

url : <http://studentjournal.umpo.ac.id/index.php/komputek>

Simulator *Injector 90 cc Spark Ignition Engine* dengan Menggunakan Metode Pengaturan Waktu Pembukaan Injektor terhadap *Volume Injeksi Bahan Bakar*

Berto Yusuf Nugroho^{1*}, Gramandha Wega Intyanto²

¹Perawatan Kendaraan Ringan, Akademi Komunitas Negeri Pacitan, Indonesia, 63514

²Tata Laksana Studio Produksi, Akademi Komunitas Negeri Pacitan, Indonesia, 63514

*Email: berto@aknpacitan.ac.id

History Artikel

Diterima: 14 September 2020 Disetujui: 07 Oktober 2020 Dipublikasikan: 28 Oktober 2020

Abstract

Conventional gasoline motorbike vehicles are one of the parts that will have an impact on the effectiveness of combustion and the efficiency of fuel use. One of the factors that influence the work of the engine is the injector. One of the working parameters of the injector is that it must have a fuel spray that varies according to the amount of time each step has. The author has the idea to analyze and make a simulator to determine the performance of the injector by adjusting the opening time of the volume of fuel released by the actual conditions. The working simulator system uses the pulse width modulation method. The results obtained are the volumetric ratio of the injector from the test results of the simulator still have a mean of 9.44%, which means the value of the possibility is still high because it approaches the value of 10%.

Keywords:Injector;Simulator;Pulse Width Modulation; Fuel;Motorcycle.

Abstrak

Merupakan salah satu bagian yang akan memberikan dampak tingkat efektifitas pembakaran terjaga berikut efisiensi pemakaian bahan bakar. Injector bekerja berdasarkan parameter kebutuhan kerja mesin yang tepat. Jumlah volume bahan bakar menjadi acuan dalam menjaga performa dari injektor, simulator Injector akan menginformasikan jumlah volume bahan bakar yang dapat dianalisa, dengan mendapatkan nilai *Electronic Pulse Width* Injector actual simulator dapat dijalankan, *Electronic Pulse Width actual* objek penelitian sebesar 2 ms-3 ms, laju bahan bakar Injector objek penelitian sebesar 90 cc/min pada tekanan 2,9 Bar, dengan F error rata-rata 9,44% yang dihasilkan oleh simulator, F Error > 10% simulator tidak dapat diterima, F Error < 10% maka simulator dapat digunakan untuk menganalisa volumetric dari Injector sehingga pada penelitian ini, memberikan solusi ketika kondisi aktual perawatan periodik didapatkan dengan memodelkan kondisi parameter kerja Injector tersebut di dalam kesatuan sistem sehingga pengukuran volume bahan bakar dapat dengan mudah dilakukan.

Keywords: *Injector*, *Simulator*, *Pulse Width Module*, *Volumetric*

Nugroho, B Y. 2020. *Simulator Injector 90 cc Spark Ignition Engine dengan Menggunakan Metode Pengaturan Waktu Pembukaan Injektor terhadap Volume Injeksi Bahan Bakar*. KOMPUTEK : Jurnal Teknik Universitas Muhammadiyah Ponorogo, 4(2): 1-7

© 2020 Universitas Muhammadiyah Ponorogo. All rights reserved

ISSN 2614-0985 (Print)

ISSN 2614-0977 (Online)

1. Pendahuluan

Kendaraan konvensional berbahan bakar bensin merupakan kendaraan yang memiliki sistem kerja memasukkan dan mencampurkan bahan bakar serta udara dengan menggunakan karburator, kemudian memasukkan ke dalam ruang bakar berdasarkan perbedaan tekanan atmosfer dari kevakuman di dalam *intake manifold* [1][2]. Mengupayakan efisiensi yang baik pada kendaraan konvensional yaitu jumlah percampuran udara dan bahan bakar harus mendekati nilai rasio *stoichiometry A/F* untuk mesin *spark ignition* tetapi sulit bagi kendaraan konvensional mencapai nilai *stoichiometry* [3]. Perkembangan zaman, muncullah teknologi baru yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar pada kendaraan mesin pembakaran yang dinamakan dengan *Electronic Fuel Injection (EFI)*.[4]

