



Analisis Tegangan dan Kegagalan *Yoke Propeller Shaft* Truk Angkutan Sawit Menggunakan Metode Elemen Hingga

Tri Satya Ramadhoni^{1*}, Herlin Sumarna², Toni Okviyanto³, Purfaji⁴, Rachmat Dwi Sampurno⁵

^{1,2,3,4,5} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

Email: ^{1*}tri.satya.ramadhoni@polsri.ac.id, ²herlin.sumarna@polsri.ac.id, ³toni.okviyanto@polsri.ac.id, ⁴purfaji@polsri.ac.id, ⁵rachmat.dwi.sampurno@polsri.ac.id

Abstract

Failure of slip yoke components in palm oil transport vehicle transmission systems is generally caused by complex and cyclic dynamic loading. This study aims to analyze stress distribution and predict failure locations using a Metode Elemen Hingga (FEM)-based approach. A three-dimensional model was developed from actual geometry with controlled simplification using AISI 4140 material. Mesh convergence and quality evaluation were conducted to ensure numerical reliability. The results show that maximum stress increases with load, reaching 196.14 MPa, 294.38 MPa, 392.40 MPa, and 490.52 MPa for loads of 4, 6, 8, and 10 tons, respectively. At 10 tons, the stress exceeds the material yield strength (415 MPa), indicating plastic deformation. Stress concentration occurs at the critical section (C-C) due to geometric discontinuities and combined loading, consistent with observed failure locations. Comparison with analytical results shows less than 1% deviation, confirming model accuracy. This study demonstrates that FEM effectively predicts stress distribution and failure mechanisms, providing a basis for design optimization and maintenance strategies.

Keywords: Slip Yoke, Finite Element Method, Stress Distribution, Critical Section, Material Failure.

Abstrak

Kegagalan komponen slip yoke pada sistem transmisi kendaraan angkutan sawit umumnya disebabkan oleh pembebanan dinamis yang kompleks dan berulang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tegangan dan memprediksi lokasi kegagalan menggunakan pendekatan berbasis Metode Elemen Hingga (FEM). Model tiga dimensi dikembangkan dari geometri aktual dengan penyederhanaan terkontrol menggunakan material AISI 4140. Studi konvergensi dan evaluasi kualitas mesh dilakukan untuk memastikan keandalan numerik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum meningkat seiring dengan beban, yaitu 196,14 MPa, 294,38 MPa, 392,40 MPa, dan 490,52 MPa untuk beban 4, 6, 8, dan 10 ton. Pada beban 10 ton, tegangan melampaui kekuatan luluh material (415 MPa) yang mengindikasikan deformasi plastis. Konsentrasi tegangan terjadi pada penampang kritis (C-C) akibat perubahan geometri dan pembebanan kompleks, yang konsisten dengan lokasi kerusakan aktual. Perbandingan dengan analisis teoritis menunjukkan deviasi kurang dari 1%, menandakan akurasi model yang tinggi. Penelitian ini menegaskan bahwa FEM efektif dalam memprediksi distribusi tegangan dan mekanisme kegagalan serta dapat digunakan sebagai dasar optimasi desain dan strategi perawatan.

Kata Kunci: Slip Yoke, Metode Elemen Hingga, Distribusi Tegangan, Penampang Kritis, Kegagalan Material.

1. PENDAHULUAN

Komoditas kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis yang mendukung perekonomian di Indonesia dan penyumbang utama terhadap total Produk Domestik Bruto (PDB). Data menunjukkan Indonesia mampu menghasilkan minyak sawit sebesar 42,9 juta ton dengan luas areal budidaya mencapai 14,33 juta hektar (Setiawan et al., 2023). Bahan baku berupa TBS (Tandan Buah Segar) berasal dari kebun yang dikelola

oleh pabrik kelapa sawit diolah menjadi minyak sawit mentah atau sering disebut CPO (Crude Palm Oil) (Yanti et al., 2024). Proses distribusi tandan buah segar (TBS) dari area perkebunan kelapa sawit menuju pabrik pengolahan umumnya dilakukan menggunakan kendaraan angkutan berat seperti truk. Truk tersebut umumnya mengangkut kelapa sawit hingga beban hingga berton-ton.

Sistem transmisi pada kendaraan truk tersebut memiliki peranan penting dalam menyalurkan daya dari mesin menuju roda penggerak. Salah satu komponen utama dalam sistem ini adalah *propeller shaft* yang berfungsi mentransmisikan torsi dari transmisi menuju diferensial. Pada sistem *propeller shaft* terdapat komponen yaitu *yoke* berfungsi sebagai penghubung antara poros dengan *universal joint* sehingga memungkinkan transmisi daya tetap berlangsung meskipun terjadi perubahan sudut antara poros saat kendaraan sedang berjalan. Kondisi operasi yang berat pada kendaraan truk angkutan sawit dengan sering melewati jalan perkebunan yang tidak rata serta beban tinggi berpotensi menyebabkan tegangan berulang yang dapat memicu kegagalan material akibat kelelahan (Sitthipong et al., 2017).

Distribusi tegangan dan potensi kegagalan pada komponen mekanis dengan geometri yang kompleks dapat dipahami melalui pendekatan numerik menggunakan metode elemen hingga dan sudah banyak digunakan dalam penelitian. Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode elemen hingga untuk menganalisis kegagalan pada poros *propeller*. Penelitian yang dilakukan oleh Firmansyah dkk. menganalisis kegagalan *propeller shaft* pada kendaraan ringan menggunakan simulasi *Finite Element Method* dengan beberapa jenis material seperti FCD450-10, SM45C dan SCM440 untuk mengetahui karakteristik tegangan serta deformasi akibat pembebanan statis dan dinamis (Firmansyah et al., 2025). Selain itu penelitian lain melakukan studi mengenai poros propulsi kapal di mana menunjukkan bahwa kegagalan *fatigue* sering dipengaruhi oleh kombinasi tegangan torsional dan *bending* yang terjadi secara siklik (Marijančević et al., 2025).

