

Rancang Bangun Alat Peraga Injektor Mesin Diesel

Markus Sampe Banne, Djoko Setyanto*

Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51, Jakarta 12930

Article Info

Article history:

Received
6 May 2026

Accepted
8 July 2026

Keywords:

Diesel injector; Common
rail system; Teaching
aid; Engineering
education; Fuel
atomization

Abstract

The injector is a critical component in diesel engines that governs combustion efficiency through fuel atomization. In engineering education, understanding common rail systems is often constrained by the complexity of internal mechanisms and the safety risks associated with high-pressure engine operation. This study aims to design and develop an injector teaching aid as a safe and interactive learning medium. A design-and-build approach was employed, including conceptual and detailed design using AutoCAD, followed by prototype development. The system integrates key components, namely a 4D56 injector, DLLP nozzle, manual hand pump tester, and a CR-C common rail injector tester, mounted on an angle steel frame (110 × 55 × 75 cm). Experimental results indicate that the apparatus is capable of consistently exhibiting a conical spray pattern with a pressure stability of <10% and an actuator response of <3 ms, rendering it effective for laboratory-based learning

Info Artikel

Histori Artikel:

Diserahkan:
6 Mei 2026

Diterima:
8 Juli 2026

Kata Kunci:

Alat Peraga, Injektor
Diesel, Common Rail,
Nozzle, Atomisasi.

Abstrak

Injektor merupakan komponen penting dalam mesin diesel yang menentukan efisiensi pembakaran melalui proses pengabutan bahan bakar. Dalam pendidikan teknik, pemahaman sistem common rail sering terkendala oleh kompleksitas mekanisme internal serta risiko tinggi praktik langsung pada mesin bertekanan tinggi. Penelitian ini bertujuan merancang alat peraga injektor sebagai media pembelajaran yang aman dan interaktif. Metode rancang bangun digunakan, meliputi perancangan menggunakan AutoCAD dan pembuatan prototipe dengan komponen utama injektor 4D56, nozzle DLLP, manual hand pump tester, dan modul CR-C. Alat dipasang pada rangka besi siku berukuran 110 × 55 × 75 cm. Pengujian menunjukkan alat mampu menampilkan pola semprotan kerucut secara konsisten, dengan stabilitas tekanan <10% dan respons aktuator <3 ms, sehingga efektif untuk pembelajaran praktikum.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi otomotif dan industri menuntut lulusan teknik mesin untuk memiliki kompetensi yang komprehensif, khususnya dalam sistem injeksi bahan bakar bertekanan tinggi seperti Common Rail Direct Injection (CRDI). Injektor pada sistem CRDI bekerja pada tekanan ekstrem (mencapai 2000 bar) untuk mengatomisasi bahan bakar menjadi partikel mikrometer, yang secara langsung menentukan efisiensi termal dan emisi mesin (Haq *et al.*, 2022). Namun, integrasi teknologi kompleks ini ke dalam kurikulum pendidikan teknik sering kali menghadapi hambatan pedagogis yang signifikan.

Kajian literatur terkini menunjukkan bahwa pemahaman mahasiswa terhadap dinamika fluida dan atomisasi bahan bakar masih terbatas pada pendekatan teoretis dan simulasi 2D (Zhai *et al.*, 2025). Lebih lanjut, praktik langsung menggunakan mesin diesel utuh berisiko

*Corresponding author. Djoko Setyanto
Email address: djoko.setyanto@atmajaya.ac.id

tinggi terhadap keselamatan kerja (cedera injeksi tekanan tinggi dan kebakaran) serta berpotensi merusak komponen mahal akibat kesalahan prosedur oleh pemula (Raut *et al.*, 2026).

