



Rekomendasi Waktu Rem Minimum untuk Uji Layak Jalan Sepeda Motor Berdasarkan Ketebalan Brake Pad dengan Metode Taguchi

Ian Hardianto Siahaan¹, Ninuk Jonoadji², Andre Welianto³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra

¹ian@petra.ac.id

Abstract

One of the main factors ensuring the safety of motor vehicle riders is their braking system. This system plays a crucial role in slowing down or stopping the vehicle. The efficiency of braking in disc brake systems is influenced by various aspects, one of which is the level of wear on the brake pads. When brake pads wear out, their thickness decreases, which can affect braking performance. The thinner the brake pads, the longer the stopping time required, which can increase the risk of accidents. This study aims to educate motorcycle users, as many still use brake pads even when their thickness has reached the minimum limit of 2-3 mm. The methodology used in this research is a stationary test that varies the thickness of worn brake pads, specifically at 2 mm, 4 mm, and 6 mm conditions. Subsequently, the three brake pads were tested at safe speed limits, ranging from 20, 40, to 60 km/h, with normal braking loads of 4 kg, 5 kg, and 6 kg. The conclusion indicates that the effective stopping time for motorcycle brake pads should be between 1.07 and 1.13 seconds, showing that braking performance is still adequate at a brake pad thickness of 2-3 mm to prevent the risk of accidents.

Keywords: brake pads, wear out, braking, stopping time

Abstrak

Salah satu faktor utama yang memastikan keselamatan pengendara kendaraan bermotor adalah sistem pengeremannya. Sistem ini berperan penting dalam memperlambat atau menghentikan kendaraan. Efisiensi pengereman pada sistem rem cakram dipengaruhi oleh berbagai aspek, salah satunya adalah tingkat keausan brake pad. Ketika brake pad aus, ketebalannya berkurang, yang dapat mempengaruhi kinerja pengereman. Semakin tipis brake pad, semakin lama waktu rem yang dibutuhkan, yang dapat meningkatkan risiko terjadinya kecelakaan. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan sosialisasi kepada pengguna sepeda motor, mengingat masih banyak yang menggunakan brake pad meskipun ketebalannya telah mencapai batas minimal 2-3 mm. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengujian stasioner dengan memvariasikan ketebalan brake pad yang telah aus, yaitu pada kondisi 2 mm, 4 mm, dan 6 mm. Selanjutnya, ketiga brake pad tersebut diuji pada batas kecepatan yang aman, mulai dari kecepatan 20, 40, hingga 60 km/jam, dengan beban rem normal sebesar 4 kg, 5 kg, dan 6 kg. Kesimpulan menunjukkan bahwa waktu rem efektif untuk brake pad pada sepeda motor harus berkisar antara 1,07 hingga 1,13 detik, yang menunjukkan bahwa kinerja pengereman masih layak pada ketebalan brake pad 2-3 mm mencegah resiko kecelakaan

Kata kunci: brake pad, keausan, pengereman, waktu rem

1. Pendahuluan

Pengereman adalah proses yang memperlambat atau menghentikan pergerakan mesin termasuk kendaraan. Proses ini dilakukan menggunakan komponen yang disebut rem, yaitu perangkat mekanis yang menghambat laju pergerakan. Rem berfungsi untuk memperlambat, menghentikan, atau menahan mesin atau kendaraan agar tidak bergerak kembali. Banyak inovasi telah dilakukan dan sedang dikembangkan untuk mempercepat proses pengereman dan memperpendek waktu rem. Rem cakram termasuk

dalam kategori rem gesekan karena metode pengoperasiannya mengandalkan brake pad dan piringan cakram. Pada kendaraan modern, rem cakram paling umum digunakan, menggantikan rem tromol dengan memberikan operasi yang lebih linier dan toleransi yang lebih besar terhadap suhu tinggi [1]. Rem tersebut mengubah energi kinetik dari bagian yang bergerak menjadi energi panas melalui gesekan yang kemudian secara bertahap terdisipasi ke udara di sekitarnya. Sebuah rem cakram, yang biasanya terbuat dari besi cor atau komposit keramik

