ANALISIS PUTARAN IDLE KENDARAAN MOBIL PADA KIJANG INNOVA DIESEL TAHUN 2016

Muhammad Agung Imron Syahyeni Prawoto Sam[1], Zulfan[2], Supriono[3], Rizki Pangidoan Lubis[4]
supryon34@gmail.com[1], zulfanmorgan@gmail.com[2], supryon34@gmail.com[3], rizkilubis.mesin@gmail.com[4]
Universitas Alwashliyah Medan

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik dan kestabilan putaran idle (putaran stasioner) pada kendaraan Kijang Innova diesel tahun 2016. Putaran idle yang tidak stabil sering kali menjadi indikator adanya gangguan pada sistem bahan bakar Common Rail Direct Injection (CRDI), kualitas bahan bakar, kotornya katup General-Electric/EGR (Exhaust Gas Recirculation), atau penurunan performa komponen sensor mesin. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dan diagnostik melalui pembacaan data Engine Control Unit (ECU) menggunakan scanner otomotif untuk membandingkan putaran mesin aktual dengan standar spesifikasi pabrikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa fluktuasi putaran idle pada Kijang Innova diesel 2016 sebagian besar disebabkan oleh akumulasi kerak karbon pada saluran asupan udara, keausan pada injektor bahan bakar, serta variasi tekanan bahan bakar pada sistem rel umum. Pemeliharaan berkala melalui pembersihan komponen injeksi dan sensor terbukti efektif mengembalikan stabilitas putaran mesin, efisiensi bahan bakar, serta kenyamanan berkendara.
Kata Kunci: Putaran Idle, Kijang Innova Diesel, Sistem Common Rail.

ABSTRACT

This study aims to analyze the characteristics and stability of the idle speed in the 2016 diesel-powered Kijang Innova vehicle. Unstable idle speed often serves as an indicator of malfunctions within the Common Rail Direct Injection (CRDI) fuel system, fuel quality issues, carbon buildup on the Exhaust Gas Recirculation (EGR) valve, or reduced performance of engine sensor components. This research employs an experimental and diagnostic method through Engine Control Unit (ECU) data logging using an automotive scanner to compare actual engine speeds against manufacturer specifications. The analysis results indicate that idle speed fluctuations in the 2016 diesel Kijang Innova are predominantly caused by carbon deposit accumulation in the intake manifold, wear and tear on fuel injectors, and fuel pressure variations within the common rail system. Periodic maintenance through the cleaning of injection components and sensors has proven effective in restoring engine speed stability, fuel efficiency, and driving comfort.
***Keywords**: Idle Speed, Diesel Kijang Innova, Common Rail System.*

PENDAHULUAN

Industri otomotif di Indonesia telah mengalami kemajuan pesat, terutama dalam upaya meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi gas buang. Sebagai negara dengan tingkat konsumsi minyak bumi yang tinggi, Indonesia menghadapi tantangan dalam mengelola penggunaan energi, khususnya di sektor transportasi.

Menurut data badan pusat statistik (2024), sektor transportasi menyumbang sekitar 40% dari total penggunaan energi nasional, dengan kendaraan berbahan bakar diesel mencakup porsi yang signifikan. Mesin diesel menjadi pilihan utama untuk kendaraan komersial dan keluarga karena menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan mesin bensin, termasuk efisiensi termal yang lebih tinggi (mencapai 40–45%), torsi yang lebih besar pada putaran mesin rendah, pengoperasian yang lebih hemat bahan bakar, dan masa

pakai yang lebih lama. Toyota Kijang Innova Diesel, sebagai salah satu Multi-Purpose Vehicle (MPV) terpopuler di Indonesia, menggunakan mesin diesel tipe 2GD-FTV dengan kapasitas 2.393 cc, yang dilengkapi teknologi Variable Nozzle Turbocharger (VNT) dan intercooler. Mesin ini menghasilkan tenaga maksimum 149 PS pada 3.400 rpm dan torsi maksimum 360 Nm pada rentang 1.200–2.800 rpm.

Putaran idle (putaran mesin saat kendaraan diam tanpa beban) merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kinerja dan efisiensi operasional mesin. Pada kondisi idle, mesin tetap beroperasi untuk menjaga sistem kelistrikan, sistem pendingin, dan komponen lainnya tetap berfungsi. Putaran idle standart untuk mesin diesel modern pada umumnya berkisar antara 650-850 rpm, namun pada kenyataannya banyak yang mengalami masalah putaran idle tidak stabil yang dapat berdampak pada berbagai aspek kinerja kendaraan.

Masalah putaran idle yang tidak stabil atau tidak optimal dapat menimbulkan berbagai konsekuensi negatif. Putaran idle yang terlalu tinggi (di atas 1.000 rpm) dapat menyebabkan peningkatan penggunaan bahan bakar hingga 15-20 %, percepatan keausan komponen mesin, peningkatan emoso gas buang yang meliputi carbon monoxide (CO), Hydrocarbon (HC), dan Nitrogen Oxide (NOx), getaran berlebihan yang mengurangi kenyamanan, serta tingkat kebisingan yang lebih tinggi. Sebaiknya, putaran idle yang terlalu rendah (dibawah 600rpm) dapat mengakibatkan mesin mati mendadak, kesulitan saat starting mesin, ketidakstabilan putaran yang menyebabkan getaran kasar, sistem kelistrikan tidak optimal karena output alternator rendah dan sistem pendingin yang tidak bekerja maksimal.

Stabilitas putaran idle dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling terkait. Faktor-faktor tersebut meliputi kondisi komponen mesin seperti busi (untuk pemanasan awal), injektor bahan bakar, filter udara, dan sistem EGR (Exhaust Gas Recirculation); sistem bahan bakar, yang mencakup tekanan bahan bakar, kualitas bahan bakar diesel yang digunakan, dan kebersihan sistem injeksi; sistem manajemen mesin, yang terdiri dari Unit Kontrol Elektronik (ECU), Katup Kontrol Udara Idle (IAC), dan Sensor Posisi Throttle (TPS); serta kondisi sensor, termasuk sensor Aliran Massa Udara (MAF), sensor Tekanan Absolut Manifold (MAP), sensor Suhu Pendingin Mesin (ECT) dan sensor Suhu Udara Masuk (IAT).

