

Optimasi Desain Poros Alat Uji Daya Kendaraan Roda Dua Jenis Inertia Dynamometer

Kunto Hamijoyo^{*1}, Lujeng Widodo², Nur Aklis³

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Dharma AUB Surakarta, Surakarta, Indonesia

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia

e-mail: ^{*1}kuntoaub@gmail.com, ²lujengwidodo@gmail.com,
³na187@ums.ac.id

Abstrak

Inertia dynamometer, khususnya, merupakan jenis dynamometer yang bekerja berdasarkan prinsip kelembaman massa, di mana kendaraan memutar drum berinertia tertentu untuk mensimulasikan beban jalan dan mengukur respons mesin kendaraan terhadap beban tersebut (Heywood, 1988). Dalam pengujian kendaraan roda dua, akurasi dan kestabilan sistem pengujian sangat ditentukan oleh komponen-komponen mekanik yang menyusun alat tersebut, termasuk poros (shaft) yang menghubungkan drum dengan sistem pengukuran. Poros ini menerima beban torsi dan gaya dinamis yang cukup besar, serta harus mampu mentransmisikan daya tanpa mengalami deformasi berlebih, kelelahan material, atau resonansi yang menyebabkan ketidakakuratan pengukuran (Budynas & Nisbett, 2015). Metode yang digunakan adalah dengan melakukan optimasi sebagai profil model acuan awal yang kemudian disempurnakan dengan pemodelan ulang menggunakan MecWay. Model poros mula-mula diuji statik dengan mengaplikasikan beban sesuai perhitungan dan diagram poros. Hasil Analisa MecWay pada poros hasil optimasi menunjukkan pada ASTM A36 bertingkat memiliki Massa 4,07kg, Gaya Geser Maksimum 168 N [V] dan 94 N [W], Lendutan Maksimum ~0,00556 mm, Tegangan lentur maksimum ~3,15 MPa. Sementara hasil analisa poros S30C adalah Massa 4,07 kg, Gaya Geser Maksimum 168 N [V] dan 94 N [W], Lendutan Maksimum ~0,0058 mm, Tegangan Lentur maksimum positif ~3 MPa. Kesimpulan yang dapat diberikan adalah bahwa berdasarkan data lendutan, tegangan lentur maksimum, dan massa yang sama, ASTM A36 merupakan material yang paling optimal secara keseluruhan. Meskipun lendutannya tidak sekecil ASTM A228, ASTM A36 memiliki tegangan lentur maksimum tertinggi (~3,15 MPa), yang berarti dapat menahan beban lentur lebih besar sebelum deformasi permanen. Kekakuannya juga masih tergolong baik (lebih kaku dari AISI 1025), dan harganya cenderung lebih ekonomis dibandingkan ASTM A228.

Kata kunci— optimasi desain, poros, inertia dynamometer

Abstract

Inertia dynamometer, in particular, is a type of dynamometer that works based on the principle of mass inertia, where the vehicle rotates a certain inertia drum to simulate road loads and measure the response of the vehicle engine to the load (Heywood, 1988). In testing two-wheeled vehicles, the accuracy and stability of the testing system are largely determined by the mechanical components that make up the tool, including the shaft that connects the drum to the measuring system. This shaft receives a fairly large torque and dynamic force load, and must be able to transmit power without experiencing excessive deformation, material fatigue, or resonance that causes measurement inaccuracy (Budynas & Nisbett, 2015). The method used is to optimize as an initial reference model profile which is then refined by re-modeling using MecWay. The initial shaft model is tested statically by applying loads according to calculations and shaft diagrams. The results of the MecWay analysis on the optimized shaft show that the ASTM A36 multi-storey has a Mass of 4.07 kg, Maximum Shear Force of 168 N [V] and 94 N

[W], Maximum Deflection of ~ 0.00556 mm, Maximum bending stress of ~ 3.15 MPa. While the results of the S30C shaft analysis are Mass 4.07 kg, Maximum Shear Force of 168 N [V] and 94 N [W], Maximum Deflection of ~ 0.0058 mm, Maximum positive Bending Stress of ~ 3 MPa. The conclusion that can be given is that based on the data of deflection, maximum bending stress, and the same mass, ASTM A36 is the most optimal material overall. Although its deflection is not as small as ASTM A228, ASTM A36 has the highest maximum bending stress (~ 3.15 MPa), which means it can withstand greater bending loads before permanent deformation. Its stiffness is also still relatively good (stiffer than AISI 1025), and its price tends to be more economical than ASTM A228.