Penelitian terdahulu oleh (Yanuar *et al.*, 2021) telah mengembangkan alat uji injektor, namun fokusnya lebih diarahkan pada aspek diagnostik bengkel daripada visualisasi edukatif untuk mahasiswa. Penelitian terdahulu oleh (Anugrah, 2021) membahas tentang pengaruh kalibrasi pompa injeksi tipe inline dan injektor motor diesel terhadap volume dan tekanan penginjeksian, namun penelitian dilakukan pada mesin diesel utuh yang mana memiliki risiko yang tinggi terhadap keselamatan kerja. Pompa yang digunakan masih pompa injeksi tipe inline, belum menggunakan common rail. Terdapat kesenjangan (*research gap*) yang jelas: belum adanya alat peraga yang secara spesifik dirancang untuk memvisualisasikan pola semprotan dan karakteristik dinamika common rail dalam lingkungan laboratorium yang aman, terkontrol, dan ergonomis bagi pendidikan tinggi.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun alat peraga injektor mesin diesel yang mengintegrasikan aspek keselamatan, visualisasi transparan, dan kontrol tekanan yang presisi. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan media pembelajaran teknik mesin yang interaktif dan berbasis bukti empiris.

Program studi Teknik Mesin Saint Paul, belum memiliki sarana praktikum yang mampu mensimulasikan pengujian tekanan secara akurat sekaligus memvisualisasikan pola semprotan. Hal ini menjadi urgensi bagi mahasiswa teknik untuk memiliki alat uji yang interaktif guna memahami karakteristik sistem common rail secara mendalam. Alat peraga ini berfungsi untuk mengubah pemahaman teoretis yang abstrak menjadi pengamatan visual yang konkrit. Menunjukkan bagaimana cairan bahan bakar diubah menjadi butiran kabut halus agar mudah bercampur dengan udara panas di ruang bakar. Mahasiswa dapat melihat bentuk semprotan (apakah berbentuk kerucut sempurna atau menyimpang) yang menentukan kesempurnaan pembakaran.

Berikut adalah identifikasi masalah yang melatar belakangi perlunya pembuatan alat peraga yang disajikan dalam Tabel 1 matriks perbandingan identifikasi masalah:

Tabel 1.

Matriks Perbandingan Identifikasi Masalah

Aspek	Kondisi Saat Ini	Kebutuhan
Visualisasi	Komponen tertutup dan bekerja sangat cepat.	Alat peraga potong (<i>cut-away</i>) atau transparan.
Keamanan	Tekanan tinggi berbahaya bagi pemula.	Alat simulasi dengan tekanan yang terkontrol.
Pemahaman Konsep	Teori abstrak tentang atomisasi.	Observasi langsung pola semprotan bahan bakar.
Biaya	Kerusakan komponen saat praktek sangat mahal.	Media simulasi yang aman untuk bongkar-pasang berulang kali.

Manfaat dari alat peraga ini adalah:

1. Melihat secara langsung bentuk semprotan (*spray pattern*).
2. Memahami perbedaan antara semprotan yang baik (berkabut halus) dan yang buruk (menetes atau berbentuk garis).
3. Mengetahui gejala kerusakan injektor seperti "kencing" (*dripping*), pola penyemprotan yang tidak rata, atau tekanan pembukaan yang tidak sesuai sulit dipahami tanpa pengamatan visual yang jelas.

2. METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Design-Based Research* (DBR) yang berfokus pada pengembangan solusi praktis untuk masalah pedagogis dan teknis. Kerangka konseptual penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan validitas desain dan keandalan prototipe.

2.1 Kerangka Konseptual

Untuk memberikan pemahaman yang utuh mengenai proses penelitian, berikut adalah kerangka konseptual:

1. Identifikasi Masalah: Kompleksitas internal injektor, risiko keselamatan, kurangnya visualisasi empiris.
2. Kajian Literatur & Kriteria Desain: Studi literatur atomisasi dan ergonomi.
3. Perancangan Konseptual & Detail: Sub-fungsi (pemompaan, regulasi, penyemprotan, visualisasi). Pemodelan 3D/AutoCAD.
4. Fabrikasi Prototipe: Pemotongan material, pengelasan rangka, instalasi komponen.
5. Pengujian Eksperimental: Uji kebocoran, stabilitas tekanan, respons aktuator, dan pola semprotan.
6. Analisis Data & Pembahasan: Analisis statistik data uji dan interpretasi visualisasi.
7. Kesimpulan & Rekomendasi.

