

Contents list available at [Sinta](#)

ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

Rancang bangun dan Analisis Kinerja Saluran udara pada Simulator Trainer Airbag

Yuniarto Agus W¹, Solachuddin Al Ayyubi^{2*}¹Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo Lowokwaru Malang 65141²Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Otomotif Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo Lowokwaru Malang 65141

ARTICLE INFO

Keywords:

*Airbag deployment**Flow channel**ATmega328 microcontroller**Response time**Passive safety system*

ABSTRACT

Passive safety systems like airbags are crucial for reducing fatal crash injuries, with deployment speed depending heavily on mechanical design and electronic controls. This study determines the effect of valve orifice diameters (2.5 mm, 5 mm, and 8 mm) on driver-side airbag response time. The research employed a quantitative experimental approach using an embedded simulation system on an ATmega328 microcontroller-based safety simulator. The setup integrates a solenoid valve to regulate airflow, an ADXL345 sensor for collision triggering, and an HC-SR04 ultrasonic sensor to detect the airbag's linear expansion. Experimental analysis shows the orifice diameter significantly affects response time. The smallest diameter (2.5 mm) produced the fastest response at 521.2 ms. Increasing the diameter to 5 mm and 8 mm delayed the response to 591.3 ms and 753.3 ms, respectively. This trend demonstrates a significant delay increase of approximately 44.5% from the smallest to the largest channel. Conclusively, the smaller valve orifice accelerates linear expansion directed at the sensor due to a high-velocity jetting effect, rather than reflecting an increase in the overall airbag volume inflation rate.

*Corresponding solahayub870@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.11459>

Received 28 April 2026; Received in revised form 5 May 2026; Accepted 10 June 2026

Available online 1 September 2026

Pendahuluan

Kecelakaan lalu lintas merupakan tantangan global yang sangat serius bagi keselamatan publik. Berdasarkan laporan *World Health Organization* (WHO, 2023), tercatat sekitar 1,19 juta kematian terjadi di jalan raya setiap tahunnya, menjadikannya penyebab utama kematian pada kelompok usia produktif secara global [1]. Sebagian besar fatalitas tersebut disebabkan oleh benturan keras saat terjadi kecelakaan frontal yang mengakibatkan cedera serius pada kepala dan dada. Dalam upaya meminimalisir risiko ini, sistem keselamatan pasif seperti airbag menjadi komponen krusial yang mampu mereduksi risiko kematian pengemudi hingga 22% [2] [3]. Namun, efektivitas proteksi airbag sangat bergantung pada kecepatan pengembangan waktu respons aktivasi *airbag*, yang mana keterlambatan dalam hitungan milidetik dapat berakibat fatal bagi penumpang [4] [5]. Dalam simulasi maupun implementasi sistem pneumatik, kecepatan aliran udara tidak hanya bergantung pada respons elektronik, tetapi juga dibatasi oleh hambatan fisik mekanis, seperti penyempitan ukuran saluran udara (*valve orifice*). Oleh karena itu, penentuan dimensi fisik katup menjadi sangat penting agar instruksi dari aktuator elektronik yang cepat tidak terhambat oleh laju mekanis fluida yang lambat.

Secara teoritis, karakteristik dinamis aliran udara di dalam saluran pneumatik dikendalikan oleh hukum mekanika fluida dasar, yaitu Hukum Kontinuitas. Berdasarkan Hukum Kontinuitas yang dinyatakan dalam persamaan $A_1V_1 = A_2V_2$, reduksi atau pengecilan pada luas penampang saluran secara langsung akan mengakibatkan lonjakan pada kecepatan aliran fluida (v). Penyempitan diameter saluran ini bertindak sebagai pembatas aliran (*flow restriction*) yang secara mekanis menghasilkan efek semburan (*jetting effect*) udara berkecepatan tinggi saat fluida lolos dari celah yang lebih sempit [6]. Waktu respons ekspansi linear (t) merupakan fungsi dari jarak tempuh kantung udara

menuju titik baca sensor (s) dibagi dengan kecepatan aliran (v), yang secara matematis dituliskan dengan rumus:

$$t = \frac{s}{v}$$

Melalui persamaan tersebut, terbukti bahwa lonjakan kecepatan aliran (v) akibat penyempitan diameter saluran secara langsung akan mempercepat waktu tempuh ekspansi, sehingga waktu respons (t) menjadi lebih singkat. Dalam eksperimen ini, kecepatan aliran (v) merupakan variabel teori yang tidak diukur langsung. Fokus pengujian murni dilakukan pada hasil akhirnya, yaitu evaluasi terhadap penurunan drastis pada waktu respons (t) sistem.

