

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

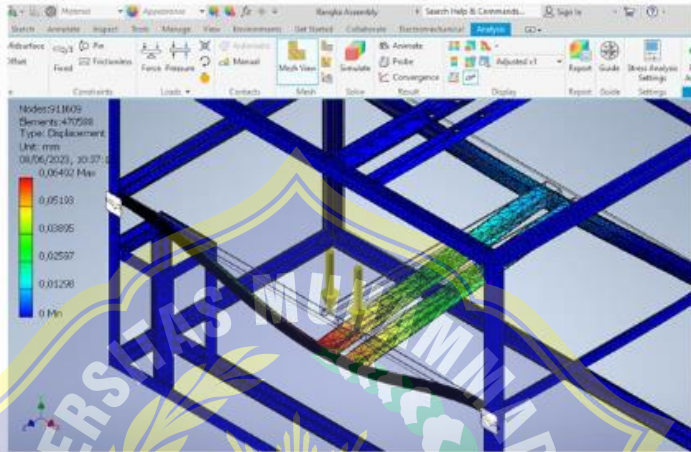
2.1 Penelitian Terdahulu

Mesin *spinner*, biasa disebut sebagai mesin peniris minyak, merupakan peralatan mekanis yang dirancang untuk mengurangi kandungan minyak atau air dalam barang-barang kuliner yang telah mengalami penggorengan atau pemrosesan. Mesin ini beroperasi dengan memanfaatkan gaya sentrifugal yang dihasilkan melalui rotasi cepat tabung peniris. Prinsip operasionalnya relatif mudah namun sangat efektif, produk makanan yang akan ditiriskan diposisikan dalam tabung berlubang (keranjang), setelah itu motor listrik mendorong tabung pada kecepatan tinggi melalui sistem transmisi pulley dan v-belt. Akibatnya, rotasi cepat ini menyebabkan minyak atau air yang menempel pada produk dikeluarkan melalui lubang dalam tabung karena gaya sentrifugal, sementara produk padat dipertahankan dalam tabung.

Rangka adalah elemen struktural fundamental dalam sebuah mesin. Rangka didefinisikan sebagai komponen utama yang berfungsi untuk menopang dan menyatukan seluruh bagian mesin lainnya, sehingga membentuk sebuah sistem yang utuh dan siap dioperasikan.

Alwi et al., (2023) dalam penelitiannya yang berjudul "Perancangan dan analisis struktur rangka mesin *high speed spinner* pemisah cairan lateks kapasitas 1 liter/ Jam" melakukan analisis rangka mesin *spinner* dengan kapasitas 1 liter/jam dan putaran 10.000 rpm. Mereka melakukan perhitungan manual dan simulasi menggunakan *Autodesk Inventor*. Hasilnya menunjukkan tegangan maksimum 14,66 MPa dan faktor keamanan 7,54 pada material ST37, yang menyimpulkan rangka aman digunakan. Penelitian ini sangat relevan karena objeknya

serupa (rangka mesin *spinner*), namun kapasitas dan metode analisisnya berbeda.



Gambar 2. 1 Defleksi pada batang

Sumber : (Alwi *et al.*, 2023)

Putero *et al.*, (2025) menganalisis faktor keamanan dan tegangan *Von Mises* pada poros *rotating drum bioreactor* berbahan *stainless steel* 304 menggunakan FEM. Hasil simulasi menunjukkan nilai *Von Mises* maksimum sebesar 10,98 N/mm², jauh di bawah tegangan luluh material 205 N/mm², dengan faktor keamanan minimum 19. Penelitian ini memperkuat validitas penggunaan FEM dalam analisis komponen mesin yang memiliki bagian berputar (*rotating parts*), termasuk mesin *spinner*.

No.	Analysis Parameter	Analytical	Numerical	Error
1.	Yield strength (MPa)	205	206.81	0.88%
2.	Stress (MPa)	10.95	10.98	0.275%
3.	Safety Factor	18.7	19	1.58%

Gambar 2. 2 Hasil komparasi

Sumber : (Putero *et al.*, 2025)

Pratama, (2023) dalam penelitiannya berjudul "Desain dan Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pres Batako Menggunakan *Finite Element Method*" melakukan analisis kekuatan rangka mesin pres batako berbahan baja struktural dengan *SolidWorks Simulation*. Penelitian ini menunjukkan efektivitas FEM dalam mengevaluasi kekuatan rangka mesin sederhana yang banyak digunakan UMKM, dengan pendekatan yang memvalidasi desain sebelum proses fabrikasi.

2.2 Material Rangka ASTM A36

Material berfungsi sebagai elemen penting dalam rekayasa struktural mesin. Pemilihan material yang tepat secara signifikan mempengaruhi keandalan, keamanan, dan umur panjang suatu struktur. Dalam perencanaan rangka mesin, baja struktural sering dipilih karena sifat mekaniknya yang menguntungkan, kemudahan fabrikasi, dan ketersediaan pasar yang luas. Di antara berbagai jenis baja struktural yang digunakan dalam praktik teknik, baja ASTM A36 (*American Society for Testing and Materials A36*) adalah salah satu yang paling umum.