(termasuk karbon, kevlar, dan silika), dan yang terhubung ke roda. Untuk menghentikan roda, material gesekan dalam bentuk brake pad (yang dipasang pada perangkat yang disebut kaliper rem) ditekan secara mekanis, hidraulik, pneumatik, atau elektromagnetik ke kedua sisi cakram. Gesekan menyebabkan cakram dan roda yang terpasang melambat atau berhenti [2]. Pengereman yang berlebihan dapat menjebak partikel aus dari brake pad di celah antara brake pad dan cakram, yang menyebabkan keausan pada brake pad tersebut semakin meningkat. Pada beberapa penelitian menyatakan bahwa pemilihan material gesekan rem harus dirancang untuk mencapai gesekan yang stabil dalam kisaran koefisien gesekan (μ) sekitar 0,30 hingga 0,45, yang juga tergantung pada jenis kendaraan yang digunakan [3].

Brake pad adalah elemen vital dalam sistem rem kendaraan, yang berperan utama dalam mengonversi energi kinetik menjadi energi panas ketika pengereman terjadi. Kampas rem cenderung lebih cepat aus terutama dalam kondisi menantang seperti daerah perbukitan, di mana tingkat keausannya bisa hingga 53% lebih tinggi dibandingkan dengan jalan datar [4]. Seringnya pengereman dan padatnya lalu lintas bisa juga dapat mempercepat ausnya brake pad, sehingga masa pakainya jadi lebih pendek [5]. Panas yang dihasilkan saat pengereman dapat merusak struktur brake pad. Ini menyebabkan oksidasi dan mengurangi ketahanannya terhadap panas, sehingga efisiensi pengereman menurun seiring waktu. Brake pad, yang terbuat dari bahan gesekan, ditekan pada kedua sisi cakram menggunakan mekanisme mekanis, hidraulik, pneumatik, atau elektromagnetik pada kendaraan untuk menghentikannya [6]. Brake pad bersentuhan dengan piringan cakram untuk memberikan gaya penghentian, dan akibatnya, ia menjadi panas karena sejumlah kecil senyawa gesekan ditransfer ke cakram atau kampas [7]. Gesekan antara piringan cakram dan brake pad menghasilkan panas yang tinggi. Jika suhu ini melebihi batas kritis bahan, bisa terjadi berbagai masalah seperti keausan dini, penguapan minyak rem, kegagalan bantalan, retakan termal, dan getaran akibat panas [8]. Pada suhu tinggi, permukaan rotor rem bisa retak dan mengalami banyak deformasi plastis.

Keausan adalah fenomena umum yang terjadi pada setiap material yang bergesekan dengan material lain. Ini bukan sifat dasar material, melainkan respons terhadap kontak permukaan eksternal. Semua material dapat mengalami keausan melalui berbagai mekanisme. Keausan terjadi karena gesekan antara dua permukaan, yang menyebabkan perpindahan material dan pengurangan dimensi. Keausan juga dapat diartikan sebagai hilangnya material secara bertahap dari permukaan yang bersentuhan dengan benda padat, cair, atau gas [9]. Ketebalan *brake pad* yang terlalu tipis dapat mengurangi kemampuan atau kinerja pengereman, yang memperpanjang jarak

berhenti kendaraan tersebut, dan meningkatkan risiko kecelakaan. Jika brake pad habis, pengereman bisa gagal sepenuhnya, yang sangat berbahaya. Selain itu, torsi yang lebih besar pada rem cakram dibandingkan jenis rem lainnya dapat menyebabkan peningkatan keausan pada komponen rem tersebut. Dengan mengetahui batasan waktu rem yang efektif pada kecepatan *safety* 60 km/jam, pengemudi dapat memastikan bahwa kendaraannya masih dalam kondisi yang aman saat menghentikan kendaraan. *Brake pad* yang tebalnya memadai memastikan performa pengereman tetap konsisten, terutama dalam kondisi ekstrem seperti cuaca panas atau berkendara di daerah berbukit maupun pada kondisi macet [10].

