

Perbandingan Kinerja Toyota Kijang Model Innova G Produksi Tahun 2005 dan 2007 dengan Sistem *Electrical Fuel Injection* (EFI)

Joni^{1✉}, Pither Palamba²

^{1, 2} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diserahkan : 24-08-2023

Direvisi : 30-08-2023

Diterima : 02-09-2023

Kata Kunci:

Putaran Motor, Efisiensi, Sistem Bahan Bakar, Emisi Gas Buang

Keywords :

Engine Speed, Efficiency, Fuel System, Exhaust Emissions

ABSTRAK

Meningkatnya penggunaan kendaraan roda empat dalam transportasi darat dewasa ini memberikan kenyamanan dalam mobilisasi. Efek samping peningkatan emisi gas buang yang dihasilkan oleh kendaraan, juga ikut meningkat. Setiap merek dan model kendaraan roda empat memiliki ciri khasnya masing-masing. Salah satu contohnya adalah Innova EFI, merupakan model yang diproduksi oleh Toyota dan menggunakan sistem injeksi bahan bakar secara elektronik. Mobil ini memiliki kapasitas untuk mengurangi penggunaan bahan bakar serta mengurangi dampak polusi pada tahap pembakaran. Tujuan dari studi ini adalah untuk menginvestigasi hubungan antara variasi beban motor terhadap komposisi gas buang yang dihasilkan. Pengukuran melibatkan penggunaan alat ukur gas analyzer dan torsi meter. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa efisiensi termal mencapai puncaknya pada 4000 rpm, untuk model Innova tahun 2005 efisiensi mencapai 29,49%, dan Innova tahun 2007 efisiensinya sebesar 28,93%. Kendaraan Toyota Innova tahun 2007 memiliki kadar emisi terendah, dengan tingkat CO sebesar 1,38% dan HC sebesar 136 ppm.

ABSTRACT

The increasing use of four-wheeled vehicles in land transportation now provides comfort in mobilization. The side effect of increasing exhaust emissions produced by vehicles is also increasing. Each make and model of four-wheeled vehicle has its own characteristics. One example is the Innova EFI, a model manufactured by Toyota and using an electronic fuel injection system. This car can reduce fuel consumption and reduce the impact of pollution at the combustion stage. The aim of this research is to determine the relationship between motor load variations and the composition of the exhaust gas produced. The measurements involve the use of a gas analyzer and a torque meter. The results showed that thermal efficiency reached its peak at 4000 rpm, for the 2005 Innova model the efficiency reached 29.49%, and the 2007 Innova reached 28.93%. The 2007 Toyota Innova vehicle has the lowest emission levels, with CO levels of 1.38% and HC 136 ppm.

Corresponding Author :

Joni

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih

Jl. Kamp. Wolker - Kampus Baru Uncen Waena – Jayapura, Kode Pos 99352

Email: me.uncen@gmail.com

PENDAHULUAN

Satu permasalahan signifikan yang menjadi tantangan penduduk dunia saat ini adalah transformasi iklim global yang timbul dari polusi udara, khususnya di wilayah perkotaan besar. Masalah ini telah mengakibatkan penurunan mutu udara, mengganggu kenyamanan hidup, bahkan berdampak negatif pada kesehatan manusia serta keseimbangan lingkungan global. Penurunan mutu udara ini utamanya disebabkan oleh pemakaian bahan bakar fosil pada industri dan transportasi, yang sebagian besar terpusat di pusat-pusat perkotaan (Kuntandi & Sutrisno, 2016). Penelitian telah menunjukkan bahwa lebih dari separuh polusi udara berasal dari sektor transportasi, terutama dari kendaraan bermotor yang menggunakan bensin sebagai bahan bakar.

Polusi udara yang diakibatkan oleh gas buang kendaraan bermotor, meliputi CO, HC, NO₂, SO₂, Pb, dan partikulat debu. Dari beberapa jenis gas buang, CO dan HC memberikan nilai yang signifikan dalam emisi gas buang kendaraan bermotor, terutama pada kendaraan yang menggunakan bahan bakar bensin (Wijayanto *et al*, 2014). Gas CO merupakan hasil utama dari proses pembakaran yang tidak sempurna, sedangkan gas HC terbentuk akibat bahan bakar yang tidak terbakar sepenuhnya, tetapi sudah keluar bersama-sama dengan gas buang.

Motor bensin merupakan alat yang mengubah energi dengan cara tidak langsung, yakni dari energi yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas, baru kemudian menjadi energi mekanis. Dengan kata lain, energi kimia dalam bahan bakar tidak langsung diubah menjadi energi mekanis. Bahan bakar standar yang digunakan pada motor bensin adalah isooktan dengan rumus C₈H₁₈. Efisiensi konversi energi dari bahan bakar menjadi tenaga mekanis pada motor bensin mencapai sekitar 30% (dengan variasi sekitar $\pm 30\%$ untuk efisiensi termal), hal ini terjadi karena berbagai kerugian, termasuk kerugian panas, gesekan mekanis, dan pembakaran yang tidak sempurna (Arianto *et al*, 2020).

Gas buang yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor terdiri dari zat-zat yang tidak bersifat beracun, seperti nitrogen (N₂), karbon dioksida (CO₂), dan uap air (H₂O), serta zat-zat beracun seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), oksida nitrogen (NO_x), partikel timbal (Pb), dan partikulat lainnya.

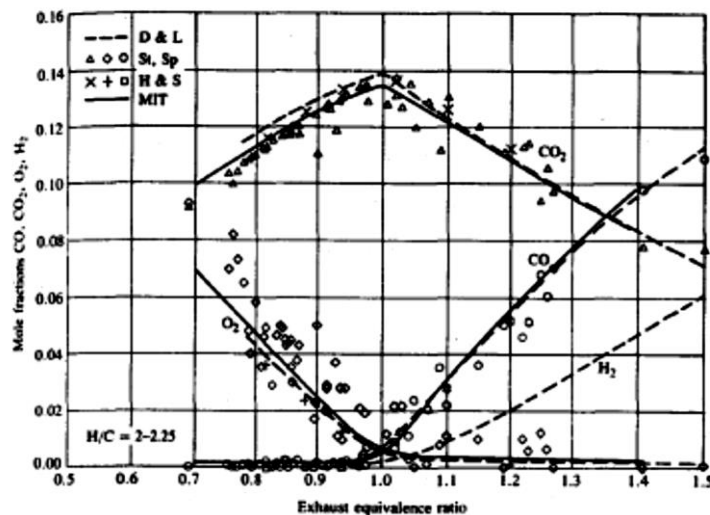
Emisi gas buang dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk rasio aktual antara bahan bakar dan udara (AFR) saat pembakaran, serta waktu pengapian dan desain motor). Jumlah emisi gas buang sangat tergantung pada desain motor dan kondisi operasionalnya (Kasab & Strzelec, 2020). Nilai rasio setara antara bahan bakar dan udara (ϕ), atau sebaliknya, perbandingan udara-bahan bakar (λ), memiliki dampak pada emisi gas buang sesuai dengan prinsip yang dikemukakan oleh Kasab & Strzelec, 2020.