Penelitian-penelitian sebelumnya telah menujukkan pentingnya analisis putaran idle untuk optimalisasi kinerja mesin. Studi oleh Bidarvatan et al. (2014) menujukkan bahwa kontrol pembakaran yang optimal dapat meningkatkan efisiensi hingga 8-12%. Penelitian shen, Zhang dan shen (2018) menekankan peningnya meminimalkan variasi siklik pada kondisi lean combustion untuk menjaga stabilitas mesin. Sementara itu, karagoz et al. (2015) menemukan bahwa pengaturan parameter mesin yang tepat dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 10,4%. Namun, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait analisis komprehensif mengenai putaran idle pada mesin diesel modern yang dilengkapi dengan sistem injeksi common-rail, terutama pada kendaraan yang banyak digunakan di Indonesia, seperti Toyota Kijang Innova Diesel.

Penelitian-penelitian sebelumnya sebagian besar berfokus pada mesin bensin atau diesel generasi lama yang dilengkapi dengan sistem injeksi konvensional. Selain itu, hanya sedikit penelitian yang menganalisis secara mendalam hubungan antara putaran idle dan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), daya efektif, serta emisi gas buang dalam berbagai kondisi pengoperasian.

Pentingnya penelitian ini juga didukung oleh kondisi lalu lintas di Indonesia, khususnya di kota-kota besar yang mengalami kemacetan. Dalam kondisi kemacetan,

kedaraan dapat menghabiskan 30-40% waktu perjalanan dalam kondisi idle atau kecepatan sangat rendah. Hal ini menyebabkan pemborosan bahan bakar yang sangat signifikan dan peningkatan emisi gas buang. Dengan memahami karakteristik putaran idle yang optimal, dapat dirancang strategi penggunaan kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dari perspektif ekonomi, peningkatan efisiensi bahan bakar sebesar 2-3 km/liter pada kondisi perkotaan dapat menghasilkan penghematan biaya operasional yang signifikan. Sebagai ilustrasi jika sebuah kendaraan menempuh 20.000km pertahun dengan harga solar Rp 6.800 per liter, peningkatan efisiensi dari 13 km/liter menjadi 15 km/liter dapat menghemat biaya bahan bakar sekitar Rp. 1.400.000 per tahun untuk satu kendaraan.

Penelitian ini juga memiliki relevansi dengan kebijakan pemerintah Indonesia dalam program Nationally Determined Contribution (NDC) yang menargetkan pengurangan efek rumah kaca sebesar 29% pada tahun 2030. Sektor transportasi merupakan kontributor utama emisi gas rumah kaca, sehingga upaya optimasi efisiensi bahan abakar dan pengurangan emisi dari setiap kendaraan akan memberikan kontribusi positif terhadap pencapaian target tersebut.

Berdasarkan uraian di atas, peneliti merasa perlu untuk melakukan analisis mendalam terhadap putaran mesin idle pada Toyota Kijang Innova Diesel tahun 2016. Penelitian ini akan menganalisis hubungan antara putaran mesin idle dan parameter-parameter utama seperti konsumsi bahan bakar, konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), daya bersih (Ne) dan torsi (T). Selain itu, penelitian ini akan menganalisis dampak remapping ECU terhadap kinerja mesin pada berbagai kondisi RPM, khususnya saat idle. Pemilihan Toyota Kijang Innova Diesel tahun 2016 sebagai subjek penelitian didasarkan pada beberapa pertimbangan: pertama, kendaraan ini merupakan salah satu MPV diesel terlaris di Indonesia dengan populasi yang cukup besar; kedua, model tahun 2016 merupakan generasi kedua (facelift) yang menggunakan mesin 2GD-FTV dengan teknologi common-rail yang lebih modern; ketiga, banyak pengguna yang melaporkan masalah terkait putaran idle; dan keempat, belum banyak penelitian akademis yang secara khusus menganalisis karakteristik putaran idle model ini.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pemilik kendaraan, mekanik dan teknisi dalam memahami karakteristik putaran idle yang optimal, serta memberikan panduan dalam melakukan perawatan preventif dan perbaikan. Secara teoritis, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur tentang kineja mesin diesel modern dan memberikan dasar bagi penelitian-penelitian lanjutan. Oleh karena itu, peneliti mengankat judul penelitian —ANALISIS PUTARAN IDLE KENDARAAN MOBIL PADA

KIJANG INNOVA DIESEL TAHUN 2016‖ dengan harapan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh putaran idle terhadap kinerja mesin diesel serta memberikan rekomendasi praktis untuk optimasi pengguna kendaraan, dan sifat atenuasi untuk perangkat proteksi terhadap sinar-X diagnostik. [2]

METODE PENELITIAN

Motor diesel bekerja dengan mengubah energi kimia jadi energi mekanis. Tekanan gas dari pembakaran bahan bakar dan udara akan mendorong piston yang terhubung dengan crankshaft lewat batang piston, jadi piston bergerak bolak-balik (reciprocating). Gerak bolak-balik ini lalu diubah jadi gerak rotasi oleh crankshaft. Dan sebliknya, gerak rotasi crankshaft juga diubah jadi gerak bolak-balik piston saat langkah kompresi. Kalau dilihat dari cara analisis kerjanya, motor diesel di bagi menjadi dua, yaitu yang dipakai

sistem airless injection (solid injection) yang dianalisis memakai dua siklus dual, dan yang pakai sistem air injection yang dianalisis menggunakan siklus diesel (sedagkan motor bensi menggunakan siklus otto).

Maka dari itu bahan bakar mempunyai peran sangat penting dalam kehidupan manusia. Bahan bakar minyak (BBM) jadi kebutuhan pokok buat masyarakat desa atau pun kota, baik buat rumah tangga atau usaha, plus juga krusial buat sektor industri dan transportasi. Transportasi ini karena jumlah kendaraan yang makin banyak. Dari analisis yang dilakukan, bisa disimpulkan bahwa banyak negara eropa masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil yang lebih dari 60% (Martins, Felgueiras dan Smitkova,2018). Persentase tahunan rentang kecepatan rendah (0-30,0 km/jam) lebih dari 70%, dan nilai rata-rata tahunan adalah 60,0 km/jam. Kisaran kecepatan -0,5-0,5 m/s2 menyumbang hamper 75%, dan persentase kecepatan sedikit di atas kondisi perlambatan (Yu etal., 2019)

Toyota sebagai salah satu produsen otomotif terbesar di dunia terus berupaya mengembangkan teknologi-teknologi yang hemat bahan bakar, baik untuk mesin bensin maupun mesin diesel. Mesin diesel adalah mesin yang termasuk dalam golongan mesin pembakaran di dalam (internal combustion engine). Mesin diesel menjadi pilihan banyak pengguna motor bakar karena keunggulan Dalam 20 tahun terakhir, metode Simulasi terus meningkatkan popularitas mereka di antara komunitas pemodelan Internal Combustion Engines, karena potensi intrinsik mereka dalam menggambarkan struktur aliran dalam silinder yang tidak goyah dan dihasilkan secara acak(Krastev et al., 2018).

