



Optimisasi Desain Rangka Bentor dengan Fokus pada Aspek Keselamatan Menggunakan Metode Pahl and Beitz

Muhamad Alfandi Aris¹✉, Muhammad Yasser Arafat¹, Idham Halid Lahay¹

⁽¹⁾Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo, Provinsi Gorontalo, Indonesia

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.54218

✉ Corresponding author:
[muhamadalfandiaris@gmail.com]

Article Info

Abstrak

Kata kunci:

Desain Rangka Bentor;

Pahl & Beitz;

Finite Element Analysis (FEA);

Penelitian ini mengembangkan desain rangka bentor yang lebih aman melalui pendekatan Research and Development (R&D) dan metode perancangan Pahl & Beitz. Data kebutuhan pengguna diperoleh melalui observasi dan kuesioner, yang menunjukkan kelemahan utama pada aspek keselamatan, terutama sistem penggereman, suspensi, dan ketidakseragaman struktur rangka. Berdasarkan hasil analisis kebutuhan, dirumuskan konfigurasi rangka baru dengan posisi penumpang di belakang, material AISI 1020, rem cakram depan, suspensi teleskopik, serta penggunaan diferensial sebagai sistem pemindah tenaga. Evaluasi kekuatan struktur dilakukan menggunakan Finite Element Analysis (FEA) dengan pembebanan statis sesuai kondisi operasional. Hasil simulasi menunjukkan tegangan maksimum 140 MPa, deformasi 0,49 mm, dan faktor keamanan 2,49, masih di bawah batas leleh material 351 MPa. Dengan demikian, desain yang diusulkan layak diterapkan karena menunjukkan peningkatan signifikan pada aspek kekuatan, stabilitas, dan keselamatan operasional.

Abstract

Keywords:

Bentor Frame Design;

Pahl & Beitz method;

FEA Simulation;

This study proposes a safer bentor frame design using a Research and Development (R&D) approach combined with the Pahl & Beitz design methodology. User requirements were gathered through field observations and questionnaires, revealing major safety issues in current bentor structures, including braking performance, suspension reliability, and dimensional inconsistency. A revised configuration was developed featuring a rear passenger layout, AISI 1020 frame material, front disc brake, telescopic suspension, and a differential drivetrain system. Structural performance was verified through static load simulation using Finite Element Analysis (FEA) based on real operating conditions. The results indicate a maximum stress of 140 MPa, displacement of 0.49 mm, and a safety factor of 2.49, remaining within the allowable limit of the material's 351 MPa yield strength. These findings demonstrate that the proposed design offers improved structural integrity,

stability, and operational safety, making it a viable alternative for practical implementation.

1. PENDAHULUAN

Bentor (becak bermotor) merupakan sarana transportasi roda tiga hasil perubahan desain sepeda motor pada umumnya, keberadaanya sangat populer karena dapat membantu kebutuhan transportasi masyarakat dengan biaya yang murah serta rute perjalanan yang fleksibel utamanya pada jarak pendek di kawasan perkotaan dan pinggiran kota yang membuat bentor banyak digunakan di berbagai wilayah Indonesia, khususnya di Provinsi Gorontalo (Katili & Tueno, 2020; Permana et al., 2023). Selain digunakan sebagai sarana transportasi harian seperti mengantar anak sekolah, berbelanja ke pasar, atau menuju tempat kerja, bentor juga menyediakan sumber mata pencaharian untuk pengemudinya pada sektor jasa transportasi, khususnya di daerah yang masih kekurangan layanan transportasi umum (Mege et al., 2023).

Walaupun bentor berkontribusi pada sektor sosial dan ekonomi yang cukup signifikan, pengoperasianya kerap kali mendapatkan permasalahan pada aspek keselamatan. Hasil dari beberapa studi mengemukakan bahwa sebagian besar bentor yang beroperasi tidak sepenuhnya memenuhi persyaratan teknis dan kelayakan jalan. Situasi ini merupakan gambaran dari terdapatnya kekurangan pada sistem rem, pencahayaan, serta komponen mekanis lainnya yang tidak sesuai dengan standar operasional kendaraan bermotor (Parlindungan, 2019). Ketidaksesuaian ini berpotensi meningkatkan risiko kecelakaan lalu lintas dan menjadikan bentor sebagai sarana transportasi yang memiliki tingkat keselamatan yang relatif rendah.