Dalam penelitian ini, ada beberapa hipotesis yang dipertimbangkan. Pertama, kecepatan kendaraan sangat mempengaruhi waktu berhenti; semakin tinggi kecepatan, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk berhenti [11]. Kedua, gaya atau beban rem yang diberikan pada sistem rem juga berpengaruh [12]. Ketiga, ketebalan dan tingkat keausan *brake pad* sangat penting; *brake pad* yang aus akan memperpanjang waktu berhenti [13]. Solusi yang diterapkan untuk pengolahan data dari hasil eksperimen melibatkan hipotesis parameter yang telah disebutkan sebelumnya, yaitu untuk memprediksi atau menggunakan garis lurus untuk menggambarkan hubungan antara dua variabel atau lebih. Variabel adalah besaran yang nilainya berubah-ubah. Selanjutnya, variabel tersebut terbagi menjadi dua jenis, yaitu variabel pemberi pengaruh dan variabel terpengaruh, yang disebut dengan *multiple linear regression* [14].

2. Metode Penelitian

Metode yang diterapkan untuk mengolah data eksperimen adalah analisis Desain Taguchi, yang digunakan untuk mengevaluasi berbagai kombinasi variabel dan kondisi. Analisis ini menunjukkan bahwa meskipun produk memenuhi spesifikasi, kinerjanya yang jauh dari nilai ideal masih dapat menyebabkan kerugian

2.1. Tahapan Pertama

Pada tahap pertama, yaitu *set-up* pengujian, perlu dipastikan bahwa kendaraan roda dua berada dalam kondisi mesin yang baik dan memenuhi persyaratan kinerja pengereman sesuai standar pabrikan. Data yang akurat sangat penting. Jika rem tidak dalam kondisi baik, hasil pengujian bisa menjadi tidak tepat atau menyesatkan. Selain itu, rem yang berfungsi dengan baik sangat penting untuk memastikan keselamatan pengemudi dan penumpang dari resiko terjadinya kecelakaan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Rem yang efisien memungkinkan pengemudi memiliki kendali penuh atas kendaraan, terutama dalam situasi darurat atau saat berkendara di kondisi jalan yang berbahaya. Kondisi rem yang optimal juga membantu meminimalkan keausan pada

komponen lain dari sistem pengereman dan meningkatkan umur kendaraan secara keseluruhan.



Gambar 1. Rem Cakram

2.2. Tahapan Kedua

Tahap kedua adalah menyiapkan alat dan bahan yang terdiri dari brake pad yang aus dengan ketebalan bervariasi, yaitu 6 mm, 4 mm, dan 2 mm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Ketebalan yang berbeda membantu memahami pengaruh keausan pada kinerja brake pad dan waktu rem.



Gambar 2. Brake Pad

2.3. Tahapan Ketiga

Tahap ketiga adalah menyiapkan batu timbangan dengan bobot 4 kg, 5 kg, dan 6 kg, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Penggunaan beban yang bervariasi sangat penting untuk memastikan akurasi dan presisi dalam pengukuran berat. Hal ini memungkinkan pengguna mengkalibrasi timbangan dengan lebih tepat, sehingga mengurangi kesalahan pengukuran yang mungkin terjadi akibat perubahan kondisi seperti suhu atau getaran.



