

## Analisis Densitas, Laju Keausan Dan Konduktivitas Termal *Brake Pad* Berbasis Tembaga Untuk Kereta Api Cepat 160 Km/Jam Menggunakan *Test Rig*

Budi Santoso<sup>1</sup> \*, Rusnaldy<sup>2</sup>, Paryanto<sup>3</sup>, Nur Kholis F<sup>4</sup>, Sulthan Toriq<sup>5</sup>

<sup>a</sup> Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia

\*E-mail: : budisan163@students.undip.ac.id

### Abstract

*This study aims to evaluate the physical and thermal performance of copper-based composite brake pads used in high-speed train braking systems under simulated conditions of 160 km/h using a scaled test rig. The experimental tests focused on measuring key parameters including density, specific wear rate, and thermal conductivity, under two braking pressures: 0.95 bar and 1.25 bar. Density was measured using the Archimedes principle with a density meter, resulting in a value of 5.13 g/cm<sup>3</sup>. Wear rate was calculated from the mass loss before and after braking and the braking energy, yielding an average wear rate of 0.377 cm<sup>3</sup>/MJ. Thermal conductivity was determined using Fourier's law, based on experimental data from surface temperature, frictional force, and braking duration. Results show an increase in thermal conductivity from 105.7 W/m·K at 0.95 bar to 133.8 W/m·K at 1.25 bar. The findings indicate that increased braking pressure does not significantly affect the wear rate but leads to higher thermal conductivity due to elevated frictional temperatures. The novelty of this research lies in the use of an indigenously developed scaled test rig and real experimental measurements, offering a scientific foundation for developing domestically produced copper-based brake pads to support national high-speed rail independence in Indonesia.*

**Keywords:** *copper-based brake pad, high-speed train, scaled test rig, wear rate, thermal conductivity*

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa fisis dan termal *brake pad* berbasis tembaga (Cu-based composite) yang digunakan pada sistem pengereman kereta api cepat dengan kecepatan simulasi 160 km/jam menggunakan *test rig* berskala. Pengujian dilakukan untuk mengetahui parameter penting seperti densitas, laju keausan spesifik, dan konduktivitas termal, dengan dua variasi tekanan pengereman yaitu 0,95 bar dan 1,25 bar. Pengukuran densitas dilakukan menggunakan prinsip Archimedes dengan alat density meter, menghasilkan nilai densitas sebesar 5,13 g/cm<sup>3</sup>. Laju keausan dihitung berdasarkan selisih massa sebelum dan sesudah pengereman serta energi pengereman, menghasilkan nilai keausan rata-rata sebesar 0,377 cm<sup>3</sup>/MJ. Pengukuran konduktivitas termal dilakukan menggunakan pendekatan hukum Fourier berdasarkan data eksperimental suhu permukaan, gaya gesek, dan waktu pengereman. Hasilnya menunjukkan bahwa konduktivitas termal meningkat dari 105,7 W/m·K pada tekanan 0,95 bar menjadi 133,8 W/m·K pada tekanan 1,25 bar. Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pengereman tidak mempengaruhi laju keausan secara signifikan, namun berdampak terhadap peningkatan konduktivitas termal akibat kenaikan suhu gesekan. Kebaruan dari studi ini adalah penggunaan *test rig* berskala hasil pengembangan dalam negeri dan pengukuran berbasis data eksperimen aktual, yang dapat menjadi acuan pengembangan *brake pad* tembaga nasional untuk mendukung kemandirian transportasi perkeretaapian cepat di Indonesia.

**Kata kunci:** *brake pad* berbasis tembaga, kereta api cepat, *test rig* berskala, laju keausan, konduktivitas termal

### 1. Pendahuluan

Peningkatan kecepatan dan beban operasional pada sistem transportasi kereta api cepat menuntut sistem pengereman yang tidak hanya andal secara mekanis, tetapi juga stabil secara termal. Salah satu komponen utama dalam sistem pengereman tersebut adalah bantalan/kampas rem (*brake pad*), yang berfungsi sebagai elemen gesek utama untuk mengubah energi kinetik menjadi energi panas melalui proses gesekan dengan cakram rem (*disc brake*). Dalam kondisi operasional berkecepatan tinggi, *brake pad* harus mampu mempertahankan kestabilan performa meskipun mengalami

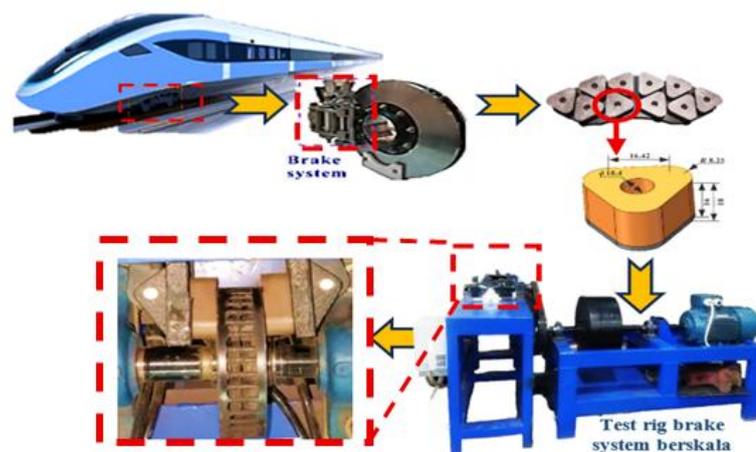
suhu tinggi, tekanan kontak besar, dan gaya gesek berulang, tanpa mengalami degradasi fungsional seperti *fading*, keausan cepat, atau deformasi termal.