Dari segi aspek dinamika kendaraan, konstruksi kendaraan tiga roda secara umum memiliki kekurangan pada aspek stabilitas lateral dibandingkan kendaraan beroda empat. Distribusi massa yang tidak merata, baik pada konstruksi dua roda di depan maupun dua roda di belakang, mempengaruhi nilai static stability factor serta karakteristik perpindahan beban lateral. Hasilnya, kendaraan roda tiga cenderung lebih mudah kehilangan keseimbangan atau mengalami rollover, utamanya pada saat melakukan manuver menikung tajam atau berbelok serentak pada kecepatan tertentu (Ataei et al., 2017; Lamhalli, 2025; Permadi & Siswantoro, 2025; Rodríguez-Licea, 2021). Resiko ini semakin meningkat jika kendaraan memiliki pusat gravitasi yang relatif tinggi dan jarak antar roda yang terbatas (Kurniawan & Wailanduw, 2025a).

Pada perancangan kendaraan, rangka berfungsi sebagai struktur utama yang menentukan kekuatan, stabilitas, dan kenyamanan berkendara. Untuk memastikan kelayakan desain Finite Element Analysis (FEA) dapat dijadikan sebagai proses evaluasi yang berfungsi untuk menilai distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan sebagai acuan kemampuan rangka menahan beban statis maupun dinamis (Kurniawan & Wailanduw, 2025a; Permadi & Siswantoro, 2025; Yuzif et al., 2025). Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya mengemukakan bahwa pemilihan material dan konstruksi rangka yang tepat dapat meningkatkan kekuatan struktur dan mengurangi keseluruhan massa, sehingga aspek keselamatan dapat meningkat tanpa mengurangi efisiensi berat kendaraan (Kurniawan & Wailanduw, 2025b).

Tak hanya dari aspek teknis, aspek regulasi dan legalitas juga mempengaruhi tingkat keselamatan pengoperasian bentor. Berdasarkan aturan yang berlaku, kendaraan hasil modifikasi diwajibkan memenuhi persyaratan teknis dan kelaikan sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 108 Tahun 2017. Namun saat ini kebanyakan bentor beroperasi tanpa memenuhi ketentuan tersebut, sehingga berpotensi membahayakan pengemudi, penumpang, maupun pengguna jalan lainnya (Kusuma et al., 2023; Republik Indonesia, 2017).

Selain aspek teknis dan regulasi, faktor manusia turut berkontribusi cukup signifikan terhadap terjadinya kecelakaan lalu lintas pada bentor. Berdasarkan hasil penelitian Kaharu (2016) mengemukakan bahwa faktor dominan penyebab terjadinya kecelakaan dikarenakan kelelahan pengemudi, rendahnya disiplin berkendara, serta keterbatasan kemampuan dalam mengendalikan kendaraan. Dalam skala global, pengguna kendaraan roda tiga juga termasuk dalam vulnerable road users karena memiliki tingkat risiko cedera yang lebih tinggi apabila terlibat dalam kecelakaan lalu lintas (Rehman et al., 2025; Ur Rehman et al., 2025).

Pengembangan sistem kendali stabilitas aktif maupun penerapan pendekatan rekayasa desain yang lebih terstruktur adalah upaya yang telah dilakukan untuk meningkatkan keselamatan kendaraan roda tiga. Beberapa penelitian mempelajari penerapan mekanisme penyeimbang dinamis dan kontrol kemiringan (tilting control) sebagai strategi mengurangi risiko rollover saat kendaraan bermanuver (Kurniawan & Wailanduw, 2025a; Permadi & Siswantoro, 2025).

