

Rancang Bangun dan Evaluasi Awal Sistem Pengereman Elektro-Pneumatik Pada Prototipe Mobil Listrik Roda Empat

Christof Geraldi Simon^{1*}, Simon Ka'ka², Festo Andre Hardinsi³, Risa Lasarus⁴, Formanto Paliling⁵

^{1,4,5}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Toraja

²Jurusan Teknik Mesin, Prodi Mekatronika, Politeknik Negeri Ujung Pandang

³Jurusan Teknik Mesin, Prodi Manufaktur, Politeknik Negeri Fakfak

e-mail: *Christof@ukitoraja.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi kinerja awal sistem pengereman udara berbasis elektro-pneumatik pada mobil listrik roda empat. Sistem dikembangkan sebagai alternatif mekanisme pengereman yang mengintegrasikan komponen mekanik, meliputi kompresor udara, tangki udara, katup pengatur tekanan, katup solenoid 5/2, silinder pneumatik kerja ganda, dan rem tromol, dengan komponen elektronik berupa pedal rem elektrik, brushless controller, dan modul step-down. Pengujian dilakukan pada variasi tekanan udara 1–5 bar untuk mengamati langkah piston dan penurunan tekanan, dilanjutkan dengan pengujian pengereman kendaraan pada tekanan operasi 3 bar dan variasi kecepatan awal 19–36 km/jam. Hasil menunjukkan bahwa langkah piston meningkat dari 49,0 mm pada tekanan 1 bar menjadi 88,8 mm pada 5 bar, dengan rata-rata 65,4 mm. Gaya silinder pneumatik secara teoritis meningkat dari 49,09 N menjadi 245,44 N, sedangkan momen mekanis hasil perhitungan meningkat dari 1,47 N-m menjadi 7,36 N-m. Pada tekanan operasi 3 bar, pengujian mencatat jarak pengereman 17–145 cm dan waktu pengereman 3,0–4,5 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat diaktifkan dan berfungsi pada prototipe dalam kondisi pengujian yang diterapkan. Namun, verifikasi konsistensi data jarak dan waktu pengereman serta pengujian lanjutan diperlukan sebelum efektivitas dan keselamatan sistem dapat disimpulkan..

Kata kunci— Pengereman udara, Elektro-pneumatik, Mobil listrik, Silinder pneumatik, Jarak pengereman

Abstract

This study aims to design, implement, and evaluate the initial performance of an electro-pneumatic air braking system for a four-wheeled electric vehicle. The system was developed as an alternative braking mechanism that integrates mechanical components, including an air compressor, air reservoir, pressure control valve, 5/2-way solenoid valve, double-acting pneumatic cylinder, and drum brake, with electronic components, including an electric brake pedal, brushless controller, and step-down module. Testing was conducted at air pressures ranging from 1 to 5 bar to observe piston stroke and pressure drop, followed by vehicle braking tests at an operating pressure of 3 bar and initial speeds ranging from 19 to 36 km/h. The results showed that piston stroke increased from 49.0 mm at 1 bar to 88.8 mm at 5 bar, with an average of 65.4 mm. The theoretically calculated pneumatic cylinder force increased from 49.09 N to 245.44 N, while the calculated mechanical moment increased from 1.47 N-m to 7.36 N-m. At an operating pressure of 3 bar, the recorded braking distances ranged from 17 to 145 cm, and braking times ranged from 3.0 to 4.5 seconds. The results indicate that the system could be activated and functioned on the prototype under the tested conditions. However, further verification of the consistency of the braking distance and time measurements, along with

additional testing, is required before the system's braking effectiveness and safety can be conclusively established.

Keywords— Air braking, Electro-pneumatic, Electric vehicle, Pneumatic cylinder, Stopping distance

1. PENDAHULUAN

Transisi menuju kendaraan listrik mendorong pengembangan sistem kendaraan yang tidak hanya efisien dari sisi penggerak, tetapi juga aman dari sisi pengereman. Pada kendaraan listrik, energi kinetik dapat dikurangi melalui pengereman regeneratif, tetapi rem mekanis tetap dibutuhkan untuk kondisi ketika perlambatan harus ditingkatkan, kendaraan berhenti sepenuhnya, atau terjadi kondisi operasi tertentu. Penelitian mengenai pengereman mobil listrik hasil modifikasi menunjukkan bahwa kecepatan dan beban kendaraan berpengaruh terhadap gaya pengereman yang diperlukan [1].

Penggunaan sistem pneumatik pada kendaraan telah berkembang terutama pada kendaraan komersial dan kendaraan berat karena udara bertekanan dapat menghasilkan gaya aktuasi yang besar dan sistem dapat dirancang untuk bekerja secara kontinu [2],[3]. Kajian sistem pengereman pneumatik menunjukkan bahwa kinerja sistem dipengaruhi oleh tekanan kerja, karakteristik aktuator, distribusi udara, dan mekanisme rem [4]. Integrasi sistem pneumatik dengan kendali elektronik kemudian memungkinkan aktuasi dan pengaturan sistem dilakukan secara lebih terkontrol [5].