Penelitian terkait kegagalan slip yoke pada sistem transmisi kendaraan telah banyak dilakukan namun sebagian besar studi masih berfokus pada analisis berbasis beban statis dan pendekatan eksperimental sederhana. Dalam praktik operasional, khususnya pada kendaraan perkebunan dengan kondisi jalan yang tidak seragam dan beban fluktuatif, slip yoke lebih dominan mengalami beban dinamis berupa kombinasi torsi siklik, gaya aksial, serta getaran acak. Perbedaan karakteristik beban statis dan dinamis ini sangat signifikan, di mana beban dinamis cenderung memicu fenomena kelelahan material (*fatigue failure*) yang tidak dapat diidentifikasi secara akurat melalui pendekatan statis semata. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa komponen transmisi berputar seperti poros dan yoke sangat rentan terhadap kegagalan akibat beban siklik, terutama pada daerah dengan konsentrasi tegangan tinggi (Mendes et al., 2024). Studi terbaru juga menegaskan bahwa retak awal umumnya terbentuk pada area kritis akibat akumulasi tegangan dinamis dan berkembang melalui mekanisme propagasi kelelahan (Yu et al., 2025). Selain itu, analisis kegagalan yoke menunjukkan bahwa spektrum beban aktual di lapangan bersifat dinamis dan kompleks, sehingga pendekatan berbasis beban statis tidak cukup merepresentasikan kondisi operasional (Wang et al., 2025). Oleh karena itu, penerapan metode Metode Elemen Hingga (FEM) menjadi krusial karena mampu memodelkan distribusi tegangan dan perilaku struktur di bawah beban dinamis secara lebih realistis.

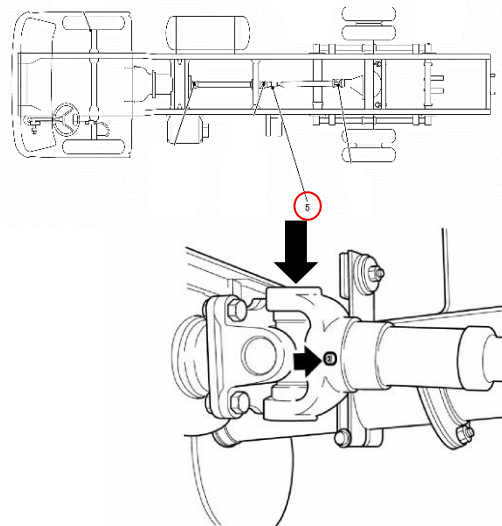
Berdasarkan uraian tersebut, penulis melihat bahwa masih terdapat kesenjangan penelitian dalam kajian mengenai analisis distribusi tegangan pada slip yoke poros penggerak, khususnya yang diaplikasikan pada kendaraan angkutan sawit dengan karakteristik beban dinamis yang tinggi dan variatif. Oleh karena itu, penelitian ini

bertujuan untuk menganalisis kemungkinan penyebab kegagalan komponen slip yoke pada poros penggerak kendaraan truk angkutan sawit menggunakan pendekatan FEM.

Pemilihan material dalam analisis kegagalan slip yoke merupakan faktor kunci yang sangat menentukan akurasi simulasi dan relevansi hasil terhadap kondisi lapangan. Dalam penelitian ini, material AISI 4140 dipilih karena memiliki kombinasi sifat mekanik yang unggul dibandingkan baja karbon standar. Material baja paduan seperti AISI 4140 dikenal memiliki kekuatan tarik tinggi, ketahanan kelelahan yang baik dan ketangguhan yang tinggi sehingga banyak digunakan pada komponen transmisi yang mengalami beban siklik dan torsi tinggi. Studi kegagalan pada komponen drivetrain menunjukkan bahwa peningkatan sifat kelelahan material sangat berpengaruh dalam memperlambat inisiasi dan propagasi retak (Mendes et al., 2024). Material dengan kemampuan hardenability yang baik seperti AISI 4140 juga mampu mempertahankan kekuatan pada kondisi pembebanan dinamis dan variasi tegangan tinggi yang umum terjadi pada sistem transmisi kendaraan berat. Penggunaan material dengan ketahanan kelelahan tinggi menjadi sangat penting karena kegagalan pada komponen seperti yoke umumnya terjadi akibat beban siklik jangka panjang bukan beban statis sesaat (Cardoso et al., 2022). Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai distribusi tegangan, lokasi kritis dan faktor keamanan pada komponen slip yoke sehingga dapat menjadi dasar dalam upaya peningkatan desain maupun perencanaan perawatan sistem transmisi kendaraan angkutan berat yang lebih andal.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Bagian komponen pada nomor 5 yaitu *slip yoke* pada poros penggerak kendaraan truk tipe Canter dari sebuah pabrik pengolah sawit digunakan sebagai objek penelitian dalam studi ini seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen *slip yoke* pada poros penggerak Mitsubishi Fuso Canter
Sumber : Direproduksi dari buku panduan servis Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation untuk keperluan akademis dan penelitian. (SERVICE MANUAL 2012 Model FOREWORD)

Kondisi pada *slip yoke* yang mengalami kegagalan dapat dilihat pada **Gambar 2**, dimana menunjukkan adanya patahan pada salah satu bagian lengan penghubung *universal joint*. Kerusakan diprediksi disebabkan oleh pembebanan berulang selama kendaraan truk beroperasi.



Gambar 2. Bagian salah satu lengan *slip yoke* mengalami patahan

Ditemukan juga bentuk kegagalan lain yang terjadi pada area lengan penghubung universal joint, yaitu berupa deformasi atau pembengkokan dan patah pada komponen slip yoke yang disebabkan karena beban torsi atau torsi berlebih pada yoke seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kegagalan lain berupa deformasi atau pembengkokan dan patah pada *slip yoke* (Tathe & Bajaj).

Dalam studi ini metode numerik melalui pendekatan simulasi metode elemen hingga dan metode analitik sederhana digunakan dan divalidasi hasilnya satu sama lain (ŞEN & KAHYALAR, 2020)(Ramadhoni et al., 2024).

2.1 Metode Analitik

Kendaraan pengangkut TBS sering beroperasi di jalan perkebunan yang memiliki permukaan tidak rata dan kondisi kecepatan rendah. Dalam keadaan seperti ini, kendaraan umumnya menggunakan gigi rendah untuk menghasilkan daya tarik yang lebih besar. Oleh karena itu, kondisi gigi pertama dipilih sebagai asumsi beban kritis untuk mewakili torsi maksimum yang ditransmisikan ke poros penggerak dan komponen *slip yoke*.