Pahl dan Beitz mengemukakan metode perancangan sistematis yang menyediakan kerangka kerja yang terstruktur dalam mamadukan aspek keselamatan, kualitas struktural, dan ergonomi sejak tahap awal

perancangan produk (Pahl & Beitz, 2007). Pendekatan ini sejalan dengan prinsip Human Centered Design yang menekankan pentingnya orientasi pada kebutuhan serta keterbatasan pengguna untuk menurunkan beban kerja pengemudi dan mengurangi kecelakaan akibat faktor manusia (Norman, 2013).

Berdasarkan berbagai permasalahan tersebut, mulai dari keterbatasan stabilitas dinamis, potensi kegagalan struktural akibat pembebanan berulang, hingga rendahnya kepatuhan terhadap regulasi teknis, dapat disimpulkan bahwa desain bensor yang ada saat ini masih memerlukan peningkatan signifikan pada aspek keselamatan dan struktural. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain rangka bensor dengan fokus pada aspek keselamatan menggunakan metode Pahl and Beitz, yaitu metode perancangan sistematis yang menekankan tahapan terstruktur mulai dari klarifikasi kebutuhan dan spesifikasi, pengembangan konsep, perancangan bentuk, hingga perancangan detail guna menghasilkan desain yang fungsional, aman, dan dapat dipertanggungjawabkan secara teknis. Metode ini juga memungkinkan proses evaluasi dan pemilihan alternatif desain berdasarkan kriteria tertentu secara objektif dan logis. Selanjutnya, penelitian ini mengevaluasi kinerja struktural desain usulan melalui analisis Finite Element Analysis (FEA) untuk menghasilkan rancangan rangka yang lebih aman, stabil, dan selaras dengan standar teknis kendaraan bermotor yang berlaku.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) untuk merumuskan desain rangka bensor yang fokus pada aspek keselamatan. Metode ini digunakan untuk memungkinkan proses pengembangan berlangsung terstruktur, mulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi hasil akhir.

Proses penelitian dimulai dengan analisis kebutuhan melalui observasi lapangan dan kajian kualitatif terhadap bensor yang beroperasi di Gorontalo. Pengguna dan pengemudi dilibatkan dalam pemetaan kekurangan serta kebutuhan desain rangka bensor saat ini melalui pengisian kuisioner skala Likert.

Hasil observasi dan kuisioner skala liker tersebut menjadi dasar dalam tahap perencanaan dan perumusan tugas, yang kemudian disusun ke dalam Product Design Specification (PDS) sebagai acuan prioritas kebutuhan desain, baik kebutuhan utama maupun tambahan.

Berdasarkan PDS, dilakukan pengembangan konsep dengan menghasilkan beberapa alternatif menggunakan analisis fungsi dan morfologi. Setiap alternatif dinilai melalui diagram Pugh untuk menentukan konsep yang paling potensial sesuai kriteria desain.

Konsep terpilih diolah menjadi desain teknis melalui pembuatan gambar berdimensi, sketsa bentuk, dan perancangan komponen dengan mempertimbangkan aspek keamanan, kemudahan fungsi, serta potensi risiko penggunaan. Tahap ini berlanjut pada perancangan detail berupa gambar kerja, spesifikasi material, dan informasi teknis pendukung.

Tahap akhir berupa deskripsi hasil pengembangan yang akan menjelaskan hasil desain rangka yang dihasilkan, perubahan struktural yang dicapai dibandingkan konstruksi awal, serta penilaian kecocokan desain baru dengan standar keselamatan yang menjadi acuan penelitian.

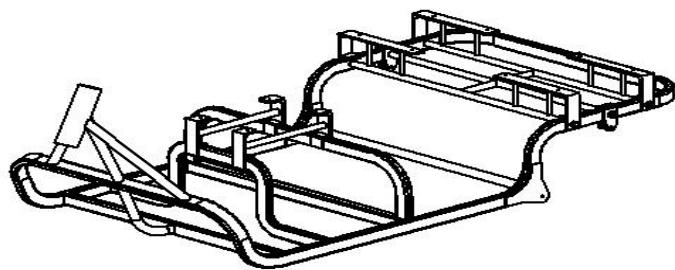
3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Hasil

Hasil observasi menunjukkan bahwa rangka bensor di Gorontalo tidak memiliki standar ukuran, dengan variasi dimensi pada lebar, panjang, dan tinggi; velg yang digunakan umumnya berukuran 17 inci. Sistem penggereman hanya mengandalkan rem belakang tanpa dukungan rem depan, sementara suspensi depan sering tidak berfungsi optimal. Selain itu, sejumlah komponen keselamatan seperti lampu rem, sein, klakson, dan speedometer banyak ditemukan dalam kondisi tidak berfungsi.