Penelitian mengenai optimasi sistem pengembangan kantung udara (*airbag*) telah banyak dilakukan melalui berbagai pendekatan mekanis dan elektronik sebagai *state of the art*. Yurchenco dkk mengembangkan sistem inflasi menggunakan model *nozzle-ejector* dan menyimpulkan bahwa desain lebar celah *nozzle* yang bervariasi memiliki dampak signifikan terhadap tekanan pengisian, sehingga mampu mengembangkan airbag berkapasitas 50L dalam waktu kurang dari 30 milidetik [7]. Dari sisi kendali elektronik, Ibrahim dkk membuktikan bahwa penggunaan mikrokontroler (*Arduino*) untuk mengendalikan katup solenoid (*solenoid valve*) sangat efektif dalam mengatur laju perpindahan aliran massa gas, di mana kontrol tegangan yang tepat dapat mengoptimalkan kinerja inflasi [8]. Wang dkk menekankan bahwa aktuator katup merupakan elemen kunci pembuka aliran gas, di mana optimalisasi waktu pemberian sinyal ke aktuator mampu memangkas waktu aktivasi hingga di bawah 30 milidetik [9].

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah membuktikan keandalan katup solenoid dan pentingnya aktuator yang cepat, masih terdapat sebuah *research gap* yang belum banyak dieksplorasi secara empiris [10]. Sebagian besar studi saat ini lebih berfokus mengejar kecepatan

algoritma sinyal kontrol dan besaran tegangan elektronik, namun sering mengabaikan dinamika fluida dari sisi perangkat keras mekanis. Padahal, kendali elektronik yang cepat akan menjadi kurang optimal apabila saluran fisik menahan laju ekspansi udara. Belum ada penelitian yang secara khusus mengkomparasikan pengaruh ukuran diameter dalam pada saluran katup solenoid terhadap debit aliran udara dan kaitannya dengan waktu respons pengembangan *airbag*. Celah inilah yang menjadi fokus utama dan kontribusi dalam penelitian ini.

Berdasarkan identifikasi masalah tersebut, rumusan masalah utama dalam penelitian ini yaitu, Bagaimana pengaruh variasi ukuran diameter *valve orifice* terhadap waktu respons ekspansi linear *airbag*? Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara spesifik pengaruh variasi diameter saluran pada katup solenoid 2,5 mm, 5 mm, dan 8 mm terhadap waktu respons pengembangan *airbag* sisi pengemudi. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada perancangan *integrated trainer system* berbasis simulator keselamatan kendaraan yang menggabungkan deteksi inersia presisi melalui sensor ADXL345, pemrosesan kendali logika menggunakan mikrokontroler ATmega328, dan validasi ekspansi linear *real-time* menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04. Melalui pendekatan eksperimental pada trainer terintegrasi ini, pengujian karakteristik dinamis saluran pneumatik dapat dilakukan secara aman dan terukur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis mengenai dimensi saluran katup yang optimal, sehingga berkontribusi pada pengembangan sistem keselamatan kendaraan yang lebih responsif tanpa memerlukan pengujian tabrak (*crash test*) destruktif.

