

Design and Calculation of Braking System for High-Speed Train Operating at 160 km/h

Mohammad Samsul Bakhri^{1*}, Muhammad Nuzan², Hamzah Ali Nashirudin³

¹⁻³ Teknik Mesin, Politeknik Purbaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: moh.samsulbakhri@gmail.com¹

Abstract. The transport industry stands out as a crucial domain in bolstering Indonesia's journey toward economic revitalization, swift progress, and equitable distribution. At present, Indonesia is in the process of establishing a high-speed railway sector that adheres to global benchmarks. Rail-based transit systems exert considerable influence on the mobility of both individuals and commodities. Trains possess the capacity to convey substantial volumes of commuters and freight in one journey, thereby playing a role in diminishing operational expenses for transportation fleets. Braking is an important aspect of driving because it affects safety, vehicle control, and vehicle efficiency. In order to develop braking research, high-speed train braking test equipment is needed to describe the actual conditions during braking. High-speed trains are a type of train capable of traveling at speeds above 200 km/h. The braking applied to these high-speed trains involves several combined forces, including regenerative braking and pneumatic braking. In regenerative braking, deceleration occurs due to the conversion of kinetic energy into electrical power. This mechanism is carried out when the train is at an operational speed of 220 km/h until it decelerates to 160 km/h. Next, pneumatic braking was applied at a speed of 160 km/h until the train slowed down and came to a stop. This study shows how the calculation process was carried out using a scale of 1:4 at a speed of 160 km/h.

Keywords: Braking; Design; High-Speed; Pneumatic; Speed.

Abstrak. Sektor transportasi merupakan salah satu area vital untuk mendukung revitalisasi, akselerasi pertumbuhan, dan distribusi ekonomi di Indonesia. Saat ini, Indonesia sedang memasuki tahap pengembangan industri kereta cepat yang sesuai dengan standar global. Transportasi darat kereta api mempunyai pengaruh yang besar terhadap pergerakan penumpang dan barang. Di mana kereta api dapat mengangkut penumpang dan kargo dalam jumlah besar dalam satu perjalanan, hal ini membantu menghemat biaya operasional armada dengan lebih efektif. Pengereman merupakan hal yang perlu diperhatikan dalam proses berkendara karena menyangkut keselamatan, kontrol kendaraan, dan efisiensi penggunaan kendaraan. Dalam rangka pengembangan riset pengereman maka diperlukan alat uji pengereman kereta cepat untuk menggambarkan kondisi sebenarnya saat terjadi pengereman. Sedangkan kereta cepat merupakan salah satu jenis kereta api yang mampu bergerak dengan kecepatan diatas 200 km/jam. Pengereman yang diterapkan pada kereta cepat ini melibatkan beberapa gaya yang dikombinasikan diantaranya pengereman regeneratif dan pengereman pneumatik. Pada pengereman regeneratif, perlambatan terjadi akibat adanya perubahan energi gerak menjadi daya listrik, mekanisme ini dilakukan pada saat kereta berada di kecepatan operasional 220 km/jam sampai mengalami perlambatan hingga 160 km/jam. Selanjutnya pengereman pneumatik dilakukan pada kecepatan 160 km/jam sampai kereta mengalami perlambatan hingga berhenti. Penelitian ini menunjukkan bagaimana cara proses perhitungan dengan perbandingan skala 1:4 dengan kecepatan 160 km/jam.

Kata kunci: Desain; Kecepatan; Kecepatan Tinggi; Pengereman; Pneumatik.

1. LATAR BELAKANG

Sektor Transportasi merupakan salah satu bidang strategis dalam rangka mendukung pemulihan, percepatan pertumbuhan maupun pemerataan ekonomi Indonesia. Saat ini, Indonesia sedang membangun sektor kereta cepat yang memenuhi standar global. Transportasi darat kereta api mempunyai pengaruh yang besar terhadap pergerakan penumpang dan barang. Di mana kereta api dapat mengangkut penumpang dan kargo dalam jumlah besar dalam satu perjalanan, hal ini membantu menghemat biaya operasional armada dengan lebih efektif.

