sedangkan

pembebanan terpusat yaitu beban yang terletak pada satu atau beberapa titik pada bagian penampang (Ramadani Wahyuchandra, 2023).

Jenis pembebanan yang digunakan pada analisis simulasi beban statis dan dinamis pada rangka sepeda motor listrik yaitu dengan memperhatikan berat beban massa pada rangka sepeda motor listrik tersebut seperti distribusi beban pengemudi dan penumpang ketika mengendarai sepeda motor listrik tersebut dan tumpuan *footstep* sepeda motor listrik, serta letak *force*/gaya pada sepeda motor listrik saat beroperasi. Penting halnya untuk mengetahui ilustrasi ketika terdapat pengemudi dan penumpang ketika mengendarai sepeda motor listrik sebelum dilakukan pengukuran tegangan pada rangka sepeda motor listrik, ilustrasi tersebut terlihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Ilustrasi pengendara dan penumpang

Sumber : <https://g.co/gemini/share/8c843c0e6d1d>

Distribusi pembebanan yang diberikan diasumsikan seperti satu orang (pengemudi), dua orang (pengemudi dan penumpang) dan dua orang (pengemudi dan penumpang) dengan tambahan beban sebesar 20 Kg. Nilai tersebut diasumsikan sebagai beban maksimum yang mungkin diterima rangka di bagian tersebut.

2.1.4 Kekuatan Rangka/*Chassis Sepeda Motor Listrik*

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas dengan tujuan untuk melakukan pengukuran pada rangka/*chassis* sepeda motor listrik dengan simulasi numerik. Setiap pembebanan pada rangka sepeda motor listrik akan dilakukan pengukuran dan analisis rangka menggunakan *ansys workbench* ataupun dengan FEA (*finite element analysis*) untuk mendapatkan kekuatan rangka terhadap beban material yang telah ditentukan. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kekuatan rangka sepeda motor listrik terhadap variasi pembebanan rangka menggunakan *ansys workbench* dengan parameter nilai tegangan maksimal dan nilai deformasi maksimal.

a) Tegangan

Tegangan/stress dapat didefinisikan sebagai gaya normal tiap satuan luas, dan tegangan ini dianggap terbagi merata pada luas penampang melintang bagian benda. Tegangan timbul akibat adanya beban atau gaya yang bekerja pada sebuah benda atau material. Tegangan inilah akan diperoleh dimensi yang terkecil namun aman terhadap gaya atau beban yang bekerja pada benda tersebut (Setiyarto, 2022).

Dalam praktek teknik, gaya umumnya diberikan dalam pound atau newton, dan luas yang menahan dalam $inch^2$ atau mm^2 . Akibatnya tegangan biasanya dinyatakan dalam $pound/inch^2$ yang sering disingkat psi atau $Newton/mm^2$ (MPa).

Pada saat benda menerima beban sebesar F kg, maka benda akan bertambah panjang sebesar ΔL mm. Saat itu pada material bekerja tegangan yang dapat dihitung dengan rumus (*engineering stress*) pada persamaan 2.1 dibawah ini:

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

Keterangan :

σ = Tegangan Normal (Pascal, N/m^2 .)

F = Beban atau gaya yang diberikan (N, lbf, kgf)

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

Tegangan timbul akibat adanya beban atau gaya yang bekerja pada sebuah benda atau material. Dalam benda atau material terdapat tegangan ijin yang besarnya ditentukan oleh tegangan *yield point* material dan faktor keamanan (*sf*) yang diambil. Tegangan akan mempunyai satuan yang berbeda-beda, mengikuti satuan F dan satuan A . Bila F bersatuan N dan A bersatuan m^2 , maka tegangan mempunyai satuan N/m^2 yang disebut Pascal (Pa).

Dalam analisis kinerja motor listrik, baik pada kondisi statis maupun dinamis, salah satu parameter penting yang mempengaruhi distribusi tegangan dan deformasi adalah luas penampang dari komponen yang menerima beban. Luas penampang berperan dalam menentukan bagaimana gaya atau beban yang diterapkan pada suatu bagian motor listrik seperti poros, stator, atau rotor akan mempengaruhi tegangan mekanis deformasi strukturalnya.

Dari persamaan diatas, terlihat bahwa semakin besar luas penampang suatu bagian, semakin kecil tegangan yang dihasilkan akibat gaya yang diberikan. Sebaliknya, jika luas penampang kecil, tegangan yang dihasilkan akan lebih besar, yang berpotensi menyebabkan deformasi atau kegagalan material lebih cepat. Pada

simulasi statis dan dinamis, luas penampang sangat berpengaruh dalam menentukan distribusi tegangan statis, yang penting untuk memastikan bahwa material mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi berlebihan. Pada simulasi dinamis, luas penampang memengaruhi bagaimana tegangan mekanis dan vibrasi tersebar dalam suatu struktur, yang penting dalam menganalisis ketahanan material terhadap kelelahan (*fatigue*).

Tegangan *von mises* merupakan teori plastisitas yang diberi beban tiga dimensi sehingga menimbulkan tegangan kompleks. Pengujian tegangan *von mises* bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan kritis yang terjadi pada material saat diberikan beban pada titik tertentu serta menentukan kegagalan material atau tidak. Keuletan material dapat terjadi kegagalan akibat tegangan *von mises* melebihi kekuatan luluh material (L.A.N. Wibawa, 2020).

Von mises stress adalah tegangan yang nilainya didapat dari teori kegagalan karena energi distorsi. Jika nilai *von mises stress* melebihi tegangan luluh dari material, desain akan mengalami kegagalan. *Von Mises* sangat penting dalam analisis kekuatan material, khususnya ketika benda mengalami beban yang kompleks.

Secara matematis, tegangan *von mises* dihitung sebagai akar kuadrat dari separuh jumlah kuadrat dari semua komponen tegangan (tegangan normal dan tegangan geser) (Mulyadi2022). pada persamaan 2.2 dibawah ini:

$$\sigma_Y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - (\sigma_1 \sigma_2)} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

σ_Y = Tegangan *Von Mises* (Mpa)

σ_1 = Tegangan Normal (Mpa)

σ_2 = Tegangan Geser (Mpa)

Tegangan *von mises* berguna dalam menggabungkan tegangan normal dan tegangan geser menjadi satu nilai yang merepresentasikan tingkat tegangan total pada suatu titik dalam benda. Tegangan *von mises* adalah representasi dari tegangan multiaksial di dalam benda. Jika tegangan *von mises* yang dihasilkan pada suatu titik melebihi batas kekuatan material dari bahan tersebut, maka dapat diindikasikan bahwa benda tersebut berpotensi mengalami deformasi permanen atau bahkan kegagalan. Oleh karena itu, tegangan *von mises* sering digunakan dalam desain struktur untuk memastikan keandalan dan kekuatan struktur yang dirancang.

Tegangan didefinisikan dengan perbandingan antara gaya yang diberikan dengan luas area bidang tekan atau bidang geser. Tegangan dibedakan menjadi 2 yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Secara teori tegangan normal dibagi menjadi 2 yaitu tegangan tarik dan tegangan tekan.

a. Tegangan Normal

Dalam mekanika bahan, tegangan normal didefinisikan sebagai gaya per satuan luas yang bekerja tegak lurus terhadap bidang penampang. Untuk pembebanan aksial (tarik/tekan) pada batang lurus, besar tegangan normal rata-rata dirumuskan yang dijelaskan pada persamaan 2.1.

b. Tegangan Geser

Tegangan geser (*shear stress*) adalah gaya per satuan luas yang bekerja sejajar terhadap bidang penampang material. Pada struktur rangka sepeda motor listrik yang umumnya menggunakan pipa baja atau aluminium sebagai elemen rangka, penampang yang dianalisis sering berbentuk lingkaran berlubang (*hollow circular*

section). Tegangan geser akibat torsi pada penampang ini dapat dihitung dengan persamaan 2.3.

$$\tau = \frac{T \cdot c}{I} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

T = Torsi pada bidang

c = Jarak lokasi dari pusat massa

I = *Area of Moment of Inertia*

$$I = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)$$

Tegangan geser maksimum terjadi pada permukaan luar pipa, sedangkan pada bagian dalam bernilai lebih rendah secara proporsional terhadap jari-jarinya. Dalam analisis statis, rumus ini digunakan untuk memeriksa kemampuan rangka menahan torsi akibat beban lateral atau gaya dari suspensi dan mesin. Sedangkan pada analisis dinamis, tegangan geser pada penampang lingkaran berlubang menjadi penting dalam simulasi getaran torsi (*torsional vibration analysis*).

b) Tegangan Prinsipal

Tegangan Prinsipal adalah tegangan normal maksimum dan minimum yang terjadi pada suatu elemen material, ketika elemen tersebut diputar ke orientasi tertentu sehingga tegangan geser (*shear stress*) sama dengan 0. Dalam istilah lain tegangan prinsipal yaitu tegangan murni tarik ataupun tegangan tekan pada suatu budang permukaan. Pada bidang ini, tidak ada tegangan geser, hanya tegangan normal saja (Mulyadi2022).

