

Perancangan Sistem Pendingin Paksa Pada Rem Cakram Mobil Suzuki Mega Carry Berbasis Sensor Suhu W1209

Yudi Setiawan, Sidik Mulyono, YKP Saleh*, M Zaenudin

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Computer Science, Universitas
Global Jakarta, Depok 16412, INDONESIA

Article Info	ABSTRAK
Article history: Received May 25th, 2025 Revised July 1st, 2025 Accepted July 4th, 2025 Keywords: Sistem pendingin rem paksa Rem cakram Modul termostat W1209 Overheating rem Efektivitas pendinginan	Sistem pengereman pada kendaraan roda dua dengan rem cakram sering mengalami peningkatan suhu yang signifikan selama proses pengereman, terutama pada kecepatan rendah dan kondisi beban berat, yang dapat menyebabkan overheating dan menurunkan performa pengereman. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem pendingin rem paksa berbasis modul termostat digital W1209 yang mengaktifkan semprotan air kabut secara otomatis untuk menjaga suhu rem tetap dalam batas aman. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak antara sumber panas (nyala api bunsen) dan sensor suhu pada 2 cm, 4 cm, dan 6 cm, serta merekam waktu pemanasan dan pendinginan pada setiap jarak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu pemanasan meningkat secara signifikan dengan bertambahnya jarak, sedangkan waktu pendinginan berbanding terbalik, di mana semakin dekat jarak sensor terhadap sumber panas menyebabkan proses pendinginan memerlukan waktu lebih lama. Sistem pendingin yang dikendalikan oleh modul W1209 mampu mengaktifkan motor pompa penyemprot air secara otomatis pada suhu 80–106°C dan menurunkan suhu cakram secara efektif. Kesimpulannya, sistem pendingin rem paksa ini efektif untuk mencegah overheating pada rem cakram, khususnya pada kendaraan dengan kecepatan rendah hingga menengah, sehingga dapat meningkatkan keamanan dan performa pengereman.
*Corresponding Author: YKP Saleh Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Computer Science, Universitas Global Jakarta, Depok 16412, INDONESIA Email: yasya@jgu.ac.id DOI: 10.56904/imejour.v3i1.100	

1. PENDAHULUAN

Transportasi merupakan salah satu aspek fundamental dalam kehidupan modern, berfungsi sebagai sarana untuk memindahkan manusia maupun barang dari satu lokasi ke lokasi lainnya, dalam jumlah dan waktu tertentu. Menurut Tjiptono (1997) [1], transportasi memainkan peranan penting dalam mendukung aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat melalui efisiensi distribusi barang dan mobilitas manusia. Dalam sistem transportasi, aspek keselamatan menjadi faktor utama yang tidak dapat diabaikan. Salah satu komponen vital dalam menjamin keselamatan kendaraan, khususnya kendaraan bermotor roda dua, adalah sistem pengereman [2]. Secara umum, sistem rem pada kendaraan roda dua terbagi menjadi dua jenis, yaitu rem cakram (*disc brake*) dan rem tromol (*drum brake*). Di antara keduanya, rem cakram lebih banyak digunakan pada kendaraan modern karena keunggulannya dalam hal

performa pengereman, efisiensi pelepasan panas, dan daya cengkeram yang lebih tinggi, terutama pada kondisi ekstrem [3].

Rem cakram bekerja berdasarkan prinsip gesekan antara kampas rem (*brake pads*) dengan piringan cakram (*disc rotor*) yang berputar seiring roda [4]. Komponen utama dari sistem rem cakram meliputi piringan cakram sebagai media gesek, master silinder rem sebagai penghasil tekanan hidrolik, piston yang menerima tekanan dari master dan mendorong kampas, selang rem sebagai penghubung aliran fluida rem, kaliper rem sebagai rumah piston dan kampas, serta kampas rem itu sendiri sebagai elemen yang menciptakan gesekan terhadap cakram. Ketika pengemudi menekan tuas rem, tekanan hidrolik yang dihasilkan master silinder diteruskan melalui selang ke piston, yang kemudian mendorong kampas rem menjepit piringan cakram. Proses ini mengubah energi kinetik kendaraan menjadi energi panas melalui gesekan. Namun, selama proses pengereman berulang, terutama pada kendaraan yang membawa beban berat atau melintasi medan yang curam, sistem rem mengalami peningkatan suhu yang signifikan. Jika panas tidak dapat terdisipasi secara efisien, maka sistem rem akan mengalami *overheating* yang dapat menurunkan efektivitas pengereman (*brake fade*), mempercepat keausan komponen, bahkan memicu kegagalan sistem rem secara keseluruhan. Studi oleh Ryu et al. (2018) [5] menunjukkan bahwa suhu permukaan cakram dapat mencapai lebih dari 300°C dalam pengereman intensif, dan dapat melebihi 500°C pada kendaraan balap atau kondisi ekstrem lainnya.

