

## STUDI TENTANG STRATEGI PENDINGINAN DAN MANAJEMEN TERMAL PADA PERMUKAAN CAKRAM SAAT Pengereman DENGAN MENGUNAKAN ANSYS

**Qomaruddin<sup>1</sup>, Rochmad Winarso<sup>1</sup>, Slamet Khoeron<sup>1a</sup>, Hera Setiawan<sup>1</sup>,  
Taufiq Hidayat<sup>1</sup>, Malik Setyawan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus  
Korespondensi:

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus  
email: slamet.khoeron@umk.ac.id

### ABSTRAK

Sistem pengereman yang tidak optimal menjadi penyebab utama terjadinya kecelakaan kendaraan. Pengereman adalah proses mengurangi kecepatan atau menghentikan kendaraan melalui gesekan antara bantalan rem dan cakram yang menghasilkan panas berlebih. Pada mobil listrik perkotaan, pengereman bisa menjadi kurang optimal jika panas berlebih akibat gesekan tidak dikelola dengan baik sehingga menyebabkan penurunan performa pengereman. Dalam Penelitian yang dilakukan menerapkan pentingnya metode pendinginan cakram, seperti termoelektrik, pelepasan udara panas, dan pemilihan kampas rem, serta mengkaji pengaruh fluks panas dan konveksi terhadap distribusi panas, dampak daya rem dan waktu pengereman, serta efektivitasnya. Pendingin termoelektrik dalam menjaga stabilitas suhu dan efisiensi sistem pengereman. Metode penelitian menggunakan alat uji dengan penggerak motor listrik dan berbagai tingkat beban pada pedal rem untuk mengamati respon sistem terhadap variasi beban, dengan melakukan pengukuran distribusi panas menggunakan enam sensor suhu pada radius cakram. Simulasi ANSYS menunjukkan bahwa distribusi panas pada cakram rem menjadi lebih merata dengan adanya variasi fluks panas, yang menyebabkan suhu pengereman minimum meningkat seiring dengan meningkatnya daya rem (Pb). Namun pada Pb 2,8 fluks panas menurun meskipun daya rem meningkat, menunjukkan adanya faktor lain yang mempengaruhi performa. Sebaliknya, pendingin termoelektrik efektif dalam menjaga suhu rem tetap stabil terhadap variasi dalam daya rem dan waktu pengereman, lebih baik daripada hanya mengandalkan perubahan fluks panas.

**Kata kunci:** sistem pengereman, termoelektrik, panas berlebih, distribusi panas.

### ABSTRACT

*A braking system that is not optimal is the main cause of vehicle accidents. Braking is the process of reducing speed or stopping a vehicle through friction between the brake pads and discs, which produces excess heat. In urban electric cars, braking can be suboptimal if excess heat from friction is not managed properly, causing a decrease in braking performance. This research assesses the importance of disc cooling methods, such as thermoelectric, hot air release, and brake lining selection, and examines the influence of heat flux and convection on heat distribution, the impact of brake power and braking time, as well as the effectiveness of thermoelectric coolers in maintaining temperature stability and braking system efficiency. The research method uses test equipment with an electric motor drive and various levels of load on the brake pedal to*

*observe the system response to load variations, by measuring heat distribution using six temperature sensors on the disc radius and simulating using ANSYS software. ANSYS simulation shows that the heat distribution on the brake disc becomes more even with variations in heat flux, which causes the minimum braking temperature to increase with increasing brake power ( $P_b$ ). However, at  $P_b$  2,8 the heat flux decreases even though the brake power increases, indicating other factors influence the performance. In contrast, thermoelectric coolers are effective in keeping brake temperatures stable despite variations in brake power and braking time, better than relying solely on changes in heat flux.*

**Keywords:** *braking system, thermoelectric, overheating, heat distribution.*

## 1. PENDAHULUAN

Sistem pengereman yang tidak optimal menjadi salah satu faktor penting penyebab terjadinya kecelakaan di jalan raya, khususnya pada kendaraan bermotor. Kendaraan listrik, seperti mobil listrik perkotaan, juga tidak luput dari masalah. Mengandalkan sistem pengereman hidrolik yang mengubah tekanan oli dari tuas rem menjadi gerakan pada piston, mendorong bantalan rem bersentuhan dengan cakram dan menimbulkan gesekan yang menghasilkan panas [1].