Electronic Fuel Injection (EFI) memiliki keistimewaan bahwa bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar dengan sistem elektronik. *Electronic Fuel Injection (EFI)* memiliki actuator pemasukan bahan bakar yang dinamakan dengan injector. Injector bekerja berdasarkan sinyal tegangan dari unit kontrol dengan mendekati nilai homogen pada proses pemasukan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Nilai homogen yang dimaksudkan yaitu nilai kesesuaian bahan bakar yang dimasukkan dengan kebutuhan pada ruang bakar sehingga hal ini dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar pada kendaraan [5]. Parameter Injector dalam bekerja dijelaskan lebih lengkap pada Tabel 1 [6].

Tabel 2. Parameter Kerja Injector

No.	Parameter Kerja Injector
1.	Pengukuran bahan bakar yang akurat
2.	Jumlah massa bahan bakar yang diinginkan sesuai dengan kebutuhan
3.	Minimal pengabutan yang lebih terarah kepada ruang bakar hingga kebutuhan rata-rata
4.	Sudut pengabutan (<i>Axysmmetry</i>) selama rata-rata kerja pada injector
5.	Memiliki tetesan yang sedikit dan tidak ada kebocoran pada saluran injector terutama pada kondisi dingin
6.	Memiliki kantung yang sedikit (dalam volume bahan bakar)
7.	Memiliki aliran yang linier dan dinamis pada kondisi rendah dan tinggi dan memiliki rentang waktu pembukaan dan penutupan bahan bakar
8.	Memiliki karakteristik <i>Electronic Pulse Width</i>

Salah satu parameter kerja dari injector yaitu harus memiliki penyemprotan bahan bakar yang bervariasi sesuai dengan jumlah ketersediaan waktu yang dimiliki setiap langkah [7]. Kondisi ini dipengaruhi antara linearitas laju aliran dengan *electronic pulse width* pada *Engine Control Unit (ECU)*. Hal ini juga akan mempengaruhi jumlah bahan bakar yang masuk pada mesin bakar [8]. Ketika injector tidak bisa bekerja dengan maksimal maka yang terjadi pada kendaraan yaitu penurunan performa pada mesin dan juga mempengaruhi penurunan efisiensi bahan bakar yang mana akan menciptakan sumber emisi gas buang yang tinggi [9][10].

Dalam hal ini, peneliti memiliki ide untuk menganalisa dan melakukan pembuatan simulator untuk mengetahui kinerja dari injector dengan pengaturan waktu pembukaan terhadap volume bahan bakar yang dikeluarkan, dikarenakan pada kondisi injector pada kendaraan hanya waktu bukaan yang bisa kita lihat dari sinyal *electronic pulse width* (kondisi waktu menyala ($T_{y_{max}}$), tetapi tidak dengan kondisi waktu mati ($T_{y_{min}}$) bukaan tertutup) yang dikeluarkan oleh *Engine Control Unit (ECU)* dan untuk mengetahui kondisi volume bahan bakar yang didistribusikan dari injector masuk ke ruang bakar.

2. Metode

Pada proses rancang bangun sistem simulator keseluruhan ada 2 tahap metode yang dilakukan, yaitu pengambilan data aktual injector dan proses perancangan simulator.

2.1. Data Aktual Injector

Pada perancangan sistem, injector yang digunakan yaitu injector *Port Fuel Injection* sepeda motor dengan *flow rate* 90 cc /min, *multi hole* dengan jumlah *hole* 6. Data aktual merupakan pengambilan data dari standar injector dari kendaraan secara langsung, data aktual ini nantinya juga sebagai parameter uji validitas. Pada proses pengambilan data terjadi variasi data yang tidak konstan pada tiap kecepatan sehingga diambil rata-rata dari data tiap kecepatan tersebut. Tahap terakhir data yang diperoleh digunakan sebagai data acuan untuk merancang bangun simulator injector yang memiliki tingkat validitas yang presisi dengan tingkat error kurang dari 10 % dari parameter uji validitas.