2.2 Metode Perancangan dan Pembuatan

Perancangan dimulai dengan dekomposisi fungsi alat menjadi sub-sistem. Rancangan detail dibuat menggunakan *software AutoCAD 2D/3D* untuk memastikan interferensi antar komponen. Fabrikasi prototipe dilakukan dengan spesifikasi material: rangka utama menggunakan besi siku, *top plate* menggunakan plat bordes untuk ketahanan beban, dan *safety cover* menggunakan akrilik transparan tebal untuk visualisasi tanpa mengorbankan keselamatan. Sistem kontrol menggunakan modul CR-C *Common Rail Injector Tester* yang mampu mensimulasikan sinyal injeksi dengan rentang frekuensi 0-30 Hz dan *pulse width* 0-10 ms.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Perancangan Alat

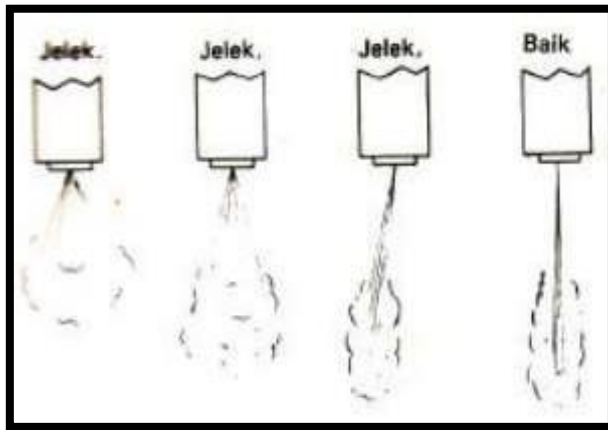
Data perancangan alat terdiri dari spesifikasi Alat Peraga, Rancangan Konseptual dan Rancangan Detail.

3.1.1. Spesifikasi Alat Peraga

Mesin diesel terdiri dari beberapa komponen yang bekerja sesuai dengan fungsinya. Komponen mesin diesel antara lain piston, *cylinder head*, *rocker arm*, *crankshaft*, *camshaft*, *injector* dan lain-lain. Salah satu komponen yang penting mesin diesel adalah injektor yang bertugas untuk menyemprotkan bahan bakar ke ruang bakar pada saat proses pembakaran (Putranto *et al.*, 2023). Injector termasuk komponen mesin diesel yang fungsinya sangat penting. Sesuai tidaknya bahan bakar yang masuk ke dalam silinder ditentukan oleh kinerja injektor. Jika injektor menyemprotkan bahan bakar dalam bentuk kabut akan mempermudah pembakaran dalam silinder. Injector ini mempunyai fungsi yang penting dalam menunjang proses pembakaran dalam mesin diesel. Apabila injektor ini tidak bekerja secara baik atau mengalami kerusakan maka dapat memunculkan dampak pada suhu gas buang dalam mesin, karena itu harus dilakukan perawatan dengan baik supaya tetap bekerja dengan optimal dan menghasilkan pengabutan yang sempurna (Yanuar *et al.*, 2021).

Salah satu faktor terpenting untuk mekanisme injeksi bahan bakar yang optimal adalah ukuran tetesan bahan bakar. Ukuran butiran bahan bakar yang ideal sangat penting untuk pembentukan campuran bahan yang tepat. Salah satu komponen yang mempengaruhi sistem pembakaran mesin induk adalah nozzle (Achmat *et al.*, 2024).

Di dalam menyemprotkan bahan bakar, Nozzle memiliki bentuk-bentuk penyemprotan bahan bakar, bentuk penyemprotan ini sangat berpengaruh terhadap kualitas campuran bahan bakar di dalam silinder. Gambar 2 akan menjelaskan tentang bentuk penyemprotan Nozzle serta pengaruhnya terhadap pembakaran (Motor, 1980). Visualisasi bertujuan untuk mengevaluasi pola semprotan (spray pattern), sudut semprot (spray cone angle), dan panjang penetrasi semprotan.