Hubungan tegangan prinsipal dengan tegangan *Von misess* yaitu jumlah tegangan *von misess* dihitung dari tegangan prinsipal yang digunakan untuk mengetahui suatu material mengalami *yielding* (luluh) atau tidak. Tegangan prinsipal ini penting karena suatu material biasanya mengalami gagal (*yield/patah*)

pada kondisi tertentu dari tegangan prinsipal, tidak hanya dari tegangan pada arah sumbu awal. Nilai dari tegangan prinsipal dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 2.4 (Mulyadi2022). berikut ini:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

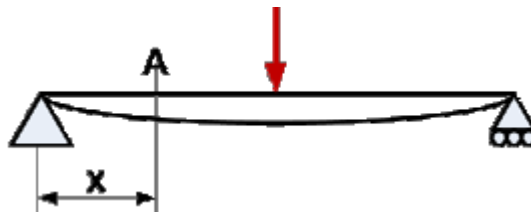
$\sigma_{1,2}$ = Tegangan Prinsipal (Pa)

$\sigma_{x,y}$ = Tegangan normal (Pa)

τ_{xy} = Tegangan geser (Pa)

c) Tegangan Bengkok (*Bending Stress*)

Tegangan bengkok adalah tegangan yang timbul ketika suatu elemen (batang, profil, rangka) mengalami momen lentur (*bending moment*). Tegangan ini terjadi karena bagian atas elemen mengalami regangan tarik dan bagian bawah mengalami regangan tekan (atau sebaliknya), dengan adanya poros netral di tengah. Dengan istilah lainnya tegangan bengkok yang terjadi karena adanya momen yang menyebabkan benda mengalami lentur atau bengkok. Seperti yang telah dijelaskan pada gambar 2.4 dibawah ini merupakan tegangan bengkok pada batang.



Gambar 2. 4 Tegangan bengkok

Sumber : Mulyadi et al., 2022

Tegangan bengkok (bending stress) pada titik A :

$$b = \frac{M_x \cdot c}{I} \dots\dots\dots(2.5)$$

Ketreangan :

M_x = Momen pada titik A yang berjarak x dari ujung elemen

C = Jarak titik elemen terhadap garis netral penampang elemen

I = Moment inersia.

Tegangan bengkok maksimum terjadi pada titik yang menerima momen maksimum dan jarak terhadap garis netral maksimum ($C_{\max}$). Bila penampang elemen berbentuk bulat pejal maka $C_{\max} = r$, sehingga :

$$b = \frac{M_{\max} \cdot r}{I} \dots\dots\dots(2.6)$$

d) *Mohr's Circle*

Hukum *Mohr* atau *Mohr's Circle* adalah metode grafis dan matematis yang digunakan untuk menentukan tegangan utama (*principal stresses*), regangan utama, dan tegangan geser maksimum pada suatu elemen material yang mengalami tegangan bidang (*plane stress*). Konsep ini sangat penting dalam analisis kekuatan struktur rangka sepeda motor listrik karena kondisi pembebanan yang terjadi sering merupakan kombinasi tegangan normal dan tegangan geser akibat gaya statis maupun dinamis.

Dalam bentuk grafis, *Mohr's Circle* menggambarkan semua kemungkinan kombinasi tegangan normal dan tegangan geser pada berbagai orientasi bidang di dalam elemen. Titik- titik pada lingkaran mewakili keadaan tegangan pada bidang tertentu, sementara radius lingkaran menunjukkan tegangan geser maksimum. Dalam *Mohr's Circle* bidang 2 dimensi mengidentifikasi nilai $\sigma_1 > \sigma_2$ dan *Mohr's Circle* bidang 3 dimensi mengidentifikasi nilai $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Dalam analisis statis rangka sepeda motor listrik, metode ini digunakan untuk mengevaluasi titik kritis yang mengalami kombinasi beban tarik, tekan, dan geser, sehingga dapat dibandingkan dengan kekuatan luluh material berdasarkan kriteria kegagalan seperti *von mises* atau *maximum shear stress theory*. Pada analisis

dinamis, *Mohr's Circle* dapat digunakan untuk memeriksa perubahan orientasi bidang maksimum tegangan akibat pembebanan siklik atau getaran. Metode *Mohr's Circle* yang digunakan untuk menghitung tegangan geser dan tegangan prinsipal yang bekerja pada suatu elemen atau struktur (Mulyadi2022). Untuk mengetahui atau menggambarkan *Mohr's Circle* menggunakan persamaan 2.7 :

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

R = Radius lingkaran mohr (Pa)

σ_{xy} = Tegangan normal (Pa)

τ_{xy} = Tegangan geser (Pa)

d) Regangan

Regangan merupakan perubahan pada ukuran akibat beban yang diterima oleh suatu rangka material sepeda motor listrik. Regangan terjadi akibat adanya dua gaya yang sama besar dan saling berlawanan arah sehingga terjadi perubahan bentuk atau ukuran. Regangan dapat dicari menggunakan hukum *hooke*, dimana Hukum *hooke* menggunakan persamaan tegangan berbanding lurus dengan nilai regangan. Elastisitas material yang berhubungan antara tegangan dan regangan akibat beban yang diterima didefinisikan sebagai hukum *hooke* (Ramadani Wahyuchandra, 2023).

Batasan sifat elastis perbandingan regangan dan tegangan akan linier dan akan berakhir sampai pada titik mulur. Hubungan tegangan dan regangan tidak lagi linier pada saat material mencapai batasan fase sifat plastis. Sehingga untuk mengetahui besarnya regangan yang terjadi adalah dengan membagi perpanjangan

dengan panjang semula. Regangan dapat dihitung menggunakan rumus dengan persamaan 2.8 berikut ini:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan :

L_0 = Panjang mula-mula (m)

L = Panjang setelah diberi gaya (m)

ΔL = Perubahan atau penambahan panjang (m)

ε = Regangan

c) Deformasi

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau posisi yang disebabkan adanya gaya yang diterima. Pada hasil simulasi akan menunjukkan hasil berupa warna pada desain sesuai dengan perhitungan rangka yang diberi beban. Bagian rangka yang memiliki nilai deformasi rendah dapat dioptimalkan dengan mengurangi massa rangka, dan bagian rangka yang mengalami nilai deformasi tinggi dapat diberikan penguat rangka (Ramadani Wahyuchandra, 2023).

Pada awal pembebanan akan terjadi deformasi elastis sampai pada kondisi tertentu, sehingga material akan mengalami deformasi plastis. Pada awal pembebanan di bawah kekuatan luluh, material akan kembali ke bentuk semula. Hal ini dikarenakan adanya sifat elastis pada bahan. Peningkatan beban melebihi kekuatan luluh (*yield point*) yang dimiliki plat akan mengakibatkan aliran deformasi plastis sehingga plat tidak akan kembali ke bentuk semula (Setiyarto, 2022).