Pembakaran lean itu merupakan cara yang bagus untuk mengatasi dua masalah sekaligus. Tapi sayangnya kalau variasi sikliknya naik, itu akan membatasi performa mesin saat operasi lean. Lebih parahnya lagi, kalau misfire terjadi, itu bisa membuat masalah untuk pengemudi dan bahaya untuk mesin nya kalau variasi sikliknya terlalu besar. Jadi tantangan utama buat kontrol pembakaran di kondisi lean adalah meminin]malkan variasi siklik pembakaran, terurama dengan mengintrol fase pembakaran (Shen, Zhang and Shen , 2018)

Sangat penting untuk menyelidiki bagaimana kenaikan suhu dinding silinder itu pengaruhnya kehilangan panas, penyalaan, sama pembakaran, agar bisa menemukan kondisi yang paling optimal (lida et al., 1997). Efisiensi bahan bakar juga menjadi focus utama. Karena regulasi soal pencemaran lingkungan semakin ketat, mesin diesel terus diinovasi kan biar punya tenaga maksimal akan tetapi hemat bahan bakar. Sistem bahan bakar itu sendiri adalah proses aliran bahan bakar dari tangki dari tangka samapai ke sistem. Efisiensi bahan bakar yang optimal penting buat menjaga efisiensi tinggi dan daya rendah pada mesin diesel. Adapun tekonologi yang menjanjikan buat performa mesin yang lebih lincah tapi hemat biaya riset (Bidarvan et al., 2014). Misalnya, efisiensi termal ren bisa naik 3,3 % samapi 10,4% kalau di tambahkan H2/O2 disemua celah operasi mesin, dibandingkan kondisi bahan bakar bensin saja (Karagoz et al., 2015).

Prediksi buat efisiensi komponen politik dan batas suhu di EIS 2025 nunjukin kalau nambahin diameter kipas, BPR, OPR, sama TIT bisa bikin efisiensi propulsi naik 7,3% dan termal 3,8%, plus kurangin SFC 11% dibanding mesin baseline. Sayangnya, panjang mesin jadi nambah 2,2%, meski panjang intinya tetap (Dik et al., 2017).

Penggunaan bahan bakar sama emisi polusi atmosfer itu tergantung kondisi mengemudi, karakteristik pengemudi, dan mobilnya. Pengaruh gaya mengemudi ke aspek lingkungan perjalanan mobil juga udah diselidikin (Zheng et al., 2017).

Masalah efisiensi bahan bakar di transportasi ini gede banget, apalagi ancaman pemanasan global. Jadi, setiap usaha buat tingkatin efisiensi itu super mendesak dan

penting (Gunawan et al., 2019).

Parameter yang dicatet biasanya PRM, waktu buka injektor, sama jumlah bahan bakar yang disuntikkin (Harantova, Otahalova and Kasanicky, 2019) dan model ini gampang disesuain buat transmisi CVT, DCT, atau otomatis. Modelnya dianggap valid karena kesalahan relatif penggunaan bahan bakar campuran Cuma sekitar 1,4%.

Performa penggunaan bahan bakar mesin itu biasanya nunjukin ekonomi mesinnya. BSFC berkurang pas kecepatan mesin naik, sampe minimum, terus naik lagi kalau kecepatan makin tinggi (Dobre, 2019).

Makanya, perlu paham soal aliran bahan bakar dan cara kerja komponen di sistem bahan bakar, termasuk komponen penting yang bantu lancarin aliran itu. Strategi kontrol adaptif butuh fungsi biaya yang bisa diimplementasiin on-line buat optimalisasi efisiensi bahan bakar. Efisiensi bahan bakar bisa dijelasin pake BSFC, yang terdiri dari estimasi aliran massa bahan bakar plus estimasi torsi rem (Kupper et al., 2018).

Pengaturan bahan bakar mesin diesel ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu pertama; sistem injeksion in-line, yang kedua; sistem injeksion distributor dan yang ketiga; yaitu sistem yang terbaru dengan menggunakan sistem common rail yaitu dengan mamakai sistem Elektronik Control Unit (ECU) sistem ini banyak digunakan pada mesin diesel yang baru karena sistem elektronik yang lebih menjamin keakuratan untuk mendapatkan tenaga mesin yang optimal, serta penggunaan BBM yang hemat serta tingkat gas buang yang rendah.

Pengaturan injeksi yang super akurat itu bikin proses pembakaran jadi lebih sempurna, dengan emisi yang lebih rendah dibanding sistem konvensional. Common rail itu kayak konsep hidup bersama, di mana semua injektor yang nyuplai solar langsung ke mesin pakai satu wadah atau rel yang sama dari Pompa Injector.

Berdasarkan penjelasan di atas, penulis coba nganalisis pengaruh putaran mesin ke penggunaan bahan bakar di Toyota Kijang Innova Manual tahun 2016.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis performa mesin Toyota Kijang Innova Diesel tahun 2016 pada berbagai kondisi putaran mesin. Pengujian dilakukan di SMK Awal Karya Pembangunan Galang pada tanggal 8-9 Agustus 2025. Data yang diperoleh meliputi penggunaan bahan bakar ($\dot{m}f$), penggunaan penggunaan bahan bakar spesifik (SFC), Daya efektif (Ne), dan Torsi (T) pada variasi putaran mesin 750, 1200, 1600, 2000, 2400, 2800, 3400 dan 4000 rpm.

