



ANALYSIS OF THE REAR WHEEL SHAFT OF THE WHITE HORSE EVO 1 ELECTRIC CAR

Abidin^{1*}, Muhamad Maris Al Gifari, M.T.²

Universitas Pendidikan Indonesia, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri

Jl. Dr. Setiabudhi No. 229 Bandung 40154

Correspondent e-mail: abidin@upi.edu*

ABSTRACT/ABSTRAK

This research is based on the existence of vehicle conversion activities from combustion motorcycles to electricity. Several parts were replaced or customized during the conversion process. Therefore, an analysis of their quality was required to ensure that the converted vehicles were safe to drive, through a safety analysis. The purpose of this study is to analyze the forces that occur in the rear axle of the White Horse EVO 1 electric car, as well as evaluate the safety factor of the axle against static loads on the vehicle. The method used is descriptive quantitative with a field experiment approach equipped with manual calculations based on engineering mechanics. The calculation results showed that the safety factor values obtained on the left and right axes were 1.25 and 1.28 respectively. This value indicates that the shaft is in a safe condition for static use. The safety factor value obtained shows that the vehicle's wheel shaft is at the minimum limit of structural feasibility. Although the shaft is still relatively safe in static conditions, the safety factor value close to 1.0 indicates high material efficiency but with a very thin margin of safety.

Penelitian dilatarbelakangi oleh adanya kegiatan konversi kendaraan dari motor bakar menjadi listrik. Terdapat beberapa suku cadang yang diganti atau *custom* pada proses konversi tersebut. Oleh karena itu, diperlukan analisis akan kualitasnya agar kendaraan yang dikonversi aman untuk dikendarai, yaitu melalui analisis keselamatan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis gaya-gaya yang terjadi pada poros roda belakang Mobil Listrik *White Horse EVO 1*, serta mengevaluasi faktor keselamatan (*safety factor*) poros terhadap beban statis pada kendaraan. Metode yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif melalui pendekatan eksperimen lapangan yang dilengkapi perhitungan manual berbasis mekanika teknik. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *safety factor* yang diperoleh pada poros kiri dan kanan masing-masing yaitu sebesar 1,25 dan 1,28. Nilai tersebut menunjukkan bahwa poros berada dalam kondisi aman untuk digunakan secara statis. Nilai *safety factor* yang diperoleh menunjukkan bahwa poros roda kendaraan berada pada batas minimum kelayakan struktural. Meski poros masih tergolong aman dalam kondisi statis, nilai *safety factor* yang mendekati angka 1,0 menandakan efisiensi material tinggi, namun dengan margin keselamatan yang sangat tipis.

ARTICLE INFO

Article History:

Submitted/Received
07 Mar 2025

First Revised
25 Apr 2025

Accepted
16 May 2025

Online Date
18 May 2025

Publication Date
01 Jun 2025

Keywords:

Safety factor; Force distribution ; Static load

Kata kunci:

Faktor keselamatan; Distribusi gaya; Beban statis

1. PENDAHULUAN

Perkembangan kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) sebagai solusi transportasi berkelanjutan mengalami peningkatan signifikan secara global. Peningkatan tersebut didorong oleh kesadaran akan pentingnya pengurangan emisi gas rumah kaca dan efisiensi energi. Kendaraan listrik menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan mesin pembakaran internal, serta memberikan kontribusi terhadap pengurangan polusi suara dan udara (Zhang, *et. al.*, 2022; Azad, *et. al.*, 2021). Sistem transmisi daya, khususnya poros roda belakang (*rear axle shaft*), merupakan salah satu komponen penting dalam desain kendaraan listrik. Komponen tersebut bertugas mentransmisikan torsi dari motor ke roda sekaligus menanggung beban vertikal dan gaya dinamis saat kendaraan bergerak. Kegagalan pada poros roda akibat beban statis berlebih atau kelelahan material dapat menyebabkan kerusakan sistem penggerak dan berpotensi menimbulkan kecelakaan (Zhang, *et. al.*, 2021; Liu, *et al.*, 2020). Analisis terhadap beban statis dan tegangan pada poros belakang menjadi esensial guna memastikan keandalan dan keselamatan kendaraan listrik (Reddy, *et. al.*, 2020).