Pengambilan data aktual injector memiliki tujuan untuk mengetahui waktu bukaan pada injector untuk memasukkan bahan bakar pada mesin. Data aktual injector diambil dengan menggunakan alat *Scanner Injector Universal MST 100-P* dalam kondisi kendaraan menyala. Data yang diambil pada *scanner* yaitu data waktu bukaan injector. Kejelasan sistem scanner mengambil data

bukaan injector yaitu ketika durasi waktu *Engine Control Unit* memberikan *Signal Pulse Width* dalam kondisi waktu menyala pada injector ($T_{y_{max}}$). Ilustrasi proses pengambilan data pada Gambar 1.



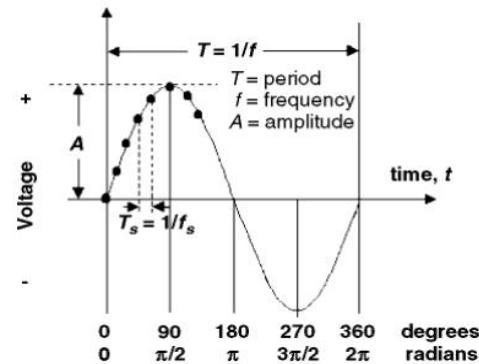
Gambar 2. Pengambilan Data Aktual Injector

Pengambilan data aktual injector sepeda motor dilakukan sesuai dengan metode pengujian pada kendaraan bermotor tipe baru pada mutu emisi gas buang dari kementerian lingkungan hidup no. 10 tahun 2012 [11]. Pada Tabel 1 merupakan data yang didapat dari waktu bukaan injector terhadap kecepatan pada kendaraan.

Tabel 1. Perbandingan Waktu Bukaan Injector dengan Kecepatan pada kendaraan

Kecepatan (rpm)	Injector On (ms)
1000	2,3
2000	2,4
3000	2,15
4000	2,08
5000	2,1
6000	2,34

Data actual injector kendaraan diambil pada RPM tertentu, yang pada dasarnya data waktu buka injector memiliki fluktuasi yang tinggi, namun pada penelitian ini diambil rerata waktu buka injector aktual pada setiap RPM untuk menunjukkan adakah perbedaan secara significant waktu kecepatan dengan lamanya injector membuka, walaupun kondisi perubahan kecepatan meningkat tetapi waktu pada bukaan injector tidak mengalami peningkatan atau tidak linier. Hal ini bisa terjadi dikarenakan kebutuhan bahan bakar di dalam ruang bakar relative kecil sehingga lamanya waktu buka injector juga relative singkat. Pada kondisi ini untuk mengetahui berapa lamanya injector memiliki waktu untuk membuka dan menutup yaitu dengan cara menentukan berapa kali signal dihasilkan satu siklus 360° atau 2π radian fase dalam satu periode seperti disajikan pada Gambar 2 [12][13].



Gambar 2. Periode dalam satu siklus [2]

Pada Gambar 2 menjadi dasar untuk mendapatkan berapa banyak (T) periode (s) dalam satu putaran penuh 360° , Pada mesin empat langkah dalam satu siklus pembakaran akan mengalami empat langkah piston, yaitu pertama langkah hisap, kedua langkah kompresi, ketiga langkah usaha dan keempat langkah buang, dalam satu siklus pembakaran tersebut terjadi dua kali putaran poros engkol [14] sehingga ada dua kali putaran 360° , untuk menentukan lamanya injector memiliki waktu ($T_{y_{max}}$) dan ($T_{y_{min}}$) disajikan pada persamaan 1 di bawah ini [2].

