

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **IV.1. Variasi Campuran Bahan Bakar Pengujian**

Pada penelitian ini digunakan variasi campuran bahan bakar yang terdiri dari bahan bakar RON 90 dan RON 92 yang dicampur dengan bioetanol berbasis tebu. Variasi campuran yang digunakan meliputi kadar bioetanol sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% untuk masing-masing jenis bahan bakar. Pembuatan campuran dilakukan dengan perbandingan tertentu untuk memastikan komposisi yang sesuai dan homogen sebelum dilakukan pengujian.



**Gambar IV. 1** Variabel Variasi Penelitian

Campuran bahan bakar dibuat dengan variasi kadar bioetanol sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% pada masing-masing jenis bahan bakar, yaitu RON 90 dan RON 92. Proses pencampuran dilakukan secara bertahap dengan perbandingan tertentu untuk memastikan homogenitas campuran sebelum dilakukan pengujian.

#### **IV.2. Hasil Percampuran RON 90 dan Bioetanol**

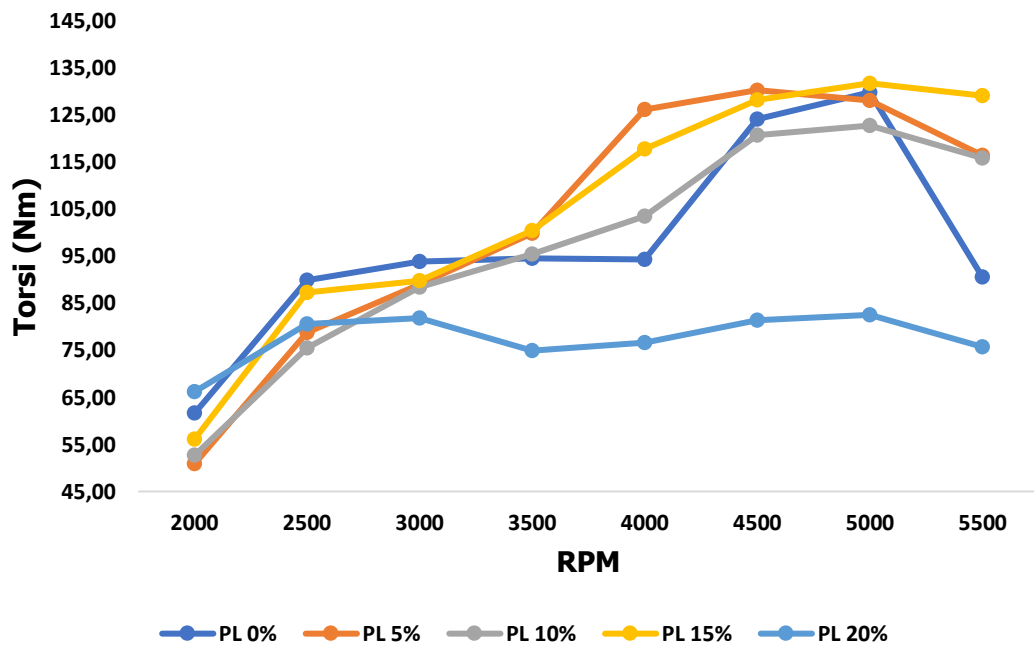
Pengumpulan data mengenai performa, konsumsi bahan bakar spesifik, dan pelepasan gas buang dilakukan pada campuran RON 90 yang dicampur dengan bioetanol.

#### IV.2.1. Pengaruh Bahan Bakar RON 90 dan Bioetanol terhadap Torsi dan Daya

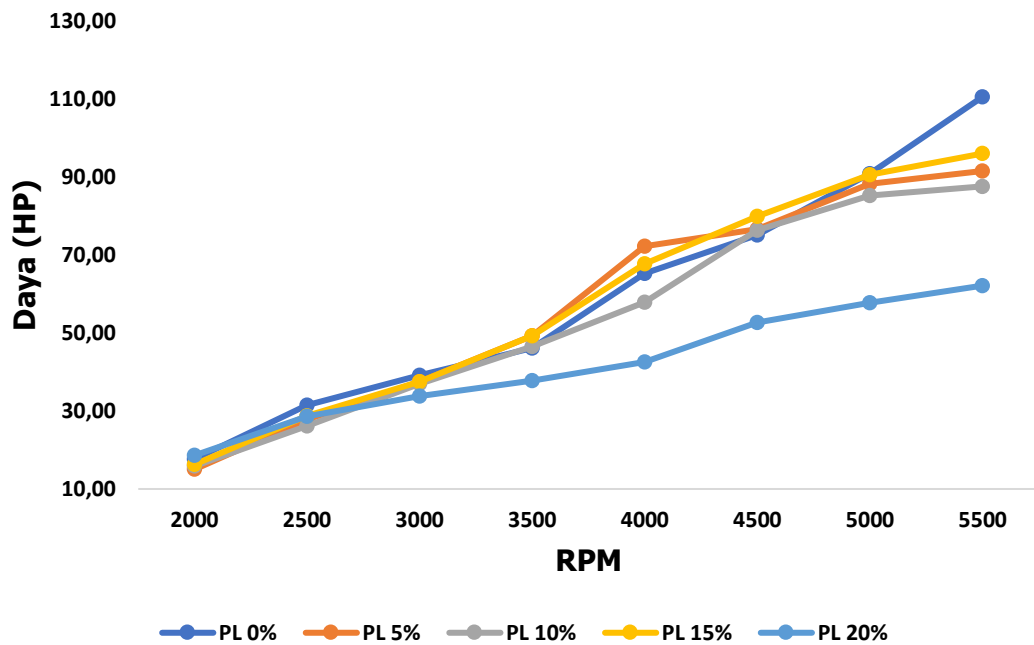
Pengujian performa kendaraan dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi campuran bahan bakar. Berikut hasil pengujian dari performa kendaraan berupa torsi dan daya :

**Tabel IV. 1** Tabel Rata-Rata Hasil Torsi & Daya Campuran RON 90 dan Bioetanol

Pengujian Dyno	PL 0%		PL 5%		PL 10%		PL 15%		PL 20%	
	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)
2000 RPM	61,62	17,64	50,88	15,01	52,66	15,85	56,09	16,26	66,19	18,60
2500 RPM	89,87	31,49	78,84	27,72	75,56	26,14	87,35	28,78	80,56	28,63
3000 RPM	93,90	39,13	88,96	37,51	88,42	36,87	89,81	37,44	81,86	33,82
3500 RPM	94,60	46,12	99,90	49,17	95,52	46,47	100,42	49,21	74,90	37,68
4000 RPM	94,29	65,14	126,23	72,11	103,54	57,81	117,86	67,63	76,68	42,56
4500 RPM	124,17	75,06	130,33	76,51	120,80	76,18	128,23	79,75	81,38	52,62
5000 RPM	129,87	90,78	128,17	88,06	122,80	85,12	131,80	90,40	82,55	57,70
5500 RPM	90,57	110,37	116,40	91,40	115,90	87,47	129,17	95,87	75,78	62,06



**Gambar IV. 2** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 90 Terhadap Torsi



**Gambar IV. 3** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 90 Terhadap Daya

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja mesin yang terlihat pada grafik, variasi campuran bahan bakar RON 90 dan Bioetanol (PL) memberikan dampak yang signifikan terhadap torsi dan daya pada setiap tingkat putaran mesin. Sebagai acuan dasar yang tertulis pada Bab 3, mesin Mitsubishi Xpander 1.5L MIVEC DOHC (4A91) yang digunakan dalam pengujian ini memiliki spesifikasi performa pabrikan berupa daya maksimum 105 PS (sekitar 104-105 HP) pada 6000 rpm dan torsi maksimum 141 Nm pada 4000 rpm.

