

SIMULASI NUMERIK PENGARUH JUMLAH DAN DIAMETER LUBANG INJEKTOR TERHADAP KARAKTERISTIK SEMPROTAN PADA MESIN DIESEL *DIRECT INJECTION*

Aulia Ravan Reza Bastian

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: auliaravan.22003@mhs.unesa.ac.id

Aris Purwanto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: arispurwanto@unesa.ac.id

Abstrak

Mesin diesel *direct injection* menghasilkan emisi berbahaya yang memerlukan optimalisasi proses pembakaran melalui peningkatan karakteristik semprotan bahan bakar, di mana geometri nosel injektor, khususnya jumlah dan diameter lubang, memegang peranan krusial dalam menentukan atomisasi, penetrasi, dan distribusi semprotan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi kombinasi jumlah lubang (8 dan 9) serta diameter lubang (0,110 mm dan 0,130 mm) terhadap karakteristik makroskopik dan mikroskopik semprotan pada injektor Toyota Hilux 2GD-FTV menggunakan simulasi CFD dengan *Ansys Fluent* pada kondisi *non-reaktif*. Hasil simulasi menunjukkan konfigurasi 9 x 0,130 mm unggul pada *droplet velocity* tertinggi (184,52 m/s), namun memiliki atomisasi terburuk dengan *Sauter Mean Diameter* (SMD) terbesar ($1,46 \times 10^{-7}$ m) dan cone angle tersempit (33,97°). Sebaliknya, konfigurasi 9 x 0,110 mm menghasilkan SMD terkecil ($1,31 \times 10^{-7}$ m) yang mengindikasikan atomisasi paling halus, meskipun penetrasinya paling pendek (0,0405 m). Konfigurasi 8 x 0,130 mm menunjukkan penetrasi terpanjang (0,0450 m) serta *droplet velocity* dan cone angle yang stabil. Berdasarkan keseimbangan seluruh parameter, konfigurasi 8 x 0,130 mm direkomendasikan sebagai pilihan paling ideal karena menggabungkan penetrasi terbaik, kecepatan kompetitif, atomisasi memadai, dan sudut optimal untuk menghindari pembasahan dinding silinder. Diameter lubang terbukti lebih dominan daripada jumlah lubang dalam menentukan karakteristik semprotan, sementara jumlah lubang berfungsi sebagai parameter penyesuaian untuk mendistribusikan bahan bakar secara lebih merata di dalam ruang bakar.

Kata Kunci: simulasi numerik, CFD, *direct injection diesel*, karakteristik semprotan, atomisasi.

Abstract

Direct injection diesel engines generate harmful emissions, necessitating the optimization of combustion processes through improved fuel spray characteristics, where injector nozzle geometry, particularly the number and diameter of holes, plays a crucial role in determining atomization, penetration, and spray distribution. This study aims to analyze the combined effects of variations in hole number (8 and 9) and hole diameter (0.110 mm and 0.130 mm) on the macroscopic and microscopic spray characteristics of a Toyota Hilux 2GD-FTV injector using CFD simulations with Ansys Fluent under non-reactive conditions. The simulation results show that the 9 x 0.130 mm configuration excels in achieving the highest droplet velocity (184.52 m/s) but exhibits the poorest atomization with the largest Sauter Mean Diameter (SMD) of 1.46×10^{-7} m and the narrowest cone angle (33.97°). In contrast, the 9 x 0.110 mm configuration produces the smallest SMD (1.31×10^{-7} m), indicating the finest atomization, despite having the shortest penetration (0.0405 m). The 8 x 0.130 mm configuration demonstrates the longest penetration (0.0450 m) while maintaining stable droplet velocity and cone angle. Considering the overall balance of all parameters, the 8 x 0.130 mm configuration is recommended as the most ideal choice, as it combines superior penetration, competitive velocity, adequate atomization, and an optimal cone angle to mitigate wall wetting risks. The hole diameter is proven to exert a more dominant influence than the hole number in determining spray characteristics, whereas the hole number functions as a tuning parameter to distribute fuel more evenly throughout the combustion chamber.

Keywords: Numerical Simulation, CFD, *direct injection diesel*, Spray Characteristics, Atomization

PENDAHULUAN

Mesin diesel memegang peranan vital sebagai sumber tenaga utama di berbagai sektor, mulai dari transportasi hingga pembangkit listrik, berkat efisiensi termalnya yang superior dan durabilitas tinggi (Ahmed & Mekonen, 2022). Namun, mesin ini juga dikenal sebagai salah satu sumber utama emisi gas buang berbahaya seperti NO_x, *partikulat matter* (PM), CO, dan HC. Meningkatnya kesadaran global akan isu lingkungan dan regulasi emisi yang semakin ketat

mendorong para peneliti untuk terus mengembangkan teknologi guna menekan polutan tanpa mengorbankan performa dan efisiensi mesin (Jadhav & Mallikarjuna, 2018).

Penelitian ini berfokus pada Toyota Hilux karena kendaraan ini mendominasi penjualan pickup di Indonesia, menjadikannya representatif untuk studi karakteristik semprotan injektor (Ghani, 2026). Karakteristik performa dan emisi mesin diesel sangat bergantung pada efisiensi proses pembakaran, yang dipengaruhi oleh kualitas

semprotan bahan bakar. Pada mesin diesel *direct injection* (DI), bahan bakar disemprotkan langsung ke ruang bakar, sehingga karakteristik semprotan seperti atomisasi, penetrasi, dan distribusi bahan bakar menjadi faktor penentu utama (Kothiwale *et al.*, 2023).

Sistem injeksi bahan bakar, khususnya injektor, memegang peran krusial dalam menghasilkan semprotan berkualitas. Geometri nosel injektor, yang mencakup jumlah lubang dan diameter lubang, merupakan faktor desain yang sangat berpengaruh terhadap struktur semprotan. Perubahan kecil pada parameter ini dapat menyebabkan variasi signifikan pada pola semprotan dan ukuran butiran, yang pada akhirnya mengubah keseluruhan proses pembakaran (Kumbhar *et al.*, 2019).