Pada kendaraan listrik, penelitian terdahulu lebih banyak membahas pengereman mekanis, kendali pengereman otomatis, dan pengereman regeneratif. [6] mengembangkan kendali otomatis pengereman mobil listrik otonom dengan mekanisme rem cakram. Penelitian lain mengkaji gaya traksi dan gaya gesek pada rem kendaraan listrik 2 kW [7], sedangkan Fauzi dan Rabbika [8] menganalisis jarak pengereman serta temperatur Rem Tromol pada prototipe mobil listrik. [9] juga melaporkan performa pengereman pada mobil listrik prototipe melalui parameter gaya, waktu, dan jarak pengereman.

Di sisi lain, Setyono et al. [10] telah menunjukkan pemanfaatan sistem pneumatik pada kendaraan hybrid, tetapi sistem tersebut ditujukan sebagai bagian dari sistem penggerak dan bukan sebagai sistem pengereman udara utama pada kendaraan listrik murni. Hal tersebut menunjukkan adanya ruang pengembangan untuk mengintegrasikan sumber tekanan udara, aktuator pneumatik, rem tromol, dan kendali elektronik sebagai satu sistem pengereman pada mobil listrik prototipe. Dalam perancangan sistem pengereman, pemilihan aktuator dan tekanan kerja perlu mempertimbangkan kebutuhan teknis kendaraan, termasuk massa total kendaraan, rentang kecepatan rancangan, jumlah roda yang direm, kebutuhan perlambatan, dan torsi pengereman yang diperlukan. Menurut [11].

Berdasarkan permasalahan dan kajian penelitian terdahulu, penelitian ini berfokus pada implementasi sistem pengereman udara berbasis elektro-pneumatik pada prototipe mobil listrik roda empat. Penelitian diawali dengan mengevaluasi karakteristik aktuator melalui hubungan tekanan udara dan perpindahan piston, kemudian dilanjutkan dengan pengujian pengereman kendaraan berdasarkan hubungan kecepatan awal terhadap jarak dan waktu pengereman. Melalui tahapan tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi fungsi dan karakteristik kinerja sistem pengereman yang dikembangkan serta mengidentifikasi kondisi pengoperasian yang dapat mendukung proses pengereman pada prototipe. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar evaluasi teknis dan pengembangan lebih lanjut terhadap penerapan sistem elektro-pneumatik pada kendaraan listrik.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi kinerja sistem pengereman udara berbasis elektro-pneumatik pada mobil listrik roda empat, Sistem dirancang dengan menggabungkan subsistem pneumatik dan subsistem elektrik. Sumber energi listrik berasal dari baterai kendaraan, kemudian digunakan untuk mengoperasikan kompresor dan rangkaian kontrol. Udara bertekanan disimpan pada tangki udara dan dialirkan melalui pressure control valve menuju katup solenoid 5/2. Ketika pedal rem elektrik diaktifkan, sinyal kendali mengaktifkan katup sehingga udara mendorong silinder pneumatik kerja ganda dan menghasilkan gerakan pada mekanisme rem tromol.

2.1 Rancangan Sistem

Komponen mekanik utama yang digunakan terdiri atas kompresor udara 0,75 HP dengan tekanan maksimum 8 bar, tangki udara maksimum 8 bar, pressure control valve 0–8 bar, katup solenoid 5/2 DC 24 V, silinder pneumatik kerja ganda, rem tromol, dan selang berdiameter 6 mm. Sambungan udara diperiksa menggunakan metode inspeksi kebocoran untuk memastikan tidak terdapat kebocoran yang mengganggu tekanan kerja.

Pada subsistem elektrik digunakan pedal rem elektrik, brushless controller, dan modul step-down DC–DC. Brushless controller berperan dalam pengendalian sistem kelistrikan kendaraan dan koordinasi saat aktuasi pengereman, sedangkan modul step-down digunakan untuk menyesuaikan tegangan komponen kontrol. Integrasi elektro-pneumatik dimaksudkan agar proses pengubahan energi listrik menjadi tekanan udara dan selanjutnya menjadi gaya mekanis dapat berlangsung dalam satu rangkaian kendali.

2.2 Perhitungan Gaya dan Torsi Pengereman

Gaya teoritis yang dihasilkan silinder pneumatik dihitung berdasarkan tekanan udara dan luas efektif piston. Hubungan dasar yang digunakan Adalah :

$$1) \quad F_{gaya} = P_{cilinder} \cdot A_{piston} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

$P_{cilinder}$ adalah tekanan di Tromol rem (Pa).