Keywords— design optimization, shaft, inertia dynamometer

1. PENDAHULUAN

Pengujian performa kendaraan bermotor merupakan aspek penting dalam proses penelitian, pengembangan, dan sertifikasi kendaraan, terutama dalam mengukur daya dan torsi mesin. Salah satu perangkat yang banyak digunakan dalam pengujian ini adalah dynamometer. Inertia dynamometer, khususnya, merupakan jenis dynamometer yang bekerja berdasarkan prinsip kelembaman massa, di mana kendaraan memutar drum berinertia tertentu untuk mensimulasikan beban jalan dan mengukur respons mesin kendaraan terhadap beban tersebut (Heywood, 1988).

Dalam pengujian kendaraan roda dua, akurasi dan kestabilan sistem pengujian sangat ditentukan oleh komponen-komponen mekanik yang menyusun alat tersebut, termasuk poros (shaft) yang menghubungkan drum dengan sistem pengukuran. Poros ini menerima beban torsi dan gaya dinamis yang cukup besar, serta harus mampu mentransmisikan daya tanpa mengalami deformasi berlebih, kelelahan material, atau resonansi yang menyebabkan ketidakakuratan pengukuran (Budynas & Nisbett, 2015). Namun, dalam praktiknya, sering ditemukan bahwa desain poros pada alat uji inertia dynamometer belum dioptimalkan secara struktural dan material. Hal ini berpotensi menyebabkan masalah seperti getaran berlebih, ketidaktepatan pembacaan daya, bahkan kegagalan struktural pada poros setelah beberapa siklus pengujian. Oleh karena itu, dibutuhkan optimasi desain poros dengan mempertimbangkan aspek-aspek seperti tegangan maksimum, defleksi, momen inersia, dan kelelahan material (fatigue), guna meningkatkan performa dan keandalan alat uji.

Optimasi ini dapat dilakukan melalui pendekatan numerik dan simulasi menggunakan perangkat lunak teknik seperti Finite Element Analysis (FEA) untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi, serta menggunakan metode optimasi seperti Design of Experiments (DOE) atau algoritma genetika untuk menemukan kombinasi parameter desain terbaik (Rao, 2011). Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain poros pada alat uji daya kendaraan roda dua jenis inertia dynamometer agar mampu meningkatkan akurasi pengukuran dan memperpanjang umur operasional komponen tersebut, sekaligus mendukung pengembangan teknologi pengujian kendaraan bermotor yang lebih efisien dan andal.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik tegangan, deformasi, dan distribusi gaya yang terjadi pada poros alat uji daya kendaraan roda dua jenis inertia dynamometer?
2. Parameter desain apa saja yang paling memengaruhi kekuatan dan keandalan poros pada alat uji tersebut?
3. Bagaimana penerapan metode optimasi, seperti Finite Element Analysis (FEA) dan pendekatan numerik lainnya, dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja poros secara struktural dan fungsional?

Kekuatan material, Pemilihan material poros dipengaruhi oleh tegangan ijin, kekuatan tarik, dan ketahanan terhadap kelelahan. Inertia dynamometer merupakan alat uji daya kendaraan yang bekerja dengan prinsip menyimpan energi kinetik dari kendaraan melalui massa

inersia yang diputar oleh roda kendaraan. Gaya yang dibangkitkan oleh percepatan massa inersia digunakan untuk menghitung daya.

Optimasi merupakan proses sistematis untuk mencari kombinasi parameter desain terbaik berdasarkan tujuan tertentu seperti meminimalkan berat, memaksimalkan kekuatan, atau memperpanjang umur pakai. Dalam desain poros, optimasi bisa dilakukan dengan mempertimbangkan: Diameter poros, Material, Faktor keamanan, Tegangan maksimum, Biaya manufaktur Metode yang digunakan, Analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA) dan Algoritma optimasi seperti Taguchi, Genetic Algorithm, atau Response Surface Methodology (RSM).