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah adanya *trade-off* antara parameter geometri nosel, diameter lubang yang lebih kecil meningkatkan atomisasi tetapi menurunkan penetrasi, sementara penambahan jumlah lubang memperbaiki distribusi namun berisiko menyebabkan interferensi antar semprotan. Kombinasi antara kedua parameter ini menciptakan tantangan optimisasi yang kompleks, di mana penemuan kombinasi yang seimbang sangat krusial untuk mencapai target performa dan emisi yang diinginkan (Kang, 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kombinasi jumlah lubang (8 dan 9) dan diameter lubang (0,110 mm dan 0,130 mm) terhadap karakteristik semprotan pada injektor Toyota Hilux 2GD-FTV menggunakan simulasi CFD dengan *Ansys Fluent*. Secara spesifik, penelitian ini ingin mengetahui pengaruh parameter tersebut terhadap karakteristik makroskopik (penetrasi dan sudut semprotan) dan mikroskopik (*Sauter Mean Diameter*, kecepatan *droplet*, dan distribusi ukuran *droplet*), serta interaksi antara kedua parameter dalam menentukan karakteristik semprotan secara keseluruhan.

METODE

Jenis Penelitian

Metode Penelitian ini merupakan simulasi aliran fluida menggunakan metode numerik *computational fluid dynamics* (CFD) dengan bantuan *software Ansys Fluent*. Dalam studi ini, karakteristik semprotan injektor dapat ditemukan dengan bantuan simulasi numerik ini. Nilai-nilai parameter kemudian disajikan dalam bentuk kontur, tabel dan grafik.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian tentang simulasi numerik pengaruh jumlah dan diameter lubang injektor terhadap karakteristik semprotan pada mesin diesel *direct injection* dilakukan di Laboratorium Aerodinamika Gedung A8, Universitas Negeri Surabaya, Kampus Ketintang. Penelitian ini akan dilaksanakan pada Januari 2026 – juni 2026 hingga segala data dan analisa yang dibutuhkan terpenuhi.

Variabel Penelitian

- Variabel Bebas

Variabel bebas berupa jumlah lubang injektor 8 dan 9, diameter lubang injektor 0,110 mm dan 0,130 mm

- Variabel Terikat

Variabel terikat berupa karakteristik semprotan injektor makroskopik (*spray penetration, spray cone angle*) dan mikroskopik (*sauter mean diameter, droplet velocity, droplet size distribution*).

- Variabel Kontrol

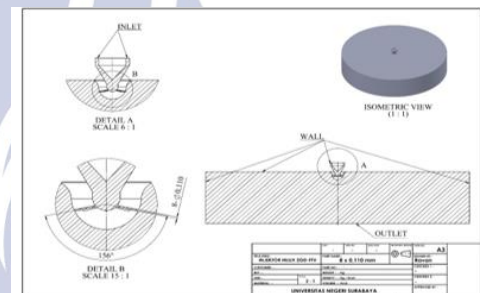
1. Fluida yang mengalir pada injektor adalah biodiesel.
2. Menggunakan injektor mesin diesel Toyota Hilux 2GD-FTV.
3. Aliran fluida di dalam injektor adalah *unsteady*.
4. karakteristik semprotan pada kondisi *non-reaktif*.
5. Tekanan injektor dijaga konstan pada kondisi maksimal 160 Mpa.
6. Waktu injeksi bahan bakar 1ms.

Teknik Pengumpulan Data

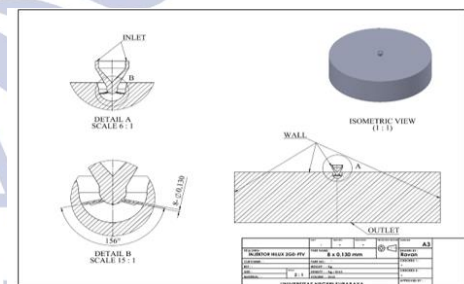
- Pre-processing

1. Pembuatan Geometri

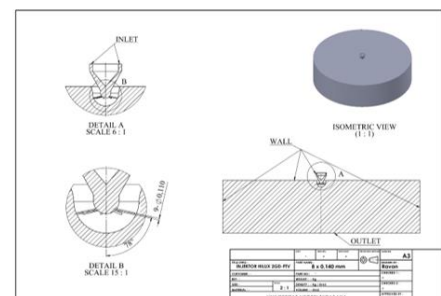
Injektor dengan jumlah dan diameter lubang (8 x 0,110 mm)



Gambar 1. Injektor (8 x 0,110 mm)
Injektor dengan jumlah dan diameter lubang (8 x 0,130 mm)

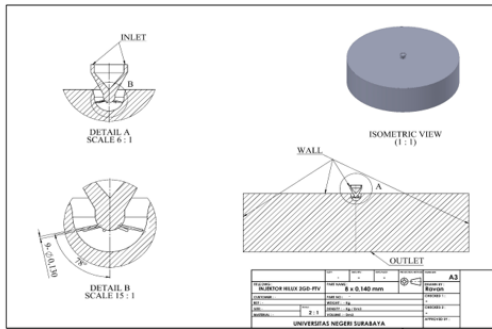


Gambar 2. Injektor (8 x 0,130 mm)
Injektor dengan jumlah dan diameter lubang (9 x 0,110 mm)



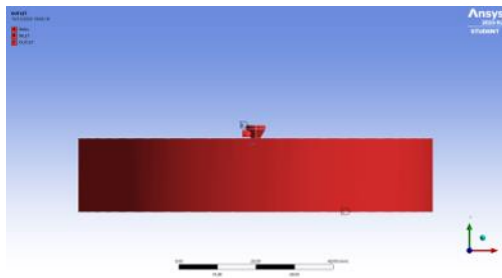
Gambar 3. Injektor (9 x 0,110 mm)

Injektor dengan jumlah dan diameter lubang (9 x 0,130 mm)



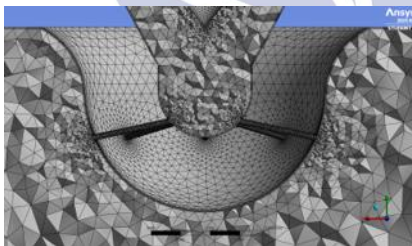
Gambar 4. Injektor (9 x 0,130 mm)

2. Domain



Gambar 5. Domain Geometri

3. Meshing



Gambar 6. Meshing

4. Penentuan Solver

Tabel 1. Penentuan Solver

Solver		
Type	Pressure-Based	
Velocity Formulation	Absolute	
Time	Transient	
Models		
Multiphase	Volume of Fluid	
Discrete Phase	Breakup	
Injection		
Type	Surface	
Breakup Model	KH-RT	
Material		
Fluid	Diesel Fuel	
	Air	
Solid	Alumulium	
Boundary Layer		
Inlet	Pressure-Inlet	160 MPa
Outlet	Pressure-Outlet	1 MPa
Wall		No Slip
Fluid Properties		Air