Elastisitas bahan sangat ditentukan oleh modulus elastisitas. Modulus elastisitas suatu bahan didapat dari hasil bagi antara tegangan dan regangan. Dapat juga diketahui menggunakan rumus persamaan 2.9 berikut ini:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ atau } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan :

E = Modulus elastisitas

ε = Regangan

σ = Tegangan

d) *Yield Point* (Batas Luluh)

Yield Point dapat ditemukan sebagai nilai tegangan pada titik transisi antara *region* elastis dan plastis pada kurva tegangan-regangan. Dalam banyak kasus, *Yield Point* diambil sebagai titik pertama di mana deformasi plastis mulai terjadi, atau menggunakan pendekatan untuk mencari *Yield Strength* menggunakan aturan *offset* (Pasha, 2018). Berikut gambar 2.5 merupakan grafik yang menunjukkan batas luluh atau yang disebut dengan *Yield Point*.

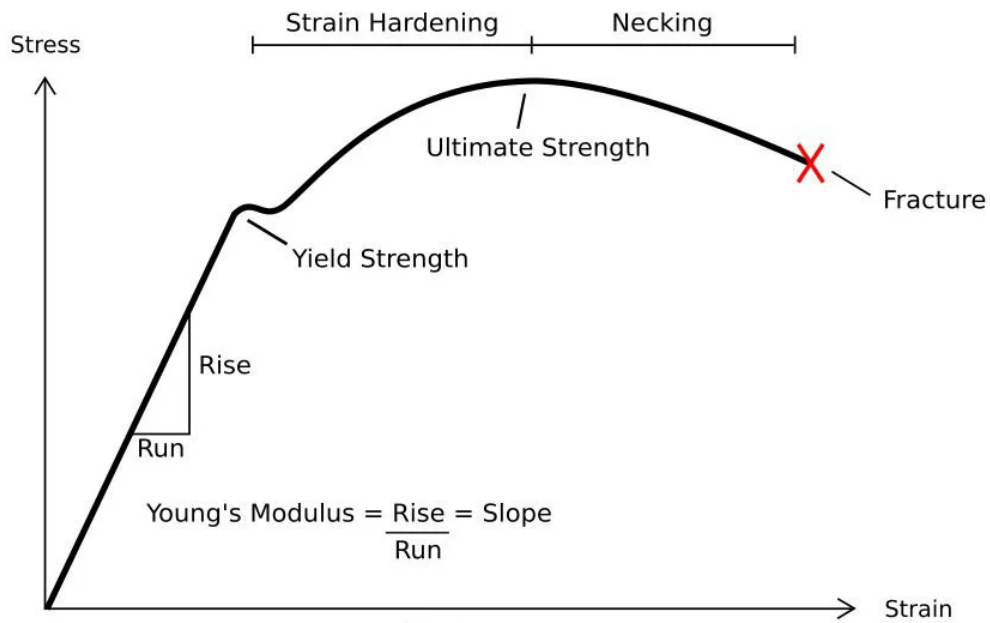
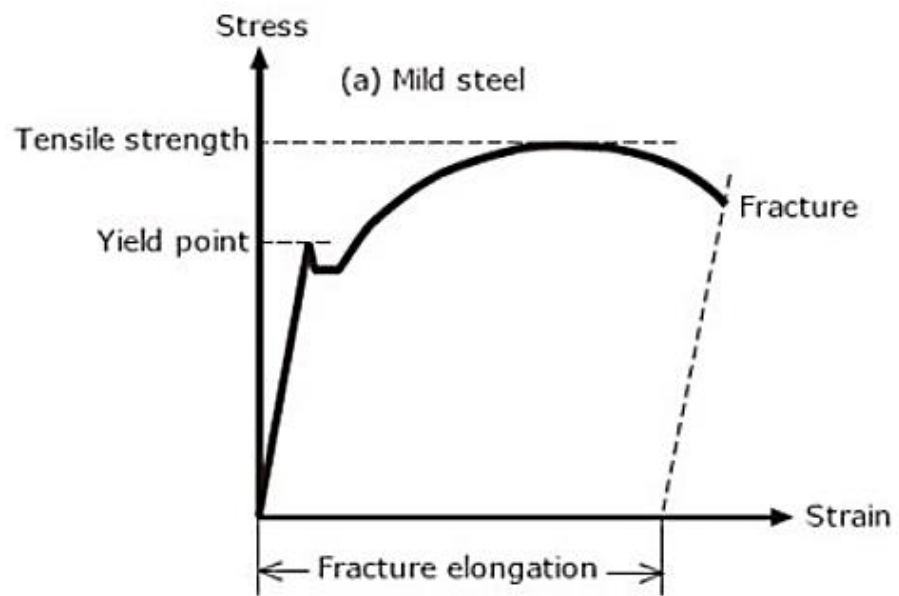


Figure 1

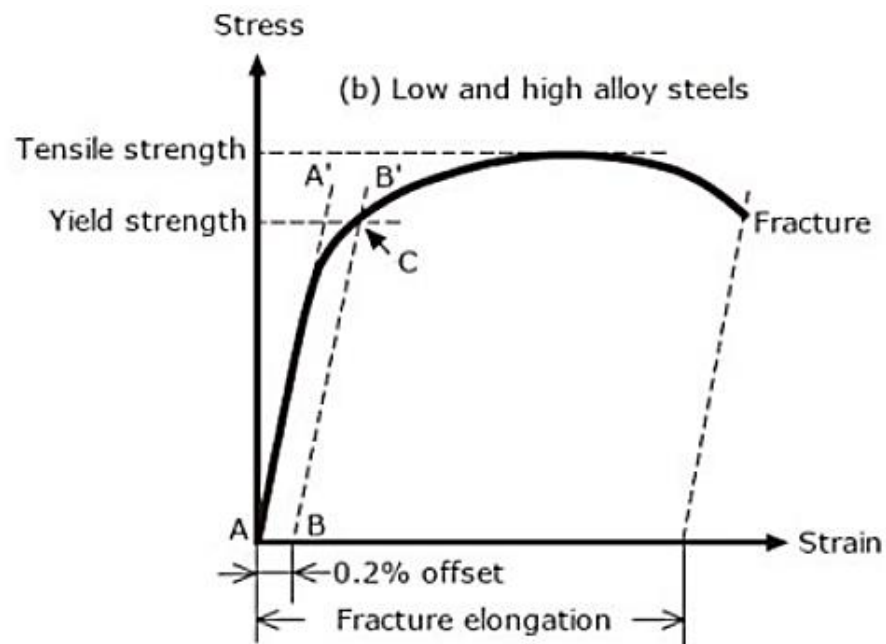
Gambar 2. 5 Grafik *yield point* atau batas luluh

Sumber : Callister & Rethwisch, n.d.

Jika beban yang bekerja pada material diteruskan hingga diluar batas elastis akan terjadi perpanjangan atau perpendekan permanen secara tiba-tiba, dimana regangan meningkat sekalipun tiada peningkatan tegangan (hanya terjadi pada baja lunak). Setelah melewati titik ini, material tidak akan kembali ke bentuk semula, atau material sedang berada dalam daerah plastis seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 dan gambar 2.7.

Gambar 2. 6 Grafik *mild steel*

Sumber : Callister & Rethwisch, n.d.

Gambar 2. 7 Grafik *low and high alloy steels*

Sumber : Callister & Rethwisch, n.d.

Metode *offset 0.2%* adalah salah satu cara umum untuk menentukan *yield point* adalah dengan menggunakan metode *offset 0.2%*. Pada gambar 2.7 *low and high alloy steels* menjelaskan tentang metode titik *yield* yang ditentukan dengan menarik garis lurus sejajar dengan bagian linear dari kurva tegangan-regangan (kurva elastis) dengan kemiringan yang sama, tetapi dimulai dari titik yang terletak 0.2% regangan lebih besar dari titik awal regangan.

e) Faktor Keamanan/*Safety Factor*

Faktor keamanan adalah nilai perbandingan antara kekuatan sebenarnya terhadap kekuatan yang tersedia berdasarkan material yang digunakan. Fungsi dari faktor keamanan untuk menghindari kegagalan sebuah struktur sehingga tidak terjadi hal yang tidak diinginkan pada saat struktur atau benda tersebut digunakan. Aturan nilai dalam faktor keamanan yaitu sebagai berikut:

- a. Nilai 1,25 hingga 2,0 didapatkan dalam struktur dan beban statis dengan kepastian yang tinggi pada perancangan data.
- b. Nilai 2,0 hingga 2,5 didapatkan pada struktur statis dan beban dinamis dengan kepastian rata-rata terhadap perancangan data.
- c. Nilai 2,5 hingga 4,0 didapatkan pada struktur statis dan beban dinamis dengan ketidakpastian beban, material, dan lingkungan.
- d. Nilai $> 4,0$ didapatkan pada struktur statis dengan beban dinamis yang memiliki variasi beban, material, dan lingkungan (Ramadani Wahyuchandra, 2023).