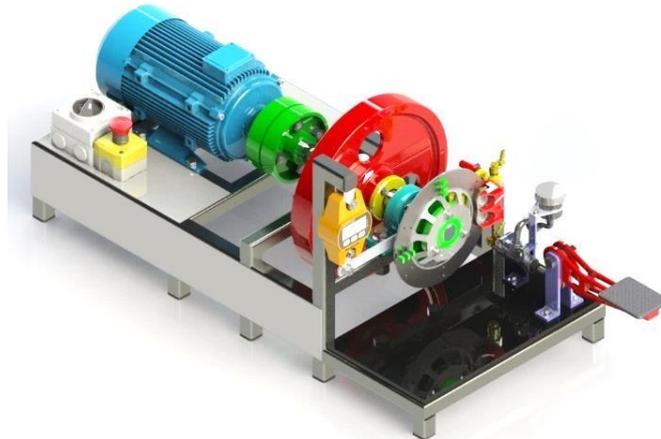
Kapasitas energi yang lebih kecil pada mobil listrik perkotaan meningkatkan risiko masalah pengereman. Proses gesekan yang berulang-ulang antara pad dan piringan menghasilkan panas yang tidak dapat dihindari [2]. Namun, jika panas tidak segera dihilangkan, disk dapat menjadi terlalu panas, menimbulkan celah udara panas yang mengganggu kinerja pengereman dan berpotensi menimbulkan kecelakaan.

Studi terbaru menunjukkan bahwa pendinginan rem cakram merupakan langkah penting untuk menghindari keausan berlebihan. Sistem pendingin baik melalui semprotan uap air maupun pelepasan udara panas alami menjadi solusi untuk menjaga performa pengereman tetap optimal [3]. Selain itu, pemilihan kampas rem yang tepat juga berperan penting dalam menentukan ketahanan pengereman. Untuk meningkatkan efisiensi sistem pengereman, analisis distribusi panas pada rem cakram merupakan faktor penting [4]. Keausan rem cakram dipengaruhi oleh berbagai faktor, dan pemahaman yang lebih mendalam tentang distribusi panas dapat membantu mengembangkan sistem pengereman yang lebih efisien dan tahan lama di masa depan.

Sistem pengereman yang efisien semakin penting karena kendaraan masa depan cenderung menjadi lebih kompleks dan bertenaga. Salah satu komponen terpenting pada kendaraan jalan raya adalah sistem pengereman, yang berfungsi untuk memperlambat kendaraan. Sistem rem gesek pada kendaraan terdiri dari rem tromol dan rem cakram, dengan rem cakram memiliki keunggulan lebih [5]. Cakram rem biasanya terbuat dari besi cor kelabu atau komposit keramik yang terhubung ke roda atau poros. Untuk mereduksi panas, berbagai percobaan seperti penggantian bahan dan penambahan baling-baling telah dilakukan sebagai cara meningkatkan pendinginan rotor cakram melalui desain saluran udara pada bumper mobil, memungkinkan pendinginan paksa yang lebih efektif. Pengembangan sistem pengereman yang optimal tidak hanya meningkatkan keselamatan tetapi juga mempercepat transisi menuju mobilitas yang lebih berkelanjutan.

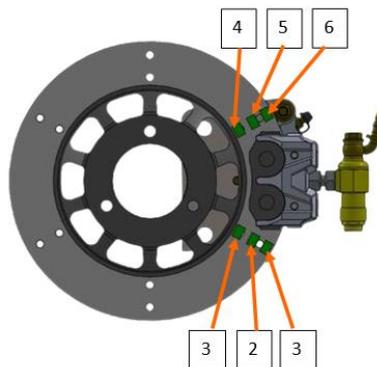
## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Pemodelan alat uji dalam Gambar 1. Menggunakan penggerak motor listrik dengan spesifikasi tenaga 2 HP, putaran 1400 rpm, dan tegangan 220/380 V. Menunjukkan bahwa eksperimen memerlukan peralatan yang cukup kuat dan stabil untuk menjalankan proses pengukuran dengan baik. Pembebanan pada pedal rem juga menjadi bagian penting dalam eksperimen yang dilakukan, dengan tiga level berbeda, yaitu 1 kg, 1,5 kg, dan 2 kg, untuk mengamati respons sistem pada variasi pembebanan.



