

## **OPTIMASI KINERJA MESIN KENDARAAN BERBAHAN BAKAR GAS LPG DENGAN VARIASI TEKANAN KELUAR GAS DAN WAKTU PENGAPIAN**

Darwin Rio Budi Syaka<sup>1\*)</sup>, Adi Tri Tyassmadi<sup>1</sup>, Agung Fadhillah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta Timur, 13220, Indonesia

\*) E-mail: [drbsyaka@unj.ac.id](mailto:drbsyaka@unj.ac.id)

**Abstrak:** Pemanfaatan bahan bakar gas (BBG) pada kendaraan bermotor merupakan strategi penting dalam mendukung transisi menuju energi alternatif yang lebih bersih dan berkelanjutan. Namun, optimalisasi performa mesin berbahan bakar gas masih menghadapi tantangan teknis, khususnya dalam pengaturan tekanan bahan bakar dan waktu pengapian pada mesin yang awalnya dirancang untuk bensin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan bahan bakar gas (2, 3, dan 4 bar) serta waktu pengapian (15° BTDC, 17,5° BTDC, dan 20° BTDC) terhadap performa dan emisi gas buang sepeda motor Honda Beat ESP tahun 2019. Metode yang digunakan adalah true experimental research dengan desain faktorial penuh dua faktor untuk mengevaluasi efek utama dan interaksi antara tekanan bahan bakar dan waktu pengapian. Pengukuran torsi dan daya dilakukan menggunakan dynamometer (dynotest), sedangkan emisi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) dianalisis menggunakan gas analyzer pada kondisi operasi terkendali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan bahan bakar dan kemajuan waktu pengapian secara signifikan meningkatkan torsi dan daya mesin. Konfigurasi 4 bar dengan waktu pengapian 20° BTDC menghasilkan performa tertinggi, sedangkan emisi CO dan HC terendah diperoleh pada tekanan 2 bar dengan waktu pengapian 20° BTDC. Temuan ini mengindikasikan adanya trade-off antara optimasi performa dan pengendalian emisi akibat perubahan karakteristik pembakaran. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi teknis dalam pengembangan strategi optimasi sistem pembakaran mesin berbahan bakar LPG untuk meningkatkan efisiensi energi sekaligus menekan emisi gas buang.

**Kata kunci:** daya, emisi gas buang, tekanan bahan bakar gas, torsi, waktu pengapian.

### ***Optimization of LPG-Fueled Vehicle Engine Performance Through Variations in Gas Outlet Pressure and Ignition Timing***

**Abstract:** The utilization of gas fuel (BBG) in motor vehicles represents an important strategy in supporting the transition toward cleaner and more sustainable alternative energy. However, optimizing the performance of gas-fueled engines still faces technical challenges, particularly in regulating fuel pressure and ignition timing in engines originally designed for gasoline. This study aims to analyze the effect of variations in gas fuel pressure (2, 3, and 4 bar) and ignition timing (15° BTDC, 17.5° BTDC, and 20° BTDC) on the performance and exhaust emissions of a 2019 Honda Beat ESP motorcycle. The method employed was true experimental research using a full factorial two-factor design to evaluate the main effects and interaction between fuel pressure and ignition timing. Torque and power were measured using a dynamometer

*(dynotest), while carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions were analyzed using a gas analyzer under controlled operating conditions. The results indicate that increasing fuel pressure and advancing ignition timing significantly improve engine torque and power. The 4 bar pressure configuration with 20° BTDC ignition timing produced the highest performance, while the lowest CO and HC emissions were obtained at 2 bar pressure with 20° BTDC ignition timing. These findings demonstrate a trade-off between performance optimization and emission control due to changes in combustion characteristics. Overall, this study provides a technical contribution to the development of combustion optimization strategies for LPG-fueled engines to improve energy efficiency while reducing exhaust emissions.*

*Keywords: exhaust emissions, fuel gas pressure, ignition timing, power, torque.*

## PENDAHULUAN

Sepeda motor merupakan moda transportasi yang paling banyak digunakan di negara berkembang, termasuk Indonesia, karena kemudahan akses dan biaya operasional yang relatif rendah. Kendaraan ini umumnya menggunakan mesin pembakaran dalam berbahan bakar bensin untuk mengkonversi energi kimia menjadi energi mekanik. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, jumlah sepeda motor di Indonesia mencapai lebih dari 125 juta unit pada tahun 2022, yang menunjukkan tingginya ketergantungan masyarakat terhadap kendaraan berbahan bakar minyak (BPS, 2022). Kondisi ini berimplikasi langsung pada peningkatan konsumsi energi fosil dan emisi gas rumah kaca dari sektor transportasi. Sektor transportasi tercatat sebagai salah satu kontributor utama emisi gas rumah kaca di Indonesia, dengan kontribusi mencapai 24,64% dari total emisi nasional pada tahun 2019 dan laju peningkatan rata-rata sebesar 7,17% per tahun (Kementerian ESDM, 2019). Emisi tersebut berperan signifikan dalam percepatan pemanasan global, perubahan iklim, serta penurunan kualitas lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan dan penerapan bahan bakar alternatif yang lebih bersih menjadi kebutuhan mendesak, baik dari sisi teknis maupun edukatif dalam konteks pendidikan teknik mesin.