Berdasarkan hasil kuisioner mengindikasikan bahwa meskipun masyarakat masih dapat menerima konstruksi dan material bensor saat ini, mayoritas pengguna menilai perlu adanya penambahan rem depan serta perbaikan suspensi depan untuk meningkatkan kenyamanan dan keselamatan berkendara. Kondisi ini menegaskan lemahnya aspek keamanan pada desain bensor konvensional.

Berdasarkan analisis kebutuhan, disusun Product Design Specification (PDS) yang memfokuskan prioritas pada keamanan, kekuatan struktur, kemudahan pengendalian, dan kenyamanan pengguna sebagai dasar pengembangan desain.



Gambar 1. Model Desain 3D Rangka Bentor Berdasarkan Hasil Analisis Morfologi dan Diagram Pugh

Evaluasi konsep melalui analisis morfologi dan diagram Pugh menetapkan konfigurasi rangka dengan posisi penumpang berada di belakang sebagai alternatif paling sesuai. Material yang dipilih adalah baja hollow AISI 1020 (4×2 cm) karena seimbang dari segi kekuatan, bobot, dan proses produksi, sedangkan mesin bensin dipertahankan sebagai sumber tenaga utama karena mudah diperoleh, praktis dalam perawatan, dan cocok dengan kondisi operasional bentor di Gorontalo.

Sistem penggereman yang terpilih terdiri dari rem cakram pada roda depan dan rem tromol pada roda belakang. Untuk sistem suspensi, suspensi teleskopik digunakan pada bagian depan dan suspensi dual shock pada bagian belakang. Sistem pemindah tenaga menggunakan differential, sedangkan sistem kemudi menggunakan mekanisme manual.

3.2 Finite Element Analysis (FEA)

Kekuatan rangka dianalisis melalui uji pembebanan menggunakan SolidWorks, di mana model rangka diberi simulasi beban sesuai kondisi operasional. Beban yang diterapkan meliputi massa pengemudi, penumpang, dan mesin. Dengan acuan berat rata-rata pria 602 N dan wanita 551 N, penelitian menetapkan nilai standar 637 N/orang untuk pengemudi maupun penumpang, serta 392 N sebagai beban mesin.

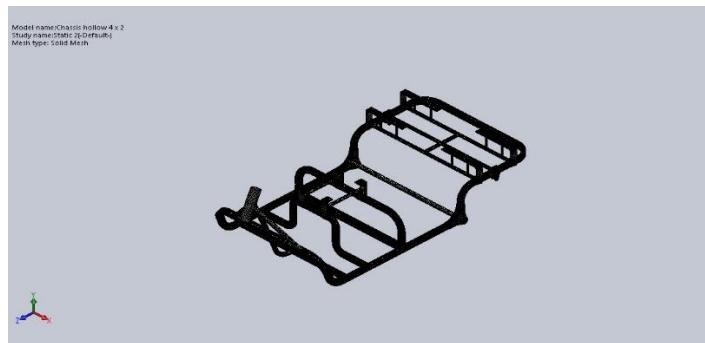
Material rangka menggunakan AISI 1020, dengan karakteristik mekanis berupa yield strength 351,571 MPa, tensile strength 420,507 MPa, dan berat total rangka 697 N sebagai parameter dasar dalam analisis.

Berikut ini merupakan proses analisis rangka bentor menggunakan solidworks simulation beban statis.