Gambar 1. Alat uji sistem pengereman tipe cakram solid

Dalam percobaan, analisis menyeluruh terhadap distribusi panas pada bantalan kontak dan cakram telah dilakukan. Pemilihan peralatan dan bahan yang sesuai untuk menjamin keakuratan data yang diperoleh. Enam sensor mlx90614 diposisikan pada radius cakram, meliputi radius dalam, tengah, dan luar, memungkinkan pengukuran suhu panas secara detail [6]. Model piringan padat dipilih untuk menjaga konsistensi hasil pengukuran dapat dilihat pada Gambar 2. Pengukuran distribusi panas antar bidang kontak pada piringan dilakukan dengan menggunakan alat uji tipe padat, dengan memperhatikan radius daerah piringan. Proses pengukuran meliputi pengukuran diameter luar dan dalam serta ketebalan cakram menggunakan jangka sorong untuk memastikan keakuratan data dapat dilihat pada Tabel 1. Geometri bidang kontak bantalan rem annular pada cakram rem menggambarkan permukaan kontak pada aspek geometris sistem pengereman.

Gambar 2. Cakram tipe *solid disc*

Tabel 1. Dimensi rotor dan bantalan rem

Parameter	Nilai	Simbol
Jari-jari dalam (cm)	8,65	$r_i$
Jari-jari luar (cm)	11,45	$r_o$
Jari-jari tengah (cm)	10,05	$r$
Tebal (4mm)	0,4	$T$
Kecepatan sudut disc (rad/s)	146,5	$\omega$

## 2.1 Pengukuran data eksperimen

Pengukuran geometri master silinder dapat di lihat pada Table 2.

Tabel 2. Dimensi master silinder dan silinder cakram

Komponen	Dimensi (mm)
Diameter master silinder	13
Diameter silinder cakram	20

Langkah perhitungan berfungsi sebagai referensi dalam analisis untuk mendapatkan data yang akurat selama proses pengereman. Mengingat bahwa gaya tekan pada pedal rem tidak selalu konsisten, variasi dalam gaya tekan pedal rem diperlukan. Dilakukan variasi gaya tekan pedal sebesar 9,8 N, 14,7 N, dan 19,6 N. Hasil perhitungan ditampilkan dalam Tabel 3. yang menunjukkan data dari berbagai gaya tekan yang diterapkan selama pengereman.

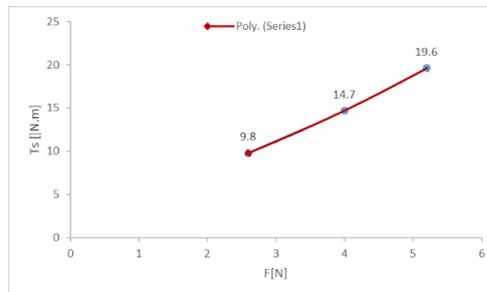
Tabel 3. Dimensi master silinder dan silinder cakram

F (N)	FK (N)	Pe (N/mm <sup>2</sup> )	Fp (N)	Fs (N)	Ts (N.m)
9,8	26,4	0,2	63,4	25,4	2,6
14,7	39,2	0,3	95,1	38,2	4
19,6	53,9	0,4	127,5	50	5,2

Diskripsi: F adalah gaya pada pedal, FK adalah gaya yang dihasilkan pedal rem, Pe adalah tekanan hidrolik, Fp gaya tekan pad ke cakram, Fs adalah gaya gesek, Ts adalah torsi gesek.

Garis merah solid pada Gambar 3 menggambarkan hasil kalibrasi polinomial antara gaya tekan (N) dan torsi gesek (N.m). Grafik ini menunjukkan hubungan matematis yang dijelaskan oleh Persamaan (1), di mana polinomial digunakan untuk menyajikan data pengukuran dengan presisi tinggi, memungkinkan analisis yang lebih akurat mengenai kecocokan antara dua parameter tersebut.