Dalam parameter torsi, pengujian *chassis dynamometer* menunjukkan bahwa nilai maksimum tertinggi dicapai oleh campuran PL 15% sebesar 132 Nm pada 5000 rpm. Angka torsi ini berada sedikit di bawah spesifikasi pabrikan (141 Nm). Hal ini merupakan fenomena yang sangat wajar karena pengujian dilakukan langsung pada roda (*wheel horsepower/torque*), sehingga terjadi penyusutan tenaga (*drivetrain loss*) akibat gesekan transmisi dan gardan sebelum putaran mesin sampai ke aspal. Kenaikan torsi tertinggi pada PL 15% ini terjadi karena komposisi 15% merupakan titik optimal (*sweet spot*) di mana kandungan oksigen bawaan bioetanol mampu menyempurnakan campuran bahan bakar dan memadatkan udara masuk akibat kalor laten penguapan.

Selanjutnya, PL 5% mendapatkan torsi puncak sekitar 130 Nm yang dicapai lebih awal pada 4500 rpm akibat cepatnya laju perambatan api (*flame speed*). Sementara itu, bensin murni (PL 0%) juga mencapai sekitar 130 Nm pada 5000 rpm. Di sisi lain, PL 10% mulai mengalami penurunan torsi maksimum menjadi 125 Nm dalam rentang putaran 4500–5000 rpm, dan penurunan drastis terjadi pada PL 20% dengan puncak hanya sekitar 85 Nm di 5000 rpm akibat merosotnya nilai kalor total bahan bakar yang tidak lagi mampu mendorong piston dengan kuat.

Pada parameter daya, pola grafik menunjukkan bahwa daya terus meningkat seiring naiknya putaran mesin. Menariknya, daya maksimum tertinggi yang diraih oleh PL 0% (bensin murni) menyentuh angka sekitar 110 HP pada 5500 rpm. Angka ini sedikit melampaui klaim pabrikan (105 HP pada 6000 rpm). Hal ini menunjukkan bahwa dalam kondisi pengujian beban penuh (*wide open throttle*) tanpa beban jalan sesungguhnya, bensin murni mampu

mengekstraksi nilai kalor tertingginya secara penuh menjadi daya mekanik pada putaran yang sedikit lebih rendah dari batas spesifikasi mesin.

Posisi kedua ditempati oleh PL 15% yang menyentuh angka 95 HP pada 5500 rpm. Walaupun mengalami penurunan dibandingkan klaim pabrikan akibat lebih rendahnya nilai kalor (heating value) etanol, PL 15% mampu menahan penurunan tenaga terlalu jauh berkat tingginya efisiensi termal dari suplai oksigen yang ideal. Selanjutnya, daya menurun pada PL 5% (90 HP) dan PL 10% (88 HP). Kekalahan kedua variabel ini di putaran tinggi terjadi karena sempitnya waktu siklus pembakaran yang membuat defisit nilai kalor etanol tidak bisa diimbangi oleh volume udara. Daya terendah dialami oleh PL 20% sebesar 62 HP yang mengindikasikan bahwa mesin Xpander kehabisan tenaga puncak secara signifikan akibat kepadatan energi bahan bakar yang terlampau rendah.

Fenomena ini sejalan dengan penelitian terbaru yang menyatakan bahwa penambahan etanol dalam campuran bensin dapat meningkatkan performa mesin, khususnya pada torsi dan efisiensi pembakaran, karena kandungan oksigen dalam etanol mampu memperbaiki proses pencampuran udara-bahan bakar dan mempercepat pembakaran (Elshenawy & Razik, 2023). Selain itu, studi eksperimental juga menunjukkan bahwa campuran etanol–bensin dapat menghasilkan peningkatan daya dan torsi dibandingkan bensin murni pada kondisi tertentu (Zastempowski et al., 2025).

Namun begitu, kenaikan kadar etanol yang berlebihan malah dapat mengurangi kinerja mesin. Ini terjadi karena nilai kalor etanol lebih rendah dibandingkan dengan bensin, yang mengakibatkan energi yang dihasilkan saat pembakaran menjadi lebih sedikit (Elfasakhany, 2023). Jadi, meskipun etanol dapat meningkatkan kualitas pembakaran, pemakaiannya harus berada pada tingkat komposisi yang ideal agar tidak mengakibatkan penurunan tenaga yang besar.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa campuran PL 15% merupakan variabel terbaik. Meskipun tidak sepenuhnya menyentuh angka 141 Nm karena adanya kerugian transfer daya (*drivetrain loss*), PL 15% mampu mengoptimalkan efisiensi termal mesin Xpander sehingga

menghasilkan torsi puncak tertinggi sebesar 132 Nm di 5000 rpm. Dari segi daya, walau bensin murni (PL 0%) mampu meledakkan tenaga hingga 110 HP melebihi spesifikasi pabrik, penggunaan PL 15% memberikan keseimbangan performa yang kompetitif (95 HP) tanpa mengalami kerugian tenaga ekstrem seperti yang dialami PL 20%.

#### IV.2.2. Pengaruh Bahan Bakar RON 90 dan Bioetanol terhadap Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Perhitungan konsumsi bahan bakar spesifik memerlukan beberapa tahapan. Berikut disajikan contoh perhitungan untuk memperoleh nilai SFC pada bahan bakar RON 90 :

- a) Konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan (FC) Kecepatan 2000 rpm (Uji 1)

$$FC = \left(\frac{b}{t}\right) \times \rho \times \left(\frac{3600}{1000}\right)$$
$$FC = \left(\frac{0,05}{68,07}\right) \times 747 \times \left(\frac{3600}{1000}\right)$$
$$FC = \left(\frac{0,05}{68,07}\right) \times 747 \times \left(\frac{3600}{1000}\right)$$
$$FC = 1.976 \text{ Kg/Jam}$$

- b) Konsumsi bahan bakar spesifik Kecepatan 2000 rpm (Uji 1)

$$SFC = \frac{FC}{P}$$
$$SFC = \frac{1.976}{19.21}$$
$$SFC = 0.103 \frac{\text{Kg}}{\text{kW}} \times \text{jam}$$