Metode Penelitian

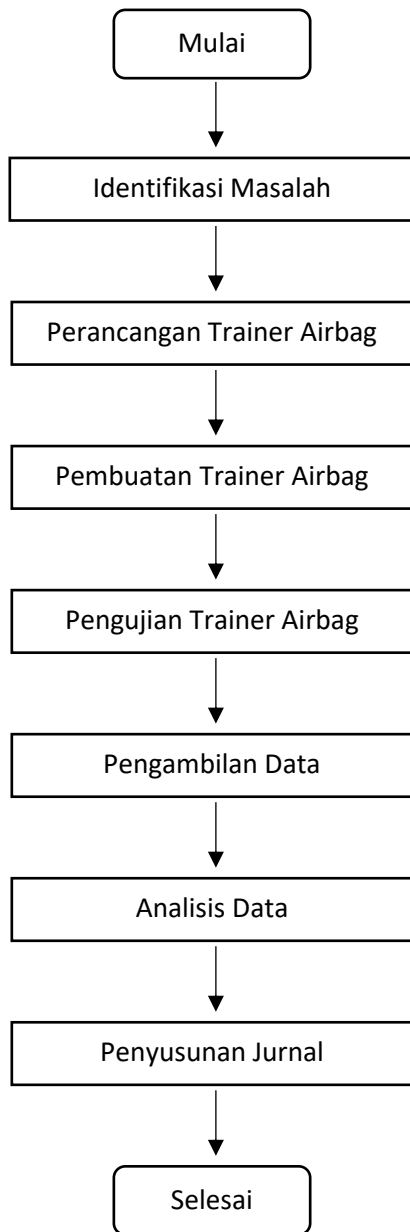
Eksperimen dilakukan di fasilitas Laboratorium Prodi Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Negeri Malang. Prosedur penelitian mengadopsi pendekatan

eksperimental kuantitatif berbasis rancang bangun (*Engineering Design Process*) guna memastikan pengembangan dan pengujian alat berjalan secara terstruktur [11]. Metodologi ini difokuskan pada pengujian variabel fisik perangkat yang mencakup tahapan utama, yaitu:

1. Analisis Perancangan Sistem

Tahap analisis perancangan dilakukan untuk mentransformasikan konsep penelitian ke dalam teknis pelaksanaan yang terukur berdasarkan tahapan pada Diagram Alir Penelitian (Gambar 1). Perancangan ini mencakup integrasi sistem elektronik dan mekanis secara sistematis, di mana logika kontrol pada mikrokontroler ATmega328 difokuskan pada sinkronisasi antara deteksi benturan oleh sensor ADXL345 dan aktivasi katup solenoid untuk meminimalisir waktu tunda (*delay*).

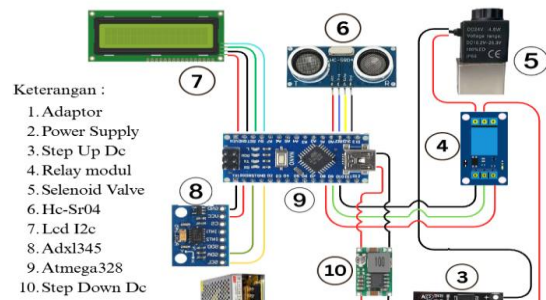
Rancangan mekanis difokuskan pada modifikasi ukuran diameter dalam saluran katup solenoid menjadi 2,5 mm, 5 mm, dan 8 mm sebagai variabel bebas untuk memvalidasi korelasi antara luas penampang saluran dengan kecepatan ekspansi kantung udara. Penentuan rentang diameter ini didasarkan pada pertimbangan karakteristik mekanika fluida pneumatik serta batasan fisik komponen katup pada unit trainer. pemilihan ketiga ukuran ini bertujuan untuk menciptakan tiga kondisi aliran udara. Pada diameter 2,5 mm untuk menciptakan kondisi penyempitan paling tinggi sehingga membatasi debit udara namun memaksimalkan kecepatan aliran udara kemudian diameter 5 mm sebagai titik tengah untuk melihat perubahan aliran fluida dan diameter 8 mm untuk kondisipenyempitan paling minim yang di sesuaikan dengan kapasitas maksimal fisik katup. Integrasi sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan untuk validasi ekspansi fisik *airbag* secara *real-time*. Penempatan komponen kontrol dirancang agar transmisi instruksi berjalan stabil, sehingga data waktu respons yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang tinggi sesuai dengan parameter diameter yang diuji.