Rasio total *drivetrain* dihitung menggunakan rasio transmisi gigi pertama dan rasio *finaldrive* poros belakang. Pendekatan ini diterapkan karena torsi maksimum yang ditransmisikan melalui sistem penggerak biasanya terjadi saat kendaraan dinyalakan atau beroperasi pada kecepatan rendah dalam kondisi beban berat. Menurut spesifikasi teknis truk Mitsubishi Fuso Canter FE74, rasio gigi pertama adalah 5,494 sedangkan rasio penggerak akhir poros belakang sekitar 5,571 sehingga menghasilkan rasio total sistem penggerak sekitar 30,6. Mesin harus berputar sekitar 30 kali untuk menghasilkan 1 putaran roda. Hal ini menunjukkan torsi yang besar sehingga tegangan pada poros penggerak dan *slip yoke* bisa tinggi saat membawa beban berat (<https://ricardochin.com/>, 2026; MODEL / VEHICLE TYPE 3S13)

$$i_{total} = i_{gear\ 1} \times i_{gear\ final} \quad (1)$$

Torsi maksimum sekitar 353 Nm digunakan dalam penelitian ini merupakan torsi puncak pada saat kecepatan mesin rendah. Nilai torsi diambil dari torsi mesin dari spesifikasi teknis truk Mitsubishi Fuso Canter (*Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation. (2018). Canter FE 74 HD Brochure. Jakarta, Indonesia., n.d.*) Pada studi ini, torsi yang bekerja pada sistem *drivetrain* dianalisis berdasarkan variasi beban muatan

kendaraan. Beban maksimum kendaraan diasumsikan sebesar 10 ton sedangkan variasi beban yang di analisis adalah 4, 6, 8 dan 10 ton. Torsi yang ditransmisikan pada poros penggerak dihitung berdasarkan torsi mesin dan rasio total *drivetrain*. Rasio total *drivetrain* diperoleh dari hasil perkalian rasio gigi transmisi dengan rasio *finaldrive* (Gillespie, 2021). Sehingga torsi pada poros penggerak dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} T_{shaft} &= T_{engine} \times i_{gear} \\ &= 353 \times 5,494 \\ &= 1.940 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (2)$$

Dimana :

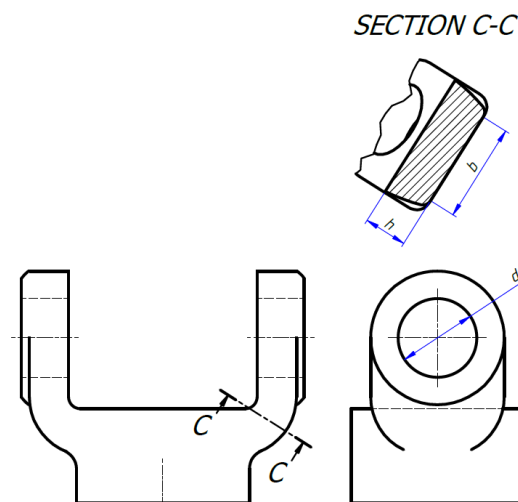
T_{engine} = torsi mesin (Nm)

i_{gear} = rasio gigi transmisi

Beban 10 ton dipilih sebagai beban maksimal untuk referensi dalam perhitungan analitis dikarenakan informasi lapangan standar aturan dari pabrik untuk muatan sawit sebaiknya berada pada range 6-7,5 ton. Namun praktik di lapangan kendaraan truk terkadang sering juga dipaksakan untuk memuat sawit hingga 10 ton yang mana ini sudah melebihi aturan standar pabrik. Beban 10 ton juga diasumsikan untuk menentukan besar nilai tegangan nominal sehingga pada beban 8 ton, torsi pada poros penggerak adalah sebesar 1940 Nm. Sehingga skala untuk torsi terhadap beban sebagai berikut :

$$T = 1940 \times \frac{\text{beban}}{10} \quad (3)$$

Pada penelitian ini penampang kritis komponen *slip yoke* ditandai dengan section (C-C) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Penentuan gaya total yang bekerja pada penampang kritis diawali dari beban torsi yang ditransmisikan oleh sistem poros. Penentuan lokasi penampang kritis dalam analisis ini dilakukan melalui pertimbangan mekanika struktur dan fenomena kegagalan yang umum terjadi pada komponen dengan geometri tidak beraturan. Penampang ini merupakan area geometri yang mengalami perubahan penampang, sudut atau fillet dimana secara teoritis daerah dengan diskontinuitas seperti ini merupakan lokasi yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan yang tinggi. Pemilihan penampang kritis C-C sebagai lokasi analisis juga didukung oleh artikel sebelumnya yang menyebutkan kegagalan komponen *slip yoke* dapat mengalami deformasi (pembengkokan) dan patah (*bent or deflected end fitting*).



Gambar 4. Penampang kritis pada section (C-C)

Dimensi penampang kritis (C-C) pada *slip yoke* yang digunakan dalam perhitungan analitis ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi lubang fork dan penampang kritis (C-C) pada *slip yoke*

Dimensi	Ukuran (mm)
b	25,47
h	10,42
d	20

Kemudian torsi yang telah diperoleh sebelumnya dikonversikan menjadi gaya tangensial yang bekerja pada lubang *fork slip yoke* dengan menggunakan hubungan antara torsi dan gaya tangensial (Deshpande & Wallibai, 2021). Gaya tangensial total dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F_{total} &= \frac{T}{r} & (4) \\
 &= \frac{1940}{0,01} \\
 &= 194.000 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Dimana r dalam perhitungan gaya tangensial merupakan jarak dari pusat lubang fork ke titik kerja gaya pada permukaan dalam lubang. Berdasarkan data pada Tabel 1. diameter lubang sebesar 20 mm maka diperoleh nilai r sebesar 10 mm. Nilai ini digunakan sebagai lengan momen dalam hubungan torsi dan gaya.

Pada komponen *slip yoke* yang memiliki dua lengan (fork), gaya tangensial tersebut tidak bekerja secara terpusat melainkan terbagi menjadi dua lengan fork yang simetris. Maka gaya tangensial total diasumsikan terbagi merata pada masing-masing lengan sehingga gaya pada satu fork dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F_{fork} &= \frac{F_t}{2} & (5) \\
 &= \frac{194.000}{2} \\
 &= 97.000 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Gaya F_{fork} ini kemudian menghasilkan momen bending maksimum pada penampang kritis (C-C) akibat adanya konsentrasi tegangan.