- Pada *stoichiometri*, biasanya 0,5 % O₂ dan $\frac{3}{4}$ % CO.
- Pada campuran kurus, equivalenrasio (ϕ) menurun maka konsentrasi CO₂ rendah, konsentrasi O₂ meningkat dan CO rendah tetapi tidak sampai nol ($\sim 0,2$ %).
- Pada campuran kaya, konsentrasi CO dan H₂ terus meningkat dengan meningkatnya ϕ , konsentrasi CO₂ turun dan tingkat O₂ rendah tetapi tidak nol ($\sim 0,2 - 0,3$ %).

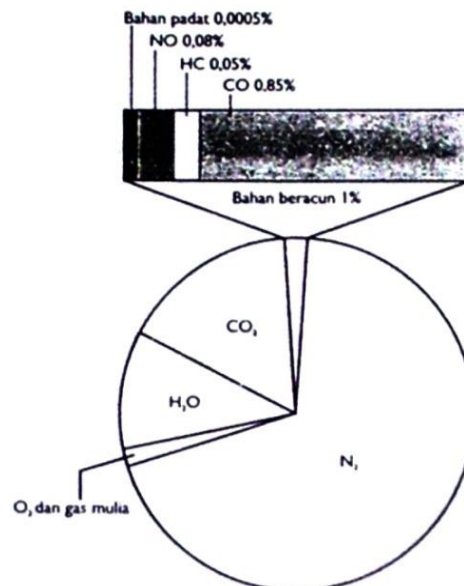
Pada motor konvensional, jika (Kirkpatrick, 2021):

- Saat perbandingan udara-bahan bakar kaya, konsentrasi oksida nitrogen (NO_x) menurun namun kadar hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) meningkat.
- Pada rasio udara-bahan bakar yang miskin, kandungan hidrokarbon (HC) dan karbon monoksida (CO) menurun namun konsentrasi oksida nitrogen (NO_x) meningkat.
- Dalam situasi perbandingan udara-bahan bakar yang sangat miskin, kadar karbon monoksida (CO) dan oksida nitrogen (NO_x) menurun namun konsentrasi hidrokarbon (HC) meningkat.

Dari pernyataan diatas, emisi merupakan fungsi AFR_{akt} sedangkan AFR_{akt} merupakan fungsi densitas. Dari persamaan $\alpha = \frac{AFR_{akt}}{AFR_{sot}}$ dimana $AFR_{akt} = \frac{G_{akt}}{G_f} (Kg_{udmx}/Kg_{bahan\ bakar})$, harga emisi bergantung pada harga α .



Gambar 1. Komposisi gas buang motor bensin dalam fraksi mol fungsi dari equivalen rasio bahan bakar-udara, (Heywood, 2018)



Gambar 2. Komposisi gas buang, (Ferrari *et al*, 2020)

Pada realitasnya, proses pembakaran di dalam motor tidak pernah berlangsung dengan sempurna, bahkan ketika motor telah dilengkapi dengan sistem kontrol yang canggih. Berikut adalah sebuah contoh dari reaksi pembakaran dalam motor bensin yang menggunakan komposisi bensin C_8H_{18} .

Dalam motor, bensin mengalami pembakaran karena tiga faktor krusial berikut (Ferrari *et al*, 2021):

- Bensin dan udara dicampur secara homogen dalam perbandingan berat 1:14,7.
- Campuran tersebut dikompres oleh gerakan piston sehingga mencapai tekanan 12 Bar dalam ruang silinder, menghasilkan pemanasan.
- Setelah itu, campuran ini bereaksi dengan panas yang dihasilkan oleh percikan api dari busi, menyebabkan terjadinya pembakaran pada tekanan tinggi yang mengakibatkan ledakan hebat.

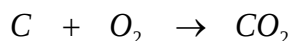
Pembakaran di dalam motor tidak mencapai tingkat kesempurnaan karena ada lima faktor yang mempengaruhinya (Heywood, 2018):

- Waktu pembakaran yang terbatas.
- Tumpang tindihnya bukaan katup.
- Udara yang masuk tidak murni, hanya mengandung oksigen.
- Bahan bakar yang masuk tidak murni, tidak hanya terdiri dari C_8H_{18} .
- Kompresi tidak selalu mencapai kerapatan sempurna.

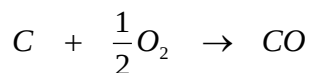
Kendaraan yang menggunakan bahan bakar bensin adalah sumber utama dari polusi udara di lingkungan perkotaan. Gas buang yang dihasilkan oleh motor bensin mencakup oksida nitrogen (NO dan NO_x), karbon monoksida (CO), serta senyawa organik yang tidak terbakar, yaitu hidrokarbon (HC). Jumlah gas-gas ini bervariasi berdasarkan rancangan motor dan kondisi operasionalnya, dengan kisaran emisi: NO_x antara 500 hingga 1000 ppm, CO sekitar 1-2%, dan HC mencapai 3000 ppm (Eriksson & Nielsen, 2014).

Karbon monoksida (CO) adalah gas yang cenderung tidak stabil dan mudah berikatan dengan unsur-unsur lain. Karbon monoksida dapat dengan mudah berubah menjadi CO_2 dengan sedikit oksigen dan panas. Saat motor bekerja dengan rasio bahan bakar-udara (AFR) yang tepat, emisi CO di ujung knalpot biasanya berada dalam kisaran 0,5% hingga 1,5% untuk motor yang dilengkapi dengan sistem injeksi bahan bakar (Heywood, 2018).

Jika proses pembakaran karbon dalam bahan bakar berlangsung secara penuh, maka akan timbul suatu reaksi yang menghasilkan CO_2 , sebagaimana dijelaskan reaksi berikut.