ASTM A36 adalah baja struktural rendah karbon yang spesifikasinya ditetapkan oleh *American Society for Testing and Materials (ASTM International)*. Standar ini awalnya diterbitkan pada tahun 1960 dan telah mengalami beberapa revisi sejak awal (Putero *et al.*, 2025). Tidak seperti mayoritas kelas baja yang

dikategorikan berdasarkan komposisi kimianya, ASTM A36 diklasifikasikan secara jelas berdasarkan sifat mekaniknya. Metal Supermarkets (2021) menjelaskan bahwa, berbeda dengan nilai AISI seperti 1018, 1141, atau 4140, ASTM A36 tidak ditentukan oleh susunan kimianya, melainkan oleh kriteria mekanis tertentu, di mana batang dan pelat baja diharuskan memiliki kekuatan luluh minimum 36.000 psi (250 MPa).

Dalam hal komposisi kimianya, ASTM A36 terdiri dari 0,25— 0,29% karbon, yang memfasilitasi keseimbangan optimal antara daktilitas dan kekuatan, di samping kandungan mangan mulai dari 0,8-1,2% yang meningkatkan kekuatan tarik. Bahan ini menunjukkan kepadatan 7,85 g/cm³, dengan konsentrasi fosfor dan belerang dikontrol dengan cermat untuk menjaga keuletan (Bushwick Metals, 2023).

Tabel 2. 1 Properti Mekanik Baja ASTM A36

Properti	Nilai
Modulus Elastisitas (E)	200.000 MPa (200 GPa)
Kekuatan Luluh (sy)	250 MPa (min.)
Kekuatan Tarik Ultimat	400 - 550 MPa
Modulus Geser (G)	79,3 GPa
Rasio Poisson (v)	0,26
Densitas (rho)	7.850 kg/m ³
Elongasi Minimum	20%

Kekerasan (BHN)	119 - 162 HB
------------------------	--------------

Sumber : (Hibbeler, 2023)

Sifat mekanik utama mencakup modulus elastisitas 200 GPa, kekuatan luluh minimum 250 MPa, dan kekuatan tarik akhir yang bervariasi antara 400-550 MPa. *Rasio Poisson* diukur pada 0,26, dengan modulus geser 79,3 GPa, di samping nilai kekerasan *Brinell* mulai dari 119-162 HB. Bahan menunjukkan keuletan, dengan kemampuan *elongasi* mencapai 20-23% tergantung pada panjang pengukur, sehingga memungkinkan deformasi plastik sebelum timbulnya kegagalan (Hibbeler, 2023).

Sehubungan dengan fabrikasi, ASTM A36 menunjukkan keunggulan luar biasa karena kemudahan pengelasan melalui berbagai metodologi, kompatibilitas dengan teknik baut dan paku keling. Penggabungan karakteristik mekanik yang teruji, kemudahan fabrikasi, dan efektivitas biaya menjadikannya sebagai bahan unggulan untuk aplikasi struktural, termasuk rangka mesin, jembatan, dan bangunan.

2.3 Analisis Pembebanan Statis : Konsep Tegangan, Regangan dan Deformasi

Mekanika kekuatan material merupakan cabang ilmu teknik yang mempelajari perilaku benda padat ketika mengalami berbagai jenis pembebanan. Pemahaman yang mendalam tentang konsep tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan deformasi merupakan fondasi utama dalam analisis struktur, termasuk analisis rangka mesin produksi.

2.3.1 Tegangan (*Stress*)

Tegangan didefinisikan sebagai rasio besarnya gaya yang diterapkan pada suatu material dengan luas

penampang yang menahannya. Menurut (Beer *et al.*, 2025) Untuk menghitung, tegangan normal (σ) diartikulasikan melalui persamaan berikut:

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

Keterangan :

σ = Tegangan Normal (Pa)

F = Gaya yang bekerja pada material (N)

A = Luas penampang material (m²)

Satuan tegangan dalam Sistem Internasional (SI) adalah Pascal (Pa), yang setara dengan Newton per meter persegi (N/m²). Dalam praktiknya, satuan seperti Megapascal (MPa) atau *pound per square inch* (psi) juga sering digunakan, terutama dalam konteks rekayasa struktur dan material (Gdoutos and Konsta-Gdoutos, 2024).

Selain tegangan normal, terdapat pula tegangan geser (τ) yang timbul akibat gaya yang bekerja sejajar dengan penampang. Tegangan geser dirumuskan sebagai (Ulamis, 2010):

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

Keterangan :

τ = Tegangan Geser (Pa atau MPa)

V = Gaya geser yang sejajar penampang (N)

A = Luas Panampang Material (m² atau mm²)

Dalam analisis rangka mesin *spinner*, tegangan yang dominan terjadi adalah tegangan tekan pada batang vertikal yang menanggung berat komponen, tegangan lentur pada batang horizontal yang menyangga tabung peniris dan motor, serta tegangan geser pada sambungan las dan titik pertemuan antar batang.