Dalam konteks kendaraan performa tinggi seperti mobil Formula 1, sistem pendingin rem merupakan bagian integral dari desain kendaraan [6]. Mobil F1 umumnya menggunakan sistem pendinginan pasif, yakni mengandalkan aliran udara dari desain aerodinamis serta corong udara untuk mengarahkan aliran udara ke area cakram. Desain ini terbukti efektif karena mobil F1 beroperasi pada kecepatan sangat tinggi (di atas 200 km/jam) yang mendukung konveksi alami dan paksa dalam pelepasan panas. Penelitian pada ref. [7] mencatat bahwa sistem pendingin rem dapat mengurangi suhu cakram hingga 200°C lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa pendingin. Sementara itu, pada mobil balap lintasan dan jalanan (*street racing*), kombinasi sistem pendingin pasif dan aktif (menggunakan kipas) sering diterapkan untuk meningkatkan aliran udara menuju cakram rem guna mempertahankan kinerja pengereman pada tingkat optimal.

Berangkat dari prinsip tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pendingin rem paksa berbasis kabut air (*water mist cooling system*) yang diintegrasikan pada sistem rem cakram. Sistem ini difokuskan pada kendaraan dengan kecepatan rendah hingga menengah (20–60 km/jam), di mana efektivitas pendinginan secara alami dari aliran udara sangat terbatas. Pada kecepatan rendah, laju aliran udara tidak cukup untuk membawa panas secara efisien dari permukaan cakram, menyebabkan akumulasi panas lebih cepat. Selain itu, faktor eksternal seperti beban berlebih serta rute dengan medan berbukit atau menanjak turut memperparah kondisi termal pada sistem pengereman. Akumulasi energi panas yang tidak terbuang menyebabkan suhu sistem meningkat secara eksponensial. Oleh karena itu, pada desain sistem pendingin ini juga disertakan indikator suhu atau sistem peringatan dini (*early warning system*) terhadap kondisi *overheat* yang dapat memberi sinyal kepada pengemudi apabila suhu cakram telah melewati ambang batas aman—misalnya, lebih dari 250°C untuk cakram berbahan besi cor—sehingga pengemudi dapat segera mengambil tindakan pencegahan. Rancangan sistem pendingin aktif dan sistem pemantauan suhu ini diharapkan mampu meningkatkan keselamatan berkendara melalui pengendalian suhu sistem rem secara aktif, serta memberikan efisiensi operasional tanpa mengabaikan aspek ekonomis dan keberlanjutan desain.