Tabel 1. Pemberian gaya pada rangka

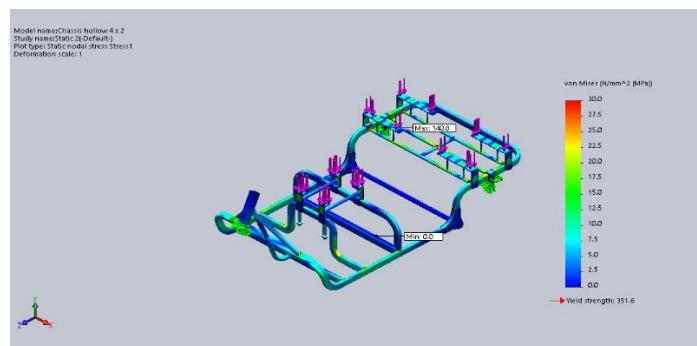
Gaya 1 diberikan pada rangka bagian tempat penumpang dengan beban sebesar 1912 N	A 3D wireframe model of the vehicle frame with three magenta arrows pointing downwards at different locations on the front subframe and side sills, representing the application of passenger weight.
Gaya 2 diberikan pada rangka bagian pengemudi dengan beban sebesar 637 N	A 3D wireframe model of the vehicle frame with four blue arrows pointing downwards at different locations on the front subframe and side sills, representing the application of driver weight.
Gaya 3 diberikan pada rangka bagian tempat dudukan mesin dengan beban sebesar 392 N	A 3D wireframe model of the vehicle frame with three blue arrows pointing downwards at different locations on the front subframe and side sills, representing the application of engine weight.

Pada area rangka belakang yang menjadi posisi penumpang diterapkan beban 1912 N, setara tiga orang dengan asumsi 637 N/orang. Bagian tengah rangka yang ditempati pengemudi menerima beban 637 N, sedangkan titik pemasangan mesin dibebani 392 N. Ketiga kondisi tersebut menjadi dasar analisis kekuatan desain rangka bentor yang dikembangkan.



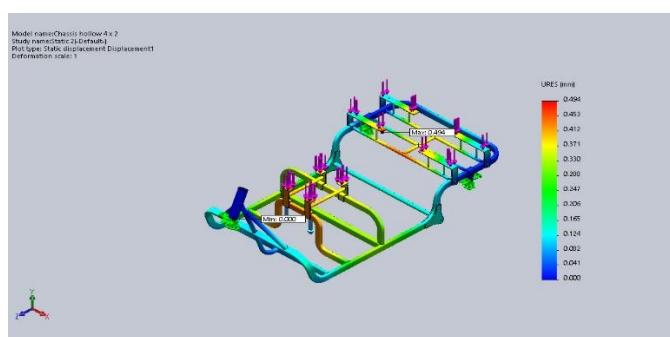
Gambar 2. Mesh

Sebelum analisis dilakukan, model rangka terlebih dahulu melalui proses mesh, yaitu pembagian geometri solid menjadi elemen-elemen kecil sebagai dasar perhitungan numerik. Pada penelitian ini, ukuran mesh yang diperoleh adalah 1,6 cm dengan rasio 1,5.



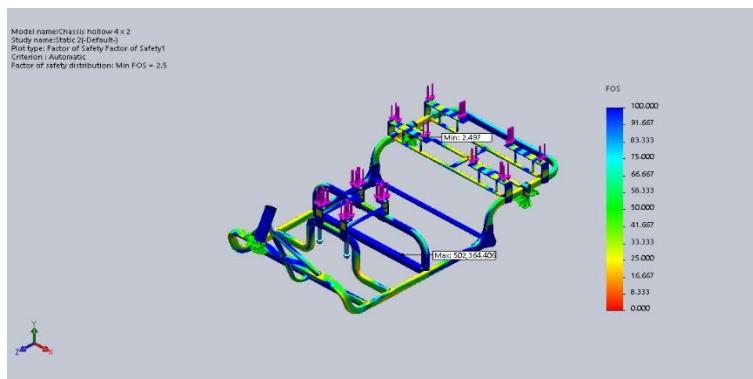
Gambar 3. Analisis Tegangan

Analisis tegangan menunjukkan bahwa rangka mengalami stress sebesar 140 MPa sebagai respon terhadap pembebanan yang diterapkan. Nilai ini masih berada di bawah yield strength material AISI 1020 sebesar 351 MPa, sehingga desain rangka dinilai mampu menahan beban kerja yang diberikan tanpa mencapai batas leleh material.