Wibowo dan Saputra (2020) mengembangkan prototipe inertia dynamometer dengan menggunakan cakram baja sebagai massa inersia. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengukuran torsi dan daya dapat divalidasi secara efektif melalui simulasi, memberikan landasan awal bagi pengujian performa sepeda motor secara praktis dan ekonomis. Kurniawan et al. (2019) meneliti analisis tegangan pada poros dinamis menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA). Hasilnya menunjukkan bahwa metode FEA sangat efektif untuk mengevaluasi distribusi tegangan, khususnya dalam mengidentifikasi lokasi tegangan maksimum. Penelitian ini juga mengungkap bahwa poros dengan desain terlalu kecil cenderung mengalami tegangan berlebih dan berisiko gagal saat beroperasi. Ahmad dan Ismail (2021) menggunakan metode Taguchi untuk mengoptimalkan desain poros penggerak pada mesin uji motor. Mereka berhasil menemukan kombinasi diameter dan material poros yang optimal, yang mampu menurunkan tegangan maksimum hingga 23%. Pendekatan eksperimental ini memberikan kontribusi signifikan dalam efisiensi dan ketahanan desain mekanik.

Sitorus dan Nata (2018) mengeksplorasi pengaruh ukuran poros terhadap kapasitas torsi maksimum. Penelitian ini menyimpulkan bahwa poros dengan diameter lebih besar memiliki ketahanan torsi yang lebih baik, namun diimbangi dengan peningkatan massa, yang dapat berdampak pada efisiensi sistem secara keseluruhan. Selanjutnya, Prasetyo et al. (2022) menggabungkan perangkat lunak CAD (SolidWorks) dan FEA (ANSYS) dalam merancang dan menganalisis inertia dynamometer untuk pengujian sepeda motor 150cc. Pendekatan ini memungkinkan visualisasi desain yang komprehensif sekaligus validasi performa struktural sebelum pembuatan fisik, sehingga meningkatkan akurasi dan efisiensi proses desain.

Penelitian ini bertujuan untuk: Menganalisis beban kerja dan distribusi tegangan yang terjadi pada poros inertia dynamometer untuk kendaraan roda dua. Mengidentifikasi parameter desain utama yang berpengaruh terhadap performa dan umur pakai poros. Mengoptimalkan desain poros dengan menggunakan pendekatan analisis numerik dan simulasi teknik, guna meningkatkan akurasi pengujian dan mengurangi risiko kegagalan mekanik.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian rekayasa eksperimental berbasis analisis numerik dan simulasi elemen hingga (Finite Element Analysis). Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengoptimalkan desain poros pada alat uji daya tipe inertia dynamometer untuk kendaraan roda dua, dengan fokus pada ketahanan struktur terhadap beban torsi dan lentur selama pengujian. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif teknik, yang terdiri dari tiga tahapan utama, perhitungan analitis mekanika teknik, mencakup evaluasi tegangan puntir dan lentur, serta analisis momen inersia berdasarkan beban kerja system dan Simulasi numerik menggunakan metode FEA (Finite Element Analysis), untuk memvalidasi performa mekanik poros terhadap beban kerja yang disimulasikan secara realistis serta Optimasi desain, yang dilakukan dengan mengubah material poros dan mengevaluasi output berupa tegangan maksimum, deformasi, dan faktor keamanan.

Tahapan Penelitian, Tahap awal dilakukan melalui kajian literatur mengenai prinsip kerja inertia dynamometer dan peran poros sebagai komponen utama transmisi torsi. Studi juga mencakup tinjauan terhadap mekanisme kegagalan umum pada poros, serta identifikasi

parameter desain yang kritis, seperti diameter, panjang efektif, dan posisi beban. Spesifikasi beban ditentukan berdasarkan data operasional maksimal, yaitu torsi maksimum yang dihasilkan oleh massa inersia (flywheel) dan kecepatan putar maksimum (RPM) kendaraan. Dimensi awal poros, termasuk diameter dan panjang, ditentukan menggunakan pendekatan perhitungan standar teknik, dengan acuan dari ASME Code atau Standar Nasional Indonesia (SNI) jika tersedia.



a. Inertia dynamometer

b. Poros dengan flywheel

c. Gambar mesin

Gambar 1. Permodelan dan Simulasi (FEA)

Model 3D poros dibuat menggunakan perangkat lunak dan Simulasi numerik dilakukan menggunakan aplikasi Mecway dengan input: 1) Beban pada poros: a. flywheel 300 N, b. gaya tarik belt + massa puli 200 N, 2) Momen putar poros 79 Nm. Output dari simulasi meliputi distribusi lendutan, gaya geser dan tegangan pada kondisi beban kerja maksimum. Alat dan Bahan Penelitian: 1) Perangkat lunak, Mecway, 2) Dimensi poros: a. Diameter 30 mm dan 40 mm, panjang 500 mm, b. Material ASTM A228, 3) Dimensi poros opyimasi: a. Diameter 30 mm dan 40 mm, panjang 500 mm, b. Material ASTM A36 dan AISI 1025.