Namun, ketika kadar oksigen tidak mencukupi, proses pembakaran tidak akan berjalan dengan sempurna, sehingga karbon yang terkandung dalam bahan bakar akan mengalami pembakaran yang tidak lengkap, seperti yang diuraikan dalam reaksi kimia berikut ini.



Dengan kata lain, emisi karbon monoksida (CO) yang dihasilkan oleh kendaraan sangat dipengaruhi oleh komposisi campuran udara dan bahan bakar yang masuk ke ruang pembakaran (AFR). Untuk mengurangi kadar CO , proporsi campuran ini harus ditingkatkan dengan lebih banyak udara (lebih banyak udara daripada yang diperlukan untuk pembakaran sempurna). Namun, dampak dari tindakan ini adalah peningkatan emisi hidrokarbon (HC) dan oksida nitrogen (NO), serta penurunan output performa motor. Secara rata-rata, emisi CO dari motor bensin empat langkah, seperti motor karburator, berkisar antara 1,5-3,5%, sementara motor EFI berkisar antara 0,5-1,5% (Arianto *et al*, 2020).

Setiap molekul hidrokarbon (HC) yang terdapat dalam gas buang kendaraan mengindikasikan adanya bensin yang tidak terbakar dan terbangun bersama dengan hasil pembakaran yang belum sempurna. Walaupun perbandingan udara dan bensin sudah tepat dan didukung oleh desain ruang bakar motor saat ini yang mendekati optimal, sejumlah bensin tetap berpotensi untuk tidak terbakar dengan sempurna selama proses pembakaran. Ini mengakibatkan emisi HC yang cukup tinggi di ujung knalpot (Heywood, 2018).

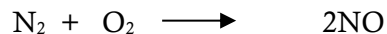
Untuk mengurangi emisi HC , diperlukan penambahan sedikit udara atau oksigen agar semua molekul bensin dapat berinteraksi dengan molekul oksigen untuk melakukan reaksi pembakaran secara sempurna. Hal ini mengartikan bahwa perbandingan udara-bahan bakar 14,7:1 (dikenal sebagai $\lambda = 1$) sebenarnya merupakan kondisi yang agak kaya akan udara. Hasilnya, kandungan oksigen dalam gas buang akan berkisar antara 0,5% hingga 1% (Heywood, 2018).

Sumber emisi hidrokarbon (HC) dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, dengan rincian sebagai berikut:

- a. Bahan bakar yang tidak berhasil terbakar dan dilepaskan dalam bentuk gas mentah.
- b. Bahan bakar yang mengalami dekomposisi akibat suhu tinggi, berubah menjadi molekul hidrokarbon lain yang dilepaskan bersamaan dengan gas buang.

Penyebab utama dari emisi hidrokarbon yang melebihi batas biasanya terkait dengan kesalahan dalam pencampuran udara dan bahan bakar. Rata-rata emisi hidrokarbon pada motor bensin empat langkah dalam kondisi normal adalah sekitar 200-400 ppm untuk motor karburator dan 50-200 ppm untuk motor injeksi bahan bakar (Eriksson & Nielsen, 2014).

Apabila ada kandungan nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2) pada suhu sekitar 1800 hingga 2000 derajat Celsius, akan terjadi reaksi pembentukan gas nitrat oksida (NO) seperti yang diuraikan di bawah ini.



Dalam atmosfer, nitrogen monoksida (NO) cenderung berubah menjadi nitrogen dioksida (NO_2). Dalam gas buang, komponen NO_x terdiri sebagian besar dari 95% NO, sekitar 3-4% NO_2 , dan jumlah sisanya termasuk N_2O , N_2O_3 , dan sejenisnya (Eriksson & Nielsen, 2014).

Konsentrasi karbon dioksida (CO_2) secara langsung mencerminkan kondisi pembakaran di dalam ruang bakar. Ketika rasio bahan bakar-udara (AFR) berada pada angka ideal, emisi CO_2 biasanya berada di kisaran 12% hingga 15%. Jika AFR terlalu kaya atau terlalu miskin, emisi CO_2 akan menurun secara signifikan. Jika konsentrasi CO_2 berada di bawah 12%, perlu dianalisis pula emisi komponen lain untuk mengetahui apakah AFR terlalu kaya atau miskin. Penting untuk diingat bahwa CO_2 dihasilkan hanya di dalam ruang bakar. Jika kadar CO_2 terlalu rendah namun emisi CO dan HC normal, itu bisa mengindikasikan adanya kebocoran pada saluran knalpot (Heywood, 2018).

Tingginya kandungan karbondioksida (CO_2) dalam gas buang mencerminkan kualitas pembakaran yang lebih baik dalam motor. Sebaliknya, kadar CO_2 yang rendah menunjukkan efisiensi pembakaran yang buruk dan juga mencerminkan performa motor yang kurang baik. Selain itu, hal ini juga dapat menyebabkan peningkatan kadar CO dan HC dalam emisi gas buang serta konsumsi bahan bakar yang meningkat. Rata-rata kadar CO_2 pada motor bensin empat langkah dalam kondisi normal adalah sekitar 12-15% untuk motor karburator dan sekitar 12-16% untuk motor injeksi bahan bakar (Richard, 2021).

Kehadiran oksigen (O_2) dalam konsentrasi gas buang kendaraan memiliki hubungan terbalik dengan kandungan karbondioksida (CO_2). Untuk mencapai pembakaran yang sempurna, penting bahwa suplai oksigen (O_2) ke dalam ruang bakar cukup untuk setiap molekul hidrokarbon (Heywood, 2018).

Secara umum, konsentrasi oksigen dalam gas buang biasanya sekitar 1,2% atau lebih rendah, bahkan mungkin mencapai 0%. Ini mengindikasikan bahwa seluruh oksigen telah digunakan dalam proses pembakaran, yang berarti rasio bahan bakar-udara (AFR) cenderung berlebih. Ketika konsentrasi oksigen tinggi, ini bisa menunjukkan AFR yang terlalu miskin, tetapi juga bisa menandakan kondisi lain seperti kurangnya katalitik converter pada mobil jika kadar oksigen terlalu tinggi, dan keberadaan rendah bisa mengindikasikan adanya kebocoran pada sistem knalpot (Heywood, 2018).