A_{piston} adalah luas efektif piston/diafragma (m²).

$$2) \quad A_1 = \pi \times (D^2/4) \dots \dots \dots (2)$$

D = Diameter batang (mm).

A = Luas penampang piston (mm² atau cm²)

dengan F adalah gaya pneumatik (N), P adalah tekanan udara (Pa), dan A adalah luas efektif piston (m²). Torsi pengereman pada drum dihitung menggunakan:

$$T = F \times r \dots \dots \dots (3)$$

dengan T adalah torsi pengereman (N.m), F adalah gaya normal yang bekerja pada mekanisme rem, dan r adalah jarak tegak lurus dari pusat putar ke titik aplikasi gaya [12].

2.3 Prosedur Pengujian

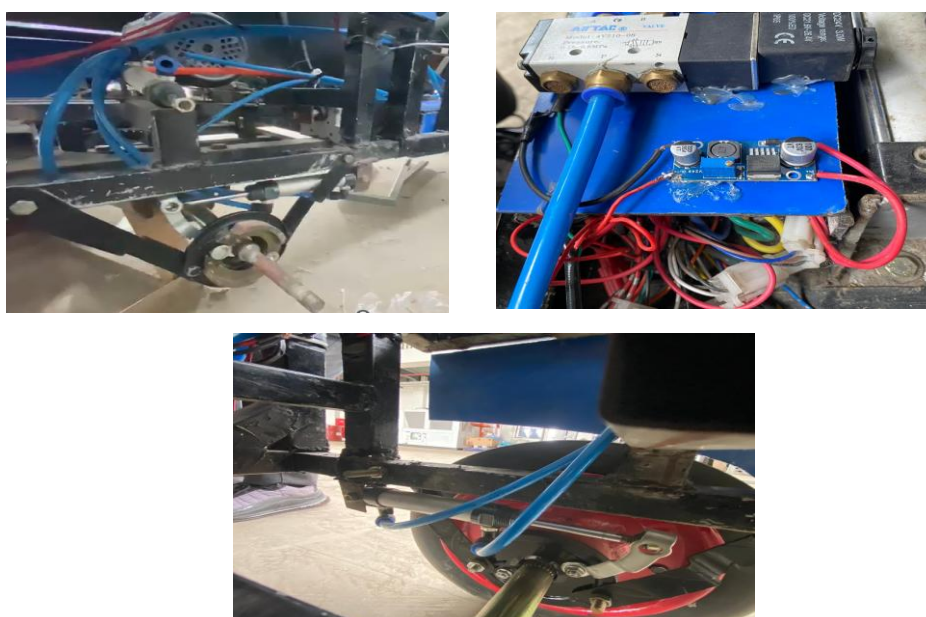
Penelitian diawali dengan studi literatur dan identifikasi kebutuhan, dilanjutkan dengan perancangan mekanik dan sistem elektro-pneumatik, perakitan komponen, serta pengujian sistem pengereman pada prototipe mobil listrik roda empat. Pengujian dilakukan dalam tiga

tahap. Tahap pertama adalah pengujian karakteristik aktuasi pada tekanan udara 1, 2, 3, 4, dan 5 bar dengan mengukur langkah piston dan perubahan tekanan udara. Tahap kedua adalah pengujian pengereman pada variasi kecepatan awal 19, 28, 31, 34, dan 36 km/jam dengan tekanan operasi 3 bar, melalui pengukuran jarak berhenti dan waktu pengereman. Tahap ketiga adalah pengujian pengaruh pembebanan terhadap jarak berhenti kendaraan. Pembebanan dilakukan dengan menambahkan beban sebesar 43 kg dan 49 kg secara terpisah, serta menggabungkan kedua beban tersebut sehingga total beban tambahan mencapai 92 kg. Setiap kondisi pembebanan diuji pada jarak lintasan 15, 20, dan 25 m. Kecepatan awal dan jarak berhenti dicatat pada setiap pengujian untuk mengevaluasi perubahan respons pengereman akibat perbedaan pembebanan. Perbandingan hasil dilakukan dengan mempertimbangkan kecepatan awal pada setiap percobaan, karena perbedaan kecepatan juga dapat memengaruhi jarak berhenti. Seluruh data dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi karakteristik aktuasi dan fungsi awal sistem pengereman elektro-pneumatik, dengan membedakan hasil perhitungan teoritis dari hasil pengukuran aktual.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Implementasi Sistem

Hasil perakitan menunjukkan bahwa kompresor, Tangki udara, pressure control valve, katup solenoid, silinder pneumatik, dan rem tromol dapat ditempatkan dan diintegrasikan pada kendaraan. Katup solenoid dipasang dekat silinder Pneuamatik untuk mempersingkat jalur udara. Batang piston dihubungkan langsung dengan mekanisme tuas rem tromol sehingga gerak linear piston diubah menjadi gaya tekan pada mekanisme rem. Pemeriksaan menggunakan air sabun tidak menunjukkan gelembung pada sambungan, sehingga sistem dinyatakan tidak mengalami kebocoran yang teramati selama pemeriksaan. Konfigurasi tersebut menunjukkan bahwa integrasi elektro-pneumatik dapat diterapkan pada kendaraan listrik prototipe dengan arsitektur yang relatif sederhana. Temuan ini sejalan dengan kajian mengenai sistem elektro-pneumatik yang menekankan pentingnya pengaturan aliran dan tekanan untuk memperoleh respons aktuasi yang konsisten [4], serta penelitian Adril et al. [13] yang menunjukkan penerapan kontrol elektro-pneumatik pada mesin mekanis.



