

(Artikel Penelitian/Ulasan)

Pengaruh Jarak *Nozzle* pada *Air Cooling Brake*

Muhamad Misbach Suryo Nugroho¹, Chandra Gunawan²

¹ Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang ; email : 2141220048@student.polinema.ac.id

² Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang ; email : cgunawan05@gmail.com

* Penulis : Muhamad Misbach Suryo Nugroho

Abstract: Traffic accidents are a serious global issue, including in Indonesia. One of the main causes of these accidents is brake system failure, particularly brake fade or total brake loss. Brake failure is generally caused by overheating in the braking system, which leads to a reduction in braking force or the occurrence of vapor lock, making it difficult for the driver to maintain control of the vehicle. This condition poses a high risk, especially for heavy-duty vehicles such as trucks, buses, and pick-up trucks. Excessive heat in the braking system occurs due to friction during braking, which generates temperatures that exceed the system's capacity, accelerating component damage and increasing the risk of accidents. One solution to address this problem is by maintaining the temperature of the drum brakes using an automatic cooling system that directs compressed air toward the drum surface. This method helps prevent brake system failure caused by overheating and improves the safety of heavy vehicles. This research was conducted using a drum brake prototype to evaluate the effectiveness of compressed air (at 5 bar pressure), with varying *nozzle* distances (8 mm, 10 mm, and 12 mm) and a fixed *nozzle* angle of 45°, operated automatically using an Arduino Mega 2560. The objective of this study is to obtain accurate data regarding which *nozzle* distance has the most significant effect in reducing brake temperature. The best result was achieved at the shortest distance of 8 mm, with the lowest cooling temperature recorded at 127.64°C.

Keywords: Drum Brake; Overheat, *Nozzle* Distance; Pressure Air; Arduino Mega 2560

Abstrak: Kecelakaan lalu lintas merupakan permasalahan serius yang terjadi secara global, termasuk di Indonesia. Salah satu faktor utama penyebab kecelakaan adalah kegagalan sistem pengereman, khususnya rem blong. Rem blong umumnya disebabkan oleh overheating pada sistem rem, yang mengakibatkan berkurangnya daya cengkeram rem atau munculnya vapor lock, sehingga pengemudi tidak dapat mengendalikan kendaraannya. Kondisi ini sangat berisiko, terutama pada kendaraan bermuatan berat seperti truk, bus, dan mobil pick-up. Panas berlebih pada sistem rem terjadi karena gesekan saat pengereman menghasilkan temperatur yang melampaui kapasitas sistem, sehingga mempercepat kerusakan dan meningkatkan potensi kecelakaan. Salah satu solusi untuk mengatasi hal ini adalah dengan menjaga temperatur rem tromol, yaitu melalui sistem pendingin otomatis menggunakan udara bertekanan yang diarahkan ke rem tromol. Metode ini mencegah kegagalan sistem rem akibat panas berlebih dan meningkatkan keselamatan kendaraan berat. Penelitian ini dilakukan pada prototipe rem tromol untuk menguji efektivitas udara bertekanan (5 bar) dengan memvariasikan jarak *nozzle* (8 mm, 10 mm, dan 12 mm) dengan sudut *nozzle* (45°) secara otomatis menggunakan Arduino Mega 2560. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan data yang akurat mengenai jarak yang paling berpengaruh dalam menurunkan temperatur rem. Hasil terbaik diperoleh pada jarak yang terdekat yaitu 8 mm, dengan temperatur pendinginan terendah sebesar 127,64°C.

Kata kunci: Rem Tromol; Overheat; Jarak *Nozzle*; Udara Bertekanan, Arduino Mega 2560

Diterima: Mei 17, 2025
Direvisi: Mei 27, 2025
Diterima: Juni 29, 2025
Diterbitkan: Juli 2, 2025
Versi sekarang: Juli 4, 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan
publikasi akses terbuka
berdasarkan syarat dan ketentuan
lisensi Creative Commons
Attribution (CC BY SA) (
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Salah satu masalah utama yang dihadapi masyarakat di mana pun, terutama di Indonesia, adalah kecelakaan lalu lintas. Kerusakan pada sistem pengereman kendaraan akibat rem blong merupakan salah satu penyebab utama kecelakaan [1]. Berdasarkan data dari Berita Transportasi dan Logistik tahun 2024, rem blong menyebabkan hampir 80 persen kecelakaan lalu lintas, yang mengakibatkan lebih dari 12.600 korban jiwa. Pada tahun 2023, sekitar 137.851 insiden terjadi, dan jumlahnya meningkat menjadi 152.008 yang melibatkan 963 bus dan 11.292 kendaraan pengangkut barang [2]. Peristiwa rem blong merupakan suatu kondisi di mana sistem rem pada kendaraan tidak berfungsi dengan baik dikarenakan rem mengalami *overheat*, sehingga pengemudi tidak dapat mengendalikan laju kendaraan dengan baik. Hal ini tentu saja dapat berakibat fatal terhadap keselamatan pengemudi, terutama pada kendaraan dengan muatan berat [3], [4].