	Density	1.225 kg/m ³
	Viscosity	1.7894e-05 kg/m.s
	Fuel (B100)	
	Desnsity	890 kg/m ³
	Viscosity	0.00534 kg/ms
	Surface Tension	0.0306 N/m
Solution Method		
Scheme	Simple	
Gradient	Least Squares Cell Based	
Presure	Second Order	
Momentum	Second Order Upwind	
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind	
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind	
Solution Initialization		
Intialization Methods	Standard Intialization	
Run Calculation		
Type	Fixed	
Method	User-Specified	
Number of Time Step	500;400;300;200;100	
Time Step Size	2e-6	
Iteration	10	

• Processing

1. Iterasi

Solver akan melakukan *iterasi* berulang untuk mencapai konvergensi. Iterasi berhenti ketika perubahan antara iterasi berturut turut sudah cukup kecil.

2. Under-relaxation

Teknik yang digunakan dalam metode numerik untuk meningkatkan stabilitas dan konvergensi solusi iteratif. Dalam *iterasi* numerik, solusi bisa berosilasi atau divergen jika perubahan antar *iterasi* terlalu besar. *Under-relaxation* membantu dengan mengurangi perubahan antar *iterasi*, sehingga solusi konvergen lebih stabil.

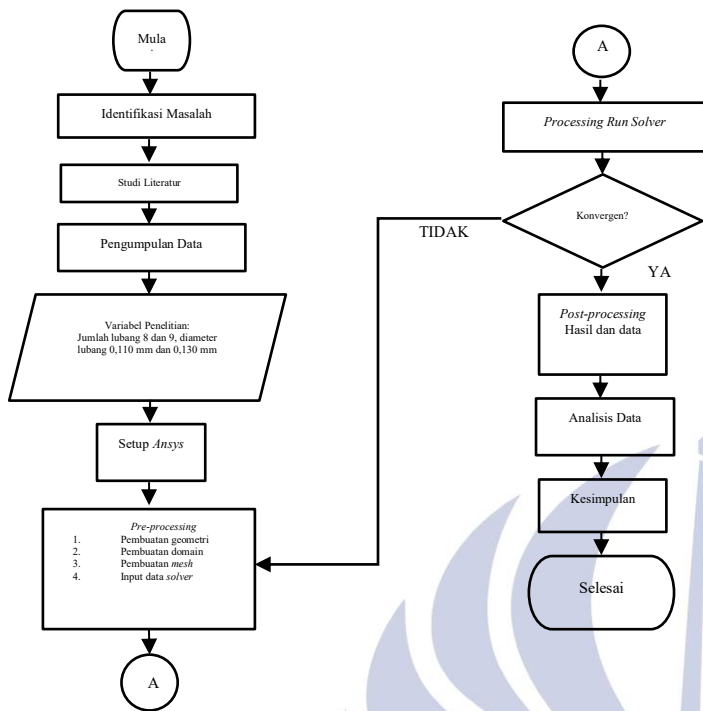
3. Metode Numerik

Solver menggunakan metode numerik untuk memecahkan persamaan diferensial parsial.

• Post-processing

Hasil simulasi akan ditampilkan dalam bentuk visualisasi berupa *particle track* dan grafik dari *spray penetration*, *spray cone angle*, *velocity*, *droplet size distribution*.

Flow Chart Penelitian



Gambar 7. Flow Chart

Teknik Analisis Data

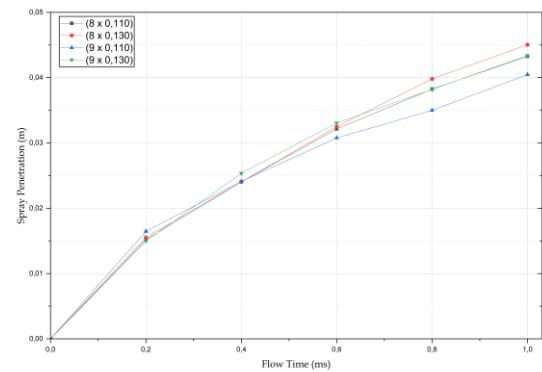
Dalam studi ini, simulasi menggunakan perangkat lunak *ANSYS Fluent* digunakan untuk menganalisis bagaimana perubahan jumlah dan diameter lubang injektor memengaruhi karakteristik semprotan secara makroskopik dan mikroskopik didalam ruang bakar. Geometri injektor dimodelkan dalam bentuk 3D dan divariasikan pada jumlah dan diameter lubang untuk melihat pengaruh langsung terhadap karakteristik semprotan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Karakteristik Makroskopik

• Particle Track Spray Penetration

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, diperoleh data mengenai pengaruh jumlah lubang injektor dan diameter lubang terhadap *spray penetration*. Simulasi ini menggunakan variasi jumlah lubang (8 dan 9) serta variasi diameter lubang (0,110 mm dan 0,130 mm). Data *spray penetration* diukur pada beberapa waktu injeksi, yaitu pada 0,2 ms, 0,4 ms, 0,6 ms, 0,8 ms, dan 1,0 ms. Tujuan dari analisis ini adalah untuk memahami bagaimana perubahan jumlah lubang dan diameter lubang mempengaruhi kemampuan *spray* untuk menjangkau jarak yang lebih jauh di dalam ruang bakar



Gambar 8. Grafik Spray Penetration

Tabel 2. Hasil Spray Penetration

NO	VARIABEL	PENETRATION (m)				
		0,2 ms	0,4 ms	0,6 ms	0,8 ms	1 ms
1	(8 x 0,110)	0,015199	0,024052	0,032143	0,038251	0,043263
2	(8 x 0,130)	0,015534	0,024036	0,032501	0,039809	0,045043
3	(9 x 0,110)	0,016464	0,02413	0,030779	0,035003	0,040467
4	(9 x 0,130)	0,015016	0,025355	0,033063	0,038208	0,043387