Gambar 4. Displacement

Displacement atau perpindahan titik pada material akibat pengaruh beban eksternal tercatat sebesar 0,49 mm berdasarkan hasil analisis, yang masih berada dalam batas toleransi deformasi rangka.

**Gambar 5. Faktor Keamanan**

Faktor keamanan (Safety Factor) menunjukkan perbandingan antara kemampuan material menahan beban dan tegangan aktual yang diterimanya. Nilai ini menjadi indikator tingkat keamanan desain untuk mencegah kegagalan seperti patah, deformasi, atau kerusakan. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh factor of safety sebesar 2,49, yang berarti desain rangka berada dalam kondisi aman karena material masih mampu menahan beban di atas tegangan kerja yang terjadi.

Hasil observasi dan kuesioner menunjukkan bahwa bentor di Gorontalo masih memiliki kekurangan mendasar, terutama pada aspek keselamatan. Variasi dimensi rangka, ketiadaan rem depan, suspensi yang tidak optimal, serta komponen keselamatan yang tidak berfungsi mengindikasikan perlunya perbaikan desain. Masukan pengguna menegaskan kebutuhan peningkatan pada sistem penggereman dan peredaman getaran.

Pengembangan desain kemudian difokuskan pada peningkatan keamanan dan kenyamanan dengan memilih konfigurasi rangka penumpang di belakang, material AISI 1020, rem cakram depan, dan suspensi teleskopik. Pilihan ini didasari pertimbangan kekuatan material, bobot, manufaktur, serta kesesuaian dengan kondisi operasional.

Hasil FEA terhadap beban 1912 N, 637 N, dan 392 N menunjukkan respon struktur yang aman. Tegangan maksimum 140 MPa masih jauh di bawah yield strength 351 MPa, sehingga rangka tidak mencapai batas leleh. Deformasi 0,49 mm berada dalam batas toleransi, dan nilai faktor keamanan 2,49 menunjukkan struktur masih memiliki cadangan kekuatan yang memadai.

Secara keseluruhan, desain yang dikembangkan terbukti memberikan peningkatan pada aspek struktural dan keselamatan, sehingga dinilai lebih layak dibandingkan rangka bentor konvensional dan sesuai untuk diimplementasikan pada kondisi penggunaan di Gorontalo.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini merumuskan rancangan rangka bentor yang dinilai lebih aman dan sesuai kebutuhan operasional di Gorontalo. Melalui penyusunan kebutuhan desain serta pengujian berbasis simulasi, diperoleh konfigurasi terbaik berupa rangka dengan posisi duduk penumpang di bagian belakang, penggunaan material AISI 1020, rem cakram pada roda depan, serta suspensi tipe teleskopik untuk menunjang stabilitas.

Hasil pengujian numerik memberikan nilai tegangan tertinggi 140 MPa, deformasi sebesar 0,49 mm, dan faktor keamanan 2,49. Nilai tersebut masih berada jauh di bawah batas kemampuan material (351 MPa), sehingga rangka dinilai mampu menahan beban kerja tanpa menunjukkan indikasi kegagalan. Dengan hasil ini, rancangan yang diajukan dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang lebih layak dibandingkan desain bentor yang umum digunakan saat ini, terutama pada aspek keselamatan dan kenyamanan berkendara.

5. REFERENSI

- Ataei, M., Khajepour, A., & Jeon, S. (2017). Rollover stabilities of three-wheeled vehicles including road configuration effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 231(7), 859–871. <https://doi.org/10.1177/0954407017695007>
- Kaharu, A., Saman, S., & Duggio, M. F. (2016). Model kecelakaan lalu lintas dan langkah strategis mengurangi tingkat risiko bagi pengguna becak bermotor (bentor) di Kota Gorontalo. In *UNG Repository*. <https://repository.ung.ac.id/get/karyailmiah/855/model-kecelakaan-lalulintas-dan-langkah-strategis-mengurangi-tingkat-resiko-bagi-pengguna-becak-bermotor-bentor-di-kota-gorontalo.pdf>
- Katili, A. Y., & Tueno, N. S. (2020). Analisis Implementasi Kebijakan Pengaturan Pengoperasian Kendaraan Pemerintah Provinsi Gorontalo maupun. *Publik (Jurnal Ilmu Administrasi)*, 9(1), 46–54. <https://doi.org/10.31314/pjia.9.1.46-54.2020>