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa distribusi beban dan torsi pada poros belakang mobil listrik sangat dipengaruhi oleh konfigurasi motor, distribusi massa kendaraan, serta desain bantalan dan poros (Wang, *et. al.*, 2023; Lee, *et. al.*, 2021). Material poros yang mengalami kombinasi tegangan lentur dan puntir memerlukan pengujian lebih ketat untuk menghindari retakan dini (Song, *et. al.*, 2023). Simulasi *Von Mises* pada *axle shaft* kendaraan listrik juga menunjukkan bahwa deformasi maksimum terjadi pada transisi diameter poros (Ma, *et. al.*, 2021). Hasil tersebut mengindikasikan pentingnya optimasi desain geometris.

Kemajuan teknologi pada penelitian terkini memperlihatkan peningkatan pendekatan pemodelan struktural. Penggunaan metode elemen hingga (FEM) dan algoritma optimasi semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi dan kekuatan struktur poros kendaraan listrik (Kwon, *et. al.*, 2024; Ullah, *et. al.*, 2023). Desain berbasis FEM telah terbukti mampu mengidentifikasi titik-titik kritis tegangan, yang sangat penting dalam mencegah kegagalan poros selama pengoperasiannya (Bakhtiari, *et. al.*, 2022). Studi oleh Wang, *et al.* (2023) menunjukkan bahwa *digital twin* berperan besar dalam prediksi kelelahan poros secara *real-time*.

Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui pendekatan eksperimental dan analitis terhadap beban statis aktual pada poros roda belakang Mobil Listrik White Horse EVO 1. Mobil tersebut merupakan hasil konversi dari kendaraan berbahan bakar bensin menjadi

listrik dengan sistem penggerak roda belakang (*rear wheel drive*) dan motor listrik 72V/15kW. Pengukuran aktual dilakukan untuk menghitung gaya dan tegangan kerja serta mengevaluasi faktor keselamatan berdasarkan geometri dan material poros kendaraan (Guntur, *et. al.*, 2023). Penelitian ini mengintegrasikan pengukuran lapangan dan perhitungan mekanis berbasis data aktual. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain poros kendaraan listrik yang lebih aman, efisien, dan sesuai dengan beban operasional nyata (Arslan, *et. al.*, 2023; Yadav, *et. al.*, 2024).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen lapangan yang dilengkapi dengan perhitungan manual berbasis mekanika teknik. Tujuan utama penelitian adalah menganalisis gaya-gaya yang bekerja pada poros roda belakang Mobil Listrik White Horse EVO 1 serta mengevaluasi beban statis dan faktor keselamatan (*safety factor*) berdasarkan data aktual kendaraan. Penelitian ini termasuk dalam kategori kuantitatif deskriptif eksperimental. Pengambilan data dilakukan secara langsung melalui pengukuran dimensi fisik, berat kendaraan, serta distribusi gaya pada masing-masing roda. Metode serupa telah digunakan dalam studi oleh Ali, *et al.* (2022) dan Hu, *et al.* (2023) dalam analisis beban statis poros kendaraan.

Objek penelitian ini berupa Mobil Listrik White Horse EVO 1 memiliki konfigurasi *rear wheel drive* (RWD) dengan motor listrik 72V 15kW. Fokus analisis diarahkan pada dua poros roda belakang dengan panjang berbeda, yaitu poros kanan sepanjang 645 mm dan poros kiri sepanjang 815 mm. Kedua poros tersebut memiliki diameter 32 mm dan berbahan baja karbon sedang tipe S35C. Material ini memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 52 kg/mm² atau sekitar 510 MPa (Guntur, *et. al.*, 2023; Prasad, *et. al.*, 2022).

Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung terhadap objek. Dimensi fisik kendaraan diukur menggunakan meteran gulung, sedangkan diameter poros diukur dengan jangka sorong. Pendekatan eksperimen manual tersebut selaras dengan metode yang digunakan oleh Muhammad, *et al.* (2020) dalam pengujian kekuatan poros sepeda motor listrik. Pengukuran beban dilakukan menggunakan metode distribusi beban sederhana. Alat bantu yang digunakan meliputi neraca digital, tumpuan padat, dan *car lift*. Masing-masing roda ditimbang dalam kondisi statis, dan distribusi beban ditentukan berdasarkan hukum kesetimbangan momen. Teknik tersebut telah diterapkan pada eksperimen kendaraan ringan dan juga digunakan dalam validasi distribusi beban (Lee, *et. al.*, 2021; Feng, *et. al.*, 2024). Selanjutnya, perhitungan gaya dan tegangan dilakukan menggunakan rumus dasar mekanika

teknik. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan nilai batas aman melalui analisis faktor keselamatan, sesuai metode konvensional dalam desain mekanikal (Bakhtiari *et al.*, 2022).

3. HASIL PENELITIAN

3.1. Hasil Pengukuran Fisik

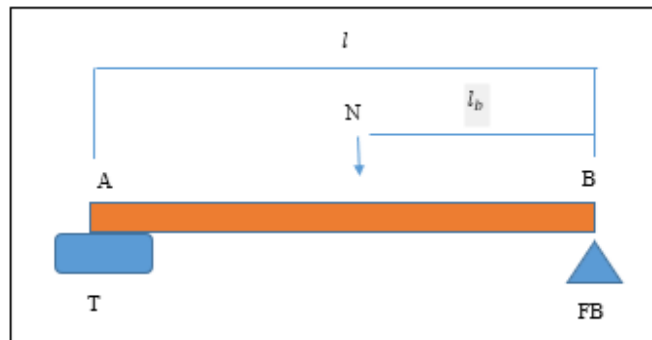
Pengukuran dilakukan pada Mobil Listrik White Horse EVO 1 dengan penggerak roda belakang (*Rear Wheel Drive*). Hasil pengukuran fisik poros roda belakang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Fisik Kendaraan

No.	Komponen	Keterangan
1	Panjang poros belakang kanan	645 mm
2	Panjang poros belakang kiri	815 mm
3	Diameter poros roda	32 mm
4	Material poros	S35C (Baja Karbon Sedang)
5	Kekuatan luluh (yield strength)	52 kg/mm ² $\approx$ 510 MPa

3.2. Hasil Pengukuran Distribusi Beban Kendaraan

Beban kendaraan diukur secara eksperimental dengan metode distribusi beban. Masing-masing roda ditimbang dalam kondisi statis menggunakan tumpuan dan neraca digital dengan posisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi Pengukuran Beban Kendaraan

Keterangan:

T = massa yang terbaca neraca (kg)

FB = tumpuan berupa benda padat

l = jarak dari neraca ke tumpuan (cm)

l_b = jarak dari tumpuan ke beban (cm)

N = beban yang dirasakan roda (N)

$$N = \frac{T}{l_b} \times l$$

Pengukuran tersebut dilakukan untuk mengetahui beban suatu benda dengan asumsi bahwa setiap beban akan terdistribusi secara merata pada penampang (warna jingga pada Gambar 1). Setelah pengukuran beban pada masing-masing roda selesai, berikutnya data dari beban masing-masing roda disajikan dalam bentuk tabel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