Selanjutnya analisis tegangan pada penampang kritis C-C dilakukan menggunakan pendekatan persamaan tegangan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Namun karena adanya perubahan geometri, kemiringan penampang dan distribusi tegangan tidak merata maka digunakan faktor koreksi berupa *stress concentration factor* (K_t) (Shigley's Mecha Nical Engineering Design, n.d.) Sehingga persamaan menjadi seperti berikut :

$$\sigma_{max} = K_t \cdot \frac{F}{A} \quad (7)$$

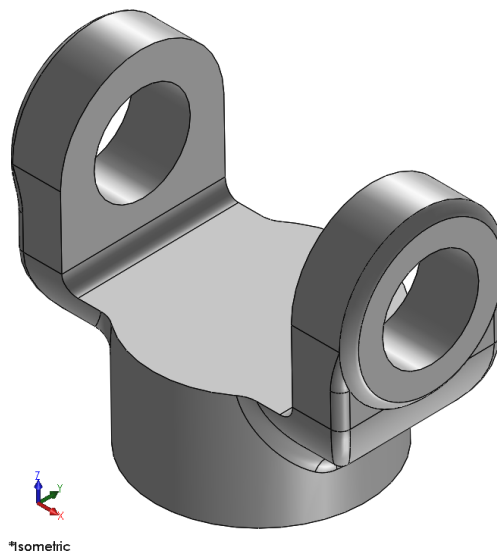
Penampang kritis (C-C) merupakan daerah transisi yang kemudian mengalami perubahan arah gaya dan memiliki ketidakaturan geometri oleh karena itu digunakan nilai *stress concentration factor* (K_t) = 1.4. Sehingga perhitungan tegangan maksimum menjadi sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= K_t \cdot \frac{F}{A} \\ &= 1.4 \cdot \frac{97.000}{276,36} \\ &= 491,38 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{8}$$

2.2 Modeling

Pemodelan geometri dibuat dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Dimensi model diperoleh berdasarkan dokumentasi visual slip yoke yang mengalami kerusakan serta disesuaikan dengan proporsi geometris komponen aktual. Gambar 5. menunjukkan model slip yoke yang telah disederhanakan dengan fokus analisis pada bagian yoke sebagai komponen utama yang mengalami kegagalan.

Penyederhanaan geometri dilakukan dengan menghilangkan fitur-fitur non-kritis seperti fillet kecil, chamfer, dan detail permukaan yang tidak berkontribusi signifikan terhadap distribusi tegangan global. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi komputasi tanpa mengurangi akurasi hasil analisis. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penyederhanaan geometri dalam simulasi berbasis FEM merupakan praktik umum selama fitur yang dihilangkan tidak mempengaruhi jalur utama distribusi tegangan pada komponen (Madenci & Guven, 2015).



Gambar 5. Model 3D *slip yoke*

Secara mekanika distribusi tegangan pada komponen slip yoke lebih dipengaruhi oleh perubahan penampang utama dan geometri makro khususnya pada area kritis seperti penampang C–C yang mengalami konsentrasi tegangan akibat pembebanan torsi dan gaya aksial. Penelitian terdahulu juga menegaskan bahwa konsentrasi tegangan dominan terjadi pada perubahan penampang atau diskontinuitas geometri utama, bukan pada detail kecil permukaan (Budynas & Keith, 2020).

Fitur yang dihilangkan dalam pemodelan diasumsikan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap pola aliran tegangan pada penampang kritis (C–C) karena kontribusinya terhadap konsentrasi tegangan bersifat lokal dan relatif kecil dibandingkan dengan pengaruh geometri utama. Dengan demikian model yang digunakan tetap mampu merepresentasikan kondisi tegangan aktual secara memadai, khususnya dalam mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan dan potensi inisiasi retak sebagai awal kegagalan komponen (Mendes et al., 2024)

2.3 Material dan Dimensi

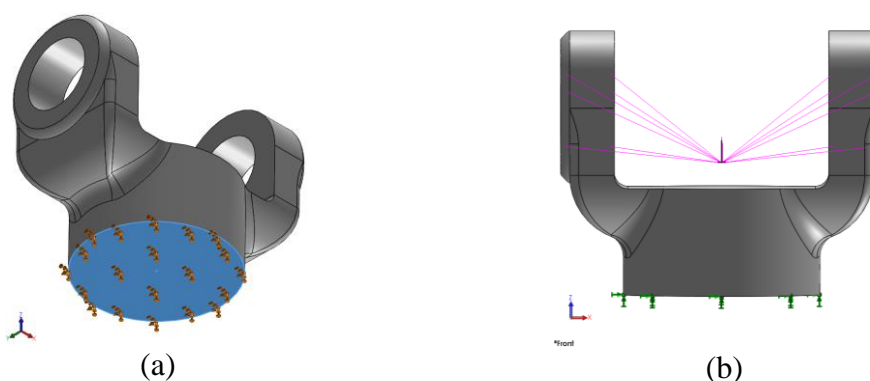
Material baja paduan AISI 4140 digunakan pada simulasi. Material ini banyak digunakan pada poros dan komponen transmisi daya karena kekuatannya yang tinggi dan ketahanan lelah yang baik. Material ini memiliki kekuatan luluh sekitar 415 MPa, kekuatan tarik sekitar 655 MPa, Modulus Young 210 GPa dan poisson rasio 0.3 (Hou et al., 2022; Rajesh Kannah/, 2025). Sifat material yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari material *library* pada perangkat lunak SolidWorks yang mengacu pada data standar hasil pengujian sebelumnya.

2.4 Metode Elemen Hingga

Analisis dalam menggunakan Metode Elemen Hingga dilakukan sebagai struktur statis linier dengan menerapkan kondisi batas pada perangkat lunak Solidworks. Sebagai hasil dari simulasi, distribusi tegangan *Von Mises*, *Factor of Safety* (FOS) untuk masing-masing beban 4, 6, 8 dan 10 ton diperoleh.

