

PEMODELAN DAN SIMULASI *BRAKE PAD* UNTUK SEBUAH KERETA API CEPAT

*Devi Veronica¹, Paryanto², Mohammad Tauviqirrahman²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: veronicaadevi@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi geometri brake pad terhadap distribusi temperatur, deformasi, dan tegangan termal pada sistem rem cakram kereta api cepat menggunakan metode elemen hingga. Variasi geometri yang digunakan meliputi Hexagon-18, Triangle-18, Triangle-10, dan Triangle-10 dengan central ventilation hole. Simulasi dilakukan secara transient thermal-static structural coupling satu arah (one-way coupling) menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench. Hasil simulasi menunjukkan bahwa geometri Hexagon-18 memiliki temperatur maksimum terendah sebesar 305,6 °C, sedangkan Triangle-10 dengan ventilasi menghasilkan temperatur tertinggi sebesar 408,9 °C. Dari sisi mekanik, tegangan ekivalen (von Mises) maksimum tertinggi ditemukan pada geometri Hexagon-18 sebesar 143,8 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada Triangle-18 sebesar 55,6 MPa. Berdasarkan dua kriteria utama temperatur maksimum dan konsentrasi thermal stress, geometri Triangle-18 dinyatakan sebagai desain paling optimal karena mampu menjaga suhu tetap stabil sekaligus meminimalkan konsentrasi tegangan tanpa menghasilkan deformasi berlebih.

Kata Kunci: brake pad; distribusi temperatur; kereta api cepat; metode elemen hingga; tegangan termal

Abstract

This study aims to analyze the influence of brake pad geometry variations on temperature distribution, deformation, and thermal stress in high-speed train disc brake systems using the finite element method. The analyzed geometries include Hexagon-18, Triangle-18, Triangle-10, and Triangle-10 with a central ventilation hole. The simulation was performed through one-way transient thermal-static structural coupling using ANSYS Workbench. The results show that the Hexagon-18 geometry produced the lowest maximum temperature of 305.6 °C, while the Triangle-10 with ventilation exhibited the highest temperature of 408.9 °C. In terms of mechanical response, the highest equivalent von Mises stress occurred in Hexagon-18 (143.8 MPa), while the lowest was found in Triangle-18 (55.6 MPa). Considering both criteria—maximum temperature and thermal stress concentration—the Triangle-18 geometry was determined as the most optimal configuration, maintaining thermal stability while minimizing stress concentration and deformation.

Keywords: brake pad; finite element method; high-speed train; temperature distribution; thermal stress

1. Pendahuluan

Kereta api cepat (*High-Speed Train*) merupakan salah satu inovasi paling signifikan dalam sistem transportasi modern yang menawarkan keunggulan dalam kecepatan, efisiensi waktu, dan kenyamanan bagi pengguna [1]. Sejak diperkenalkannya *Shinkansen* di Jepang pada tahun 1964, teknologi ini terus berkembang di berbagai negara, seperti *TGV* di Prancis, *ICE* di Jerman, dan *CRH* di Tiongkok. Pengoperasian kereta dengan kecepatan di atas 250 km/jam menuntut performa sistem mekanik dan termal yang sangat andal, khususnya pada komponen rem yang bekerja pada kondisi beban ekstrem. Dalam konteks Indonesia, pengembangan sistem kereta api cepat juga menjadi bagian dari *Proyek Strategis Nasional* (PSN), yaitu melalui inisiatif prototipe *Kereta Cepat Merah Putih (KCMP)* yang dirancang untuk mencapai kecepatan hingga 250 km/jam.

Sistem penggeraman merupakan komponen vital dalam operasional kereta api cepat karena berfungsi untuk mengonversi energi kinetik menjadi energi panas melalui gaya gesek antara *brake pad* dan *disc brake* [2]. Pada kecepatan tinggi, energi kinetik yang besar menghasilkan akumulasi panas yang signifikan di area kontak gesek. Jika panas ini tidak terdistribusi dengan baik, dapat terjadi peningkatan temperatur lokal (*hot spot*), deformasi termal, dan bahkan retak akibat tegangan termal (*thermal cracking*) [3]. Oleh karena itu, analisis karakteristik perpindahan panas dan distribusi temperatur pada sistem rem menjadi hal yang sangat penting untuk menjaga keamanan dan keandalan operasi.