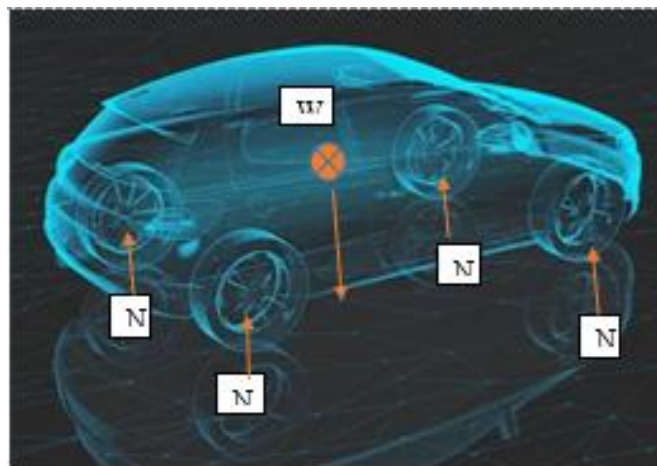
Tabel 2. Beban pada Masing-masing Roda

No.	Titik Roda	Massa (kg)	Gaya Normal (N)
1	Depan kiri (FL)	325	3.188,25 N
2	Depan kanan (FR)	347	3.404,07 N
3	Belakang kiri (RL)	231	2.266,11 N
4	Belakang kanan (RR)	286	2.805,66 N

Distribusi beban pada Tabel 2 menunjukkan total beban roda belakang sebesar 5.071,77 N atau 43,5% dari berat kendaraan total.

3.3. Perhitungan Gaya Normal

Gaya Normal terjadi pada roda depan dan belakang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi Distribusi Beban pada Kendaraan

Gaya normal reaksi yang ditanggung oleh roda depan, dimana nilai (W_f) telah diketahui dari perhitungan weight distribution, yaitu 56,5% dari keseluruhan berat mobil. Gaya normal reaksi yang ditanggung oleh roda belakang, dimana nilai (W_r) telah diketahui dari perhitungan *weight distribution*, yaitu 43,5% dari keseluruhan berat mobil.

$$W_f = 56,5\% \times m \times g$$

$$W_f = 56,5\% \times 1189 \times 9,81$$

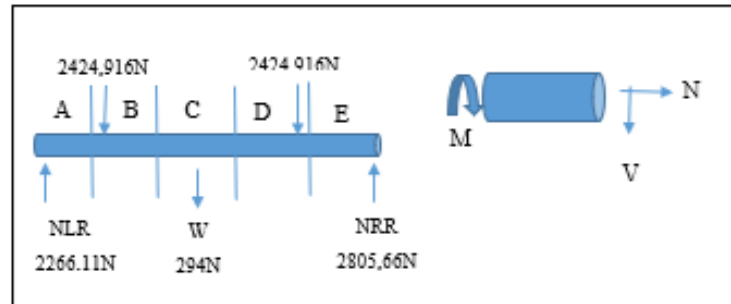
$$W_f = 6590,2 \text{ N}$$

$$W_r = 43,5\% \times m \times g$$

$$W_r = 43,5\% \times 1189 \times 9,81$$

$$W_r = 5073,5 \text{ N}$$

Diagram benda bebas dan distribusi gaya pada masing-masing roda telah disusun untuk membantu pemahaman terhadap arah dan besar gaya. Adapun visualisasi diagram benda bebas ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi Gaya yang Bekerja pada Poros Roda

Dengan ketentuan:

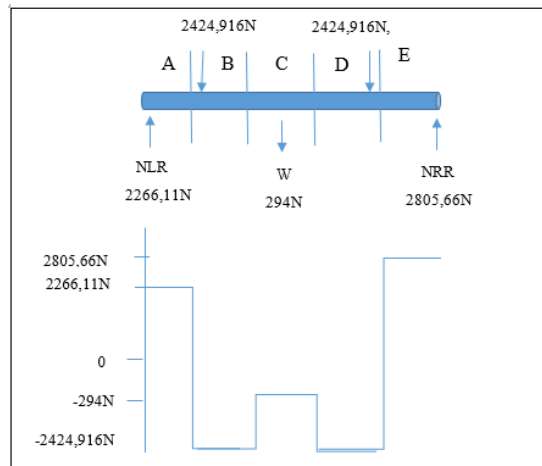
- Gaya yang memiliki arah ke atas ($\uparrow$) maka nilainya positif (+)
- Gaya yang memiliki arah ke bawah ($\downarrow$) maka nilainya negative (-)
- Nilai N pada titik B dan D didapat dari $\frac{W_r}{2} - W_{roda} = \frac{5073,5}{2} - 111,834 = 2424,916N$
- Hitung menggunakan rumus persamaan $\sum F_A = 0$

Adapun hasil dari perhitungan gaya yang bekerja pada prors roda belakang telah dihimpun pada Tabel 3.