Pembakaran yang tidak sempurna dalam motor menghasilkan kelebihan oksigen yang dilepaskan ke udara. Semakin tinggi kandungan oksigen (O_2) dalam gas buang, itu mengindikasikan keberadaan campuran bahan bakar dan udara yang lebih miskin. Pada umumnya, kandungan oksigen (O_2) dalam gas buang motor bensin empat langkah dalam kondisi normal adalah sekitar 0,5-2% untuk motor karburator dan 0,5-2% untuk motor injeksi bahan bakar (Ferrari *et al*, 2021).

Air (H_2O) adalah hasil dari reaksi pembakaran di dalam ruang bakar, dan jumlah uap air yang dihasilkan tergantung pada kualitas bahan bakar yang digunakan. Semakin banyak uap air yang ada dalam pipa gas buang, semakin baik proses pembakaran terjadi. Jika kandungan uap air

semakin besar, pipa knalpot akan tetap bersih, yang mengindikasikan bahwa emisi yang dihasilkan semakin bersih (Richard, 2014).

Menurut teori stoikiometri, untuk mengoksidasi 1 gram bensin secara sempurna, dibutuhkan sekitar 14,7 gram oksigen. Dengan kata lain, rasio ideal antara bahan bakar dan udara adalah 14,7:1. Perbandingan ini dikenal sebagai AFR (Air Fuel Ratio) atau rasio udara dan bahan bakar (Han, 2021).

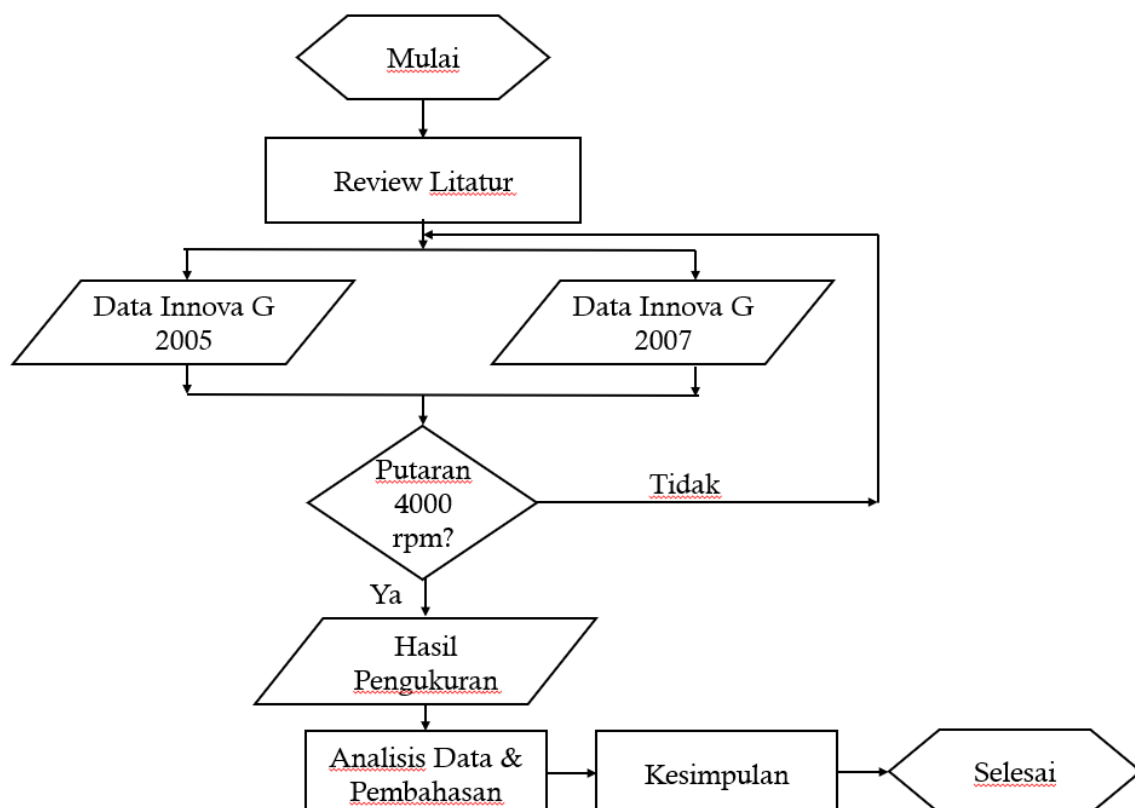
Alat pengujian emisi yang digunakan dalam proses pengujian dilengkapi dengan pengukur nilai lamda (λ) atau AFR (rasio udara dan bahan bakar). Nilai ini mampu mengindikasikan kondisi campuran udara dan bahan bakar di dalam motor. Peralatan pengujian emisi yang menggunakan istilah AFR dapat menampilkan nilai yang dapat diamati, misalnya (Ferrari *et al*, 2020):

- Ketika $AFR = 14,7$, ini mengindikasikan campuran yang mencapai kondisi ideal.
- Saat $AFR > 14,7$, ini menunjukkan bahwa campuran berada dalam kondisi kurus atau miskin.
- Apabila $AFR < 14,7$, ini menggambarkan bahwa campuran berada dalam keadaan gemuk atau kaya.

Dalam proses pembakaran di dalam motor terjadi pembentukan CO dan H_2 akibat pembakaran yang tidak sempurna, karena kekurangan udara, maka hal ini akan terjadi kerugian kalor.

METODE PENELITIAN

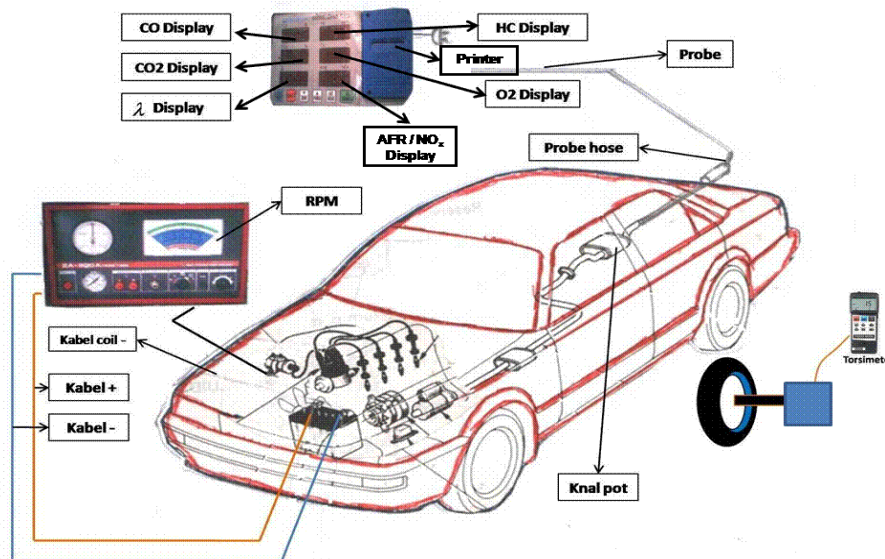
Tahapan penelitian yang dilakukan mengikuti digram pada Gambar 3 yang terdiri dari review litatur, pengumpulan data spesifikasi kendaraan, pengukuran, analisis data dan pembahasan serta membuat kesimpulan dari hasil pengujian yang dilakukan.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Peralatan dan bahan yang digunakan terdiri dari bensin, *engine test*, *exhaust gas analyzer*, dan *dynotest*, dengan spesifikasi lengkap disajikan pada Tabel 1. Sebelum pengujian dilaksanakan, telah