*Brake pad*, yang merupakan salah satu komponen paling krusial dari sistem rem kereta kecepatan tinggi, memiliki peran penting dalam pengereman gesekan, memastikan operasi yang aman dari kereta kecepatan tinggi. Namun, pengembangan *brake pad* berkualitas tinggi sangat diperlukan, mengingat peningkatan kecepatan kereta kecepatan tinggi saat ini [1-4]. Material berbasis tembaga (*copper-based composites*) telah banyak digunakan dalam aplikasi *brake pad* untuk kereta api cepat karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi (sekitar 200–400 W/m·K untuk tembaga murni), ketahanan aus yang baik, dan kestabilan dimensi pada suhu tinggi. Sejumlah penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik material ini, di antaranya kecepatan pengereman dan tekanan pengereman adalah kontributor utama bagi kemampuan pengereman, koefisien gesekan rata-rata dari *brake pad* berbasis Cu bervariasi hampir antara 0,35 dan 0,45 dengan kondisi pengereman yang berbeda, maksimum dari temperatur, jarak pengereman, waktu pengereman dan laju keausan *brake pad* masing-masing adalah 473°C, 3506 m, 138 detik dan 0,14 cm/MJ [5]. Tingkat keausan *brake pad* yang dikawinkan dengan cakram keramik adalah 0,147 cm<sup>3</sup>/MJ, jauh lebih rendah daripada dengan pasangan baja: 0,338 cm<sup>3</sup>/MJ, menunjukkan sifat yang diinginkan untuk kereta berkecepatan tinggi, karena sedikit daya rekata antara cakram keramik dan matriks logam [6]. Tingkat keausan setiap *brake pad* dan *disc brake* dihitung rata-ratanya setelah 10 percobaan yang diulang [7]. Sistem rem kereta menggunakan rem cakram yang dipasang pada poros dan roda. Pasangan gesekan terdiri dari cakram baja cor yang berventilasi rendah dan pad rem sinter, keduanya sesuai dengan standar *UIC* konduktivitas termal (k) 40,4 W/m·K [8]. Namun demikian, sebagian besar studi tersebut menggunakan peralatan uji laboratorium standar atau pendekatan simulasi numerik, yang belum sepenuhnya mewakili kondisi dinamis pengereman kereta cepat sesungguhnya.

Pengujian performa *brake pad* bertujuan untuk memastikan efektivitas, ketahanan, dan keamanan dalam berbagai kondisi operasional. Jenis-jenis uji yang umum dilakukan meliputi:

- a. Uji Koefisien Gesek – Menilai efektivitas pengereman pada berbagai kecepatan dan beban.
- b. Uji Keausan – Mengukur umur pakai dan ketahanan terhadap keausan selama penggunaan.
- c. Uji Ketahanan Termal – Menilai performa *brake pad* saat suhu tinggi akibat pengereman intensif.
- d. Uji Daya Tahan (*Durability*) – Menguji konsistensi kinerja setelah siklus pengereman berulang.
- e. Uji Kebisingan dan Getaran – Memastikan kenyamanan dan keamanan dengan meminimalkan noise dan getaran.
- f. Uji Performa di Lingkungan Basah – Menilai efektivitas pengereman dalam kondisi lembab atau hujan.
- g. Uji Pembentukan Debu – Mengukur jumlah dan sifat debu yang dihasilkan, untuk keamanan dan kebersihan sistem rem.
- h. Uji Kecepatan Tinggi – Menguji kemampuan pengereman secara aman dan efektif pada kecepatan tinggi seperti pada kereta api cepat.

Gyimahetal [9]. menyelidiki perilaku keausan dari bahan gesekan berbasis tembaga baru untuk bantalan rem kereta dengan pengujian rem *pad-on-disc* bertekanan tinggi. Gambar 1. Di bawah ini menunjukkan skema penelitian *brake pad* komersial produk impor material berbasis tembaga untuk kereta api cepat 160 km/jam dengan *disc brake* material baja cor menggunakan *test rig* berskala .



**Gambar 1.** Skema pengujian sistem pengereman pasangan *brake pad* & *disc brake*.

Infrastruktur transportasi memainkan peran dasar yang tidak tergantikan dalam pengembangan ekonomi nasional. Setiap perubahan dan peningkatan adalah fitur penting dari perubahan ekonomi yang cepat [10]. Sebagai bagian dari proyek strategis nasional dalam pengembangan kereta api cepat Merah Putih, Universitas Diponegoro, dengan dukungan riset nasional, telah mengembangkan test rig berskala sebagai sarana pengujian sistem pengereman kereta api cepat yang mampu mensimulasikan kecepatan hingga 160 km/jam. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa fisis dan

termal dari *brake pad* berbasis tembaga, dengan fokus pada pengukuran densitas, laju keausan spesifik, dan konduktivitas termal berdasarkan data eksperimental.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penggunaan *test rig* berskala buatan dalam negeri dan pendekatan perhitungan konduktivitas termal berbasis data eksperimental aktual, bukan berdasarkan asumsi teoritis atau simulasi numerik semata. Studi ini mengintegrasikan evaluasi sifat fisis (densitas dan keausan) serta termal (konduktivitas panas) dalam satu rangkaian uji eksperimental yang komprehensif. *Brake pad* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan produk komersial berbasis tembaga yang diproduksi oleh luar negeri dan telah digunakan pada kereta api cepat berkecepatan 160 km/jam. Material ini diuji secara fisis dan termal untuk mendapatkan data densitas, laju keausan, dan konduktivitas termalnya secara akurat. Data hasil pengujian ini diharapkan menjadi dasar rujukan bagi pengembangan material *brake pad* berbasis tembaga produksi dalam negeri di masa mendatang. Hasil penelitian ini juga berkontribusi terhadap validasi sistem *test rig* berskala sebagai sarana pengujian sistem pengereman kereta api cepat. Penguatan riset ini juga sejalan dengan program substitusi impor dan penguatan industri komponen dalam negeri untuk mendukung kemandirian sistem transportasi nasional, khususnya pada sektor perkeretaapian kecepatan tinggi.

