



## Perancangan Sistem *Dog Clutch* Transmisi Prototipe Diesel Berbasis Analisis FEM dan Pengujian Mekanik Material

Husna Drajat RN<sup>1</sup>, Amirul Siddiq Mirza<sup>1\*</sup>, Prasetyo<sup>1</sup>, Dibyo Setiawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

### Riwayat Artikel:

Diajukan: 15/06/2026  
Diterima: 02/07/2026  
Daring: 04/07/2026  
Terbit: 30/06/2026

### Kata Kunci:

*Dog clutch*  
*Prototipe diesel*  
*FEM*  
*Sifat mekanik*  
*Kekuatan tarik*

### Keywords:

*Dog clutch*  
*Diesel prototype*  
*FEM*  
*Mechanical properties*  
*Tensile strength*

### Abstrak

Efisiensi transmisi daya merupakan faktor krusial dalam pencapaian jarak tempuh maksimal pada kompetisi kendaraan hemat energi. Penelitian ini berfokus pada Perancangan komponen *dog clutch* untuk sistem transmisi kendaraan prototipe diesel. Metodologi penelitian menggabungkan pendekatan numerik melalui *Finite Element Method* (FEM) menggunakan *SolidWorks* dan validasi eksperimental sifat mekanik material. Pengujian mekanik yang dilakukan meliputi uji spektrometri untuk identifikasi komposisi material dan uji tarik untuk menentukan karakteristik kekuatan struktur. Hasil pengujian menunjukkan nilai kekuatan tarik (*tensile strength*) sebesar 1477 MPa yang kemudian diintegrasikan sebagai parameter masukan dalam simulasi FEM. Analisis FEM dilakukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan von Mises dan faktor keamanan pada berbagai kondisi beban torsi. Hasil Perancangan menunjukkan bahwa geometri *dog clutch* yang dirancang mampu menahan beban operasional dengan tegangan kerja di bawah batas luluh material, sehingga memastikan keandalan mekanis sistem transmisi. Hasil penelitian ini memberikan landasan teknis dalam pengembangan sistem transmisi yang ringan namun memiliki integritas struktural yang tinggi untuk aplikasi kendaraan hemat energi.

### Abstract

*Power transmission efficiency is a crucial factor in achieving maximum mileage in energy-efficient vehicle competitions. This research focuses on optimizing the design of dog clutch components for the transmission system of a diesel prototype vehicle. The research methodology combines a numerical approach through the Finite Element Method (FEM) using SolidWorks and experimental validation of the material's mechanical properties. The mechanical testing conducted includes spectrometry testing to identify material composition and tensile testing to determine structural strength characteristics. The test results indicate a tensile strength of 1477 MPa, which is then integrated as an input parameter in the FEM simulation. FEM analysis was performed to evaluate the von Mises stress distribution and safety factor under various torque loading conditions. The optimization results show that the designed dog clutch geometry is capable of withstanding operational loads with operating stress below the material's yield strength, thereby ensuring the mechanical reliability of the transmission system. The results of this study provide a technical foundation for developing a lightweight transmission system with high structural integrity for energy-efficient vehicle applications.*

### Pendahuluan

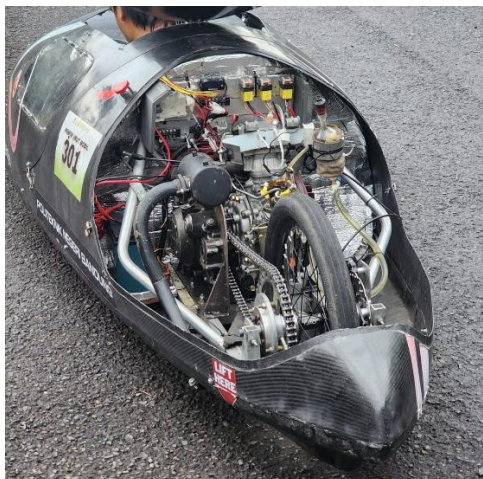
Kontes Mobil Hemat Energi (KHME) merupakan kompetensi rancang bangun kendaraan yang berfokus pada efisiensi penggunaan energi. Pada kategori kendaraan prototipe diesel, setiap komponen penggerak harus dirancang untuk meminimalisir rugi-rugi daya *power loss* agar dapat menempuh jarak maksimal dengan konsumsi bahan bakar yang sangat terbatas [1]. Salah satu subsistem krusial yang menentukan efisiensi tersebut adalah sistem transmisi daya [2]. Efisiensi transmisi yang rendah sering kali menjadi kendala utama dalam mencapai target konsumsi bahan bakar yang telah