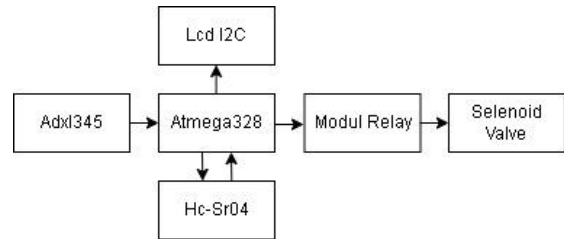
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2. Desain Komponen

Konfigurasi perangkat keras utama yang diintegrasikan dalam simulator airbag ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Wiring komponen



Gambar 3. Blok diagram sistem

Gambar 3 menyajikan diagram blok arsitektur yang menjelaskan alur sinyal terintegrasi dari sistem. Unit pengelola pemrosesan program berpusat pada mikrokontroler ATmega328 yang memiliki stabilitas tinggi dalam menangani instruksi *real-time* [12]. Pada tahap penginderaan (*sensing*), komponen deteksi terdiri dari sensor akselerometer ADXL345 yang berfungsi menangkap sinyal percepatan (*g-force*) saat simulasi benturan terjadi [13]. Data percepatan ini dikirimkan ke mikrokontroler, yang kemudian merespons dengan mengirimkan sinyal *trigger* ke aktuator mekanis berupa katup solenoid (*solenoid valve*) untuk membuka aliran udara secara instan. Bersamaan dengan proses aktuasi tersebut, sistem melakukan tahap pengukuran (*measurement*) menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 yang berperan sebagai alat ukur jarak untuk mendeteksi ekspansi kantung udara secara presisi [14]. Selisih waktu antara pemicuan aktuator hingga terdeteksinya ekspansi linear ini dikalkulasi oleh mikrokontroler sebagai waktu respons, yang hasil akhirnya langsung divisualisasikan melalui modul layar LCD I2C.

Pemilihan perangkat mikrokontroler ATmega328 didasarkan pada efisiensi konsumsi daya dan kecepatan pemrosesan

data yang memadai untuk aplikasi sistem keselamatan otomotif. Sensor ADXL345 dipilih karena memiliki sensitivitas tinggi untuk mendeteksi dampak, sementara sensor HC-SR04 digunakan untuk memberikan sinyal berhenti pada perhitungan waktu saat kantung udara terdeteksi mengembang. Pengaturan aliran udara dikendalikan melalui sebuah katup solenoid yang dirancang khusus dengan variasi diameter saluran sebesar 2,5 mm, 5 mm, dan 8 mm [15].

Seluruh rangkaian komponen elektronik tersebut dirakit secara terintegrasi membentuk satu kesatuan sistem simulator berdasarkan skema *wiring* komponen yang ditunjukkan pada Gambar 2. Integrasi jalur kabel dan pin ini dirancang secara terstruktur untuk meminimalisir hambatan sinyal (*noise*) dan memudahkan proses modifikasi selama eksperimen. Sistem perhitungan waktu respons dimulai seketika saat sensor ADXL345 mengirimkan sinyal pemicu tabrakan ke mikrokontroler dan berakhir saat sensor ultrasonik HC-SR04 mendeteksi permukaan kantung udara telah mencapai jarak maksimum ekspansinya 17 cm di depan kemudi. Hasil perhitungan waktu respons tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan milidetik (ms) dan ditampilkan secara langsung melalui layar LCD (*Liquid Crystal Display*). Metode ini memungkinkan peneliti untuk melakukan pencatatan hasil percobaan secara cepat dan akurat langsung dari perangkat simulator.

3. Development

A. Perancangan Perangkat Lunak

Sistem kontrol pada simulator airbag dikembangkan menggunakan perangkat lunak *open-source* Arduino IDE. Perangkat lunak ini berfungsi sebagai *driver* pengembangan untuk menuliskan baris kode instruksi (*sketch*) yang kemudian diunggah ke mikrokontroler ATmega328 [16]. Perangkat lunak dirancang untuk mengelola tiga tugas utama meliputi pembacaan input sensor, pemrosesan logika

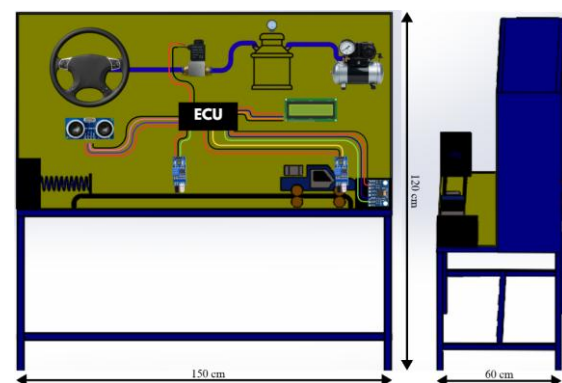
waktu (*timing*), dan tampilan output pada layar LCD.