Gambar 1.
Pola Penyemprotan Nozzle
(Motor, 1980)

Bentuk kabutan yang keluar dari injektor ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil yang baik adalah gambar yang paling kanan yang memiliki daya penetrasi yang baik dan juga homogenitas kabutan yang baik. Bentuk kabutan yang optimum bukan berarti yang memiliki daya penetrasi yang paling baik dan yang membentuk kabutan yang paling kecil tetapi bentuk kabutan yang baik adalah yang berada pada suatu titik optimum, tidak terlalu bagus daya penetrasinya tetapi atomisasinya sudah dikatakan homogen. Hal ini terjadi karena semakin baik daya penetrasi maka akan semakin buruk atomisasi hasil kabutan, begitu pula sebaliknya semakin baik atomisasi hasil kabutan maka penetrasinya akan semakin buruk. Indikator didapatkannya hasil atomisasi dan daya penetrasi yang baik adalah tekanan penginjeksian dan volume penginjeksian yang harus sesuai dengan standard (Anugrah, 2021).

Mesin common rail adalah mesin yang bekerja dikontrol secara elektronik dengan tekanan bahan bakar sekitar 30 MPa sampai 180 MPa pada supply pump, kemudian tekanan bahan bakar akan diinjeksikan oleh injektor yang dikontrol oleh sebuah engine control module. Manfaat yang besar dengan mesin common rail adalah konsumsi bahan bakar yang irit dan menghasilkan sisa gas buang yang ramah lingkungan. CR-C injector common rail merupakan sebuah alat eletronik yang dirancang untuk memberikan kendali yang presisi terhadap injektor pada sistem common rail. Fungsi utama pada CR-C common rail adalah untuk menyimulasikan sinyal ECU, sehingga memungkinkan injektor dapat diuji secara akurat diluar mesin (Saifullah & Hernowo, 2025).

3.1.2. Rancangan Konseptual

Rancangan konseptual alat peraga injektor mesin diesel berdasarkan sub-sub fungsi berikut:

1. Memompa bahan bakar
2. Pengatur pembukaan valve bahan bakar
3. Penyemprotan bahan bakar
4. Membongkar dan memasang injektor
5. Menahan sub fungsi 1 – 5

Alternatif pemilihan sub fungsi dapat disajikan dalam Tabel 2 berikut:

Tabel 2.

Alternatif Solusi Sub-sub Fungsi

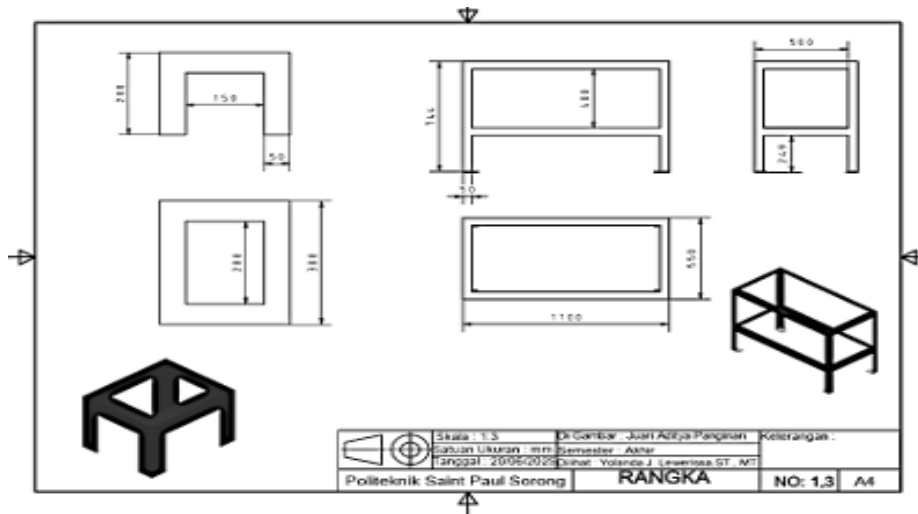
Sub Fungsi		Solusi	
		1	2
1	Memompa bahan bakar	Pompa bahan bakar tekanan tinggi	-
2	Pengatur pembukaan valve bahan bakar	Diesel Injektor Tester	-
3	Penyemprot bahan bakar	Injektor bahan bakar diesel	-
4	Membakar dan memasang injektor	Ragum meja	-
5	Menahan peralatan	Rangka besi	Rangka kayu