Salah satu alternatif yang berpotensi menggantikan bahan bakar bensin adalah bahan bakar gas, khususnya liquefied petroleum gas (LPG). LPG memiliki keunggulan berupa angka oktan yang lebih tinggi, emisi gas buang yang lebih rendah, serta ketersediaan sumber daya yang relatif melimpah dibandingkan bahan bakar cair konvensional (King et al., 2024). Pemanfaatan LPG pada kendaraan bermotor terbukti mampu menurunkan emisi karbon monoksida dan hidrokarbon, sekaligus meningkatkan efisiensi pembakaran. Namun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan LPG pada mesin yang dirancang untuk bensin cenderung menghasilkan torsi dan daya yang lebih rendah apabila tidak disertai penyesuaian parameter operasi mesin (Aminudin et al., 2020; Wiryawan et al., 2017). Secara teknis, performa mesin berbahan bakar gas sangat dipengaruhi oleh tekanan bahan bakar dan waktu pengapian. Tekanan bahan bakar gas yang tidak stabil, khususnya penurunan tekanan selama operasi, dapat menyebabkan suplai bahan bakar yang tidak optimal sehingga berdampak pada penurunan performa mesin. Nitnaware et al. (2019) melaporkan bahwa peningkatan tekanan injeksi bahan bakar gas berpengaruh signifikan terhadap peningkatan torsi dan efisiensi mesin. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Duy et al. (2021), yang menunjukkan bahwa perubahan tekanan bahan bakar gas dapat meningkatkan daya mesin sepeda motor berbasis sistem injeksi.

Selain tekanan bahan bakar, pengaturan waktu pengapian merupakan variabel kunci dalam mengoptimalkan pembakaran pada mesin berbahan bakar gas. LPG memiliki karakteristik kecepatan rambat api yang lebih lambat dibandingkan bensin, sehingga memerlukan pengapian yang lebih maju untuk mencapai tekanan puncak pembakaran pada sudut engkol yang optimal. Penelitian Tuan dan Dong (2022) menunjukkan bahwa pemajuan waktu pengapian pada mesin

berbahan bakar LPG mampu meningkatkan performa sekaligus menurunkan emisi gas buang. Studi lain oleh Khadri et al. (2024) dan Dimas et al. (2023) juga menegaskan bahwa penyesuaian waktu pengapian melalui remapping ECU dapat meningkatkan torsi dan daya mesin secara signifikan.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh tekanan bahan bakar atau waktu pengapian secara terpisah, kajian yang mengintegrasikan kedua variabel tersebut pada sepeda motor berbahan bakar gas, khususnya dalam konteks mesin konvensional tanpa modifikasi struktural, masih terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian lebih menitikberatkan pada aspek performa mesin semata, sementara kajian yang mengaitkan performa dengan karakteristik emisi gas buang secara simultan masih relatif jarang. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya penelitian eksperimental yang mengkaji interaksi antara tekanan bahan bakar gas dan waktu pengapian terhadap torsi, daya, serta emisi gas buang secara komprehensif.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan bahan bakar gas dan waktu pengapian terhadap kinerja mesin sepeda motor berbahan bakar LPG ditinjau dari torsi dan daya, serta karakteristik emisi gas buang. Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi teknis dalam pengembangan sistem bahan bakar gas yang lebih optimal, tetapi juga menjadi sumber pembelajaran kontekstual dalam pendidikan teknik mesin, khususnya pada mata kuliah motor bakar dan energi alternatif.

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode true experimental research yang dirancang dalam bentuk desain eksperimen faktorial penuh dua faktor (full factorial two-factor design  $3 \times 3$ ). Desain faktorial ini digunakan untuk menganalisis secara simultan pengaruh utama (main effect) masing-masing variabel bebas serta pengaruh interaksi (interaction effect) antara tekanan bahan bakar LPG dan waktu pengapian terhadap performa mesin dan emisi gas buang.

Tabel 1. Desain Faktorial

Tekanan (bar)	Waktu Pengapian (BTDC)		
	15° (B1)	17,5° (B2)	20° (B3)
2 bar (A1)	T1 (A1B1)	T2 (A1B2)	T3 (A1B3)
3 bar (A2)	T4 (A2B1)	T5 (A2B2)	T6 (A2B3)
4 bar (A3)	T7 (A3B1)	T8 (A3B2)	T9 (A3B3)

Faktor pertama adalah tekanan bahan bakar LPG yang terdiri atas tiga level, yaitu 2 bar, 3 bar, dan 4 bar. Faktor kedua adalah waktu pengapian yang terdiri atas tiga level, yaitu 15°, 17,5°, dan 20° sebelum Titik Mati Atas (BTDC). Kombinasi kedua faktor tersebut menghasilkan sembilan kombinasi perlakuan ( $3 \times 3 = 9$  treatment combinations) yang seluruhnya diuji pada unit mesin yang sama dalam kondisi terkendali.

Penelitian dilaksanakan selama periode Desember 2024 hingga Juni 2025. Pengujian performa mesin yang meliputi torsi dan daya dilakukan di Bengkel Lima Pandawa CNC, Jakarta Selatan, sedangkan pengujian emisi gas buang dilaksanakan di Bengkel Teknik Kendaraan Ringan SMKN 4 Jakarta. Objek penelitian berupa sepeda motor Honda Beat ESP tahun 2019 dengan spesifikasi mesin empat langkah SOHC, kapasitas 108,2 cc, sistem bahan bakar PGM-FI, dan rasio kompresi 9,5:1 dalam kondisi standar tanpa modifikasi mekanis internal.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah tekanan bahan bakar LPG (2, 3, dan 4 bar) dan waktu pengapian (15°, 17,5°, dan 20° BTDC). Variabel terikat yang diamati meliputi torsi (Nm), daya (HP), serta emisi gas buang berupa karbon monoksida (CO, %) dan hidrokarbon (HC, ppm). Untuk menjaga validitas internal eksperimen, beberapa variabel dikendalikan, antara lain kondisi mesin tetap standar, penggunaan jenis bahan bakar LPG yang sama, suhu

lingkungan kerja yang relatif konstan, prosedur pengujian yang seragam, serta penggunaan alat ukur yang sama pada seluruh kombinasi perlakuan.