## 2. Material dan metode penelitian

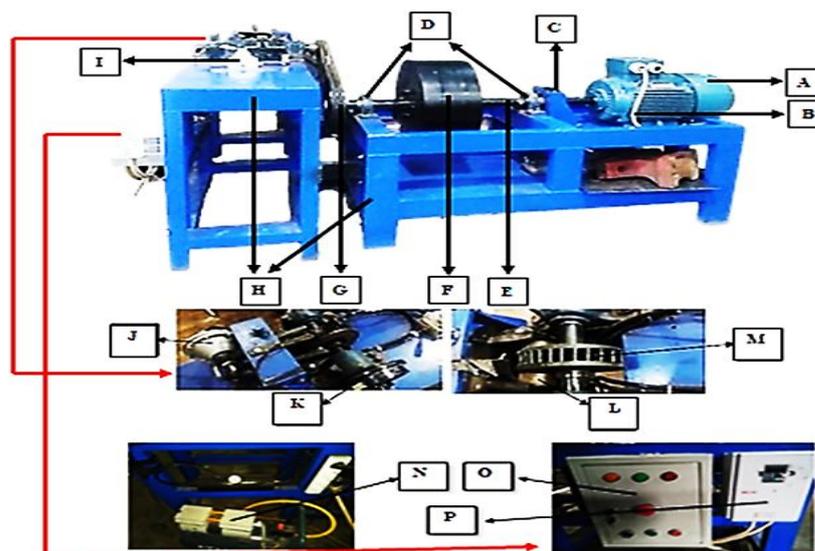
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa fisis dan termal *brake pad* berbasis tembaga dalam aplikasi pengereman kereta api cepat. Pengujian dilakukan secara eksperimental menggunakan *test rig* berskala, dengan parameter simulasi kondisi pengereman pada kecepatan setara 160 km/jam. Data utama yang dianalisis meliputi densitas, laju keausan spesifik, dan konduktivitas termal, dengan dua variasi tekanan pengereman sebagai variabel bebas (0,95 bar dan 1,25 bar).

### 2.1. Material dan Data Awal

Material uji merupakan *brake pad* komersial berbasis tembaga (*Cu-based composite*) produksi luar negeri yang digunakan pada kereta api cepat berkecepatan 160 km/jam. Material ini menjadi acuan pengembangan produk lokal dengan karakteristik sebanding. Parameter teknis awal material yang digunakan meliputi: luas permukaan kontak: 2604 mm<sup>2</sup>, ketebalan *brake pad*: 25 mm, kecepatan flywheel: 1437 rpm, diameter flywheel: 500 mm, massa flywheel: 262,175 kg, tekanan pengereman: 0,95 bar dan 1,25 bar, suhu permukaan: direkam menggunakan kamera *thermal image*.

### 2.2. Lokasi dan Peralatan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Peralatan utama yang digunakan dalam pengujian terdiri dari: *Test rig* berskala model flywheel sebagai simulasi beban inersia kereta, density meter untuk mengukur densitas material *brake pad*, tachometer digital untuk memantau kecepatan rotasi roda linier, kamera *thermal image* untuk merekam perubahan suhu permukaan selama proses pengereman, regulator tekanan dan *pressure gauge* yang terpasang pada sistem pneumatik guna mengontrol tekanan pengereman secara presisi. Gambar 2. dibawah menunjukkan *test rig* berskala yang digunakan untuk pengujian pengereman *brake pad* berbasis tembaga.



**Gambar 2.** *Test rig* berskala uji pengereman *brake pad* kereta api cepat 160 km/jam dan bagian-bagian *test rig* A) Motor Listrik, B) Kabel Power, C) Kopling magnetik, D) Bearing, E) Poros, F) Flywheel, G) Sabuk dan Pulley, H) Rangka, I) Handle Rem, J) Sistem Pneumatik, K) Roda, L) *Brake pad*, M) *Disc Brake*, N) Kompresor, O) Panel Kelistrikan, P) Inverter

Peralatan telah dikalibrasi dan diatur untuk menghasilkan data eksperimental yang akurat dan dapat diandalkan. Peralatan yang digunakan untuk mendapatkan data dapat ditunjukkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Peralatan uji pengereman

### 2.3. Prosedur dan Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dalam tahapan sebagai berikut: karakterisasi awal material dilakukan dengan pengukuran massa, dimensi, dan densitas menggunakan density meter, pengujian performa pengereman dilakukan pada *test rig* berskala dalam dua variasi tekanan (0,95 dan 1,25 bar) dengan kecepatan tetap roda linier 4354 rpm, perekaman suhu permukaan sebelum dan sesudah pengereman menggunakan kamera thermal, perhitungan laju keausan berdasarkan massa hilang setelah pengujian dan volume keausan, Perhitungan konduktivitas termal dilakukan menggunakan pendekatan hukum Fourier . Gambar 4 menunjukkan diagram alir penelitian untuk mendapatkan data hasil pengujian.



Gambar 4. Diagram alir penelitian *brake pad* berbasis tembaga menggunakan *test rig* berskala

Massa jenis, yang juga dikenal sebagai densitas, kerapatan, atau kepadatan, merupakan ukuran massa per satuan volume suatu benda. Densitas dihitung sebagai perbandingan antara massa suatu material dengan volumenya, dan dinyatakan dalam satuan gram per sentimeter kubik ( $\text{g/cm}^3$ ) atau kilogram per meter kubik ( $\text{kg/m}^3$ ). Parameter ini sangat penting dalam karakterisasi material karena memberikan informasi dasar mengenai sifat fisik suatu bahan.

Dalam konteks *brake pad* untuk kereta api cepat, densitas menjadi salah satu indikator utama untuk memahami komposisi internal dan kualitas material yang digunakan. Pengukuran densitas yang akurat diperlukan untuk memastikan konsistensi kualitas produk, identifikasi jenis material, serta optimalisasi proses manufaktur. Densitas yang sesuai akan memastikan bahwa *brake pad* memiliki struktur yang padat namun tidak terlalu rapuh, sehingga mampu menahan tekanan dan gesekan selama proses pengereman berkecepatan tinggi.

Densitas juga menjadi parameter penting dalam perhitungan laju keausan (*wear rate*). Untuk menghitung laju keausan, diperlukan beberapa data seperti densitas *brake pad*, energi kinetik dari sistem *test rig* (yang berkaitan dengan energi pengereman), serta massa *brake pad* sebelum dan sesudah pengujian. Kombinasi parameter tersebut memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat material yang hilang akibat gesekan.

Pengujian sifat fisik dan mekanik dari *brake pad*, termasuk densitas, porositas, kekerasan, kekuatan geser, dan kekuatan tekan, dilakukan berdasarkan standar *China Railway Product Certification (CRCC)*. Untuk pengukuran densitas dan porositas secara khusus, metode yang digunakan umumnya mengacu pada prinsip Archimedes, yaitu teknik pengukuran berdasarkan perbedaan massa suatu benda dalam udara dan dalam air untuk menentukan volumenya secara tidak langsung [6].