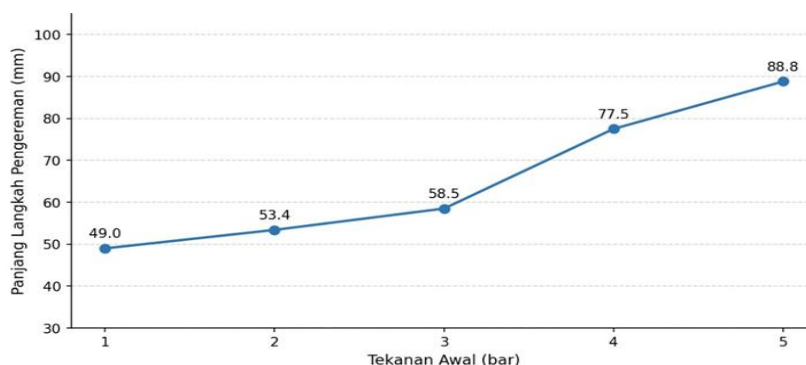
Gambar 1. Pemasangan Rem tromol dan Silinder pneumatik

3.2 Hubungan Tekanan Udara dan Panjang Langkah Piston

Tabel 1. Hubungan Tekanan Udara dan Panjang Langkah Piston

Pengujian ke-	Tekanan Pengereman (bar)	Panjang Langkah Pengereman (mm)	Penurunan Tekanan Pengereman (bar)	Keterangan
1	1	49,0	0.5	Berfungsi
2	2	53.4	1.5	Berfungsi
3	3	58.5	2.0	Berfungsi
4	4	77.5	3.0	Berfungsi
5	5	88.8	3.2	Berfungsi
Rata-rata	-	65.4	2.0	Berfungsi

Panjang langkah piston meningkat dari 49.0 mm pada 1 bar menjadi 88.8 mm pada 5 bar. Kenaikan tidak sepenuhnya seragam, perubahan terbesar terjadi antara 3 dan 4 bar, yaitu dari 58.5 menjadi 77.5 mm. Secara keseluruhan, pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tekanan memberikan peningkatan perpindahan piston dan memperbesar kapasitas aktuator mekanisme rem. Pola ini konsisten dengan karakteristik aktuator pneumatik yang menunjukkan perubahan perpindahan sebagai respons terhadap perubahan tekanan kerja [12]. Penurunan tekanan pada jalur udara juga perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi respons aktuator sistem [13].



Gambar 2. Hubungan tekanan udara dengan panjang langkah piston.

3.3 Gaya dan Torsi Pengereman

Aktuator pengereman terjadi saat batang piston mendorong tuas rem (gerakan maju/*extending*), maka perhitungan gaya pengereman F pada penelitian ini menggunakan luas A_1 , sesuai persamaan (2).

Spesifikasi pneumatic cylinder yang digunakan adalah diameter piston (*bore*) $D = 25$ mm, diameter batang piston $d = 8$ mm, dan jarak lengan tuas rem terhadap pusat putar tromol (jari-jari efektif) $r = 3$ cm = 0,03 m.

Menghitung luas efektif piston untuk gerakan maju (*extending*), sesuai persamaan (2):

$$A_1 = \pi \times D^2/4$$

$$A_1 = \pi \times (25 \text{ mm})^2 / 4$$

$$A_1 = \pi \times 625 \text{ mm}^2 / 4$$

$$A_1 = \pi \times 156,25 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 490,87 \text{ mm}^2 = 4,9087 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Menghitung gaya pengereman (F) untuk setiap variasi tekanan, sesuai persamaan (1): $F = P \times A_1$

Contoh perhitungan pada tekanan 1 bar ($P = 100.000 \text{ Pa}$) :

$$F = P \times A_1$$

$$F = 100.000 \text{ Pa} \times 4.9087 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = 49.09 \text{ N}$$

Menghitung torsi pengereman (T) pada Rem Tromol, sesuai persamaan (3):

$$T = F \times r$$

Contoh perhitungan pada tekanan 1 bar:

$$T = F \times r$$

$$T = 49.09 \text{ N} \times 0.03 \text{ m}$$

$$T = 1,47 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Contoh perhitungan pada tekanan kerja aktual 3 bar:

$$T = F \times r$$

$$T = 147.26 \text{ N} \times 0.03 \text{ m}$$

$$T = 4.42 \text{ N}\cdot\text{m}$$

. Tabel 2. Hasil perhitungan gaya dan torsi pengereman.