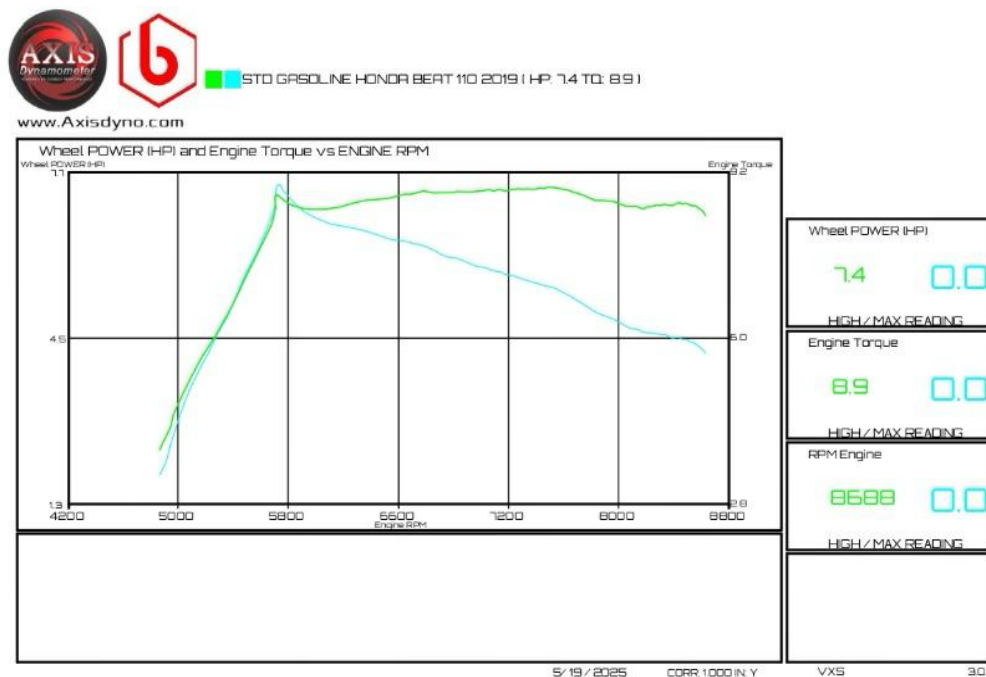
Pengukuran torsi dan daya mesin dilakukan menggunakan dynamometer Dyno Axis Moto VX-5, sedangkan pengukuran emisi gas buang CO dan HC dilakukan menggunakan Gas Analyzer HG-520 pada kondisi idle. Prosedur pengujian emisi mengacu pada standar SNI 09-7118.3-2005. Setiap kombinasi perlakuan diuji secara berulang untuk meningkatkan reliabilitas dan konsistensi data.

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan analisis deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai rata-rata setiap kombinasi perlakuan untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan performa dan emisi akibat variasi tekanan bahan bakar dan waktu pengapian. Penyajian data dilakukan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menggambarkan pola pengaruh masing-masing faktor serta kombinasi keduanya secara sistematis dan objektif.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini merupakan eksperimen faktorial yang mengkaji pengaruh variasi tekanan bahan bakar LPG (2 bar, 3 bar, dan 4 bar) dan waktu pengapian ( $15^\circ$ ,  $17,5^\circ$ , dan  $20^\circ$  BTDC) terhadap torsi, daya, serta emisi gas buang CO dan HC pada sepeda motor Honda Beat ESP tahun 2019. Desain ini memungkinkan analisis hubungan sebab akibat antar variabel proses pembakaran secara sistematis dan terkontrol, sebagaimana direkomendasikan dalam penelitian performa mesin pembakaran dalam modern (Liu et al., 2018; Singh & Sharma, 2021). Sebanyak sembilan kombinasi perlakuan diuji dengan tiga kali pengulangan, menghasilkan total 27 set data. Pendekatan ini meningkatkan reliabilitas temuan serta memungkinkan identifikasi kecenderungan performa dan emisi secara konsisten (Zareei et al., 2020).

### 1. Performa Dasar Mesin Menggunakan Bahan Bakar *Pertalite*



Gambar 1. Hasil *Dynotest* Mesin Honda Beat ESP Tahun 2019 dengan Bahan Bakar *Pertalite*

Tabel 2. Hasil Dynotest Bahan Bakar *Pertalite*

RPM	Torsi (Nm)	Daya (HP)	RPM	Torsi (Nm)	Daya (HP)
4900	3,40	2,4	7000	7,50	7,4
5000	3,50	2,5	7200	7,39	7,4
5200	5,20	3,8	7400	7,26	7,5
5400	6,30	4,9	7500	7,15	7,5
5600	7,50	6,0	7600	6,90	7,5
5800	8,99	7,3	7800	6,78	7,4
6000	8,36	7,1	8000	6,39	7,3
6200	8,25	7,2	8200	6,15	7,1
6400	8,00	7,3	8400	6,08	7,1
6600	7,85	7,4	8600	5,76	7,0
6800	7,74	7,4	8688	5,21	6,5

Hasil dynotest pada kondisi standar menggunakan bahan bakar pertalite disajikan pada Gambar 1 dan Tabel 2. Mesin menghasilkan torsi puncak sebesar 8,99 Nm dan daya maksimum 7,5 HP, yang menjadi acuan pembandingan untuk seluruh konfigurasi berbahan bakar LPG. Nilai ini mencerminkan karakteristik performa mesin standar PGM-FI berkapasitas kecil yang dioptimalkan untuk efisiensi dan emisi rendah (Yusri et al., 2019).