Dalam rangka pengembangan riset mengenai pengereman, diperlukan alat untuk menguji pengereman kereta cepat yang dapat menggambarkan situasi nyata selama proses pengereman berlangsung. Sebuah pendekatan lain untuk pengujian pengereman adalah melalui pengujian langsung pada kereta api yang beroperasi di jalur rel. Proses pengujian ini melibatkan pemasangan sensor di rem kereta untuk mengukur suhu, perlambatan, gesekan, dan gaya tekan yang terjadi. Pendekatan ini memerlukan biaya tinggi dan proses persiapan yang kompleks. Saat ini, terdapat metode pengujian yang menggunakan dinamometer skala penuh, yang dapat mengukur karakteristik yang muncul selama pengereman. Pengujian dengan dinamometer menjadi pilihan paling efisien karena dapat mengevaluasi koefisien gesek, tingkat keausan, drag braking, stop braking, dan suhu tanpa memerlukan pengujian pada kereta yang sedang beroperasi. Namun, metode pengujian skala penuh menuntut investasi alat yang besar dan komponen berukuran besar, sehingga total biaya pengujian menjadi tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan perancangan dan pembuatan perangkat uji pengereman dengan ukuran yang lebih kecil untuk menekan biaya produksinya. Laboratorium Material di Fakultas Teknik UNS telah memiliki alat uji dinamometer skala kecil untuk rem kereta api, yang mampu mengukur gaya gesek dan gaya tekan dari blok rem yang datanya tercatat di komputer. Alat uji dinamometer ini dirancang dengan skala 1:4 dari ukuran aslinya dan dapat memvariasikan kecepatan rotasi hingga 1440 rpm atau setara dengan 50 km/jam. Di sisi lainnya, kereta cepat adalah salah satu tipe kereta yang bisa bergerak dengan kecepatan melebihi 200 km/jam. Proses pengereman yang diterapkan pada kereta cepat ini melibatkan beberapa gaya yang diintegrasikan, termasuk pengereman regeneratif dan pengereman pneumatik. Pada pengereman regeneratif, perlambatan terjadi karena konversi energi gerak menjadi energi listrik, dan proses ini berlangsung saat kecepatan kereta berada pada 220 km/jam hingga melambat menjadi 160 km/jam. Setelah itu, pengereman pneumatik dilaksanakan saat kecepatan mencapai 160 km/jam sampai kereta akhirnya berhenti. Oleh sebab itu, untuk mendukung penelitian mengenai alat pengujian rem kereta cepat ini, modifikasi diperlukan dari kecepatan 50 km/jam menjadi 160 km/jam dan sistem rem yang diaplikasikan adalah sistem pengereman pneumatik dengan adanya gesekan antara cakram rem dan bantalan rem. Untuk memberikan beban, digunakan flywheel sebagai pengganti beban dari kereta dan penumpangnya.