Tekanan Pengereman (bar)	Gaya Pengereman F (N)	Torsi Pengereman T (N·m)
1	49.09	1.47
2	98.17	2.95
3	147.26	4.42
4	196.35	5.89
5	245.44	7.36
Rata-rata	147.26	4.42

Gaya pengereman meningkat secara linear dari 49.09 N pada 1 bar menjadi 245.44 N pada 5 bar. Torsi juga meningkat dari 1.47 N·m menjadi 7.36 N·m. Pada tekanan kerja 3 bar, gaya teoritis yang dihitung sebesar 147.26 N dengan torsi 4.42 N·m. Kecenderungan tersebut sesuai dengan prinsip bahwa gaya pneumatik berbanding dengan tekanan pada luas piston yang tetap. Dari sisi desain, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan dapat meningkatkan kemampuan aktuasi, tetapi pemilihan tekanan operasi perlu mempertimbangkan kebutuhan Panjang Langkah piston, konsumsi udara, dan respons mekanisme.

3.4 Kinerja Pengereman Kendaraan pada Tekanan 3 bar

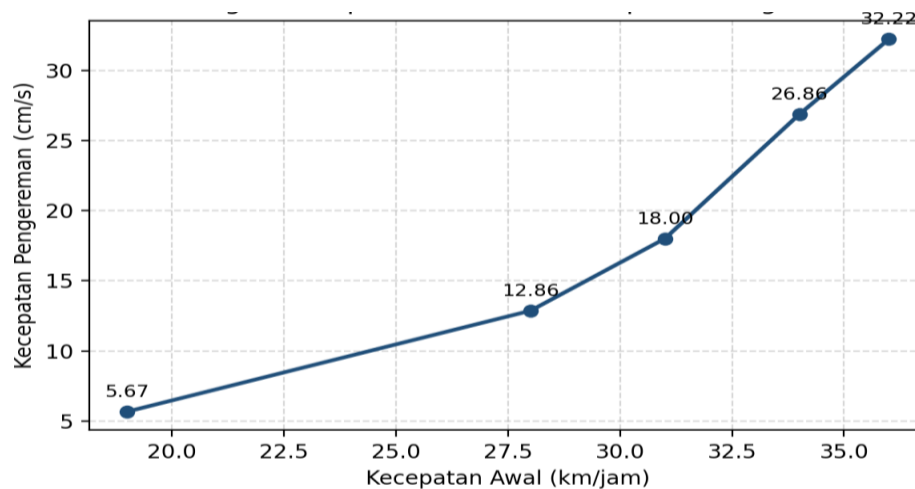
Pengujian pengereman dilakukan pada lintasan datar dan bersih dengan tekanan udara 3 bar karena mampu menggerakkan aktuator dan membuka kampas rem. Pada tekanan 1–2 bar, aktuasi belum memadai, sedangkan pada 4–5 bar gerakan piston berlebihan dan penggunaan udara dinilai kurang efisien. Pengujian dilakukan pada variasi kecepatan awal 19, 28, 31, 34, dan 36 km/jam dengan mengukur jarak serta waktu hingga kendaraan berhenti

Tabel 3. Hasil uji pengereman hingga kendaraan berhenti.

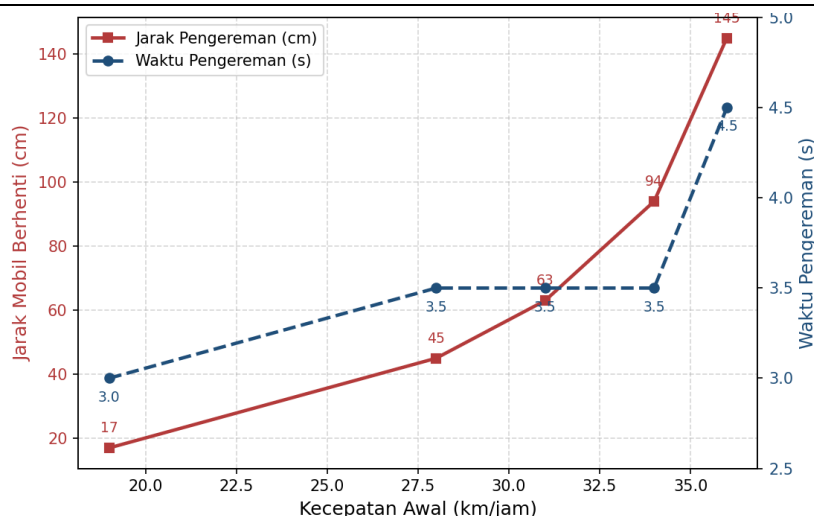
Kecepatan mobil (km/jam)	Tekanan Pengereman (bar)	Jarak Mobil Berhenti (cm)	Waktu Pengereman (s)	Kecepatan Pengereman (cm/s)
19	3	17	3.0	5.67
28	3	45	3.5	12.86
31	3	63	3.5	18.00
34	3	94	3.5	26.86
36	3	145	4.5	32.22