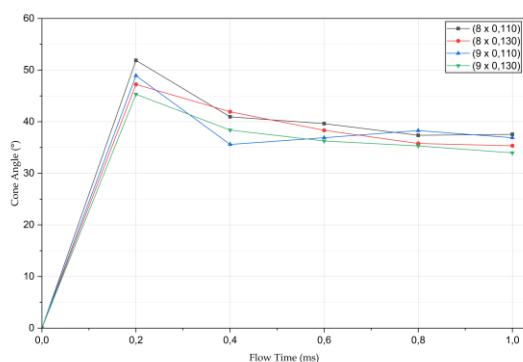
Ketika membandingkan konfigurasi 8 lubang dengan 9 lubang pada diameter yang sama, terlihat bahwa hasilnya bervariasi tergantung pada waktu pengamatan. Pada diameter 0,110 mm, konfigurasi 9 lubang justru menghasilkan penetrasi yang lebih pendek pada akhir injeksi (1 ms), yaitu 0,040467 meter, dibandingkan 8 lubang yang mencapai 0,043263 meter. Fenomena serupa juga terjadi pada diameter 0,130 mm, di mana penetrasi 9 lubang (0,043387 meter) masih lebih pendek daripada 8 lubang (0,045043 meter) pada akhir injeksi. Pada konfigurasi 8 lubang, peningkatan diameter dari 0,110 mm menjadi 0,130 mm secara konsisten menghasilkan penetrasi yang lebih panjang. Hasil ini sejalan dengan penelitian Jabbar *et al.* (2018) bahwa *spray penetration* meningkat seiring dengan membesarnya diameter lubang injektor. Tren peningkatan yang sama juga teramati pada konfigurasi 9 lubang.

Namun, analisis pada fase awal injeksi menunjukkan dinamika yang menarik. Pada waktu 0,2 ms, konfigurasi 9 lubang dengan diameter 0,110 mm justru memiliki penetrasi lebih panjang (0,016464 m) dibandingkan 8 lubang diameter 0,110 mm (0,015199 m). Akan tetapi, seiring berjalannya waktu, momentum total pada semburan 9 lubang lebih cepat terdisipasi karena pembagian *fluks* ke lebih banyak jet. Akibatnya, pada akhir injeksi (1 ms), penetrasi 9 lubang justru tertinggal dari 8 lubang untuk kedua diameter yang diuji. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan jumlah lubang tanpa diimbangi dengan diameter yang cukup akan membagi momentum aliran, sehingga mengurangi momentum total per jet dan memperpendek penetrasi pada tahap akhir.

Hasil penetrasi ini memiliki implikasi penting terhadap proses pembakaran di dalam mesin diesel. Penetrasi yang lebih panjang memungkinkan bahan bakar menjangkau area yang lebih luas di dalam ruang bakar, sehingga berpotensi meningkatkan pencampuran dengan udara. Namun, penetrasi yang terlalu panjang juga dapat menyebabkan bahan bakar menempel pada dinding silinder, yang justru menurunkan efisiensi pembakaran (Jabbar *et al.*, 2018). Dari semua variasi yang diuji, konfigurasi 8 lubang dengan diameter 0,130 mm menunjukkan penetrasi terbaik pada akhir injeksi (0,045043 m), diikuti oleh konfigurasi 9 lubang dengan diameter 0,130 mm (0,043387 m). Sementara itu, konfigurasi 9 lubang dengan diameter 0,110 mm menunjukkan penetrasi terpendek (0,040467 m), yang mungkin kurang ideal untuk aplikasi mesin diesel yang membutuhkan jangkauan *spray* yang cukup. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi injektor harus mempertimbangkan keseimbangan antara penetrasi yang cukup untuk pencampuran yang baik dan upaya menghindari kontak dengan dinding silinder.

- *Particle Track Spray Cone Angle*

Sudut semprotan atau *cone angle* merupakan salah satu parameter penting yang menggambarkan seberapa lebar penyebaran bahan bakar saat disemprotkan dari injektor ke dalam ruang bakar. Semakin lebar sudut ini, semakin besar area yang dapat dijangkau oleh bahan bakar, sehingga potensi pencampuran dengan udara menjadi lebih baik. Analisis ini bertujuan untuk melihat bagaimana pengaruh variasi jumlah lubang (8 dan 9) serta variasi diameter lubang (0,110 mm dan 0,130 mm) terhadap sudut semprotan yang dihasilkan. Data sudut semprotan diukur pada lima titik waktu yang berbeda, yaitu 0,2 ms, 0,4 ms, 0,6 ms, 0,8 ms, dan 1,0 ms.



Gambar 9. Grafik *Spray Cone Angle*

Tabel 3. Hasil *Spray Cone Angle*

NO	VARIABEL	CONE ANGLE (°)				
		0,2 ms	0,4 ms	0,6 ms	0,8 ms	1 ms
1	(8 x 0,110)	51,88	40,94	39,63	37,37	37,55
2	(8 x 0,130)	47,24	41,93	38,33	35,78	35,34
3	(9 x 0,110)	48,93	35,59	36,9	38,28	36,89
4	(9 x 0,130)	45,32	38,38	36,26	35,32	33,97

Berdasarkan data yang disajikan dalam tabel dan grafik, terlihat bahwa sebagian besar variasi konfigurasi menunjukkan kecenderungan sudut semprotan (*spray cone angle*) yang menurun seiring dengan bertambahnya waktu injeksi. Namun, perlu dicatat bahwa pada konfigurasi 9 lubang dengan diameter 0,110 mm, terjadi fluktuasi yang cukup menarik, yaitu sudut semprotan sempat naik kembali pada waktu 0,8 ms (38,28°) sebelum akhirnya turun ke 36,89° pada 1,0 ms. Hal ini mengindikasikan bahwa dinamika aliran pada fase menengah injeksi masih cukup kompleks sebelum mencapai kondisi stabil. Fenomena penurunan sudut secara umum ini diperkuat oleh penelitian Ishak *et al.* (2019) yang menemukan bahwa sudut semprotan dipengaruhi oleh geometri nosel dan cenderung stabil setelah fase awal injeksi. Pada awal injeksi (0,2 ms), sudut semprotan umumnya berada pada nilai tertinggi dibandingkan waktu berikutnya, karena tekanan bahan bakar yang keluar dari nosel sangat tinggi sehingga semburan menyebar kuat ke arah samping. Seiring waktu menuju 0,4 ms, 0,6 ms, dan seterusnya, sudut ini perlahan mengecil.