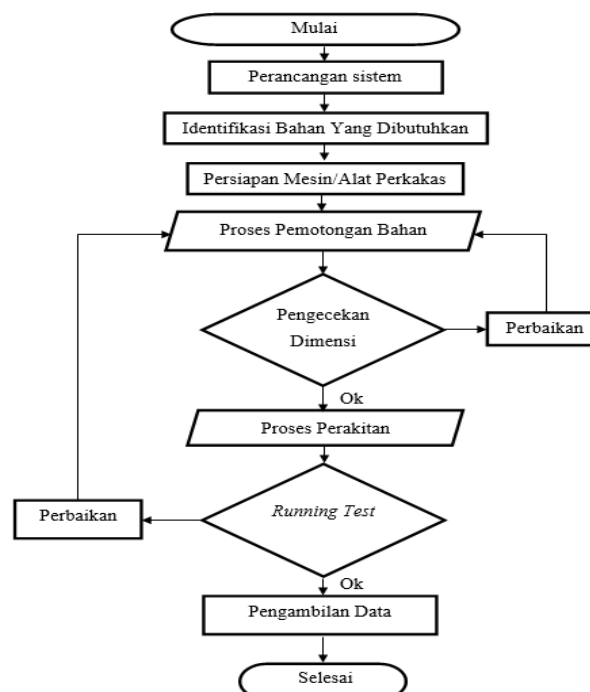
2. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam pelaksanaan pembuatan sistem pendingin rem paksa berbasis modul W1209 [8], terdapat beberapa tahapan penting yang harus dilakukan secara sistematis. Modul W1209 merupakan modul termostat digital berbasis mikrokontroler yang memiliki sensor suhu NTC (*Negative Temperature Coefficient*) dan luaran berupa *relay* yang dapat diatur untuk aktif atau

nonaktif pada suhu tertentu [9,10]. Modul ini berfungsi sebagai pengendali suhu otomatis, di mana sistem akan mengaktifkan pendinginan ketika suhu melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Proses perancangan sistem ini diawali dengan perancangan rangkaian elektronik, termasuk pemilihan sumber daya listrik (*power supply*) yang sesuai dengan tegangan kerja modul, yaitu 12 Volt DC. Selanjutnya, sensor suhu NTC ditempatkan pada posisi strategis yang bersinggungan langsung atau sedekat mungkin dengan sistem rem cakram untuk memperoleh data suhu secara real time.

Luaran dari modul W1209 berupa sinyal ke *relay* digunakan untuk mengaktifkan pompa air mini DC atau *solenoid valve*, yang kemudian akan menyemprotkan air dalam bentuk kabut (*mist*) melalui *nozzle* yang telah dirancang sebelumnya. Proses atomisasi air ini dapat dilakukan dengan menggunakan *sprayer nozzle* bertekanan rendah yang mampu menghasilkan partikel air berukuran mikro agar efisiensi pendinginan meningkat melalui proses *evaporative cooling*. Selain itu, pengaturan suhu pada modul dilakukan melalui tombol *onboard* dengan presisi pengaturan $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, sehingga suhu ambang batas dapat ditentukan berdasarkan hasil simulasi termal atau data eksperimental dari sistem pengereman.

Tahapan selanjutnya adalah pengujian dan kalibrasi sistem, meliputi verifikasi fungsi modul W1209 terhadap respons suhu, kecepatan aktivasi pompa, serta kestabilan kerja sistem dalam kondisi beban termal yang bervariasi. Pengujian dapat dilakukan secara bertahap dengan memberikan panas buatan (misalnya menggunakan *heat gun*) untuk menyimulasikan kondisi *overheating* pada sistem rem. Evaluasi dilakukan dengan mencatat waktu respon sistem, durasi kerja pompa, serta efektivitas pendinginan terhadap cakram rem. Hasil dari implementasi ini diharapkan menunjukkan bahwa sistem berbasis W1209 dapat menjadi solusi ekonomis namun efektif untuk mengendalikan suhu rem, terutama pada kendaraan yang beroperasi pada kecepatan rendah hingga menengah dan rentan terhadap penumpukan panas berlebih. Selain itu, sistem ini juga dapat dikembangkan lebih lanjut dengan integrasi ke sistem indikator visual atau *buzzer* sebagai alarm suhu tinggi untuk meningkatkan faktor keselamatan berkendara. Secara lengkap tahapan penelitian dapat dilihat pada diagram alir di Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