$$T_s = 0.2244F^2 + 2.0192F + 3.0333 \quad (1)$$



Gambar 3. Hubungan antara beban pedal dengan torsi gesek

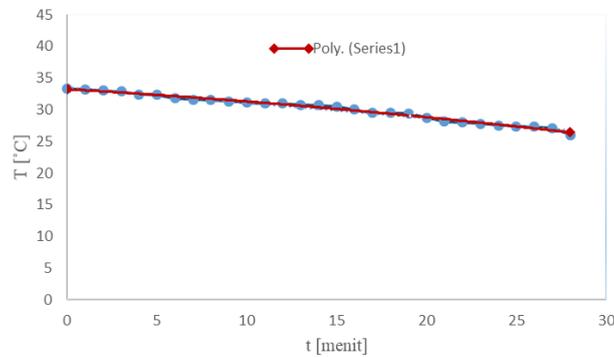
Nilai tekan pada pedal rem memberikan dampak yang signifikan terhadap gaya yang dihasilkan pada silinder piston, di mana gaya tekan yang lebih tinggi menghasilkan tekanan yang lebih besar dan langsung mempengaruhi kinerja sistem pengereman. Tekanan yang lebih besar ini memperkuat gaya pada master silinder rem serta silinder cakram, sehingga pad rem menekan piringan cakram dengan kekuatan lebih besar [7]. Hal ini terlihat jelas pada Gambar 3, yang menunjukkan hubungan antara gaya tekan pedal rem dan torsi gesek selama pengereman [8]. Dengan memahami pengaruh variasi nilai tekan pedal rem terhadap gaya gesek dan torsi gesek, kita dapat mengoptimalkan desain sistem pengereman untuk berbagai kondisi mengemudi [9].

## 2.2 Penerapan termoelektrik pada piringan cakram

Teknologi termoelektrik diterapkan pada piringan cakram selama interaksi antara pad rem dan cakram yang berputar untuk mengurangi panas yang dihasilkan dari kontak tersebut. Perangkat termoelektrik diposisikan secara strategis di area di mana cakram berputar memasuki master silinder pad, dengan penutup berbahan aluminium untuk melindungi piringan cakram. Penggunaan teknologi ini efektif dalam menurunkan

suhu dari kontak permukaan antara pad dan cakram [10]. Pengamatan dilakukan dengan mengukur perubahan suhu seiring waktu pendinginan, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4. Di Gambar 4, garis merah solid menunjukkan pencocokan polinomial antara temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan waktu (menit) yang disajikan dalam bentuk polinomial sesuai dengan Persamaan (2).

$$T = -0.0028t^2 - 0.1641t + 33.214 \quad (2)$$



Gambar 4. Perubahan temperatur pada termoelektrik cover cakram terhadap waktu

### 2.3 Proses Persiapan Simulasi dengan ANSYS

Metode simulasi dengan menggunakan software ANSYS 19.0 melibatkan beberapa tahapan yang sistematis untuk memastikan parameter dalam analisis terpenuhi. Pemodelan komponen dilakukan menggunakan Autodesk Inventor Professional 2020. Geometri cakram rem dan kampas rem dibuat secara presisi sesuai spesifikasi yang tercantum pada Tabel 1. Komponen yang dimodelkan diimpor ke ANSYS untuk pra-pemrosesan sebelum dilakukan simulasi kondisi tunak. dilakukan. Tahap impor memerlukan format file yang kompatibel, seperti .IGS atau .STEP, untuk memastikan keterbacaan dan kelancaran proses simulasi.

Pemilihan sifat material seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. diperlukan untuk simulasi yang melibatkan penggunaan besi cor kelabu untuk cakram rem dan asbes untuk kampas rem, dengan mempertimbangkan sifat seperti densitas, modulus elastisitas, dan konduktivitas termal untuk memastikan keakuratan dalam pemodelan material. Proses meshing dilakukan dengan membagi menjadi dua bagian, yaitu sisi stasioner dan sisi bergerak, seperti terlihat pada Gambar 5. Pentingnya meshing yang tepat adalah untuk menghasilkan data ekstrak yang akurat. Pada area kontak permukaan, meshing yang lebih padat diterapkan untuk menghasilkan kontur area yang lebih jelas. Selanjutnya dilakukan proses penyelesaian dengan mempertimbangkan berbagai parameter seperti distribusi temperatur. Penggunaan software ANSYS memungkinkan analisis mendalam terhadap distribusi panas pada permukaan cakram rem.