2.3.2 Tegangan Lentur

Tegangan lentur merupakan tegangan yang timbul akibat momen lentur (M) yang bekerja pada penampang balok. Besarnya tegangan lentur dinyatakan dengan persamaan flexure formula sebagai (Hibbeler, 2023) :

$$\sigma_b = \frac{M \times c}{I} \quad (2.3)$$

Keterangan :

σ_b = Tegangan lentur (MPa)

M = Momen lentur yang bekerja (N·mm)

c = Jarak dari sumbu netral ke serat terluar penampang (mm)

I = Momen inersia penampang terhadap sumbu netral (mm⁴)

Untuk profil *hollow* persegi dengan dimensi luar b×h dan ketebalan dinding t, momen inersia dihitung sebagai :

$$I = \frac{(b \times h^3)}{12} - \frac{b_i \times h_i^3}{12} \quad (2.4)$$

Keterangan :

b, h = Dimensi luar penampang (mm)

b_i, h_i = Dimensi dalam penampang = $b - 2t, h - 2t$ (mm)

t = Ketebalan dinding profil (mm)

2.3.3 Regangan

Regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perubahan bentuk atau deformasi yang dialami material akibat tegangan yang bekerja, dinyatakan sebagai rasio antara perubahan dimensi terhadap dimensi aslinya. Secara matematis, regangan normal (ϵ) dapat dirumuskan sebagai (Gdoutos and Konsta-Gdoutos, 2024)

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad (2.5)$$

Di mana :

ϵ = Regangan Normal

Δl = Perubahan Panjang (m)

L_0 = Panjang Mula-mula (m)



Gambar 2. 3 Regangan Normal

Sumber : (Altabey, 2024)

Regangan ialah besaran tak berdimensi, tetapi sering diartikan dalam satuan mm/mm atau persentase. Pada material isotropik, regangan berbanding lurus

dengan tegangan yang bekerja hingga mencapai batas elastis material.

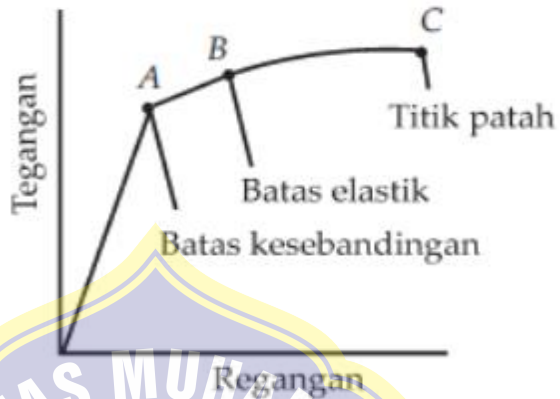
2.3.4 Hubungan Tegangan dan Regangan

Hubungan antara tegangan dan regangan dalam domain elastis dijelaskan oleh Hukum Hooke (*Hooke's Law*). Hukum Hooke berlaku ketika material dibebani dalam batas elastisnya tegangan yang dihasilkan dalam benda berbanding lurus dengan regangan yang dihasilkan. Hukum Hooke sangat penting untuk memahami hubungan linier yang ada antara tegangan (σ) dan regangan (ϵ) pada bahan yang beroperasi dalam daerah elastisnya. Hubungan ini dapat diartikulasikan secara matematis sebagai (Sitorus, 2026) :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.6)$$

Di mana E adalah modulus elastisitas material (Sitorus, 2026). Pada diagram tegangan-regangan, daerah linier ini disebut daerah elastis, di mana material akan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepas.

Modulus elastisitas (E) mengukur kekakuan material, semakin tinggi nilai E material semakin kaku, seperti baja, semakin rendah semakin fleksibel, seperti karet. Pada daerah elastis, deformasi bersifat sementara dan hubungan tegangan-regangan linear. Jika tegangan melampaui batas proporsional, material memasuki daerah plastis dengan deformasi permanen.



Gambar 2. 4 Hubungan Tegangan-Regangan

Sumber : (Sitorus, 2026)

2.3.5 Deformasi

Deformasi merupakan perubahan posisi suatu titik atau bagian struktur akibat pembebanan. Dalam analisis elemen hingga, deformasi merupakan besaran primer yang dihitung terlebih dahulu, kemudian dari deformasi diturunkan regangan dan tegangan

Deformasi mengacu pada perubahan geometri atau dimensi material sebagai akibat dari beban atau tegangan yang diberikan. Dalam bidang rekayasa struktural, pemahaman tentang deformasi sangat penting untuk menegaskan integritas dan keamanan struktur teknik. Deformasi dibagi menjadi 2 yaitu :

1. Deformasi elastis

Deformasi elastis terjadi ketika material mengalami perubahan bentuk yang bersifat sementara. Ketika beban dihilangkan, material akan kembali ke bentuk asalnya. Konsep ini dapat dijelaskan melalui hukum Hooke, yang menyatakan bahwa tegangan (σ) sebanding dengan regangan (ϵ) dalam batas elastis material.