dipastikan semua spesifikasi motor/ kendaraan sudah disetting dengan benar (Gambar 4), kemudian motor dipanaskan setelah mencapai kondisi operasi putaran dinaikkan sampai 1500 *rpm* dan dipertahankan konstan selama satu menit, posisikan/letakkan kendaraan pada alat uji dynotest. Lepas selang bahan bakar dari tangki, kemudian masukkan ujungnya ke gelas ukur yang berisi bahan bakar. Memasukkan probe gas analyzer sedalam 30 cm dari ujung pipa gas buang dan pastikan bahwa tidak ada kebocoran pipa gas buang, agar udara luar tidak mempengaruhi komposisi gas buang. Setelah 1 menit pada putaran idle, catat emisi gas buang dan konsumsi bahan bakar. Masukkan (posisikan) gigi persnelling 4, kemudian atur pedal gas sampai putaran motor mencapai 1500 *rpm*, setelah 1 menit catat torsi roda, emisi gas buang dan konsumsi bahan bakar.



Gambar 4. Set-up pengukuran

Ulangi langkah selanjutnya untuk putaran motor 2000, 3000, 4000 dan 5000 rpm. Pengujian dilakukan masing-masing pada kedua jenis kendaraan yang telah disiapkan.

Tabel 1. Spesifikasi Alat Ukur

Alat Ukur	Spesifikasi
<i>Engine test</i>	▪ Merek LAUNCH X431 PRO3S + V2.0 HDIII 12V Mobil 24V ▪ Sistem operasi: Android 10.0 ▪ Memori: 4GB ▪ Penyimpanan: 64GB ▪ Baterai: 12600mAh \ 3.7V ▪ Layar: 10 inci ▪ Kamera: kamera depan 8.0MP, kamera belakang 8.0MP ▪ Jaringan: Wi-Fi, WLAN 802.11b/g/n ▪ Bluetooth: Bluetooth 5.1 ▪ Suhu bekerja: 32°F -122°F (0°C - 50°C) ▪ Suhu penyimpanan: 4°F ~ 140°F (-20°C ~ 60°C)
<i>Exhaust gas analyzer</i>	▪ Merek: Nova 4000 ▪ Method of Detection: CO, CO₂, and HC by infrared detector / NO and O₂ by electrochemical sensor RPM by inductive tachometer ▪ Available Ranges: 0-25.0% O₂ 0-10.00% CO 0-20.0% CO₂ 0-10,000 PPM HC (as n-Hexane) 0-5,000 PPM NO_x (as NO only) 0-30,000 RPM (as kRPM) 0-50% AFR calculation (air to fuel ratio) 0-5% Lambda calculation

	▪ Resolution: 0.1% or 1% on % ranges, 0.01% on CO, 1 PPM on most PPM ranges, 1000 RPM ▪ Accuracy: $\pm 1\%$ of full scale for O₂, CO, CO₂, and HCs; $\pm 2\%$ of full scale for NO ▪ Response Time (T90): 8-10 seconds ▪ Ambient Temperature Range: 2°C to 40°C (35°F to 113°F) ▪ Size And Weight: approx. 33.5W x 27.4L x 16.5D cm @ 4.1kg (13"W x 11"L x 6 1/2"D @ 9lbs) ▪ Power: 115 VAC or 220VAC, 50/60Hz. Also 12VDC for cigarette lighter socket ▪ Optional Outputs: 0-1, 0-5, 0-10 VDC, RS232 serial with custom protocol
<i>Dynotest</i>	▪ Merek: Iqutech dynamex dengan komputer windows 8 64bit sport device dynotest software, dengan roler dynoMex DW-25 ▪ Dimensi (LxWxH): 2,21m x 0,8m x 0,75m ▪ Power maksimum dinamis: 150 hp, ▪ Kecepatan maksimum: 300 Km/h, ▪ Daya: 1500 Watt

Besarnya kerugian kalor dapat dihitung dengan persamaan (Ferary et al, 2020) adalah

$$\begin{aligned}
 (\Delta H_1)_{\text{chem}} &= (\Delta H_1)_{\text{CO}} + (\Delta H_1)_{\text{H}_2} \\
 &= 114 \times 10^6 (1 - \lambda) A_{\text{th}} (\text{J/kg})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$A_{\text{th}} = \frac{1}{0.21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right) - \frac{O}{32} \quad (\text{kmole})$$

Gaya Traksi Roda (F_R)

$$F_R = \frac{T_R}{r_R} \quad (\text{N}) \tag{2}$$

dimana,

$$\begin{aligned}
 T_R &= \text{Torsi roda (Nm)} \\
 r_R &= \text{Jari-jari roda kendaraan (m)}
 \end{aligned}$$

Torsi Motor (T_M), (Kett, 1982)

$$T_M = \frac{T_R}{r_t \cdot r_g \cdot \eta_t} \quad (\text{Nm}) \tag{3}$$

dimana,

$$\begin{aligned}
 T_R &= \text{Torsi roda (Nm)} \\
 r_g &= \text{Rasio gigi gardan} \\
 r_t &= \text{Perbandingan gigi transmisi} \\
 \eta_t &= \text{Efisiensi transmisi}
 \end{aligned}$$

Daya efektif (N_e)

$$N_e = T_M \times \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{kW}) \tag{4}$$

dimana, n adalah putaran motor (*rpm*)