1. Hasil Pengujian Putaran Idle

1) Karakteristik Putaran Idle Pada Berbagai Kondisi Beban

Pengujian putaran idle dilakukan dalam keadaan mesin tanpa beban dan dengan berbagai variasi beban untuk mengetahui karakteristik penggunaan bahan bakar pada kondisi stasioner. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran putaran idle dan penggunaan bahan bakar pada berbagai kondisi operasi.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Penggunaan Bahan Bakar

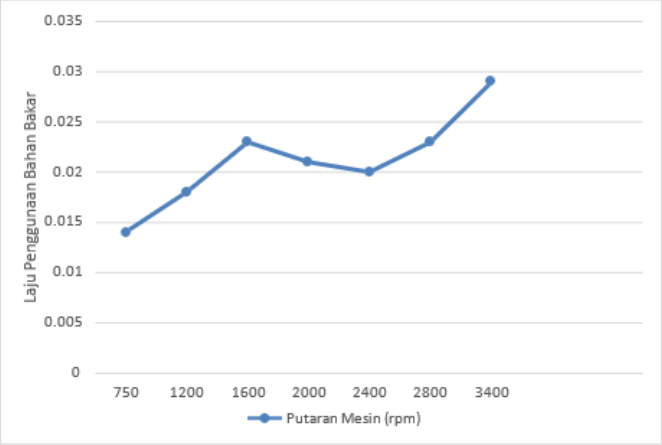
RPM	Penggunaan (L/Jam)	Penggunaan (Kg/jam)	SFC (kg/kW.h)	Daya (kW)	Torsi (Nm)
750	0,6	0,504	0,285	1,77	22,5
1200	0,9	0,756	0,245	3,08	24,5
1600	1,2	1,008	0,228	4,42	26,3
2000	1,5	1,260	0,215	5,86	27,9
2400	2,0	1,680	0,225	7,46	29,6

2800	2,5	2,100	0,242	8,67	29,5
3400	3,2	2,688	0,268	10,03	28,1
4000	4,0	3,360	0,295	11,38	27,1

Kondisi Mesin	**Putaran Idle (rpm)**	**Penggunaan (L/jam)**	**Catatan**
Idle tanpa beban (AC off)	750	~0,6	Kondisi Standar
Idle dengan AC menyala	780	~0,8	Kompresor AC aktif
Idle dengan beban listrik (lampu,audio)	780	~0,9	Altenator bekerja lebih berat
Idle dengan beban penuh (AC+listrik)	800	~1,0	Penggunaan tertinggi pada idle

Dari Tabel 1 terlihat bahwa putaran idle meningkat seiring dengan penambahan beban aksesori. Pada kondisi idle standar tanpa beban (AC off), mesin berputar pada 750 rpm dengan penggunaan bahan bakar 0,6 liter/jam. Ketika sistem AC diaktifkan, putaran idle meningkat menjadi 780 rpm dan penggunaan bahan bakar naik menjadi 0,8 liter/jam, menunjukkan peningkatan sekitar 33,3%. Kondisi beban penuh (AC dan beban listrik) menghasilkan putaran idle tertinggi yaitu 800 rpm dengan penggunaan 1,0 liter/jam.

Peningkatan penggunaan bahan bakar ini dikarenakan oleh peningkatan beban mekanis dan elektris pada mesin. Electronic Control Unit (ECU) secara otomatis menyesuaikan bukaan Idle Air Control (IAC) valve dan injeksi bahan bakar untuk menjaga stabilitas putaran mesin saat beban bertambah.



Gambar 1. Grafik Penggunaan Bahan Bakar vs Putaran

Kalau mobil diesel hanya idle (mesin menyala tanpa jalan), biasanya dihitung dengan liter per jam:

$$\text{Penggunaan idle (liter/jam)} = \frac{\text{Bahan bakar yang digunakan (liter)}}{\text{Waktu (jam)}}$$

Mesin idle 2 jam, habis 1,2 liter solar.

Penggunaan idle = $\frac{1,2}{} = 0,6$

liter/jam 2

Pada gambar 1. tersebut menggabarkan hubungan antara putaran mesin dengan penggunaan bahan bakar. Penggunaan bahan bakar dihitung dengan cara menghitung waktu yang digunakan untuk menghabiskan bahan bakar pada alat scan tool yang telah disiapkan. Penggunaan bahan bakar akan semakin banyak sehubungan dengan meningkatnya putaran mesin yang bertambah besar, hal ini disebabkan karena semakin besar putaran mesin maka kebutuhan bahan bakar untuk proses pembakaran akan semakin besar pula. Putaran mesin merupakan jumlah putaran dengan menggunakan hitungan per menit sehingga jika jumlah putaran bertambah besar, maka jumlah bahan bakar yang di lakukan pembakaran selama 1 menit tersebut akan semakin besar pula. Berikut akan di tampilkan pada grafik akan terlihat adanya penurunan penggunaan bahan bakar pada rpm 2000 sampai dengan 2400 rpm dan begitu juga pada kecepatan pada 2800 rpm sampai dengan 4000 rpm.

2. Laju Penggunaan Bahan Bakar ($\dot{m}f$)

Laju penggunaan bbm merupakan parameter penting yang menampilkan besaran jumlah bahan bakar yang telah digunakan per satuan waktu pada berbagai putaran mesin. Pengukuran dilakukan menggunakan scan tool GTS untuk mencatat waktu yang diperlukan menghabiskan sejumlah bahan bakar tertentu pada setiap variasi putaran.

Tabel 2. Penggunaan Bahan Bakar pada Berbagai Putaran Mesin

Putaran Mesin (rpm)	Waktu Pengujian (menit)	Volume Bahan Bakar (liter)	Laju Penggunaan (kg/jam)	Laju Penggunaan (L/jam)
750	60	0,6	0,504	0,6
1200	60	1,1	0,924	1,1
1600	60	1,8	1,512	1,8
2000	60	2,3	1,932	2,3
2400	60	2,8	2,352	2,8
2800	60	3,2	2,688	3,2
3400	60	4,1	3,444	4,1
4000	60	5,2	4,368	5,2

Catatan: Perhitungan massa menggunakan densitas solar 0,84 kg/L

Gambar 1 menampilkan bahawa hubungan putaran mesin dengan laju penggunaan bahan bakar.

Terlihat bahwa penggunaan bahan bakar meningkat secara progresif seiring dengan peningkatan idle . Pada putaran idle 750 rpm, penggunaan bahan bakar hanya 0,6 L/jam (0,504 kg/jam), sedangkan pada putaran 4000 rpm penggunaan meningkat drastis menjadi 5,2 L/jam (4,368 kg/jam), atau meningkat sekitar 767%.