\*Korespondensi: [amirul.siddiq@polban.ac.id](mailto:amirul.siddiq@polban.ac.id)



ditetapkan dalam kompetisi [3]. Sistem transmisi daya sebelumnya menggunakan rantai yang menghubungkan antara kopling pada output *shaft* mesin dan *sprocket* pada poros roda seperti pada **Gambar 1**.

Pada kasus ini, ditemui bahwa ketika kopling bekerja atau dalam kondisi *free*, rantai ikut berputar pada poros roda ketika mobil menggelinding. Putaran rantai dan *sprocket* yang terjadi pada roda belakang menimbulkan rugi-rugi mekanik. Penambahan komponen kopling cakar atau *dog clutch* pada roda belakang dilakukan untuk menghilangkan potensi rugi-rugi mekanik pada poros roda belakang akibat rantai dan *sprocket* yang ikut berputar.



**Gambar 1.** Sistem Transmisi Pada Kendaraan Hemat Energi

Dalam pengembangannya, sistem transmisi mekanis tipe *dog clutch* dipilih sebagai solusi untuk menyalurkan torsi dari mesin diesel berdaya 5 Hp ke roda penggerak. Mekanisme *dog clutch* memiliki keunggulan dibandingkan kopling gesek konvensional karena memberikan sambungan yang meminimalisir slip, sehingga transfer daya menjadi lebih efektif [4]. Komponen *dog clutch* harus dirancang menyesuaikan ruang yang ada pada poros roda belakang dan memiliki integritas struktural yang tinggi untuk menahan beban torsi operasional dan beban kejutan saat perpindahan transmisi [5].

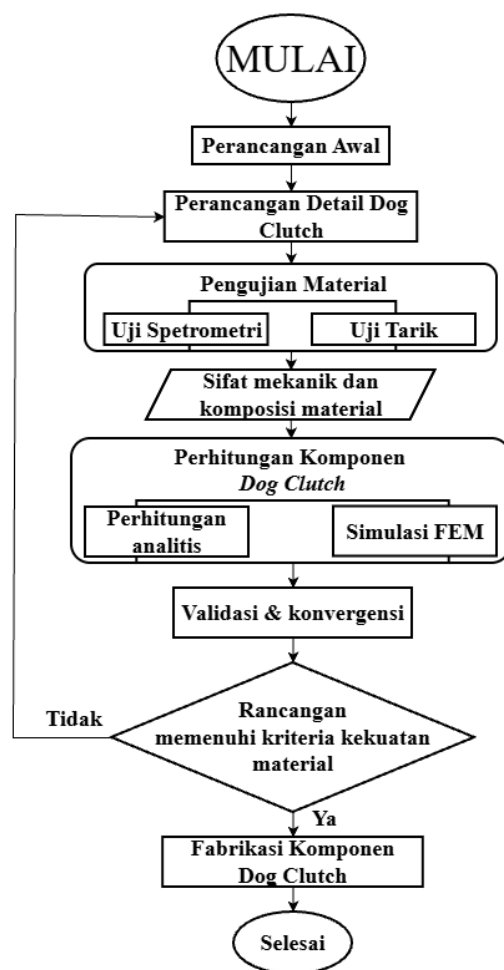
Kegagalan dalam memprediksi kekuatan material dapat menyebabkan deformasi plastis atau patah pada bagian gigi *dog clutch*. Oleh karena itu, diperlukan analisis numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk mendapatkan distribusi tegangan *von Mises* dan faktor keamanan yang akurat [6]. Analisis ini sangat bergantung pada parameter input sifat mekanik material yang digunakan. Untuk menjamin akurasi simulasi, pengujian eksperimental berupa uji spektrometri dan uji tarik perlu dilakukan untuk mengetahui sifat material [7]. Setelah mengetahui sifat material berupa *yield stress*, maka dapat dilakukan perhitungan kekuatan secara teoritis dan analisa numerik. Hal ini dilakukan untuk memvalidasi tegangan yang terjadi pada *dog clutch* masih di bawah tegangan yang diizinkan.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan desain *dog clutch* pada transmisi kendaraan prototipe diesel berbasis hasil simulasi FEM dan validasi sifat mekanik material secara riil. Dengan mengintegrasikan hasil pengujian laboratorium ke dalam pemodelan perangkat lunak, diharapkan diperoleh desain yang optimal dari sisi geometri dan maupun kekuatan *dog clutch*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan performa jarak tempuh kendaraan pada ajang kompetisi KMHE serta menjadi referensi dalam pengembangan transmisi kendaraan hemat energi di masa mendatang.