Pemakaian bahan bakar (G_f)

$$G_f = \frac{V_f}{1000} \times t \times \rho_f \text{ (kg/h)} \quad (5)$$

Pemakaian bahan bakar spesifik (*SFC*)

$$SFC = \frac{G_f}{Ne} \text{ (kg/kW.h)} \quad (6)$$

Total, energi bahan bakar (Q_{tot})

$$Q_{tot} = \frac{G_f \cdot LHV}{3600} \text{ (kW)} \quad (7)$$

LHV Premium = 44.000 kJ/kg

Efisiensi termal (η_{th})

$$\eta_{th} = \frac{Ne}{Q_{tot}} \times 100\%$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mengacu di Tabel 3 dan Gambar 5, menunjukkan torsi motor yang memiliki kecenderungan meningkat seiring peningkatan putaran motor, dan mencapai puncaknya pada putaran motor (n) = 4000 rpm. Pada titik ini, untuk mobil Innova tahun 2005, torsi mencapai 137,52 Nm, sementara Innova tahun 2007 mencapai 132,41 Nm. Setelah itu, torsi motor mengalami penurunan. Begitu pula, daya efektif (Ne) juga meningkat seiring peningkatan putaran motor. Hal ini disebabkan waktu perpindahan sistem transmisi pada putaran tinggi yang lambat akan memberikan dampak pada pemakaian bahan bakar yang lebih boros dan menghasilkan torsi yang lebih kecil.

Table 2. Hasil Pengujian

Merk, Type, Vol.,	PUT.	POSISI	λ	O2	CO	CO2	HC	AFR	Gf	TR
	MOTOR (rpm)	PEDAL GAS		(%)	(%)	(%)	(ppm)		(kg/h)	(Nm)
Innova G (EFI, 1998cc, 2005)	850	0	0.13	1.42	12.4	12.4	105	14.43	2.5002	0
	1500	1	0.14	1.01	13.7	13.7	86	14.66	4.5009	408.921
	2000	2	0.16	0.31	14.9	14.9	78	14.76	6.8013	467.513
	3000	3	1.04	0.27	14.3	14.3	63	16.21	11.821	556.467
	4000	4	2.12	0.26	12.8	12.8	69	17.7	15.987	599.072
	5000	5	2.97	0.25	12.5	12.5	74	17.73	18.463	552.852
Innova G (EFI, 1998cc, 2007)	850	0	0.979	0.16	1.38	12.7	136	14.39	2.4759	0
	1500	1	0.989	0.19	1.01	13.9	112	14.69	4.4901	412.580
	2000	2	1.002	0.21	0.38	14.8	97	14.73	6.5259	461.196
	3000	3	1.105	1.97	0.34	14.2	78	16.24	11.532	547.363
	4000	4	1.207	3.27	0.33	13.1	86	17.74	15.690	576.811
	5000	5	1.209	3.37	0.33	12.8	87	17.77	18.185	534.599

Pengujian ini mencapai batas putaran motor maksimum 5000 rpm, dan hasilnya menunjukkan daya efektif Innova tahun 2005 mencapai 65,38 kW, sedangkan Innova tahun 2007 mencapai 63,76 kW. Dalam hal konsumsi bahan bakar spesifik, terlihat bahwa tendensinya akan

menurun berbanding lurus putaran motor (n) yang meningkat, kemudian akan kembali mengalami peningkatan. Pada putaran motor (n) = 4000 rpm, penggunaan bahan bakar spesifik (SFC) mencapai nilai terendah. Untuk Innova tahun 2005, SFC mencapai 0,277 kg/kWh, dan untuk Innova tahun 2007 mencapai 0,283 kg/kWh.

Hubungan antara putaran motor (n) dengan efisiensi termal (η_{th}) menunjukkan bahwa efisiensi termal cenderung meningkat seiring kenaikan putaran motor, kemudian mengalami penurunan. Efisiensi termal mencapai nilai tertinggi pada putaran motor 4000 rpm, yakni 29,49% untuk Innova 2005 dan 28,93% untuk Innova tahun 2007. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pembakaran pada mobil Toyota Innova Tahun 2005 memiliki tingkat kelengkapan yang sedikit lebih baik.

Dari Tabel 2 dan Gambar 6, menyajikan kandungan emisi oksigen (O_2) saat kendaraan berada pada putaran idle (850 rpm) adalah sebagai berikut: untuk Toyota Innova Tahun 2005, kandungan O_2 mencapai 0,13% dengan koefisien kelebihan udara (λ) = 0,972, dan untuk Toyota Innova Tahun 2007, kandungan O_2 mencapai 0,16% dengan koefisien kelebihan udara (λ) = 0,979. Standar yang ditetapkan oleh Toyota Astra Motor adalah 2%, sementara Kasab & Strzelec (2020) menetapkan kisaran 0,5-2%. Kedua hasil pengujian menunjukkan kandungan O_2 yang lebih rendah dari batas yang ditetapkan, yang mengindikasikan bahwa kedua kendaraan yang diuji masih dalam kondisi normal.