2. KAJIAN TEORITIS

Pengereman dalam konteks kereta api yang sering dikenal sebagai “Perabaran” adalah aspek yang sangat krusial dalam pengoperasian perjalanan kereta, terutama terkait dengan keamanan dan kenyamanan selama proses pengurangan kecepatan dan penghentian. Peranan utama dari rem adalah untuk mengurangi, mengatur, dan menghentikan gesekan pada suatu mesin dengan memberikan tekanan yang berlawanan terhadap gesekan tersebut. Mengingat fungsi rem, adalah hal yang sangat krusial bagi setiap mesin, baik yang dimanfaatkan dalam transportasi, pengangkutan dan pemindahan bahan, maupun dalam berbagai jenis mesin industri lain, untuk dilengkapi dengan perangkat yang dinamakan rem.. Ketika kereta api bergerak, ia menyimpan energi kinetik. Untuk bisa berhenti, energi kinetik tersebut perlu dihilangkan melalui proses pengereman, di mana energi kinetik dikonversi menjadi energi panas akibat gesekan. Kereta api berkecepatan tinggi (HSR) memiliki pengertian yang berbeda di setiap negara. Berdasarkan definisi dari International Union of Railways (UIC), Uni Eropa menggambarkan rel dengan kecepatan tinggi sebagai jalur yang dirancang khusus untuk kecepatan minimal 250 km/jam, atau jalur yang telah ditingkatkan untuk kecepatan lebih dari 200 km/jam. Menurut Undang-Undang Perkeretaapian Indonesia No 23/2007 (Undang-Undang Perkeretaapian), kereta api kecepatan tinggi didefinisikan secara sederhana sebagai jalur dengan kecepatan lebih dari 200 km/jam. Pengereman kereta cepat digunakan untuk memperlambat suatu Gerakan transportasi, pengereman diibaratkan sebagai penghapus energi gerak/energi kinetik dan mengubah kecepatan menjadi harga nol, sehingga gerakan menjadi berhenti. atau dalam pengertian lainnya, pengereman mengubah semua atau sebagian energi kinetik kendaraan yang bergerak menjadi bentuk energi lain untuk mengurangi kecepatannya. Menurut mekanisme kerja pengereman kereta, sistem pengereman dapat diklasifikasikan menjadi beberapa sistem, antara lain yaitu sistem rem udara, rem vakum, rem elektro-pneumatik, dan lain-lain. Metode pengereman yang digunakan oleh mayoritas kereta cepat adalah elektro-pneumatik, yang menggabungkan rem udara dan rem listrik, penerapan rem ini digunakan pada saat melakukan pengereman biasa dan pengereman darurat. Perangkat pengujian pengereman ini dilakukan dengan ukuran skala laboratorium. Rentang factor penskalaan, dari 1:1 hingga 1:20, dapat dilakukan pada berbagai instrument perkeretaapian seperti ballast, rail track, roller rig, wheel set dll. Disk brake adalah komponen kereta yang berada di bagian sistem pengereman kereta dengan memanfaatkan disc rotor yang akan dijepit oleh cakram atau kanvas rem dengan tujuan untuk memperlambat putaran roda kendaraan. Sistem pengereman ini menggunakan kapiler yang digerakkan oleh piston supaya bisa mendorong brake pads ke cakram dan dijepit. Rem cakram terbuat dari cast iron. Terdapat dua

metode yang digunakan dalam klasifikasi pengereman, antara lain yaitu adhesi braking dan non-adhesi braking. Pada adhesi braking atau pengereman adhesi, gaya yang dibuat dibatasi oleh gaya maksimum antara wheelset dan rel, sedangkan pada non-adhesi braking tidak adanya batasan gaya maksimum yang terjadi. Penggabungan metode pengereman adhesi dan non-adhesi sudah umum digunakan pada kereta berkecepatan tinggi. Pada saat routine braking atau service braking jenis pengereman regeneratif braking dan disc brake, kemudian pada saat emergency braking pengereman yang dipakai adalah disk brake yang digerakkan oleh compressed air, kedua kondisi pengereman tersebut merupakan metode pengereman adhesi, namun demikian terdapat keadaan dimana koefisien adhesi menurun seiring dengan meningkatnya kecepatan kereta, sehingga diperlukan metode pengereman lainnya yaitu non-adhesi seperti contohnya yaitu pengereman eddy current, pengereman rel elektromagnetik, dan pengereman aerodinamik yang mana jenis pengereman tersebut sangat sesuai dan efektif dalam mengatasi masalah pengereman kereta berkecepatan tinggi. Kampas rem adalah bahan yang digunakan dalam sistem pengereman untuk memperlambat laju kendaraan hingga akhirnya berhenti. Ada beberapa macam brake pad yang digunakan oleh UIC pada kereta cepat menurut. Data perhitungan pengereman dapat dilihat pada Tabel 1.