Tabel 1. Karakteristik ASTM A36

Properti	Nilai / Deskripsi
Jenis Material	Baja karbon rendah (low carbon steel)
Komposisi Kimia (maksimum)	
Karbon (C)	0,26%
Mangan (Mn)	0,60 – 0,90%
Fosfor (P)	0,04%
Sulfur (S)	0,05%
Kekuatan Tarik (Tensile Strength)	400–550 MPa
Modulus Elastisitas (E)	~200 GPa
Modulus Geser (G)	~79 GPa
Densitas	7.850 kg/m ³
Kekerasan Brinell	~119 HB

Tabel 2. Karakteristik ASTM A228

Properti	Nilai / Deskripsi
Jenis Material	Baja karbon tinggi (high-carbon steel)
Komposisi Kimia (maksimum)	
Kadar Karbon (C)	0,70 – 1,00 %
Kadar Mangan (Mn)	0,20 – 0,70 %
Kadar Fosfor (P)	Maks. 0,025 %
Kadar Sulfur (S)	Maks. 0,025 %
Tegangan Tarik (Tensile Strength)	2300 – 4000 MPa

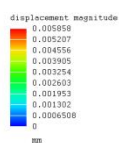
Modulus Elastisitas (E)	~ 210 GPa
Modulus Geser (G)	~ 81 GPa
Densitas	7850 kg/m ³
Kekerasan	Tinggi (setara Rockwell C 45–60, tergantung kondisi)

Tabel 3. Karakteristik AISI 1025

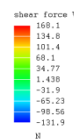
Properti	Nilai / Deskripsi
Jenis Material	Baja karbon biasa
Komposisi Kimia (maksimum)	
Kadar Karbon (C)	0,22 – 0,28%
Kadar Mangan (Mn)	0,30 – 0,60%
Kadar Fosfor (P)	≤ 0,040% (maksimum)
Kadar Sulfur (S)	≤ 0,050% (maksimum)
Tegangan Tarik (Tensile Strength)	430 – 580 MPa
Modulus Elastisitas (E)	~ 190 – 210 GPa
Modulus Geser (G)	~ 75 – 81 GPa
Densitas	7850 kg/m ³
Kekerasan	120 – 180 HB (Brinell Hardness)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini adalah tampilan untuk material poros AISI 1025

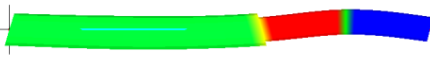
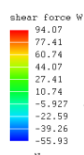


[Gambar 2. Analisa lendutan]

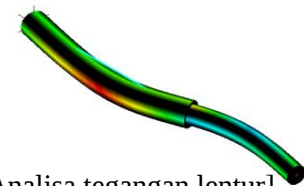
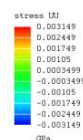


[Gambar 3. Analisa gaya geser V]

Distribusi perpindahan (displacement) untuk , nilai maksimum perpindahan $\approx 0,0058$ mm terjadi di tengah bentang $\varnothing 40$ mm, di daerah poros $\varnothing 30$ mm, perpindahan sedikit menurun, karena panjangnya lebih pendek dan efek torsi/bending lebih terlokalisasi. Distribusi Gaya Geser V, nilai maksimum sekitar +168 N terlihat tepat di ujung batang $\varnothing 40$ mm menuju transisi ke $\varnothing 30$ mm, nilai minimum sekitar -132 N muncul di pangkal batang $\varnothing 40$ mm, dekat penyangga atau penahan beban. Distribusi Gaya Geser W, nilai maksimum $\approx +94$ N terletak tepat di batang $\varnothing 40$ mm menjelang transisi ke $\varnothing 30$ mm, nilai minimum ≈ -56 N muncul di ujung batang $\varnothing 30$ mm. Zona transisi $\varnothing 40$ mm $\rightarrow$ $\varnothing 30$ mm adalah titik kritis gaya geser.