Ketika membandingkan jumlah lubang yang berbeda pada diameter yang sama, hasil yang diperoleh menunjukkan pola yang konsisten. Pada awal injeksi (0,2 ms), konfigurasi 8 lubang dengan diameter 0,110 mm memberikan sudut terlebar, yaitu 51,88°, dibandingkan 9 lubang dengan diameter sama yang hanya mencapai 48,93°. Hal yang sama juga teramati pada diameter 0,130 mm, di mana 8 lubang (47,24°) masih lebih lebar daripada 9 lubang (45,32°). Ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah lubang pada tahap awal mengurangi lebar semburan, karena tekanan bahan bakar terbagi ke lebih banyak lubang sehingga momentum radial per lubang berkurang.

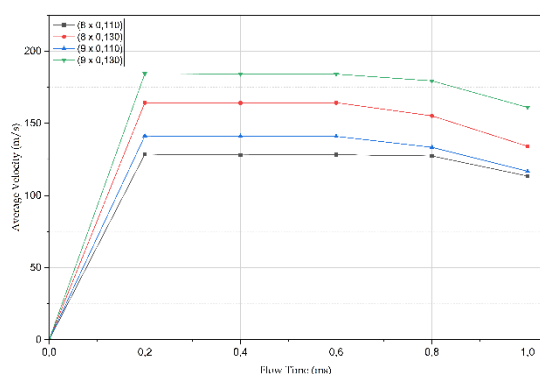
Selain itu, temuan menarik lainnya adalah pengaruh diameter lubang. Pada konfigurasi 8 lubang, peningkatan diameter dari 0,110 mm menjadi 0,130 mm justru menurunkan sudut semprotan pada akhir injeksi (dari 37,55° menjadi 35,34°). Fenomena serupa juga terjadi pada konfigurasi 9 lubang, di mana sudut akhir turun dari 36,89° menjadi 33,97°. Hal ini menunjukkan bahwa diameter lubang yang lebih besar meningkatkan momentum aksial bahan bakar, sehingga semburan cenderung lebih terarah ke depan (penetrasi lebih panjang) dibandingkan menyebar ke samping (sudut lebih sempit). Temuan

ini melengkapi hasil sebelumnya tentang penetrasi, di mana diameter lebih besar meningkatkan jangkauan, namun mengorbankan lebar penyebaran radial. Penelitian Ahmed & Mekonen (2022) menyoroti bahwa peningkatan jumlah lubang berdampak pada atomisasi, namun dari aspek sudut geometris, hasil ini menunjukkan bahwa jumlah lubang yang lebih sedikit (8 lubang) justru memberikan penyebaran lateral yang lebih luas pada akhir injeksi untuk diameter yang diuji.

Hasil Karakteristik Mikroskopik

- *Particle Track Velocity*

Kecepatan partikel merupakan salah satu parameter penting yang menunjukkan seberapa cepat partikel-partikel bahan bakar bergerak setelah keluar dari injektor menuju ruang bakar. Semakin tinggi kecepatan partikel, maka semakin besar energi kinetik yang dimiliki oleh semburan bahan bakar, yang berpengaruh pada kemampuan spray untuk menembus udara di sekitarnya. Analisis ini bertujuan untuk melihat bagaimana variasi jumlah lubang (8 dan 9) serta variasi diameter lubang (0,110 mm dan 0,130 mm) mempengaruhi kecepatan partikel bahan bakar. Data kecepatan diukur pada lima titik waktu yang berbeda yaitu 0,2 ms, 0,4 ms, 0,6 ms, 0,8 ms, dan 1,0 ms.



Gambar 12. Grafik *Spray Velocity*

Tabel 4. Hasil *Spray Velocity*

NO	VARIABEL	VELOCITY (m/s)				
		0,2 ms	0,4 ms	0,6 ms	0,8 ms	1 ms
1	(8 x 0,110)	128,6451	128,0762	128,297	127,3947	113,5078
2	(8 x 0,130)	164,3274	164,2186	164,3611	155,1993	134,1052
3	(9 x 0,110)	141,3389	141,1979	141,0378	133,4339	116,7934
4	(9 x 0,130)	184,5156	184,3559	184,114	179,4559	161,0356

Berdasarkan data yang disajikan dalam tabel, terlihat bahwa kecepatan partikel cenderung bertahan pada nilai yang relatif stabil pada fase awal injeksi, namun kemudian mengalami penurunan yang cukup signifikan menjelang akhir waktu pengamatan. Pada rentang waktu 0,2 ms hingga 0,6 ms, sebagian besar variasi menunjukkan nilai kecepatan yang hampir konstan atau hanya mengalami perubahan yang sangat kecil. Namun, ketika memasuki waktu 0,8 ms dan terutama pada 1,0 ms, terjadi penurunan kecepatan yang cukup drastis pada semua konfigurasi. Penurunan ini disebabkan oleh hilangnya momentum akibat hambatan aerodinamis dari udara sekitar, serta proses atomisasi yang terus berlangsung sehingga partikel terpecah menjadi lebih kecil. Semakin jauh jarak tempuh partikel, semakin besar energi yang hilang akibat gesekan dengan udara.

Dari data yang diperoleh, terlihat bahwa diameter lubang memiliki pengaruh yang sangat dominan terhadap besarnya kecepatan partikel. Secara konsisten, semakin besar diameter lubang, maka semakin tinggi kecepatan partikel yang dicapai, baik pada konfigurasi 8 lubang maupun 9 lubang. Sebagai contoh, pada konfigurasi 8 lubang, kecepatan pada waktu 0,2 ms meningkat dari 128,65 m/s (diameter 0,110 mm) menjadi 164,33 m/s (diameter 0,130 mm). Pola yang sama juga teramati pada konfigurasi 9 lubang, di mana kecepatan meningkat dari 141,34 m/s (0,110 mm) menjadi 184,52 m/s (0,130 mm). Peningkatan ini terjadi karena lubang yang lebih besar memungkinkan laju aliran massa bahan bakar yang lebih tinggi dalam waktu yang sama, sehingga menghasilkan momentum total yang lebih besar serta kecepatan partikel yang lebih tinggi.