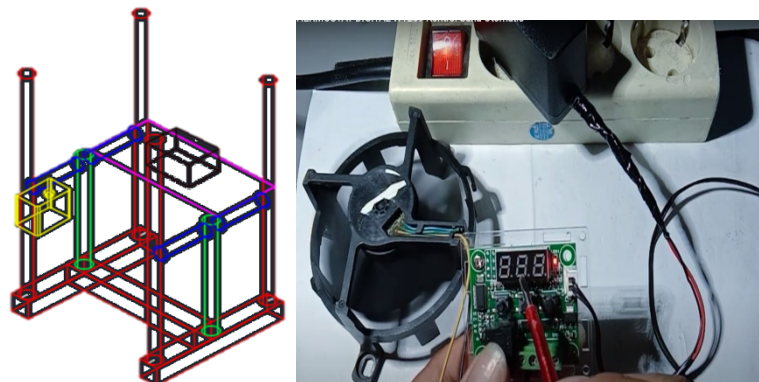
Dalam proses pengembangan desain sistem pendingin rem paksa, dilakukan beberapa modifikasi terhadap bentuk dan konfigurasi material serta rangkaian elektronik yang

digunakan. Desain awal dan desain setelah modifikasi dapat dilihat secara visual pada Gambar 2, yang menunjukkan perbedaan mendasar pada konfigurasi pemasangan komponen, terutama pada bagian sistem kontrol berbasis modul termostat W1209. Salah satu aspek penting dalam desain ini adalah diagram pengkabelan yang menunjukkan hubungan kelistrikan antar komponen sistem.

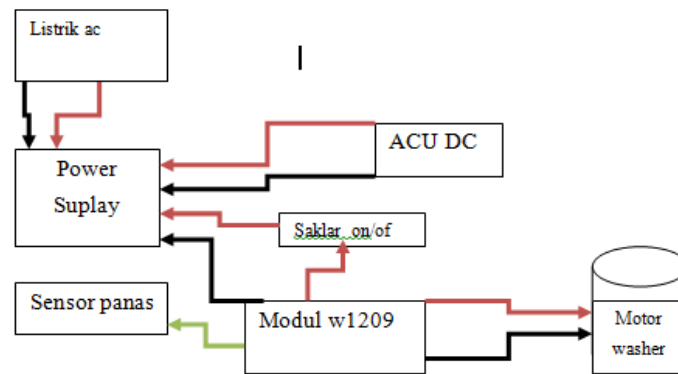
Berdasarkan diagram pengkabelan yang ditunjukkan pada Gambar 3, arus listrik searah (DC) dari terminal positif aki dengan kabel berwarna merah pertama-tama mengalir menuju *power supply*. Dari *power supply*, arus positif diteruskan ke saklar *on/off* dan juga ke terminal +12V DC pada modul W1209. Untuk jalur negatif, arus DC dari terminal negatif aki diarahkan ke masukkan *power supply* dan ke terminal GND pada modul W1209. Modul ini dilengkapi dengan tiga terminal kendali yaitu K0, K1, dan GND. Kabel merah dari terminal +12V DC masuk ke terminal K1 pada W1209, sedangkan dari terminal K0, kabel merah lainnya diteruskan ke terminal positif *motor washer* sebagai aktuator penyemprot air. Jalur negatif dari terminal GND W1209 dihubungkan ke terminal negatif *motor washer*, sehingga membentuk rangkaian tertutup yang dapat dikendalikan secara otomatis oleh sinyal suhu yang dibaca oleh sensor termal.

Pengujian sistem pendingin rem paksa dilakukan secara menyeluruh untuk mengevaluasi kinerja dan respons sistem terhadap perubahan suhu. Tahapan pengujian dilakukan secara bertahap sesuai dengan prosedur eksperimen. Langkah pertama dimulai dengan menyiapkan seluruh komponen sistem pendingin yang telah dirakit pada platform uji, termasuk unit reservoir, modul kontrol, *sprayer*, serta *thermocouple*. Selanjutnya, disiapkan kamera sebagai alat dokumentasi, *bunsen* yang telah diisi dengan bahan bakar spiritus, dan reservoir yang diisi dengan 1200 ml air sebagai media pendingin. *Thermocouple* dilepaskan sementara dari posisi semula di kaliper rem, kemudian dipasang pada kedudukan tripod untuk simulasi pengukuran suhu eksternal. Ujung *thermocouple* didekatkan ke sumber panas, yaitu api dari *bunsen*, untuk mengamati respons sistem terhadap kenaikan suhu.