Overheat (gesekan berlebih) yang terjadi saat pengereman menyebabkan sistem rem menjadi terlalu panas, akibatnya rem dapat kehilangan daya cengkramnya saat suhu meningkat, yang dapat mengakibatkan kecelakaan. Temperatur maksimal yang dapat diterima dari kampas rem non-asbestos adalah 350°C, sedangkan untuk kampas rem asbestos adalah 200°C [5]. Berbagai metode pendinginan telah dikembangkan untuk mengatasi masalah ini, seperti penyemprotan uap air pada disk brake, penggunaan air scoope untuk memanfaatkan aliran udara, serta modifikasi drum brake dengan sirip pendingin berisi air [5]–[7].

Sejumlah penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan dalam penelitian saat ini. Penelitian pertama berjudul Pengaruh Penambahan *Air Scoope* dan Variasi Konduktifitas *Thermal Brake Pad* Terhadap Penurunan Suhu Pada *Brake pad* [8]. Penelitian kedua berjudul Sistem Pengendalian Panas Rem Tromol dengan *Water Coller* Sebagai Solusi *Losse Brake* pada Truck [9]. Penelitian ketiga berjudul *Heat Dissipation from Stationary Passenger Car Brake Discs* [10]. Metode penelitian yang digunakan tersebut memiliki keterbatasan, seperti potensi *crack* akibat penurunan temperatur secara mendadak dan efektivitas yang bergantung pada kecepatan kendaraan. Oleh karena itu, penggunaan udara bertekanan sebagai pendingin rem tromol menjadi solusi yang lebih baik.

Studi ini meneliti pengaruh variasi jarak *nozzle* terhadap penurunan temperatur rem tromol berbasis media udara bertekanan. Menurut penelitian sebelumnya, sudut kecil dengan nilai 45° dan jarak yang lebih dekat ke sumber panas cenderung memberikan pendinginan yang lebih maksimal [8], [9]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak *nozzle* berpengaruh atau tidak terhadap penurunan temperatur rem tromol.

2. Tinjauan Literatur

2.1. Kajian Teori dan Literatur

Kajian teori dan literatur ini disusun sebagai landasan untuk memahami sistem pengereman, mekanisme pendinginan, serta pengaruh variasi jarak *nozzle* terhadap temperatur rem tromol guna mendukung analisis dan pembahasan penelitian.

○ Sistem Rem Tromol

Sistem rem pada kendaraan berperan penting dalam menjaga keselamatan dengan cara memperlambat atau menghentikan laju kendaraan melalui gesekan antara *brake shoe* dan *drum brake*, yang menghasilkan panas tinggi [11]. Jika temperatur rem melebihi batas aman, yaitu 200°C untuk bahan asbestos dan 350°C untuk non-asbestos, maka sistem pengereman berisiko mengalami *overheat* yang dapat menurunkan kinerjanya [5].

○ Fluida Gas (Udara)

Udara merupakan jenis fluida kompresibel yang volumenya dapat diperkecil, namun proses pemampatan ini akan meningkatkan temperatur dan mempengaruhi kerapatan molekulnya. Dalam proses pendinginan, udara sering digunakan karena kemampuannya dalam menyerap panas melalui perpindahan panas secara konveksi dari material bersuhu lebih tinggi [12]. Selain itu, udara memiliki kapasitas panas jenis yang cukup tinggi serta konduktivitas termal, yang menjadikannya efektif sebagai media pendingin. Kapasitas panas yang besar memungkinkan udara menyerap banyak panas tanpa peningkatan suhu yang drastis, sehingga dapat menjaga kestabilan suhu material [13].

Walaupun konduktivitas termal udara lebih rendah dibandingkan fluida cair, kekurangan ini dapat dikompensasi dengan peningkatan kecepatan aliran udara. Dalam sistem pendingin berbasis udara bertekanan dan *nozzle*, kecepatan aliran tinggi dapat meningkatkan laju perpindahan panas secara signifikan [14]. Perpindahan panas melalui konveksi terjadi ketika fluida cair atau gas mengalir dari area bersuhu tinggi ke area bersuhu rendah akibat perbedaan temperatur yang ada [12]. Mekanisme ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu konveksi alami, yang berlangsung karena perbedaan suhu yang menyebabkan perubahan densitas, dan konveksi paksa, yang dibantu oleh pengaruh eksternal seperti aliran udara dari *nozzle*, kipas, atau pompa [15]. Dalam sistem rem tromol kendaraan, penggunaan konveksi paksa dapat meningkatkan efektivitas pendinginan dengan cara mengarahkan udara secara langsung ke permukaan tromol. Jarak antara *nozzle* dan tromol turut menentukan seberapa besar kecepatan dan volume udara yang menghantam permukaan rem, sehingga memengaruhi proses pelepasan panas. Semakin tinggi kecepatan udara yang diterapkan, semakin cepat pula panas akibat gesekan dapat dikurangi. Karena itu, penyesuaian jarak dan ukuran *nozzle* menjadi aspek penting untuk mengoptimalkan sistem pendinginan berbasis konveksi paksa pada rem tromol.