2.4.1 Kondisi Batas

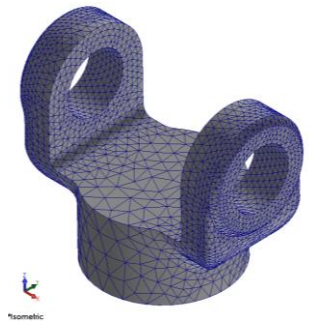
Kondisi batas pada model ditentukan untuk merepresentasikan kondisi kerja aktual komponen *slip yoke* pada poros penggerak. Beban yang bekerja pada *slip yoke* berasal dari torsi transmisi yang diteruskan melalui *universal joint*. Gaya kontak pada lubang *fork* merupakan reaksi dari torsi tersebut dan bukan beban independen. Oleh karena itu, pada simulasi metode elemen hingga ini, beban direpresentasikan dalam bentuk momen rotasi (torque) ekuivalen tanpa penambahan gaya terpisah untuk menghindari duplikasi pembebanan. Pembebanan diberikan pada kedua lubang *fork slip yoke* yang berinteraksi dengan *universal joint*. Rotasi sumbu poros penggerak searah sumbu z (center shaft) merupakan acuan arah rotasi pembebanan sehingga distribusi beban yang dihasilkan menyerupai kondisi aktual saat komponen mentransmisikan torsi. Kemudian kondisi *fixed support* diberikan pada salah satu ujung poros penggerak untuk mensimulasikan penahanan terhadap gerakan translasi dan rotasi. Kondisi ini merepresentasikan pembebanan torsi yang bekerja secara simetris pada kedua lengan *fork slip yoke*. **Gambar 6.** (a) dan (b) masing-masing menunjukkan kondisi batas *fix support* dan pembebanan torsi yang diberikan pada pemodelan 3D.



Gambar 6. (a). Kondisi batas *fix support* pada ujung poros penggerak (b). Pembebanan torsi pada kedua lubang *fork slip yoke*.

2.4.2 Proses Meshing

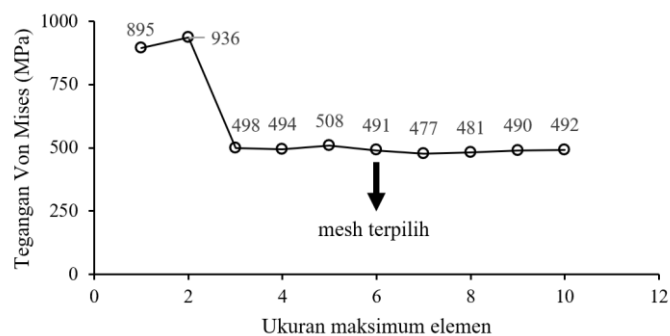
Model geometri yang telah ditentukan kemudian didiskretisasi menjadi elemen-elemen kecil melalui proses *meshing*. Jenis elemen yang digunakan adalah elemen solid tiga dimensi dengan bentuk tetrahedral yang sesuai untuk geometri kompleks. Ukuran elemen *mesh* ditentukan secara bertahap untuk memperoleh keseimbangan antara akurasi hasil dan waktu komputasi.



Gambar 7. Meshing model

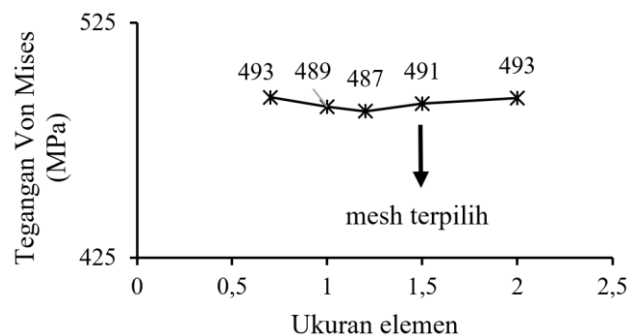
2.4.3 Mesh sensitivity studi

Untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh ukuran mesh dilakukan *mesh sensitivity* studi dengan membandingkan hasil tegangan maksimum pada beberapa variasi ukuran elemen. Studi konvergensi *mesh* dilakukan secara bertahap dengan mengurangi ukuran elemen maksimum global sambil mempertahankan kontrol *mesh* lokal yang konstan di tepi lubang fork *slip yoke*. Parameter *meshing* lainnya seperti rasio pertumbuhan dan jumlah minimum elemen perlingkaran dijaga konstan untuk memastikan konsistensi numerik. Kondisi konvergen tercapai ketika perubahan hasil antar variasi *mesh* tidak signifikan. Analisis sensitivitas mesh pada pemodelan ini menggunakan parameter nilai tegangan maksimal Von Mises yang terjadi pada model geometri *slip yoke* dari beban 10 ton. Hasil analisis sensitivitas mesh untuk global mesh, ukuran maksimum elemen sebesar 6 mm dipilih seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. dengan jumlah elemen 41450 elemen.



Gambar 8. Konvergen studi geometri *slip yoke* untuk global mesh

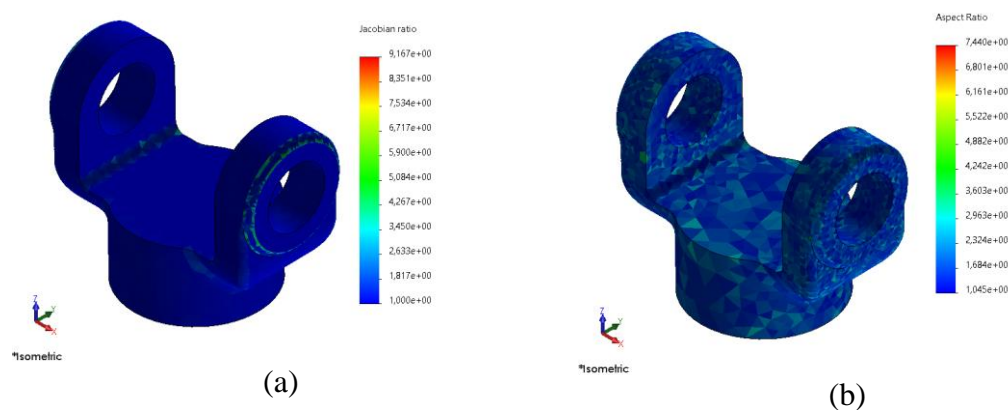
Setelah menetapkan konvergensi *mesh* global, analisis sensitivitas *mesh* lokal dilakukan di tepi kedua lubang fork *slip yoke*. Hasil analisis sensitivitas mesh untuk lokal mesh, ukuran elemen sebesar 1,5 mm dipilih seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. dengan jumlah elemen 41450 elemen.