Selanjutnya, kamera dinyalakan untuk merekam keseluruhan proses pengujian, dan sistem pendingin diaktifkan melalui saklar utama agar pompa dan modul W1209 siap bekerja. Setelah itu, sumbu *bunsen* dinyalakan menggunakan korek api, lalu ujung *thermocouple* didekatkan ke nyala api untuk memperoleh peningkatan suhu secara bertahap. Proses pemanasan berlangsung hingga suhu termokopel melebihi 80°C, yang merupakan ambang batas aktivasi sistem pendingin. Ketika suhu melampaui batas tersebut, modul W1209 akan mengaktifkan *motor washer* secara otomatis, menyemburkan air dalam bentuk kabut ke arah cakram atau area yang telah disimulasikan. Setelah suhu target tercapai, perekaman kamera dihentikan. Hasil rekaman kemudian dianalisis ulang dengan memutar video percobaan untuk mencatat waktu aktivasi sistem, yaitu saat api *bunsen* pertama kali mendekati *thermocouple* hingga saat sistem pendingin mulai menyala. Kemudian, metode ini dapat diperoleh data kuantitatif mengenai waktu respons sistem, efektivitas pendinginan, serta kesesuaian sistem terhadap kondisi suhu aktual. Evaluasi tersebut menjadi dasar penting dalam validasi desain sistem pendingin berbasis suhu otomatis untuk aplikasi pengereman kendaraan.



Gambar 2. Desain dan contoh pengujian alat uji.



Gambar 3. Diagram pengkabelan pada alat yang dikembangkan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil data sensor pada saat pemanasan

Sistem indikator suhu pada alat ini menggunakan lampu *buzzer* yang akan aktif secara otomatis pada kisaran suhu antara 106°C hingga 80°C. Fungsi dari indikator ini adalah memberikan peringatan visual dan audio kepada pengguna bahwa sistem pengereman sedang berada dalam kondisi termal yang tinggi dan berpotensi mengalami *overheat*. Aktivasi lampu *buzzer* dikendalikan oleh modul termostat (W1209) yang telah diprogram untuk mendeteksi suhu melebihi ambang batas tertentu dan memberikan sinyal keluaran ke indikator sebagai *respon* pengendalian suhu berbasis ambang (*threshold-based thermal control*).

Hasil pengujian pemanasan sistem dijelaskan secara rinci pada Tabel 1, yang menyajikan data waktu pemanasan berdasarkan jarak antara sumber panas (api *bunsen*) dengan sensor suhu (*thermocouple*), yaitu pada jarak 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Dari data tersebut terlihat bahwa terdapat perbedaan signifikan dalam waktu pencapaian suhu tertentu, tergantung pada jarak nyala api terhadap sensor. Secara fisik, fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme konduksi dan konveksi panas, di mana semakin besar jarak antara nyala api dan sensor, maka densitas fluks panas yang diterima oleh sensor menjadi lebih rendah, sehingga memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai suhu kritis. Dengan demikian, jarak pemanasan berbanding lurus terhadap waktu pemanasan, dan hal ini harus diperhatikan dalam evaluasi kinerja sistem pendingin serta kalibrasi suhu aktivasi indikator *buzzer*. Variasi jarak ini juga memberikan gambaran mengenai sensitivitas sistem terhadap berbagai kondisi lingkungan yang memengaruhi transfer panas menuju sensor.

Tabel 1. Data hasil pengukuran waktu pemanasan.

No. Percobaan	Jarak (cm)	Waktu Pemanasan (s)	Rata-Rata (s)
1	2	97	97
2	2	98	
3	2	98	
4	4	164	163
5	4	163	
6	4	162	
7	6	232	233
8	6	234	
9	6	235	

Untuk menganalisis pengaruh jarak sumber panas terhadap waktu pemanasan sistem, dilakukan perbandingan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu kritis pada tiga variasi jarak, yaitu 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Berdasarkan data yang diperoleh, waktu pemanasan pada jarak 2 cm adalah 97 detik, pada jarak 4 cm adalah 163 detik, dan pada jarak 6 cm adalah 233 detik. Perbandingan waktu pemanasan antara jarak 4 cm terhadap 2 cm dihitung menggunakan rumus persentase kenaikan relatif:

$$\frac{(163 - 97)}{97} \times 100 = 68\%$$

Artinya, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu yang sama pada jarak 4 cm meningkat sebesar 68% dibandingkan dengan jarak 2 cm. Selanjutnya, perbandingan antara jarak 6 cm terhadap 4 cm menghasilkan:

$$\frac{(233 - 163)}{163} \times 100 = 42,94\% \approx 43\%$$

dengan demikian, waktu pemanasan pada jarak 6 cm meningkat sebesar 43% dibandingkan dengan jarak 4 cm. Sedangkan perbandingan waktu pemanasan antara jarak 6 cm terhadap 2 cm menunjukkan hasil:

$$\frac{(233 - 97)}{97} \times 100 = 140,21\% \approx 140\%$$

Hal ini menunjukkan bahwa pada jarak 6 cm, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu tertentu meningkat lebih dari dua kali lipat dibandingkan jarak 2 cm. Data ini mengindikasikan bahwa semakin jauh jarak sensor terhadap sumber panas, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu yang sama akan semakin panjang, akibat penurunan fluks panas yang diterima sensor. Secara fisis, hal ini sejalan dengan hukum konduksi dan konveksi, di mana intensitas energi panas menurun secara signifikan dengan bertambahnya jarak dari sumber panas.

3.2. Hasil data sensor pada saat pendinginan

Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan (repetisi) untuk masing-masing variasi jarak antara *thermocouple* dan laras nyala api, yaitu pada jarak 2 cm, 4 cm, dan 6 cm, guna memperoleh data yang lebih akurat dan dapat direpresentasikan secara statistik. Hasil dari pengujian tersebut disajikan dalam Tabel 2, yang menampilkan waktu pendinginan serta nilai rata-rata waktu pada setiap jarak. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa waktu pendinginan menunjukkan variasi yang signifikan antar jarak, di mana perbedaan ini dipengaruhi oleh intensitas dan sebaran panas awal yang diterima oleh sensor sebelum proses pendinginan dimulai.

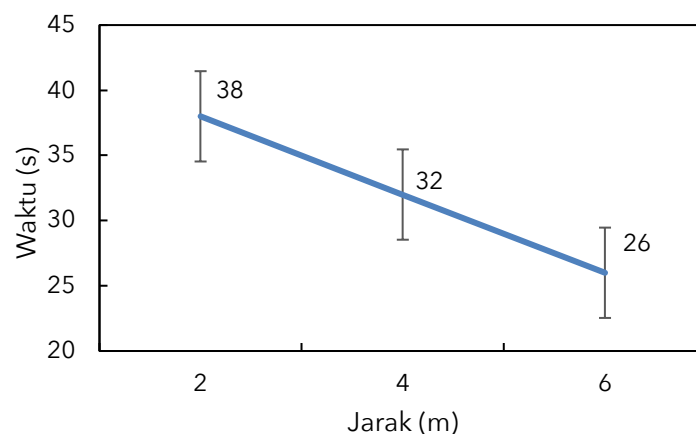
Menariknya, dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin dekat jarak antara laras api dengan sensor (misalnya pada jarak 2 cm), justru menghasilkan waktu pendinginan yang lebih lama dibandingkan dengan jarak yang lebih jauh, seperti 4 cm atau 6 cm. Hal ini dapat dijelaskan melalui fenomena termal di mana pada jarak yang lebih dekat, sensor mengalami akumulasi energi panas yang lebih tinggi akibat fluks panas yang besar dan kontak termal yang intens. Akibatnya, sistem pendingin membutuhkan waktu yang lebih lama untuk menurunkan suhu sensor kembali ke ambang batas tertentu, dibandingkan dengan kondisi di mana sensor hanya menerima paparan panas yang lebih lemah dari jarak yang lebih jauh.

Jarak sumber panas terhadap titik pengukuran tidak hanya memengaruhi waktu pemanasan, tetapi juga memengaruhi kinerja sistem dalam proses pendinginan. Hal ini sangat penting dalam konteks implementasi sistem pendingin berbasis suhu, karena penempatan sensor yang terlalu dekat dengan sumber panas dapat menghambat efektivitas respon pendinginan akibat tingginya energi termal yang harus diredam. Oleh karena itu, hasil dari Tabel 2 ini dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan posisi optimal sensor suhu dalam desain sistem pendingin rem kendaraan, agar sistem bekerja secara efisien baik dalam kondisi pemanasan maupun pendinginan.