Gambar 3. Batu Timbangan

2.4. Tahapan Keempat

Tahap keempat adalah menyiapkan roller. Roller ini digunakan untuk menahan roda belakang saat pengujian sepeda motor, agar motor tetap diam di tempat dan tidak bergerak maju selama pengujian secara stasioner. Roller ini mencegah ban belakang bergerak maju ketika mesin dihidupkan, memungkinkan pengujian dilakukan tanpa kendaraan bergerak. Roller digunakan untuk simulasi kondisi jalan pada sepeda motor saat motor diam, sehingga pengujian dapat fokus pada aspek performa, seperti akselerasi, torsi, atau efisiensi tanpa gerakan maju fisik kendaraan, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Roller Stasioner

2.5. Tahapan Kelima

Tahap kelima adalah menyiapkan alat ukur dan pendukungnya, seperti mikrometer digital, stopwatch, kamera, dan worksheet data hasil pengujian. Dalam pengujian, alat ukur seperti mikrometer digital dan stopwatch memiliki peranan penting, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5. Mikrometer digital digunakan untuk mengukur dimensi kecil seperti ketebalan atau diameter benda dengan tingkat presisi yang sangat tinggi, sehingga hasil pengujian lebih akurat. Stopwatch, di sisi lain, digunakan untuk mengukur waktu secara tepat, biasanya dalam uji durasi atau kecepatan yang memerlukan ketepatan waktu bahkan hingga milidetik.



Gambar 5. Stopwatch dan Mikrometer Digital

2.6. Tahapan Akhir

Tahap terakhir adalah melakukan pengujian dan pengolahan data untuk mendapatkan persamaan empiris waktu pengereman terhadap semua variabel

yang mempengaruhi waktu rem, yaitu tebal kampas rem, kecepatan, dan beban rem yang diberikan, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Pengujian dan Set-up Kendaraan Roda Dua

3. Hasil dan Pembahasan

Brake pad yang baru umumnya memiliki ketebalan antara 8 hingga 10 mm. Pengujian waktu rem dilakukan dengan tiga kali pengulangan untuk setiap tingkat kecepatan, guna memperoleh hasil yang optimal. Pengulangan pengujian atau replikasi ini membantu mengidentifikasi dan mengurangi kesalahan yang mungkin terjadi, sehingga memastikan hasil yang diperoleh konsisten dan tidak dipengaruhi oleh faktor-faktor acak. Hal ini juga memberikan gambaran yang lebih jelas tentang performa yang diuji.

Faktor-faktor dan levelnya telah ditentukan untuk melaksanakan percobaan berdasarkan hipotesis yang disebutkan sebelumnya, melalui diskusi bersama tim kerja dan dengan mempertimbangkan panduan atau prosedur uji. Oleh karena itu, faktor-faktor dan levelnya ditampilkan dalam tabel 1.

Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
Tebal brake pad (mm)	2	4	6
Beban rem (kg)	4	5	6
Kecepatan (Km/jam)	20	40	60

Array ortogonal yang paling sesuai untuk eksperimen adalah array L9. Oleh karena itu, total sembilan percobaan akan dilaksanakan sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.

Eksperimen	Level 1	Level 2	Level 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

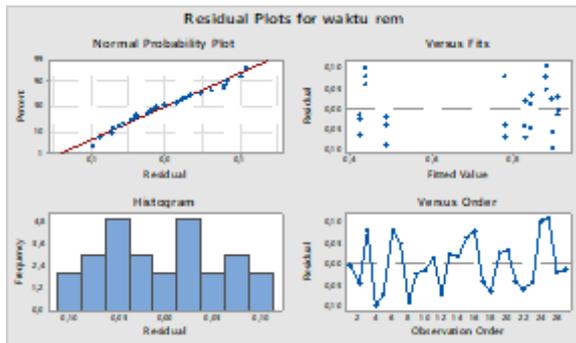
Oleh karena ada 3 replikasi hasil data pengujian maka akan diperoleh 27 data hasil pengujian, sehingga dengan bantuan software diperoleh hasilnya sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.