Gambar 9. Konvergen studi geometri *slip yoke* untuk lokal mesh

Untuk memastikan keandalan hasil simulasi, evaluasi kualitas mesh juga dilakukan pada model akhir dengan ukuran global mesh 6 mm dan local mesh *refinement* 1,5 mm pada area kritis (C–C). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai *Jacobian Ratio* berada pada rentang 1,00–6,5 tanpa ditemukannya elemen bernilai negatif yang mengindikasikan distorsi elemen yang minimal. Sementara itu, nilai *Aspect Ratio* berada pada rentang 1,04–4,8 dan masih memenuhi batas rekomendasi ($AR < 5$) untuk menjaga akurasi numerik berdasarkan buku (Shigley's Mecha Nical Engineering Design).

Distribusi elemen didominasi oleh nilai yang mendekati kondisi ideal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10 (a) dan 10 (b), di mana nilai *Jacobian Ratio* terkonsentrasi di sekitar 1 dan *Aspect Ratio* berada pada rentang 1–3. Hal ini menunjukkan bahwa mesh yang digunakan memiliki kualitas yang baik dan layak untuk analisis berbasis Metode Elemen Hingga. Dengan demikian, mesh yang digunakan telah memenuhi kriteria konvergensi dan kualitas elemen sehingga hasil simulasi yang diperoleh dapat dianggap akurat dan dapat diandalkan.



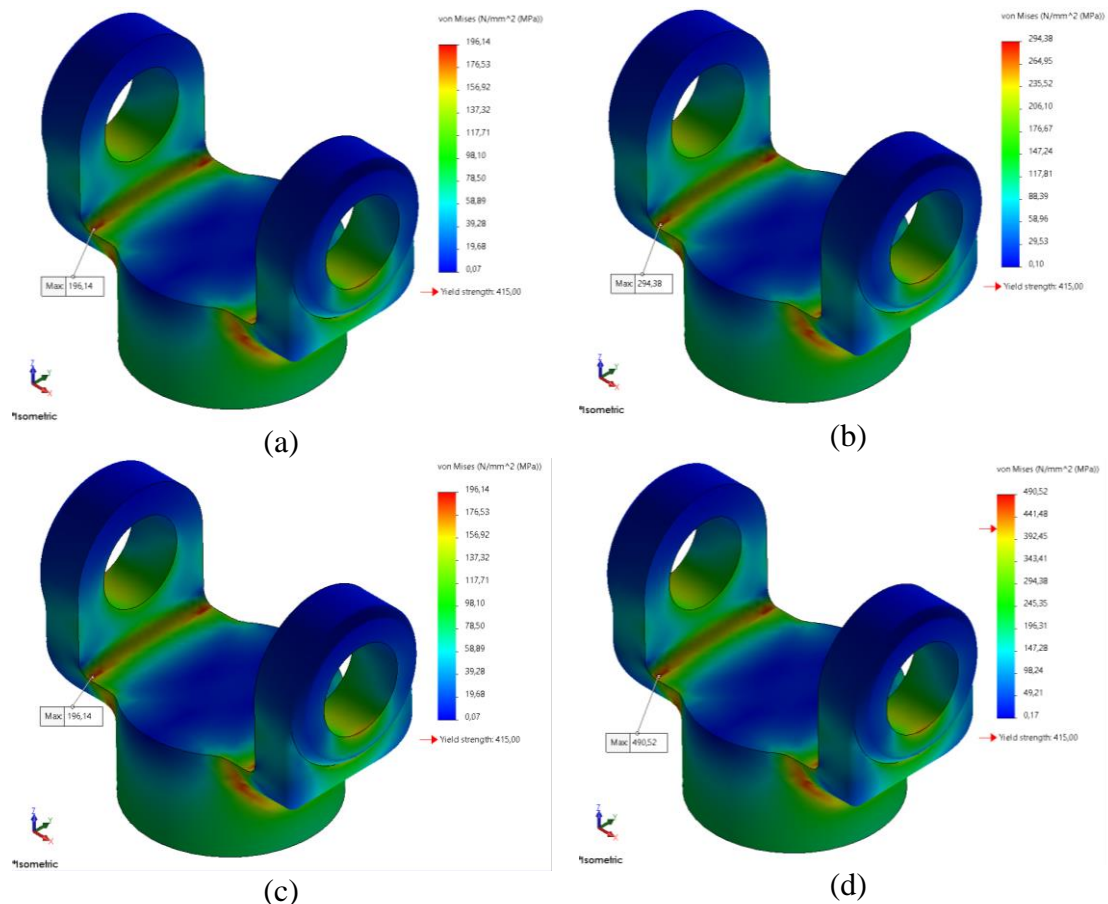
Gambar 10. Evaluasi kualitas *mesh* : (a). distribusi *Jacobian Ratio*, (b). distribusi *Aspect Ratio*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah seluruh parameter simulasi ditentukan kemudian proses analisis dijalankan untuk memperoleh gambaran dan nilai distribusi tegangan pada komponen *slip yoke*. Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga menunjukkan distribusi tegangan Von Mises pada seluruh bagian komponen *slip yoke*. Tegangan maksimum teridentifikasi berada pada area sekitar lengan fork slip york sesuai dengan lokasi *section* penampang kritis (C–C). Gambar 11. (a), (b), (c) dan (d) menunjukkan tegangan maksimum pada slip york untuk masing-masing beban 4, 6, 8 dan 10 ton.

Pada Gambar 11 terlihat bahwa konsentrasi tegangan maksimum terlokasi pada area transisi antara lengan yoke dan badan utama (penampang C–C). Zona ini ditunjukkan dengan distribusi warna merah–kuning yang menandakan tegangan tinggi. Fenomena ini menunjukkan kesesuaian yang kuat dengan kondisi kerusakan aktual pada Gambar 2 dan Gambar 3, di mana kegagalan berupa patahan dan deformasi plastis terjadi pada bagian lengan yoke. Pola patahan yang terlihat mengindikasikan adanya konsentrasi tegangan yang tinggi dan kemungkinan diawali oleh retak mikro akibat pembebanan siklik yang kemudian berkembang menjadi patahan total. Selain itu, deformasi plastis yang terlihat pada Gambar 3 memperkuat bahwa material telah melewati batas elastisnya sebelum mengalami kegagalan. Fenomena ini dapat dijelaskan secara teoritis bahwa lokasi penampang C–C menjadi area kritis karena adanya perubahan geometri yang signifikan, khususnya pada transisi antara badan utama dan lengan yoke. Dalam teori mekanika teknik, perubahan luas penampang yang drastis serta adanya radius fillet yang kecil dapat menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan (*stress concentration*).