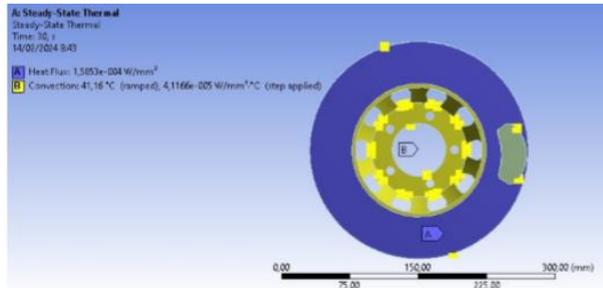
Gambar 5. Proses meshing pada pada dan piringan cakram

Tabel 4. Dimensi master silinder dan silinder cakram

Properti material	Disc (gray cast iron)	Pad (asbestos)
Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	7300	2500
Modulus elastisitas (Gpa)	124	160
Poisson rasio	0,33	0,3
Konduktifitas termal (w/mK)	53,3	1,46
Panas spesifik (J/KgK)	490	1907

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

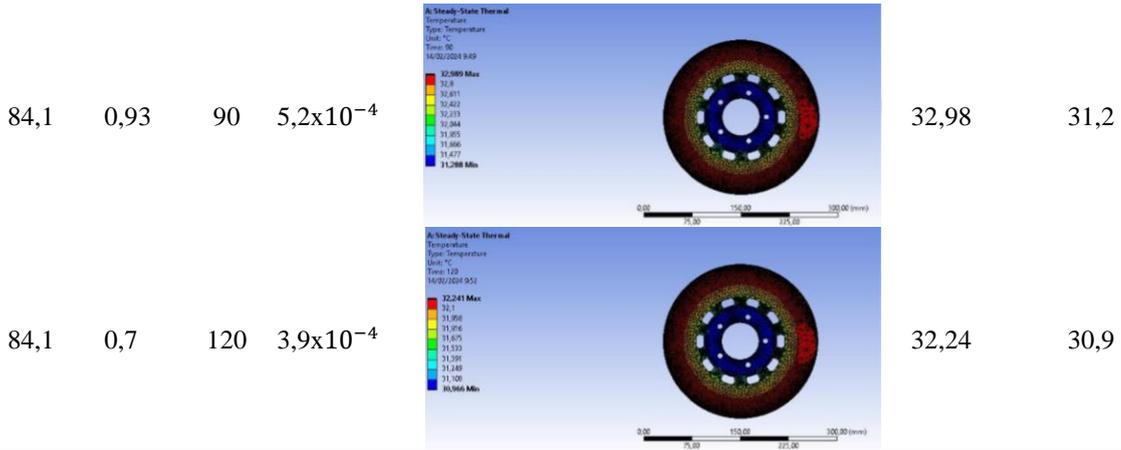
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai fluks panas, yang dihasilkan selama proses pengereman, telah dimasukkan ke dalam simulasi pada Tabel 5. Fluks panas menggambarkan aliran panas penting untuk menganalisis distribusi panas dalam sistem rem. Selain fluks panas, nilai konveksi juga disertakan dalam simulasi sebagai beban termal. Konveksi menggambarkan perpindahan panas melalui udara di sekitar komponen rem, yang mempengaruhi suhu keseluruhan sistem [11]. Simulasi memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai penyebaran dan pengurangan panas pada komponen rem. Gambar 6 menunjukkan bagaimana fluks panas dan konveksi diterapkan dalam simulasi, memvisualisasikan lokasi dan penerapan beban termal pada komponen rem untuk analisis mendalam terhadap kinerja termal sistem.



Gambar 6. Penerapan beban panas

Tabel 5. Perhitungan laju aliran panas pada cakram tanpa pendinginan

EK (J)	Pb (W)	t (s)	Q (w/mm <sup>2</sup> )	Hasil simulasi	S <sub>Tmax</sub> (°C)	S <sub>Tmin</sub> (°C)
84,1	2,8	30	1,5x10 <sup>-4</sup>		38,96	33,8
84,1	1,4	60	7,9x10 <sup>-4</sup>		34,48	31,9