## 2. Pengaruh Tekanan Bahan Bakar dan Waktu Pengapian terhadap Torsi

Distribusi nilai torsi untuk seluruh kombinasi perlakuan ditunjukkan pada Tabel 3 secara umum, peningkatan tekanan bahan bakar dan pemajuan waktu pengapian menghasilkan peningkatan torsi rata-rata. Fenomena ini mengindikasikan bahwa suplai bahan bakar yang lebih stabil dan proses pembakaran yang terjadi lebih dekat dengan titik tekanan maksimum efektif mampu meningkatkan kerja mekanik piston (Payri et al., 2017).

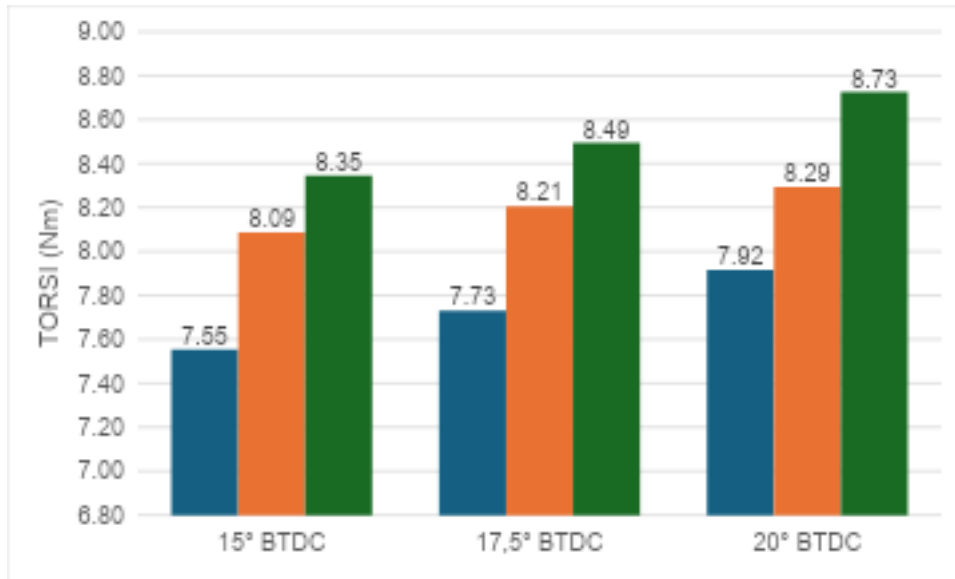
Tabel 3. Torsi Rata-Rata Mesin Berdasarkan Variasi Tekanan Bahan Bakar dan Waktu Pengapian

Tekanan (bar)	15° BTDC (Nm)	17,5° BTDC (Nm)	20° BTDC (Nm)
2 bar	7.55	7.73	7.92
3 bar	8.09	8.21	8.29
4 bar	8.35	8.49	8.73

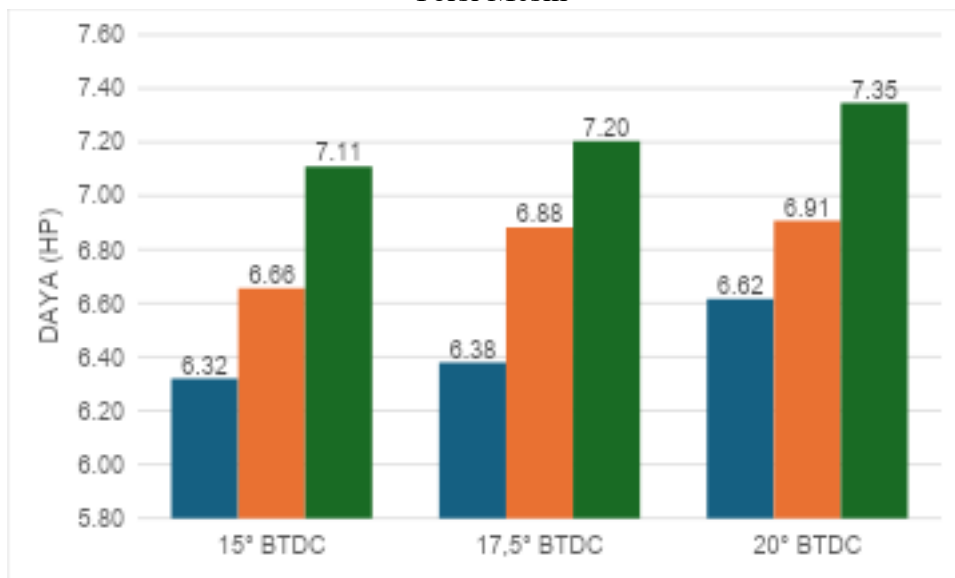
Pola ini konsisten dengan temuan bahwa pengapian yang lebih maju hingga batas tertentu meningkatkan tekanan pembakaran efektif, selama tidak memicu knocking atau pembakaran tidak sempurna (Ghazikhani et al., 2018). Dalam konteks ini, konfigurasi 4 bar–20° BTDC menghasilkan torsi tertinggi (8,73 Nm), mendekati performa bahan bakar pertalite.