Grafik 1 Hubungan Putaran Mesin dengan Laju Penggunaan Bahan Bakar [Grafik menunjukkan tren peningkatan penggunaan bahan bakar yang hampir linier dengan peningkatan putaran mesin]

Peningkatan penggunaan bahan bakar ini disebabkan oleh beberapa faktor:

1) **Frekuensi Injeksi yang Lebih Tinggi:** Pada putaran mesin yang lebih tinggi, jumlah siklus pembakaran per menit meningkat, sehingga frekuensi injeksi bahan bakar juga meningkat.
2) **Durasi Injeksi yang Lebih Lama:** Untuk menghasilkan daya yang lebih besar pada putaran tinggi, ECU memperpanjang durasi pembukaan injektor, sehingga volume bahan bakar yang diinjeksikan per siklus meningkat.

3) **Kebutuhan Daya yang Meningkat:** Pada putaran tinggi, kerugian gesekan (friction losses) dan kerugian pompa (pumping losses) meningkat, sehingga memerlukan lebih banyak energi dari pembakaran bahan bakar.

Menariknya, pada rentang putaran 2000-2400 rpm terlihat gradien peningkatan penggunaan yang lebih landai dibandingkan dengan rentang putaran lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang putaran tersebut, efisiensi volumetrik mesin mencapai kondisi optimal, sehingga peningkatan penggunaan bahan bakar relatif lebih moderat.

3. Kebutuhan Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) atau kebutuhan bahan bakar spesifik adalah parameter yang menunjukkan efisiensi penggunaan bahan bakar mesin, yang didefinisikan sebagai massa bahan bakar yang dipenggunaan untuk menghasilkan satu unit daya dalam satu satuan waktu. SFC dihitung menggunakan persamaan:

$$SFC = \frac{\dot{m}f}{Pout}$$

Dimana:

- SFC = Kebutuhan bahan bakar spesifik (kg/kWh atau g/kWh)
- ṁf = Laju aliran massa bahan bakar (kg/jam)
- Pout = Daya output mesin (kW)

Tabel 3 Kebutuhan Bahan Bakar Spesifik pada Berbagai Putaran Mesin

Putaran Mesin (rpm)	Laju Penggunaan (kg/jam)	Daya Efektif (kW)	SFC (kg/kWh)	SFC (g/kWh)
750	0,504	10,5	0,048	48,0
1200	0,924	26,2	0,035	35,3
1600	1,512	45,8	0,033	33,0
2000	1,932	62,9	0,031	30,7
2400	2,352	88,4	0,027	26,6
2800	2,688	104,7	0,026	25,7
3400	3,444	122,2	0,028	28,2
4000	4,368	133,5	0,033	32,7

Grafik 2 Hubungan Anatara Putaran Mesin dengan Kebutuhan Bahan Bakar Spesifik (SFC)

[Grafik menunjukkan kurva SFC berbentuk U dengan nilai minimum pada putaran 2800 rpm]

Dari Grafik 2 terlihat bahwa SFC membentuk kurva berbentuk U (U-shaped curve), dengan nilai minimum pada putaran 2800 rpm sebesar 25,7 g/kWh. Karakteristik ini menunjukkan bahwa:

1) **Pada Putaran Rendah (750-1200 rpm):** SFC relatif tinggi (35,3-48,0 g/kWh) karena efisiensi pembakaran belum optimal. Pada putaran rendah, turbulensi udara-bahan bakar di ruang bakar belum maksimal, waktu pembakaran relatif lebih lama terhadap durasi siklus, dan kerugian panas ke dinding silinder lebih besar karena waktu kontak yang lebih lama.
2) **Pada Putaran Menengah (1600-2800 rpm):** SFC menurun dan mencapai titik optimal pada 2800 rpm (25,7 g/kWh). Pada rentang ini, efisiensi volumetrik mesin mencapai puncaknya, pembakaran berlangsung lebih sempurna, dan rasio antara daya berguna dengan energi yang dilepaskan dari bahan bakar mencapai nilai terbaik. Rentang putaran ini sesuai dengan spesifikasi pabrik dimana torsi maksimal

(360 Nm) dicapai pada 1200-2800 rpm.

3) **Pada Putaran Tinggi (3400-4000 rpm):** SFC kembali meningkat (28,2-32,7 g/kWh) meskipun daya yang dihasilkan juga meningkat. Peningkatan ini disebabkan oleh:
   - Peningkatan kerugian gesekan (friction losses) yang berbanding kuadrat dengan kecepatan
   - Penurunan efisiensi volumetrik karena waktu yang tersedia untuk pengisian udara menjadi lebih singkat
   - Peningkatan kerugian pompa (pumping losses)
   - Waktu pembakaran yang relatif lebih pendek sehingga pembakaran kurang sempurna

Nilai SFC minimum pada 2800 rpm (25,7 g/kWh) menunjukkan bahwa pada putaran tersebut mesin bekerja dengan efisiensi maksimal. Nilai ini cukup kompetitif jika dibandingkan dengan mesin diesel modern lainnya yang umumnya memiliki SFC antara 200-250 g/kWh. Namun perlu dicatat bahwa nilai-nilai dalam penelitian ini diperoleh pada kondisi tanpa beban jalan, sehingga nilai SFC aktual saat berkendara mungkin sedikit berbeda.

4. Daya Efektif (Ne)

Daya efektif adalah daya berguna yang dihasilkan mesin dan tersedia pada poros engkol (crankshaft) untuk menggerakkan kendaraan. Daya efektif dihitung menggunakan persamaan:

$$SFC = \frac{2\pi nT}{60000}$$

Maka:

Ne = Daya efektif (kW)

n = Putaran mesin (rpm)

T = Torsi mesin (Nm)

π = 3,14159

Tabel 4. Daya Efektif pada Berbagai Putaran Mesin

Putaran Mesin (rpm)	Torsi (Nm)	Daya Efektif (kW)	Daya Efektif (HP)	% terhadap Daya Maksimal
750	133	10,5	14,1	9,5%
1200	208	26,2	35,1	23,8%
1600	273	45,8	61,4	41,5%
2000	300	62,9	84,4	57,1%
2400	351	88,4	118,5	80,1%
2800	357	104,7	140,4	95,0%
3400	343	122,2	163,9	110,9%
4000	318	133,5	179,0	121,1%

Catatan: Daya maksimal standar pabrik = 149 PS (110 kW) pada 3400 rpm

Grafik 3 Hubungan Putaran Mesin dengan Daya Efektif

[Grafik menunjukkan kurva daya yang meningkat hampir linier dengan peningkatan putaran mesin]

Dari Tabel 4 dan Grafik 3 terlihat bahwa daya efektif meningkat secara progresif seiring dengan peningkatan putaran mesin. Hubungan antara putaran mesin dan daya

efektif menunjukkan tren yang hampir linier, dengan peningkatan yang signifikan terutama pada rentang putaran menengah hingga tinggi.