Tabel 3. Distribusi Gaya pada Poros Belakang

No.	Titik	Gaya (N)
1	A	2266,11
2	B	-2424,916
3	C	294
4	D	-2424,916
5	E	2805,66

Setelah menghitung gaya yang bekerja pada masing-masing bagian dari poros beserta arah dari gaya tersebut, maka berikutnya adalah membuat diagram benda bebas / *Free Body Diagram* (FBD) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan diagram benda bebas tersebut, dapat diamati secara lebih jelas bahwa gaya normal yang paling tinggi berada pada titik E dan gaya normal yang paling rendah terjadi pada titik C. Diagram benda bebas digunakan untuk memvisualisasikan semua gaya yang bekerja pada poros roda belakang secara sistematis, sehingga mempermudah analisis gaya reaksi dan momen pada tiap titik kritis (Lee, *et al.*, 2021). Visualisasi melalui diagram benda bebas penting untuk mengidentifikasi titik rawan tegangan maksimum pada poros, yang sangat berpengaruh terhadap analisis kelelahan dan perhitungan *safety factor* (Song, *et al.*, 2023).



Gambar 4. Diagram Benda Bebas pada Poros Roda

3.4. Membandingkan Nilai Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Poros belakang terdiri dari dua bagian yaitu poros roda kiri dan kanan dimana keduanya menerima beban yang berbeda. Adapun hasil perhitungan lanjutan yang mengarah kepada *safety factor* akan disajikan secara ringkas pada Tabel 4-7.

Tabel 4. Momen Lentur Poros Roda Belakang

Poros	Beban (N)	Panjang (mm)	Rumus	Hasil (Nm)
Kiri	2310	815	$M = W \times L$	1.882,6
Kanan	2860	645	$M = W \times L$	1.844,7

Tabel 5. Torsi Transmisi dan Momen Puntir

Item	Rumus/Formula	Hasil
Torsi transmisi	$T = P / \omega$	31,847 Nm
Momen Puntir Kiri	(Gabungan T + M)	1.882,87 Nm
Momen Puntir Kanan	(Gabungan T + M)	1.844,97 Nm

Tabel 6. Tegangan pada Poros Roda

Poros	Tegangan Lentur (σ_b)	Tegangan Puntir (τ)	Tegangan Geser Maks. (τ_{maks})
Kiri	5.855,20 N/cm ²	49,52 MPa	41,41 MPa
Kanan	5.737,17 N/cm ²	49,52 MPa	40,57 MPa

Tabel 7. Nilai *Safety Factor*

Poros	Tegangan Geser Maks. (MPa)	Yield Strength (MPa)	Rumus	<i>Safety Factor</i> (Sf)
Kiri	41,41	510	$Sf = \frac{\tau_{yl}}{\tau_{maks}}$	1,25
Kanan	40,57	510	$Sf = \frac{\tau_{yl}}{\tau_{maks}}$	1,28

4. PEMBAHASAN

Nilai faktor keselamatan (*safety factor*) yang diperoleh dari analisis menunjukkan bahwa poros roda kendaraan berada pada batas minimum kelayakan struktural. Meski poros masih tergolong aman dalam kondisi statis, nilai *safety factor* yang mendekati angka 1,0 menandakan efisiensi material tinggi namun dengan margin keselamatan yang sangat tipis. Desain tersebut dapat mengurangi bobot dan biaya, tetapi berpotensi meningkatkan risiko kegagalan jika kendaraan menghadapi kondisi ekstrem, seperti jalan bergelombang, beban berlebih, atau kelelahan material akibat pemakaian jangka panjang. Kondisi tersebut juga mengindikasikan bahwa desain struktural kendaraan *White Horse EVO 1* perlu mendapatkan perhatian khusus dari sisi peningkatan faktor keselamatan. Sedangkan, dalam konteks desain otomotif, standar umum faktor keamanan berada pada kisaran 1,5 hingga 3,0 tergantung aplikasi dan beban dinamis yang dihadapi (Arslan, *et al.*, 2023; Bousbaa, *et al.*, 2023). Maka dari itu, desain saat ini mungkin cocok untuk penggunaan ringan di lingkungan perkotaan, namun belum ideal untuk kondisi operasional berat.