## Metodologi

Penelitian dilakukan melalui tahapan perancangan dan pemodelan desain, karakterisasi sifat mekanik material secara eksperimental, serta analisis kekuatan struktur menggunakan *Finite Element Methode* (FEM). Alur penelitian dirancang untuk memastikan bahwa desain transmisi yang dihasilkan memiliki validitas data yang kuat antara hasil pengujian laboratorium dan simulasi komputer, sehingga nantinya desain ini dapat diwujudkan dengan melakukan fabrikasi komponen *dog clutch*. Perancangan awal dilakukan dengan mencari studi literatur sebagai referensi desain *dog clutch* dilihat dari aspek geometri, maupun perhitungan mekanik. Selanjutnya pemodelan komponen dilakukan menggunakan *software SolidWorks*.

Pemilihan material berdasarkan kemudahan dalam mendapatkan bahan baku di pasaran. Material kemudian diuji untuk memverifikasi sifat material. Pengujian material yang dilakukan adalah uji spektrometri untuk mendapatkan komposisi paduan material dan uji tarik untuk mendapatkan sifat mekanik material. Adapun *flowchart* perancangan komponen *dog clutch* dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Diagram alir Perancangan.

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja yang digunakan sebagai bahan dasar pembuatan *dog clutch*. Peralatan penelitian meliputi spektrometer untuk identifikasi komposisi material, mesin uji tarik untuk karakterisasi sifat mekanik, serta perangkat lunak *SolidWorks* untuk pemodelan dan simulasi FEM.

Perancangan dan pemodelan 3D menjadi tahap awal penelitian dengan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Perancangan difokuskan pada optimasi geometri gigi transmisi agar mampu melakukan penyambungan daya secara positif dan responsif. Dimensi komponen disesuaikan dengan spesifikasi ruang pada sistem transmisi kendaraan prototipe diesel untuk meminimalisir inersia dan berat total sistem [8].

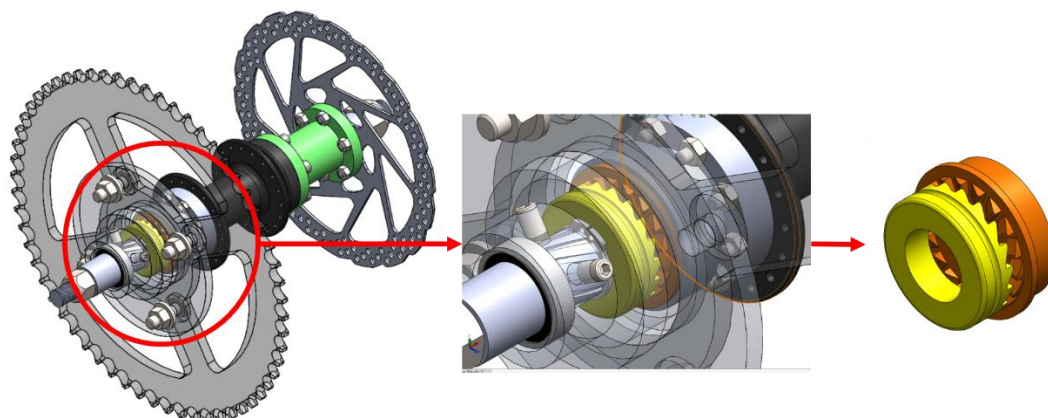
Karakterisasi material dilakukan melalui pengujian spektrometri dan uji tarik. Uji spektrometri digunakan untuk mengidentifikasi komposisi kimia material penyusun *dog clutch* guna memastikan jenis material yang digunakan, sedangkan uji tarik dengan menggunakan standar spesimen tertentu dilakukan untuk mengetahui batas kekuatan maksimum material.