- c) Menghitung rata rata pada ketiga uji

Uji 1 : 0,103

Uji 2 : 0,128

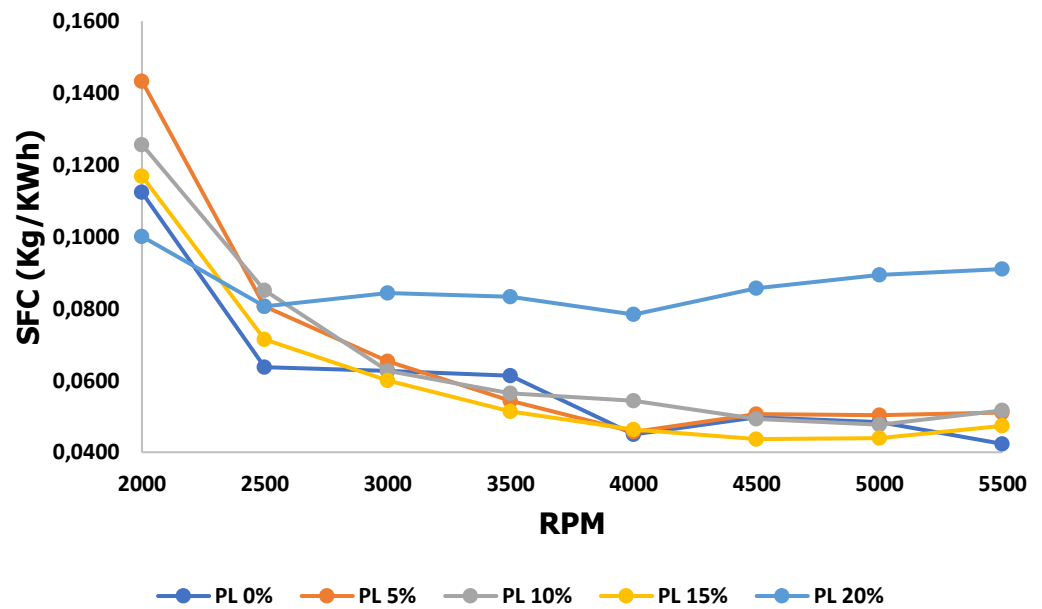
Uji 3 : 0,106

$$SFC = \frac{0,103 + 0,128 + 0,106}{3}$$
$$SFC = 0,1123 \frac{\text{Kg}}{\text{kW}} \times \text{jam}$$

Pengujian konsumsi bahan bakar spesifik dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi campuran bahan bakar. Berikut hasil pengujian dari performa kendaraan berupa konsumsi bahan bakar spesifik :

**Tabel IV. 2** Tabel Rata-Rata Hasil SFC Campuran RON 90 dan Bioetanol

<b>HASIL SFC</b>	<b>PL 0%</b>	<b>PL 5%</b>	<b>PL 10%</b>	<b>PL 15%</b>	<b>PL 20%</b>
<b>2000</b>	0,1123	0,1433	0,1257	0,1169	0,1001
<b>2500</b>	0,0637	0,0807	0,0850	0,0713	0,0807
<b>3000</b>	0,0627	0,0653	0,0627	0,0600	0,0843
<b>3500</b>	0,0613	0,0543	0,0563	0,0513	0,0833
<b>4000</b>	0,0450	0,0457	0,0543	0,0463	0,0783
<b>4500</b>	0,0497	0,0507	0,0493	0,0437	0,0857
<b>5000</b>	0,0483	0,0503	0,0477	0,0440	0,0893
<b>5500</b>	0,0423	0,0510	0,0517	0,0473	0,0910



**Gambar IV. 4** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 90 Terhadap Konsumsi Bahan Bakar

Berdasarkan grafik pengujian konsumsi bahan bakar spesifik (Specific Fuel Consumption/SFC) dengan berbagai campuran bioetanol dan bensin RON 90 (PL), tampak bahwa nilai SFC menunjukkan fluktuasi yang signifikan seiring dengan perubahan putaran mesin dan komposisi campuran bahan bakar. Secara umum, nilai SFC tertinggi (paling boros) untuk setiap variasi campuran muncul pada putaran mesin rendah, yaitu 2000 rpm. Pola ini wajar terjadi karena pada kecepatan rendah, turbulensi udara di dalam ruang bakar masih lemah dan suhu mesin belum optimal, sehingga pembakaran berjalan kurang efektif dan energi yang dihasilkan belum sebanding dengan massa bahan bakar yang diinjeksikan.

Jika dibedah berdasarkan masing-masing variabel pada putaran 2000 rpm, nilai SFC puncak (terburuk) didapat dari campuran PL 5% yang mencapai 0,1433 kg/kWh. Kenaikan nilai SFC yang drastis pada PL 5% ini terjadi karena sifat kalor laten penguapan etanol yang tinggi memberikan efek pendinginan berlebih pada ruang bakar di saat temperatur mesin masih rendah. Akibatnya, penguapan campuran bahan bakar terganggu dan pembakaran menjadi tidak sempurna, sehingga mesin membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk mempertahankan daya.

Namun, seiring bertambahnya kadar bioetanol, nilai SFC berangsur membaik (menurun). Campuran PL 10% mencatat penurunan SFC menjadi 0,1257 kg/kWh, dan PL 15% semakin efisien di angka 0,1169 kg/kWh. Penurunan SFC pada kedua variabel ini membuktikan bahwa suplai oksigen ekstra yang dibawa oleh kadar etanol 10% hingga 15% mulai mendominasi dan mampu mengkompensasi efek negatif dari pendinginan ruang bakar. Oksigen ini mendorong homogenitas campuran dan menciptakan pembakaran yang lebih tuntas, sehingga jumlah bahan bakar yang terbuang tanpa menjadi tenaga dapat ditekan.

Sementara itu, PL 0% (bensin murni) mencatatkan angka 0,1123 kg/kWh pada putaran yang sama. Sebagai bahan bakar murni tanpa etanol, PL 0% tidak memiliki masalah kalor laten penguapan tinggi, sehingga ia lebih mudah menguap dan terbakar secara stabil di putaran rendah dibandingkan campuran etanol konsentrasi menengah. Di sisi lain, hal yang menarik terjadi pada campuran PL 20%, di mana nilai SFC di putaran 2000 rpm justru mencatatkan angka terendah (paling efisien) yaitu sebesar 0,1001 kg/kWh.