## 3. Pengaruh Tekanan Bahan Bakar dan Waktu Pengapian terhadap Daya

Pengujian torsi dan daya ini dilakukan untuk mengetahui nilai setiap perubahan waktu pengapian dan tekanan bahan bakar gas dari 9 variasi pengujian.



Gambar 2. Grafik Rata-Rata Pengaruh Tekanan Bahan Bakar dan Waktu Pengapian terhadap Torsi Mesin



Gambar 3. Grafik Rata-Rata Pengaruh Tekanan Bahan Bakar dan Waktu Pengapian terhadap Daya Mesin

Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, peningkatan waktu pengapian secara konsisten diikuti oleh kenaikan torsi dan daya mesin pada seluruh variasi tekanan bahan bakar. Pada tekanan 4 bar, konfigurasi waktu pengapian 20° BTDC menghasilkan daya dan torsi tertinggi, masing-masing sebesar 7,35 HP dan 8,73 Nm, lebih tinggi dibandingkan konfigurasi 15° BTDC yang hanya menghasilkan 7,11 HP dan 8,35 Nm. Temuan ini menunjukkan bahwa waktu pengapian yang lebih maju menghasilkan tekanan pembakaran yang lebih optimal sehingga meningkatkan konversi energi menjadi daya mekanik. Sebaliknya, waktu pengapian 15° BTDC tergolong terlalu mundur, yang menyebabkan tekanan puncak pembakaran lebih rendah dan berdampak pada penurunan torsi serta daya. Hasil ini sejalan dengan prinsip keseimbangan energi pembakaran, di mana hanya sekitar 25–28% energi bahan bakar yang dapat dikonversi

menjadi daya efektif. oleh karena itu, pengaturan waktu pengapian yang tepat menjadi faktor kunci dalam memaksimalkan performa mesin.

Tabel 4. RPM pada Konfigurasi 4 bar 20° BTDC

RPM	Torsi (Nm)	Daya (HP)	RPM	Torsi (Nm)	Daya (HP)
4900	3.29	2.37	7000	7.41	7.30
5000	3.39	2.47	7200	7.30	7.32
5200	5.04	3.74	7400	7.17	7.36
5400	6.10	4.80	7500	7.06	7.37
5600	7.27	5.93	<b>7665</b>	6.82	<b>7.38</b>
<b>5815</b>	<b>8.88</b>	7.20	7800	6.70	7.29
6000	8.26	7.00	8000	6.31	7.20
6200	8.15	7.07	8200	6.08	7.00
6400	7.90	7.22	8400	6.01	7.05
6600	7.76	7.30	8600	5.69	6.92
6750	7.72	7.33	8800	5.30	6.66
6800	7.65	7.28	8812	5.15	6.42

Pada Tabel 4, pada konfigurasi tekanan bahan bakar 4 bar dan waktu pengapian 20° BTDC, mesin menghasilkan torsi 8,88 Nm dan daya 7,48 HP, sedikit lebih rendah dibandingkan penggunaan bahan bakar pertalite yang mencapai 8,99 Nm dan 7,50 HP. Meskipun LPG memiliki nilai kalor lebih tinggi (49,68 MJ/kg) dibandingkan pertalite (44 MJ/kg), keunggulan energi tersebut tidak sepenuhnya terkonversi menjadi daya mekanik. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan waktu pengapian belum berada pada kondisi optimum. Secara teoritis, pengapian yang kurang maju menurunkan tekanan puncak pembakaran sehingga membatasi peningkatan torsi dan daya. Dengan demikian, rendahnya performa LPG dalam penelitian ini lebih disebabkan oleh ketidaktepatan parameter pengapian daripada karakteristik bahan bakarnya.

Tabel 5. Daya Rata-Rata Mesin Berdasarkan Variasi Tekanan Bahan Bakar dan Waktu Pengapian

Tekanan (bar)	15° BTDC (HP)	17,5° BTDC (HP)	20° BTDC (HP)
2 bar	6.32	6.38	6.62
3 bar	6.66	6.84	6.91
4 bar	7.11	7.20	7.35