Dalam penelitian ini, standar yang digunakan untuk pengujian densitas *brake pad* adalah ASTM D792-20, yang merupakan metode standar internasional untuk menentukan densitas bahan padat non-logam menggunakan prinsip perendaman [7]. Pengujian ini sangat krusial karena memberikan data awal mengenai homogenitas struktur, potensi adanya rongga internal, serta kesesuaian material terhadap spesifikasi teknis untuk aplikasi pada kereta api berkecepatan tinggi.

Secara umum, terdapat dua pendekatan utama yang dapat digunakan untuk menentukan densitas *brake pad*:

1. Pengukuran eksperimental menggunakan density meter dimana alat density meter atau digital densimeter merupakan perangkat yang memungkinkan pengukuran densitas dengan cepat dan akurat, menggunakan prinsip perpindahan massa terhadap volume cairan atau udara. Dalam penelitian ini, metode inilah yang digunakan untuk memperoleh nilai densitas aktual *brake pad* karena memberikan hasil yang lebih praktis, langsung, dan sesuai untuk spesimen padat dengan bentuk tidak beraturan.
2. Perhitungan teoritis berdasarkan prinsip Archimedes dimana selain alat digital, densitas juga dapat dihitung secara manual menggunakan persamaan Archimedes, yaitu dengan membandingkan berat sampel di udara dan beratnya saat dicelupkan ke dalam air. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\rho_{(app)} = \rho_{water} \times \frac{mass\ dry}{mass\ dry - mass\ wet} \quad (1)$$

Dimana:

$\rho_{app}$	=	Apparent Density	(gr/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{water}$	=	Densitas air	(gr/cm <sup>3</sup> )
$mass\ dry$	=	Berat sampel di luar air	(gr)
$mass\ wett$	=	Berat sampel di dalam air	(gr)

Keausan (*wear*) adalah hilangnya materi dari permukaan benda padat sebagai akibat dari adanya gerakan mekanik. Keausan umumnya dianalogikan sebagai hilangnya materi akibat interaksi mekanik dua permukaan yang bergerak *sliding* dan dibebani. Ini merupakan fenomena normal yang terjadi jika dua benda permukaannya saling bergesekan, maka akan ada keausan atau perpindahan materi yang terjadi antara dua benda yang bergesekan [11]. Konduktivitas termal dari bahan *disc* dan *pad* meningkat secara eksponensial dengan jarak dari permukaan kontak [12]. Laju keausan ( $Q$ ) *brake pad* pada kereta api cepat adalah ukuran seberapa cepat material *brake pad* mengalami keausan atau pengikisan selama penggunaan. Ini adalah parameter penting yang membantu menentukan umur pakai *brake pad* dan efektivitas sistem pengereman. Persamaan yang digunakan untuk menghitung laju keausan ( $Q$ ) adalah sebagai berikut [5]:

$$Q = \frac{m_a - m_b}{\rho \cdot W} \quad (2)$$

Dimana :

$Q$	=	laju keausan <i>brake pad</i>	cm <sup>3</sup> /MJ
$m_a$	=	massa <i>brake pad</i> sebelum diuji pengereman	g
$m_b$	=	massa <i>brake pad</i> setelah diuji pengereman	g
$\rho$	=	kerapatan/kepadatan/density <i>brake pad</i>	g/cm <sup>3</sup>
$W$	=	energi selama pengereman	MJ

Di mana  $Q$  adalah laju keausan rem, dihitung sebagai volume material yang terkikis per unit kerja pengereman. Perubahan massa (sebelum dan sesudah pengereman)  $M_a - M_b$  menunjukkan berapa banyak material yang hilang dari *brake pad* selama 10 kali uji pengereman dengan kecepatan yang sama tetapi tekanan yang bervariasi yaitu 0,95 bar dan 1,25 bar. Dibagi dengan densitas atau kepadatan ( $\rho$ ) untuk mengonversi massa yang hilang menjadi volume yang hilang, kemudian dibagi dengan total kerja pengereman ( $W$ ) untuk menunjukkan berapa banyak volume yang hilang per energi pengereman yang dilakukan.

Pada proses pengereman kereta api cepat, energi kinetik ( $E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ ) dari kereta yang sedang melaju harus dikonversi menjadi energi panas agar kereta dapat berhenti. Konversi ini terjadi melalui gesekan antara *brake pad* dan *disc brake*, di mana gaya gesek menghasilkan panas yang terakumulasi di permukaan kontak.

Peningkatan suhu akibat gesekan tersebut dapat mencapai nilai tinggi dalam waktu singkat, tergantung pada kecepatan, massa, durasi pengereman, dan tekanan rem. Suhu tinggi ini berdampak langsung pada laju keausan *brake pad*, karena dapat mempercepat oksidasi, mengubah tekanan kontak akibat pemuaian termal, serta memicu keausan abrasif dan adhesif.

Secara ilmiah, hal ini menunjukkan bahwa pengereman bukan hanya proses perlambatan, tetapi juga merupakan proses termomekanik kompleks yang mempengaruhi performa dan umur pakai brake pad. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya mencatat energi kinetik dan gaya gesek, tetapi juga memantau suhu permukaan dan menghitung laju keausan serta konduktivitas termal sebagai bagian dari analisis performa rem secara menyeluruh.

Pada proses gesekan kecepatan tinggi, energi kinetik akan diubah menjadi energi panas pada permukaan material, sehingga suhu permukaan gesekan akan naik dengan cepat, dan kemudian kekuatan luluh permukaan logam matriks material dan dual akan menurun [13]. Energi kinetik yang dihamburkan oleh gesekan berkaitan dengan pangkat dua dari kecepatan awal menyelidiki bahan rem metalurgi serbuk untuk mobil dan kereta api [14]. Persamaan energi kinetik adalah sebagai berikut:

$$W = E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (3)$$

Dimana :

$E_k$	= Energi Kinetik	kJ
$m$	= massa <i>flywheel</i>	Kg
$v$	= kecepatan pengereman awal	m/s

Secara historis, pengukuran konduktivitas termal digunakan sebagai alat yang kuat untuk menyelidiki cacat kisi atau ketidaksempurnaan dalam padatan. Selain peluang untuk menyelidiki fenomena fisik yang menarik dan menggugah, studi konduktivitas termal juga memiliki minat teknologi yang besar. Material dengan konduktivitas termal yang sangat tinggi dan sangat rendah memiliki kepentingan teknologi. Konduktivitas termal zat padat bervariasi secara dramatis baik dalam besaran maupun ketergantungan suhu dari satu material ke material lainnya. Bervariasinya proses membuat konduktivitas termal menjadi area studi yang menarik baik secara eksperimental maupun teoretis.