Berdasarkan Tabel 3 sistem pengereman udara mampu menghentikan kendaraan listrik pada seluruh variasi kecepatan yang diuji. Jarak pengereman meningkat seiring bertambahnya kecepatan awal, dari 17 cm pada kecepatan 19 km/jam hingga 145 cm pada kecepatan 36 km/jam, sementara waktu pengereman berada pada rentang 3,0–4,5 detik.

Kolom kecepatan pengereman dihitung menggunakan rumus jarak mobil berhenti dibagi waktu pengereman, yang merepresentasikan kecepatan rata-rata kendaraan selama proses pengereman berlangsung dalam satuan cm/s. Nilai kecepatan pengereman meningkat secara konsisten seiring bertambahnya kecepatan awal kendaraan, mulai dari 5,67 cm/s pada kecepatan awal 19 km/jam, 12,86 cm/s pada 28 km/jam, 18,00 cm/s pada 31 km/jam, 26,86 cm/s pada 34 km/jam, hingga nilai tertinggi sebesar 32,22 cm/s pada kecepatan awal 36 km/jam.



Gambar 3. Hubungan kecepatan awal dengan waktu jarak .



Gambar 3. Hubungan kecepatan awal dengan waktu jarak .

Berdasarkan gambar grafik di atas, terlihat bahwa jarak pengereman mobil cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu pengereman yang dibutuhkan untuk menghentikan mobil secara sempurna, meskipun peningkatan waktu pengereman relatif kecil dibandingkan dengan peningkatan jarak yang cukup signifikan pada kecepatan awal yang lebih tinggi.

Kecepatan rata-rata selama proses pengereman, yang dihitung dari rasio jarak berhenti terhadap waktu pengereman, meningkat dari 5.67 cm/s menjadi 32.22 cm/s. Nilai ini bukan merupakan kecepatan awal kendaraan, tetapi indikator rata-rata gerak kendaraan selama interval pengereman. Pola kenaikan tersebut memperkuat bahwa perubahan kecepatan awal berpengaruh terhadap karakteristik proses penghentian.

Dari sudut pandang aplikasi, tekanan 3 bar dapat dipandang sebagai kondisi operasi efektif untuk prototipe yang diuji karena mampu mengaktifkan rem tanpa karakteristik aktuasi berlebihan seperti pada tekanan 4–5 bar. Temuan ini melengkapi penelitian terdahulu tentang pengereman mobil listrik yang umumnya menggunakan mekanisme rem cakram atau sistem mekanis [1], [5], [7], [8]. Sistem yang dikembangkan memperlihatkan alternatif konfigurasi berbasis udara yang dapat diuji lebih lanjut pada kendaraan listrik dengan dimensi dan massa lebih besar. Pengembangan sistem pengereman pneumatik juga perlu mempertimbangkan pengendalian tekanan dan karakteristik aktuator agar respons pengereman tetap terkendali [14], [15].

3.5 Pengaruh Beban dan Jarak Pengujian

Tabel 4. Hasil pengujian pengereman berdasarkan beban dan jarak.

Beban	Jarak uji (m)	Kecepatan (km/jam)	Jarak berhenti (cm)
43 kg	15	30	55
43 kg	20	35	92
43 kg	25	35	100
49 kg	15	32	80
49 kg	20	24	20
49 kg	25	35	125
92 kg	15	24	92
92 kg	20	31	113
92 kg	25	32	135

Pada beban 43 kg, jarak berhenti meningkat dari 55 cm pada kecepatan 30 km/jam menjadi 92–100 cm pada kecepatan 35 km/jam. Pada beban 92 kg, jarak berhenti meningkat dari 92 cm pada 24 km/jam menjadi 135 cm pada 32 km/jam. Pola tersebut menunjukkan bahwa kenaikan kecepatan dan massa kendaraan cenderung meningkatkan kebutuhan jarak pengereman, karena energi dan momentum kendaraan yang harus diredam menjadi lebih besar.

Data beban 49 kg memperlihatkan satu titik yang tidak mengikuti kecenderungan umum, yaitu pada jarak pengujian 20 m dengan kecepatan 24 km/jam diperoleh jarak berhenti 20 cm, lebih pendek daripada pengujian 15 m pada 32 km/jam dan pengujian 25 m pada 35 km/jam. Skripsi sumber telah mengidentifikasi titik tersebut sebagai kemungkinan variasi pengukuran atau perbedaan kondisi pengujian. Oleh karena itu, data tersebut dipertahankan untuk transparansi, tetapi tidak digunakan sebagai dasar tunggal untuk menarik kesimpulan umum.