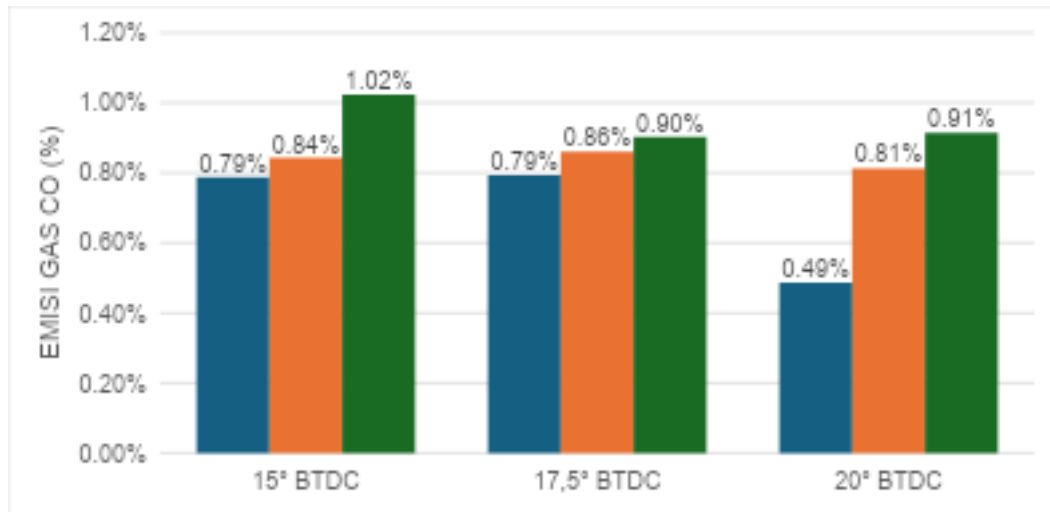
Nilai daya mesin pada berbagai konfigurasi ditampilkan pada Tabel 5. Daya menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya tekanan bahan bakar dan pemajuan sudut pengapian. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi sudut pengapian berperan penting dalam memaksimalkan laju pelepasan energi pembakaran (Heywood & Sher, 2018; Li et al., 2020). Meskipun LPG memiliki nilai kalor lebih tinggi dibandingkan bensin, daya maksimum yang dihasilkan masih sedikit lebih rendah dibandingkan pertalite. Temuan ini sejalan dengan laporan bahwa konversi energi LPG sangat sensitif terhadap strategi pengapian dan kestabilan tekanan suplai bahan bakar (Kalam et al., 2017).

#### 4. Emisi Gas Buang CO dan HC

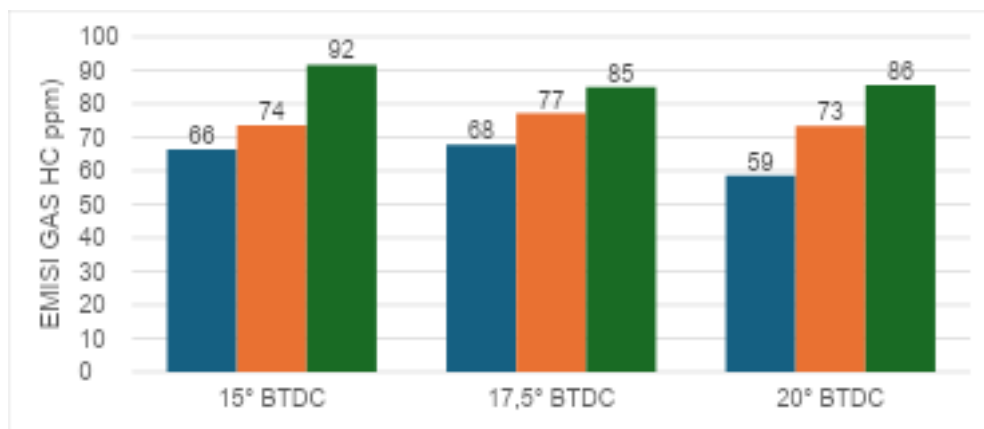
Pengujian emisi gas buang CO dan HC ini dilakukan untuk mengetahui nilai setiap perubahan waktu pengapian dan tekanan bahan bakar gas dari 9 variasi pengujian.

Tabel 6. Emisi Gas Buang CO (%) dan HC (ppm) Berdasarkan Variasi Tekanan dan Waktu Pengapian

Tekanan (bar)	Parameter	15° BTDC	17,5° BTDC	20° BTDC
2 bar	CO (%)	0.79	0.79	0.49
	HC (ppm)	66	68	59
3 bar	CO (%)	0.84	0.86	0.81
	HC (ppm)	74	77	73
4 bar	CO (%)	1.02	0.90	0.91
	HC (ppm)	92	85	86



Gambar 4. Grafik Rata-Rata Emisi CO terhadap Variasi Tekanan dan Waktu Pengapian



Gambar 5. Grafik Rata-Rata Emisi HC terhadap Variasi Tekanan dan Waktu Pengapian

Hasil pengukuran emisi CO dan HC disajikan pada Tabel 6 dan divisualisasikan pada Gambar 4 dan Gambar 5 Konfigurasi tekanan 2 bar dengan waktu pengapian 20° BTDC menghasilkan emisi terendah, menunjukkan pembakaran yang lebih homogen dan mendekati stoikiometri. LPG yang mudah menguap memungkinkan pencampuran udara–bahan bakar yang lebih baik dibandingkan bensin, sehingga menurunkan pembentukan CO dan HC (Al-Hasan, 2017; Wang et al., 2022). Namun, peningkatan tekanan hingga 4 bar cenderung meningkatkan emisi, yang mengindikasikan potensi pembakaran kaya lokal akibat suplai bahan bakar berlebih.

Temuan ini menegaskan adanya trade-off antara performa dan emisi, sebagaimana dilaporkan dalam studi optimasi mesin berbahan bakar gas (Rahman et al., 2019).

## 5. Integrasi Hasil dan Konfigurasi yang Direkomendasikan

Berdasarkan sintesis hasil performa dan emisi, konfigurasi tekanan 4 bar dengan waktu pengapian 20° BTDC memberikan keseimbangan terbaik antara torsi, daya, dan batas emisi yang masih berada di bawah ambang regulasi. Pendekatan optimasi berbasis kompromi ini umum digunakan dalam pengembangan sistem pembakaran alternatif (Zhou et al., 2021). Dari perspektif pendidikan teknik mesin, hasil data eksperimen menunjukkan hubungan non-linier antara variabel proses, performa, dan emisi dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembelajaran berbasis riset dan problem-based learning. Mahasiswa tidak hanya mempelajari teori pembakaran, tetapi juga dilatih mengevaluasi data dan mengambil keputusan rekayasa berbasis bukti empiris, sejalan dengan kerangka pembelajaran di EJEE (Gómez-Puente et al., 2019; Male et al., 2020).