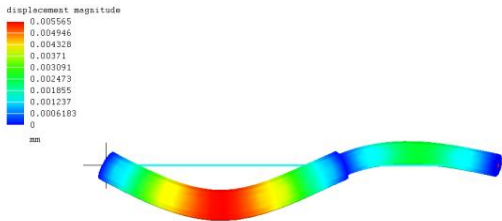
[Gambar 4. Analisa gaya geser W]



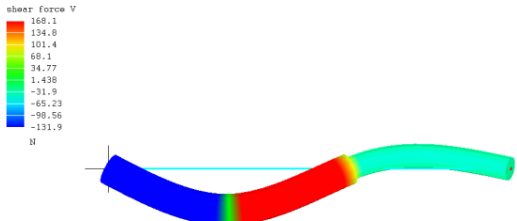
[Gambar 5. Analisa tegangan lentur]

Distribusi Tegangan Lentur, nilai maksimum $\approx +0,00315$ GPa (3,15 MPa) tampak di sisi luar lengkungan batang $\varnothing 40$ mm, nilai minimum $\approx -0,00315$ GPa ($-3,15$ MPa) muncul di

sisi dalam lengkungan pada area yang sama, menandakan pola tegangan lentur murni (tensile pada sisi tarik, compressive pada sisi tekan). Di daerah transisi (shoulder Ø 40mm → Ø 30 mm) juga terlihat gradien tegangan, meski magnitudonya lebih rendah ($\sim \pm 1$ MPa). Material poros ASTM A36



[Gambar 6. Analisa lendutan]



[Gambar 7. Analisa gaya geser V]

Poros bertingkat dari material ASTM A36, nilai maksimum lendutan $\approx 0,00556$ mm terjadi di batang Ø 40 mm. Penurunan perpindahan menuju zona transisi (fillet) dan batang Ø 30 mm: di sini $\approx 0,002$ mm– $0,003$ mm, lalu ke ujung bebas mencapai $\approx 0,0006$ mm. Bentuk kurva “S” menandakan beban bending dominan, dengan defleksi terbesar di tengah bentang panjang. Pola Distribusi Shear-Force V, nilai maksimum ~ 168 N terjadi persis di pangkal langkah (shoulder) saat transisi dari Ø 40 mm ke Ø 30 mm. Nilai minimum ~ -132 N ada di ujung kiri Ø 40 mm, menandakan arah geser berlawanan pada beban seimbang. Pada batang Ø 30 mm di ujung kanan, gaya geser turun ke sekitar $+40$ N sampai $+68$ N, karena torsi dan momen lentur yang terbagi. Poros A36 bertingkat ini secara statis masih aman, Distribusi Shear Force W, Daerah Ø 40 mm (kiri), menunjukkan gaya geser ringan positif $+10$ N sampai $+44$ N), puncak ~ 94 N muncul tepat di pangkal langkah (step shoulder) saat diameter menurun. Ujung Ø 30 mm -56 N, menandakan gaya geser berlawanan di sisi tersebut. Deformation scale factor = 9282 menegaskan defleksi fisik sangat kecil (mikrometer), struktur tampak sangat kaku. Komponen shear W ini mempertegas bahwa bahu poros (step shoulder) adalah titik paling kritis. Poros bertingkat dari ASTM A36 ini masih aman terhadap tegangan kerja yang dialaminya (maks ~ 3 MPa). Namun, potensi konsentrasi tegangan di shoulder menjadi titik rawan bila poros mengalami pembebanan siklik. Desain fillet dan kualitas permukaan menjadi penentu utama dalam memastikan umur pakai jangka panjang.

Tabel 4. Perbandingan poros mesin dan optimalisasi

	ASTM A228	ASTM A36	AISI 1025
Massa (kg)	4,07 kg	4,07 kg	4,07 kg
Gaya Geser Maks (N)	168 N [V]	168 N [V]	168 N [V]
	94 N [W]	94 N [W]	94 N [W]
Lendutan Maksimum (mm)	$\sim 0,0053$	$\sim 0,00556$	$\sim 0,0058$
Tegangan lentur maks (MPa)	~ 3	$\sim 3,15$	~ 3