Faktor keamanan (*safety factor*) juga menjadi salah satu indikator dari kekuatan. Faktor keamanan digunakan untuk mengevaluasi keamanan komponen atau struktur meskipun dimensi yang digunakan minimum. Faktor keamanan

minimum menggunakan *ansys workbench* dihitung sebagai kekuatan luluh dari material yang dibagi dengan tegangan *von mises* maksimum. Nilai faktor keamanan kurang dari nilai 1 (satu) menunjukkan kegagalan permanen dari sebuah desain. (L.A.N. Wibawa, 2020) Atau Nilai faktor keamanan dapat dikatakan aman jika memiliki nilai > 1 . Sehingga nilai tegangan material harus lebih besar dari tegangan yang terjadi. Nilai faktor keamanan dapat dicari menggunakan persamaan 2.10 berikut:

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{aktual}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan :

SF = Faktor keamanan

σ_y = Tegangan luluh material

σ_{aktual} = Tegangan kerja aktual

f) *Life Cycle*

Life cycle merujuk pada rentang waktu atau jumlah siklus pembebanan yang dapat diterima oleh suatu material atau komponen sebelum mengalami kegagalan. Siklus hidup ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti sifat material, kondisi beban, suhu, dan lingkungan di mana komponen beroperasi. Pada umumnya, siklus hidup dikaitkan dengan dua aspek: *fatigue life* (siklus kelelahan) dan *creep life* (siklus deformasi plastik). *Fatigue life* mengacu pada jumlah siklus beban yang dapat diterima oleh material tanpa terjadi kegagalan.

Teori *Miner's Rule* digunakan untuk memperkirakan umur kelelahan suatu material akibat pembebanan siklik. Prinsipnya adalah bahwa setiap siklus beban yang dikenakan pada suatu material mengonsumsi sebagian dari umur totalnya, dan

kegagalan terjadi ketika akumulasi kerusakan mencapai nilai tertentu, Adapun rumus dari *Miner's Rule* yang ditunjukkan pada persamaan 2.11 berikut:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan :

D = akumulasi kerusakan (kegagalan terjadi jika $D \geq 1$)

n_i = jumlah siklus aktual yang dialami pada tingkat tegangan tertentu

N_i = jumlah siklus kegagalan material pada tingkat tegangan yang sama berdasarkan kurva S-N

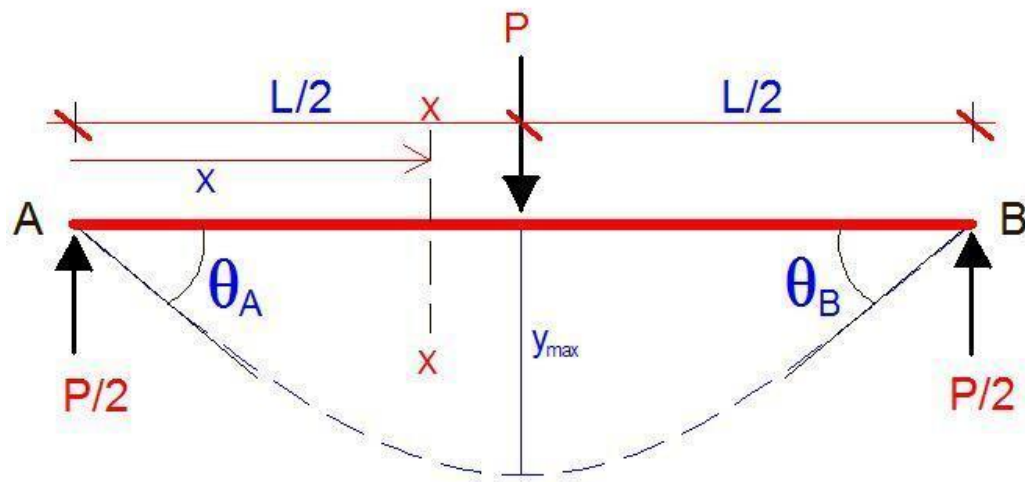
Dalam penerapannya pada pengukuran rangka motor listrik, rumus ini digunakan untuk menghitung *life cycle* dengan mempertimbangkan beban berulang yang terjadi atau pada simulasi dinamis. Dengan mengetahui variasi tegangan yang dialami rangka serta data kelelahan material dari uji eksperimental atau referensi kurva *S-N (Stress-Number of Cycles)* adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara tegangan siklik (S) dan jumlah siklus hingga kegagalan (N) dalam pengujian kelelahan material. Kurva ini digunakan untuk menentukan daya tahan material terhadap pembebanan berulang dan menjadi dasar dalam perhitungan umur kelelahan (*fatigue life*).

g) Defleksi

Defleksi merupakan perubahan bentuk atau deformasi suatu struktur akibat adanya beban yang bekerja padanya. Defleksi juga diartikan sebagai perubahan bentuk balok dalam arah y akibat pembebanan vertikal. Sumbu batang akan bergeser dari posisi awalnya ketika terkena gaya. Dengan kata lain, batang yang

menerima beban transversal, baik beban terpusat maupun merata, akan mengalami defleksi.

Defleksi ini diukur dari posisi awal garis netral hingga posisi baru setelah mengalami deformasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 dibawah ini



Gambar 2. 8 Defleksi balok sederhana

Sumber : Mulyadi et al., 2022

Defleksi maksimal mengacu pada nilai terbesar dari perubahan bentuk suatu komponen struktural akibat pembebanan. Dalam rekayasa mekanik dan struktural, analisis defleksi sangat penting untuk memastikan bahwa suatu struktur tidak mengalami deformasi berlebihan yang dapat menyebabkan kegagalan atau ketidakefektifan dalam operasionalnya. Menghitung defleksi penting untuk memastikan bahwa rangka dapat menopang beban tanpa deformasi yang signifikan, menjaga keselarasan komponen, dan mencegah kelelahan material akibat pembebanan berulang.

Untuk mencari besarnya defleksi yang ditunjukkan oleh perubahan jarak tersebut, terdapat beberapa cara yang dapat digunakan untuk menghitung lendutan pada sebuah balok atau material yang telah dikenai oleh beban yaitu antara lain :

a) Metode Integrasi Ganda

Terdapat dua cara dalam penurunan rumus pada metode integrasi ganda, yaitu:

- a. Persamaan Kelengkungan Momen pada ditunjukkan pada persamaan 2.12 dan persamaan 2.13 dibawah ini:

$$M = \frac{EI}{R} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \dots \dots \dots (1)(2.13)$$

Keterangan :

R = Jari-jari kelengkungan balok

E dan I konstan sepanjang balok

M dan R adalah fungsi dari x

- b. Rumus Eksak untuk Kelengkungan ditunjukkan pada persamaan 2.14 dan persamaan 2.15 dibawah ini:

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2} \dots \dots \dots (2)(2.15)$$

$\frac{dy}{dx}$ = Slope (kemiringan lendutan) kurva pada setiap titik

Untuk lendutan balok yang kecil, $\frac{dy}{dx}$ adalah kecil, maka dapat diabaikan

- c. Maka, untuk lendutan yang relative kecil dari persamaan 2.16 dan persamaan 2.17 dapat diringkas menjadi persamaan :

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$EI = \frac{d^2y}{dx^2} = M \dots\dots\dots (3)(2.17)$$

Keterangan :