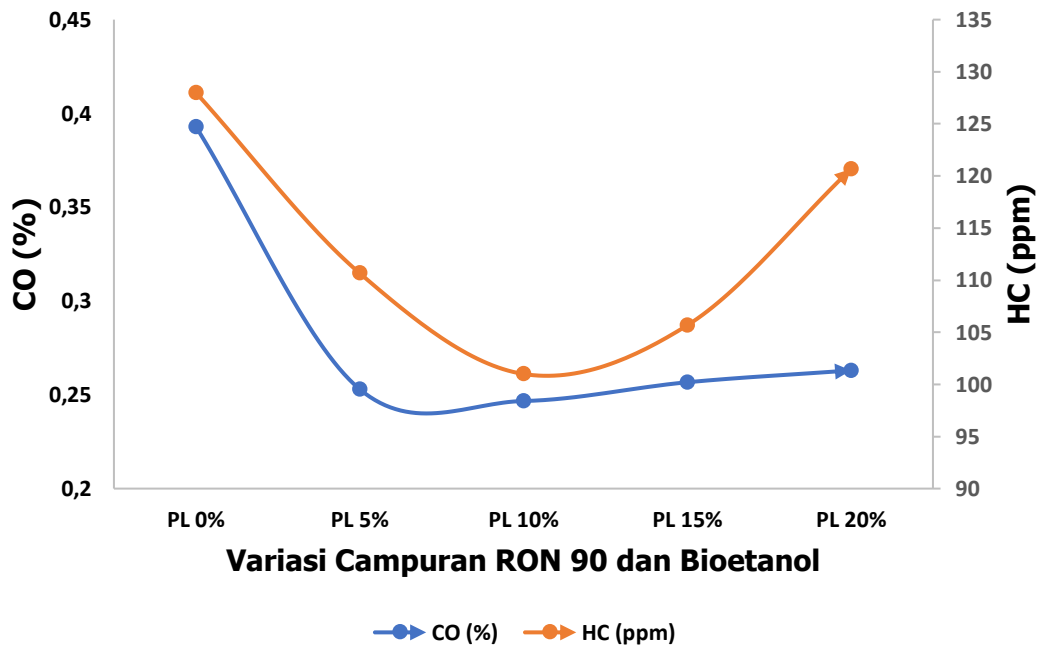
Meskipun demikian, ketika RPM mesin terus meningkat hingga putaran tinggi, keunggulan awal oksigen tersebut mulai terpinggirkan oleh faktor kebutuhan energi. Pada kecepatan tinggi, angka SFC umumnya menurun hingga mencapai titik efisiensi terbaiknya karena optimalnya turbulensi ruang bakar, lalu perlahan naik kembali akibat tingginya gesekan mekanis. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa SFC merupakan indikator efisiensi mesin, di mana konsumsi bahan bakar per satuan daya akan menurun ketika proses pembakaran dan efisiensi termal mencapai puncaknya (Rimkus et al., 2024).

Pengaruh penambahan etanol sangat jelas terlihat membelah karakteristik SFC pada putaran mesin tinggi. Pada campuran sedang (PL 10% dan PL 15%), tingkat efisiensi termal tetap terjaga karena keseimbangan antara suplai oksigen yang menyempurnakan pembakaran dengan nilai kalor yang belum terlalu anjlok (Deshpande et al., 2024). Sebaliknya, pada campuran tertinggi (PL 20%), nilai SFC justru cenderung meningkat kembali dan menjadi lebih boros terutama pada putaran tinggi. Kenaikan konsumsi

bahan bakar pada PL 20% ini murni disebabkan oleh sangat rendahnya nilai kalor (heating value) bawaan etanol. Karena energi per tetes bahan bakarnya lebih kecil dibandingkan bensin, mesin terpaksa menginjeksikan dan membakar volume bahan bakar yang jauh lebih banyak demi mempertahankan daya output di putaran tinggi yang menuntut energi besar (Huang et al., 2024).

#### IV.2.3. Pengaruh Bahan Bakar RON 90 dan Bioetanol terhadap Emisi Gas Buang

Pengujian emisi gas buang spesifik dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi campuran bahan bakar. Berikut hasil pengujian dari performa kendaraan berupa emisi gas buang :



**Gambar IV. 5** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 90 Terhadap Emisi Gas Buang

Berdasarkan grafik hasil pengujian emisi gas buang pada variasi campuran bahan bakar bioetanol dan bensin RON 90 (PL), terlihat bahwa nilai emisi CO (Karbon Monoksida) dan HC (Hidrokarbon) mengalami fluktuasi yang signifikan seiring dengan penambahan kadar etanol. Secara umum, nilai emisi maksimum (terburuk) baik untuk CO maupun HC terjadi pada bahan bakar PL 0% (RON 90 murni), dengan nilai CO sekitar 0,39% dan HC sekitar 130 ppm. Tingginya angka emisi ini wajar terjadi karena bensin murni tidak memiliki molekul oksigen bawaan (non-oxygenated fuel). Akibatnya, pada kondisi

operasi tertentu, sering terjadi area campuran kaya (rich mixture) secara lokal di dalam ruang bakar di mana kekurangan oksigen menyebabkan proses oksidasi karbon tidak tuntas (hanya membentuk CO, bukan CO<sub>2</sub>) dan menyisakan banyak molekul bahan bakar yang tidak terbakar menjadi emisi HC.

Seiring dengan penambahan etanol, terjadi penurunan emisi yang sangat signifikan pada campuran rendah hingga menengah. Nilai emisi CO berhasil ditekan hingga mencapai titik terendah pada campuran PL 5% yaitu sekitar 0,25%. Penurunan drastis ini terjadi karena penambahan 5% bioetanol memberikan suplai oksigen ekstra yang sangat ideal ke dalam ruang bakar. Oksigen bawaan ini memicu reaksi oksidasi lanjutan yang mengikat gas beracun CO menjadi CO<sub>2</sub> secara efektif, tanpa memberikan efek pendinginan ruang bakar yang berlebihan.

Selanjutnya, pada campuran PL 10%, nilai emisi HC mencapai titik minimumnya, yaitu di angka sekitar 100 ppm. Keberhasilan PL 10% menekan unsur hidrokarbon sisa ini dikarenakan kadar oksigen yang semakin besar mempercepat kecepatan rambat api (*flame speed*). Hal ini memastikan molekul bahan bakar di ujung ruang bakar (yang biasanya luput dari percikan busi) dapat terbakar habis sebelum katup buang terbuka, sehingga emisi HC menurun drastis. Penurunan ini membuktikan bahwa pada rentang 5%–10%, bioetanol bertindak sempurna sebagai pendorong efisiensi pembakaran (Elshenawy & Razik, 2023).

Berdasarkan grafik hasil pengujian emisi gas buang pada variasi campuran bahan bakar bioetanol dan bensin RON 90 (PL), terlihat bahwa nilai emisi CO (Karbon Monoksida) dan HC (Hidrokarbon) mengalami fluktuasi yang signifikan seiring dengan penambahan kadar etanol. Secara umum, nilai emisi maksimum (terburuk) baik untuk CO maupun HC terjadi pada bahan bakar PL 0% (RON 90 murni), dengan nilai CO sekitar 0,39% dan HC sekitar 130 ppm. Tingginya angka emisi ini wajar terjadi karena bensin murni tidak memiliki molekul oksigen bawaan (non-oxygenated fuel). Akibatnya, pada kondisi operasi tertentu, sering terjadi area campuran kaya (rich mixture) secara lokal di dalam ruang bakar di mana kekurangan oksigen menyebabkan proses

oksidasi karbon tidak tuntas (hanya membentuk CO, bukan CO<sub>2</sub>) dan menyisakan banyak molekul bahan bakar yang tidak terbakar menjadi emisi HC.

Seiring dengan penambahan etanol, terjadi penurunan emisi yang sangat signifikan pada campuran rendah hingga menengah. Nilai emisi CO berhasil ditekan hingga mencapai titik terendah pada campuran PL 5% yaitu sekitar 0,25%. Penurunan drastis ini terjadi karena penambahan 5% bioetanol memberikan suplai oksigen ekstra yang sangat ideal ke dalam ruang bakar. Oksigen bawaan ini memicu reaksi oksidasi lanjutan yang mengikat gas beracun CO menjadi CO<sub>2</sub> secara efektif, tanpa memberikan efek pendinginan ruang bakar yang berlebihan.