Data sifat mekanik tersebut kemudian diimplementasikan pada pemodelan numerik untuk mengevaluasi respons struktur *dog clutch* terhadap pembebanan yang diberikan. Analisis kekuatan struktur dilakukan secara numerik menggunakan fitur *simulation* pada *SolidWorks*. Tahapan simulasi meliputi penetapan jenis material dengan *input* nilai *yeld strength* 946 MPa, pembuatan jaring-jaring elemen (*meshing*), serta penetapan kondisi batas (*boundary conditions*). Beban torsi yang diberikan pada simulasi dihitung berdasarkan *output* daya mesin diesel sebesar 5 HP yang dikonversikan menjadi torsi operasional pada putaran tertentu. Analisis ini bertujuan untuk memetakan distribusi tegangan *von Mises* dan menghitung faktor keamanan (*safety factor*) untuk memastikan desain tidak mengalami kegagalan mekanis saat beroperasi pada beban puncak [9].

## Hasil dan Pembahasan

### A. Hasil Perancangan Dog Clutch

Perancangan menghasilkan geometri *dog clutch* yang disesuaikan dengan kebutuhan sistem transmisi kendaraan prototipe diesel. Konfigurasi *dog clutch* yang berjumlah 2 buah disematkan antara *sprocket* dan hub roda belakang yang dapat dilihat pada **Gambar 3**. Desain dibuat dengan mempertimbangkan keterbatasan ruang pemasangan dan kemampuan komponen dalam menahan beban operasional. Komponen *dog clutch* berwarna kuning menempel dan pada adaptor tempat *sprocket* bertumpu, sedangkan *dog clutch* berwarna oren menempel dan dikunci pada hub roda yang berwarna hitam. *Dog clutch* berwarna kuning hanya mengunci putaran dari sprocket dan bisa bergeser ke kanan hanya jika *sprocket* mendapat putaran dari torsi mesin. Desain transmisi *dog clutch* ini dibuat untuk kebutuhan operasional dengan mengandalkan tautan fisik secara kaku (*positive engagement*) antar profil cakarannya saat fase penguncian. Metode persambungan mekanis ini secara efektif mengeliminasi potensi selip (*zero slip*) yang lazim terjadi pada sistem kopling berbasis friksi. Dengan mekanisme tersebut, *dog clutch* mampu menyalurkan daya secara langsung dan utuh. Tidak adanya rugi-rugi gesekan ini menjadikan efisiensi transmisi daya sangat maksimal, sehingga menjadikannya solusi ideal untuk menekan disipasi energi sekaligus mereduksi massa komponen pada sistem penggerak kendaraan.



**Gambar 3.** Pemodelan sistem Transmisi *Dog Clutch* [2]

### B. Hasil Karakterisasi Material

Karakterisasi material dilakukan untuk mendapatkan data properti mekanik material yang akurat sebagai parameter *input* simulasi. Tahapan pengujian karakterisasi material meliputi uji spektrometri dan uji tarik.

Pengujian spektrometri dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi kimia penyusun material dog clutch guna memastikan klasifikasi material awal yang digunakan [10]. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 1**. Menunjukkan persentase unsur karbon yang rendah, sehingga material dasar ini diklasifikasikan ekuivalen dengan baja karbon rendah struktural standar AISI 3310.

Keberhasilan perlakuan panas ini divalidasi melalui uji tarik eksperimental menggunakan spesimen standar ASTM E8M. Hasil uji tarik pengujian pada **Gambar 4** menunjukkan peningkatan kekuatan struktur yang signifikan dengan nilai kekuatan luluh *yield strength* sebesar 946 MPa dan kekuatan tarik maksimum atau *ultimate tensile strength* sebesar 1477 MPa. Data ini menjadi acuan utama dalam menentukan batas luluh *yield strength* material pada pemodelan material di perangkat lunak simulasi. Data uji tarik ditunjukkan pada **Tabel 2**.