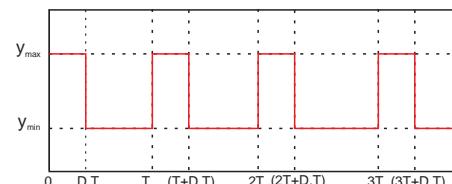
$$T = \frac{60}{0.5 \cdot n} \cdot 10^3 = \frac{12 \cdot 10^4}{n}, \quad (1)$$

2.2. Rancang Bangun Simulator

Pada tahap perancangan simulator, dilakukan pembagian menjadi 3 tahapan yaitu perancangan sistem matematis, perancangan elektronik dan perancangan desain mekanika. Berikut ini penjelasan dan proses perancangan pada tiap tahapan.

a. Sistem Matematis

Pada tahap sistem matematis untuk proses permodalan yang digunakan untuk simulator yaitu diambil dari data aktual yang dikembangkan dengan teori matematika berdasarkan kinerja teori dari sistem elektronika. Pada sistem perangkat mikrokontroler di elektronika ada yang dinamakan dengan *Pulse Width Module (PWM)*.



Gambar 3. Grafik Ilustrasi Pulse Width Module (PWM)[13]

Pulse Width Module (y) merupakan metode untuk mengurangi daya rata-rata yang dihasilkan oleh

sinyal listrik, dengan secara efektif memotong menjadi bagian-bagian yang terpisah [8][15][12]. Pada *Pulse Width Module* (y) terdapat komponen yang utama yaitu gelombang ($f(t)$) dimana terdapat *period* (T) yang berada pada 2 kondisi yaitu nilai rendah (y_{min}) dan nilai tinggi (y_{max}), yang terakhir yaitu *duty cycle* (D).

$$PWM = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \quad (2)$$

Periode (T) sendiri merupakan waktu yang tempuh pada gelombang pada kondisi nilai tinggi (y_{max}) dan nilai rendah (y_{min}). *Duty cycle* (D) merupakan persentase waktu kondisi nilai tinggi (y_{max}) terhadap periode (T) [2].

$$D = \frac{T_{y_{max}}}{T} \cdot 100\% \quad (3)$$

Pada kondisi data aktual pada injector, dimana data bukaan injector merupakan kondisi sinyal elektronik yang dikirim oleh ECU bisa disimpulkan bahwa bukaan injector sebagai sinyal yang didapat pada kondisi waktu menyala injector sehingga dari data aktual sudah mendapatkan periode kondisi waktu gelombang bernilai tinggi ($T_{y_{max}}$) sama dengan kondisi bukaan injector. Selanjutnya untuk mendapatkan kondisi nilai kondisi injector tertutup sama dengan waktu gelombang bernilai rendah ($T_{y_{min}}$). Cara untuk mendapatkan kondisi *injector tertutup* (ms) seperti disajikan pada Persamaan 4.

$$T_{y_{min}} = T \cdot 1000 - T_{y_{max}} \quad (4)$$

Tabel 2. Data periode terhadap Duty Cycle

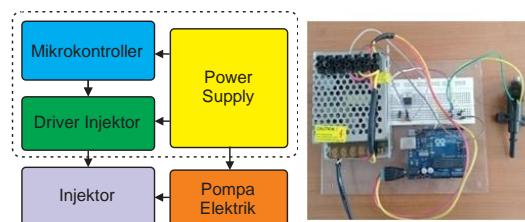
Rpm	Periode (s)	$T_{y_{max}}$ (ms)	$T_{y_{min}}$ (ms)	Duty Cycle (%)
1000	0,12	2,3	117	1,967
2000	0,06	2,4	57,6	4,0
3000	0,04	2,15	37,85	5,375
4000	0,03	2,08	27,92	6,933
5000	0,024	2,1	21,9	8,75
6000	0,02	2,34	17,66	11,7
7000	0,017	3	1,41	17,5