Tabel 2. Data hasil pengukuran waktu pendinginan.

No	Jarak (cm)	Waktu Pendingin (s)	Rata-Rata (s)
1	2	38	38
2	2	38	
3	2	39	
4	4	33	32
5	4	32	
6	4	31	
7	6	27	26
8	6	27	
9	6	26	

Untuk mengevaluasi kinerja sistem pendinginan rem paksa berdasarkan jarak antara sumber panas dan sensor suhu, dilakukan analisis perbandingan waktu pendinginan rata-rata pada tiga variasi jarak, yaitu 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Waktu pendinginan didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk menurunkan suhu dari nilai tertinggi (lebih dari 80°C) ke bawah ambang batas yang telah ditentukan. Dari hasil pengamatan, waktu pendinginan rata-rata pada jarak 2 cm adalah 38 detik, pada jarak 4 cm adalah 32 detik, dan pada jarak 6 cm adalah 26 detik. Secara lebih mendetail, hal ini juga tertuang pada grafik yang tercantum pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik hasil pengukuran waktu pendinginan.

Perbandingan waktu pendinginan antara jarak 2 cm dan 4 cm dihitung menggunakan rumus:

$$\frac{(38 - 32)}{32} \times 100 = 18,75\%$$

Artinya, waktu pendinginan pada jarak 2 cm lebih lama sebesar 18,75% dibandingkan dengan jarak 4 cm. Selanjutnya, perbandingan antara jarak 4 cm dan 6 cm menghasilkan:

$$\frac{(32 - 26)}{26} \times 100 = 23,08\%$$

waktu pendinginan pada jarak 4 cm lebih lama sekitar 23,08% dibandingkan dengan jarak 6 cm. Sedangkan perbandingan langsung antara jarak 2 cm dan 6 cm menunjukkan hasil:

$$\frac{(38 - 26)}{26} \times 100 = 46,15\%$$

Hasil ini menunjukkan bahwa waktu pendinginan pada jarak 2 cm lebih lama sebesar 46,15% dibandingkan dengan jarak 6 cm.

Perbedaan waktu pendinginan tersebut mencerminkan bahwa semakin dekat sensor terhadap nyala api, akumulasi panas pada sensor menjadi lebih tinggi, sehingga proses penurunan suhu memerlukan waktu yang lebih lama. Fenomena ini berkaitan erat dengan jumlah energi panas yang terserap oleh material di sekitar sensor selama proses pemanasan, yang pada akhirnya berdampak terhadap laju pelepasan panas selama proses pendinginan. Semakin besar energi termal awal, semakin besar pula energi yang harus diserap oleh media pendingin agar suhu kembali ke tingkat aman. Oleh karena itu, data ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa posisi sensor dan paparan awal panas sangat menentukan efektivitas dari sistem pendingin berbasis kontrol suhu otomatis.