Selanjutnya, pada campuran PL 10%, nilai emisi HC mencapai titik minimumnya, yaitu di angka sekitar 100 ppm. Keberhasilan PL 10% menekan unsur hidrokarbon sisa ini dikarenakan kadar oksigen yang semakin besar mempercepat kecepatan rambat api (flame speed). Hal ini memastikan molekul bahan bakar di ujung ruang bakar (yang biasanya luput dari percikan busi) dapat terbakar habis sebelum katup buang terbuka, sehingga emisi HC menurun drastis. Penurunan ini membuktikan bahwa pada rentang 5%–10%, bioetanol bertindak sempurna sebagai pendorong efisiensi pembakaran (Elshenawy & Razik, 2023).

Namun demikian, efektivitas ini memiliki batas optimum. Pada kadar etanol yang tinggi, seperti pada campuran PL 20%, nilai emisi CO dan HC kembali meningkat secara perlahan. Kenaikan emisi pada dosis tinggi ini disebabkan oleh beberapa faktor fisika bahan bakar. Pertama, tingginya angka kalor laten penguapan dari 20% etanol memberikan efek pendinginan (cooling effect) yang terlalu ekstrem di dalam silinder. Suhu ruang bakar yang anjlok ini memicu fenomena flame quenching (pemadaman api dini saat mendekati dinding silinder yang dingin), sehingga meninggalkan sisa bahan bakar tak terbakar (HC). Kedua, etanol memiliki viskositas dan tegangan permukaan yang lebih tinggi dari bensin, sehingga pada campuran 20%, karakteristik pengabutan (atomisasi) bahan bakar menjadi lebih kasar (butiran membesar) dan sulit menguap sempurna. Ditambah dengan nilai kalornya yang rendah,

ECU terpaksa menyuplai lebih banyak bahan bakar yang justru memperparah pembakaran (Suhartoyo, 2021).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan campuran bioetanol secara signifikan mampu menurunkan kadar gas polutan dibandingkan dengan bensin murni (PL 0%). Variabel terbaik dalam menekan emisi gas buang terbagi pada konsentrasi rendah, di mana nilai emisi CO terendah dicapai oleh PL 5% (0,25%) berkat reaksi oksidasi yang ideal, sementara emisi HC terendah diperoleh pada PL 10% (100 ppm) karena kecepatan rambat api yang tuntas membakar residu. Peningkatan dosis etanol melebihi titik ini (seperti pada PL 15% dan PL 20%) justru akan merugikan karena efek pendinginan laten dan buruknya pengabutan bahan bakar kembali memicu lonjakan emisi. Oleh karena itu, campuran PL 5%–10% menjadi komposisi yang paling ramah lingkungan karena mampu menghasilkan pembakaran paling sempurna jauh di bawah ambang batas regulasi.

### IV.3. Hasil Percampuran RON 92 dan Bioetanol

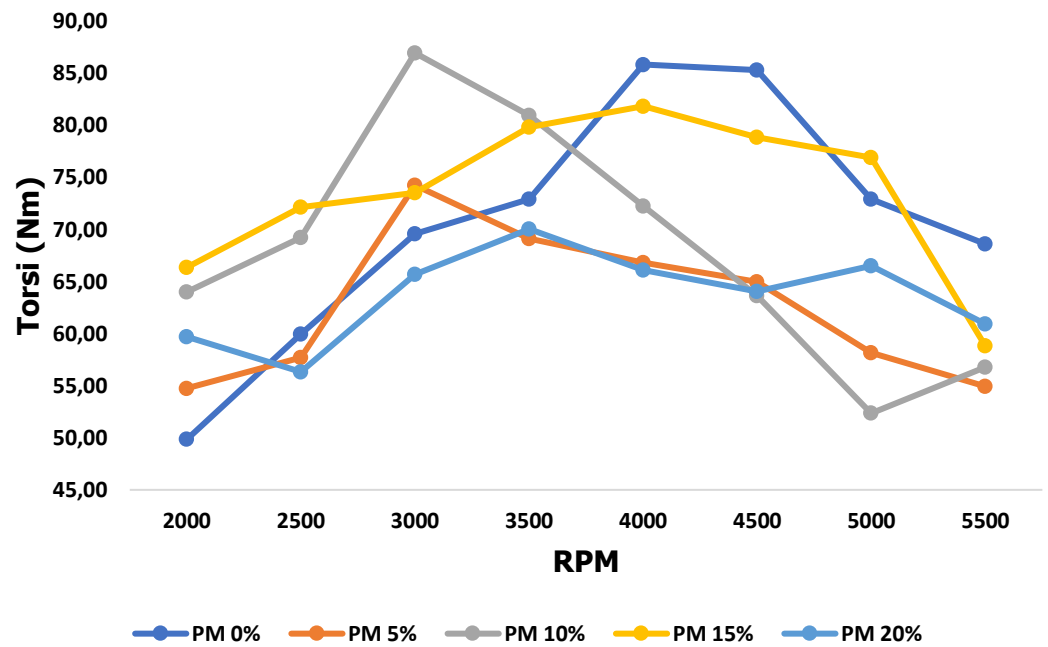
Pengumpulan data mengenai performa, konsumsi bahan bakar spesifik, dan pelepasan gas buang dilakukan pada campuran RON 92 yang dicampur dengan bioetanol.

#### IV.3.1. Pengaruh Bahan Bakar RON 92 dan Bioetanol terhadap Torsi dan Daya

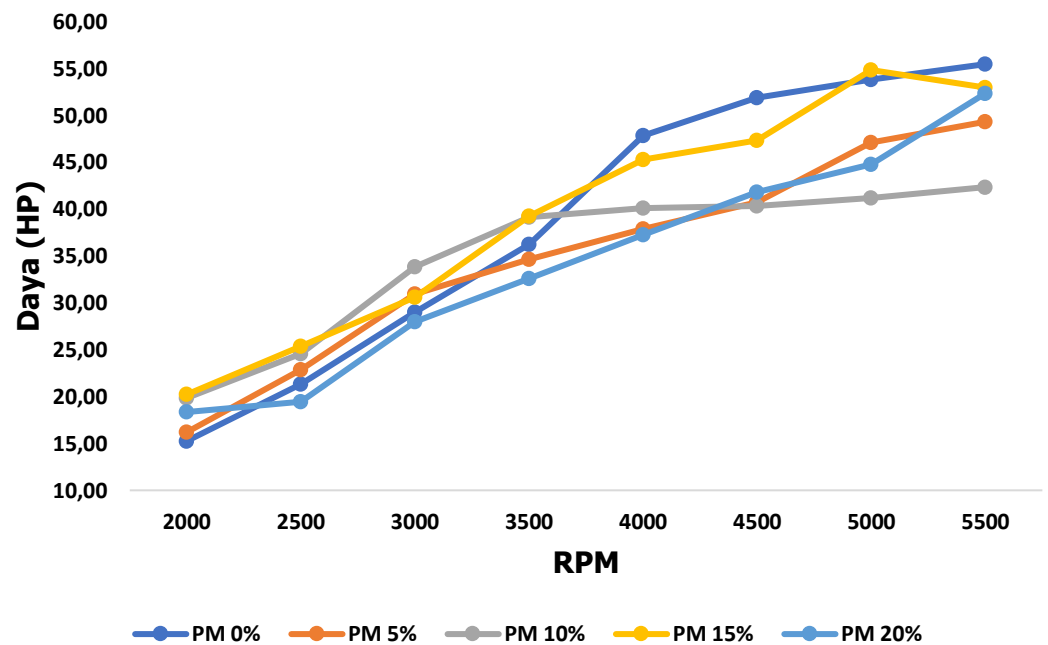
Pengujian performa kendaraan dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi campuran bahan bakar. Berikut hasil pengujian dari performa kendaraan berupa torsi dan daya :