Pemilihan sub fungsi alat peraga injektor bahan bakar diesel sebagai berikut:

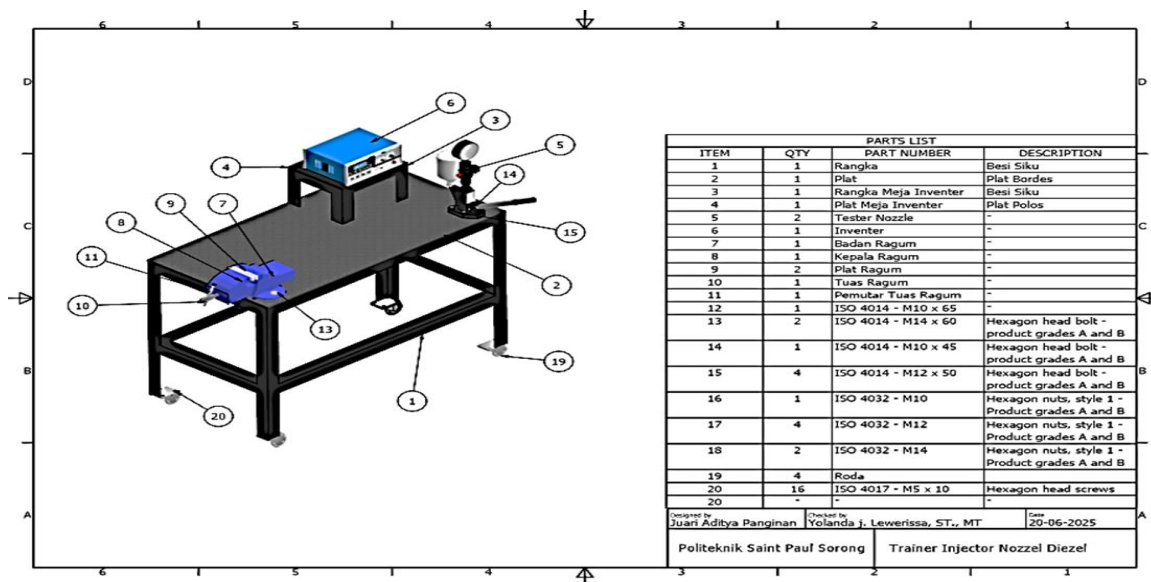
1. Komponen sub fungsi 1 memompa bahan bakar tidak ada alternatif lain dalam memilih, karena alat peraga untuk injektor bahan bakar diesel. Jadi pompa bahan bakar yang dipilih adalah pompa bahan bakar tingkat tinggi.
2. Komponen sub fungsi 2 pengatur pembukaan *valve* bahan bakar juga dipilih diesel injector tester.
3. Komponen sub fungsi 3 penyemprot bahan bakar juga dipilih injektor dengan tipe 4D56 dan nozzle tipe DLLP.
4. Komponen sub fungsi 4 membongkar dan memasang injektor dipilih ragum meja.
5. Komponen sub fungsi 5 menahan peralatan berupa rangka yang dipilih jenis material adalah besi siku karena mudah dilas dan lebih kuat dibandingkan rangka kayu. Material meja dipilih pelat bordes dan pelat besi. Ukuran rangka dapat ditentukan sebagai berikut:
 - a. Panjang (110 cm): Memberikan ruang cukup untuk seluruh komponen dan peralatan tambahan.
 - b. Lebar (55 cm): Ukuran ideal untuk efisiensi ruang dan kemudahan manipulasi alat.
 - c. Tinggi (75 cm): Standar tinggi kerja ergonomis untuk memudahkan pengamatan semprotan melalui kaca akrilik.
 - d. Besi Plat Bordes 6 mm: Lembaran baja dengan permukaan berpola timbul (motif bunga/garis).
 - e. Besi Plat 2 mm: Lembaran logam baja dengan permukaan rata tanpa pola timbul.