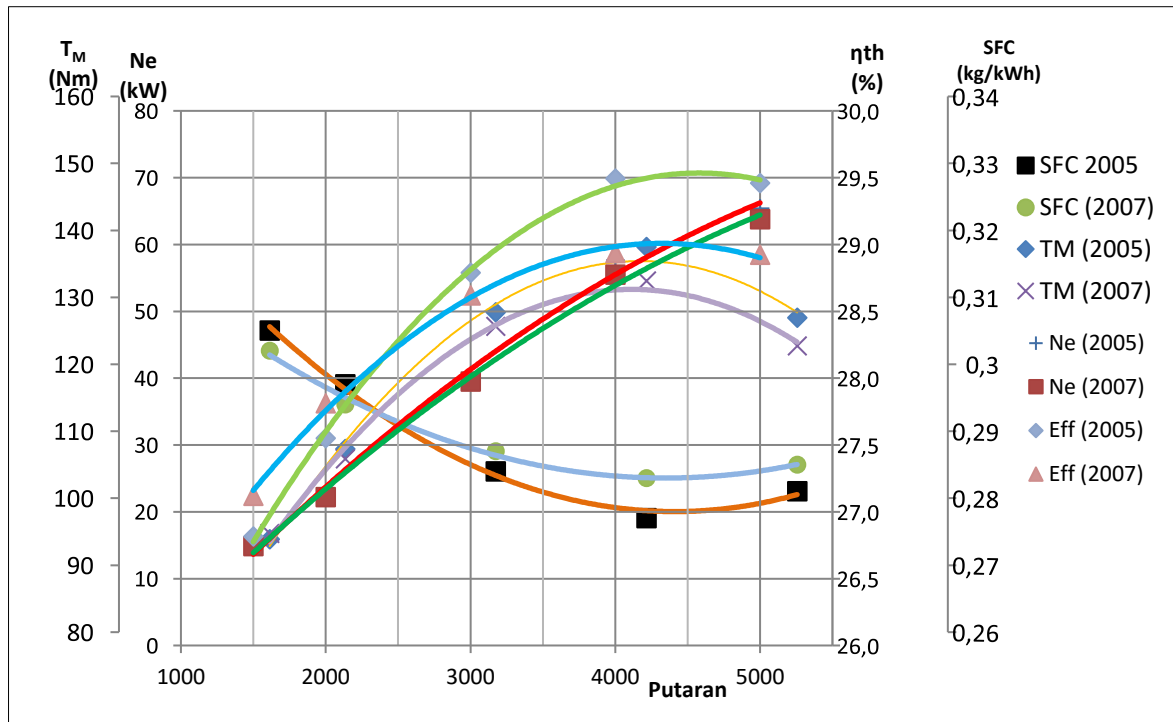
Table 3. Hasil Perhitungan

Merk, Type, Vol., Tahun	Putaran (rpm)	Gf (kg/h)	T _R (N.m)	T _M (N.m)	F _R (N)	Ne (kW)	SFC (kg/kW.h)	Q (kW)	η_{th} (%)
Innova G (EFI, 1998cc, 2005)	1500	4.5009	408.921	93.87	1328.22	14.75	0.305	55.011	26.81
	2000	6.8013	467.513	107.32	1518.53	22.49	0.297	83.127	27.55
	3000	11.821	556.467	127.74	1807.46	40.15	0.284	144.474	28.79
	4000	15.987	599.072	137.52	1945.84	57.63	0.277	195.393	29.49
	5000	18.463	552.852	126.91	1766.00	65.38	0.281	225.654	29.46
Innova G (EFI, 1998cc, 2007)	1500	4.4901	412.580	94.71	1340.10	14.88	0.302	54.879	27.12
	2000	6.5259	461.196	105.87	1498.01	22.18	0.294	79.761	27.81
	3000	11.532	547.363	125.65	1777.89	39.49	0.287	140.943	28.62
	4000	15.69	576.811	132.41	1873.54	55.49	0.283	191.763	28.93
	5000	18.185	534.599	122.72	1722.28	63.76	0.285	222.255	28.92

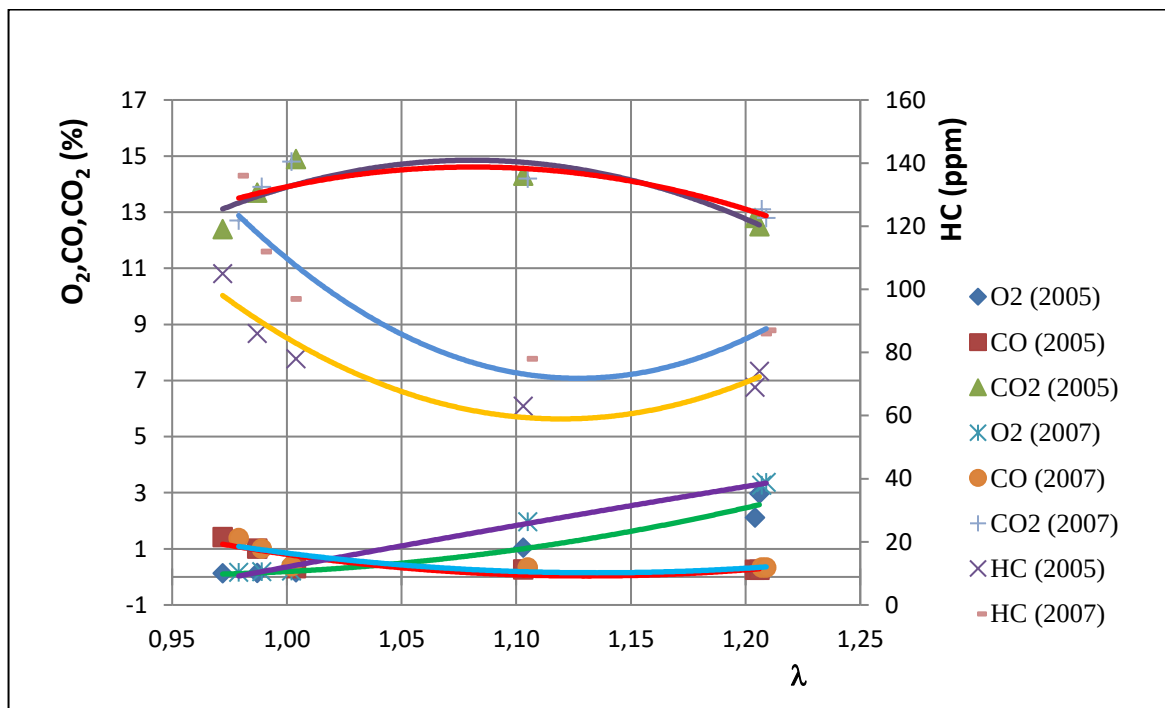
Konsentrasi emisi karbon monoksida (CO) pada kendaraan yang dilengkapi sistem EFI saat berada pada putaran idle (850 rpm) adalah sebagai berikut: untuk Toyota Innova Tahun 2005, kandungan CO mencapai 1,42% dengan λ = 0,972, dan pada Toyota Innova Tahun 2007, kandungan CO mencapai 1,38% dengan λ = 0,979. Standar yang ditetapkan oleh Toyota Astra Motor untuk sistem EFI adalah 3,5% volume, (Kasab & Strzelec, 2020) menetapkan kisaran 0,5-1,5%, (Heywood, 2018) menetapkan 1-2% volume, dan Richards (2014) menetapkan 4-6% volume. Kandungan CO yang diukur dalam pengujian berada di bawah batas yang ditetapkan, mengindikasikan bahwa kendaraan yang diuji dalam kondisi normal. Ketika nilai kandungan CO melampaui batas maksimum yang telah ditetapkan, ini mengindikasikan adanya masalah gas buang yang dihasilkan mobil. Konsentrasi gas CO yang tinggi akibat dari berkurangnya O yang dibutuhkan untuk mencapai pembakaran sempurna (Saravanan & Nagarajan, 2008).