Geometri *brake pad* memiliki peran penting dalam menentukan persebaran panas karena memengaruhi pola tekanan kontak serta jalur konduksi panas antara pad dan disc. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa bentuk pad

dengan jumlah elemen gesek lebih banyak mampu mendistribusikan tekanan lebih merata sehingga mengurangi konsentrasi panas dan tegangan lokal [4]. Sebaliknya, pad dengan jumlah elemen lebih sedikit cenderung menghasilkan densitas fluks panas yang tinggi, menyebabkan peningkatan temperatur maksimum pada area kontak.

Kinerja termal sistem rem tidak hanya dipengaruhi oleh gaya gesek, tetapi juga oleh kemampuan material dalam menyerap, menyimpan, dan mengalirkan panas [5]. Ketika energi panas yang dihasilkan tidak dapat disebarluaskan dengan cepat, gradien temperatur yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya tegangan termal (*thermal stress*).

Untuk menganalisis fenomena tersebut secara detail, metode numerik seperti *Finite Element Method (FEM)* banyak digunakan karena mampu menggambarkan kondisi termal dan mekanik pada berbagai bentuk geometri secara realistik [6]. Pendekatan *one-way transient thermal-static structural coupling* terbukti efektif untuk mengevaluasi pengaruh variasi geometri terhadap distribusi temperatur, deformasi, dan tegangan termal [6], [7]. Simulasi berbasis FEM dengan perangkat lunak seperti ANSYS Workbench telah digunakan secara luas dalam penelitian desain dan optimasi sistem rem berkecepatan tinggi [8].

2. Dasar Teori

2.1 Prinsip Kerja Sistem Pengereman Kereta Api Cepat

Sistem pengereman cakram (disc brake system) bekerja berdasarkan konversi energi kinetik menjadi energi panas akibat adanya gaya gesek antara brake pad dan disc rotor. Saat gaya pengereman diterapkan, pad menekan rotor sehingga energi kinetik kendaraan berkurang dan dikonversi menjadi energi panas. Sebagian besar energi ini dilepaskan ke udara melalui konduksi, konveksi, dan radiasi, sedangkan sisanya disimpan dalam material pad dan rotor. Selama proses pengereman, energi kinetik kendaraan (E_k) dikonversi menjadi energi panas (Q) sebagai hasil gaya gesek antara pad dan disc. Energi panas Q yang dihasilkan ini selanjutnya didistribusikan antara brake pad, disc brake, dan lingkungan. Sekitar 70–90% panas tersimpan pada disc brake karena luas kontaknya yang lebih besar dan sifat konduktivitas termalnya yang tinggi [2]. Panas yang berlebih pada permukaan disc akan menyebabkan kenaikan temperatur lokal (hotspot), penurunan koefisien gesek (fading), dan tegangan termal tinggi yang dapat memicu retak termal (thermal crack) atau deformasi cakram (warping). Proses pendinginan setelah pengereman terjadi melalui konduksi ke material sekitarnya, konveksi ke udara, dan radiasi ke lingkungan. Oleh karena itu, bentuk geometri pad dan keberadaan ventilasi memainkan peran penting dalam mengatur laju perpindahan panas dan menjaga kestabilan temperatur operasi sistem rem.

2.2 Distribusi Temperatur dan Mekanisme Perpindahan Panas

Distribusi temperatur pada sistem rem dipengaruhi oleh tiga mekanisme perpindahan panas utama, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi adalah perpindahan panas di dalam material akibat perbedaan suhu antar titik. Konveksi adalah pelepasan panas dari permukaan pad dan rotor ke udara sekitarnya. Radiasi adalah perpindahan panas dalam bentuk gelombang elektromagnetik dari permukaan yang bersuhu tinggi ke lingkungan.

2.3 Thermal Stress

Tegangan termal muncul ketika pemuaian akibat panas tertahan oleh kekangan mekanis atau distribusi temperatur tidak seragam.