Konduktivitas termal adalah kemampuan material menghantarkan panas dari suhu tinggi ke suhu rendah. Dalam sistem rem kereta api cepat, panas muncul akibat gesekan antara *brake pad* dan *disc brake*. Jika panas tidak menyebar dengan baik, dapat terjadi kerusakan seperti deformasi atau kegagalan material. Oleh karena itu, *brake pad* harus memiliki konduktivitas termal yang baik. Tembaga digunakan sebagai bahan dasar *brake pad* karena mampu menghantarkan panas dengan cepat, tahan aus, dan memiliki gesekan yang stabil dengan disc baja cor. Sifat ini membuat tembaga cocok untuk sistem pengereman kereta api cepat. Konduktivitas termal  $k$  suatu bahan ditentukan oleh hukum Fourier sebagai berikut:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

$$k = \frac{q}{A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}} = \frac{q \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta x}$$

dimana :

$q$	= fluks panas	W/m <sup>2</sup>
$k$	= konduktivitas termal	W/m·K
$A$	= luas permukaan kontak	m <sup>2</sup>
$\frac{dT}{dx}$	= gradien temperatur terhadap ketebalan material	K/m

$q$  adalah laju panas gesekan (dihitung dari gaya gesek dan kecepatan)  $q = F_{gesek} \cdot v$  atau bisa dihitung dari energi gesek dibagi waktu pengereman dimana  $A$  adalah luas kontak *pad* (m<sup>2</sup>),  $\Delta T$  adalah beda suhu antara sisi dalam dan luar *brake pad* dan  $\Delta x$  adalah ketebalan *pad* (dalam meter).

Nilai  $k$  akan menentukan seberapa cepat panas yang timbul akibat gesekan dapat mengalir ke bagian dalam *brake pad* atau ke media pendingin lainnya. Semakin tinggi nilai  $k$ , semakin efektif material tersebut dalam mengalirkan panas dan mencegah akumulasi suhu berlebih pada permukaan kontak. Dalam konteks aplikasi kereta api cepat, suhu gesekan dapat meningkat hingga lebih dari 300°C dalam waktu sangat singkat, sehingga material *pad* harus memiliki karakteristik termal dan mekanik yang optimal.

Konstituen metalik yang digunakan dalam *Cu-MMC* memberikan kekuatan, stabilitas suhu tinggi, ketahanan terhadap oksidasi, dan konduktivitas termal yang tinggi [15]. Grafit abu-abu dalam matriks dimanfaatkan untuk membentuk lapisan pelumas yang bertahan sendiri di permukaan gesekan, dan meningkatkan konduktivitas termal komposit [15].

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Densitas Brake Pad

Hasil pengujian menunjukkan bahwa densitas *brake pad* berbasis tembaga yang diuji memiliki nilai sebesar 5,13 g/cm<sup>3</sup>. Nilai ini menunjukkan bahwa material memiliki kepadatan tinggi, yang secara umum merepresentasikan struktur internal yang padat, minim pori, serta kualitas ikatan partikel logam dan penguat yang baik. Densitas yang tinggi sangat penting dalam aplikasi sistem pengereman kecepatan tinggi karena dapat meningkatkan ketahanan terhadap gaya tekan dan beban gesek yang tinggi selama proses pengereman.

Jika dibandingkan dengan standar *CRCC (China Railway Product Certification) TJ/CL 307–2014* untuk *brake pad* berbasis tembaga, nilai minimum densitas yang disyaratkan adalah  $\geq 4,8 \text{ g/cm}^3$ . Dengan demikian, nilai densitas  $5,13 \text{ g/cm}^3$  yang diperoleh dari spesimen uji ini telah memenuhi bahkan melampaui standar minimum internasional, yang menunjukkan bahwa kualitas struktur internal material cukup baik dan layak untuk digunakan pada aplikasi pengereman kereta api cepat. Tingginya densitas ini juga mencerminkan bahwa proses manufaktur dari *brake pad* telah menghasilkan material dengan kompaksi dan sintering yang optimal, sehingga void (rongga internal) dalam material dapat diminimalisir. Hal ini juga berimplikasi positif terhadap performa termal dan mekanik *brake pad*, termasuk kemampuan menghantarkan panas secara merata serta menahan deformasi akibat tekanan kontak tinggi. Dengan kata lain, nilai densitas  $5,13 \text{ g/cm}^3$  merupakan indikator bahwa *brake pad* yang diuji memiliki struktur yang homogen, berkualitas tinggi, dan sesuai dengan tuntutan operasional pada sistem rem kereta api berkecepatan tinggi.

### 3.2. Hasil Perhitungan Laju Keausan *Brake pad*

Berdasarkan hasil perhitungan, laju keausan *brake pad* berbasis tembaga pada tekanan pengereman 0,95 bar adalah sebesar  $0,373\text{--}0,376 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ , sementara pada tekanan 1,25 bar nilainya sedikit meningkat menjadi  $0,377\text{--}0,378 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ . Secara rata-rata, laju keausan kedua variasi tekanan berada pada kisaran  $0,374\text{--}0,378 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ .

Nilai ini menunjukkan bahwa kenaikan tekanan pengereman dari 0,95 bar ke 1,25 bar tidak menyebabkan lonjakan signifikan terhadap laju keausan. Kestabilan laju keausan ini mengindikasikan bahwa material *brake pad* berbasis tembaga memiliki ketahanan aus yang baik, bahkan ketika mengalami tekanan kontak yang lebih tinggi, yang dalam kondisi nyata akan terjadi pada pengereman darurat atau intensif.