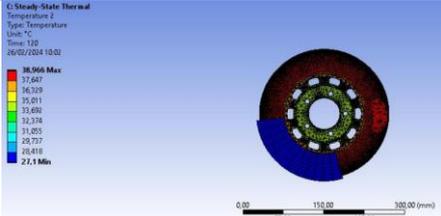
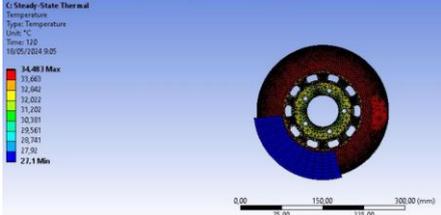
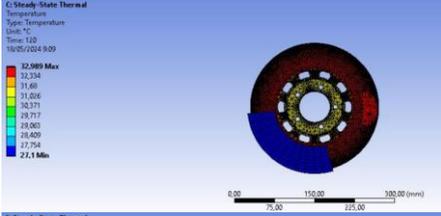
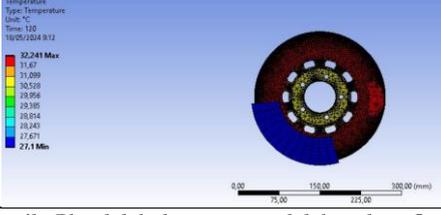
Diskripsi: EK adalah energy kinetik, Pb adalah daya rem, t adalah waktu, Q adalah *heat flux*,  $s_T$  adalah temperature permukaan maksimum.

Pengaruh nilai fluks panas dalam simulasi keadaan tunak menggunakan ANSYS menunjukkan bahwa distribusi panas pada permukaan piringan menjadi lebih merata. Hasil simulasi memperlihatkan dengan jelas bagaimana variasi fluks panas mempengaruhi distribusi temperatur pada piringan dalam kondisi lingkungan dengan suhu tetap 30 °C. Tabel 6 menyajikan hasil perhitungan fluks panas yang berbeda, menggambarkan respons piringan terhadap perubahan fluks panas tersebut.

Daya rem (Pb) meningkat signifikan dari 0,7 menjadi 2,8, dan peningkatan daya rem diikuti dengan peningkatan suhu panas pengereman minimum dari 30,966 °C menjadi 33,864 °C yang menunjukkan bahwa semakin besar daya rem maka pengereman akan semakin tinggi. Panas yang dihasilkan pada waktu pengereman yang lebih pendek cenderung menghasilkan fluks panas yang lebih besar, seperti Pb 1,4 dengan waktu pengereman 60 detik yang memiliki fluks panas  $7,9 \times 10^{-4} \text{ w/mm}^2$  lebih besar dari Pb 0,7 dengan waktu pengereman 120 detik yang memiliki fluks panas  $3,9 \times 10^{-4} \text{ w/mm}^2$ . Fluks panas cenderung meningkat dengan meningkatnya daya rem hingga Pb 1,4, namun pada Pb 2,8 fluks panas menurun meskipun daya rem meningkat, menunjukkan bahwa ada faktor lain yang mempengaruhi fluks panas. Peningkatan tenaga rem dan penurunan waktu pengereman cenderung meningkatkan suhu panas pengereman minimum, dan korelasi antara daya rem dan fluks panas tidak selalu linier, yang menunjukkan kompleksitas dalam distribusi panas cakram rem.

Strategi pendinginan sangat penting untuk meningkatkan kinerja sistem pengereman, terutama dalam aplikasi yang memerlukan kontrol suhu yang ketat dan konsisten. Penerapan teknologi Peltier menawarkan fleksibilitas dalam mengelola distribusi panas, memungkinkan penyesuaian yang tepat untuk mempertahankan suhu operasional. Pada pengereman yang didukung oleh perubahan panas di sekitar permukaan cakram, dengan daya rem (Pb) 0,7 hingga 2,8 dan waktu pengereman yang bervariasi antara 120 detik hingga 30 detik, panas pengereman minimum tetap konstan pada suhu 27,1 °C, menunjukkan bahwa sistem pendingin termoelektrik efektif menjaga suhu cakram rem tetap stabil meskipun daya rem bertambah dan waktu pengereman bervariasi, serta fluks panas cenderung meningkat seiring bertambahnya daya rem, pada kasus (Pb) 2,8 fluks panas berkurang namun panas pengereman minimum tetap konstan, menunjukkan bahwa pendinginan termoelektrik mampu mengatasi variasi waktu pengereman dan mengatur distribusi panas memberikan dampak overheating pada sistem pengereman.