Sementara itu, kandungan emisi karbondioksida (CO₂) pada putaran idle (850 rpm) kendaraan menunjukkan bahwa untuk Toyota Innova Tahun 2005, konsentrasi CO₂ mencapai 12,4% volume dengan λ = 0,972, dan pada Toyota Innova Tahun 2007, konsentrasi CO₂ mencapai 12,7% volume dengan λ = 0,979. Standar yang ditetapkan oleh Toyota Astra Motor dan Swisscontact adalah 12% volume. Hasil pengujian pada kedua kendaraan ini masih berada dalam kisaran yang dianggap normal karena melebihi batas standar yang ditetapkan. Tingginya

kandungan CO₂ mengindikasikan pembakaran yang semakin optimal, serta akselerasi yang lebih baik.



Gambar 5. Grafik Hubungan N_e , T_M , SFC dan η_{th} Vs Putaran



Gambar 6. Grafik Hubungan O₂, CO, CO₂ dan HC Vs λ

Konsentrasi emisi hidrokarbon (HC) pada kendaraan yang dilengkapi sistem EFI saat berada pada putaran idle (850 rpm) adalah sebagai berikut: untuk Toyota Innova Tahun 2005,

kandungan HC mencapai 105 ppm pada $\lambda = 0,972$, dan pada Toyota Innova Tahun 2007, kandungan HC mencapai 136 ppm pada $\lambda = 0,979$. Kedua hasil pengujian ini masih dalam batas normal karena nilai konsentrasi gas HC berada di bawah nilai batas maksimumnya yang ditetapkan oleh Toyota Astra Motor untuk motor EFI sebesar 300 ppm, Kasab & Strzelec (2020) menetapkan kisaran 50-200 ppm untuk motor injeksi, Richards (2014) menetapkan 500 - 1000 ppm, dan Heywood (2018) menetapkan 1000 - 3000 ppm. Semakin rendah kandungan HC mengindikasikan proses pembakaran berlangsung sesuai yang diharapkan dengan minimalnya sisa gas yang tidak terbakar setelah pembakaran dapat dikeluarkan bersama gas lainnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Daya efektif (N_e) naik berbanding lurus dengan peningkatan putaran motor. Untuk putaran motor 5000 *rpm*, daya efektif yang dihasilkan yaitu Innova tahun 2005 sebesar = 65,38 *kW* dan Innova tahun 2007 sebesar = 63,76 *kW*. Sedangkan konsumsi bahan bakar spesifik cenderung turun dengan naiknya putaran motor. Konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) terendah pada putaran motor (n) = 4000 *rpm*, yaitu Innova tahun 2005 sebesar 0,277 *kg/kW.h* sedangkan pada Innova tahun 2007 sebesar 0,283 *kg/kW.h*. Efisiensi termal cenderung naik dengan naiknya putaran motor dan kemudian turun kembali. Efisiensi thermal mencapai nilai tertinggi pada putaran motor 4000 *rpm*, yaitu Innova tahun 2005 sebesar 29,49 % dan Innova tahun 2007 sebesar 28,93 %. Kadar emisi gas buang terendah pada putaran motor 850 *rpm* (idle) yakni pada kendaraan Innova tahun 2007 dengan λ sebesar 0,979 masing-masing: CO sebesar 1,38 % dan turun seiring naiknya putaran hingga mencapai 0,25 % pada putaran 5000 *rpm*; sedangkan HC sebesar 136 *ppm* kemudian turun hingga 78 *ppm* pada putaran motor 3000 *rpm* dengan λ sebesar 1,103 dan naik kembali hingga pada putaran 5000 *rpm* sebesar 87 *ppm*.

Hasil pengukuran komposisi gas buang kendaraan yang diuji masih memenuhi standar ambang batas. Hasil pengukuran tersebut masih memenuhi standar ambang batas yang ditetapkan Pemerintah melalui Keputusan Menteri Perhubungan No 8/1990 yang menetapkan $CO \leq 4,5\%$ dan $HC \leq 1200$ *ppm*.

Saran

Pemilihan kendaraan roda empat perlu memperhatikan aspek hasil pengujian teknis performa mesin dan kondisi lapangan yang akan digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pimpinan Laboratorium Teknik Mesin Universitas Cenderawasih yang berkenan memberikan fasilitas untuk melaksanakan penelitian.

REFERENSI

- Arianto, I., Wijayanto, D.S., & Rohman, N. (2020). Pengaruh Pemanasan Bahan Bakar Melalui Pipa Tembaga Bersirip Radial Di Dalam Upper Tank Radiator dan Penambahan Etanol Pada Bahan Bakar Terhadap Konsumsi Bahan Bakar. *NOZEL*, 2(2), 129–136
- Eriksson, L & Nielsen, L. (2014). *Modeling and Control of Engines and Drivelines*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Ferrari, G., Onorati, A., & Gianluca D'Errico, G. (2022). *Internal Combustion Engines*, Società Editrice Esculapio.
- Han, Z. (2021). *Simulation and Optimization of Internal Combustion Engines*. US: SAE International

- Heywood, J.B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. NY: McGraw-Hill Book company.
- Kasab, J. & Strzelec, A. (2020). *Automotive Emissions Regulations and Exhaust Aftertreatment Systems*. US: SAE International
- Kett, P.W. (1982). *Motor Vehicle Science, Part 2*. US: Chapman and Hall Ltd.
- Kirkpatrick, A.T. (2021). *Internal Combustion Engines- Applied Thermosciences Fourth Edition*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Kuntandi, J. & Sutrisno. (2016). Desain Sistem Exhaust Toyota Kijang Innova Untuk Meningkatkan Performa. *Jurnal Teknik Mesin*, 16(1), 27–29.
- Richards, P. (2014). *Automotive Fuels Reference Book*, 3nd. US: SAE International
- Saravanan, N., & Nagarajan, G. (2008). An experimental investigation on performance and emissions study with port injection using diesel as an ignition source for different EGR flow rates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(16), 4456–4462.
- Wijayanto, D.S., Rohman, N., Ranto, R., Bugis, H., Sukisno, A.Y., & Qoribi, M.R. (2014) Pengaruh Pemanasan Bahan Bakar Melalui Pipa Bersirip Transversal Pada Upper Tank Radiator dan Penambahan Etanol Terhadap Emisi Gas Buang Pada Toyota Kijang. *JIPTEK*, 7(2), 25–33.