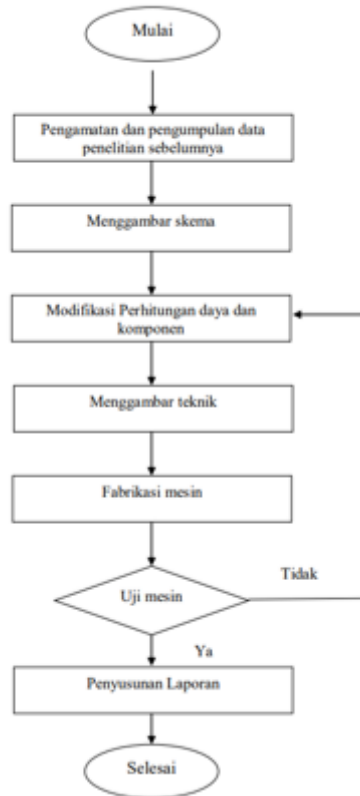
<i>List</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
<i>Brake cylinder piston area (service brake circuit)</i>	<i>510.7</i>	<i>cm²</i>
<i>Internal brake cylinder ratio</i>	<i>1</i>	<i>-</i>
<i>Rigging ratio</i>	<i>1.9</i>	<i>-</i>
<i>Rigging efficiency</i>	<i>0.95</i>	<i>-</i>
<i>Internal brake cylinder spring force</i>	<i>-1500</i>	<i>N</i>
<i>Force/Pressure ratio</i>	<i>9.218</i>	<i>kN/bar</i>

Gambar 1. Data Brake Calculation.

Untuk mengevaluasi apakah alat penguji rem berfungsi secara optimal seperti yang diharapkan, diperlukan analisis performa mesin. Berdasarkan penelitian (R. Afify, 2022), standar kinerja mesin mencakup: kecepatan rotasi motor serta roda selama proses pengereman, kecepatan sudut motor dan roda penerbangan terkait waktu, torsi motor dalam kaitannya dengan waktu, fluktuasi tekanan udara selama pengereman, kecepatan motor serta frekuensi motor, tegangan yang diterapkan pada motor dan frekuensinya, arus listrik yang mengalir pada motor dan frekuensinya, daya motor berkaitan dengan kecepatan operasional, efisiensi motor sehubungan dengan kecepatan operasional, serta energi kinetik berhubungan dengan kecepatan operasional.

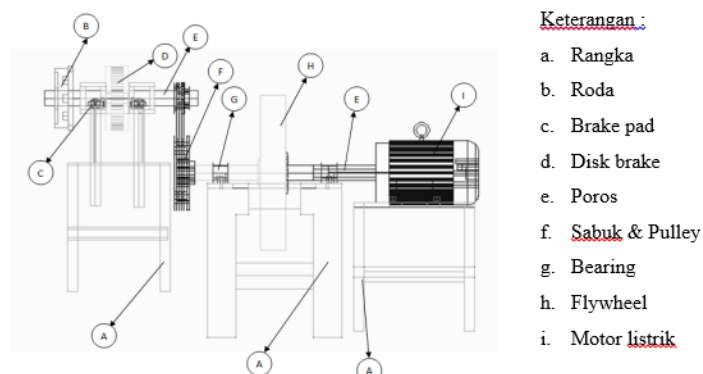
3. METODE PENELITIAN

Pendekatan yang diterapkan oleh penulis dalam penelitian ini adalah desain. Rangkaian penelitian diperlihatkan melalui diagram alir penelitian yang ada di Gambar 1.



Gambar 2. Metode penelitian.

Setelah komponen – komponen teridentifikasi maka Langkah selanjutnya adalah merancang sketsa perancangan untuk High Speed Train. Sketsa mesin dapat dilihat pada Gambar 2.