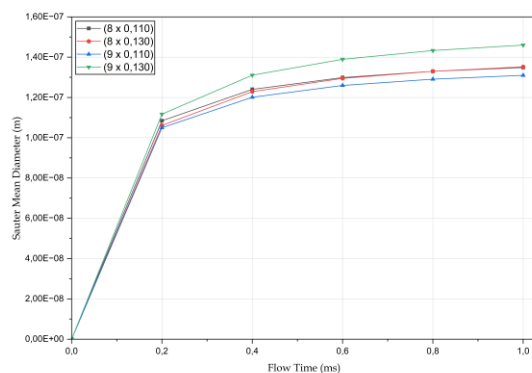
Selain diameter, jumlah lubang juga menunjukkan pengaruh yang jelas. Pada diameter yang sama, konfigurasi 9 lubang secara konsisten menghasilkan kecepatan partikel yang lebih tinggi dibandingkan 8 lubang. Misalnya, pada diameter 0,130 mm, kecepatan 9 lubang (184,52 m/s) jauh lebih tinggi daripada 8 lubang (164,33 m/s) pada waktu 0,2 ms. Pengaruh jumlah lubang ini sejalan dengan temuan Ahmed & Mekonen (2022) yang menyatakan bahwa peningkatan jumlah lubang injektor (*injector hole number*, INHN) berdampak substansial terhadap peningkatan atomisasi dan laju pencampuran bahan bakar-udara.

Berdasarkan analisis kecepatan partikel yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa diameter lubang merupakan faktor paling dominan, di mana diameter yang lebih besar secara konsisten menghasilkan kecepatan yang lebih tinggi. Jumlah

lubang juga memberikan kontribusi signifikan, dengan konfigurasi 9 lubang cenderung menghasilkan kecepatan lebih tinggi daripada 8 lubang pada diameter yang sama. Seluruh konfigurasi menunjukkan pola penurunan kecepatan yang signifikan pada fase akhir injeksi (0,8–1,0 ms) akibat disipasi momentum. Kombinasi $9 \times 0,130$ mm menjadi konfigurasi dengan kecepatan tertinggi (184,52 m/s pada 0,2 ms dan 161,04 m/s pada 1,0 ms), sedangkan kombinasi $8 \times 0,110$ mm memiliki kecepatan terendah. Untuk aplikasi yang membutuhkan atomisasi yang baik tanpa risiko pembasahan dinding (*wall wetting*) yang berlebihan, konfigurasi $8 \times 0,130$ mm atau $9 \times 0,110$ mm dapat menjadi pilihan yang lebih seimbang, karena menawarkan kecepatan partikel pada rentang menengah di antara keempat variasi yang diuji.

- *Particle Track Droplet Size Distribution*

Sauter Mean Diameter atau yang sering disingkat SMD merupakan parameter penting yang digunakan untuk menggambarkan ukuran rata-rata *droplet* bahan bakar yang dihasilkan oleh injektor. Parameter ini sangat krusial dalam proses pembakaran karena ukuran *droplet* menentukan seberapa cepat bahan bakar dapat menguap dan bercampur dengan udara. Semakin kecil nilai SMD, maka semakin halus atomisasi yang terjadi, yang berarti *droplet* bahan bakar lebih mudah menguap dan proses pembakaran menjadi lebih sempurna. Dalam analisis ini, data SMD diukur pada enam variasi konfigurasi yang terdiri dari kombinasi jumlah lubang (8 dan 9) dan diameter lubang (0,110 mm, 0,130 mm, dan 0,140 mm). Pengukuran dilakukan pada lima titik waktu yaitu 0,2 ms, 0,4 ms, 0,6 ms, 0,8 ms, dan 1,0 ms.



Gambar 13. Grafik *Sauter Mean Diameter*

Tabel 5. Hasil *Sauter Mean Diameter*

NO	VARIABEL	SAUTER MEAN DIAMETER (m)				
		0,2 ms	0,4 ms	0,6 ms	0,8 ms	1 ms
1	(8 x 0,110)	1,08437E-07	1,24007E-07	1,29895E-07	1,32976E-07	1,34867E-07
2	(8 x 0,130)	1,06105E-07	1,22922E-07	1,29500E-07	1,33001E-07	1,35211E-07
3	(9 x 0,110)	1,04952E-07	1,20130E-07	1,25986E-07	1,29097E-07	1,31010E-07
4	(9 x 0,130)	1,11720E-07	1,31067E-07	1,38952E-07	1,43294E-07	1,45997E-07

Berdasarkan data yang disajikan dalam tabel, terlihat bahwa semua variasi menunjukkan pola peningkatan nilai SMD seiring dengan bertambahnya waktu injeksi. Pada awal pengamatan (0,2 ms), nilai SMD masih berada pada kisaran yang relatif kecil, yaitu antara 1,04952E-07 meter (konfigurasi $9 \times 0,110$) hingga 1,11720E-07 meter (konfigurasi $9 \times 0,130$). Namun, seiring berjalannya waktu, nilai SMD terus meningkat dan mencapai puncaknya pada 1,0 ms dengan rentang antara 1,31010E-07 meter ($9 \times 0,110$) hingga 1,45997E-07 meter ($9 \times 0,130$). Peningkatan ini terjadi karena *droplet-droplet* kecil yang terbentuk pada awal injeksi mulai bergabung atau berkoalesensi satu sama lain, sehingga membentuk *droplet* yang lebih besar. Selain itu, saat partikel bergerak semakin jauh dari nosel, kecepatannya menurun, sehingga gaya geser yang berperan dalam memecah *droplet* juga berkurang.

Ketika membandingkan pengaruh jumlah lubang pada diameter yang sama, hasil yang diperoleh menunjukkan variasi yang cukup beragam. Pada diameter 0,110 mm, konfigurasi 9 lubang secara konsisten menghasilkan SMD yang lebih kecil dibandingkan 8 lubang pada semua waktu pengamatan. Misalnya, pada 1,0 ms, konfigurasi 9 lubang menghasilkan 1,31010E-07 meter, sedangkan 8 lubang menghasilkan 1,34867E-07 meter. Namun, pada diameter 0,130 mm, konfigurasi 9 lubang justru menghasilkan SMD yang jauh lebih besar dibandingkan 8 lubang, dengan selisih mencapai sekitar 1,08E-08 meter pada akhir waktu injeksi (1,45997E-07 vs 1,35211E-07). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah lubang tidak selalu menghasilkan *droplet* yang lebih kecil, karena efektivitas atomisasi sangat bergantung pada interaksi antara jumlah lubang dan diameternya. Jumlah lubang yang terlalu banyak dengan diameter tertentu justru dapat mengganggu proses atomisasi.