Logika pemrograman dimulai dengan melakukan inisialisasi pada sensor ADXL345 untuk menetapkan ambang batas (*threshold*) percepatan yang dikategorikan sebagai benturan. Ketika sensor ADXL345 mendeteksi nilai percepatan yang melampaui ambang batas, mikrokontroler secara otomatis memicu katup solenoid untuk membuka aliran udara dan secara bersamaan memulai fungsi penghitung waktu (*timer*).

kemudian menginstruksikan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk melakukan pemindaian jarak secara kontinu. Saat sensor ultrasonik mendeteksi adanya perubahan jarak yang menandakan airbag telah mengembang pada jarak 17 cm, mikrokontroler akan menghentikan fungsi timer. Selisih waktu antara pemicuan awal hingga deteksi pengembangan diproses dalam satuan milidetik (ms). Hasil akhir dari kalkulasi waktu respons tersebut dikirimkan oleh perangkat lunak untuk ditampilkan melalui layar LCD secara *real-time*.

B. Perancangan Perangkat Keras

Desain perangkat keras merupakan rancangan fisik dan mekanis dari simulator airbag yang dikembangkan. Konstruksi set eksperimen untuk pengujian waktu respons airbag ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Desain trainer airbag



Gambar 5. Realisasi desain trainer airbag

Pengembangan perangkat keras ini melibatkan sistem pneumatik sederhana yang berfungsi sebagai pengganti reaksi kimia pemicu gas pada airbag asli. Udara bertekanan dialirkan dari tangki melalui katup solenoid yang menjadi komponen utama dalam mengatur aliran udara. Katup solenoid ini dimodifikasi untuk dapat menerima variasi diameter saluran, yaitu 2,5 mm, 5 mm, dan 8 mm, guna menguji pengaruh penyempitan saluran terhadap kecepatan ekspansi kantung udara.

Komponen elektronik dirakit secara terstruktur pada panel kontrol agar terlindung dari getaran mekanis saat simulasi tabrakan dilakukan. Sensor ADXL345 ditempatkan pada bagian alas bidang tabrak simulator benturan untuk mendeteksi gaya inersia. Sementara sensor ultrasonik HC-SR04 diposisikan tepat di depan kantung udara dengan jarak tertentu untuk mendeteksi perubahan jarak saat kantung mengembang. Unit pemroses utama menggunakan ATmega328 yang terhubung dengan layar LCD sebagai output informasi waktu respons dalam satuan milidetik (ms). Seluruh sistem ditenagai oleh catu daya DC yang stabil untuk memastikan kinerja katup solenoid dan akurasi sensor tetap terjaga selama pengujian dilakukan secara kontinu.

4. Implementasi Sistem

Sebelum dilakukan pengambilan data utama, dilakukan pengujian awal dan kalibrasi kuantitatif pada setiap komponen untuk memastikan seluruh instrumen berfungsi dengan normal dan meminimalkan kesalahan pengukuran.

Kalibrasi sensor jarak ultrasonik HC-SR04 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap jarak fisik aktual menggunakan mistar ukur pada rentang jarak 10 cm hingga 40 cm. Hasil kalibrasi menunjukkan tingkat akurasi tinggi dengan rata-rata selisih error kesalahan pengukuran sebesar 0,21 cm. Kemudian kalibrasi sensor akselerometer ADXL345 dilakukan melalui pengujian statis multi-axis dimana tiap sumbu diletakkan bergantian pada posisi lurus menghadap ke atas dan sumbu lainnya mendarat untuk menentukan nilai offset akselerasi awal. Nilai ambang batas pemicu tabrakan pada mikrokontroler ditetapkan lebih besar dari 2,5g untuk menghindari pemicuan palsu akibat getaran operasional non impak pada meja simulator.