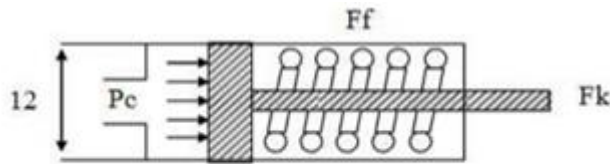


Gambar 3. Sketsa Alat Uji Pengereman.

Perhitungan persamaan rancangan test rig yang digunakan sebagai berikut :

- a. Persamaan Gaya Tekan Piston Pada silinder rem

Dorongan piston (F_k) pada silinder rem:



$$F_k = A_k \cdot P_c \cdot 10 - F_f$$

Keterangan :

F_k = Piston thrust (dorongan piston) (N), A_k = Luas silinder rem (cm^2), P_c = Tekanan pada silinder rem (kg/cm^2), F_f = Return spring force (gaya kembali pegas)

- b. Persamaan Gaya tekan disk brake secara keseluruhan

$$F_{pg} = 2 \times \{ (F_k \times I_a \times \mu) - (n \times F_r) \}$$

Keterangan :

F_{pg} = Total disk brake force (N); F_k = Piston thrust (N); i_a = Total brake rigging ratio; n = Rigging ratio in the bogie; F_r = Counter force (N); μ = Brake rigging efficiency.

- c. Persamaan Tekanan yang dihasilkan brake pad

$$P = F_p / A_b$$

Keterangan :

P = Tekanan (N/m^2); F_p = Gaya tekan tiap brake pad (N); A_b = Luas Permukaan brake pad (m^2)

- d. Persamaan Gaya Gesek Rem

$$F_g = \mu \times F_p$$

Keterangan : F_g = Gaya Gesek (N); μ = Koefisien Gesek; F_p = Gaya Tekan rem (N)

- e. Persamaan yang digunakan untuk menentukan brake power

$$B. P = \frac{T \times 2\pi N}{60}$$

Keterangan :

B.P. = Brake power (Watt) ; T = Torsi (N.m) ; N = Kecepatan putar (rpm)

- f. Massa Flywheel

Dalam perancangan alat uji dinamometer pengujian gesek stop braking, flywheel digunakan sebagai pengganti energi kinetik dari kereta api. Rumus energi kinetik adalah sebagai berikut :

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Keterangan : m = massa berat gerbong (kg); v = kecepatan kereta (m/s)

- g. Untuk menentukan jarak yang diperlukan saat pengereman, bisa memakai rumus di bawah ini.

$$\alpha = \frac{Vt - Vo}{t}$$

Keterangan :

α = perlambatan (m/s^2)

Vt = Kecepatan awal (m/s)

Vo = Kecepatan awal (m/s)

Berdasarkan nilai perlambatan yang diperoleh, maka jarak berhenti dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini:

$$s = Vo \cdot t + \frac{a t^2}{2}$$

Keterangan :

s = Jarak pengereman (m)

Vo = Kecepatan awal

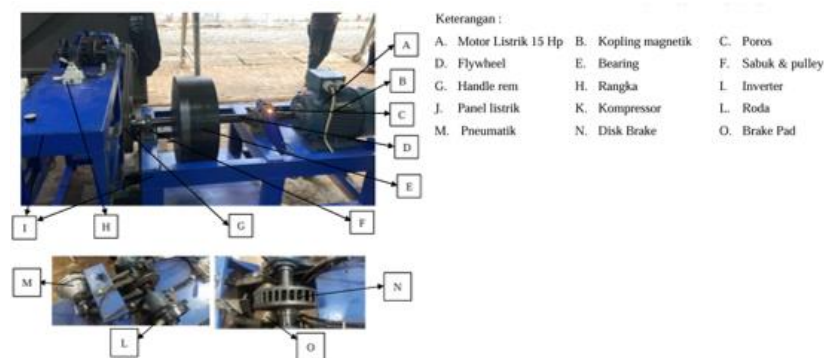
t = Waktu pengereman (s)