3.1.1. Rancangan Detail

Hasil rancangan berdasarkan rancangan konseptual disajikan dalam gambar desain yang dibuat menggunakan *software AutoCad* yang diuraikan pada gambar 2 dan gambar 3 berikut ini:



Gambar 2.
Gambar Desain Rangka



Gambar 3.
Gambar Desain Alat Peraga Injektor Mesin Diesel

Rancangan alat peraga tidak hanya berfokus pada fungsi mekanis, tetapi juga pada aspek ergonomi dan pedagogis. Rangka dengan dimensi $110 \times 55 \times 75$ cm dipilih berdasarkan standar antropometri ergonomi untuk pengamatan visual tanpa membungkuk (Suarjana *et al.*, 2022). Penggunaan *safety cover* akrilik transparan di ruang nozzle memungkinkan mahasiswa mengamati langsung fenomena atomisasi. Secara teknis, desain ruang visualisasi dirancang untuk meminimalkan turbulensi udara di sekitar nozzle, sehingga pola semprotan (*spray cone*) yang terbentuk tidak terdistorsi oleh angin ruangan. Hal ini krusial agar mahasiswa dapat membedakan secara empiris antara atomisasi yang baik (kabut halus simetris) dan atomisasi yang buruk (menetes/dripping atau asimetris).

3.2 Pembuatan Prototipe Alat Peraga

Setelah perancangan dilanjutkan dengan pembuatan prototipe dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Persiapan Material: Menyiapkan bahan utama seperti besi siku (5x5 dan 4x4), plat bordes (6 mm), plat besi (2 mm), dan roda fleksibel.
2. Pemotongan: Material dipotong menggunakan mesin gerinda potong sesuai dengan ukuran pada desain gambar kerja.
3. Pengelasan Rangka: Menyusun dan menyambung besi siku serta plat menggunakan mesin las (trafo las) hingga membentuk rangka meja yang kokoh.
4. Pemasangan Panel: Memasang top plate (plat bordes) dan safety cover berupa akrilik pelindung.
5. Finishing: Melakukan penggerindaan sambungan las agar halus, pemberian cat dasar, dan cat finishing.
6. Komponen Terpasang: Meja dilengkapi dengan ragum, inverter (alat uji), dan unit test nozzle.
7. Sistem Kontrol: Menggunakan CR-C Common Rail Injector Tester dengan rentang frekuensi 0-30 Hz dan rentang waktu 0-10 ms.

Gambar proses pengukuran besi, pemotongan besi, pengelasan membentuk rangka dan proses pengecatan serta perakitan komponen sub-sub fungsi disajikan pada gambar 4, gambar 5 dan gambar 6 berikut:



Gambar 4.
Gambar Proses Pembuatan Rangka



Gambar 5.
Gambar Proses Perakitan Komponen Sub Fungsi 1 – 4

**Gambar 6.**

Gambar Prototipe Alat Penyemprotan Injektor Diesel

3.3 Pengujian Alat

Pengujian prototipe dilakukan dengan pengulangan eksperimen ($n=5$) untuk setiap parameter guna mendapatkan data yang valid secara statistic.

3.3.1 Pengujian Stabilitas Tekanan Rail

Pengujian tekanan dilakukan pada set-point 200 Bar. Data fluktuasi tekanan dicatat menggunakan sensor digital yang dicatat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2.