E = Modulus Elastisitas

I = Momen Inersia

M = Momen Lentur

y = Jarak vertikal (lendutan balok)

x = jarak sepanjang balok

Momen lentur pada setiap segmen balok di antara titik perubahan beban dihitung terlebih dahulu. Selanjutnya, momen tersebut diintegrasikan untuk setiap segmen. Konstanta integrasi ditentukan dengan mempertimbangkan syarat batas dan kondisi kontinuitas.

b) Metode Momen Area

Metode momen area digunakan untuk menentukan defleksi dan kemiringan suatu balok yang mengalami pembebanan. Prinsip utama metode ini adalah hubungan antara kurva momen lentur dan perubahan sudut atau perpindahan balok. Metode ini sering digunakan untuk menghitung defleksi pada titik tertentu dalam sistem yang memiliki tumpuan sederhana dan pembebanan tetap. Metode momen area dapat dihitung menggunakan rumus yang ditunjukkan pada persamaan 2.18 dan persamaan 2.19 dibawah ini:

$$\theta_B - \theta_A = \frac{1}{EI} \int_A^B M(x) dx \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\Delta_B = \frac{1}{EI} \int_A^B M(x) dx \dots\dots\dots (2.19)$$

Keterangan :

EI = kekakuan lentur

$M(x)$ = momen lentur sepanjang balok

θ = perubahan sudut kemiringan

Δ = defleksi vertical

c) Metode Fungsi Singularitas

Metode fungsi singularitas digunakan untuk menuliskan beban, momen, dan gaya geser dalam satu persamaan kontinu yang berlaku di seluruh panjang balok. Metode ini bermanfaat dalam kasus dengan beban kompleks karena menghasilkan satu persamaan yang mencakup semua kondisi dalam sistem. Fungsi ini mempermudah analisis struktur dengan beberapa beban terdistribusi atau titik gaya. Fungsi singularitas biasanya dituliskan menggunakan notasi Macaulay yang ditunjukkan pada persamaan 2.20 dibawah ini:

$$\langle x - a \rangle^n = \begin{cases} (x - a)^n, & x > a \\ 0, & x < a \end{cases} \dots\dots\dots (2.20)$$

Persamaan defleksi diperoleh dari persamaan 2.21 dibawah ini :

$$EI = \frac{d^2y}{dx^2} = M(x) \dots\dots\dots (2.21)$$

di mana y adalah defleksi balok.

d) Metode Energi Elastis

Metode ini menggunakan prinsip energi untuk menentukan deformasi suatu struktur. Salah satu teknik yang sering digunakan adalah teorema Castigliano, yang

menyatakan bahwa defleksi di suatu titik dapat diperoleh dari turunan energi regangan total terhadap gaya yang bekerja di titik tersebut. Metode ini sering digunakan dalam analisis struktur dengan geometri kompleks atau ketika pendekatan langsung dengan persamaan momen menjadi sulit.

Rumus dasar Castigliano ditunjukkan pada persamaan 2.22 dan persamaan 2.23 dibawah ini:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} \dots \dots \dots (2.22)$$

$$U = \frac{1}{2} \int \frac{M^2}{EI} dx \dots \dots \dots (2.23)$$

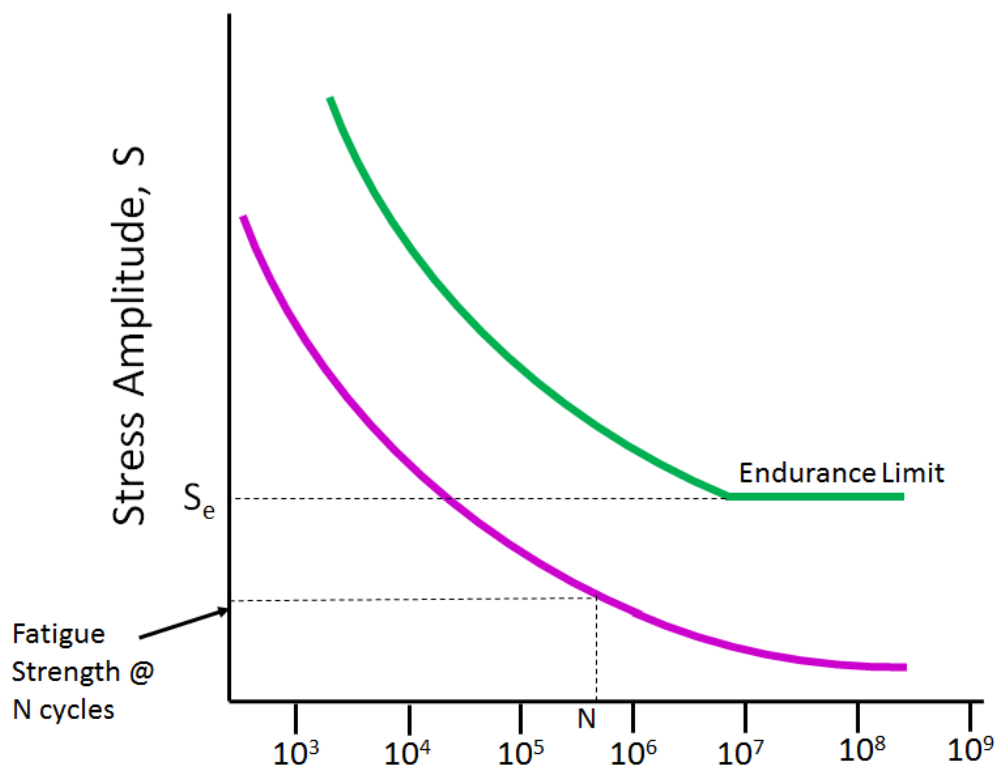
h) *Limit Endurance Diagram*

Diagram Limit Endurance atau *Diagram Endurance Limit* merupakan representasi grafis yang menggambarkan hubungan antara tegangan siklik dan jumlah siklus beban yang dapat diterima oleh material sebelum mengalami kegagalan akibat fatigue (kelelahan). Diagram ini digunakan untuk menunjukkan batas-batas yang dihadapi oleh material saat diberikan beban berulang-ulang. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi perubahan diagram *endurance limit*. Berikut ini faktor-faktor tersebut , antara lain :

- Tegangan Maksimum : Tegangan tertinggi yang diterima oleh material dalam setiap siklus.
- Geometri Material : Bentuk dan ukuran komponen dapat mempengaruhi distribusi tegangan dan potensi terjadinya retakan.

- Lingkungan : Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, atau keberadaan korosi dapat mempengaruhi daya tahan material terhadap fatigue.

Dalam analisa tegangan rangka sepeda motor listrik ini menggunakan grafik atau diagram hubungan antara hasil nilai tegangan dengan *stress life cycle* (n cycle) yang disebut *diagram limit endurance*. *Diagram Limit Endurance* sebagai hasil atau acuan umur pemakaian rangka/*chasis* sepeda motor listrik yang didapatkan dari perhitungan *stress life cycle* (n cycle) atau lamanya suatu tegangan yang terjadi pada rangka secara terus-menerus seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Diagram *endurance limit* dengan *stress life cycle*

Sumber : <https://www.vcalc.com/equation/?uuid=15553ba6-855f-11e3-9cd9-bc764e2038f2>

Dari grafik hubungan *Endurance Limit* dengan *stress life cycle* dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Di bawah batas *endurance*, material dapat menahan beban berulang tanpa kegagalan.
- Di atas batas *endurance*, material akan mengalami kegagalan lebih cepat karena kelelahan akibat siklus pembebanan yang tinggi.

i) Momen Inersia

Momen Inersia merupakan besaran fisika yang menyatakan kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan keadaan rotasinya, analog dengan massa pada gerak translasi. Nilai momen inersia ditentukan oleh massa benda serta distribusinya terhadap sumbu rotasi. Pada sistem sederhana, momen inersia dihitung menggunakan persamaan 2.24 dan gambar 2.10.

$$I = m \times r^2 \dots\dots\dots (2.24)$$

Keterangan :

I = Momen Inersia

m = massa

r = jarak tegak lurus massa terhadap sumbu putar

Table: Area inertia properties for some common cross sections

	$A = bh$ $I_{xx} = \frac{bh^3}{12} \quad I_C = \frac{bh}{12}(b^2 + h^2)$ $I_{yy} = \frac{b^3h}{12}$
	$A = \frac{bh}{2}$ $I_{xx} = \frac{bh^3}{36} \quad I_C = \frac{bh}{36}(b^2 + h^2)$ $I_{yy} = \frac{b^3h}{36}$
	$A = \frac{\pi d^2}{4}$ $I_{xx} = I_{yy} = \frac{\pi d^4}{64}$ $I_C = \frac{\pi d^4}{32}$
	$A = \frac{\pi}{4}(d^2 - d_i^2)$ $I_{xx} = I_{yy} = \frac{\pi}{64}(d^4 - d_i^4)$ $I_C = \frac{\pi}{32}(d^4 - d_i^4)$
	$A = \frac{\pi r^2}{2}$ $I_{xx} = I_{yy} = \frac{\pi r^4}{8}$ $y_C = \frac{4r}{3\pi}$

Gambar 2. 10 *Moment inertia*

Sumber : Callister & Rethwisch, n.d.