**Tabel IV. 3** Tabel Rata-Rata Hasil Torsi & Daya Campuran RON 92 dan Bioetanol

Pengujian Dyno	PL 0%		PL 5%		PL 10%		PL 15%		PL 20%	
	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)	Torsi (Nm)	Daya (HP)
2000 RPM	49,84	15,26	54,75	16,20	64,00	19,85	66,37	20,22	59,71	18,35
2500 RPM	59,97	21,35	57,69	22,88	69,21	24,55	72,16	25,37	56,33	19,46
3000 RPM	69,59	29,01	74,25	30,94	86,94	33,87	73,53	30,63	65,70	27,98
3500 RPM	72,90	36,25	69,11	34,64	80,93	39,14	79,81	39,26	70,04	32,61
4000 RPM	85,84	47,87	66,83	37,86	72,23	40,10	81,84	45,26	66,09	37,24
4500 RPM	85,28	51,87	64,98	40,76	63,65	40,36	78,84	47,36	64,04	41,82
5000 RPM	72,90	53,82	58,18	47,10	52,35	41,21	76,89	54,83	66,49	44,77
5500 RPM	68,59	55,46	54,93	49,31	56,76	42,34	58,82	52,99	60,93	52,34



**Gambar IV. 6** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 92 Terhadap Torsi



**Gambar IV. 7** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 92 Terhadap Daya

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja mesin yang terlihat pada grafik, variasi campuran bahan bakar RON 92 dan Bioetanol (PM) memberikan dampak yang fluktuatif terhadap torsi maupun daya pada setiap tingkat putaran mesin. Sebagai acuan dasar teknis yang tercantum pada Bab 3, mesin Mitsubishi

Xpander 1.5L MIVEC (4A91) memiliki spesifikasi standar pabrikan berupa torsi maksimum sebesar 141 Nm pada 4000 rpm dan daya maksimum sebesar 105 PS (sekitar 104-105 HP) pada 6000 rpm.

Dalam hal torsi, nilai maksimum tertinggi pada pengujian ini diraih oleh campuran PM 10% yang menyentuh angka 87 Nm pada putaran 3000 rpm. Jika dibandingkan dengan spesifikasi standar pabrikan (141 Nm), terdapat selisih nilai yang cukup besar. Hal ini disebabkan oleh penggunaan chassis dynamometer yang mengukur tenaga langsung pada roda (wheel torque), sehingga nilai yang terbaca telah mengalami penyusutan akibat kerugian mekanis pada sistem transmisi dan gardan (drivetrain loss). Meskipun secara angka nominal lebih rendah dari klaim pabrik, PM 10% terbukti mampu mengoptimalkan karakter mesin Xpander pada putaran rendah berkat akselerasi laju perambatan api (flame speed) dari oksigen tambahan bioetanol, yang puncaknya dicapai lebih awal (3000 rpm) dibandingkan standar pabrikan (4000 rpm).

Selanjutnya, PM 0% (RON 92 murni) mencapai torsi 86 Nm pada 4000 rpm, yang secara karakteristik putaran mesin (RPM) paling mendekati standar pabrikan. Namun, tanpa bantuan oksigenat dari etanol, PM 0% membutuhkan putaran mesin yang lebih tinggi untuk mencapai torsi puncaknya dibandingkan PM 10%. Variabel lainnya seperti PM 15% (82 Nm), PM 5% (74 Nm), dan PM 20% (70 Nm) menunjukkan penurunan performa di bawah standar akibat ketidakseimbangan antara nilai kalor bahan bakar dan efisiensi pembakaran.

Pada parameter daya, daya tertinggi dicapai secara bersamaan oleh PM 0% dan PM 15% sebesar 55 HP. Nilai ini menunjukkan penurunan sekitar 47% dari klaim daya maksimal pabrikan (105 HP). Penurunan signifikan ini selain disebabkan oleh drivetrain loss, juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan saat pengujian dan pengaturan beban pada alat dynotest. Namun, hal yang perlu digarisbawahi adalah PM 15% mampu mencapai daya puncak 55 HP tersebut pada putaran 5000 rpm, lebih cepat dibandingkan PM 0% (5500 rpm) maupun spesifikasi standar pabrikan (6000 rpm). Keunggulan PM 15% ini dipicu oleh efek pendinginan dari kalor laten penguapan etanol yang meningkatkan

efisiensi volumetrik (kepadatan udara masuk), sehingga tenaga maksimal dapat diekstraksi pada RPM yang lebih rendah.

Di sisi lain, PM 20% menghasilkan 53 HP, sedangkan PM 5% (49 HP) dan PM 10% (42 HP) mengalami penurunan daya yang cukup drastis pada putaran tinggi. Khusus pada PM 10%, meskipun unggul pada torsi putaran bawah, ia mengalami penurunan daya di putaran tinggi karena defisit nilai kalor (heating value) yang tidak mampu lagi mensuplai energi ledakan yang cukup dalam waktu siklus pembakaran yang sangat singkat di 5500 rpm.

Fenomena ini dikonfirmasi oleh studi (Khan & Mia, 2023) yang menyatakan bahwa penggunaan bioetanol dengan nilai oktan tinggi mendukung pembakaran yang stabil di putaran tertentu akibat oksigen bawannya. Namun demikian, seperti yang teramati pada anjloknya tenaga di putaran atas pada beberapa variabel, penggunaan kadar etanol memicu kerugian nilai kalor. Studi lain juga menegaskan bahwa meskipun etanol meningkatkan kualitas pembakaran dari segi emisi, penggunaannya memerlukan pemetaan ulang mesin (tuning) agar suplai udara dan bahan bakar seimbang untuk menjaga performa optimal di seluruh rentang putaran (Kumar et al., 2023).