Pada tabel 2 ditunjukkan lamanya waktu injector menutup berdasarkan ketersediaan waktu

total (T) dan ($T_{y_{max}}$), dan ($T_{y_{min}}$) yang didapat dari persamaan 1, akan bergantung dengan jumlah dari *Duty cycle* (D) yang pada dasarnya pada kendaraan actual nilainya tergantung dari pembuat *Engine Control Unit* agar dapat mengatur kendaraan berdasarkan kebutuhan kendaraan yang efisien dan rendah emisi gas buang [6].

b. Komponen Elektronika

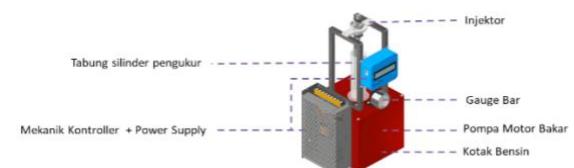
Perangkat Elektronika pada simulator menggunakan 5 komponen utama, yang pertama yaitu mikrokontroler dimana sebagai sistem utama dalam elektronika atau sebagai otak dalam perangkat elektronika. Kedua yaitu driver motor sebagai jembatan antara injector dan mikrokontroler. Ketiga yaitu power supply sebagai sumber tegangan yang di supply untuk seluruh perangkat elektronika. Keempat yaitu pompa elektrik dimana sebagai pengatur tekanan bahan bakar masuk ke dalam injector. Terakhir yaitu injector sebagai aktuator dan sebagai objek utama dalam penelitian.



Gambar 3. Rangkaian Elektronik Simulator

Penjabaran terkait perangkat elektronika pada perangkat mikrokontroler digunakan Arduino Uno, driver motor menggunakan mosfet dikombinasi dengan resistor dan diode penyearah sebagai relay tegangan dari input kemudian sebagai penyalur tegangan output 12 V dari *power supply* ke injector.

c. Desain Mekanika



Gambar 4. Desain Mekanika Simulator

Pada desain mekanis terdapat beberapa 6 komponen utama yaitu injector sebagai komponen output pada komponen mekanis sekaligus pada komponen sebagai komponen aktuator elektronik. Tabung silinder pengukur (volumetrik) sebagai pengukur bahan bakar yang keluar, tabung ini di ilustrasikan sebagai tempat bahan bakar masuk ke ruang bakar. Kotak Bensin dimana di dalam kotak bensin ini selain isinya sebagai penampung bahan

bakar bensin juga terdapat pompa motor bakar. Pompa motor bakar ini digunakan sebagai pendorong bahan bakar ke selang aliran pada injector yang kekuatan dorongan-nya diukur dengan *gauge bar* (percobaan kekuatan tekanan pada penelitian ini menggunakan 2.9 bar). Kotak kontroler sebagai tempat komponen elektronika utama seperti mikrokontroler dan *power supply*, kotak dimasukkan ke dalam kriteria komponen mekanika karena mempermudah peneliti dalam pengoperasian dan pengambilan data.

3. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan pengujian simulator tester dengan parameter yang telah didapatkan untuk simulator antara lain *Period* (T), ($T_{y_{max}}$), ($T_{y_{min}}$) dan *Duty cycle* (D) maka dihasilkan data yang ditampilkan pada tabel 3 berikut ini.

Tabel 3 Hasil Uji Simulator

Rpm	Time Periode (ms)		Volume Bahan Bakar (cc)		Percentase Volume Error (%)
	On	Off	Aktual	Simulator	
1000	2,3	117,7	0,0345	0,035	1,4%
2000	2,4	57,6	0,036	0,0316	12,22%
3000	2,15	37,85	0,03225	0,0308	4,49%
4000	2,08	27,92	0,0312	0,0292	6,41%
5000	2,1	21,9	0,0315	0,03	4,76%
6000	2,34	17,66	0,0351	0,03	14,52%
7000	3	141,429	0,045	0,035	22,22%