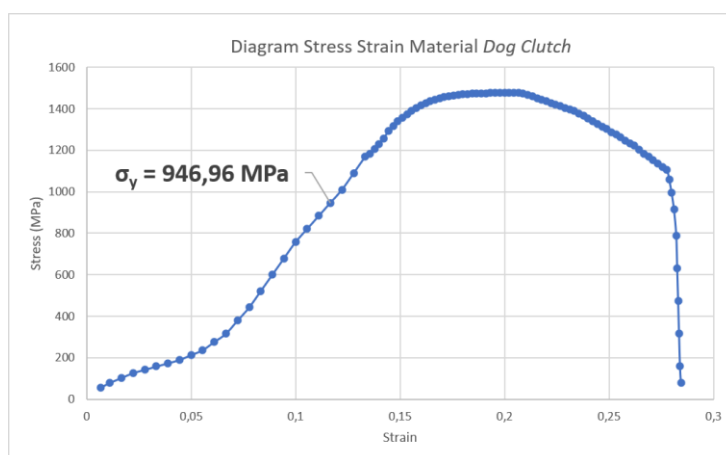
Mengingat komponen *dog clutch* beroperasi di bawah beban kejut dinamis dan gesekan tinggi pada sistem transmisi prototipe diesel, material dasar ini telah melalui proses perlakuan panas *carburizing*. Proses ini secara strategis dirancang untuk menghasilkan sifat mekanis komposit: permukaan luar yang sangat keras untuk menahan aus dan tegangan kontak, serta bagian inti yang tetap ulet untuk menyerap energi impact.

**Tabel 1.** Hasil Uji Spektrometri

No	Fe (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr(%)	Ni(%)
1	89.63	>1.80	0.819	0.385	3.05	3.98
2	89.58	>1.80	0.806	0.397	3.17	3.92
3	89.62	>1.80	0.801	0.391	3.10	3.97
Ø	89.61	>1.80	0.809	0.391	3.11	3.96

**Tabel 2.** Hasil Uji Tarik

No	Tensile Strength (MPa)	Yeld Strength (MPa)	Max Force (kN)
1	1477	946	93.51



Gambar 1. Diagram stress-strain material dog clutch [6]

### C. Analisis Beban dan Tegangan Teoritis

Perhitungan beban dan tegangan teoritis dilakukan untuk mengetahui kemampuan cakar (*dog clutch*) dalam menahan beban torsi yang ditransmisikan dari mesin sebelum dilakukan analisis numerik menggunakan *Finite Element Method (FEM)*.

Perhitungan kekuatan cakar yang digunakan pada *dog clutch* adalah sebanyak 18 buah, sehingga sudut antar cakar dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\theta = \frac{360^\circ}{z} \tag{1}$$

dengan  $z$  adalah jumlah cakar, sehingga

$$\theta = \frac{360^\circ}{18} = 20$$

Berdasarkan dimensi *dog clutch* yang digunakan, diketahui diameter luar sebesar 36 mm, diameter dalam sebesar 28 mm, dan ketebalan cakar sebesar 2 mm. Perancangan geometri dan sudut kontak cakar ini didasarkan pada standar proporsi elemen transmisi mekanis untuk meminimalisir *backlash* [11]. Sudut kontak cakar dihitung menggunakan persamaan berikut

$$\beta = 2\sin^{-1}\left(\frac{t}{D-d}\right) \tag{2}$$

sehingga diperoleh

$$\alpha = \theta - \beta$$

$$\alpha = 20^\circ - 6,4^\circ = 13,6^\circ$$

Gaya total yang bekerja pada *dog clutch* dihitung berdasarkan torsi yang ditransmisikan oleh sistem. Hubungan antara torsi dan gaya total ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$T = F_{total}\left(\frac{D+d}{4}\right) \tag{3}$$

dengan torsi sebesar 48 Nm, diperoleh

$$F_{total} = \frac{4T}{D+d} \tag{4}$$

$$F_{total} = \frac{4 \times 48}{0,036 + 0,028}$$

$$F_{total} = 3000 \text{ N}$$

Di keadaan terburuk beban hanya ditanggung oleh 1 cakar, maka gaya yang bekerja pada setiap cakar adalah:

$$F = \frac{F_{total}}{z} \tag{5}$$

$$F = \frac{3000}{1} = 3000 \text{ N}$$

Luas penampang geser cakar dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \frac{\alpha}{360} \tag{6}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (36^2 - 28^2) \frac{13,6}{360}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \frac{\alpha}{360}$$