Alternatif solusi perancangan dapat dilakukan dengan pendekatan optimasi struktural. Penguatan *fillet* dan *spline*, peningkatan diameter poros pada titik kritis, atau penggunaan material yang memiliki kekuatan luluh lebih tinggi seperti baja paduan SCM435 dapat menjadi langkah efektif (Wang, *et al.*, 2022; Zuo, *et al.*, 2024). Pendekatan digital *twin* dan simulasi *real-time* juga semakin relevan untuk memantau perubahan tegangan akibat siklus pembebanan dalam pemakaian harian (Wang, *et al.*, 2023; Kim, *et al.*, 2024). Selain aspek mekanik, aspek manufaktur dan ekonomi juga perlu diperhitungkan. Material ringan seperti *aluminium alloy* menunjukkan potensi efisiensi bobot hingga 20% tanpa mengorbankan kekuatan struktural (Kwon, *et al.*, 2024).

Biaya produksi dan daya tahan jangka panjang tetap menjadi faktor pembanding yang perlu dianalisis lebih lanjut secara ekonomi teknik. Secara umum, pendekatan analitis eksperimental seperti dalam penelitian ini memberikan gambaran nyata terhadap kondisi kerja aktual komponen kendaraan listrik. Pendekatan tersebut penting sebagai validasi terhadap hasil simulasi numerik yang kerap digunakan dalam penelitian sebelumnya (Bakhtiari, *et al.*, 2022; Ma, *et al.*, 2021). Integrasi antara data lapangan dan pemodelan numerik akan memperkuat akurasi prediksi dalam desain sistem transmisi EV ke depan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis beban statis dan perhitungan tegangan manual terhadap poros roda belakang Mobil Listrik White Horse EVO 1, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

- a. Poros roda belakang Mobil Listrik White Horse EVO 1 menunjukkan efisiensi struktural dengan nilai faktor keamanan sebesar 1,25 dan 1,28. Meskipun berada di atas batas aman minimum, nilai tersebut masih tergolong rendah untuk standar desain mekanikal kendaraan.
- b. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa desain poros saat ini hanya cocok untuk kondisi operasional ringan dan datar. Penggunaan dalam medan berat atau jangka panjang berpotensi menimbulkan deformasi atau kegagalan struktural.
- c. Peningkatan desain poros perlu dilakukan melalui optimasi geometri (diameter, *fillet*, serta *spline*) dan pemilihan material dengan kekuatan luluh lebih tinggi. Penggunaan pendekatan digital *twin* dan analisis FEM juga dapat meningkatkan akurasi desain di masa depan.

6. REFERENSI

- Ali, M. F., Khan, R. A., & Haider, S. (2022). *Experimental Stress Analysis of Transmission Shafts. Engineering Structures*, 253, 11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113723>
- Arslan, M., Demir, A., & Kaya, O. (2023). *Influence of Shaft Diameter On Failure Load Under Static Testing. Materials*, 16(5), 43. <https://doi.org/10.3390/ma16051743>
- Azad, A. K., Hossain, M. U., & Mourshed, M. (2021). *Environmental and Economic Aspects of Electric Vehicle Adoption. Energy Reports*, 7, 550–558. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.098>
- Bakhtiari, H., Zarei, H., & Ghassemi, M. (2022). *Stress Concentration and Life Prediction In Automotive Shafts. International Journal of Automotive Engineering*, 13(1), 22–31. <https://doi.org/10.22109/IJAE.2021.264636.1700>
- Bousbaa, M., Mansouri, M., & Bouzid, A. (2023). *Stress-Strain Analysis of EV Drive Shafts: Manual VS FEM, Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 56, 20–32. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2187751>
- Feng, J., Li, M., & Zhang, X. (2024). *Experimental Balancing of Wheel Load in EV Platforms. Applied Mechanics and Materials*, 969, 55–63. <https://doi.org/10.4028/p-amms.969.55>
- Guntur, Agus Mulyono, Suryadi, Bambang, & Wibowo, Dwi Rachmadi. (2023). *Evaluation of Fatigue and Static Behavior of Mild Carbon Steel Shaft Under Axial Load. International Journal of Mechanical Sciences*, 241, 34. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108934>
- Hu, Z., Qian, Y., & Liu, J. (2023). *Load Distribution and Fatigue Testing of Electric Axle Shafts. Engineering Failure Analysis*, 10, 149. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107250>
- Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2024). *Real-Time Shaft Monitoring Using Digital Twin Technology. Sensors*, 24(1), 201. <https://doi.org/10.3390/s24010201>