○ Sistem Kontrol

Sistem kontrol pada penelitian ini adalah sebuah sistem dimana dapat memantau dan menjalankan perintah sesuai dengan program yang disusun dengan baik [16]. Berikut merupakan sistem pengontrolan yang digunakan dalam penelitian kali ini:

➤ Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah salah satu jenis mikrokontroler berbasis ATmega2560.

➤ Sensor temperatur IR GY-906 MLX90614

Sensor suhu infrared (IR) adalah sistem pemantau temperatur yang digunakan untuk melihat kenaikan atau penurunan suhu dengan tipe *non-contact*.

➤ Electric solenoid

Electric solenoid adalah aktuator yang digunakan untuk memutuskan dan menghubungkan jalur fluida udara secara *electric*.

➤ Data logger

Merupakan perangkat elektronik untuk mempermudah dalam pengambilan data karena tiap waktu ke waktu data akan dicatat dan disimpan pada *data logger*.

➤ Step down LM2596

Step down LM2596 adalah sistem pengontrolan yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari sumber yang tinggi menuju tegangan yang lebih rendah.

➤ Electric relay

Electric relay adalah aktuator yang digunakan untuk memutus dan menghubungkan sumber listrik secara otomatis sesuai dengan program yang ditentukan oleh pembuatnya.

➤ LCD 16x2

LCD adalah perangkat elektronik yang digunakan untuk menampilkan sebuah nilai yang ditunjukkan oleh sebuah sensor.

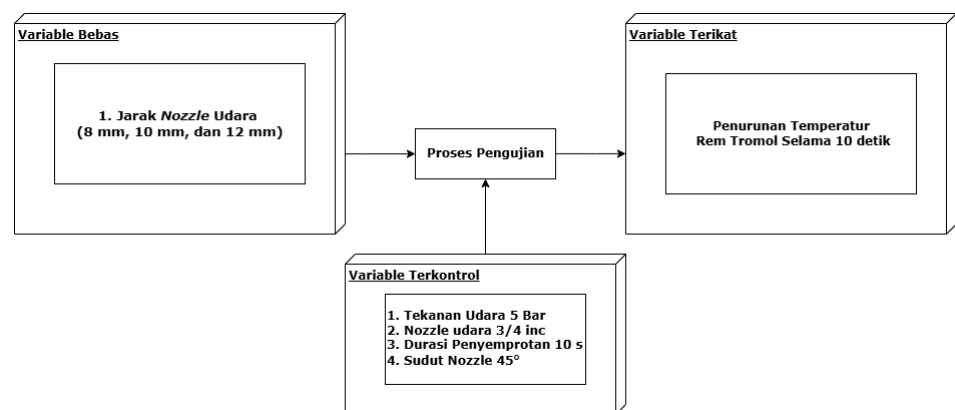
○ Sistem Pendinginan Rem (*Cooling Brake*)

Sistem pendinginan rem sangat penting untuk menjaga suhu komponen rem tetap stabil agar performa pengereman optimal dan mencegah terjadinya *overheating*. Udara sebagai fluida gas menjadi media pendingin yang efektif karena bersifat ringan, mudah didapat, dan mampu mentransfer panas secara konveksi [17]. Sistem pendingin berbasis udara bertekanan mampu bekerja secara efisien bahkan saat kendaraan tidak bergerak, berbeda dengan sistem pasif yang bergantung pada kecepatan. Penggunaan *air scoop* pada rem cakram atau fluida cair dengan tambahan sirip pendingin pada rem tromol terbukti dapat menurunkan temperatur secara signifikan. Udara juga unggul karena desain sistemnya lebih sederhana dan tidak menimbulkan risiko korosi seperti sistem berbasis cairan.

Efektivitas pendinginan udara didukung oleh teori perpindahan panas secara konveksi berdasarkan hukum Newton, di mana semakin besar perbedaan temperatur, semakin tinggi laju pelepasan panas. Peningkatan kecepatan aliran udara dalam konveksi paksa akan meningkatkan koefisien perpindahan panas, sehingga proses pendinginan lebih cepat. Hukum gas ideal menjelaskan bahwa pemampatan udara meningkatkan tekanan dan densitasnya, yang berdampak pada peningkatan kemampuan menyerap panas. Selain itu, prinsip hambatan termal menunjukkan bahwa memperluas permukaan dengan penambahan sirip akan mempercepat proses pelepasan panas. Dengan landasan teoritis tersebut, penggunaan udara sebagai media pendingin rem tromol sangat potensial untuk dikembangkan menjadi sistem pendinginan yang efisien, praktis, dan ramah lingkungan.