Secara tribologis, fenomena ini dapat dijelaskan karena material tembaga dan penguatnya mampu mempertahankan kestabilan strukturalnya meskipun suhu dan tekanan meningkat. Tembaga memiliki konduktivitas termal tinggi, sehingga panas yang timbul akibat gesekan dapat segera disebarkan, mencegah akumulasi panas berlebih di permukaan kontak yang berpotensi mempercepat keausan. Selain itu, struktur material sinter pada *brake pad* juga memberikan kekuatan ikatan antar partikel yang tinggi, sehingga tidak mudah terlepas selama proses pengereman berulang.

Jika dibandingkan dengan standar *CRCC (TJ/CL 307–2014)* dan spesifikasi umum *UIC Code 541-3*, rentang laju keausan yang diperbolehkan untuk *brake pad* berbasis tembaga adalah antara  $0,38\text{--}0,45 \text{ cm}^3/\text{MJ}$ . Maka, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa laju keausan *brake pad* yang diuji masih berada di bawah batas maksimum, bahkan sedikit lebih baik dari standar minimum, sehingga dapat dikategorikan sebagai material dengan performa aus yang sangat baik.

Dengan demikian, hasil ini memberikan indikasi kuat bahwa *brake pad* berbasis tembaga impor yang digunakan memenuhi syarat kelayakan teknis untuk aplikasi sistem pengereman kereta api cepat, serta menjadi acuan penting bagi pengembangan produk dalam negeri dengan karakteristik serupa.

Hasil lengkap dari perhitungan laju keausan untuk masing-masing siklus pengujian disajikan dalam Tabel 1. berikut ini:

**Tabel 1.** Hasil perhitungan laju keausan *brake pad* berbasis tembaga.

NO	Tekanan Pengereman (Bar)	<i>Brake Pad</i>	Massa Sebelum Pengujian Pengereman (Gram)	Massa Setelah Pengujian Pengereman (Gram)	Kepadatan/density <i>brake pad</i> ( $\text{g/cm}^3$ )	Energi selama pengereman (kJ)	Laju Keausan ( $\text{cm}^3/\text{MJ}$ )
1	0,95	I	372,542	372,505	5,13	188153,78	0,373
		II	376,424	376,383			0,376
2	1,25	I	377,613	377,502			0,378
		II	376,756	376,68			0,377

### 3.3. Hasil Perhitungan Konduktifitas Termal *Brake Pad*

Hasil perhitungan konduktifitas termal *brake pad* berbasis tembaga yang diuji pengereman dapat dilihat pada tabel 2. berikut ini :

**Tabel 2.** Hasil perhitungan konduktifitas termal *brake pad* berbasis tembaga

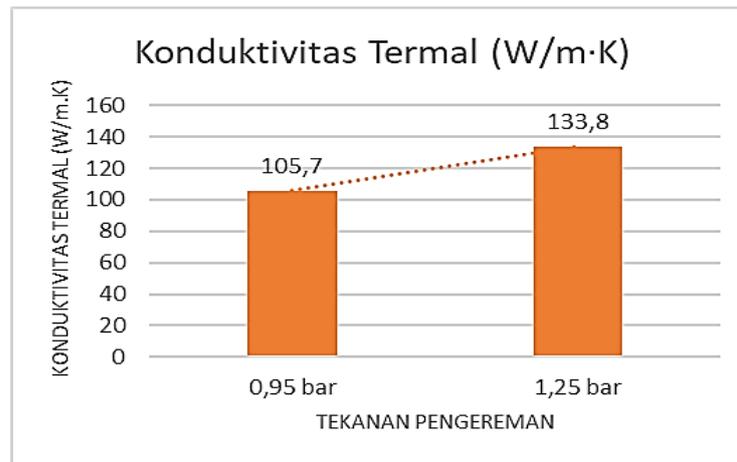
Parameter	Skenario 1 (0,95 bar)	Skenario 2 (1,25 bar)
Gaya gesek (F)	242,90 N	242,90 N
Waktu pengereman (t)	42,98 s	27,43 s
Diameter flywheel (d)	0,5 m	0,5 m
Putaran flywheel (n)	1437 rpm	1437 rpm
Suhu awal ( $T_1$ )	33 °C	33 °C
Suhu akhir ( $T_2$ )	65 °C	70 °C
$\Delta T$ (kenaikan suhu)	32 °C	37 °C

Tebal kampas rem (L)	0,025 m	0,025 m
Luas permukaan gesek (A)	0,002604 m <sup>2</sup>	0,002604 m <sup>2</sup>
Energi gesek total (E friction)	2056,6 J	1626,8 J
Energi yang diserap (diperkirakan 30%)	616,98 J	488,04 J
<b>Konduktivitas termal (k) hasil akhir)</b>	<b>105,7 W/m·K</b>	<b>133,8 W/m·K</b>

Berdasarkan data hasil pengujian, nilai konduktivitas termal ( $k$ ) *brake pad* berbasis tembaga menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara dua kondisi tekanan pengereman: Pada tekanan 0,95 bar, nilai konduktivitas termal tercatat sebesar 105,7 W/m·K. Pada tekanan 1,25 bar, nilai konduktivitas termal meningkat menjadi 133,8 W/m·K. Peningkatan ini menunjukkan bahwa tekanan pengereman yang lebih tinggi menghasilkan laju perpindahan panas yang lebih besar melalui material *brake pad*. Hal ini berkaitan langsung dengan kenaikan suhu permukaan gesekan dari 32°C menjadi 37°C dan pemendekan waktu pengereman dari 42,98 detik menjadi 27,43 detik, sehingga proses pelepasan energi panas terjadi dalam waktu yang lebih singkat namun dengan intensitas lebih tinggi.