- Kurniawan, E. B., & Wailanduw, A. G. (2025a). Analisis Struktur Pada Desain Chassis Mobil Listrik Roda Tiga. *Jurnal Teknik Mesin*, 14, 89–94.
- Kurniawan, E. B., & Wailanduw, A. G. (2025b). ANALISIS STRUKTUR PADA DESAIN CHASSIS MOBIL LISTRIK RODA TIGA MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA. *Jurnal Teknik Mesin (UNESA)*, 14, 89–94.
- Kusuma, W. W., Saimima, I. D. S., & Dudung, S. D. I. (2023). Analisis Legalitas Kendaraan Roda Tiga sebagai Angkutan Orang dan Barang. *Jurnal Mercatoria*, 16(1), 81–90. <https://doi.org/10.31289/mercatoria.v16i1.9351>
- Lamhalli, A. (2025). Three Wheeled Vehicle Dynamics: Static Stability Factor Improvement. *Ournal of Applied Science, Engineering and Technology*, 3(2), 60–70. <https://doi.org/10.47355/jaset.v3i2.60>
- Mege, S. R., Windriya, A., Werdania, R. E., & Budiyono, B. (2023). Assessing the Impact and Utilization of Three-Wheeled Cargo Motorcycles by MSMEs in Central Java. *Journal of Vocational Studies on Applied Research*, 5(2), 73–78. <https://doi.org/10.14710/jvsar.v5i2.23547>
- Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things (Revised ed.)* (Revised ed).
- Pahl, G., & Beitz, W. (2007). *Engineering design: A systematic approach* (3rd editio). Springer.
- Parlindungan, P. (2019). Pengendalian operasional transportasi becak motor di wilayah hukum Polres Bojonegoro Operational control of motorcycle transportation in the Bojonegoro police law area. *UNAIRe-Journal*, 14, 76–83. <https://doi.org/10.20473/jsd.v14i2.2019.76-83>
- Permadi, Y., & Siswantoro, D. H. (2025). *Desain dan Evaluasi Struktur Sasis Kendaraan Listrik Roda Tiga Menggunakan Metode Elemen Hingga*. 4(2), 12668–12674.
- Permana, A., Tahara, T., Said, M. B., & Arifin, A. (2023). The Bentor in Gorontalo City Becoming the Preferred Mode of Transportation. *KnE Social Sciences*. <https://doi.org/10.18502/kss.v8i2.12762>
- Rehman, Z. U., Chaozhe, J., Adanu, E. K., Jamal, A., Almarhabi, Y., Islam, M. K., & Al-Ahmadi, H. M. (2025). Assessing heterogeneity in factors influencing three-wheeled motorized rickshaws crash outcomes between weekdays and weekends. *Scientific Reports*, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97847-x>
- Republik Indonesia. (2017). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 108 Tahun 2017 (108)*. Art. 108. https://peraturan.bpk.go.id/Download/93821/PM_108_TAHUN_2017.pdf
- Rodríguez-Licea, M. A. (2021). On the Tripped Rollovers and Lateral Skid in Three-Wheeled Vehicles and Their Mitigation. *Vehicles*, 3(3), 357–376. <https://doi.org/10.3390/vehicles3030022>
- Ur Rehman, Z., Chaozhe, J., Adanu, E. K., Almarhabi, Y., & Jamal, A. (2025). Factors influencing injury severity in three-wheeled motorized rickshaw and motorcycle collisions. *Scientific Reports*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00145-9>
- Yuzif, R., Andiyanto, A., & Priwintoko, B. (2025). Static and Dynamic Performance Evaluation of Three-Wheeled Vehicle Frames Based on Aluminum and High-Grade Steel Using Finite Element Simulation. *Multidisciplinary Innovations and Research in Applied Engineering*, 2(2), 124–135. <https://doi.org/10.70935/rfvn0v81>