Berdasarkan hasil pengujian, variasi tekanan bahan bakar LPG dan waktu pengapian menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik performa dan emisi gas buang mesin Honda Beat ESP tahun 2019. Pola perubahan yang terjadi pada torsi, daya, serta emisi CO dan HC mengindikasikan bahwa kedua faktor tersebut tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling berinteraksi melalui mekanisme pembakaran di dalam ruang bakar.

Peningkatan tekanan bahan bakar dari 2 bar menjadi 4 bar secara umum diikuti oleh peningkatan nilai torsi dan daya mesin. Secara teoritis, peningkatan tekanan bahan bakar meningkatkan debit massa LPG yang masuk melalui injektor. Dengan suplai massa bahan bakar yang lebih memadai, campuran udara-bahan bakar cenderung mendekati kondisi stoikiometri LPG, sehingga proses pembakaran berlangsung lebih stabil dan menghasilkan tekanan pembakaran yang lebih tinggi. Tekanan pembakaran yang meningkat akan memperbesar gaya dorong pada torak selama langkah usaha, yang pada akhirnya meningkatkan torsi pada poros engkol. Karena daya merupakan fungsi dari torsi dan putaran mesin, peningkatan torsi tersebut berimplikasi langsung pada peningkatan daya.

Di sisi lain, variasi waktu pengapian juga memberikan pengaruh signifikan terhadap performa mesin. Kemajuan waktu pengapian dari 15° menuju 20° BTDC menunjukkan kecenderungan peningkatan torsi dan daya. Secara fenomenologis, LPG memiliki angka oktan yang lebih tinggi dibandingkan bensin, sehingga lebih tahan terhadap knocking dan memungkinkan pengapian dimajukan tanpa risiko detonasi dini. Pemajuan waktu pengapian memberikan waktu yang cukup bagi proses pembakaran untuk mencapai tekanan puncak mendekati sudut engkol optimal setelah Titik Mati Atas (TDC). Apabila tekanan puncak terjadi pada posisi sudut engkol yang tepat, energi hasil pembakaran dapat dikonversi secara maksimal menjadi kerja mekanis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi tekanan 4 bar dan waktu pengapian 20° BTDC menghasilkan performa tertinggi, yang mengindikasikan bahwa pada konfigurasi tersebut tekanan puncak pembakaran berada pada kondisi yang paling menguntungkan untuk menghasilkan kerja efektif.

Namun demikian, peningkatan tekanan bahan bakar tidak selalu berdampak positif terhadap emisi gas buang. Data pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi tekanan 2 bar dengan waktu pengapian 20° BTDC menghasilkan emisi CO dan HC terendah. Hal ini dapat dijelaskan melalui karakteristik campuran pembakaran. Pada tekanan yang lebih rendah, suplai bahan bakar relatif lebih sedikit sehingga campuran cenderung lebih miskin (lean mixture). Campuran yang lebih miskin, selama masih berada dalam rentang pembakaran stabil, dapat mengurangi pembentukan karbon monoksida akibat berkurangnya kondisi kekurangan oksigen. Selain itu, pembakaran yang lebih sempurna juga menekan jumlah hidrokarbon tak terbakar.

Sebaliknya, pada tekanan 4 bar, meskipun performa meningkat, terdapat kecenderungan peningkatan emisi CO dan HC pada kondisi tertentu. Peningkatan tekanan bahan bakar dapat menyebabkan campuran menjadi lebih kaya (rich mixture) apabila tidak diimbangi dengan suplai udara yang proporsional. Kondisi campuran kaya meningkatkan kemungkinan pembakaran tidak sempurna sehingga terbentuk CO dan sisa hidrokarbon. Temuan ini menunjukkan adanya trade-off antara optimasi performa dan pengendalian emisi. Peningkatan daya maksimum tidak selalu berbanding lurus dengan kualitas emisi terbaik.

Interaksi antara tekanan bahan bakar dan waktu pengapian juga menjadi aspek penting dalam pembahasan ini. Waktu pengapian yang terlalu lambat pada tekanan tinggi berpotensi menyebabkan tekanan puncak terjadi terlambat, sehingga sebagian energi pembakaran terbuang melalui gas buang. Sebaliknya, pada tekanan rendah, pemajuan waktu pengapian hingga 20° BTDC tetap mampu mempertahankan kualitas pembakaran yang baik tanpa meningkatkan emisi secara signifikan. Hal ini menegaskan bahwa optimasi mesin berbahan bakar LPG memerlukan pendekatan kombinatorial, bukan pengaturan satu parameter secara terpisah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa karakteristik pembakaran LPG pada mesin yang dirancang untuk bensin sangat dipengaruhi oleh penyesuaian tekanan suplai dan waktu pengapian. Konfigurasi 4 bar–20° BTDC efektif untuk memaksimalkan performa, sedangkan konfigurasi 2 bar–20° BTDC lebih optimal dalam aspek emisi. Dengan demikian, pemilihan konfigurasi terbaik bergantung pada prioritas operasional, apakah difokuskan pada peningkatan performa atau pengurangan emisi. Temuan ini memberikan dasar teknis bagi pengembangan strategi pengaturan sistem pembakaran pada mesin konversi LPG, khususnya untuk kendaraan berkapasitas kecil dengan sistem injeksi elektronik.