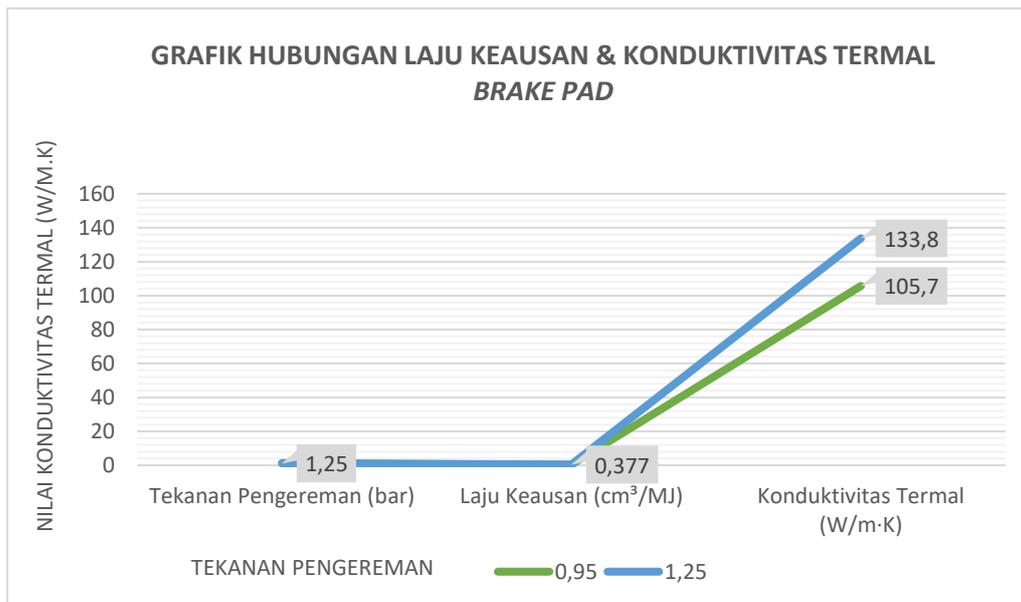
Secara fisis, nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi pada tekanan lebih besar mengindikasikan bahwa material mampu menghantarkan panas dengan lebih efisien. Efisiensi ini sangat penting dalam aplikasi rem kecepatan tinggi, karena akumulasi panas yang tidak tersalur dengan baik akan menyebabkan degradasi termal, deformasi, atau bahkan kegagalan fungsi.

Fenomena ini sesuai dengan Hukum Fourier, di mana fluks panas sebanding dengan gradien suhu dan kemampuan material menghantarkan panas (nilai  $k$ ). Pada tekanan pengereman yang lebih tinggi, beban gesek dan akumulasi panas meningkat, yang mendorong laju perpindahan panas dalam material. Material tembaga sebagai matriks utama dalam *brake pad* berperan penting karena memiliki konduktivitas termal alami yang tinggi (sekitar 200–400 W/m·K untuk tembaga murni). Jika dibandingkan dengan referensi standar: Menurut ASM Handbook, DIN 5480, dan spesifikasi material Cu-MMC dalam standar internasional lainnya, konduktivitas termal minimum yang disarankan untuk *brake pad* berbasis tembaga adalah di kisaran 50–150 W/m·K. Maka, nilai hasil uji 105,7 W/m·K dan 133,8 W/m·K berada dalam rentang standar yang sesuai, bahkan mendekati batas atas pada skenario tekanan 1,25 bar. Berikut gambar 5. grafik perbandingan konduktivitas termal *brake pad* berbasis tembaga antara 0,95 dan 1,25 bar dibawah ini :



**Gambar 5.** Grafik perbandingan konduktivitas termal *brake pad* berbasis tembaga

Gambar grafik di atas menunjukkan hubungan antara tekanan pengereman dengan konduktivitas termal dari *brake pad* berbasis tembaga yang diuji menggunakan *test rig* berskala. Terlihat bahwa peningkatan tekanan pengereman dari 0,95 bar menjadi 1,25 bar menyebabkan peningkatan nilai konduktivitas termal dari 105,7 W/m·K menjadi 133,8 W/m·K. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar tekanan pengereman, semakin tinggi suhu yang dihasilkan pada permukaan kontak antara *brake pad* dan *disc brake*, yang kemudian meningkatkan kemampuan material dalam menghantarkan panas. Peningkatan konduktivitas ini dapat dijelaskan melalui hukum Fourier, di mana fluks panas meningkat seiring dengan perbedaan suhu yang lebih besar akibat tekanan rem yang lebih tinggi. Dengan demikian, grafik ini menegaskan bahwa karakteristik termal *brake pad* sensitif terhadap perubahan tekanan pengereman, yang penting untuk dianalisis dalam performa sistem pengereman kereta api cepat.



**Gambar 6.** Grafik hubungan antara laju keausan dan konduktivitas termal *brake pad*

Gambar 6 di atas memperlihatkan hubungan antara tekanan pengereman (0,95 bar dan 1,25 bar) terhadap dua parameter kinerja *brake pad* berbasis tembaga, yaitu:

1. Laju Keausan (cm³/MJ) : Nilai tetap di 0,377 cm³/MJ untuk kedua tekanan.. Hal ini menunjukkan bahwa dalam pengujian ini, tekanan tidak berpengaruh signifikan terhadap tingkat kehilangan massa per satuan energi pengereman.
2. Konduktivitas Termal (W/m·K) : Pada tekanan 0,95 bar: konduktivitas 105,7 W/m·K, pada tekanan 1,25 bar: meningkat menjadi 133,8 W/m·K, Artinya, semakin tinggi tekanan pengereman, semakin tinggi suhu dan aliran panas yang dihasilkan, yang memicu peningkatan konduktivitas termal terukur, sesuai hukum Fourier.

Valisadi hasil keseluruhan penelitian pengujian pengereman *brake pad* berbasis tembaga dengan variasi tekanan pengereman 0,95 bar dan 1,25 bar dapat dilihat dari tabel 3. berikut ini :

**Tabel 3.** Hasil valisadi nilai pengujian pengereman *brake pad* berbasis tembaga

NO.	Hasil Pengujian	Nilai		Nilai Validasi	Referensi/Standart
		0,95 bar	1,25 bar		
1.	Densitas <i>brake pad</i> (g/cm³)	5,13		≥ 4,8 g/cm³	CRCC TJ/CL 307–2014 & UIC Code 541-3
2.	Laju Keausan (cm³/MJ)	0,374	0,377	0,38 – 0,45	CRCC Spec. TJ/CL 307–2014 ( <i>Cu</i> -based pad)
3.	Konduktivitas Termal (W/m.K)	105,7	133,8	50 – 150	Konduktivitas termal <i>Cu</i> -Composite Ref: ASM Handbook, DIN 5480