2.2 Kerangka Konsep Penelitian

Kerangka konsep penelitian yang digunakan dalam penyusunan ini berisikan variable bebas, variable terikat, dan variable terkontrol.



Gambar 2. 1 Kerangka Konsep Penelitian

Pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak *nozzle* udara (8 mm, 10 mm, 12 mm) selama sepuluh detik menggunakan sudut *nozzle* 45° untuk mengetahui efektivitasnya dalam menurunkan temperatur rem tromol pada kendaraan bermuatan berat. Berikut merupakan perancangan alat yang digunakan:



Gambar 2. 2 Perancangan Alat

Alat yang digunakan untuk mendukung penelitian ini meliputi *compressor*, *hot gun*, *controller*, dan *nozzle* udara yang dirangkai menjadi satu kesatuan agar bekerja secara normal. Saat sensor temperatur membaca pada suhu 150°C maka Arduino Mega 2560 akan memerintahkan *electric relay* untuk bekerja kemudian *electric solenoid* akan terbuka dan udara bertekanan sebesar 5 bar dari kompresor akan menuju *nozzle* udara untuk mendinginkan *back plate*, setiap perubahan temperatur akan dibaca dan disimpan menggunakan *data logger*. Data yang didapatkan dari penelitian ini kemudian akan diolah menggunakan minitab 22 yang ditampilkan berupa grafik dan membandingkan data yang terbaik

3. Metode

3.1. Jenis Penelitian dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif untuk menganalisis hubungan sebab-akibat antara variabel bebas dan variabel terikat. Dalam penelitian ini, dikembangkan sebuah alat sistem pendingin rem berbasis mikrokontroler yang memanfaatkan udara bertekanan. Alat tersebut dirancang untuk mencegah terjadinya *overheat* pada sistem rem tromol yang dapat menyebabkan kegagalan pengereman.

Lokasi penelitian pengaruh jarak *nozzle* pada *air cooling brake* akan dilakukan di bengkel program studi Teknik Otomotif Elektronik gedung Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang untuk mendapatkan hasil dari penelitian tersebut. Untuk menyiapkan program pada arduino akan dilakukan rumah penyusun, yakni Jalan Raya Candi V, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia. Waktu pelaksanaan penelitian ini dilakukan pada bulan Februari 2025 hingga bulan Mei 2025

Pada penelitian ini terdapat tiga variabel, yakni sebagai berikut:

- Variabel Bebas
Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi jarak *nozzle* (8 mm, 10 mm, 12 mm)
- Variabel Terikat
Variabel terikat pada penelitian ini adalah hasil akhir dari penurunan temperatur rem tromol selama 10 detik
- Variabel Kontrol
Variabel kontrol pada penelitian ini adalah tekanan udara dari kompresor sebesar 5 bar, *nozzle* dengan ukuran 3/4" yang dipasang pada sudut 45°, dan durasi penyemprotan udara selama 10 detik

3.2. Metode Pengambilan Data

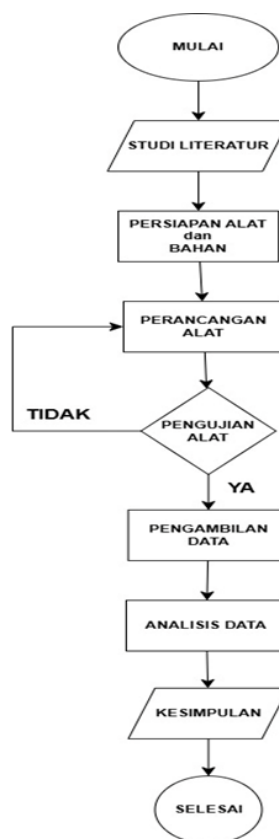
Berikut merupakan metode pengambilan data yang digunakan pada penelitian kali ini:

- Menyiapkan alat dan bahan yang diperlukan dalam pengujian.
- Merangkai alat dan bahan agar dapat bekerja dengan baik.
- Mengkalibrasi sensor temperatur dengan *thermo gun*.
- Mengatur jarak *nozzle* untuk pendinginan *back plate*.
- Memastikan tekanan kompresor 5 bar menggunakan *pressure gauge*.
- Melakukan pengukuran awal dengan memanaskan *back plate* hingga 150°C menggunakan *hot gun* tanpa adanya sistem pendingin rem tromol dan pengambilan data penurunan selama 10 detik.