Data Hasil Pengujian Stabilitas Tekanan

Pengujian Ke-	Tekanan Terukur (Bar)	Deviasi	Status
1	196	-2,0%	Lulus
2	203	+1,5%	Lulus
3	198	-1,0%	Lulus
4	205	+2,5%	Lulus
5	195	-2,5%	Lulus
Rata-rata	199,4	-0,3%	-
Standar Deviasi	4,18	$\pm 2,09\%$	-

Hasil menunjukkan fluktuasi tekanan maksimum hanya sebesar $\pm 2,5\%$, jauh di bawah batas toleransi kriteria lulus ($\leq 10\%$). Stabilitas ini menunjukkan bahwa *hand pump tester* dan regulator pada modul CR-C mampu mempertahankan tekanan rail secara konsisten, yang merupakan syarat mutlak untuk menghasilkan pola atomisasi yang stabil dan dapat diamati oleh mahasiswa.

3.3.2. Pengujian Respons Aktuator

Respons aktuator diukur dari waktu yang dibutuhkan injektor untuk membuka penuh sejak sinyal listrik diberikan (*mode single pulse*). Data hasil pengujian respon akuator tercatat pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3.

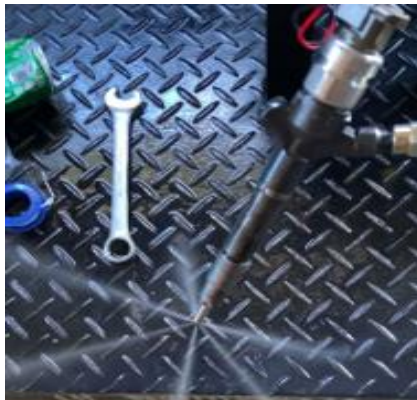
Data Hasil Pengujian Respons Aktuator (Target < 3 ms)

Pengujian Ke-	Waktu Respon (ms)	Status
1	2,4	Lulus
2	2,6	Lulus
3	2,3	Lulus
4	2,5	Lulus
5	2,2	Lulus
Rata-rata	2,4	-

Rata-rata respons aktuator adalah 2,4 ms. Waktu yang sangat singkat ini membuktikan bahwa solenoid/aktuator pada injektor 4D56 yang diintegrasikan dengan modul CR-C bekerja dengan presisi tinggi, mensimulasikan kondisi aktual injeksi diesel modern yang membutuhkan ketepatan waktu (*timing*) dalam orde milidetik.

3.3.3. Analisis Visualisasi Penyemprotan

Pengamatan visual gambar 7 hasil penyemprotan melalui ruang akrilik menunjukkan bahwa pada tekanan stabil 200 Bar, nozzle DLLP menghasilkan pola semprotan kerucut (*hollow cone/solid cone* sesuai tipe) yang simetris dan teratomisasi sempurna. Tidak terdapat gejala *dripping* (menetes) atau *streaming* (menyemprot seperti garis lurus) yang biasanya mengindikasikan kerusakan pegas atau keausan nozzle. Visualisasi ini memberikan dampak pedagogis yang signifikan; mahasiswa dapat secara langsung mengorelasikan teori tekanan pembukaan (*opening pressure*) dengan bentuk fisik semprotan, sesuatu yang tidak dapat dicapai melalui media gambar 2D.



Gambar 7.

Gambar Pola Semprotan

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh adalah:

1. Prototipe alat peraga injektor diesel common rail berhasil dirancang dan dibangun dengan dimensi ergonomis (110 × 55 × 75 cm), mengintegrasikan injektor 4D56, nozzle DLLP, dan modul kontrol CR-C dalam rangka yang aman dan interaktif.
2. Pengujian statistik membuktikan keandalan alat dengan stabilitas tekanan yang sangat baik (deviasi rata-rata $\pm 2,09\%$) kurang dari 10 % dan respons aktuator yang cepat (rata-rata 2,4 ms) kurang dari 3 ms.
3. Alat ini berhasil menjembatani kesenjangan antara konsep teoretis atomisasi dan observasi empiris. Keberhasilan visualisasi pola semprotan secara real-time dalam lingkungan bertekanan tinggi yang terkontrol memberikan implikasi positif terhadap peningkatan pemahaman kognitif dan psikomotorik mahasiswa dalam mendiagnosis karakteristik sistem injeksi diesel.
4. Prototipe saat ini masih menggunakan simulasi sinyal dari modul CR-C dan belum diintegrasikan langsung dengan Engine Control Unit (ECU) asli, serta pengamatan pola semprotan masih bersifat kualitatif visual.