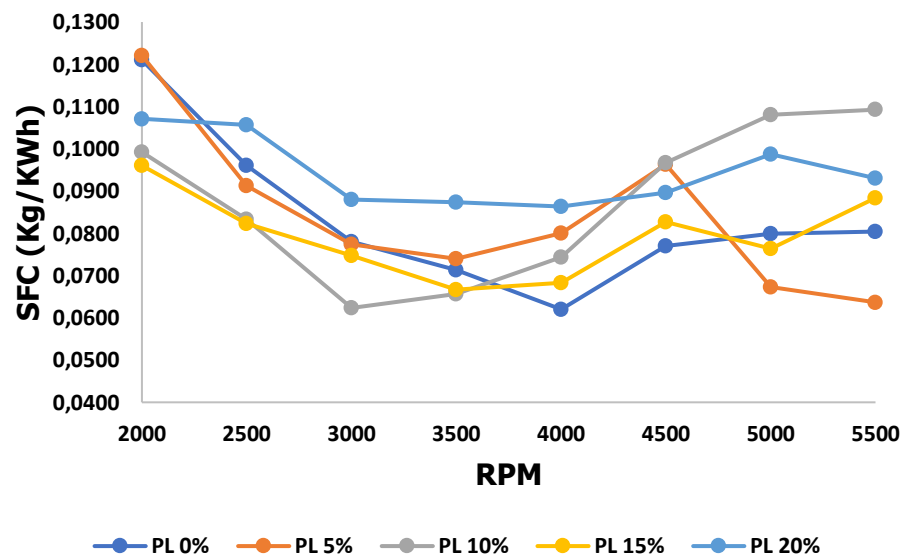
Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada penggunaan bahan bakar RON 92, campuran PM 10% adalah variabel terbaik untuk mengejar torsi puncak yang reaktif di putaran bawah (3000 rpm). Sementara itu, PM 15% merupakan komposisi paling optimal untuk mencapai efisiensi daya maksimal karena mampu menghasilkan tenaga puncak setara bensin murni pada putaran mesin yang lebih rendah dari spesifikasi standar pabrikan. Hal ini membuktikan bahwa penambahan bioetanol mampu mengubah karakteristik kurva performa mesin Xpander menjadi lebih efisien pada rentang putaran operasional tertentu.

#### IV.3.2. Pengaruh Bahan Bakar RON 92 dan Bioetanol terhadap Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Pengujian konsumsi bahan bakar spesifik dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi campuran bahan bakar. Berikut hasil pengujian dari performa kendaraan berupa konsumsi bahan bakar spesifik :

**Tabel IV. 4** Tabel Rata-Rata Hasil SFC Campuran RON 92 dan Bioetanol

HASIL SFC	PM 0%	PM 5%	PM 10%	PM 15%	PM 20%
2000	0,1210	0,1221	0,0992	0,0960	0,1071
2500	0,0960	0,0912	0,0833	0,0823	0,1057
3000	0,0780	0,0773	0,0623	0,0747	0,0880
3500	0,0713	0,0740	0,0657	0,0667	0,0873
4000	0,0620	0,0800	0,0743	0,0683	0,0863
4500	0,0770	0,0963	0,0967	0,0827	0,0897
5000	0,0800	0,0673	0,1080	0,0763	0,0987
5500	0,0804	0,0637	0,1092	0,0883	0,0930



**Gambar IV. 8** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 92 Terhadap Konsumsi Bahan Bakar

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar IV.7, nilai konsumsi bahan bakar spesifik (Specific Fuel Consumption/SFC) pada berbagai variasi campuran bioetanol dan RON 92 (PL 0%, PL 5%, PL 10%, PL 15%, dan PL 20%) menunjukkan fluktuasi yang bervariasi terhadap

perubahan putaran mesin. Secara umum, nilai SFC tertinggi (paling boros) untuk hampir semua variasi terjadi pada putaran rendah, yaitu 2000 rpm. Tingginya angka SFC di putaran bawah ini merupakan fenomena wajar karena kecepatan aliran udara yang masuk masih lambat, turbulensi di ruang bakar lemah, dan efisiensi volumetrik mesin belum optimal. Akibatnya, campuran bahan bakar dan udara tidak homogen, sehingga ECU (atau karburator) harus menyuplai volume bahan bakar yang lebih besar untuk menjaga mesin tetap hidup dan menghasilkan daya.

Jika dibedah per variabel pada kondisi putaran rendah (2000 rpm) tersebut, nilai SFC terbesar (terburuk) ditunjukkan oleh variasi PL 5% yang menyentuh angka sekitar 0,122 kg/kWh. Tingginya konsumsi pada PL 5% ini diakibatkan oleh sifat kalor laten penguapan etanol. Pada putaran rendah di mana suhu operasional ruang bakar belum maksimal, penambahan 5% etanol justru memberikan efek pendinginan yang menghambat proses penguapan (atomisasi) bahan bakar RON 92. Karena pengabutan tidak sempurna dan suplai oksigen dari 5% etanol belum cukup signifikan, banyak bahan bakar yang tidak terbakar menjadi tenaga, sehingga konsumsinya membengkak.

Memasuki putaran menengah (sekitar 3000–4000 rpm), nilai SFC cenderung menurun drastis pada seluruh variasi bahan bakar, menandakan tercapainya efisiensi termal terbaik mesin. Nilai terendah (paling irit) pada fase ini dicetak oleh PL 0% (bensin murni) di sekitar putaran 4000 rpm dengan nilai 0,061 kg/kWh. Sebagai bahan bakar murni tanpa etanol, PL 0% tidak mengalami masalah pendinginan akibat kalor laten penguapan, sehingga pada putaran menengah ia mampu menguap sempurna. Ditambah dengan nilai kalor (heating value) bawaannya yang paling tinggi, bensin murni menghasilkan konversi energi yang sangat efisien di rentang putaran ini.

Di sisi lain, pada putaran tinggi (5500 rpm), terlihat anomali di mana nilai SFC kembali melonjak. Salah satunya terlihat pada variasi PL 10% yang konsumsinya naik mencapai sekitar 0,109 kg/kWh, serta pada PL 20% yang juga mengalami peningkatan SFC di rentang putaran yang sama. Kenaikan nilai SFC pada putaran tinggi untuk campuran yang mengandung etanol ini diakibatkan oleh sempitnya waktu siklus pembakaran dan tingginya kerugian

gesekan mekanis. Karena etanol memiliki nilai kalor yang lebih rendah dari bensin, campuran PL 10% dan PL 20% memiliki kepadatan energi yang defisit. Untuk mengejar kebutuhan daya di RPM tinggi dengan waktu yang sangat singkat, mesin terpaksa menginjeksikan volume bahan bakar etanol yang jauh lebih banyak.

Meskipun demikian, variasi PL 15% (dan sebagian kondisi PL 5%) justru menunjukkan tren nilai SFC yang lebih stabil dan lebih rendah dibandingkan bensin murni di beberapa titik operasional. Keberhasilan PL 15% menekan konsumsi bahan bakar ini membuktikan bahwa pada takaran 15%, molekul oksigen bawaan etanol (oxygenated fuel) bekerja paling efektif. Oksigen ini secara drastis memperbaiki kualitas homogenitas dan kecepatan rambat api, sehingga setiap tetes bahan bakar terbakar tuntas menjadi energi mekanik. Peningkatan kualitas pembakaran ini berhasil menutupi (mengkompensasi) kekurangan nilai kalor bawaan etanol tersebut.