3.1. Metode Taguchi dan Replikasi Hasil Pengujian

Eksperimen n	Level 1	Level 2	Level 3	Waktu rem
1	1	1	1	0,91
2	1	2	2	0,80
3	1	3	3	0,86
4	2	1	2	0,80
5	2	2	3	0,76
6	2	3	1	0,52
7	3	1	3	0,93
8	3	2	1	0,40
9	3	3	2	0,40
10	1	1	1	0,90
11	1	2	2	0,86
12	1	3	3	0,71
13	2	1	2	0,92
14	2	2	3	0,85
15	2	3	1	0,50
16	3	1	3	0,96
17	3	2	1	0,45
18	3	3	2	0,36
19	1	1	1	0,94
20	1	2	2	0,88
21	1	3	3	0,74
22	2	1	2	0,84
23	2	2	3	0,79
24	2	3	1	0,54
25	3	1	3	0,99
26	3	2	1	0,47
27	3	3	2	0,41

3.2. Uji Hipotesis dan Multiregression

Hasil uji parameter dari data eksperimen menunjukkan bahwa variabel waktu rem dipengaruhi oleh faktor perubahan, termasuk data replikasi. Dengan menggunakan software Minitab, menemukan bahwa data tersebut berdistribusi normal dengan tingkat kepercayaan 95%. Pada grafik normal probability plot, titik-titik yang mewakili data terurut membentuk pola linear yang dekat dengan garis diagonal yaitu garis 45 derajat atau bergradien $m=1$. Garis diagonal ini menunjukkan hubungan ideal untuk data yang berdistribusi normal. Jika titik-titik mengikuti garis ini, maka data dianggap telah berdistribusi normal.



Gambar 7. Uji Residual Waktu Rem

Faktor ketebalan brake pad, beban rem, dan kecepatan kendaraan terbukti sangat berpengaruh sekali dalam menentukan nilai waktu rem, di mana P-Value yang diperoleh lebih kecil dari 0,05 berdasarkan analisis varians ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Analisa Varians

Faktor	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	1,040	0,346	85,75	0,000
		294	981		
Tebal brake pad	1	0,276	0,276	68,28	0,000
		27	272		
Beban rem	1	0,551	0,551	136,2	0,000
		25	250	4	
Kecepatan	1	0,213	0,213	52,75	0,000
		42	422		
Error	23	0,093	0,004		
		06	046		
Lack-of-Fit	5	0,057	0,011	5,92	0,002
		86	573		
		0,035	0,001		
Pure Error	18	20	956		
Total	26	1,134			
		01			

Model Summary

S R-sq R-sq(adj) R-sq(pred)
 0,0636099 91,79% 90,72% 88,44%

Tabel 5. Coefficients

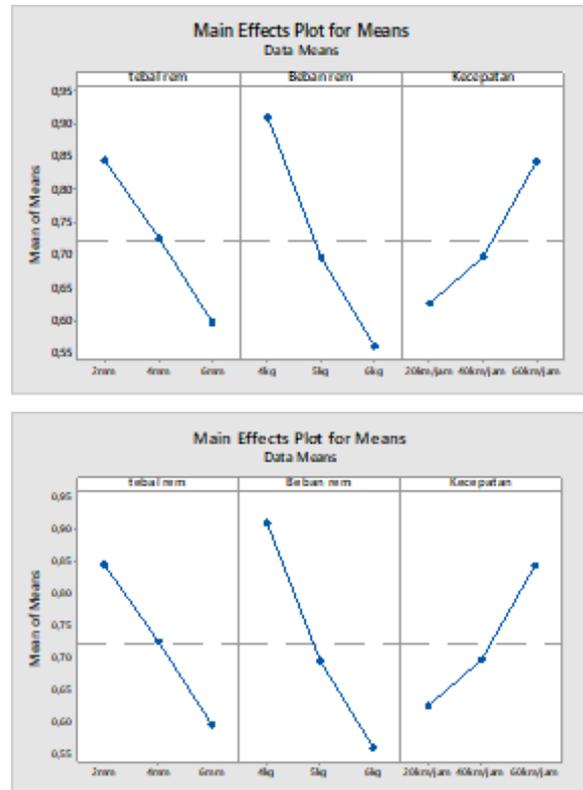
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1,62	0,087	18,70	0,000	
	69	0			
Tebal brake pad	-	0,007	-	0,000	1,00
	0,06	50	8,26		
	194				
Beban rem	-	0,015	-	0,000	1,00
	0,17	0	11,67		
	50				
Kecepatan	0,00	0,000	7,26	0,000	1,00
	5444	750			