Di mana E adalah modulus elastisitas material. Data menunjukkan bahwa material seperti baja dan beton memiliki modulus elastisitas yang tinggi, sehingga mampu menahan tegangan yang besar sebelum mengalami deformasi permanen (Callister Jr and Rethwisch, 2020).

2. Deformasi Plastis

Berbeda dengan deformasi elastis, deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang bersifat permanen. Ketika tegangan melebihi batas elastis material, material akan mengalami deformasi plastis, yang tidak dapat dikembalikan ke bentuk asalnya setelah beban dihilangkan. Deformasi plastis ini dapat terjadi melalui berbagai mekanisme, seperti dislokasi, deformasi geser, dan pengikisan (Meyers and Chawla, 2008).

Dalam desain rangka mesin, deformasi harus dijaga dalam batas elastis (Nisbett and Budynas, 2024). Batas deformasi maksimum yang diizinkan

(δ_{allow}) untuk elemen struktur mesin umumnya ditetapkan sebagai:

$$\delta_{allow} = \frac{L}{500} \quad (2.7)$$

Keterangan:

δ_{allow} = Deformasi maksimum yang diizinkan (mm)

L = Panjang bentang elemen struktural (mm)

Dalam analisis rangka mesin *spinner*, pembebanan statik mencakup berat komponen mesin itu sendiri (beban mati/*dead load*), berat produk atau material yang diolah, dan gaya reaksi dari mekanisme kerja mesin. (Abimanyu, Rohmat and Arif, 2022) dalam penelitian analisis rangka mesin pencacah kertas menggunakan variasi pembebanan statik bertingkat (500 N, 1000 N, dan 1500 N) untuk mengetahui respons tegangan dan regangan pada masing-masing level beban, yang menjadi dasar penentuan batas keamanan struktur rangka.

2.4 Teori Kegagalan Material: Kriteria Tegangan Von Mises untuk Material *Ductile*

Dalam bidang elemen mesin dan desain struktural, sangat penting bagi *engineer* untuk memastikan kondisi spesifik yang memicu kegagalan material (*failure*). Dalam kasus bahan ulet (*Ductile*), dicontohkan oleh baja ASTM A36, kriteria kegagalan utama yang digunakan adalah Kriteria Tegangan Von Mises (*Von Mises Stress Criterion*), yang juga disebut sebagai teori energi distorsi maksimum (*maximum distortion energy theory*).

Tegangan Von Mises (σ_{VM}) adalah nilai skalar tunggal yang diturunkan dari kondisi tegangan triaksial penuh. Dalam

koordinat tegangan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), tegangan *Von Mises* dinyatakan sebagai (Nisbett and Budynas, 2024):

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2} \times [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.8)$$

Dimana :

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ =Principal Stress (MPa)

σ_{vm} = Tegangan *Von Mises* akuivalen (MPa)

Kegagalan daktail terjadi ketika $\sigma_{vm} \geq S_y$ (tegangan luluh material). Persamaan (2.8) di atas dapat pula dinyatakan dalam komponen tegangan Cartesian sebagai:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2\}} \quad (2.9)$$

Keunggulan utama kriteria *Von Mises* dibandingkan kriteria lain seperti *Maximum Shear Stress* (Tresca) adalah lebih akurat secara eksperimental dalam memprediksi kegagalan material daktail, mempertimbangkan semua komponen tegangan termasuk tegangan geser dan menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih optimis (kurang konservatif), sehingga memungkinkan perancangan yang lebih efisien secara material (Nisbett and Budynas, 2024). Hal inilah yang menjadikan kriteria *Von Mises* sebagai default output pada hampir semua perangkat lunak FEA komersial termasuk *SolidWorks Simulation*.

2.5 Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan (*Factor of Safety*, FoS atau SF) merupakan salah satu konsep terpenting dalam rekayasa

perancangan. Faktor keamanan adalah rasio antara kekuatan material terhadap tegangan aktual yang terjadi pada komponen, dan merupakan salah satu parameter terpenting dalam perancangan komponen mesin. Secara matematis, faktor keamanan untuk material daktail berdasarkan kriteria kegagalan leleh didefinisikan sebagai:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_e} \quad (2.10)$$

Dimana :

η = Faktor keamanan

S_y = Tegangan luluh material (N/m²)

σ_e = Tegangan *Von Mises* Maksimum (N/m²)

Nilai $n > 1$ berarti komponen aman, $n = 1$ berarti berada tepat di batas kegagalan, dan $n < 1$ berarti komponen telah gagal. Dalam aplikasi *SolidWorks Simulation*, perhitungan faktor keamanan dilakukan secara otomatis berdasarkan setiap titik (node) dalam model. Menurut Nisbett and Budynas, (2024) penetapan faktor keamanan berdasarkan jenis pembebanan.