2.4 Pengaruh Geometri Brake Pad terhadap Sebaran Panas

Bentuk dan jumlah elemen gesek pada brake pad menentukan pola distribusi tekanan kontak serta jalur perpindahan panas. Geometri dengan jumlah elemen lebih banyak, seperti Hexagon-18 atau Triangle-18, memiliki luas area gesek total yang besar dan pola tekanan yang lebih merata, sehingga mampu menyebarkan panas secara seragam [9]. Sebaliknya, geometri dengan jumlah elemen lebih sedikit, seperti Triangle-10, memiliki area kontak per elemen lebih luas yang menyebabkan peningkatan densitas fluks panas dan kemunculan hotspot di area ujung (tips). Penambahan lubang ventilasi terpusat (central ventilation hole) dapat meningkatkan pendinginan konvektif, namun juga mengurangi luas kontak efektif pad, sehingga dapat menaikkan suhu puncak pada fase awal pengereman.

2.5 Material Brake Pad dan Disc

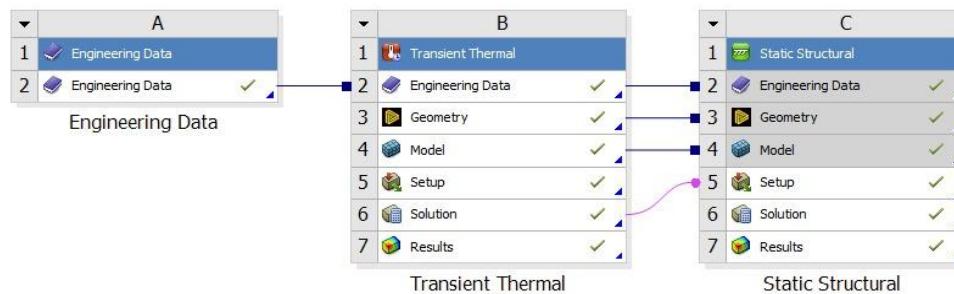
T Material brake pad umumnya terdiri dari komposit semi-metallic yang mengandung serat baja, grafit, resin fenolik, dan bahan abrasif lainnya. Material ini memiliki koefisien gesek stabil ($\mu = 0,3\text{--}0,4$), konduktivitas termal rendah ($\approx 1\text{--}5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), dan modulus elastisitas sedang (1–10 GPa), sehingga efektif menyerap panas tanpa cepat mengalami deformasi. Disc brake biasanya menggunakan baja karbon menengah atau besi tuang kelabu (gray cast iron) yang memiliki konduktivitas termal tinggi ($\approx 45\text{--}55 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) dan modulus elastisitas 100–200 GPa, sehingga berfungsi sebagai penyebar panas utama.

2.6 Finite Element Method

Metode elemen hingga (FEM) digunakan untuk menyelesaikan permasalahan konduksi panas dan analisis tegangan termal secara numerik. Model kontinu dibagi menjadi elemen-elemen kecil (discretization) yang masing-masing memiliki sifat termal dan mekanik tersendiri. Pendekatan one-way coupling digunakan pada penelitian ini, di mana hasil distribusi temperatur dari analisis termal menjadi input beban pada analisis struktural tanpa adanya umpan balik deformasi terhadap medan temperatur. Metode ini lebih efisien secara komputasi dan cukup akurat untuk menentukan distribusi tegangan termal pada sistem pengereman [10].

3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara numerik menggunakan pendekatan Finite Element Analysis (FEA). Model disc dan brake pad dibuat dengan variasi bentuk sesuai desain, lalu dilakukan simulasi transient thermal selama 50 detik untuk merepresentasikan kondisi pengereman kontinu. Hasil temperatur pada setiap waktu dipetakan ke simulasi static structural untuk memperoleh deformasi total dan tegangan ekuivalen (von Mises). Kondisi batas utama terdiri dari temperature awal, koefisien gesek, durasi pengereman, material disc brake dan material brake pad.