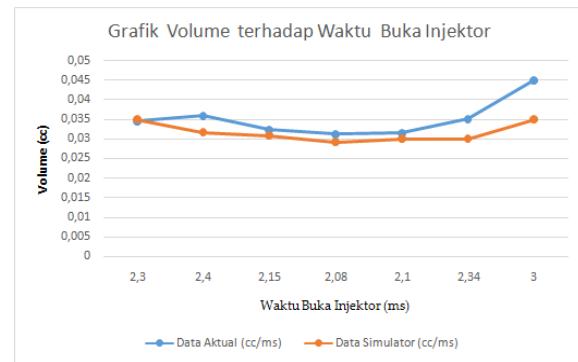
Hasil percobaan terhadap alat simulator injector didapatkan perbandingan hasil uji waktu injector actual pada kendaraan langsung dengan

jumlah volume bahan bakar hasil uji, pada percobaan didapatkan laju aliran bahan bakar rata rata yang diinjeksikan sebesar 0,0316 cc/ms, sedangkan data real pada injector yang didapat dari pengujian kendaraan standart rata rata sebesar 0,035 cc/min, jumlah error rata rata sebesar 9,44 %.

Terdapat 3 hasil pengujian dengan jumlah nilai selisih bahan bakar simulasi dengan actual yang lebih dari 10 %, hal tersebut dikarenakan pada saat pengambilan waktu injector actual ($T_{y_{max}}$) menggunakan rerata, karena untuk mendapatkan ketepatan data uji ($T_{y_{max}}$) menggunakan *Scanner Injector Universal MST 100-P* memiliki fluktuasi nilai yang tinggi sehingga data diambil rerata ketika RPM tepat pada nilai yang telah ditentukan.

Pada kondisi actual nilai dari ($T_{y_{min}}$) dan *Duty cycle* (D) dan *Period*(T) tidak dapat dilakukan

dengan *Scanner Injector Universal MST 100-P*, namun pada penelitian ini digunakan perhitungan secara matematis sehingga didapatkan perbandingan antara waktu buka injector dan volume diilustrasikan pada Gambar 5



Gambar 5. Grafik Pengaruh Waktu Bukaan Injector terhadap Volume

Dengan nilai volume bahan bakar yang masuk memiliki error rata-rata sebesar 9,44% yang diambil dari perbandingan jumlah volume pengujian actual dengan jumlah volume pengujian simulator, dengan error rata-rata sebesar 9,44 % maka simulator dapat digunakan karena pada awal penelitian diberi batasan kepercayaan sebesar 10 %, jika nilai volume bahan bakar yang dikeluarkan oleh simulator berada di atas nilai 10% maka simulator belum bisa memberikan ketepatan nilai uji volume bahan bakar.

3.1. Analisa

Dalam penerapan simulator injector diperlukan data aktual dari kendaraan uji, namun pada penelitian ini data aktual uji hanya diambil lamanya injector membuka pada saat putaran mesin tertentu, sedangkan data parameter lain injector termasuk beban mesin, panas mesin, kevakuman saluran masuk tidak dilakukan pengujian, sehingga jumlah parameter injector belum terpenuhi secara lengkap, namun untuk melakukan pengujian jumlah volumetric bahan bakar dapat disimulasikan seperti disajikan pada tabel 4 dan gambar 5.

Pada kondisi ini, untuk dapat menentukan jumlah bahan bakar yang akan dimasukkan ke dalam ruang bakar pada mesin pembakaran, pada sistem injector diperlukan nilai *duty cycle* namun untuk menentukan lamanya jumlah waktu yang digunakan untuk injector ($T_{y_{max}}$) dan ($T_{y_{min}}$) dibutuhkan nilai total *period*, volume bahan bakar yang masuk akan sebanding dengan lamanya ($T_{y_{max}}$) di impuls oleh *electronic control unit*, sehingga untuk mendapatkan efisiensi yang baik ataupun untuk mendapatkan performa yang baik maka nilai ($T_{y_{max}}$), dan ($T_{y_{min}}$) dapat dilakukan analisa kembali.