Tabel 2. 2 Nilai Safety Factor yang di rekomendasikan

Jenis Pembebanan	Nilai Safety Factor
Beban Statis	1,25 – 2,0
Beban Dinamis	2,0 – 3,0
Beban Kejut	3,0 – 4,0

Sumber : (Nisbett and Budynas, 2024)

2.6 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode Elemen Hingga (FEM) mewakili pendekatan analisis komputasi yang banyak digunakan dalam rekayasa struktural dan telah menjadikan dirinya sebagai standar yang berlaku untuk evaluasi tegangan. Metode ini membagi struktur menjadi elemen kecil yang lebih mudah dikelola, sehingga meningkatkan perhitungan tegangan dan deformasi. Menurut Taylor and Nithiarasu,(2024), FEM memberikan fasilitas analisis yang lebih kompleks dan tepat berbeda dengan metode grafis atau analisis analitik tradisional. Persamaan keseimbangan global yang dihasilkan oleh perakitan seluruh elemen dinyatakan dalam bentuk sistem persamaan matriks linear:

$$[K] \{u\} = \{F\} \quad (2.11)$$

di mana:

$[K]$ = matriks kekakuan global (N/m)

$\{u\}$ = vektor perpindahan nodal (m)

$\{F\}$ = vektor gaya nodal ekuivalen (N)

Setelah vektor perpindahan $\{u\}$ diperoleh dari penyelesaian sistem persamaan di atas, distribusi regangan dan tegangan pada setiap elemen dihitung menggunakan hubungan kinematik dan konstitutif. Pendekatan FEM ini telah terbukti efektif dan efisien dalam berbagai penelitian analisis tegangan rangka mesin di Indonesia (Pratama, 2023). Keunggulan FEA dibandingkan metode analitik konvensional adalah kemampuannya menganalisis geometri kompleks, kondisi batas yang tidak seragam, dan kombinasi beban multi-arah yang tidak dapat diselesaikan secara analitik sederhana.

2.7 Mesh Sensitivity Analysis

Kualitas hasil simulasi FEM sangat bergantung pada kehalusan *mesh* yang digunakan. *Mesh sensitivity analysis* (analisis konvergensi *mesh*) adalah proses memverifikasi bahwa hasil simulasi sudah konvergen, artinya perubahan ukuran *mesh* tidak lagi mengubah hasil secara signifikan. Proses ini dilakukan dengan membandingkan hasil tegangan *Von Mises* maksimum untuk berbagai ukuran elemen *mesh*, mulai dari kasar hingga halus, hingga perbedaan hasil antara dua iterasi berurutan kurang dari 5%. Konvergensi *mesh* sangat penting untuk memastikan validitas dan akurasi hasil simulasi (Taylor and Nithiarasu, 2024).

2.8 SolidWorks CAD

SOLIDWORKS mewakili perangkat lunak desain berbantuan komputer (CAD) yang canggih, berorientasi fitur, dan pemodelan padat parametrik, yang banyak digunakan dalam rekayasa komponen mekanis, termasuk bingkai pemintal. Dalam domain desain bingkai, **SOLIDWORKS** memberdayakan desainer untuk membangun model tiga dimensi profil berongga, sambungan las, dan pelat pemasangan motor secara parametrik, menandakan bahwa setiap dimensi dapat dimodifikasi dengan

mudah tanpa memerlukan gambar ulang yang lengkap. Model tiga dimensi yang dihasilkan berfungsi tidak hanya sebagai visualisasi geometris, tetapi juga sebagai database fisik yang komprehensif (massa, volume, sentroid) yang penting untuk penilaian awal kondisi beban. Dengan pendekatan pemodelan solid, setiap komponen bingkai direpresentasikan sebagai entitas padat yang memiliki sifat material yang berbeda, sehingga meminimalkan ketidakakuratan geometris potensial dari fase desain.

Sebelum model rangka dapat dianalisis di *SOLIDWORKS Simulation*, terdapat beberapa tahap persiapan yang harus dilakukan di lingkungan CAD. Tahap pertama adalah menyederhanakan model dengan menghilangkan fitur-fitur yang tidak berpengaruh terhadap kekuatan mekanik, seperti chamfer kecil, lubang tanpa fungsi struktural, atau *fillet* dekoratif. Penyederhanaan ini penting untuk mengurangi jumlah elemen *mesh* dan mempercepat waktu komputasi tanpa mengurangi akurasi hasil. Selanjutnya, model harus dipastikan sebagai *solid body* tunggal atau rakitan (*assembly*) dengan hubungan antar komponen yang sudah terdefinisi dengan benar (misalnya menggunakan fitur *bonded* untuk mensimulasikan sambungan las). Setelah itu, material dapat ditetapkan langsung dari pustaka material *SOLIDWORKS*, misalnya *Mild Steel* atau *AISI 304*, yang berisi data mekanik seperti modulus elastisitas, angka *Poisson*, dan tegangan luluh. Dengan persiapan yang tepat, model CAD siap di-*mesh*, diberi beban dan tumpuan, serta dijalankan analisis statik atau frekuensi untuk mengevaluasi keamanan rangka mesin *spinner*.