α = perlambatan (m/s^2)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Fabrikasi

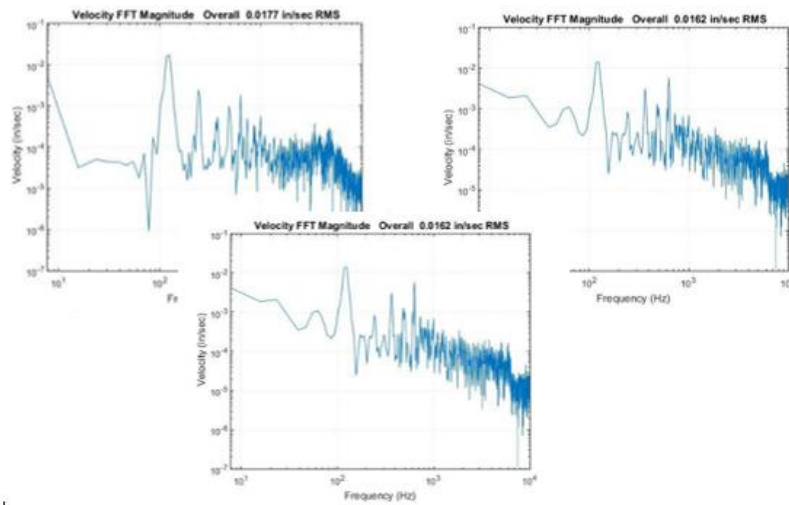
Hasil proses pembuatan prototype alat uji pengereman dengan ukuran skala 1:4 dari ukuran aslinya secara detail dapat dilihat pada ilustrasi berikut.



Gambar 4. Hasil fabrikasi.

Hasil getaran pada kedua sisi bearing.

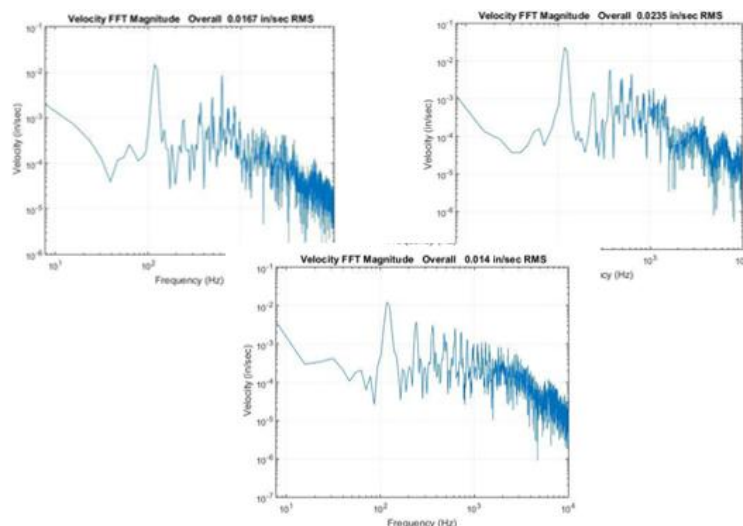
Pada kecepatan 4400 rpm Bearing Kanan



Gambar 5. Hasil Getaran pada sisi bearing kanan.

Nilai V_{rms} pada bantalan kanan saat beroperasi dengan kecepatan 4400 rpm atau setara dengan 160 km/jam menghasilkan rata-rata V_{rms} untuk akselerometer horizontal sebesar 0,017 in/s, untuk akselerometer vertikal sebesar 0,0162 in/s, dan untuk akselerometer axial sebesar 0,017 in/s. Jika dibandingkan secara keseluruhan dengan standar ISO 10816, angka V_{rms} tersebut masih berada dalam kategori yang baik untuk beroperasi.

Pada kecepatan 4400 rpm Bantalan Kiri



Gambar 6. Hasil Getaran pada sisi bearing kiri.