4. KESIMPULAN

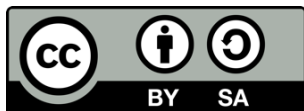
Berdasarkan hasil penelitian mengenai kinerja sistem pemanasan dan pendinginan cakram rem yang diuji dengan variasi jarak antara sumber panas dan sensor suhu, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Jarak berpengaruh signifikan terhadap waktu pemanasan dan pendinginan. Semakin dekat sensor terhadap nyala api (misalnya pada jarak 2 cm), maka waktu pemanasan menjadi lebih singkat karena fluks panas yang diterima lebih besar. Sebaliknya, semakin jauh jaraknya (hingga 6 cm), waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu aktivasi menjadi lebih lama.
2. Waktu pemanasan meningkat secara non-linear seiring dengan penambahan jarak, di mana waktu pemanasan rata-rata meningkat sebesar 68% dari jarak 2 cm ke 4 cm, 43% dari 4 cm ke 6 cm, dan mencapai peningkatan total 140% dari 2 cm ke 6 cm. Hal ini menunjukkan bahwa jarak memengaruhi kecepatan transfer energi panas secara eksponensial.
3. Waktu pendinginan juga menunjukkan tren yang serupa namun berlawanan, yaitu semakin dekat sensor terhadap sumber panas, waktu pendinginan menjadi lebih lama. Pendinginan rata-rata pada jarak 2 cm adalah 38 detik, sedangkan pada jarak 4 cm dan 6 cm masing-masing sebesar 32 detik dan 26 detik. Perbedaan waktu pendinginan menunjukkan bahwa pada jarak 2 cm, sistem membutuhkan waktu 46,15% lebih lama untuk mendinginkan dibandingkan dengan jarak 6 cm.
4. Efektivitas sistem pendingin berbasis modul W1209 terbukti mampu mendeteksi suhu secara akurat dan mengaktifkan aktuator (*motor washer*) secara otomatis ketika suhu melebihi ambang batas (di atas 80–106°C). Integrasi sistem ini juga dilengkapi dengan indikator *buzzer* sebagai peringatan visual dan suara apabila suhu rem telah mencapai kondisi kritis.
5. Desain sistem pendingin berbasis air dengan metode penyemprotan kabut terbukti memberikan pendinginan yang efektif dalam menurunkan suhu cakram rem. Sistem ini cocok diterapkan pada kendaraan berkecepatan rendah hingga menengah (20–60 km/jam), di mana pendinginan konveksi alami tidak mencukupi untuk mempertahankan suhu rem dalam batas aman.

REFERENCES

- [1] F. Tjiptono, Strategi Pemasaran, 2nd ed. Indonesia: Penerbit ANDI, 1997, p. 374.
- [2] A. Lutanto, A. Fajri, K. Cikal Nugroho, and F. Falah, "Advancements in Automotive Braking Technology for Enhanced Safety: A Review," *Multidisciplinary Innovations and Research in Applied Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 6–20, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.70935/6n21wx31>.
- [3] A. Rashid, "Overview of disc brakes and related phenomena - a review," *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, vol. 10, no. 4, p. 257, 2014, doi: <https://doi.org/10.1504/ijvrv.2014.065634>.
- [4] R. C. Parker and T. P. Newcomb, "The Performance and Characteristics of the Disc Brake," *SAE technical papers on CD-ROM/SAE technical paper series*, Jan. 1964, doi:

- <https://doi.org/10.4271/640140>.
- [5] B.-J. Ryu¹, Y. Kim, B.-J. Oh², and B. Shin¹, “Temperature and Flow Analysis for Brake Control Units of an Unmanned Aerial Vehicle,” *Journal of Digital Contents Society*, vol. 19, no. 11, pp. 2167–2172, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.9728/dcs.2018.19.11.2167>.
- [6] R. Stauch, J. Bög, S. Grabant, R. König, and D. Traub, “Analysis of the Cooling Concept of the Braking System of a Formula Student Racing Car Using CFD Simulation and 1D Simulation,” *Defect and Diffusion Forum*, vol. 412, pp. 115–129, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.412.115>.
- [7] G. Li, “The Design of the Automobile Brake Cooling System,” *OALib*, vol. 05, no. 04, pp. 1–10, 2018, doi: <https://doi.org/10.4236/oalib.1104567>.
- [8] S. Mishra, S. K. Dash, R. E. Nambiar, P. K. Ray, H. Kumar P, and D. Mishra, “Design and Fabrication of a Retrofit E-Bicycle for Sustainable Urban Transportation,” *2024 IEEE International Conference on Smart Power Control and Renewable Energy (ICSPCRE)*, pp. 1–6, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/icspcre62303.2024.10675279>.
- [9] M. D. Ananda and H. H. Rachmat, “Evaluasi Karakteristik Resistansi Sensor NTC W1209 10K,” *e-Proceeding FTI*, 2021. <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/fti/article/view/582>.
- [10] D. Tamilarasi, M. N. Yadav, Neha S, P. N. Mahendrakar, and R. S. Reddy, “Automated temperature monitoring and cooling system using Thermoelectric generators and W1209 temperature actuators,” pp. 243–248, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/iedi3c53598.2021.00056>.



Integrated Mechanical Engineering Journal (IMEJOUR) is licensed under a [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).