Kemudian setelah validasi sensor selesai kode program diunggah ke dalam mikrokontroler ATmega328. Sistem pneumatik dihubungkan dari tangki udara menuju katup solenoid yang diuji secara bergantian berdasarkan variasi diameter. Pengujian dilakukan dengan memberikan simulasi benturan melalui miniatur mobil yang ditarik ke arah pegas, kemudian diluncurkan ke arah bidang tabrak. Ketika sensor ADXL345 mendeteksi gaya inersia yang melampaui ambang batas mikrokontroler akan mengaktifkan katup solenoid untuk mengalirkan udara ke kantung udara. Proses perhitungan waktu respons berjalan secara otomatis dan ditampilkan pada layar LCD.

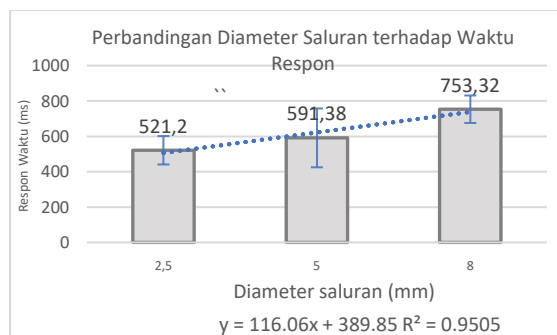
Proses pengambilan data untuk setiap variasi diameter saluran katup dilakukan sebanyak 10 kali pengulangan. Pengulangan ini dilakukan untuk mendapatkan data rata-rata yang akurat untuk meminimalisir keanehan pembacaan sensor elektronik dan menjaga stabilitas mekanik, serta memastikan data yang diperoleh bersifat valid. Setelah seluruh rangkaian pengujian selesai, data waktu respons yang tertera pada LCD dicatat secara sistematis ke dalam tabel hasil eksperimen

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian waktu respons pengembangan airbag terhadap variasi diameter saluran katup solenoid menunjukkan adanya korelasi yang signifikan. Data yang diperoleh merupakan hasil rata-rata dari pengujian yang dilakukan sebanyak 10 kali untuk setiap parameter diameter, yaitu 2,5 mm, 5 mm, dan 8 mm. Ringkasan data hasil eksperimen ditampilkan dalam Tabel 1 berikut:

| No | Diameter Saluran (mm) | Rata-rata waktu Respons (ms) $\pm SD(ms)$ |
|----|-----------------------|---|
| 1 | 2,5 | 521,2 \pm 80,3 |
| 2 | 5 | 591,3 \pm 166,4 |
| 3 | 8 | 753,3 \pm 77,7 |

Berdasarkan data di atas untuk mempermudah identifikasi perubahan performa sistem, data rata-rata pada Tabel 1 divisualisasikan ke dalam bentuk grafik batang pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Diameter Saluran terhadap Waktu Respon

Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa ukuran diameter saluran memberikan pengaruh yang berbanding lurus terhadap durasi pengembangan kantung udara. Tren data ini dimodelkan menggunakan pendekatan regresi linear sederhana (*linear curve fitting*), di mana korelasi linear yang sangat kuat dibuktikan dengan perolehan nilai determinasi sebesar $R^2 = 0,9505$. Konfigurasi diameter terkecil, yaitu 2,5 mm, mencatatkan waktu respons tercepat dengan rata-rata 521,2 ms hingga ekspansi linear

tersebut terdeteksi oleh sensor ultrasonik HC-SR04.

Secara teoritis, penampang yang lebih besar (8 mm) seharusnya memberikan laju aliran massa (*mass flow rate*) yang lebih besar untuk mengisi volume *airbag* secara keseluruhan. Namun, terdeteksinya waktu respons ekspansi linear yang lebih cepat pada saluran 2,5 mm dalam eksperimen ini sejalan dengan pemodelan teoretis yang telah dijabarkan pada bagian Pendahuluan. Penyempitan saluran menjadi 2,5 mm terbukti secara empiris bertindak sebagai *flow restriction* yang memicu *pressure build-up* sangat tinggi di belakang katup solenoid. Merujuk pada Hukum Kontinuitas ($A_1V_1 = A_2V_2$), penyempitan penampang ini mengonversi perbedaan tekanan secara drastis menjadi *jetting effect* atau semburan berkecepatan tinggi. Peningkatan kecepatan aliran (v) yang signifikan inilah yang menabrak langsung ke bagian tengah kain *airbag*, mendorongnya berekspansi secara linear ke depan sehingga langsung memotong jarak baca sensor ultrasonik HC-SR04 dalam waktu singkat.