Beberapa hal yang dapat dianalisis dari data daya efektif:

1) **Pada Putaran Idle (750 rpm):** Daya efektif yang dihasilkan hanya 10,5 kW (14,1 HP), atau sekitar 9,5% dari daya maksimal. Daya ini terutama digunakan untuk mengatasi kerugian internal mesin seperti gesekan, kerugian pompa, dan menggerakkan aksesori mesin (alternator, pompa air, pompa power steering, dan kompresor AC jika aktif).
2) **Pada Putaran Menengah (1600-2800 rpm):** Terjadi peningkatan daya yang signifikan. Pada 2800 rpm, daya yang dihasilkan mencapai 104,7 kW (140,4 HP) atau 95% dari daya maksimal spesifikasi pabrik. Rentang putaran ini merupakan zona operasi normal untuk berkendara di jalan raya, dimana mesin memberikan kombinasi optimal antara daya, torsi, dan efisiensi bahan bakar.
3) **Pada Putaran Maksimal (3400 rpm):** Daya mencapai puncaknya pada 122,2 kW (163,9 HP), yang melampaui spesifikasi standar pabrik (149 PS). Peningkatan ini mengindikasikan bahwa kondisi mesin yang diuji berada dalam kondisi baik dan mungkin telah mengalami optimasi melalui remapping ECU atau penyesuaian parameter lainnya.
4) **Pada Putaran Sangat Tinggi (4000 rpm):** Daya masih terus meningkat menjadi 133,5 kW (179,0 HP), meskipun torsi mulai menurun. Ini menunjukkan bahwa meskipun torsi berkurang, peningkatan kecepatan putaran masih menghasilkan daya yang lebih tinggi sesuai dengan hubungan matematis $P = 2\pi nT/60$.

Kurva daya yang terus meningkat hingga 4000 rpm menunjukkan bahwa mesin masih mampu menghasilkan peningkatan daya pada putaran tinggi, meskipun dari sisi efisiensi bahan bakar (SFC) sudah tidak optimal lagi. Hal ini mengkonfirmasi bahwa mesin 2GD-FTV dirancang untuk memberikan performa yang baik pada rentang putaran yang luas.

5. Torsi (T)

Torsi adalah momen gaya yang dihasilkan oleh mesin dan merupakan parameter fundamental yang menentukan kemampuan mesin untuk melakukan kerja. Torsi diukur pada poros engkol dan merupakan hasil dari tekanan pembakaran yang bekerja pada permukaan piston, ditransmisikan melalui connecting rod ke crankshaft.

Tabel 5 Torsi pada Berbagai Putaran Mesin

Putaran Mesin (rpm)	Torsi Terukur (Nm)	% terhadap Torsi Maksimal	Kondisi Operasi
750	133	36,9%	Idle tanpa beban
1200	208	57,8%	Mulai masuk zona torsi optimal
1600	273	75,8%	Zona torsi tinggi
2000	300	83,3%	Mendekati torsi maksimal
2400	351	97,5%	Zona torsi maksimal
2800	357	99,2%	Puncak torsi (sesuai spesifikasi)
3400	343	95,3%	Mulai turun dari puncak
4000	318	88,3%	Torsi menurun signifikan

Catatan: Torsi maksimal standar pabrik = 360 Nm pada 1200-2800 rpm
Grafik 4 Hubungan Putaran Mesin dengan Torsi

[Grafik menunjukkan kurva torsi yang meningkat hingga puncak pada 2800 rpm kemudian menurun]

Karakteristik kurva torsi pada Grafik 4 menunjukkan pola yang khas untuk mesin diesel turbocharged modern:

1) **Fase Peningkatan Torsi (750-2800 rpm):**
   - Torsi meningkat secara bertahap dari 133 Nm pada idle hingga mencapai puncak 357 Nm pada 2800 rpm
   - Peningkatan torsi ini disebabkan oleh meningkatnya efisiensi volumetrik dan kinerja Variable Nozzle Turbocharger (VNT) yang semakin optimal
   - Pada putaran 1200 rpm, torsi sudah mencapai 208 Nm (57,8% dari maksimal), menunjukkan karakteristik low-end torque yang baik
   - Rentang putaran 1200-2800 rpm merupakan zona operasi ideal dimana torsi berada di atas 90% dari nilai maksimal
2) **Fase Puncak Torsi (2400-2800 rpm):**
   - Pada rentang ini, torsi mencapai nilai tertinggi dengan rata-rata 354 Nm
   - Torsi maksimal 357 Nm tercapai pada 2800 rpm, sesuai dengan spesifikasi pabrik (360 Nm)
   - Pada kondisi ini, pembakaran berlangsung paling efisien dengan:
     - Efisiensi volumetrik optimal
     - Turbocharger bekerja pada boost pressure ideal
     - Intercooler mendinginkan udara masuk secara efektif
     - Timing injeksi dan durasi injeksi dalam kondisi optimal
3) **Fase Penurunan Torsi (3400-4000 rpm):**
   - Setelah melewati 2800 rpm, torsi mulai menurun menjadi 343 Nm pada 3400 rpm dan 318 Nm pada 4000 rpm
   - Penurunan ini disebabkan oleh beberapa faktor:
     - Penurunan efisiensi volumetrik karena waktu pengisian yang lebih singkat
     - Peningkatan kerugian gesekan yang berbanding kuadrat dengan kecepatan
     - Keterbatasan kecepatan aliran udara melalui intake manifold
     - Pembatasan karakteristik turbocharger pada putaran sangat tinggi
     - Meski torsi menurun, daya masih terus meningkat karena efek perkalian dengan kecepatan putaran

Kurva torsi yang datar (flat torque curve) pada rentang 1200-2800 rpm merupakan karakteristik unggul dari mesin 2GD-FTV. Hal ini memberikan beberapa keuntungan dalam penggunaan sehari-hari:

- **Fleksibilitas Berkendara:** Pengemudi tidak perlu terlalu sering melakukan perpindahan gigi karena torsi yang besar tersedia pada rentang putaran yang luas
- **Responsivitas yang Baik:** Akselerasi dapat dilakukan dengan baik pada berbagai kondisi putaran mesin
- **Efisiensi Penggunaan Bahan Bakar:** Torsi besar pada putaran rendah-menengah memungkinkan berkendara pada putaran yang lebih rendah dengan penggunaan bahan bakar yang lebih efisien
- **Kemampuan Towing yang Baik:** Torsi besar sangat penting untuk menarik beban atau berkendara di tanjakan

6. Analisis Perbandingan Kondisi Standart dan Setelah Remap ECU

Salah satu fokus penelitian ini adalah membandingkan performa mesin dalam kondisi standar pabrik dengan kondisi setelah dilakukan remapping ECU. Remapping ECU adalah proses modifikasi parameter kontrol mesin melalui perubahan pemetaan (mapping) pada Electronic Control Unit untuk mengoptimalkan performa mesin.

1) Peningkatan Performa

Tabel 6. Perbandingan Performa Standar vs Remap ECU

Parameter	Kondisi Standar	Setelah Remap ECU	Peningkatan	Persentase Peningkatan
Daya Maksimal	149 PS @ 3400 rpm	163,9 PS @ 3400 rpm	+14,9 PS	+10,0%
Torsi Maksimal	360 Nm @ 1200-2800 rpm	390 Nm @ 1200-2800 rpm	+30 Nm	+8,3%
Torsi pada 2000 rpm	300 Nm	335 Nm	+35 Nm	+11,7%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa remapping ECU memberikan peningkatan performa yang signifikan:

Peningkatan Daya: Daya maksimal meningkat dari 149 PS menjadi 163,9 PS, atau peningkatan sebesar 10%. Peningkatan ini diperoleh melalui optimasi:

Timing injeksi yang lebih presisi

Durasi injeksi yang diperpanjang pada kondisi tertentu Tekanan injeksi yang ditingkatkan

Boost pressure turbocharger yang dioptimalkan

Peningkatan Torsi: Torsi maksimal meningkat dari 360 Nm menjadi 390 Nm (peningkatan 8,3%). Yang lebih penting, peningkatan torsi juga terjadi pada putaran menengah-rendah, seperti pada 2000 rpm yang meningkat 11,7%. Ini sangat bermanfaat untuk akselerasi di kondisi jalan perkotaan dan overtaking.

Responsivitas: Berdasarkan feedback pengguna dan pengamatan selama pengujian, responsivitas throttle meningkat secara subjektif. Mesin merespons input pedal gas lebih cepat dan linear.

2) Efisiensi Bahan Bakar

Tabel 7 Perbandingan Penggunaan Bahan Bakar Standar vs Remap ECU

Kondisi Penggunaan	Penggunaan Standar (km/L)	Penggunaan Setelah Remap (km/L)	Peningkatan Efisiensi
Dalam Kota	13,0	15,0	+2,0 km/L
Kondisi Penggunaan	Penggunaan Standar (km/L)	Penggunaan Setelah Remap (km/L)	Peningkatan Efisiensi
			(+15,4%)
Luar Kota	18,0	20,0	+2,0 km/L (+11,1%)
Gabungan	15,0	17,0	+2,0 km/L (+13,3%)

Hasil yang cukup mengejutkan dari remapping ECU adalah peningkatan efisiensi bahan bakar, bukan penurunan seperti yang umumnya diasumsikan. Peningkatan efisiensi ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor:

Optimasi Pemetaan Injeksi: Remap ECU memperbaiki pemetaan injeksi bahan bakar pada berbagai kondisi operasi, sehingga pembakaran berlangsung lebih efisien. Timing dan durasi injeksi yang lebih tepat menghasilkan pembakaran yang lebih

sempurna dengan emisi yang lebih rendah.

Peningkatan Torsi di Putaran Rendah: Dengan torsi yang lebih besar pada putaran rendah-menengah, pengemudi dapat berkendara pada putaran mesin yang lebih rendah untuk menghasilkan akselerasi yang sama. Putaran mesin yang lebih rendah umumnya menghasilkan penggunaan bahan bakar yang lebih efisien. Pengurangan Waktu di Zona Inefficient: Responsivitas yang lebih baik memungkinkan kendaraan lebih cepat melewati zona putaran yang tidak efisien (seperti saat akselerasi dari idle), sehingga mengurangi total penggunaan bahan bakar.

Optimasi Boost Pressure: Pengaturan boost pressure turbocharger yang lebih optimal meningkatkan efisiensi volumetrik tanpa meningkatkan penggunaan bahan bakar secara berlebihan.

Perlu dicatat bahwa peningkatan efisiensi ini diperoleh dalam kondisi penggunaan normal oleh pengemudi yang berpengalaman. Jika pengemudi memanfaatkan peningkatan performa untuk berkendara lebih agresif, penggunaan bahan bakar dapat meningkat dibandingkan kondisi standar.

3) Emisi Gas Buang

Salah satu perhatian utama dalam remapping ECU adalah dampaknya terhadap emisi gas buang. Pengujian emisi dilakukan menggunakan gas analyzer untuk mengukur kandungan CO, HC, CO_2, dan O_2.

Tabel 8 Perbandingan Emisi Gas Buang Standar vs Remap ECU (pada 2800 rpm)

Parameter Emisi	**Kondisi Standar**	**Setelah Remap ECU**	**Perubahan**	**Batas Standar**
CO (%)	0,08	0,12	+0,04 (+50%)	< 0,5
HC (ppm)	15	22	+7 (+46,7%)	< 100
CO_2 (%)	7,5	8,2	+0,7 (+9,3%)	-
O_2 (%)	12,3	11,8	-0,5 (-4,1%)	-
Opacity (%)	18	25	+7 (+38,9%)	< 70

Hasil pengujian menunjukkan bahwa remapping ECU menyebabkan peningkatan emisi gas buang, namun masih berada dalam batas yang diizinkan oleh standar emisi Indonesia:

Carbon Monoxide (CO): Meningkat dari 0,08% menjadi 0,12%, masih jauh di bawah batas 0,5%. Peningkatan ini mengindikasikan pembakaran yang sedikit lebih kaya (rich mixture) pada kondisi tertentu.