Nilai V_{rms} pada bantalan kanan pada putaran 4400 rpm atau setara dengan 160 km/jam mendapatkan rata-rata V_{rms} untuk accelerometer horizontal sebesar 0,0167 in/s, accelerometer vertikal mencapai 0,0235 in/s, dan accelerometer axial di angka 0,014 in/s. Ketika nilai V_{rms}

tersebut dihubungkan dengan standar ISO 10816, seluruh nilai ini masih dianggap dalam kategori baik untuk digunakan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil desain dan pengolahan data yang sudah dilakukan, beberapa kesimpulan dapat diambil sebagai berikut: (1) Perangkat untuk pengujian pengereman dapat berfungsi dengan efektif pada kecepatan 160 km/jam. (2) Getaran mekanis yang ditimbulkan oleh perangkat tersebut masih berada dalam kategori baik menurut standar ISO 10816. Usulan atau anjuran yang dapat diajukan berdasarkan temuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Melakukan penelitian lebih lanjut mengenai gaya-gaya yang terlibat dalam proses pengereman. (2) Penting untuk melakukan penelitian lebih mendalam mengenai komposisi material dari brake pad. (3) Analisis mengenai energi yang hilang pada flywheel yang akan diterapkan sebagai sumber energi pada pengereman eddy current atau pengereman secara regeneratif.

DAFTAR REFERENSI

- Afify, R., et al. (2022). Modeling, simulation, and experiments on waste kinetic energy utilization. *Journal of Energy*, 8, 231-249. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.106>
- Günay, M., Korkmaz, M. E., & Özmen, R. (2020). An investigation on braking systems used in railway vehicles. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(2), 421-431. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.01.009>
- International Union of Railways. (2012). General definitions of high speed. <http://www.uic.org/spip.php?article971>
- Jianyong, Z., et al. (2014). Aerodynamic braking device for high-speed trains: Design, simulation and experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(3), 260-270. <https://doi.org/10.1177/0954409712471620>
- Jiguang, C., & Fei, G. (2015). Temperature field and thermal stress analyses of high-speed train brake disc under pad variations. *Open Mechanical Engineering Journal*, 9(1), 371-378. <https://doi.org/10.2174/1874155X01509010371>
- Ken Wong. (2016). *Brake calculation*. Knoor-Bremse.
- Kitanov, S., & Podol'skii, A. (2008). Analysis of eddy-current and magnetic rail brakes for high-speed. *The Open Transportation Journal*, 19-28.
- Koswara, D. (2003). *Analisis gaya-gaya pengereman sistem udara tekan otomatis pada gerbong kereta api di Stasiun Besar Purwokerto* (pp. 1-43).
- Marko Reibenschuh. (2009). Modelling and analysis of thermal and stress loads in train disc brakes - Braking from 250 km/h to standstill. *Journal of Mechanical Engineering*, 55, 51-60.

- Micklitz, H.-W. (2012). The transformation of enforcement in European private law. *European Review of Private Law*, 20(4), 1185-1215. <https://doi.org/10.54648/ERPL2012075>
- Nasoha, A. M. M. (2025). Kewarganegaraan multikultural dalam negara hukum: Antara hak asasi dan kepentingan nasional. *Jurnal Pendidikan dan Kewarganegaraan Indonesia*, 7(1), 45-60. <https://doi.org/10.70134/pakehum.v1i1.210>
- Preeta Sharan, et al. (2023). The development of laboratory downscale rail-wheel test rig model with optical sensors. *Journal of Optical Fiber Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103287>
- R. Schmid, S., J. Hamrock, B., & O. Jacobson, B. (2014). *Fundamentals of Machine Elements SI Version Third Edition*. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17120>
- Wang, C., & Liu, J. (2021). An efficient anomaly detection for high-speed train braking system using broad learning system. *IEEE Access*, 9, 63825-63832. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074929>
- World Bank. (2021). *Global consumer protection and data privacy framework: Challenges in digital commerce*. <https://www.worldbank.org/digital-consumer-rights>