Hasil ini sejalan secara konseptual dengan penelitian pengereman kendaraan listrik yang menunjukkan bahwa kecepatan dan beban merupakan faktor penting dalam menentukan gaya dan jarak pengereman [1]. Dengan demikian, evaluasi sistem elektro-pneumatik tidak cukup hanya berdasarkan kemampuan aktuator, tetapi perlu memasukkan kondisi dinamis kendaraan dan beban aktual [16].

3.6 Pembahasan Kinerja dan Implikasi Rekayasa

Secara keseluruhan, kinerja sistem dapat dipisahkan menjadi tiga aspek, yaitu kemampuan aktuasi, kemampuan menghasilkan gaya/torsi, dan kemampuan menghentikan kendaraan. Pada aspek aktuasi, Panjang langkah piston meningkat terhadap tekanan dan seluruh pengujian 1–5 bar berfungsi. Pada aspek gaya, tekanan 3 bar menghasilkan 147.26 N dan 4,42 N·m. Pada aspek kendaraan, tekanan yang sama mampu menghentikan kendaraan pada seluruh kecepatan uji 19–36 km/jam.

Keunggulan utama konfigurasi ini adalah pemanfaatan kendali elektronik untuk mengaktifkan katup pneumatik sehingga sistem dapat diintegrasikan dengan arsitektur kelistrikan kendaraan. Konsep tersebut relevan dengan pengembangan sistem pengereman elektronik dan elektro-pneumatik yang telah banyak dikaji [17], [11], termasuk pendekatan pengendalian tekanan pada sistem rem elektronik-pneumatik [18]. Namun, penelitian ini masih berada pada tahap prototipe. Belum dilakukan pengujian ABS, distribusi gaya antar roda, temperatur kampas/rem tromol, kondisi jalan basah atau miring, ketahanan siklus, serta pengujian pada kecepatan tinggi. Pengujian lanjutan dengan fitur anti-lock dan evaluasi penurunan tekanan pada jalur pneumatik penting dilakukan untuk menilai konsistensi dan keselamatan sistem [19], [4].

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa 3 bar merupakan tekanan efektif pada konfigurasi saat ini, tetapi bukan berarti 3 bar merupakan tekanan optimum universal. Nilai optimum harus ditentukan kembali apabila massa kendaraan, diameter piston, panjang lengan mekanisme, radius drum, atau karakteristik kampas berubah. Pendekatan tersebut penting agar hasil penelitian tidak disalahartikan sebagai standar desain untuk kendaraan lain.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem pengereman udara berbasis elektro-pneumatik berhasil dirancang dan diimplementasikan pada prototipe mobil listrik roda empat melalui integrasi komponen mekanik dan elektronik. Pemeriksaan sambungan tidak menunjukkan kebocoran udara yang teramati selama pengujian.
2. Panjang langkah piston meningkat dari 49.0 mm pada tekanan 1 bar menjadi 88,8 mm pada tekanan 5 bar, dengan rata-rata 65.4 mm. Pada rentang tekanan tersebut, gaya silinder pneumatik secara teoritis meningkat dari 49.09 N menjadi 24,44 N, sedangkan