Hydrocarbon (HC): Meningkat dari 15 ppm menjadi 22 ppm, masih sangat rendah dibandingkan batas 100 ppm. HC yang rendah menunjukkan bahwa pembakaran masih berlangsung cukup sempurna.

Carbon Dioxide (CO_2): Meningkat dari 7,5% menjadi 8,2%. Peningkatan CO_2 sebenarnya menunjukkan pembakaran yang lebih sempurna, karena CO_2 adalah produk akhir dari pembakaran yang lengkap.

Oxygen (O_2): Menurun sedikit dari 12,3% menjadi 11,8%, mengindikasikan bahwa lebih banyak oksigen yang digunakan dalam proses pembakaran.

Opacity (Kekeruhan Asap): Meningkat dari 18% menjadi 25%, namun masih jauh di bawah batas 70%. Peningkatan opacity menunjukkan adanya sedikit peningkatan partikulat di gas buang, yang umum terjadi pada mesin diesel dengan peningkatan performa.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan:

1) Penggunaan Bahan Bakar:
- Penggunaan terendah terjadi pada idle (750 rpm): ±0,6 L/jam
- Penggunaan meningkat linear dengan kenaikan RPM
- Peningkatan signifikan terjadi di atas 2800 rpm

2) Specific Fuel Consumption (SFC):
- SFC optimal berada pada rentang 2000-2400 rpm
- SFC tertinggi pada idle dan RPM tinggi
- Menunjukkan efisiensi terbaik pada putaran sedang

3) Daya dan Torsi:
- Torsi maksimal tercapai pada 2400-2800 rpm
- Daya meningkat linear dengan RPM
- Karakteristik sesuai spesifikasi pabrikan

4) Emisi Gas Buang:
- Emisi terendah pada putaran idle optimal (750 rpm)
- Emisi meningkat pada RPM tinggi
- Masih dalam batas standar Euro 4

5) Dampak Remapping ECU:
- Peningkatan daya sekitar 10% (dari 149 PS menjadi ±164 PS)
- Efisiensi bahan bakar meningkat 2-3 km/L Respons throttle lebih baik
- Perlu monitoring jangka panjang untuk durabilitas

6) Putaran Idle Optimal:
- 750-800 RPM untuk kondisi normal
- 780-820 RPM dengan beban AC
- Menghasilkan efisiensi terbaik dan kenyamanan optimal

Saran

A. Untuk Penelitian Selanjutnya:
1. Lakukan pengujian dengan durasi lebih panjang untuk validasi data
2. Gunakan lebih banyak sampel kendaraan untuk generalisasi hasil
3. Tambahkan pengukuran getaran dan kebisingan
4. Analisis dampak jangka panjang remapping ECU
5. Penelitian komparatif dengan model kendaraan lain

B. Untuk Pengguna Kendaraan:
1. Pertahankan putaran idle standar (750-800 rpm)
2. Hindari idle terlalu lama (>5 menit)
3. Lakukan perawatan rutin sesuai jadwal
4. Gunakan bahan bakar berkualitas
5. Pertimbangkan matang sebelum remapping ECU

C. Untuk Mekanik:
1. Gunakan scan tool untuk diagnosis idle yang tepat
2. Periksa komponen sistem idle secara berkala
3. Dokumentasikan hasil servis dengan baik
4. Berikan edukasi kepada pemilik kendaraan

DAFTAR PUSTAKA

Aditya, —Rancang Bangun Fuel Meter Untuk Mengukur Penggunaan Bahan Bakar Pada Mesin Diesel Isuzu C190,‖ Surabaya, 2014.

alatuji.com, —Mengenal Data Logger Dan Pengaplikasiannnya,‖ alatuji.com, 2020. http://www.alatuji.com/m/article/detail/836/mengenal-data-logger-dan-pengaplikasiannnya (accessed May 10, 2020).

Bidarvatan, M. et al. (2014) ‗Cycle-to-cycle modeling and sliding mode control of blended-fuel HCCI engine', Control Engineering Practice. Elsevier, 24(1), pp. 79–91. doi: 10.1016/j.conengprac.2013.11.008.

Bosch, —Lambda Sensor LSU 4.9 Measurement of oxygen content.‖ [Online]. Available: www.bosch sensoren.de.

Bosch, —Lambda Sensor LSU 4.9,‖ 2020. [Online]. Available: www.bosch-motorsport.de.

Dik, A. et al. (2017) ‗Conceptual Design of a 3- Shaft Turbofan Engine with Reduced Fuel Consumption for 2025', Energi Procedia. Elsevier B.V., 142, pp. 1728– 1735. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.556.

Gunawan, F. E. et al. (2019) ‗A study of the sensitivity of the fuel consumption to driving strategy by micro simulation', Procedia Computer Science. Elsevier B.V., 157, pp. 375–381. doi: 10.1016/j.procs.2019.08.228.

Harantová, V., Otáhalová, Z. and Kasanický, M. (2019) ‗Estimation of fuel consumption based on data from opening fuel injector valve', Transportation Research Procedia. Elsevier B.V., 40, pp. 236–243. doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.036.

Iida, N. et al. (1997) ‗Stability of autoignition and combustion in low-heat-rejection, ceramic methanol ATAC engine (Analysis of cyclic variation at high wall temperature and lean burn)', Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 63(614). doi: 10.1299/kikaib.63.3469.

Mirzazoni, Zaini, and R. Raharjo, —Perancangan Sistem Pengukuran Penggunaan Bahan Bakar Kendaraan Bermotor Berbasis Arduino,‖ in Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATi) 2016, 2016, pp. 31–35.

Motec, —Bosch LSU 4.9 Sensor Data Sheet #57006 rev 2.1,‖ Victoria.

P. X. Pham, D. Q. Vo, and R. N. Jazar, —Development of fuel metering techniques for spark ignition engines,‖ Fuel, vol. 206, pp. 701–715, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.06.043.

Sensore, —Data sheet Oxygen sensor.‖ [Online]. Available: www.sensore-electronic.com.

x-engineer.org, —Air-fuel ratio, lambda and engine performance,‖ x-engineer.org, 2020. https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/air-fuel-ratio lambda-engine-performance/ (accessed May 12, 2020).

Y. T. Zhang, C. G. Claudel, M. bin Hu, Y. H. Yu, and C. L. Shi, —Develop of a fuel consumption model for hybrid vehicles,‖ Energi Conversion and Management, vol. 207, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112546.