2.1.5 Pengukuran Tegangan Rangka/Chassis Sepeda Motor Listrik

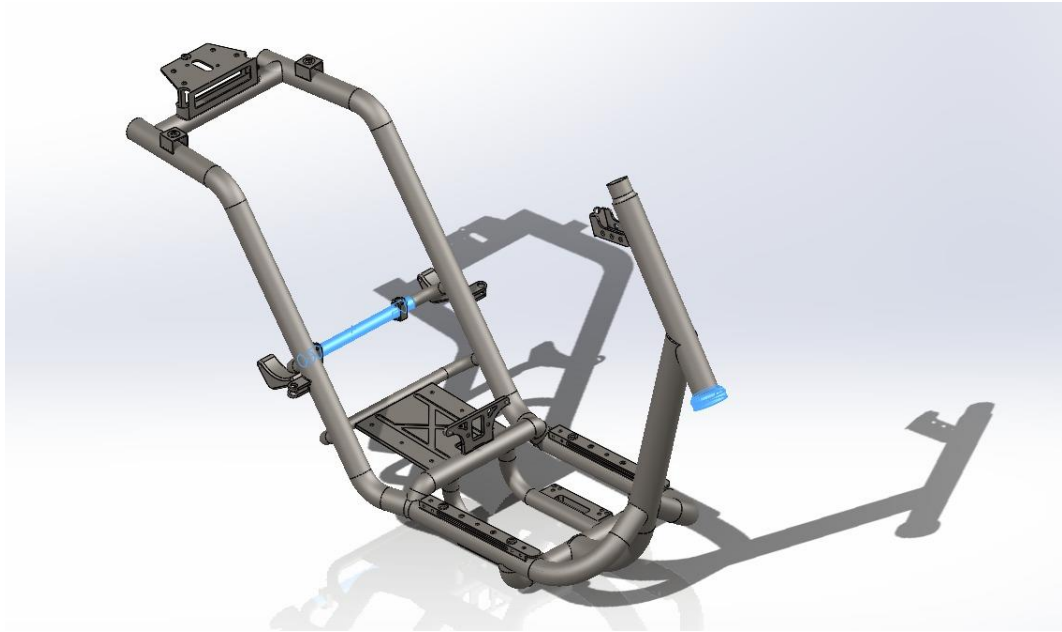
Pengukuran tegangan dan analisis pada rangka/chassis sepeda motor listrik menggunakan metode *finite element* untuk menghasilkan data yang komprehensif dan rinci. Sebagai respons fisik sistem terhadap beban pada beberapa titik poin yang

dapat terbaca. Metode ini sangat berguna dalam bidang teknik, terutama dalam analisis kendaraan roda dua dan struktur. Analisis *stress* pada titik-titik kritis yang menyebabkan kegagalan berhasil dilakukan dengan menggunakan metode *finite element* dengan perangkat lunak *solidworks*. Berdasarkan hasil analisis, rancangan yang dilakukan untuk mengurangi nilai *stress* yang mengarah pada desain keselamatannya (Avero Azhar et al., 2023).

Perancang otomotif tersebut dirancang untuk mempermudah memahami berbagai tekanan dan respons terhadap desain rangka/*chassis* sepeda motor listrik. Pengukuran dan analisis pada nilai *stress* itu penting untuk mempelajari hal yang berhubungan dengan nilai *stress* kelelahan/nilai *fatigue* dan umur suatu sistem (lifetime) (Dai et al., 2024b).

Pada penelitian ini dapat diamati dengan menggunakan software *FEA* yang paling umum digunakan dalam menganalisis tegangan rangka/*chassis* sepeda motor listrik yaitu *FEA (Finite Element Analysis)* (Avero Azhar et al., 2023). Selain itu, ditemukan bahwa sebagian besar peneliti menggunakan perangkat lunak/*software ansys* untuk memprediksi analisis nilai tegangan/*stress* pada *chassis* kendaraan roda dua. Pemodelan 3D dari rangka/*chassis* tersebut digambar menggunakan software *solidworks* dan uji analisis menggunakan *ansys* (Avero Azhar et al., 2023).

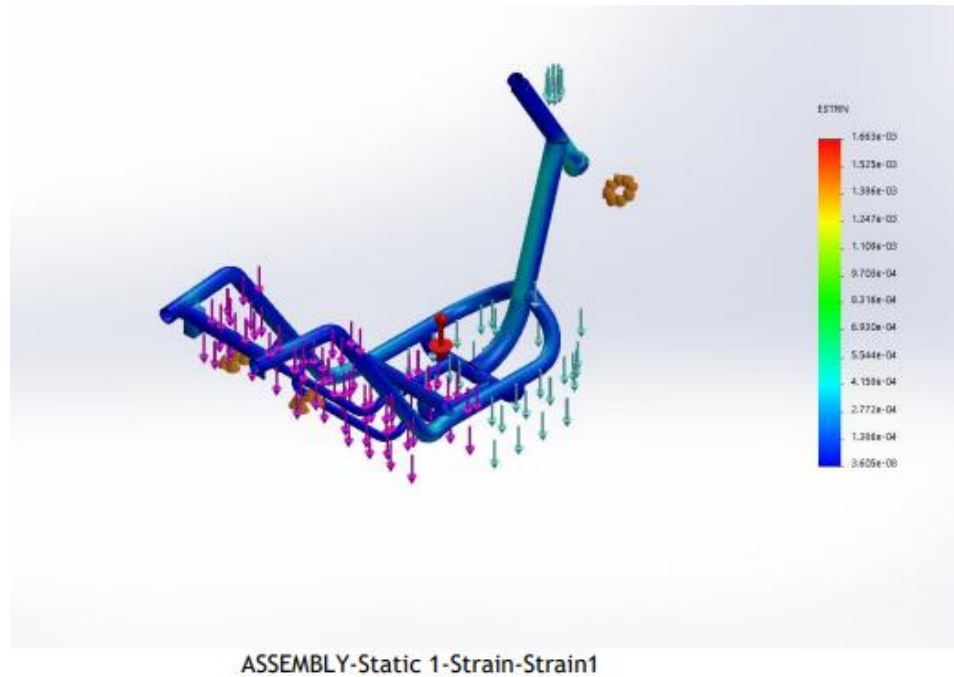
Rangka atau *chassis* kendaraan dibuat dengan menggunakan bentuk sedemikian rupa seperti pada umumnya yang banyak digunakan dalam otomotif, konstruksi dan sektor peralatan industri. Desain rangka/*chassis* keseluruhan dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Rangka/chassis kendaraan roda dua

Desain 3D telah digambar dengan menggunakan *software solidworks* kemudian diukur dan dianalisis dengan menggunakan *software ansys*. Rangka kendaraan roda dua ini sebagai tempat penopang beberapa komponen yang dipasang, yaitu baterai, motor listrik, pengontrol dan komponen lainnya.