Selain itu, pada komponen slip yoke, penampang C-C juga merupakan area yang menerima kombinasi beban kompleks, yaitu torsi, gaya aksial, dan kemungkinan bending akibat misalignment poros. Kombinasi pembebanan ini memperparah kondisi tegangan pada area tersebut sehingga menjadi titik awal inisiasi retak. Dengan demikian, secara teoritis dan numerik, penampang C-C merupakan lokasi yang paling rentan terhadap kegagalan karena dipengaruhi oleh kombinasi faktor geometri dan pembebanan. Kemudian hasil simulasi FEM menunjukkan besar nilai tegangan maksimum Von Mises masing-masing beban 4 ton, 6 ton dan 8 ton memperoleh nilai sebesar 196,14 Mpa, 331 Mpa dan 392,40 MPa. Nilai ini masih dikategorikan aman karena masih lebih rendah dari nilai *yield strength material slip yoke*.



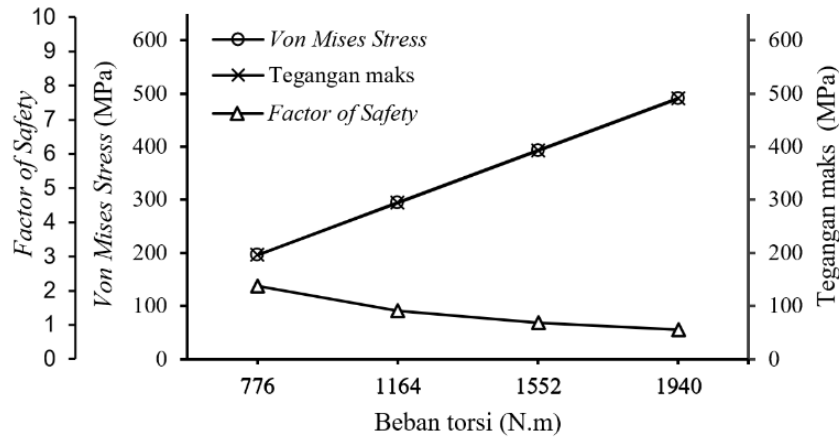
Gambar 11. Hasil simulasi tegangan Von Mises, (a). 4 ton, (b). 6 ton, (c). 8 ton dan (d). 10 ton

Sedangkan pada beban 10 ton, nilai tegangan Von Mises menunjukkan nilai sebesar 490,52 MPa. Nilai ini sudah melewati batas elastis material dengan nilai kekuatan luluhnya adalah 415 MPa. Kondisi ini mengindikasikan bahwa material telah memasuki fase deformasi plastis yang berpotensi menyebabkan kegagalan permanen pada komponen slip yoke. Sehingga pada 10 ton bisa dikategorikan tidak aman lagi untuk kendaraan truk sawit. Dengan demikian, hasil simulasi tidak hanya menunjukkan nilai tegangan maksimum, tetapi juga mampu memprediksi lokasi kegagalan yang konsisten dengan kondisi aktual di lapangan, sehingga memvalidasi pendekatan berbasis Metode Elemen Hingga (FEM) yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 2 menunjukkan detail nilai tegangan maksimum yang diperoleh dari perhitungan analitis dan simulasi FEM serta nilai FOS (factor of safety) untuk masing-masing beban yaitu 4, 6, 8, dan 10 ton.

Tabel 2. Nilai tegangan maksimum dan FOS minimum pada beban 4, 6, 8 dan 10 ton.

Beban sawit (N)	Beban torsi (Nm)	Tegangan maks analitis (MPa)	Tegangan maks FEM (MPa)	Selisih (%)	FOS
4	776	196,55	196,14	0,21	2,12
6	1164	294,83	294,38	0,15	1,41
8	1552	393,11	392,40	0,18	1,06
10	1940	491,39	490,52	0,18	0,85



Gambar 12. Grafik nilai tegangan maksimum analitis dan simulasi serta FOS

Kemudian dilihat dari grafik pada Gambar 12. bahwa seiring dengan peningkatan beban torsi maka nilai tegangan *Von Mises* maksimum pada area sekitar lengan *slip yoke* juga mengalami peningkatan secara linier. Hal ini menunjukkan bahwa respon struktur masih berada dalam kondisi elastis linier. Pada hasil simulasi FOS menunjukkan kebalikannya dimana nilainya menurun seiring dengan peningkatan beban torsi yang diberikan. Nilai FOS yang semakin rendah tersebut menunjukkan bahwa bagian yang mengalami tegangan *Von Mises* maksimal tersebut merupakan lokasi paling kritis terhadap kemungkinan kegagalan struktur.

Untuk memvalidasi hasil simulasi, dilakukan perbandingan antara tegangan yang diperoleh dari metode elemen hingga dengan hasil perhitungan analitis. Persentase selisih antara hasil perhitungan tegangan maksimum simulasi FEM dan analitis dihitung menggunakan persentase deviasi. Hasil perhitungan persentase selisih ditunjukkan pada Tabel 2.

$$\% \text{ error} = \frac{|\sigma_{FEM} - \sigma_{analitis}|}{\sigma_{analitis}} \times 100 \% \quad (9)$$