- Mendingkan sistem rem menjadi 120°C kemudian memanaskan kembali rem tromol hingga 150°C dan memastikan *nozzle* udara bekerja dengan baik.
- Mengambil data selama 10 detik sesuai dengan variasi jarak *nozzle* (8 mm, 10 mm, dan 12 mm).
- Mengolah data sesuai dengan pengujian yang telah dilakukan lalu membuat kesimpulan.

3.3. Metode Pengumpulan dan Pengolahan Data

Untuk metode pengumpulan data digunakan bantuan *software Microsoft Excel*, sedangkan untuk metode pengolahan data digunakan uji normalitas data dan Anova *One-Way* menggunakan bantuan *software Minitab 22*. Berikut merupakan diagram alir penelitian kali ini:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, didapatkan hasil pengujian pada tabel dibawah ini. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap replikasi percobaan dengan harapan hasil yang diperoleh tidak hanya hasil nilai acak semata.

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian

Jarak <i>Nozzle</i> (mm)	Temperatur (°C)			
	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Rata-rata
8	127,52	127,97	127,43	127,64
10	130,04	129,92	129,59	129,85
12	131,58	131,25	131,05	131,29

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 4.1, terlihat bahwa jarak *nozzle* 8 mm menghasilkan temperatur akhir sebesar 127,43°C, 127,97°C, dan 127,53°C. Rata-rata dari ketiga pengujian ini adalah 127,64°C, yang menjadi temperatur terendah dalam seluruh variasi. Hal ini menunjukkan bahwa udara bertekanan pada jarak ini mampu menjangkau permukaan rem secara optimal. Arah semburan yang fokus dan jarak yang dekat membuat aliran udara memiliki kecepatan dan tekanan dinamis yang tinggi saat mengenai permukaan rem. Dalam kondisi ini, konveksi paksa terjadi secara maksimal karena udara bergerak akibat tekanan eksternal dari *nozzle*, yang meningkatkan laju perpindahan panas. Menurut Incropera, dkk pada bukunya yang berjudul “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, teori perpindahan panas, yakni konveksi paksa memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan konveksi alami karena aliran fluida dipicu oleh gaya luar, seperti kipas atau tekanan *nozzle*, yang mempercepat pengangkutan energi panas dari permukaan benda ke fluida [18].

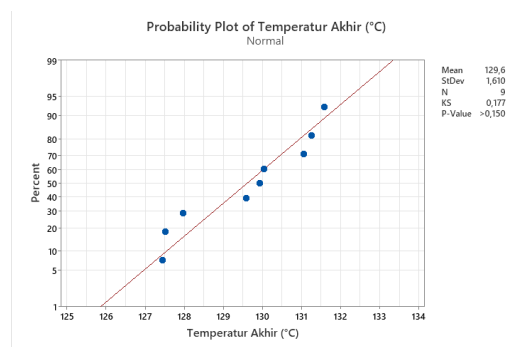
Selanjutnya, pada jarak *nozzle* 10 mm, temperatur akhir yang tercatat adalah 130,04°C, 129,59°C, dan 129,79°C, dengan rata-rata sebesar 129,81°C. Dibandingkan jarak 8 mm, terjadi peningkatan temperatur sekitar 2°C yang mengindikasikan penurunan efektivitas pendinginan. Hal ini disebabkan oleh menurunnya intensitas aliran udara yang mencapai permukaan rem akibat bertambahnya jarak. Semburan udara mulai menyebar dan kehilangan fokus sehingga proses pelepasan panas dari permukaan rem ke udara tidak lagi seefektif sebelumnya. Karena konveksi paksa bergantung pada kecepatan, arah, dan intensitas aliran fluida, maka ketika aliran mulai melemah atau menyebar, kemampuan fluida dalam menyerap dan membawa panas menurun drastis. Teori mengenai konveksi paksa pada buku Incropera, dkk yang berjudul “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, menyatakan bahwa dalam konveksi paksa, koefisien perpindahan panas meningkat dengan naiknya kecepatan aliran; namun pada jarak yang lebih jauh, aliran menjadi lebih lambat dan kehilangan energi, sehingga efisiensi konveksi ikut menurun [18].