Gambar 1. Schematic Simulasi One Way Coupling Transient Thermal-Static Structural

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 2022 R1 dengan pendekatan Finite Element Analysis (FEA). Model disc dan pad dibuat sesuai ukuran aktual sistem pengereman kereta cepat dengan empat variasi geometri. Proses *meshing* difokuskan pada area kontak gesek menggunakan *fine element size* untuk meningkatkan akurasi pada gradien temperatur dan tegangan [5]. Model sistem rem yang digunakan terdiri dari disc brake dan brake pad yang dirancang menyerupai ukuran aktual komponen rem kereta cepat. Empat variasi bentuk pad dimodelkan untuk dibandingkan, yaitu Hexagon-18, Triangle-18, Triangle-10, dan Triangle-10 dengan central ventilation hole.

Setiap geometri memiliki perbedaan jumlah elemen gesek, luas kontak, dan volume total, yang memengaruhi distribusi panas selama proses pengereman. Model dibuat secara parametrik menggunakan DesignModeler agar dapat mempertahankan dimensi disc yang konstan, sementara bentuk pad dapat diganti dengan cepat sesuai variasi. Simulasi dilakukan selama 49 s dengan kondisi awal 50 °C. Energi panas gesek ditentukan dari gaya pengereman dan koefisien gesek sebesar 0,35 [6]. Analisis termal dilakukan untuk memperoleh distribusi temperatur pada disc brake selama proses pengereman. Sumber panas berupa fluks gesek diterapkan pada permukaan kontak antara pad dan disc, sedangkan bagian hub disc dianggap *adiabatic boundary* karena terhubung langsung ke as roda. Hasil berupa distribusi temperatur terhadap waktu kemudian dijadikan beban untuk analisis struktural. Dalam analisis struktural, tumpuan (fixed support) diberikan pada bagian hub disc untuk menahan gerakan translasi, sedangkan tepi luar disc dibiarkan bebas (free boundary) agar dapat mengalami pemuaian radial akibat panas. Dari simulasi ini diperoleh parameter utama berupa total deformation (mm) dan equivalent von Mises stress (MPa) sebagai indikator tegangan termal maksimum. Data temperatur dari *transient thermal* dimasukkan ke analisis *static structural* untuk memperoleh total deformation dan von Mises stress. Analisis dilakukan dengan batas tumpuan tetap pada hub dan kondisi bebas pada tepi luar.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pengolahan data, dapat disimpulkan bahwa:

- Hasil simulasi transient thermal menunjukkan bahwa perbedaan bentuk geometri brake pad berpengaruh signifikan terhadap persebaran temperatur pada sistem rem cakram. Pada geometri Hexagon-18, distribusi panas terlihat paling merata dengan temperatur maksimum mencapai 305,6 °C pada waktu pengereman 25 detik. Bentuk heksagonal dengan 18 blok gesek mampu menghasilkan luas kontak besar dan jalur konduksi yang kontinu, sehingga panas menyebar dengan baik ke seluruh permukaan disc. Sementara itu, geometri Triangle-18 menghasilkan temperatur maksimum 315,2 °C, dengan hotspot terlokalisasi di ujung (tips) pad bagian leading edge. Meski sedikit lebih tinggi, temperatur ini masih relatif stabil karena jumlah blok yang banyak membantu menjaga distribusi panas tetap merata. Pada geometri Triangle-10 dan Triangle-10 dengan ventilasi terpusat, temperatur maksimum meningkat menjadi 382,6 °C dan 408,9 °C. Jumlah elemen yang lebih sedikit membuat fluks panas per area kontak meningkat, sementara lubang ventilasi memang mempercepat pendinginan di sekitar pusat pad, namun mengurangi luas kontak efektif sehingga menyebabkan peningkatan suhu puncak.
- Analisis static structural dengan beban temperatur hasil transient thermal memperlihatkan bahwa tegangan ekuivalen (von Mises) bervariasi sesuai geometri. Nilai tegangan maksimum tertinggi muncul pada Hexagon-18 sebesar 143,8 MPa, sedangkan yang terendah terdapat pada Triangle-18 sebesar 55,6 MPa. Deformasi maksimum

untuk Hexagon-18 adalah 0,0486 mm, sedangkan Triangle-18 mencapai 0,0857 mm. Pada geometri Triangle-10, deformasi meningkat menjadi 0,106 mm, dan pada Triangle-10 ventilasi, nilai deformasi sedikit menurun menjadi 0,098 mm akibat efek konveksi dari lubang ventilasi. Seluruh nilai tegangan masih di bawah batas elastis material baja rotor (≈ 250 – 300 MPa), sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem rem masih bekerja aman tanpa risiko deformasi permanen.