4. Kesimpulan

Simulator injector dapat digunakan untuk menghasilkan data sebagai berikut:

1. Lamanya waktu membuka dapat disesuaikan dengan kondisi mesin uji actual.
2. Lamanya waktu menutup didapatkan dari perhitungan matematis perbandingan antara (T) dengan (D) dan dimasukkan ke dalam program mikrokontroler.
3. Ratio Volumetric Injector dari hasil uji simulator masih memiliki rerata error 9,44% yang artinya nilai kemungkinan error masih tinggi karena mendekati nilai 10%, namun simulator masih bisa digunakan untuk menguji rasio jumlah volume bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar dalam satuan waktu tertentu.

Ucapan Terimakasih

Artikel ini merupakan kolaborasi penelitian antara program studi Perawatan kendaraan ringan dan tata laksana studio produksi, Akademi Komunitas Negeri Pacitan. Ucapan terimakasih disampaikan kepada seluruh pranata laboratorium perawatan kendaraan ringan, dan mahasiswa dalam melakukan penelitian.

Referensi

- [1] J. E. Smith, "Manifold drain valve." Google Patents, 1963.
- [2] M. Gailis and V. Pirs, "Experimental Study in Gasoline Engine Injector Performance," *Publ. Ed.*, pp. 364–368, 2013.
- [3] C. Schwarz, "Calculation of the Real Working Process," in *Combustion Engines Development*, Springer, 2012, pp. 227–308.
- [4] N. Shahangian *et al.*, "Transient nozzle flow simulations of gasoline direct fuel injectors," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 175, no. April, p. 115356, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115356.
- [5] H. Zhao, *HCCI and CAI engines for the automotive industry*. Elsevier, 2007.
- [6] F. Zhao, M.-C. Lai, and D. L. Harrington, "Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines," *Prog. energy Combust. Sci.*, vol. 25, no. 5, pp. 437–562, 1999.
- [7] N. Mitroglou, J. M. Nouri, Y. Yan, M. Gavaises, and C. Arcoumanis, "Spray structure generated by multi-hole injectors for gasoline direct-injection engines," 2007.
- [8] M. H. R. Alias, M. F. A. Rahim, M. H. M. I. Rodzi, and R. A. Bakar, "Effect of Injection Pressure, Injection Duration, and Injection Frequency on Direct Injector's Mass Flow Rate for Compressed Natural Gas Fuel," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 225, p. 2008.
- [9] E. Movahednejad, F. Ommi, M. Hosseinalipour, and O. Samimi, "Experimental and Theoretical Study of Injection Timing on Performance and Exhaust Emissions in a Port-Injected Gasoline Engine," in *ASME 2006 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference*, 2006, pp. 137–145.
- [10] T. R. Butts, J. D. Luck, B. K. Fritz, W. C. Hoffmann, and G. R. Kruger, "Evaluation of spray pattern uniformity using three unique analyses as impacted by nozzle, pressure, and pulse-width modulation duty cycle," *Pest Manag. Sci.*, vol. 75, no. 7, pp. 1875–1886, 2019.
- [11] M. N. L. H. R. INDONESIA, "PERATURAN MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP REPUBLIK INDONESIA NOMOR 12 TAHUN 2012 TENTANG PEDOMAN PENGHITUNGAN BEBAN EMISI KEGIATAN INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI," 2012.
- [12] R. Raja, T. Sebastian, and M. Wang, "Online stator inductance estimation for permanent magnet motors using PWM excitation," *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 5, no. 1, pp. 107–117, 2019.
- [13] T. A. Leyrer, M. Staebler, and W. C. Wallace, "Managing pulse-width modulation trip signals from multiple sources." Google Patents, 2019.
- [14] J. B. Heywood, "1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York."
- [15] Q. Liu *et al.*, "Comparative study on thermodynamics, combustion and emissions of turbocharged gasoline direct injection (GDI) engine under NEDC and steady-state conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 169, no. May, pp. 111–123, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.047.