Namun di kondisi terburuk hanya setengah luas yang menerima beban [12]. Tegangan geser teoritis yang terjadi pada cakar dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \frac{\alpha}{360} \quad (7)$$

$$T_{geser} = \frac{F}{A}$$

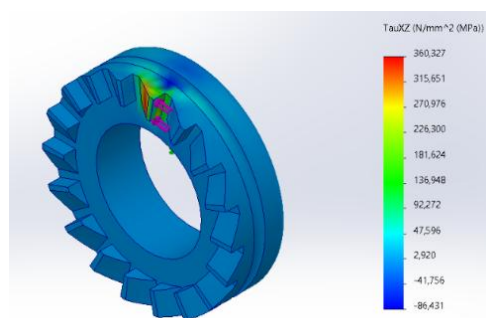
$$T_{geser} = \frac{3000}{8}$$

$$T_{geser} = 375 \text{ MPa}$$

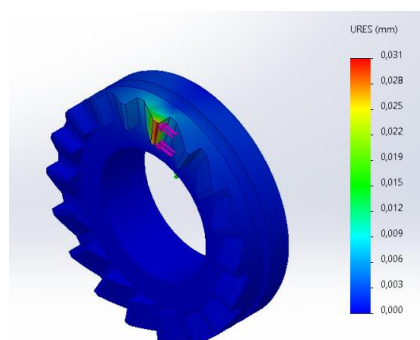
Berdasarkan hasil perhitungan teoritis diperoleh tegangan geser sebesar 10,95 MPa pada setiap cakar *dog clutch*. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan awal dalam mengevaluasi kemampuan struktur komponen sebelum dilakukan analisis numerik menggunakan FEM. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan distribusi tegangan yang diperoleh dari simulasi untuk menilai tingkat keamanan desain yang dikembangkan [7].

#### D. Hasil Simulasi FEM

Evaluasi kekuatan struktural komponen *dog clutch* dilakukan secara numerik untuk mengetahui respons material terhadap beban operasional [13]. Pembebanan pada simulasi didefinisikan berdasarkan gaya kontak maksimum yang terjadi saat perpindahan daya. Gaya total yang diaplikasikan pada pemodelan adalah sebesar 3000 N. [14].



**Gambar 5.** Hasil Simulasi Tegangan geser



**Gambar 6.** Hasil Simulasi *Displacement* [6]

Berdasarkan hasil komputasi elemen seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 5**, distribusi tegangan maksimum ( $\tau_{XZ}$ ) terpusat pada area pangkal mata gigi yang menjadi titik tumpuan gaya kontak. Nilai tegangan geser maksimum yang terukur pada simulasi ini adalah sebesar 375 MPa. Jika nilai tegangan kerja ini dibandingkan dengan karakteristik material hasil uji laboratorium yang memiliki *yield strength* hingga 946 MPa, maka dapat disimpulkan bahwa komponen beroperasi sangat jauh di bawah batas luluh (*yield strength*). Hal ini mengindikasikan bahwa geometri *dog clutch* memiliki integritas struktural yang sangat tinggi dan aman dari risiko kegagalan fatik maupun deformasi plastis akibat tegangan geser operasional.

Selain tinjauan tegangan, analisis deformasi statis (*displacement*) juga menjadi parameter krusial untuk memastikan komponen tidak mengalami distorsi bentuk yang dapat menyebabkan slip atau macet. Hasil simulasi pada **Gambar 6** menunjukkan bahwa pergeseran atau defleksi maksimum yang terjadi pada ujung mata gigi hanya sebesar 0,001 mm. Nilai deformasi yang sangat kecil ini membuktikan bahwa rancangan *dog clutch* memiliki tingkat *stiffness* yang baik dan masih memenuhi kriteria desain [7]. Stabilitas dimensi yang terjaga di bawah beban puncak ini memastikan efisiensi transfer mekanis pada sistem transmisi prototipe diesel tetap berada pada kondisi optimal tanpa adanya rugi-rugi mekanis akibat keausan asimetris.

## Kesimpulan

Hasil pengujian mekanik dan simulasi *Finite Element Method* (FEM) membuktikan bahwa rancangan *dog clutch* transmisi prototipe diesel memiliki keandalan struktural yang sangat tinggi. Dengan material *yeld strength* 946 MPa, komponen hanya mengalami tegangan maksimum 375 MPa dan defleksi sebesar 0,031 mm saat diberikan beban operasional sebesar 3000 N. Dalam keadaan terburuk pada saat setengah bagian luas gigi cakar bersentuhan dan menerima beban total, *dog clutch* mampu menahan tegangan kerja dengan nilai SF 3, serta menjaga stabilitas dimensi untuk meminimalisir rugi mekanis. Rancangan kopleng dengan geometri yang efisien dan tangguh ini siap diaplikasikan untuk meningkatkan transfer daya pada kendaraan Kortes Mobil Hemat Energi (KMHE), serta diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi pengembangan transmisi di masa mendatang.