Temuan ini mengukuhkan hipotesis bahwa karakteristik fisik saluran mekanis merupakan elemen krusial dalam perancangan sistem keselamatan pasif. Meskipun kajian terdahulu lebih menitikberatkan pada percepatan algoritma sinyal kontrol [9], hasil eksperimen ini membuktikan bahwa efektivitas perlindungan pasif setelah aktivasi sangat bergantung pada dinamika aliran fluida di dalam katup. Melalui validasi sensor akselerometer ADXL345 dan pemantauan langsung pada layar LCD, Melalui penelitian ini, dapat diidentifikasi bahwa diameter 2,5 mm merupakan konfigurasi mekanis paling optimal untuk menghasilkan akselerasi respons sistem melalui pemanfaatan *jetting effect*.

Untuk menguji signifikansi perbedaan waktu respons antara ketiga variasi diameter saluran, dilakukan uji statistik *One-Way Analysis of Variance* (ANOVA) terhadap data dari 10 kali pengulangan. Berdasarkan perhitungan

statistik, diperoleh simpangan baku (*standard deviation*) dari masing-masing pengujian sebesar $\pm 80,3$ ms (untuk 2,5 mm), $\pm 166,4$ ms (untuk 5 mm), dan $\pm 77,7$ ms (untuk 8 mm). Uji ANOVA menunjukkan nilai F-hitung sebesar 10,58 dengan tingkat signifikansi (*p-value*) sebesar 0,0004. Karena nilai *p-value* (0,0004) jauh lebih kecil dari taraf signifikansi yang ditetapkan ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol ditolak. Hal ini membuktikan secara kuantitatif bahwa variasi ukuran diameter saluran memberikan perbedaan pengaruh yang sangat signifikan terhadap waktu respons sistem, sekaligus mengonfirmasi bahwa tren penurunan waktu pada saluran yang lebih kecil bukanlah hasil anomali atau kebetulan acak, melainkan efek nyata dari dinamika fluida mekanis.

Selain evaluasi dinamika fluida, performa *real-time* dari perangkat keras juga dievaluasi melalui *latency analysis* untuk mengetahui waktu tunda instruksi elektronik dari sensor hingga ke aktuator. Mikrokontroler ATmega328 yang beroperasi pada frekuensi *clock* 16 MHz terbukti mampu mengeksekusi instruksi pembacaan sensor ADXL345 (melalui jalur komunikasi I2C) dan memberikan sinyal *trigger* ke *relay* aktuator dalam waktu yang sangat singkat. Total *computational delay* atau keterlambatan pemrosesan elektronik dari sisi mikrokontroler diestimasi berada di bawah 2 milidetik (ms).

Keterlambatan komputasi ini sangat kecil dan secara operasional tidak signifikan bagi sistem keselamatan pasif kendaraan. Oleh karena itu, besarnya waktu respons keseluruhan sistem simulator *airbag* ini (yang mencatatkan rentang rata-rata 521,2 ms hingga 753,3 ms) dipastikan murni didominasi oleh *mechanical delay*. Waktu tunda tersebut merupakan representasi dari hambatan fisik mekanis, yaitu waktu tunda yang dibutuhkan oleh kumparan induksi katup solenoid untuk membuka penuh penampang saluran udara bertekanan, serta waktu tempuh aliran fluida pneumatik untuk berekspansi mencapai sensor jarak

ultrasonik HC-SR04, dan bukan akibat keterlambatan atau penundaan (*bottleneck*) dari sisi pemrosesan data oleh mikrokontroler.

Kesimpulan

Namun demikian, penelitian ini memiliki batasan (*limitation*), yaitu ketiadaan pengukuran empiris secara langsung terhadap kecepatan aliran fluida (*v*) di dalam saluran, serta pengukuran sensor ultrasonik yang hanya memindai ekspansi jarak linear dalam satu dimensi (lurus ke depan) dan belum memperhitungkan dinamika tekanan di sisi samping kantung udara. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengintegrasikan sensor aliran fluida (*flow meter*) berpresisi tinggi, menggunakan pemodelan pneumatik tingkat lanjut serta penambahan sensor tekanan internal, atau memvalidasinya melalui pengujian tabrak berskala nyata (*real crash simulation*) guna mengevaluasi laju pengisian volume kantung udara secara lebih komprehensif.