Pada gambar 2.12 di bawah ini menunjukkan distribusi beban yang diterima oleh rangka/*chassis* sepeda motor listrik . Dalam pengukuran dan analisa nilai tegangan ini, struktur rangka akan dibuat dikenai beban sebesar 500 N atau setara dengan beban berat 80 kg/orang yang disalurkan pada rangka/*chassis* seperti yang ditunjukkan oleh panah ungu dan biru (Avero Azhar et al., 2023).



Gambar 2. 12 Contoh titik pembebanan pada rangka kendaraan roda tiga

Batasnya pengukuran nilai *stress* terletak pada satu titik kritis. Pada pembebanan rangka sepeda motor listrik dilakukan secara statis dan dinamis. Pengaturan kondisi rangka ini disebut batasan tetap/*boundary conditions*.

2.1.6 Simulasi Pembebanan Pada Pengukuran Rangka /*Chassis Sepeda Motor Listrik*

Simulasi pembebanan adalah proses menggunakan perangkat lunak untuk memodelkan dan menganalisis bagaimana suatu struktur bereaksi terhadap berbagai jenis beban. Simulasi ini penting dalam rekayasa mekanik karena memungkinkan para insinyur untuk mengevaluasi desain sebelum tahap produksi fisik. Perangkat lunak simulasi seperti *ansys*, *solidworks simulation* sering digunakan untuk melakukan analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*,

FEA), yang memecah struktur menjadi elemen-elemen kecil untuk analisis lebih rinci.

a) *Ansys Fluent*

Ansys Fluent adalah paket perangkat lunak CFD yang digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, dan interaksi fluida-struktur. Paket ini dapat digunakan untuk menganalisis berbagai masalah, termasuk aliran gas, cairan, dan fluida multifase, serta sistem reaksi dan analisis struktur.

Ansys Fluent digunakan secara luas di berbagai industri, termasuk otomotif, kimia, dsb. *Ansys Fluent* menggunakan metode volume terbatas untuk memecahkan persamaan yang mengatur aliran fluida dan perpindahan panas. *Ansys Fluent* menggunakan algoritme iteratif untuk memecahkan persamaan ini dan memperoleh solusi konvergen (Graba and Grycz, 2024).

b) *Finite Element Analysis (FEA)*

FEA adalah metode numerik yang digunakan untuk menghitung respons suatu struktur terhadap beban yang diberikan. Teknik ini sangat efektif dalam memprediksi tegangan, regangan, dan deformasi pada material. FEA telah menjadi alat standar dalam analisis struktural dan digunakan secara luas dalam berbagai industri, termasuk otomotif, kedirgantaraan, dan teknik sipil (Sutisna et al., 2018).

Proses utama dalam menggunakan metode elemen hingga (FEA) melibatkan pemodelan suatu sistem atau struktur sebagai kumpulan elemen kecil yang terhubung, yang kemudian dianalisis untuk memprediksi respons sistem terhadap berbagai kondisi beban (Seshu, P., 2006).

. Setiap elemen memiliki properti fisik tertentu, seperti sifat material dan geometri, dan dipertautkan dengan elemen-elemen tetangga melalui titik-titik persilangan yang disebut node.

2.1.7 Analisa Konvergensi, *Uji grid Independence* dan Mesh Quality

Hasil dari analisis tegangan rangka sepeda motor listrik bergantung pada pemilihan bentuk meshing dan jumlah elemen yang digunakan untuk mendiskritisasi struktur. Kualitas meshing akan mempengaruhi tingkat akurasi simulasi, sehingga kualitas meshing harus dipastikan baik dengan menggunakan indikator nilai *skewness* (Gunawan et al., 2021). Uji konvergensi dapat dilakukan dengan melihat hasil analisis menggunakan mesh pada benda uji. Apabila perbedaan hasil analisis berada pada rentang yang masih dapat diterima, maka dapat disimpulkan bahwa mesh yang dilakukan telah mendiskritisasi struktur dengan baik atau dapat dikatakan dalam kondisi *konvergen*. Kualitas mesh juga dapat ditentukan dari nilai *skewness* pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Skewness Mesh Metrics Spectrum

Skewness Mesh Metrics Spectrum	
Kategori	Rentang Nilai
<i>Excellent</i>	0 - 0.25
<i>Very Good</i>	0.25-0.50
<i>Good</i>	0.50 - 0.80
<i>Acceptable</i>	0.80 - 0.94
<i>Bad</i>	0.95 - 0.97
<i>Unacceptable</i>	0.98 - 1.00

Sumber : Gunawan et al., 2021

Kualitas *meshing* akan mempengaruhi tingkat akurasi simulasi, sehingga kualitas *meshing* harus dipastikan baik dengan menggunakan indikator nilai *skewness*. *Meshing* merupakan proses diskritisasi struktur menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Hasil elemen dari *meshing* dapat berbeda bergantung pada kerumitan dari struktur yang di uji. Kualitas *mesh* dapat dilihat melalui nilai *skewness*. Kualitas *mesh* harus dijaga pada nilai 0,80-0,94 dimana pada ukuran tersebut *mesh* dikategorikan sebagai *acceptable*. Apabila *mesh* diatas *skewness* untuk kategori *acceptable*, maka *mesh* akan dikategorikan jelek dan dibutuhkan *mesh control* dan *refinement* untuk meningkatkan kualitas *mesh* (Setiawan et al., 2020).

Uji *grid independence* atau *mesh independence test* merupakan salah satu tahap penting dalam proses validasi simulasi numerik berbasis *finite element method* (FEM), termasuk pada perangkat lunak seperti *ansys*. Tujuan utama pengujian ini adalah memastikan bahwa hasil simulasi, baik pada analisis statis maupun dinamis, tidak bergantung pada ukuran atau kerapatan elemen mesh yang

digunakan. Pada simulasi statis rangka sepeda motor listrik, parameter yang umumnya diamati adalah nilai *maximum equivalent stress (von Mises)*. Proses uji ini dilakukan dengan membuat beberapa variasi ukuran mesh mulai dari mesh kasar hingga mesh halus, kemudian menjalankan simulasi dengan kondisi batas (*boundary condition*) dan pembebanan yang sama.

Hasil dari tiap variasi mesh dibandingkan untuk melihat kecenderungan perubahannya. Apabila perbedaan hasil antara dua variasi mesh terakhir berada di bawah batas toleransi tertentu (umumnya 1–5%), maka mesh tersebut dianggap telah memenuhi syarat independensi grid. Pemilihan mesh yang optimal yakni mesh yang cukup halus untuk memberikan hasil yang akurat namun tetap efisien secara komputasi—akan meningkatkan keandalan prediksi perilaku struktur rangka sepeda motor listrik pada berbagai kondisi pembebanan.

2.1.8 Free Body Diagram

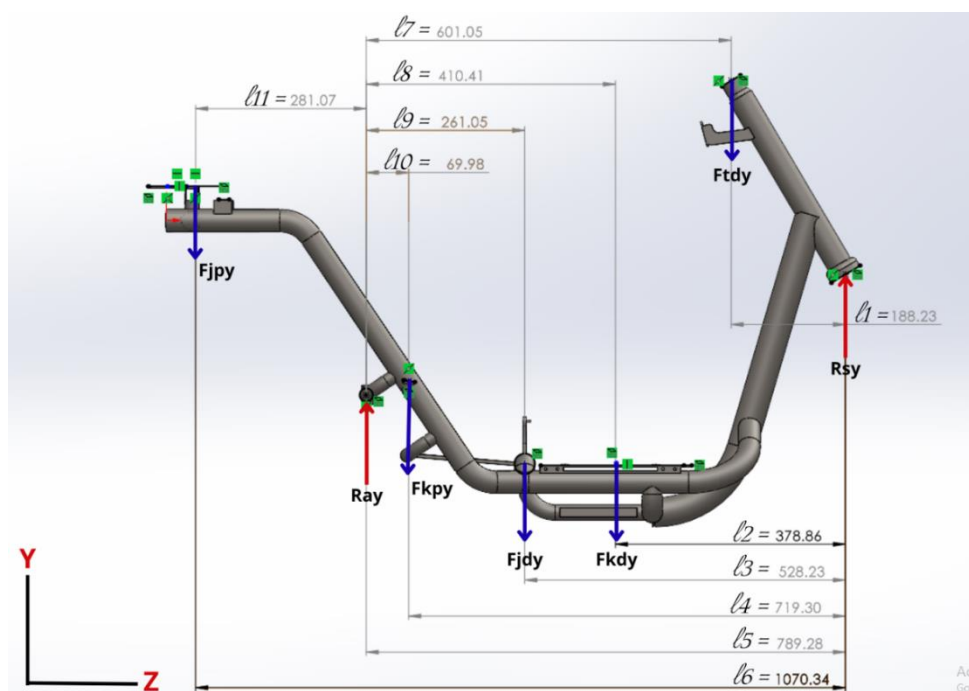
Free Body Diagram adalah representasi grafis dari suatu objek atau sistem yang menunjukkan semua gaya dan momen yang bekerja padanya. Diagram ini digunakan untuk menganalisis gaya-gaya yang bekerja pada suatu objek dan menentukan apakah objek tersebut dalam keadaan setimbang atau tidak. Dalam konteks rangka sepeda motor listrik, *free body diagram* digunakan untuk menganalisis gaya-gaya yang bekerja pada rangka sepeda motor, baik dalam keadaan statis maupun dinamis.