Berdasarkan hasil analisis *Sauter Mean Diameter* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa diameter lubang dan jumlah lubang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ukuran *droplet* bahan bakar. Secara umum, nilai SMD cenderung

meningkat seiring bertambahnya waktu setelah injeksi akibat proses koalesensi antar droplet. Pada konfigurasi 8 lubang, diameter 0,110 mm menghasilkan SMD yang sedikit lebih kecil dibandingkan 0,130 mm pada akhir injeksi, meskipun perbedaannya sangat tipis ($1,34867E-07$ vs $1,35211E-07$). Sedangkan pada konfigurasi 9 lubang, diameter 0,110 mm menunjukkan atomisasi yang jauh lebih baik dibandingkan diameter 0,130 mm pada semua waktu pengamatan. Secara keseluruhan, konfigurasi $9 \times 0,110$ mm merupakan konfigurasi dengan atomisasi terbaik (SMD terkecil), sedangkan konfigurasi $9 \times 0,130$ mm menghasilkan atomisasi paling buruk (SMD terbesar) di antara keempat variasi yang diuji. Temuan ini sejalan dengan penelitian Kumbhar *et al.* (2019) yang juga mengonfirmasi bahwa *Sauter mean diameter* meningkat seiring dengan pembesaran diameter lubang akibat penundaan dalam proses *breakup* dan atomisasi.

Pengaruh Variasi Jumlah dan Diameter Lubang Terhadap Karakteristik Semprotan Makroskopik dan Mikroskopik

Terdapat hubungan yang erat antara karakteristik makroskopik dan mikroskopik dari semprotan bahan bakar yang perlu dipahami secara komprehensif. Konfigurasi dengan kecepatan tinggi, seperti yang teramati pada $9 \times 0,130$ mm (184,52 m/s pada fase awal), cenderung menghasilkan momentum yang besar sehingga mendorong partikel bergerak lebih jauh, yang tercermin pada nilai penetrasi yang relatif panjang. Namun, kecepatan yang terlalu tinggi justru membuat partikel bergerak terlalu cepat ke arah aksial sehingga sudut semprotannya cenderung lebih sempit, sebagaimana ditunjukkan oleh konfigurasi $9 \times 0,130$ mm yang memiliki sudut terakhir terkecil ($33,97^\circ$). Sebaliknya, konfigurasi dengan kecepatan rendah seperti $8 \times 0,110$ mm (128,65 m/s pada fase awal) menghasilkan sudut semprotan yang lebih lebar ($37,55^\circ$ pada akhir injeksi) karena partikel memiliki waktu lebih banyak untuk menyebar ke samping, namun konsekuensinya penetrasi yang dihasilkan menjadi lebih pendek (0,043263 meter). Ukuran *droplet* juga memegang peranan penting dalam menentukan kedua parameter makroskopik tersebut. Droplet yang lebih besar, seperti yang dihasilkan oleh konfigurasi $9 \times 0,130$ mm dengan nilai SMD tertinggi ($1,45997E-07$ meter), memiliki momentum inersia yang lebih besar sehingga mampu mempertahankan lintasan lurus dan menghasilkan penetrasi yang panjang, meskipun atomisasinya buruk. Sebaliknya, *droplet* yang lebih kecil, seperti pada konfigurasi $9 \times 0,110$ mm dengan SMD terkecil ($1,31010E-07$ meter), lebih mudah terpengaruh oleh

hambatan aerodinamis sehingga menyebar lebih lebar namun jangkauan penetrasinya menjadi paling pendek (0,040467 meter). Oleh karena itu, desain injektor harus mempertimbangkan keseimbangan antara kecepatan, ukuran droplet, penetrasi, dan sudut semprotan untuk mendapatkan kinerja pembakaran yang optimal, karena keseimbangan ini sangat menentukan efisiensi pembakaran dan emisi gas buang yang dihasilkan oleh mesin diesel.

Berdasarkan analisis menyeluruh dari semua parameter yang telah dibahas pada rentang diameter 0,110 mm dan 0,130 mm, terlihat bahwa tidak ada satu pun konfigurasi yang unggul secara mutlak di semua aspek, karena setiap variasi menunjukkan keunggulan pada parameter tertentu dengan konsekuensi pengorbanan di parameter lainnya. Konfigurasi $8 \times 0,130$ mm menunjukkan performa yang sangat baik dan seimbang, dengan kecepatan yang cukup tinggi (164,33 m/s pada fase awal dan 134,11 m/s pada akhir), penetrasi terbaik di antara semua variasi (0,045043 meter), serta nilai SMD yang masih tergolong baik ($1,35211E-07$ meter) yang menunjukkan atomisasi yang memadai, meskipun sudut semprotannya tergolong sedang ($35,34^\circ$). Sementara itu, konfigurasi $9 \times 0,130$ mm menunjukkan keunggulan pada kecepatan tertinggi (184,52 m/s pada fase awal) dan penetrasi yang sangat baik (0,043387 meter), namun memiliki kelemahan signifikan pada atomisasi karena menghasilkan SMD terbesar ($1,45997E-07$ meter) yang mengindikasikan ukuran droplet paling kasar. Di sisi lain, konfigurasi $9 \times 0,110$ mm justru unggul pada aspek atomisasi dengan SMD terkecil ($1,31010E-07$ meter) dan sudut semprotan yang relatif lebar ($36,89^\circ$), tetapi penetrasi yang dihasilkan adalah yang terpendek (0,040467 meter) dan kecepatannya berada pada tingkat menengah ke bawah. Konfigurasi $8 \times 0,110$ mm memiliki sudut semprotan terlebar ($37,55^\circ$) namun kecepatan dan penetrasinya adalah yang paling rendah di antara semua variasi, sehingga kurang ideal untuk aplikasi yang membutuhkan jangkauan semburan yang panjang. Dari semua pertimbangan tersebut, konfigurasi $8 \times 0,130$ mm dapat direkomendasikan sebagai pilihan yang paling seimbang karena mampu memberikan penetrasi terbaik, kecepatan yang kompetitif, atomisasi yang cukup baik, serta sudut semprotan yang masih dalam batas wajar, sehingga berpotensi menghasilkan pencampuran bahan bakar-udara yang optimal tanpa menimbulkan risiko pembasahan dinding silinder yang berlebihan.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa diameter lubang memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan jumlah lubang, namun interaksi antara kedua parameter menghasilkan karakteristik semprotan yang bervariasi dan saling terkait. Secara makroskopik, penetrasi tertinggi dicapai oleh konfigurasi (8 x 0,130 mm), sedangkan sudut semprotan terlebar pada akhir injeksi diperoleh dari (8 x 0,110 mm) dan sudut tersempit dari (9 x 0,130 mm), yang mengindikasikan bahwa kecepatan yang lebih tinggi cenderung mengarahkan aliran ke aksial. Dari sisi mikroskopik, kecepatan partikel tertinggi ditemukan pada (9 x 0,130 mm), tetapi justru konfigurasi (9 x 0,110 mm) yang menghasilkan Sauter Mean Diameter (SMD) terkecil, sehingga membuktikan bahwa kecepatan optimal tertentu diperlukan untuk atomisasi terbaik, karena kecepatan yang terlalu tinggi pada (9 x 0,130 mm) justru menghasilkan SMD terbesar akibat gangguan stabilitas aliran dan meningkatnya koalesensi. Terdapat hubungan timbal balik yang erat, di mana konfigurasi dengan kecepatan tinggi dan droplet besar seperti (9 x 0,130 mm) menghasilkan penetrasi panjang namun sudut semprotan sempit dan atomisasi buruk, sedangkan kondisi sebaliknya pada (9 x 0,110 mm) menghasilkan sudut lebar dengan penetrasi pendek namun atomisasi sangat baik, sehingga tidak ada satu pun konfigurasi yang unggul di semua parameter secara mutlak. Dengan mempertimbangkan keseimbangan seluruh parameter pada rentang diameter 0,110 mm dan 0,130 mm yang diuji, konfigurasi (8 x 0,130 mm) direkomendasikan sebagai pilihan paling optimal karena mampu menghasilkan penetrasi terbaik, kecepatan yang kompetitif (peringkat kedua tertinggi), atomisasi yang relatif baik dengan SMD yang hampir setara dengan konfigurasi terbaik, serta sudut semprotan yang masih dalam batas wajar, sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan pada mesin diesel guna mencapai pencampuran bahan bakar dan udara yang optimal sekaligus meminimalkan risiko pembasahan dinding silinder.