2.9 Perhitungan Empiris

Perhitungan empiris dilakukan untuk memperoleh nilai tegangan teoritis pada elemen kritis rangka sebelum dilakukan

simulasi. pendekatan empiris digunakan untuk memprediksi perilaku sistem teknik berdasarkan hubungan matematis yang diperoleh dari teori dan pengamatan eksperimen sehingga dapat digunakan sebagai acuan validasi model numerik.

Pada penelitian ini, perhitungan empiris dilakukan untuk menentukan nilai tegangan teoritis, deformasi, dan faktor keamanan pada rangka mesin sebelum dilakukan simulasi FEM. Hasil perhitungan empiris kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi untuk mengetahui tingkat validitas model. Langkah - langkah melakukan perhitungan adalah sebagai berikut :

1. Identifikasi dan Pemodelan Pembebanan: Mengidentifikasi seluruh gaya yang bekerja pada rangka, meliputi berat motor listrik, berat tabung peniris berisi produk (beban operasi 5 kg), dan pulley. Total beban ditetapkan sebesar 981 N (100 kg).

2. Perhitungan Reaksi Tumpuan: Menganalisis rangka sebagai struktur statis tertentu menggunakan persamaan kesetimbangan statika

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M = 0$$

untuk mendapatkan reaksi pada setiap tumpuan.

3. Perhitungan Properti Penampang: Menghitung luas penampang (A), momen inersia (I), dan jarak serat terluar (c) untuk profil hollow 40×40×1,6 mm.

4. Perhitungan Tegangan: Menghitung tegangan normal ($\sigma = F/A$), tegangan lentur ($\sigma_b = M \cdot c/I$), dan tegangan geser ($\tau = V/A$) pada elemen kritis.

5. Perhitungan Faktor Keamanan Empiris: Menghitung nilai faktor keamanan ($n = S_y / \sigma_{\text{gabungan_maks}}$) dan membandingkannya dengan nilai yang disyaratkan .

2.10 SolidWorks Simulation Software

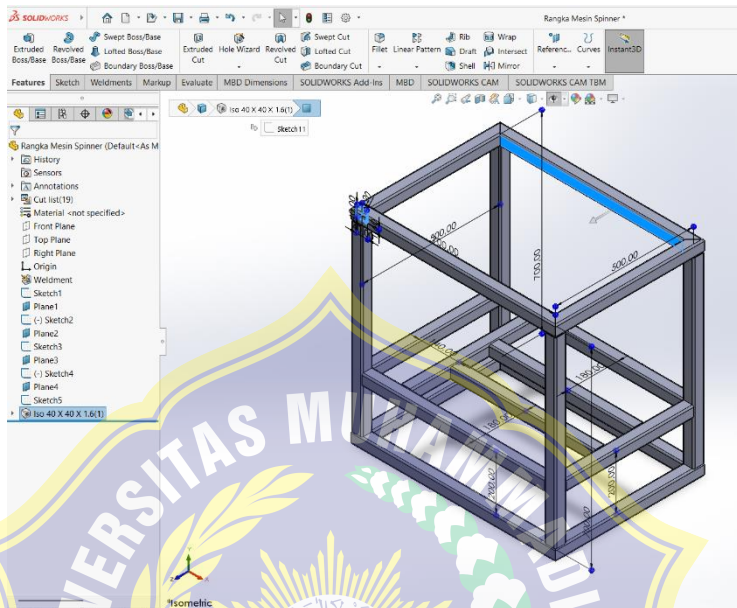
SolidWorks Simulation merupakan *add-in* FEM yang terintegrasi secara langsung dalam platform CAD *SolidWorks*, sehingga memfasilitasi transisi yang mulus dari fase desain geometris ke fase analisis struktur. Manfaat utama perangkat lunak ini terletak pada antarmuka yang intuitif dan integrasi CAD-FEM yang erat, menjadikannya pilihan populer dalam penelitian perancangan mesin di Indonesia.

SolidWorks Simulation menyediakan berbagai jenis studi analisis yang memenuhi kebutuhan rekayasa yang beragam, antara lain (*Linear Static Analysis*) analisis tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan di bawah beban statik (*Nonlinear Analysis*) analisis dengan mempertimbangkan ketidaklinearan material dan geometri (*Frequency Analysis*) analisis frekuensi natural dan moda getar (*Thermal Analysis*) distribusi temperatur (*Fatigue Analysis*) estimasi umur lelah komponen serta *Buckling Analysis*.