Pengujian pada jarak 12 mm menunjukkan temperatur tertinggi dengan hasil sebesar 131,58°C, 131,31°C, dan 131,35°C, dengan rata-rata 131,41°C. Nilai ini menjadi yang tertinggi dari seluruh variasi, mencerminkan bahwa pendinginan menjadi paling tidak efektif pada jarak terjauh. Pada jarak ini, aliran udara telah kehilangan sebagian besar energi kinetiknya sebelum menyentuh permukaan rem, sehingga kekuatannya dalam mengganggu lapisan termal pada permukaan juga menurun. Akibatnya, udara tidak mampu mengangkat panas dari permukaan rem secara efisien karena tekanan impaknya berkurang secara signifikan. Konveksi paksa yang terbentuk pada jarak ini tidak lagi optimal, karena gaya eksternal dari udara bertekanan sudah tidak cukup kuat untuk menghasilkan aliran yang efektif dalam mentransfer panas. Berdasarkan teori yang digunakan di atas tentang pendinginan, semakin besar kecepatan fluida dan perbedaan temperatur, maka semakin tinggi pula laju perpindahan panas; namun pada jarak 12 mm, aliran tidak lagi cukup cepat untuk mempertahankan perbedaan suhu yang signifikan antara udara dan permukaan rem.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa jarak *nozzle* sangat memengaruhi performa pendinginan rem tromol. Jarak terdekat 8 mm memberikan hasil pendinginan terbaik karena udara bertekanan mampu menjangkau dan menyentuh permukaan rem dengan optimal. Ketika jarak diperbesar menjadi 10 mm hingga 12 mm, performa pendinginan menurun secara bertahap. Menurut Incropera, dkk pada buku yang berjudul “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, fenomena ini sejalan dengan prinsip konveksi paksa, yaitu suatu mekanisme perpindahan panas yang dipicu oleh adanya pergerakan fluida akibat gaya luar, seperti kipas atau semburan dari *nozzle*, yang meningkatkan laju aliran fluida dan mempercepat pembuangan panas. Menurut teori perpindahan panas, konveksi paksa memiliki koefisien perpindahan panas yang jauh lebih besar dibanding konveksi alami karena aliran fluida dikendalikan secara aktif, sehingga mampu meningkatkan efisiensi sistem pendinginan, terutama pada kondisi statis seperti kendaraan yang tidak bergerak [18]. Oleh karena itu, pemilihan jarak *nozzle* yang tepat sangat penting agar aliran udara tetap fokus dan memiliki energi kinetik cukup untuk mengangkat panas secara efektif dari permukaan rem tromol.

4.2. Pembahasan

Setelah dilakukan pengumpulan data menggunakan bantuan *Microsoft Excel*, data hasil pengujian tersebut diuji menggunakan uji normalitas data menggunakan *software* Minitab 22 untuk dilihat data hasil pengujian berdistribusi secara normal atau tidak. Berikut merupakan hasil uji normalitas data:



Gambar 4. 1 Grafik Uji Normalitas Data

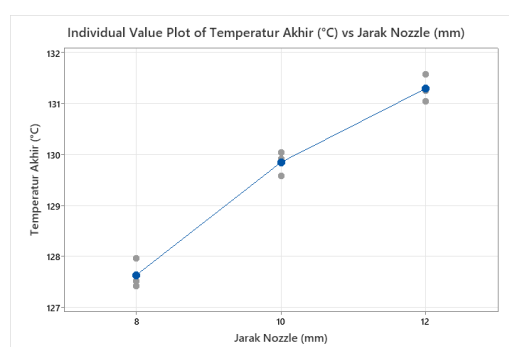
Berdasarkan gambar 4.2 grafik *Probability Plot* uji normalitas data di atas, distribusi data temperatur menunjukkan pola yang mengikuti garis diagonal secara konsisten, yang menandakan bahwa data menyebar secara normal. Nilai p-value yang lebih besar dari 0,150 serta nilai Kolmogorov-Smirnov sebesar 0,177 mengindikasikan bahwa tidak terdapat penyimpangan signifikan dari distribusi normal, atau dapat dikatakan data berdistribusi dengan normal. Dengan jumlah data sebanyak sembilan, hasil ini menunjukkan bahwa data temperatur layak untuk dianalisis menggunakan metode statistik parametrik, yakni Anova *One-Way*.

Tabel 4. 2 Hasil Analisa Data Menggunakan Anova *One-Way*

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Jarak <i>Nozzle</i>	2	20,3142	10,1571	145,35	0,000
Error	6	0,4193	0,0699		
Total	8	20,7334	0,3764		

Analisa data menggunakan metode Anova *One-Way* digunakan untuk mengetahui pengaruh antara variabel bebas terhadap variabel terikat. Berdasarkan hasil uji Anova *One-Way*, nilai p-value sebesar 0,000 menunjukkan bahwa variasi jarak *nozzle* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap temperatur akhir rem tromol. Karena p-value jauh lebih kecil dari ambang batas 0,05, maka dapat disimpulkan bahwa perbedaan rata-rata temperatur yang terjadi antar jarak *nozzle* bukan disebabkan oleh faktor kebetulan. Ini menegaskan bahwa jarak *nozzle* merupakan variabel yang berpengaruh signifikan dalam sistem pendinginan rem ini.