SARAN

- Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi eksperimental di laboratorium guna membandingkan hasil simulasi CFD dengan kondisi nyata di lapangan. Pengujian langsung pada mesin diesel dengan konfigurasi injektor terpilih akan memberikan data yang lebih akurat dan memperkuat hasil analisis yang telah diperoleh.
- Variasi tekanan injeksi perlu ditambahkan dalam simulasi mendatang, misalnya pada tekanan 30 MPa, 50 MPa, atau 100 MPa, untuk melihat apakah konfigurasi ideal yang sama masih berlaku pada

kondisi tekanan yang berbeda atau justru terjadi pergeseran konfigurasi terbaik.

- Analisis lanjutan mengenai pengaruh variasi geometri injektor terhadap proses pembakaran seperti *ignition delay*, *heat release rate*, dan pembentukan emisi gas buang (NO_x, soot, CO, HC) sangat disarankan untuk dilakukan. Hal ini akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang bagaimana karakteristik semprotan mempengaruhi kinerja mesin secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M. B., & Mekonen, M. W. (2022). Effects of Injector Nozzle Number of Holes and Fuel Injection Pressures on the Diesel Engine Characteristics Operated with Waste Cooking Oil Biodiesel Blends. *Fuels*, <https://doi.org/10.3390/fuels3020017>
- Achebe, C. H., Ogunedo, B. M. O., Chukwunke, J. L., & Anosike, N. B. (2020). Analysis of diesel engine injector nozzle spray characteristics fueled with residual fuel oil. *Heliyon*, 6(8), e04637. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04637>
- Challen, B. (1987). Diesel engine reference book. In *Journal of Mechanical Working Technology* (Vol. 14, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(87\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0378-3804(87)90022-2)
- Hiroyasu, H., & Arai, M. (1990). Fuel spray penetration and spray angle in diesel engines.
- Ishak, M. H. H., Ismail, F., Mat, S. C., Abdullah, M. Z., Aziz, M. S. 130 131 A., & Idroas, M. Y. (2019). Numerical Analysis of Nozzle Flow and Spray Characteristics from Different Nozzles Using Diesel and Biofuel <https://doi.org/10.3390/en12020281>
- Jadhav, P. D., & Mallikarjuna, J. M. (2018). Effect of fuel injector hole diameter and injection timing on the mixture formation in a GDI engine - A CFD study. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 6(4), 737–748. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V6-N4-737-748>
- Jabbar, S., Algayyim, M., & Wandel, A. P. (2018). The Impact of Injector Hole Diameter on Spray Behaviour for Butanol-Diesel Blends. v(Cvv). <https://doi.org/10.3390/en11051298>
- Kothiwale, G. R., Akkoli, K. M., Doddamani, B. M., Kattimani, S. S., Ağbulut, Afzal, A., Kaladgi, A. R., & Said, Z. (2023). Impact of injector nozzle diameter and hole number on performance and emission characteristics of CI engine powered by nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(5), <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04397-0>

- Kumbhar, V., Pandey, A. K., & Varghese, A. (2019). Effect of fuel injector nozzle hole diameter on emissions of CAT 3401 diesel engine using CONVERGETM CFD. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6), 927–932. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F8231.088619>
- Kang, S. S. L. D. H. C. B. (2019). Effects of Nozzle Orifice Diameter and Hole Number on Diesel Combustion and Engine Performance. 675, 0–8.
- Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017). Atomization and sprays. In *Atomization and* <https://doi.org/10.1201/9781315120911>
- Munson, B. R. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics. In Instrumentation, Measurements, and Experiments in Fluids.*
- Pastor, V., Arre, J., & Palomares, A. (2001). Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test. 40(17).
- Vijay Kumar, M., Veeresh babu, A., Ravi Kumar, P., & Manoj Kumar Dundi, T. (2020). Influence of different nozzle hole orifice diameter on performance, combustion and emissions in a diesel engine. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 18(2), 179–184. <https://doi.org/10.1080/14484846.2018.1453975>
- Zhao, H., & Liu, H. (2019). Breakup Morphology and Mechanisms of Liquid Atomization. *Environmental Impact of Aviation and Sustainable Solutions*, 1–19. <https://doi.org/DOI:10.5772/intechopen.84998>