4.2 Saran

Untuk pengembangan alat secara teknis maupun penelitian lanjutan secara sistematis, disarankan:

1. Pengembangan Teknis: Mengintegrasikan *high-speed photography* (kamera kecepatan tinggi) dan perangkat lunak pengolah citra (seperti *ImageJ*) untuk mengukur sudut semprotan (*spray angle*) dan ukuran partikel droplet secara kuantitatif. Selain itu, penambahan sensor IoT untuk pemantauan data tekanan dan suhu secara *real-time* melalui *dashboard* digital akan meningkatkan nilai edukatif alat.
2. Penelitian Lanjutan (Pedagogis): Disarankan untuk melakukan penelitian eksperimen semu (*quasi-experiment*) dengan desain *pretest-posttest control group design* untuk mengukur secara statistik efektivitas penggunaan alat peraga ini terhadap peningkatan hasil belajar (kognitif dan psikomotorik) mahasiswa dibandingkan dengan media konvensional.
3. Pengembangan Sistem: Mengganti atau menambah modul kontrol dengan ECU open-source (seperti *Speeduino* atau *RusEFI*) untuk mensimulasikan strategi injeksi multi-fase (*pilot, main, post injection*) yang lebih mendekati kondisi operasional mesin diesel modern.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Achmat, B., Sa'pang, A., & Bungin, S. S. (2024). Mekanisme Kinerja dan Kualitas Perawatan Injector Mesin Induk di Kapal KMP. Merak PT. ASDP Indonesia Ferry (PERSERO). *Hengkara Majaya*, 5(1), 5–12.
2. Anugrah, R. A. (2021). Analisis Pengaruh Kalibrasi Pompa Injeksi Tipe Inline dan Injektor Motor Diesel Terhadap Volume dan Tekanan Penginjeksian. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(1), 9.
3. Haq, M. U., Jafry, A. T., Ahmad, S., Cheema, T. A., Ansari, M. Q., & Abbas, N. (2022). Recent Advances in Fuel Additives and Their Spray Characteristics for Diesel-Based Blends. *Energies*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/en15197281>
4. Motor, P. T. T. A. (1980). Toyota Diesel Engine, Service Training Information. *Japan: Toyota Motor Sales CO. LTD*, Japan.
5. Putranto, W. A., Khaeroman, K., Susanto, S., & Suharso, A. R. (2023). Simulasi dan Eksperimen Pengaruh Variasi Tekanan Injeksi Bahan Bakar Diesel Liquid pada Mesin Induk Kapal Terhadap Karakteristik Semprotan Injektor. *Jurnal Ilmiah Momentum*, 1-6.
6. Raut, N., Hamidon, W., Verma, A., & Vaidya, R. (2026). Enhancing Chemical Engineering Education: The Role of Virtual Labs in Bridging Theory and Practice. *Jurnal Kejuruteraan*, 38(1), 25–33. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38\(1\)-03](https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38(1)-03).
7. Saifullah, R. F., & Hernowo, S. (2025). Analisis Pengaruh Variasi Penyetelan Tekanan Injektor Common Rail Terhadap Performa Mesin. *Jurnal Voering*, 10(2), 1–7.
8. Suarjana, I. W. G., Pomalingo, M. F., Palilingan, R. A., & Parhusip, B. R. (2022). Perancangan fasilitas kerja ergonomi menggunakan data antropometri untuk mengurangi beban fisiologis. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 10(2), 109–117.
9. Yanuar, P., Khoryanton, A., & Oktariza, G. (2021). Rancang Bangun Alat Uji Injektor Nozzle Spray Semi Otomatis. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(2), 279–285.
10. Zhai, C., Zhang, J., Li, K., Dong, P., Jin, Y., Chang, F., & Luo, H. (2025). Comparative analysis and normalization of single-hole vs. multi-hole spray characteristics: 1st report on spray characteristic comparison. *Green Energy and Resources*, 3(1), 100120. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2025.100120>