#### SIMPULAN DAN SARAN

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa variasi tekanan bahan bakar gas LPG dan waktu pengapian berpengaruh signifikan terhadap performa dan emisi mesin sepeda motor Honda Beat ESP Tahun 2019. Peningkatan tekanan bahan bakar dan pemajuan waktu pengapian cenderung meningkatkan torsi dan daya mesin, dengan nilai tertinggi diperoleh pada konfigurasi tekanan 4 bar dan waktu pengapian 20° BTDC. Namun demikian, peningkatan performa tersebut diikuti oleh kenaikan emisi gas buang CO dan HC, meskipun nilainya masih berada di bawah batas ambang yang ditetapkan standar emisi. Sebaliknya, konfigurasi tekanan 2 bar dengan waktu pengapian 20° BTDC menghasilkan emisi gas buang terendah, tetapi disertai penurunan performa mesin yang cukup signifikan. Hasil ini menegaskan adanya kompromi (trade-off) antara performa dan emisi pada penggunaan bahan bakar LPG. Secara keseluruhan, konfigurasi tekanan 4 bar dan waktu pengapian 20° BTDC dinilai sebagai kondisi paling optimal dalam penelitian ini karena mampu memberikan performa tertinggi dengan emisi yang masih dapat diterima. Temuan ini menegaskan pentingnya pengaturan parameter pembakaran yang tepat untuk mengoptimalkan pemanfaatan bahan bakar alternatif pada mesin kendaraan.

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar penelitian selanjutnya menggunakan sistem pengaturan waktu pengapian yang lebih presisi dan adaptif, seperti ignition mapping berbasis sensor, untuk memperoleh kondisi pembakaran yang lebih optimal pada bahan bakar LPG. Selain itu, konsistensi tekanan awal tabung LPG perlu diperhatikan guna meminimalkan potensi bias data akibat fluktuasi suplai bahan bakar. Bagi praktisi otomotif, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan awal dalam menentukan konfigurasi tekanan bahan bakar dan waktu pengapian pada konversi bahan bakar LPG agar diperoleh keseimbangan antara performa dan emisi. Sementara itu, bagi pengembang kurikulum pendidikan teknik mesin, penelitian ini direkomendasikan sebagai bahan pembelajaran berbasis eksperimen untuk memperkuat pemahaman mahasiswa mengenai hubungan antara parameter pembakaran, performa mesin, dan dampak lingkungan.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Bengkel Lima Pandawa CNC dan SMKN 4 Jakarta atas dukungan fasilitas dan teknis selama pelaksanaan penelitian. Apresiasi juga diberikan kepada semua pihak Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hasan, A. Y. (2017). Performance and emissions characteristics of LPG-fueled SI engine under different ignition timings. *Energy Conversion and Management*, 133, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.045>
- Al-Farayedhi, A., Aljuaid, H., & Alghamdi, M. (2018). Comparative emissions analysis of gasoline and liquefied petroleum gas (LPG) engines. *Fuel*, 234, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.071>
- Demirbas, A. (2017). Combustion characteristics of alternative fuels in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1153–1165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.196>
- Ghazikhani, M., Azadi, S., & Najafi, G. (2018). Effects of ignition timing and compression ratio on SI engine performance fueled with LPG. *Journal of Engine Research*, 25(4), 289–302. <https://doi.org/10.1080/17586610.2018.1452617>
- Heywood, J. B., & Sher, E. (2018). Fundamentals of spark-ignition engine performance. *Combustion Science and Technology*, 190(11), 1785–1802. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1432250>
- Kalam, M. A., Masjuki, H. H., & Palash, S. M. (2017). Impact of LPG fuel on engine performance and emissions. *Energy Procedia*, 105, 1344–1350. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.437>
- Li, X., Wang, Y., & Liu, H. (2020). Advanced ignition strategies for SI engines with gaseous fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 77, 100–118. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100819>
- Liu, Z., Zhao, H., & Li, J. (2018). Optimization of LPG-fueled engine performance using computational and experimental methods. *Applied Energy*, 229, 1174–1183. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.064>
- Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments in engine research. *Journal of Experimental Design*, 22(2), 101–121. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2017.05.004>
- Payri, R., Salvador, F. J., & Carreres, M. (2017). Influence of ignition timing and combustion development in SI engines fueled with alternative fuels. *Energy*, 125, 777–790. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.129>
- Rahman, M. M., Rasul, M., & Khan, M. (2019). Trade-off analysis between performance and emissions for alternative fuels in SI engines. *Renewable Energy*, 135, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.078>
- Singh, R., & Sharma, R. (2021). Experimental investigation of LPG fuel pressure variations on engine behavior. *Fuel*, 286, 119433. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119433>
- Stone, R. (2020). Combustion and emissions control in spark-ignition engines. *International Journal of Engine Research*, 21(8), 915–929. <https://doi.org/10.1177/1468087420930848>
- Wang, J., Zhou, Q., & Lin, T. (2022). Emission analysis of LPG engines with variable ignition timing and fuel delivery. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 15423–15435. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16234-z>

- Yildiz, B., Sever, R., & Okur, S. (2020). Combustion characteristics and emissions of SI engines fueled with LPG at different conditions. *Energy*, 190, 116436. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116436>
- Zhou, D., Tian, Y., & Li, Q. (2021). Performance optimization of LPG engine using advanced ignition control. *Energy Conversion and Management*, 227, 113591. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113591>