Poros berbahan ASTM A36 menunjukkan lendutan yang sedikit lebih besar dibanding A228, namun sedikit lebih kecil dibanding AISI 1025. Tegangan lentur maksimumnya juga sedikit lebih tinggi, menunjukkan bahwa bahan ini dapat menahan momen lentur lebih besar sebelum mencapai batas elastisnya. ASTM A36 cocok digunakan untuk aplikasi struktural umum dengan beban sedang. Material ASTM A228 (biasanya digunakan pada pegas) menunjukkan lendutan terkecil di antara ketiganya, menandakan kekakuan yang paling tinggi. Ini menunjukkan bahwa A228 memberikan performa deformasi paling minim meskipun dengan beban geser yang sama. Tegangan lenturnya sedikit lebih rendah dibanding A36, namun kekakuannya lebih baik. Cocok untuk komponen yang memerlukan elastisitas tinggi dengan defleksi minimum. AISI 1025 menunjukkan lendutan paling besar ($\sim 0,0058$ mm), menunjukkan

kekakuan paling rendah dibandingkan A36 dan A228. Tegangan lentur maksimum tetap setara dengan ASTM A228 (~3 MPa). Bahan ini cenderung lebih lunak dan lebih mudah dikerjakan, namun tidak ideal untuk aplikasi dengan kebutuhan kekakuan tinggi.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil analisa EFA menggunakan aplikasi Mecway adalah: 1) Berdasarkan data lendutan, tegangan lentur maksimum, dan massa yang sama, ASTM A36 merupakan material yang paling optimal secara keseluruhan. Meskipun lendutannya tidak sekecil ASTM A228, ASTM A36 memiliki tegangan lentur maksimum tertinggi (~3,15 MPa), yang berarti dapat menahan beban lentur lebih besar sebelum deformasi permanen. Kekakuannya juga masih tergolong baik (lebih kaku dari AISI 1025), dan harganya cenderung lebih ekonomis dibandingkan ASTM A228. 2) Dengan keseimbangan antara kekuatan lentur, kekakuan yang memadai, dan efisiensi biaya, ASTM A36 direkomendasikan untuk penggunaan umum yang membutuhkan kombinasi kekuatan struktural dan efisiensi. 3) Jika aplikasi membutuhkan kekakuan maksimal dan deformasi minimum, ASTM A228 tetap menjadi pilihan utama. Jika kemudahan dalam proses manufaktur lebih diutamakan dengan beban rendah, AISI 1025 dapat dipertimbangkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad, M., & Ismail, R. (2021). Optimasi Poros Penggerak Mesin Uji Motor Menggunakan Taguchi Method. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 15(2), 88–95. <https://doi.org/10.1234/jtmi.v15i2.12345>
- [2] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- [3] Cook, R. D., et al. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Wiley.
- [4] Giles, J. G. (2004). *Vehicle and Engine Technology*. Butterworth-Heinemann.
- [5] Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- [6] Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2012). *Fundamentals of Machine Component Design*. Wiley.
- [7] Kurniawan, D., Nugroho, A., & Santoso, F. (2019). Analisis Tegangan pada Poros Dinamis dengan Metode FEA. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 10(1), 45–52. <https://doi.org/10.5678/jrm.v10i1.23456>
- [8] Logan, D. L. (2011). *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning.
- [9] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.
- [10] Norton, R. L. (2011). *Machine Design: An Integrated Approach* (4th ed.). Pearson.
- [11] Prasetyo, A., Hadi, T., & Yuliana, R. (2022). Desain dan Analisis Inertia Dynamometer Menggunakan Software SolidWorks dan ANSYS. *Jurnal Mekanikal*, 18(3), 101–110. <https://doi.org/10.7890/jmek.v18i3.34567>
- [12] Rao, S. S. (2011). *Engineering Optimization: Theory and Practice* (4th ed.). Wiley.
- [13] Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2002). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.

- [14] Sitorus, R., & Nata, I. (2018). Pengaruh Ukuran Poros terhadap Torsi Maksimum pada Mesin Uji Daya. *Jurnal Energi dan Mesin*, 12(4), 76–83.
<https://doi.org/10.2222/jem.v12i4.45678>
- [15] Suryanto, H., & Suprobo, P. (2015). Aplikasi Analisis Elemen Hingga untuk Struktur Teknik Mesin. ITS Press.
- [16] Wibowo, H., & Saputra, A. (2020). Desain dan Simulasi Inertia Dynamometer untuk Sepeda Motor. *Jurnal Inovasi Teknologi*, 11(1), 33–40.
<https://doi.org/10.3456/jit.v11i1.56789>