Dengan demikian, diperoleh persamaan multiregresi pada persamaan (1), sebagaimana ditunjukkan berikut ini.

$$\text{Waktu rem} = 1,6269 - 0,06194 \text{ Tebal brake pad} - 0,1750 \text{ Beban rem} + 0,005444 \text{ Kecepatan} \quad (1)$$

3.3. Main Effects Plot for Means

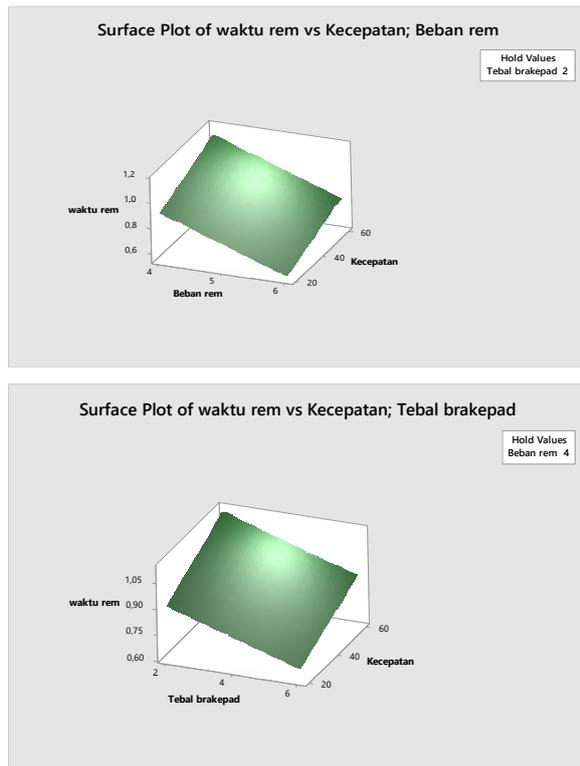
Selanjutnya, interaksi variabel perubah terhadap respon waktu rem efektif dapat dilihat pada Gambar 8, yang menunjukkan bahwa waktu rem efektif untuk uji layak jalan diuji pada ketebalan brake pad 2 mm dengan beban rem minimum 4 kg pada kecepatan aman 60 km/jam



Gambar 8. Main Effect Plot for Means

3.4. Surface Plots

Berdasarkan data dari jurnal transportasi, kecepatan rata-rata yang dianggap aman untuk sepeda motor adalah sekitar 60 km/jam [15]. Dari pengujian data eksperimen tersebut dengan menggunakan analisa *taguchi design* dengan *option smaller is better*, beban rem minimum yang diperlukan adalah 4 kg saat sepeda motor beroperasi pada kecepatan aman ini, dengan ketebalan brake pad 2-3 mm. Oleh karena itu, waktu rem yang direkomendasikan untuk uji layak jalan sepeda motor harus berkisar antara 1,07 hingga 1,13 detik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9. Jika waktu rem melebihi rentang ini, maka sepeda motor dapat dianggap tidak layak jalan, karena berisiko tinggi terhadap kecelakaan.



Gambar 9. Surface Plot Waktu Rem Rekomendasi terhadap Tebal Brake Pad 2-3 mm

4. Kesimpulan

Menurut penelitian, semakin tipis ketebalan kampas rem tersebut, maka kinerja pengereman juga semakin menurun. Penurunan ini ditandai dengan peningkatan waktu rem, yang membuat sepeda motor lebih sulit untuk dihentikan pergerakannya. Banyak pengguna kendaraan roda dua yang masih menggunakan kampas rem meskipun ketebalannya telah mencapai batas minimal 2-3 mm, bahkan dengan memajukan settingan, terutama pada roda dua dengan rem belakang tromol. Hal ini sangat berbahaya sekali dan dapat menyebabkan kegagalan rem atau malfungsi. Oleh karena itu, penting untuk memberikan informasi mengenai batasan waktu uji layak jalan yang aman bagi kendaraan roda dua. Rekomendasi waktu rem minimum yang dipenuhi harus berkisar antara 1,07 hingga 1,13 detik untuk mencegah risiko kecelakaan pada kecepatan safety 60 km/jam yang telah ditetapkan bagi sepeda motor roda dua umumnya.