3. Jika dibandingkan secara keseluruhan, Hexagon-18 unggul dalam penyebaran panas, namun memiliki tegangan termal tertinggi. Sebaliknya, Triangle-18 menunjukkan keseimbangan terbaik antara temperatur maksimum rendah (315 °C) dan tegangan minimum (55 MPa), dengan deformasi yang masih dalam batas aman. Oleh karena itu, geometri Triangle-18 dinyatakan sebagai konfigurasi paling optimal dalam meminimalkan temperatur maksimum dan konsentrasi tegangan termal pada sistem rem kereta cepat.
4. Selain pengaruh langsung terhadap deformasi, distribusi tegangan termal juga berdampak pada umur pakai (service life) dari komponen rem. Gradien temperatur tinggi pada siklus penggereman berulang dapat menyebabkan thermal fatigue dan munculnya microcrack pada permukaan rotor. Penelitian Zhang et al. [1] menyebutkan bahwa perbedaan temperatur antar siklus di atas 150 °C dapat menurunkan umur rotor hingga 30%. Berdasarkan hasil simulasi, Triangle-18 memiliki distribusi tegangan yang lebih homogen, sehingga secara teoritis memiliki umur kelelahan termal paling panjang dibandingkan variasi lainnya.

5. Daftar Pustaka

- [1] R. Limpert, *Brake Design and Safety*, 3rd ed. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2011.
- [2] S. H. Lee, “Numerical evaluation of temperature distribution in high-speed train disc brakes,” *Int. J. Mech. Eng. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 44–52, 2022, doi: 10.1016/j.ijmer.2022.04.008.
- [3] A. Singh, P. Kumar, dan H. Chattopadhyay, “Effect of pad geometry on frictional heat generation in disc brakes,” *Tribol. Int.*, vol. 180, no. Dec. 2023, hal. 108027, 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108027.
- [4] J. Park, S. Lee, dan K. H. Kim, “Thermal gradient analysis of brake discs with varying vent configurations,” *Procedia Eng.*, vol. 227, pp. 298–305, 2023, doi: 10.1016/j.proeng.2023.09.026.
- [5] X. Zhang, L. Wang, dan Y. Huang, “Thermal and structural analysis of disc brakes using finite element methods,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 856, pp. 81–86, 2023, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.856.81.
- [6] S. Liu dan H. Yu, “One-way thermal–structural coupling in brake disc FEM analysis,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 231, no. Jan. 2024, hal. 121102, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.121102.
- [7] M. Al-Khudairi, R. Rahman, dan A. F. Hasan, “Modeling of heat generation and dissipation in disc brakes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 153, no. Feb. 2024, hal. 107321, 2024, doi: 10.1016/j.englfailanal.2024.107321.
- [8] Y. Zhou, Q. Li, dan W. Chen, “Coupled thermal-mechanical analysis of railway disc brakes under emergency braking,” *Railw. Eng. Sci.*, vol. 31, no. 2, pp. 155–166, 2023, doi: 10.1007/s40534-023-00231-9.
- [9] R. Kumar dan S. Sundaram, “Optimization of brake pad design parameters using response surface methodology,” *Mater. Today: Proc.*, vol. 94, 2024, pp. 1423–1431, doi: 10.1016/j.matpr.2024.03.091.
- [10] L. Wang, Y. Zhang, dan C. Chen, “Thermo-mechanical behavior analysis of high-speed train disc brake under different braking loads,” *Wear*, vol. 532–533, 2024, p. 205142, doi: 10.1016/j.wear.2024.205142.