Nilai Adj SS (*Adjusted Sum of Squares*) sebesar 20,3142 menunjukkan jumlah variasi total dalam data yang dapat dijelaskan oleh perbedaan jarak *nozzle*. Sementara itu, Adj MS (*Adjusted Mean Square*) sebesar 10,1571 merupakan hasil pembagian antara nilai Adj SS dan derajat bebas (DF) untuk faktor jarak *nozzle*, yang mencerminkan rata-rata variasi yang disebabkan oleh perlakuan tersebut. Kedua nilai ini mendukung validitas hasil analisis, di mana variasi temperatur yang diamati sebagian besar disebabkan oleh perbedaan jarak *nozzle* yang digunakan dalam pengujian.

Gambar 4. 2 Grafik *Individual Value Plot* Temperatur Akhir dan Jarak *Nozzle*

Grafik individual *value plot* di atas menunjukkan hubungan antara variasi jarak *nozzle* dan temperatur akhir rem tromol. Terlihat jelas bahwa seiring bertambahnya jarak *nozzle* dari 8 mm ke 12 mm, terjadi peningkatan temperatur akhir yang signifikan. Pada jarak 8 mm, temperatur akhir rata-rata berada di bawah 128°C, sementara pada jarak 10 mm meningkat menjadi sekitar 130°C, dan pada jarak 12 mm mencapai lebih dari 131°C. Ini menunjukkan bahwa jarak *nozzle* berbanding lurus dengan temperatur akhir, di mana semakin jauh *nozzle* dari permukaan rem, semakin rendah efektivitas pendinginan.

Selain itu, persebaran titik data pada masing-masing jarak menunjukkan konsistensi yang cukup baik, dengan penyebaran nilai yang tidak terlalu menyimpang antar replikasi. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil eksperimen stabil dan dapat diandalkan. Garis penghubung antar titik rata-rata juga memperkuat tren bahwa peningkatan jarak menyebabkan penurunan kinerja pendinginan. Oleh karena itu, grafik ini memberikan bukti visual bahwa jarak *nozzle* merupakan faktor penting yang memengaruhi efisiensi penurunan temperatur dalam sistem pendingin rem tromol berbasis udara bertekanan.

5. Perbandingan

Penelitian ini memiliki beberapa perbandingan dengan penelitian sebelumnya, terutama dari segi metode pendinginan dan sistem pengendalian. Jika penelitian terdahulu lebih banyak menggunakan cara manual atau media pendingin konvensional, penelitian ini menggunakan udara bertekanan yang dikontrol secara otomatis. Selain itu, fokus penelitian ini lebih diarahkan pada upaya menjaga temperatur rem tromol agar tetap stabil dan mencegah *overheat* secara efektif.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Penelitian ini membuktikan bahwa variasi jarak *nozzle* udara bertekanan memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas pendinginan pada rem tromol kendaraan. Hasil uji statistik menggunakan metode Anova *One-Way* menunjukkan nilai p-value sebesar 0,000, yang berarti terdapat perbedaan yang nyata antara masing-masing perlakuan jarak. Jarak *nozzle* 8 mm memberikan temperatur akhir paling rendah dengan rata-rata 127,64°C, dibandingkan dengan 10 mm (129,81°C) dan 12 mm (131,41°C). Grafik individual plot memperkuat hasil tersebut, di mana terlihat tren peningkatan temperatur seiring bertambahnya jarak *nozzle*. Data juga menunjukkan distribusi normal (p-value > 0,150), sehingga analisis parametrik dinyatakan valid. Nilai Adj SS dan Adj MS mengindikasikan bahwa sebagian besar variasi temperatur berasal dari perubahan jarak *nozzle* yang digunakan.
- Temuan ini sejalan dengan teori perpindahan panas, khususnya konsep konveksi paksa, di mana aliran udara bertekanan yang diarahkan secara aktif melalui *nozzle* memiliki energi kinetik yang tinggi dan mampu menyerap panas secara lebih efisien dari permukaan rem. Hukum Newton tentang pendinginan menyatakan bahwa peningkatan beda suhu dan koefisien perpindahan panas mempercepat pelepasan panas. Oleh karena itu, semakin pendek jarak *nozzle*, maka semakin besar daya serap panas oleh udara, karena aliran udara masih fokus dan bertenaga saat menyentuh permukaan. Tujuan penelitian untuk mengidentifikasi konfigurasi paling efektif tercapai, yaitu jarak 8 mm dengan sudut tetap 45°, yang terbukti mampu menurunkan suhu secara signifikan dalam sistem pendinginan udara bertekanan.
- Kontribusi utama dari penelitian ini adalah penerapan sistem pendinginan aktif berbasis udara bertekanan sebagai alternatif efisien untuk mencegah overheating rem tromol, khususnya pada kendaraan bermuatan berat. Dibandingkan dengan sistem pendingin berbasis cairan yang lebih kompleks dan berisiko korosi, sistem ini lebih praktis dan ramah lingkungan. Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti hanya mengevaluasi satu variasi sudut *nozzle* dan dilakukan dalam kondisi stasioner. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar penelitian mencakup pengujian dinamis, variasi sudut dan tekanan udara, serta analisis efisiensi pada kecepatan kendaraan berbeda, guna menghasilkan sistem pendinginan yang lebih komprehensif dan siap diaplikasikan di dunia nyata.