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai tegangan dari simulasi Metode Elemen Hingga (FEM) sedikit lebih rendah dibandingkan perhitungan analitis, dengan selisih relatif kecil (<1%). Perbedaan ini disebabkan oleh pendekatan analitis yang menggunakan asumsi geometri ideal dan distribusi tegangan seragam sehingga cenderung menghasilkan nilai konservatif sedangkan FEM mampu merepresentasikan geometri aktual dan kondisi batas yang lebih kompleks. Proses diskretisasi melalui mesh dalam FEM juga memungkinkan redistribusi tegangan secara numerik sehingga nilai puncak tidak setinggi hasil analitis. Selain itu, penyederhanaan geometri dalam pemodelan turut mengurangi efek konsentrasi tegangan lokal. Dengan demikian, selisih kecil tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki akurasi yang baik dan masih berada dalam batas toleransi analisis rekayasa.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, penampang kritis (C-C) diidentifikasi sebagai lokasi kritis yang menimbulkan konsentrasi tegangan. Perhitungan analitis menunjukkan bahwa tegangan meningkat secara linear terhadap beban yaitu 196.55 MPa, 294.83 MPa, 393.11 MPa dan 491.39 MPa masing-masing untuk beban 4 ton, 6 ton, 8 ton dan 10 ton. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak Solidworks menunjukkan nilai yang sedikit lebih rendah namun memiliki tren yang sama yaitu 196.14 MPa, 294.38 MPa, 392.40 MPa dan 490.52 MPa. Tingginya tegangan pada penampang kritis (C-C) disebabkan oleh diskontinuitas geometri dan perubahan arah distribusi gaya yang menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan. Hal ini sejalan dengan salah satu fenomena kegagalan komponen *slip yoke* sehingga penampang kritis (C-C) memiliki potensis tinggi sebagai lokasi kegagalan. Beban operasional kendaraan sebaiknya dijaga kisaran 6-7,5 ton sesuai aturan standar pabrik karena pada rentang tersebut tegangan masih berada pada kondisi yang relatif aman. Namun selain disebabkan oleh konsentrasi tegangan pada penampang C-C, kegagalan pada komponen yoke juga berpotensi dipengaruhi oleh fenomena kelelahan material (*fatigue*) akibat pembebanan berulang selama operasi. Beban siklik yang terjadi secara terus-menerus dapat memicu inisiasi retak mikro yang kemudian berkembang hingga menyebabkan patah, meskipun tegangan kerja masih berada di bawah kekuatan statik material. Dengan demikian, hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi antara faktor geometri, pembebanan dinamis dan karakteristik material menjadi penyebab utama kegagalan serta menunjukkan bahwa pendekatan FEM efektif dalam memprediksi lokasi dan mekanisme kegagalan sebagai dasar untuk optimasi desain dan strategi perawatan komponen.

REFERENCES

- Budynas, R. G., & Keith, J. (2020). *Mechanical Engineering Design*.
- Cardoso, A. S. M., Pardal, J. M., Chales, R., Martins, C. H., Silva, M. M., Tavares, S. S. M., Pedroza, B. C., & Barbosa, C. (2022). Fatigue resistance performance of universal cardan joint for automotive application. *Engineering Failure Analysis*, *135*, 106128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106128>
- Deshpande, G. R., & Wallibai, A. (2021). *Design and Optimization of Knuckle Joint Used in Automotive Steering System*. www.ijedr.org
- Firmansyah, M. F. I., Arifin, A. A., Marliana, E., & Ulum, M. (2025). FAILURE ANALYSIS ON LIGHT DUTY PROPELLER SHAFT USING FINITE ELEMENT METHOD. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, *10(1)*, 103–111. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v10i1.712>
- Gillespie, T. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. <https://doi.org/10.4271/9781468601770>
- Hou, N., Ding, N., Qu, S., Guo, W., Liu, L., Xu, N., Tian, L., Xu, H., Chen, X., Zaïri, F., & Lawrence Wu, C. M. (2022). Failure modes, mechanisms and causes of shafts in mechanical equipment. In *Engineering Failure Analysis* (Vol. 136). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106216>
- <https://ricardochin.com/>. (2026, February 26). *The Manual Gear Train Blueprint #*. <https://Ricardochin.Com/docs/design/manualtransmission-design/>
- Madenci, E., & Guven, I. (2015). The finite element method and applications in engineering using ANSYS®, second edition. In *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS, Second Edition*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8>

- Marijančević, A., Braut, S., Žigulić, R., & Skoblar, A. (2025). Fatigue Assessment of Marine Propulsion Shafting Due to Cyclic Torsional and Bending Stresses. *Machines*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/machines13050384>
- Mendes, I., Lopes, J. H., Almas, E. M., & Reis, L. (2024). Failure Analysis of the Half-Shafts Belonging to a Three-Wheeled Electric Vehicle. *Metals*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/met14060727>
- Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation. (2018). *Canter FE 74 HD Brochure*. Jakarta, Indonesia. (n.d.).
- MODEL / VEHICLE TYPE 3S13. (n.d.).
- Rajesh Kannah/, T. (2025). *ANALYSIS OF CONNECTING ROD IN FEA FOR VARIOUS MATERIAL UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITION* (Vol. 12). JETIR. www.jetir.org
- Ramadhoni, T. S., Rifa'i, A. I., Anwar, Z., Hidayati, B., Sumarna, H., Okviyanto, T., & Sampurno, R. D. (2024). Static Analysis of Electric Vehicle Prototype Frame. *International Journal of Mechanics, Energy Engineering and Applied Science (IJMEAS)*, 2(1), 26–35. <https://doi.org/10.53893/ijmeas.v2i1.242>
- ŞEN, O., & KAHYALAR, M. C. (2020). Structural Analysis of Yoke Part in Design of Driveshaft. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 4(4), 248–252. <https://doi.org/10.30939/ijastech..754821>
- SERVICE MANUAL 2012 Model FOREWORD. (n.d.).
- Setiawan, B., Suhendra, S., Nopriandy, F., & Apriani, W. (2023). Uji Performansi Alat Angkut TBS Kelapa Sawit Menggunakan Penggerak Engine. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 12(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v12i2.2454>
- Shigley's Mechanical Engineering Design. (n.d.).
- Sitthipong, S., Towatana, P., & Sitticharoenchai, A. (2017). Failure analysis of metal alloy propeller shafts. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 6491–6494. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.158>
- Tathe, M. P. G., & Bajaj, D. S. (n.d.). *Review on Failure Analysis of yoke assembly of a transmission drive shaft subjected to Torsion and Shear*. Retrieved www.ijert.org
- Wang, W., Wu, Q., Chi, W., & Wang, C. (2025). Failure analysis and residual life assessment of forged coupler yokes. *Engineering Failure Analysis*, 169, 109143. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109143>
- Yanti, I., Effendi, Z., & Rangkuti, I. U. P. (2024). Pengaruh Laju Massa Uap Terhadap Efisiensi Kerja Turbin Uap Pada Pabrik Kelapa Sawit Kapasitas 50 Ton/Jam. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 13(1). <https://doi.org/10.24127/trb.v13i1.3301>
- Yu, W., Yu, Y., Shi, F., Zhang, C., & Tu, W. (2025). Fatigue crack propagation analysis considering the dynamic crack-load coupling effect. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21113-3>