Tabel 6. Perhitungan laju aliran panas pada cakram dengan pendinginan cover cakram 27 °C

EK (J)	Pb (W)	t (s)	Q (w/mm <sup>2</sup> )	Hasil simulasi	S <sub>Tmax</sub> (°C)	S <sub>Tmin</sub> (°C)
84,1	2,8	30	1,5x10 <sup>-4</sup>		38,96	27,1
84,1	1,4	60	7,9x10 <sup>-4</sup>		34,48	27,1
84,1	0,93	90	5,2x10 <sup>-4</sup>		32,98	27,1
84,1	0,7	120	3,9x10 <sup>-4</sup>		32,24	27,1

Diskripsi: EK adalah energy kinetik, Pb adalah daya rem, t adalah waktu, Q adalah *heat flux*, S<sub>T</sub> adalah temperature permukaan maksimum.

Perbandingan antara kedua pengujian menunjukkan bahwa tanpa pendinginan termoelektrik, peningkatan daya rem dan penurunan waktu pengereman secara signifikan meningkatkan suhu panas pengereman minimum dan fluks panas, namun dengan korelasi yang tidak selalu linier. Di sisi lain, penggunaan pendingin termoelektrik berhasil menjaga suhu panas pengereman minimum tetap konstan meskipun daya rem dan waktu pengereman bervariasi, menunjukkan efektivitas sistem dalam mengelola panas dan distribusi panas.

**4. KESIMPULAN**

Sistem pengereman yang tidak optimal, termasuk pada mobil listrik perkotaan, dapat menyebabkan kecelakaan karena panas berlebih dari gesekan antara pad dan cakram rem. Simulasi dengan ANSYS menunjukkan distribusi panas yang lebih merata pada piringan rem dengan variasi fluks panas, menghasilkan suhu pengereman minimum yang meningkat seiring dengan peningkatan daya rem (Pb). Pada (Pb) 2,8, fluks panas menurun meskipun daya rem meningkat. Penggunaan pendingin termoelektrik mampu menjaga suhu rem tetap stabil meskipun daya rem dan waktu pengereman bervariasi, dalam mengatasi panas berlebih.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] V. Vodovozov, Z. Raud, and E. Petlenkov, 2021. "Review on Braking Energy Management in Electric Vehicles," *Energies*, vol. 14, no.15, doi: 10.3390/en14154477.

- [2] F. Alanazi, 2023. "Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 10. doi: 10.3390/app13106016.
- [3] J. Dewanto, O. Soegihardjo, and A. N. R. Wijaya, 2018. "New Active Cooling System to Prevent an Overheating on the Vehicle Disc Brake," *Int. J. Ind. Res. Appl. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, doi: 10.9744/jirae.3.1.1-6.
- [4] V. K. Agrawal and H. P. Khairnar, 2022. "Experimental & Analytical Investigation for Optimization of Disc Brake Heat Dissipation Using CFD," *Evergreen*, vol. 9, no. 4, pp. 1076–1089, doi: 10.5109/6625720.
- [5] S. Thirumurugaveerakumar, 2020. "Optimization model of automobile brake cooling in forced convection mode," *AIP Conf. Proc.* 2 November. 2270 (1): 120002. <https://doi.org/10.1063/5.0019701>
- [6] L. Roza, H. N. Iman, F. Nursabrina, A. Nailufar, G. El Hidayah, and A. S. Sulaeman, 2023. "Measuring Room and Object Temperature Using MLX90614 Infrared Temperature Based on Arduino," *TIME Phys.*, vol. 1, no. 1, pp. 37–41, doi: 10.11594
- [7] C. Lv, H. Wang, and D. Cao, 2018. "Chapter 8 - Brake-Blending Control of EVs," H. Zhang, D. Cao, and H. B. T.-M. Du *Dynamics and Control of Electrified Vehicles*, Eds., Woodhead Publishing, pp. 275–308. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812786-5.00008-2>.
- [8] H. Glavitsch, K. Reichert, F. Peneder, and N. Singh, 2003. "40 - Power System Operation and Control," M. A. Laughton and D. J. B. T.-E. E. R. B. (Sixteenth E. Warne, Eds., Oxford: Newnes, pp. 40–50. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075064637-6/50040-X>.
- [9] A. P. Irawan dkk., 2022. "Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 6, doi: 10.3390/polym14061180.
- [10] F. Talati and S. Jalalifar, 2009. "Analysis of heat conduction in a disk brake system," *Heat Mass Transf.*, vol. 45, no. 8, pp. 1047–1059, doi: 10.1007/s00231-009-0476-y.
- [11] A. D. McPhee and D. A. Johnson, 2008. "Experimental heat transfer and flow analysis of a vented brake rotor," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 47, no. 4, pp. 458–467, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.03.006>.