Free Body Diagram pada rangka sepeda motor listrik dalam keadaan statis menggambarkan gaya-gaya yang bekerja pada rangka saat sepeda motor tidak bergerak. Gaya-gaya tersebut meliputi:

- a) Berat sepeda motor (W): Gaya gravitasi yang bekerja ke arah bawah pada pusat massa sepeda motor.
- b) Reaksi tumpuan (R): Gaya yang diberikan oleh tanah pada roda-roda sepeda motor. Gaya ini bekerja ke arah atas dan besarnya sama dengan berat sepeda motor jika sepeda motor berada pada permukaan datar.
- c) Gaya-gaya eksternal lainnya: Gaya-gaya lain yang mungkin bekerja pada sepeda motor, seperti gaya angin atau gaya dari pengendara yang duduk di atas sepeda motor.

Dalam keadaan statis, sepeda motor dalam keadaan setimbang, sehingga resultan gaya dan momen pada rangka sepeda motor harus sama dengan nol.

Free Body Diagram pada rangka sepeda motor listrik dalam keadaan dinamis menggambarkan gaya-gaya yang bekerja pada rangka saat sepeda motor bergerak seperti gambar 2.13.



Gambar 2. 13 *Free body diagram*

Gaya-gaya yang bekerja pada rangka meliputi gaya-gaya pada keadaan statis ditambah dengan gaya-gaya berikut:

- a) Gaya inersia (F), yaitu gaya yang timbul akibat percepatan atau deselerasi sepeda motor. Gaya ini berlawanan arah dengan arah percepatan atau deselerasi.
- b) Gaya normal (Nr dan Nf) adalah gaya yang selalu tegak lurus dengan permukaan material yang bekerja. Gaya ini bekerja antara permukaan ban dan jalan
- c) Gaya gravitasi merupakan gaya gravitasi selalu digambarkan sebagai gaya yang bekerja ke arah bawah dan menuju pusat bumi. Berat sepeda motor (mg) yang bekerja pada pusat gravitasinya (gaya turun) (Wen et al., 2012). Gaya gravitasi ini bekerja pada semua benda yang memiliki massa, dimana dapat dihitung menggunakan rumus persamaan 2.25:

$$F_g = m \cdot g \dots \dots (2.25)$$

Keterangan :

m = massa (kg)

g = gravitasi (9,81 m/s²)

Dalam keadaan dinamis, sepeda motor tidak dalam keadaan setimbang, sehingga resultan gaya dan momen pada rangka sepeda motor tidak sama dengan nol.

2.1.9 Hukum Newton

Hukum Newton merupakan dasar utama dalam mekanika klasik yang menjadi acuan untuk memahami gerak benda serta interaksi gaya. Hukum Newton I, dikenal sebagai hukum inersia, menyatakan bahwa suatu benda akan tetap diam

atau bergerak lurus beraturan apabila tidak ada gaya yang bekerja padanya (Halliday et al., 2014).

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

Hukum Newton II menjelaskan hubungan antara gaya, massa, dan percepatan yang dirumuskan pada persamaan 2.26.

$$\sum F = m \times a \dots\dots\dots(2.26)$$

Keterangan :

F = Gaya (N)

m = massa (Kg)

a = percepatan (m/s^2)

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

Hukum Newton III menyatakan bahwa setiap aksi selalu menimbulkan reaksi yang sama besar dan berlawanan arah. Dalam sepeda motor listrik, interaksi antara ban dan permukaan jalan saat pengereman menghasilkan gaya reaksi yang

diteruskan ke sistem suspensi dan akhirnya ke rangka. Hal ini penting untuk dianalisis, karena gaya reaksi dari jalan yang bersifat berulang menjadi salah satu faktor penyebab kelelahan material (*fatigue*) pada struktur rangka. Titik kritis pada rangka yang mengalami siklus beban terus-menerus akan mempengaruhi umur pakai (*life cycle*), sehingga simulasi dinamis sangat diperlukan untuk mengetahui ketahanan struktur dalam jangka panjang.

2.1.10 Gerak Lurus Berubah Beraturan

Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) adalah salah satu konsep dasar dalam kinematika yang menggambarkan gerak benda pada lintasan lurus dengan percepatan konstan. Pada GLBB, perubahan kecepatan benda sebanding dengan waktu, sedangkan percepatan dapat bernilai positif (akselerasi) atau negatif (deselerasi). Konsep ini sangat relevan untuk menganalisis pergerakan sepeda motor listrik ketika mengalami percepatan atau deselerasi akibat gaya pengereman.

Persamaan dasar GLBB dapat diturunkan dari hukum Newton II dan dinyatakan sebagai persamaan 2.27, persamaan 2.28, persamaan 2.29 berikut:

$$V_t = V_0 \pm a \times t \dots\dots\dots (2.27)$$

$$s = V_0 \times t \pm \frac{1}{2} \times a \times t^2 \dots\dots\dots (2.28)$$

$$V_t^2 = V_0^2 \pm 2 \times a \times s \dots\dots\dots (2.29)$$

Keterangan

V_t = Kecepatan Akhir (m/s)

V_0 = Kecepatan Awal (m/s)

a = percepatan m/s^2

s = jarak (m)

t = waktu (s)

Dalam penelitian mengenai optimasi rangka sepeda motor listrik, GLBB digunakan untuk memodelkan kondisi saat kendaraan mengalami deselerasi akibat pengereman. Deselerasi kendaraan akan menghasilkan gaya inersia tambahan yang bekerja pada rangka, sehingga distribusi tegangan dan deformasi berbeda dibandingkan kondisi pembebanan statis. Melalui simulasi berbasis metode elemen hingga (FEA), respon rangka terhadap gaya transien akibat deselerasi dapat dianalisis secara lebih mendetail.

Simulasi statis digunakan untuk mengetahui ketahanan rangka terhadap beban konstan, seperti berat pengendara dan komponen motor. Sementara itu, simulasi dinamis diterapkan untuk menganalisis rangka dalam kondisi nyata, yaitu ketika terjadi variasi beban akibat percepatan dan deselerasi. Kondisi deselerasi secara khusus perlu diperhitungkan karena dapat menimbulkan tegangan siklik yang berulang, sehingga berdampak pada umur kelelahan (*fatigue life*) dari rangka (Dai et al., 2024). Dengan mengaitkan GLBB dan simulasi FEA, dapat diperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai kekuatan, ketahanan, serta masa pakai rangka sepeda motor listrik.

Dengan demikian, pemahaman mengenai GLBB dan penerapannya dalam simulasi statis maupun dinamis menjadi landasan penting dalam optimasi rangka sepeda motor listrik. Kajian ini tidak hanya bertujuan untuk menekan massa rangka dan biaya produksi, tetapi juga memastikan keamanan serta daya tahan struktur dalam menghadapi kondisi operasional sehari-hari, termasuk pada saat deselerasi.