## Daftar Pustaka

- [1] H. M. Ardi, M. M. Fahmi, N. Fajri, and Y. A. Wiraputra, "Overhaul dan Uji Performansi Generator Firman," vol. 12, no. 1, 2026.
- [2] D. Setiawan, R. Jatnika, D. M. Muthohary, I. Azmy, and T. Okviyanto, "Optimasi Performa Mesin Diesel Matsumoto MDX- 178F melalui Modifikasi Intake dan Exhaust," vol. 12, no. 1, 2026.
- [3] S. R. Asep Sukmayadi, "Pedoman Kortes Mobil Hemat Energi (KMHE) Perguruan Tinggi 2024," 2024.
- [4] F. M. Huda, S. Anis, M. B. Laroybafih, and D. F. Fitriyana, "Rancang Bangun Dog Clutch Transmission System Pada Kendaraan Mobil Hemat Energi Urate Evo-7 Pandawa Team," vol. 10, no. 2, pp. 51–56, 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.55679/enthalpy.v9i4>.
- [5] H. M. Ardi, M. M. Fahmi, D. Setiawan, and M. Y. Efendi, "Perencanaan Transmisi Mekanik Roda Gigi dan Generator Turbin Vorteks PLTMH," *J. Tek. Mesin*, vol. 20, no. 2, pp. 55–63, 2023, doi: 10.9744/jtm.20.2.55-63.
- [6] H. Widiantoro, D. Eka, S. Arifin, D. Setiawan, and A. P. I. P, "Analisis Kekuatan Fishing Tools Holder 50 . 000 LBS Menggunakan Metode Finite Element," *J. Crankshaft*, vol. 6, no. 3, pp. 68–79, 2023, doi: <https://doi.org/10.24176/crankshaft.v6i3.11557>.
- [7] S. Pradhan, B. Biswal, G. A. Sharma, A. Nayak, and H. R. Behera, "Finite Element Analysis of Dog Clutch Plate Using Numerical Methods," vol. 8, no. 8, pp. 612–622, 2021, doi: 10.17148/IARJSET.2021.88101.
- [8] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3rd ed. London: Springer London, 2007. doi: 10.1007/978-1-84628-319-2.
- [9] R. E. Firdausah, N. Ilminnafik, and M. Asrofi, "Performance of a Single Cylinder Diesel Engine Fueled by 40 % Biodiesel Blend with Excess Air System," 2025, doi: 10.31284/j.jmesi.2025.v5i1.6917.
- [10] W. D. C. Jr. and David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Wiley, 2018.
- [11] S. Y. Purwanto, *Elemen Mesin*. Yogyakarta: Akprind Press, 2018.
- [12] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 10th ed. Pearson, 2016.
- [13] Y. Aktir, Jean-François Brunel, Philippe Dufrenoy, and Hervé Mahé, "Three-dimensional finite element model of an automotive clutch for analysis of axial vibrations," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 230, no. 10, pp. 1324–1337, 2016, doi: 10.1177/0954407015607377.
- [14] C. Duan, "Analytical Study of a Dog Clutch in Automatic Transmission Application," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 1155–1162, 2014, doi: 10.4271/2014-01-1775.

## Ucapan penghargaan

Penelitian ini didukung oleh program bantuan Tugas Akhir (TA) dari Ikatan Alumni Mesin. Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Ikatan Alumni Mesin atas dukungan pendanaan yang diberikan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Prasetyo, S.T., M.Eng dan Bapak Amirul Siddiq Mirza S.Tr.T., M.T. atas bimbingan dan arahan selama pelaksanaan penelitian. Apresiasi turut disampaikan kepada seluruh anggota Tim Kalasinja Politeknik Negeri Bandung atas kerja sama, dedikasi, dan dukungan yang luar biasa selama pelaksanaan rancangan ini.

## Pernyataan Penulis

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam publikasi artikel ini. Semua penulis menyetujui penerbitan artikel ini.

## Lampiran

Tidak tersedia