Daftar Rujukan

- [1] K. M. Jensen, I. F. Santos, and H. J. P. Corstens., 2024. Prediction of brake pad wear and remaining useful life considering varying vehicle mass and an experimental holistic approach. *Wear*, vol.552–553, pp.1-16.
- [2] B. Joshi., 2013. Modification of Disc Brakes Using Rotating Brake Pads. *IOSR J. Mech. Civ. Eng*, 7 (3), pp 43–45.
- [3] V. Chauhan, J. Bijwe, and A. Darpe., 2021. Functionalization of alumina particles to improve the performance of eco-friendly brake-pads. *Friction*, 9 (5), pp.1213–1226.
- [4] Y. Zhang., 2024. Influence of thermal expansion and wear of brake pads/discs on the average and maximum temperatures of railway brake discs. *Int. Commun. Heat Mass Transf*, 158, p. 107858.
- [5] M. Timur and H. Kuşçu., 2014. Heat transfer of brake pad used in the autos after friction and examination of thermal tension analysis. *Mechanika*, 20(1), pp.17–23.
- [6] LP. H. Talele, G. B. Kute, R. P. Bhoje, G. S. Kumavat., 2021. Tribological Behaviour Of Passenger Vehicle Brake Pad Material. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8 (7), pp.54–60.
- [7] U. V. Saindane, S. Soni, and J. V. Menghani., 2021. Dry sliding behavior of carbon-based brake pad materials. *Int. J. Eng. Trans. B Appl*, 34 (11), pp.2517–2524.
- [8] A. Belhocine, A. R. Abu Bakar, and M. Bouchetara., 2016. Thermal and structural analysis of disc brake assembly during single stop braking event. *Aust. J. Mech. Eng*, 14 (1), pp.26–38.
- [9] T. Ahmad, D. Darmanto, and S. Imam., 2018. Analisis Keausan Kampas Rem Pada Disc Brake Dengan Variasi Kecepatan. *J. Ilm. Momentum*, 14 (1), pp.27-32.
- [10] M. Mhalsekar, S. Malusare, and P. Ghatge., 2018. Effect of Brake Liner Wear and Surface finish on Braking time. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 9 (5), pp.435–439.
- [11] L. ode M. A. Baharudin and H. Pranoto., 2020. Analisis Pengaruh Kecepatan Terhadap Jarak Dan Waktu. *J. Tek. Mesin*, 9 (3), pp.195–201.
- [12] W. S. Asyen, Aprizal, and Y. Rizal., 2023. Analisis Gaya Dan Lama Waktu Pengereman Pada Alat Uji Motor Diesel Mesin 2500 cc. *ENOTEK J. Energi dan Inov. Teknol*, 2 (2), pp.54–58.
- [13] K. Choudhuri and A. Shekhar., 2022. Predicting Brake Pad Wear Using Machine Learning. *EuroBrake 2020*, pp. 2–5.
- [14] W. A. L. Sinaga, S. Sumarno, and I. P. Sari., 2022. The Application of Multiple Linear Regression Method for Population Estimation Gunung Malela District. *JOMLAI J. Mach. Learn. Artif. Intell*, 1 (1), pp. 55–64.
- [15] B. Susanto, S. Malkhamah, and L. B. Suparma., 2020. Risiko Kecelakaan Sepeda Motor Pada Simpang Prioritas. *J. Transp*, 19 (3), pp.161–170.