Referensi

- [1] D. B. Wibowo and I. Haryanto, "Kegagalan Fungsi Pengereman Bis Dan Truk Akibat Rusaknya Komponen Rakitan Kampas Rem," *Rotasi*, vol. 17, no. 1, p. 19, 2017, doi: 10.14710/rotasi.17.1.19-2.
- [2] Amirrullah, "Kecelakaan di Jalan Raya Akibat Rem Blong," *Berita Transportasi dan Logistik*, 2024. <https://bisnisnews.id/detail/berita/80-persen-kecelakaan-di-jalan-raya-akibat-rem-blong--12-ribu-orang--tewas--pengemudi-ceroboh> (accessed Jan. 12, 2024).
- [3] S. S. Muhammad Hendro Aprianto, Arif Wisaksono and U. M. Sidoarjo, "Rancang Bangun Sistem Peringatan Overheating pada Suhu Kampas Rem Mobil dengan Telegram," pp. 219–224, 2023, doi: 10.31284/p.snestik.2023.4301.
- [4] A. N. THOYYIB, "Pengaruh Berat Kendaraan Terhadap Efisiensi Rem Mobil Bus Kecil," *Repos. Politek. Keselam. Transp. Jalan*, 2021.
- [5] J. Jusnita and D. Denur, "Analisis Perbandingan Suhu Rem Tromol dengan Penggunaan Fluida Sebagai Pendingin: Pendekatan Eksperimental," *J. Surya Tek.*, vol. 10, no. 2, pp. 908–911, 2023, doi: 10.37859/jst.v10i2.6440.
- [6] M. F. Anjasmara, Y. B. Laras, W. H. Azrie, L. P. Wardiana, and S. Setijo Budi, "Rancang Bangun Sistem Peringatan Suhu Pengereman Berbasis Mikrokontroller ATmega 16," pp. 1–7, 2017, doi: 10.5614/sniko.2017.1.
- [7] J. Dewanto and A. Andreas Wijaya, "Sistem Pendingin Paksa Anti Panas Lebih (Over Heating) pada Rem Cakram (Disk Brake) Kendaraan," *J. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 97–101, 2017, doi: 10.9744/jtm.12.2.97-102.
- [8] M. M. David and N. F. Nike, "Pengaruh Penambahan Air Scoop Dan Pemberian Variasi Bahan Brake Pad Terhadap Penurunan Panas Pada Sistem Rem," vol. 6, no. 2, pp. 183–192, 2024, doi: 10.20527/jtamrotary.v7i.
- [9] J. Jusnita, D. Annisa Fithry, and V. Selviyanty, "Sistem Pengendalian Panas Rem Tromol dengan Water Cooler sebagai Solusi Losse Brake pada Truck," *J. Surya Tek.*, vol. 9, no. 2, pp. 511–515, 2022, doi: 10.37859/jst.v9i2.4333.
- [10] S. Topouris, D. Stamenković, M. Olphe-Galliard, V. Popović, and M. Tirovic, *Heat dissipation from stationary passenger car brake discs*, vol. 66, no. 1. 2019. doi: 10.5545/SV-JME.2019.6002.
- [11] H. P. Satrio, "Ducting Dan Sudut Pemasangan Terhadap Performa Radiator Sapu angin Speed V1," 2018.
- [12] A. Mursadin and R. Subagyo, *Bahan Ajar Perpindahan Panas I HMKK 453*. 2016.
- [13] O. F. P. Lyons, D. B. Murray, and A. A. Torrance, "Ai Jet Cooling of Disc Brake," *Arch. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 203–210, 2018.
- [14] F. I. Alao and S. Babatunde, "3 - On Some Basics of Compressible Fluid Flows," *Appl. Heat, Mass Fluid Bound. Layers*, pp. 55–66, 2020.
- [15] I. D. Wijatama, "Analisis Efek Pendingin Konveksi Paksa Menggunakan Jet Sintetik Nozzle X Analisis Efek Pendingin Konveksi Paksa," *Univ. Pembangunan, Fak. Tek.*, 2020.
- [16] D. Sasmoko, *Arduino dan Sensor*. Yayasan Prima Agus Teknik, 2021.
- [17] T. Khatir, M. Bouchetara, K. Derrar, M. Djafri, S. Khatir, and M. A. Wahab, "Thermomechanical Behavior of Brake Drums Under Extreme Braking Conditions," *Comput. Mater. Contin.*, 2021, doi: DOI:10.32604/cmc.2022.020879.
- [18] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2007.