Referensi

- [1] W. H. Organization, "Global status report on road safety 2023," World Health Organization, 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>
- [2] A. Høy, "Are airbags a dangerous safety measure? A meta-analysis of the effects of frontal airbags on driver fatalities," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 42, no. 6, pp. 2030–2040, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.06.014>.
- [3] D. C. Viano, "History of airbag safety benefits and risks," *Traffic Inj. Prev.*, vol. 25, no. 3, pp. 268–287, Apr. 2024, doi: [10.1080/15389588.2024.2315889](https://doi.org/10.1080/15389588.2024.2315889).

- [4] S. Yang, K. Lardner, and M. El-Gindy, "Study of Occupant Safety and Airbag Deployment Time," Aug. 2015. doi: 10.1115/DETC2015-46507.
- [5] H. Musyaffa' Munif, R. Primananda, and W. Kurniawan, "Evaluasi Perbandingan Kinerja Sistem Airbag antara 3 Modular Redundancy dengan 5 Modular Redundancy," *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 6, pp. 2548–964, 2025.
- [6] M. A. Salam, "Fluid Power Properties," in *Fundamentals of Pneumatics and Hydraulics*, Singapore: Springer, 2022. doi: 10.1007/978-981-19-0855-2_3.
- [7] N. Yurchenko and P. Vynogradskyy, "Experimental optimization of the ejector design developed for a driver's airbag," *Mech. Adv. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–84, May 2022, doi: 10.20535/2521-1943.2022.6.1.260933.
- [8] M. Ibrahim, S. Shawish, S. Aldroubi, A. Dawoud, and W. Abdin, "Airbag Protection and Alerting System for Elderly People," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 16, Aug. 2023, doi: 10.3390/app13169354.
- [9] Y. Wang, Y. Wang, X. Liu, X. Wang, K. Dai, and Z. You, "Self-Powered Microsystem for Ultra-Fast Crash Detection via Prestressed Triboelectric Sensing," *Research*, vol. 8, Jan. 2025, doi: 10.34133/research.0753.
- [10] M. T. T, Moch Lutfi, Reni Listiana, S. Si., "ANALISIS KINERJA SENSOR SOLENOID DALAM OTOMATIS," vol. 13, no. 3, pp. 1959–1965, 2025.
- [11] M. Syukri, S. Maghfirah, and F. Herliana, "Engineering Design Process in PjBL-STEM Teaching Materials to Improve Students' Scientific Literacy Skills," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 3139, no. 1, p. 12086, Nov. 2025, doi: 10.1088/1742-6596/3139/1/012086.
- [12] A. C. Gheorghe and C. I. Stoica, "Wireless Weather Station Using Arduino Mega and Arduino Nano," *Sci. Bull. Electr. Eng. Fac.*, vol. 21, no. 1, pp. 35–38, Apr. 2021, doi: 10.2478/sbeef-2021-0008.
- [13] Herdiansyah Noorrizky Anggana and Moch Solikin, "Development of a Real-Time Vibration Monitoring System for Drum Tester Machines Using ADXL345 Sensor and ESP32 Microcontroller," *J. Automot. Mech. Appl. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 66–75, 2025, doi: 10.21831/jamat.v2i1.1277.
- [14] M. K. Rihmi, G. Bintoro, M. A. Rahman, G. Puspito, and A. Muntaha, "Accuracy Analysis of Distance Measurement Using Sonar Ultrasonic Sensor Hc-Sr04 on Several Types of Materials," *J. Environmental Eng. Sustain. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 10–13, 2024, doi: 10.21776/ub.jeest.2024.011.01.2.
- [15] P. Liu, R. Zhang, Q. Zhao, and S. Peng, "Eddy Effect and Dynamic Response of High-Speed Solenoid Valve with Composite Iron Core," *Materials (Basel)*, vol. 16, 2023.
- [16] U. Mahanin Tyas, A. Apri Buckhari, P. Studi Pendidikan Teknologi Informasi, and P. Studi Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, "Implementasi Apliaksi Arduino IDE Pada matakuliah Digit," vol. 1, no. 1, 2023.