#### 4. Kesimpulan

- a. Pengujian menunjukkan bahwa densitas *brake pad* berbasis tembaga sebesar 5,13 g/cm³, masih dalam kisaran material komposit tembaga (5,0–6,2 g/cm³) seperti dilaporkan dalam berbagai studi dan paten teknis. Nilai ini mencerminkan struktur padat dan minim porositas, yang mendukung performa termal dan mekanik, seperti konduktivitas panas, ketahanan aus, dan kestabilan dimensi pada tekanan dan suhu tinggi. Dengan karakteristik tersebut, material ini memenuhi spesifikasi teknis sistem pengereman kecepatan tinggi sesuai standar UIC dan DIN.
- b. Laju keausan *brake pad* berada pada rentang 0,373–0,377 cm³/MJ, menunjukkan performa aus yang baik untuk material sinter dalam aplikasi kereta api cepat. Nilai ini sebanding dengan referensi material *Cu*-based *brake pad* di literatur. Ketahanan aus yang baik mencerminkan struktur mikro yang padat dan stabil, menjamin umur pakai dan keandalan saat pengereman berulang.
- c. Hasil perhitungan konduktivitas termal *brake pad* berbasis tembaga menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal meningkat seiring dengan peningkatan tekanan pengereman. Pada tekanan 0,95 bar, konduktivitas termal material tercatat sebesar 105,7 W/m·K, sedangkan pada tekanan 1,25 bar meningkat menjadi 133,8 W/m·K. Nilai ini masih lebih rendah dibandingkan konduktivitas tembaga murni (± 385 W/m·K), namun berada dalam kisaran wajar untuk material komposit berbasis tembaga yang digunakan dalam sistem pengereman, yaitu antara 50–150 W/m·K menurut beberapa referensi penelitian dan standar teknis internasional (seperti DIN dan UIC). Kenaikan nilai konduktivitas

termal pada tekanan lebih tinggi menunjukkan bahwa peningkatan gaya kontak mempercepat transfer panas melalui permukaan kontak *brake pad*-disc. Hal ini mendukung efisiensi disipasi panas dan kestabilan termal sistem pengereman pada kecepatan tinggi seperti 160 km/jam. Oleh karena itu, material *brake pad* ini dinilai cukup layak digunakan untuk sistem pengereman kereta api cepat dari segi kinerja termalnya, meskipun masih dapat ditingkatkan melalui pengoptimalan komposisi material dan teknik manufaktur.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementerian Keuangan atas program pendanaan Riset dan Inovasi “Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju” Nomor 33/IV/KS/06/2022 dan Nomor 505/UN7.D2/KS/VI/2022, serta PT. INKA yang telah memberikan data penelitian sehingga penelitian penting ini dapat terlaksana dan terlaksana dengan baik.

### Daftar Pustaka

- [1] H. Zhou *et al.*, “Friction and wear maps of copper metal matrix composites with different iron volume content,” *Tribol. Int.*, vol. 132, pp. 199–210, 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2018.11.027.
- [2] M. W. Shin, Y. H. Kim, and H. Jang, “Effect of the Abrasive Size on the Friction Effectiveness and Instability of Brake Friction Materials: A Case Study with Zircon,” *Tribol. Lett.*, vol. 55, no. 3, pp. 371–379, 2014, doi: 10.1007/s11249-014-0361-9.
- [3] P. Chandra Verma, L. Menapace, A. Bonfanti, R. Ciudin, S. Gialanella, and G. Straffelini, “Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments,” *Wear*, vol. 322–323, pp. 251–258, 2015, doi: 10.1016/j.wear.2014.11.019.
- [4] M. Jin, K. C. Lin, W. Shi, P. T. W. Lee, and K. X. Li, “Impacts of high-speed railways on economic growth and disparity in China,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 138, no. October 2019, pp. 158–171, 2020, doi: 10.1016/j.tra.2020.05.013.
- [5] J. Chen *et al.*, “Research on friction performance and wear rate prediction of high-speed train brake pads,” *Wear*, vol. 514–515, no. November 2022, 2023, doi: 10.1016/j.wear.2022.204564.
- [6] S. Zhao, Q. Yan, T. Peng, X. Zhang, and Y. Wen, “The braking behaviors of Cu-Based powder metallurgy brake pads mated with C/C–SiC disk for high-speed train,” *Wear*, vol. 448–449, no. February, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203237.
- [7] F. Chen *et al.*, “Braking behaviors of Cu-based PM brake pads mating with C/C–SiC and 30CrMnSi steel discs under high-energy braking,” *Wear*, vol. 486–487, no. June, 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.204019.
- [8] C. Jiguang and G. Fei, “Temperature field and thermal stress analyses of high-speed train brake disc under pad variations,” *Open Mech. Eng. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 371–378, 2015, doi: 10.2174/1874155X01509010371.
- [9] G. K. Gyimah, P. Huang, and D. Chen, “Dry sliding wear studies of copper-based powder metallurgy brake materials,” *J. Tribol.*, vol. 136, no. 4, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1115/1.4027477.
- [10] P. Central, “Study on the Influence of Friction and Wear Properties of High-Speed Rail Brake Materials under Humidity Environment and Temperature Conditions,” 2010.
- [11] P. J. Blau, “Friction Science and Technology from concepts to applications,” 2008.
- [12] S. I. Reprint, A. Yevtushenko, and M. Kuciej, *Use of Modern Materials in Technological Processes Accompanied by Frictional Heating*. 2023. doi: 10.3390/books978-3-0365-8462-1.
- [13] C. Yu, J. Chen, Q. Zhang, and W. Li, “Research progress on friction and wear properties of powder metallurgy brake pad,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 14, no. 12, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1177/16878132221126854.
- [14] W. Pei, Z. Duan, X. Gong, J. Zeng, and H. Chen, “Effect of Speed on Friction and Wear Properties of Cu-based Material,” vol. 125, no. Msee, pp. 314–319, 2017, doi: 10.2991/msee-17.2017.57.
- [15] Y. Xiao *et al.*, “Mechanical and tribological behaviors of copper metal matrix composites for brake pads used in high-speed trains,” *Tribol. Int.*, vol. 119, no. July 2017, pp. 585–592, 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2017.11.038.