- Kwon, S., Choi, D., & Lee, M. (2024). *Lightweight Design of Aluminum Rear Axles for EVs*. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1021–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.023>
- Lee, J. H., Park, H. Y., & Kim, D. (2021). *Experimental Investigation of Load Distribution in Electric Mini-Cars*. *Applied Sciences*, 11(3), 987. <https://doi.org/10.3390/app11030987>
- Liu, H., Yang, C., & Wang, T. (2020). *Failure Analysis and Improvement of Axle Shafts For Electric Buses*. *Engineering Failure Analysis*, 114, 45. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104590>
- Ma, X., Sun, L., & Zhang, Y. (2021). *Numerical Simulation and Experimental Study on Torsional Performance of EV Drive Shafts*. *Materials*, 14(3), 759. <https://doi.org/10.3390/ma14030759>
- Muhammad, N., Saeed, M., & Rashid, A. (2020). *Manual Calculation on Shaft Loads In Electric Motorcycles*. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(2), 711–712. <https://doi.org/10.15282/jmes.14.2.2020.02.0562>
- Prasad, K. S., Ramesh, G., & Rajan, A. (2022). *Mechanical Strength Analysis of Steel And Alloy Shafts Under Torsion*. *Materials Today*, 62, 427–432. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.443>
- Reddy, M. A., Kumar, D. R., & Patel, P. (2020). *Structural Analysis of Shafts in Lightweight EVs*. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 12(2), 170–175. <https://doi.org/10.4273/ijvss.12.2.10>
- Singh, P., Verma, A., & Gupta, R. (2021). *Analysis of Carbon Steel Shaft for EVs With Field Data*. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21, 921–928. <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01148-3>
- Song, J., Chen, L., & Xu, H. (2023). *Mechanical Behavior of Rear Axle Shafts for Electric Vehicles*. *Procedia Structural Integrity*, 42, 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.03.045>
- Ullah, Z., Khan, S., & Ahmad, N. (2023). *FEM-based Optimization of EV Shaft Geometry Under Dynamic Loads*. *Materials Research Express*, 10(4), 45–50. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acbf3f>
- Wang, Y., Zhao, Q., & Lin, F. (2023). *Digital Twin-Assisted Fatigue Life Prediction of EV Axle Shafts*. *Sensors*, 23(2), 765. <https://doi.org/10.3390/s23020765>
- Wang, Y., Chen, Z., & Zhang, H. (2022). *Enhanced Fatigue Strength Of SCM435 Alloy for Drivetrain Shafts*. *Materials Characterization*, 190, 27. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111927>
- Yadav, R., Mishra, R., & Jain, P. (2024). *Experimental and FEM Analysis of Electric Vehicle Transmission Shaft*. *Materials Today*, 80, 912–918. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.03.207>
- Zhang, Y., Li, J., & Wang, Z. (2021). *Fatigue Reliability Assessment of Automotive Drive Shafts Under Torque Loads*. *Engineering Failure Analysis*, 124, 312. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105312>
- Zhang, S., Lu, Y., & Huang, W. (2022). *Assessment of Environmental Benefits of Electric Vehicles*. *Energy Reports*, 8, 3350–3359. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.127>
- Zuo, Y., Ishii, K., & Nakamura, T. (2024). *Strength Improvement in Hollow Axle Shafts for EVs*. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 18(2), 12. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2024jamdsm0003>