2.10.1 Tahapan Analisis pada SolidWorks Simulation

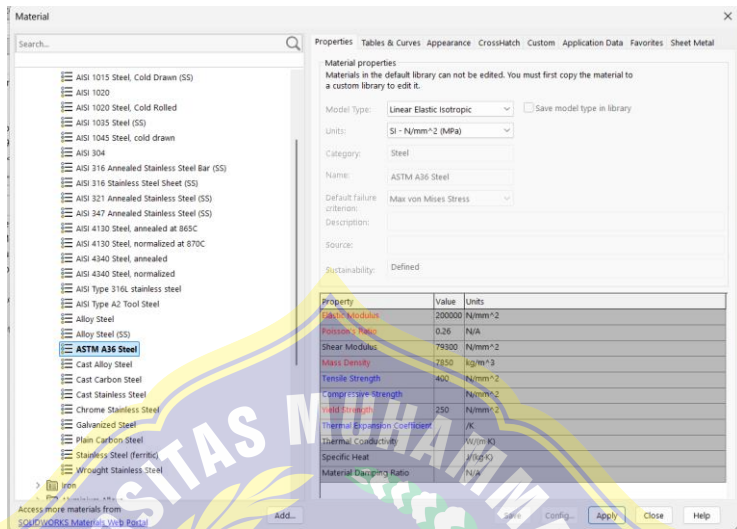
Proses analisis struktur menggunakan *SolidWorks Simulation* pada penelitian ini mengikuti tahapan sistematis sebagai berikut:

1. Pembuatan Model Geometri (*Pre-Processing*): Model 3D rangka mesin *spinner* dibuat pada modul CAD *SolidWorks* sesuai dengan dimensi aktual. Setiap komponen rangka dimodelkan dengan presisi untuk memastikan akurasi simulasi.



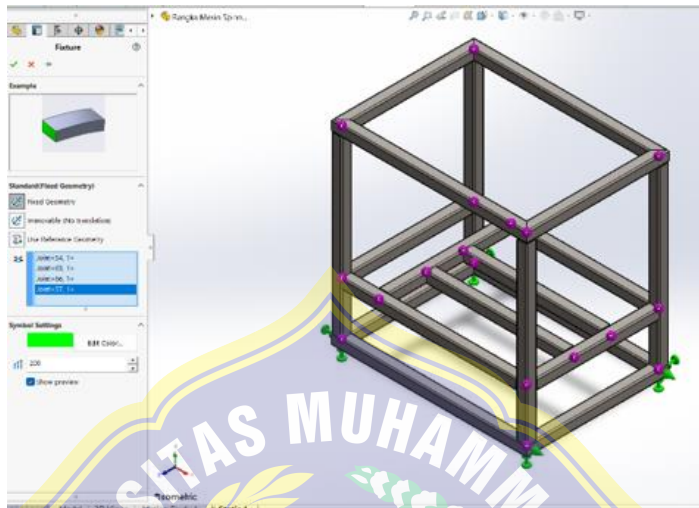
Gambar 2. 5 CAD Rangka Spinner

2. Penentuan Material: Material ASTM A36 dipilih dari *library* material *SolidWorks Simulation*. Parameter material yang dimasukkan meliputi modulus elastisitas ($E = 200 \text{ GPa}$), rasio Poisson ($\nu = 0,26$), kekuatan luluh ($S_y = 250 \text{ MPa}$), dan densitas ($\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$).

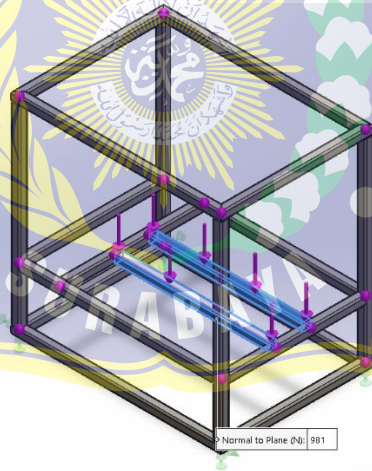


Gambar 2. 6 Material Property ASTM A36

3. Penetapan Kondisi Batas (*Boundary Conditions*):
 Tumpuan (*fixture*) diberikan pada keempat titik kaki rangka berupa *fixed support* (terkekang dalam semua arah translasi dan rotasi). Beban gravitasi (*dead load*) dan beban operasional diaplikasikan secara vertikal ke bawah pada titik-titik yang sesuai dengan posisi motor dan tabung peniris.