- momen mekanis hasil perhitungan meningkat dari 1.47 N·m menjadi 7.36 N·m. Nilai tersebut merupakan hasil perhitungan dan tidak secara langsung menunjukkan gaya atau torsi pengereman aktual pada roda.
3. Tekanan operasi 3 bar dipilih berdasarkan pengamatan awal karena mampu mengaktifkan mekanisme pengereman pada konfigurasi prototipe yang diuji. Pada tekanan tersebut, pengujian mencatat jarak pengereman 17–145 cm dan waktu pengereman 3,0–4,5 detik pada variasi kecepatan awal 19–36 km/jam. Konsistensi data jarak dan waktu pengereman perlu diverifikasi sebelum kinerja pengereman dapat dinilai secara kuantitatif.
 4. Pengujian dengan variasi beban menunjukkan kecenderungan peningkatan jarak pengereman seiring bertambahnya kecepatan dan beban. Namun, satu titik data pada beban 49 kg menunjukkan hasil yang menyimpang sehingga perlu diverifikasi melalui pengulangan pengujian. Pengaruh beban belum dapat dipisahkan secara pasti dari pengaruh kecepatan karena kondisi pengujian tidak sepenuhnya sama.
 5. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem elektro-pneumatik dapat berfungsi pada prototipe dalam kondisi pengujian yang diterapkan. Pengujian lanjutan diperlukan untuk memverifikasi jarak dan waktu pengereman, mengevaluasi kinerja pada variasi beban dan kecepatan yang lebih luas, serta menguji keandalan dan keselamatan sistem sebelum penerapan pada kendaraan operasional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. A. Alit Triadi, A. Zainuri, I. M. Suartika, I. M. A. Sayoga, I. M. Mara, and I. D. K. Okariawan, "Study pengereman pada mobil listrik hasil modifikasi," *Energy, Materials and Product Design*, vol. 3, no. 1, pp. 170–175, 2024.
- [2] M. N. Abdullah, M. M. Rahman, and K. Kadirgama, "Performance analysis of pneumatic brake system for commercial vehicle," *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, vol. 13, no. 2, pp. 156–172, 2018.
- [3] Geraldi Simon, C., Andre Hardinsi, F., Suluh, S., Paliling, F., Sampelolo, R., Widyianto, A. (2023). Enhancing vehicle wheel suspension test equipment through Taguchi method for optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (125)), 15– 27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288476>.
- [4] S. Ka'ka, D. Kambuno, and A. Tangkemandu, "Damping transformation modeling on wheel suspension using pneumatic cylinder thrust force as a substitute for vehicle weight," *J. Vibroengineering*, pp. 363–376, 2022, doi: 10.21595/jve.2022.22619.
- [5] C. G. Simon, F. Paliling, R. Lasarus, L. A. Salo, F. R. Bethony, and S. Ka'ka, "Design of Experiments (Doe) on Suspension Test Equipment of One Part Of A Vehicle Wheel Using The Taguchi Method," *INTEK J. Penelit.*, vol. 10, no. 2, pp. 106–113, 2023, doi: 10.31963/intek.v10i2.4581
- [6] A. R. Pramuditha, S. P. Sutisna, and E. Sutoyo, "Perancangan kontrol automatic sistem pengereman mobil listrik otonom," *ALMIKANIKA*, vol. 1, no. 2, 2021.
- [7] D. E. Prayitno et al., "Analisis gaya traksi dan gaya gesek pada rem kendaraan listrik 2 kW," *Prosiding Nasional Mesin*, 2024.
- [8] K. A. Fauzi and A. I. Rabbika, "Analisis jarak pengereman dan temperatur disc brake pada prototipe mobil listrik Heulang Galunggung," *AL JAZARI: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, 2024.
- [9] T. Suryana and A. M. S. Sebayang, "Rancang bangun dan analisis sistem pengereman pada mobil listrik prototipe UNPAM," *Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (JIPTEK)*, vol. 6, no. 2, pp. 58–67, 2025.

- [10] B. Setyono et al., "Perancangan dan analisis sistem pneumatik pada kendaraan hybrid penggerak motor listrik dan udara bertekanan BED-18 Bayu Petir," Prosiding SENASTITAN, 2021.
- [11] Y. Zhao and Y. Yang, "Pressure control for pneumatic electric braking system of commercial vehicle based on model predictive control," IET Intelligent Transport Systems, vol. 15, no. 12, pp. 1522–1532, 2021, doi: 10.1049/itr2.12118.
- [12] L. Wei, X. Wang, H. Liu, and L. Li, "System modeling, experimental validation and pressure estimation of the pneumatic braking system," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 187, Art. no. 109938, 2023, doi: [10.1016/j.ymssp.2022.109938](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109938).
- [13] E. Adril, M. Menhendry, D. Budiman, M. Araliz, and A. Yeni, "Rancang bangun mesin pencetak dan pemotong briket dengan sistem elektro pneumatik untuk UMKM," Jurnal Teknik Mesin, vol. 17, no. 1, p. 70, 2024. doi: 10.30630/jtm.17.1.1388.
- [14] T. Nguyen, J. Lee, and H. Kim, "Adaptive control of electro-pneumatic brake system based on deep reinforcement learning," IEEE Access, vol. 8, pp. 108739–108751, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3001245.
- [15] P. Radhakrishnan, M. Kumar, and R. Singh, "Experimental investigation on pneumatic braking system with anti-lock features," Materials Today: Proceedings, vol. 16, no. 2, pp. 1220–1227, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.220.
- [16] C. Yang et al., "Regenerative braking system development and perspectives for electric vehicles: An overview," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 198, Art. no. 114389, 2024, doi: [10.1016/j.rser.2024.114389](https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114389).
- [17] W. S. D. Yulianto, "Analisis penurunan tekanan udara pengereman pada kendaraan dengan sistem rem full air brake terhadap efisiensi pengereman," Tugas Akhir, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, 2022.
- [18] L. Chen, S. Yang, and X. Liu, "Development of electro-pneumatic brake system with intelligent control strategy," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 148, 107156, 2021.
- [19] A. Kumar and R. Sharma, "Design and analysis of pneumatic brake system for commercial vehicle," International Journal of Mechanical Engineering and Technology, vol. 11, no. 4, pp. 45–58, 2020.
-