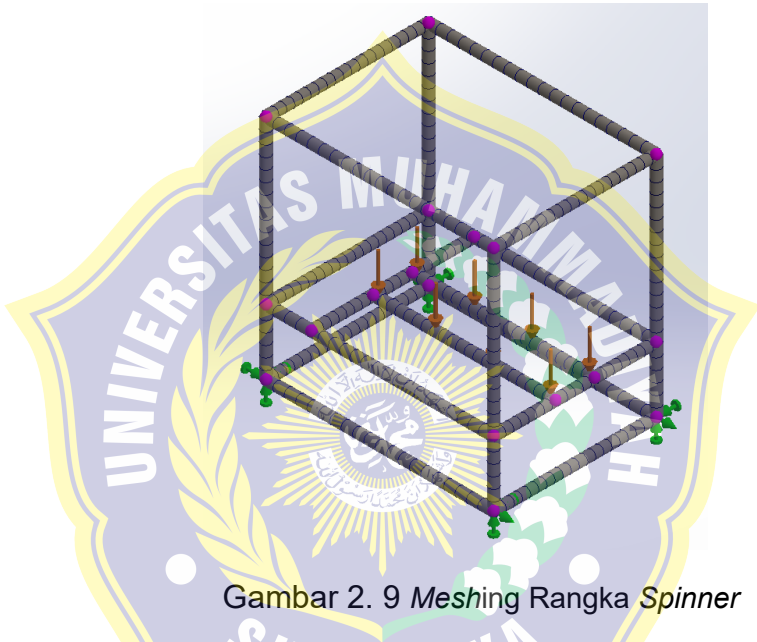
Gambar 2. 7 Fixed Geometry rangka *spinner*



Gambar 2. 8 Pembebanan rangka *spinner*

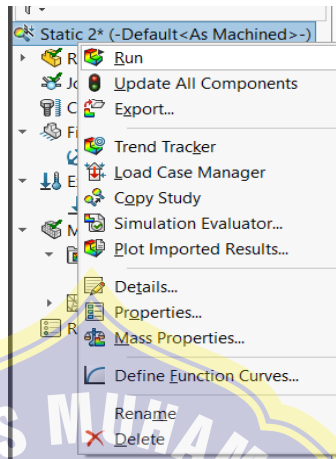
4. Proses *Meshing* (Diskretisasi): Model rangka dibagi menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) menggunakan

Beam element Kualitas *mesh* diverifikasi dengan memeriksa *aspect ratio* tanpa menggunakan *jacobian ratio* karena tidak relevan untuk elemen beam. *Mesh* yang lebih halus (*refined*) diterapkan pada area-area kritis seperti sambungan dan titik tumpuan untuk meningkatkan akurasi hasil.



Gambar 2. 9 Meshing Rangka Spinner

5. Menjalankan Simulasi (*Solver*): *SolidWorks Simulation* menyelesaikan sistem persamaan linier $[K]\{u\} = \{F\}$ secara numerik. *Solver* yang digunakan adalah *Direct Sparse* atau *FFEPlus* tergantung pada kompleksitas model.



Gambar 2. 10 Tools Run Simulasi FEA

6. Analisis Hasil (*Post-Processing*): Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk peta warna (*color map*) yang menggambarkan distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada seluruh bagian rangka. Nilai maksimum dan minimum dari setiap variabel diidentifikasi dan dibandingkan terhadap batas ijin material.

2.10.2 Pembacaan Distribusi Tegangan *Von Mises* pada *SolidWorks Simulation*

Hasil simulasi tegangan *Von Mises* ditampilkan dalam bentuk peta warna (*fringe plot*) pada permukaan model rangka. Interpretasi hasil dilakukan dengan memperhatikan beberapa aspek berikut:

1. Skala Warna (*Color Legend*): *SolidWorks Simulation* menggunakan gradasi warna dari biru (tegangan minimum) hingga merah (tegangan maksimum). Warna biru menandakan area dengan tegangan

paling rendah yang merupakan zona paling aman, sedangkan warna merah menunjukkan area konsentrasi tegangan tertinggi (*hot spot*) yang berpotensi menjadi titik kegagalan pertama.

2. Nilai Tegangan Maksimum (σ_{VMmax}): Nilai tegangan *Von Mises* maksimum ditampilkan di bagian atas skala warna dalam satuan N/m^2 atau MPa. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan kekuatan luluh material ($S_y = 250 \text{ MPa}$ untuk ASTM A36). Apabila $\sigma_{VM,max} < S_y$, maka desain rangka dinyatakan aman terhadap kegagalan leleh.
3. Identifikasi Titik Kritis: Area berwarna merah atau oranye pada peta warna menunjukkan lokasi konsentrasi tegangan yang kritis. Lokasi-lokasi ini perlu mendapat perhatian khusus dalam evaluasi desain, karena berpotensi mengalami kegagalan lebih awal dibandingkan bagian lainnya.
4. Validasi dengan Perhitungan Manual: Hasil tegangan *Von Mises* dari simulasi dibandingkan dengan nilai yang diperoleh dari perhitungan analitis. Selisih antara kedua nilai (persentase *error*) menunjukkan tingkat konvergensi dan validitas model simulasi. Umumnya, selisih yang dapat diterima adalah di bawah 10%, yang menandakan bahwa model FEM telah merepresentasikan perilaku struktur dengan akurat (Putero *et al.*, 2025).