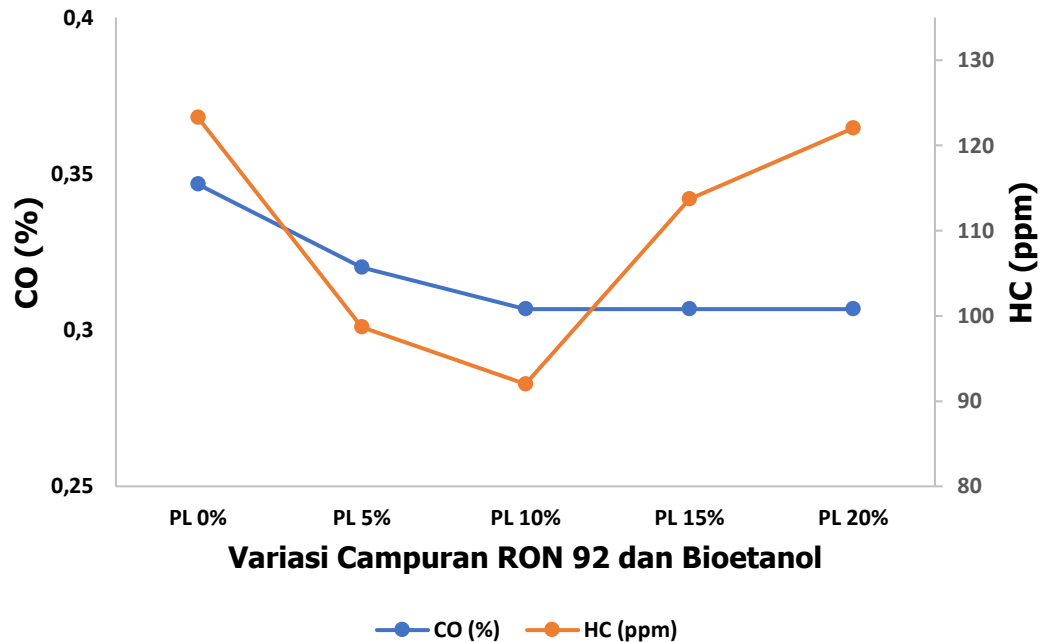
Hasil penelitian ini sejalan dengan studi dari (Szabó, 2025) yang menunjukkan bahwa campuran etanol pada bensin dapat meningkatkan efisiensi pembakaran pada komposisi menengah (seperti PL 15%), namun pada kadar yang terlalu tinggi akan menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik. Selain itu, penelitian oleh (Rosdi et al., 2025) juga mempertegas bahwa peningkatan fraksi etanol yang ekstrem (seperti pada PL 20%) pasti akan meningkatkan nilai SFC akibat dominasi penurunan nilai kalor bahan bakar secara keseluruhan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa campuran PL 15% merupakan variabel yang paling efisien dalam mengoptimalkan konsumsi bahan bakar pada berbagai rentang putaran mesin. Meskipun secara umum semua bahan bakar boros di putaran rendah (dengan angka maksimal 0,122 kg/kWh pada PL 5% akibat efek kalor laten), penambahan bioetanol pada takaran 15% terbukti menjadi titik sweet spot. Kandungan oksigen pada komposisi 15% mampu mengkompensasi defisit nilai kalor dengan cara memaksimalkan efisiensi termal pembakaran. Sebaliknya, penggunaan campuran PL 20% terbukti kurang efektif karena menyebabkan kenaikan nilai SFC (lebih boros) akibat rendahnya nilai kalor, yang memaksa mesin

meminum lebih banyak BBM demi menghasilkan tenaga yang sama. Oleh karena itu, PL 15% adalah komposisi paling optimal untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi termal dan nilai ekonomis konsumsi bahan bakar.

#### IV.3.3. Pengaruh Bahan Bakar RON 92 dan Bioetanol terhadap Emisi Gas Buang

Pengujian emisi gas buang spesifik dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi campuran bahan bakar. Berikut hasil pengujian dari performa kendaraan berupa emisi gas buang :



**Gambar IV. 9** Grafik Campuran Bioetanol dan RON 92 Terhadap Emisi Gas Buang

Berdasarkan grafik hasil pengujian emisi gas buang pada variasi campuran bahan bakar bioetanol dan RON 92 (PM), terlihat bahwa nilai emisi CO (Karbon Monoksida) dan HC (Hidrokarbon) mengalami fluktuasi yang spesifik seiring dengan penambahan kadar etanol. Secara umum, nilai emisi maksimum (terburuk) baik untuk CO maupun HC terjadi pada bahan bakar PM 0% (RON 92 murni), dengan nilai CO sekitar 0,35% dan HC sekitar 125 ppm. Tingginya angka emisi ini terjadi karena bensin murni bersifat non-oxygenated fuel (tidak membawa molekul oksigen di dalam struktur kimianya). Meskipun angka oktan RON 92 sudah cukup tinggi untuk menstabilkan pembakaran, ketiadaan suplai oksigen ekstra menyebabkan beberapa area di dalam ruang bakar mengalami rich mixture (campuran kaya) secara lokal, sehingga proses oksidasi karbon tidak tuntas dan menyisakan banyak emisi gas buang.

Seiring dengan penambahan etanol, terjadi penurunan emisi yang cukup jelas dan mencapai titik optimalnya pada PM 10%. Pada variabel ini, nilai CO

mengalami penurunan hingga mencapai sekitar 0,31%, sedangkan emisi HC menyentuh titik terendahnya yaitu sekitar 90 ppm. Penurunan drastis pada PM 10% membuktikan bahwa persentase tersebut merupakan takaran suplai oksigen tambahan yang paling pas untuk RON 92. Kehadiran oksigen bawaan dari etanol mempercepat kecepatan rambat api (*flame speed*), sehingga molekul bahan bakar dapat teroksidasi secara komprehensif menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O tanpa sisa sebelum katup buang terbuka. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa campuran etanol dalam bensin mampu menurunkan emisi gas buang karena meningkatkan kandungan oksigen dan efisiensi termal pembakaran (Jorge et al., 2024).

Namun demikian, pada kadar etanol yang lebih tinggi seperti PM 15% dan PM 20%, emisi HC terpantau kembali mengalami peningkatan, sedangkan nilai CO cenderung stagnan. Peningkatan HC pada dosis tinggi ini murni disebabkan oleh tingginya sifat kalor laten penguapan dari etanol. Saat persentase etanol terlalu tinggi, proses penguapannya akan menyerap panas ruang bakar secara berlebihan (*cooling effect*). Suhu silinder yang turun secara signifikan ini memicu fenomena *flame quenching* (pemadaman api dini sebelum mencapai dinding silinder), sehingga butiran bahan bakar gagal terbakar sempurna dan terbuang mentah-mentah sebagai emisi HC. Kondisi ini didukung oleh penelitian (Abdullah et al., 2015) yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar etanol yang berlebihan dapat meningkatkan emisi hidrokarbon akibat anjloknya temperatur pembakaran.

Jika ditinjau dari karakteristik dasar bahan bakarnya, penggunaan RON 92 memberikan keuntungan berupa stabilitas pembakaran yang lebih baik karena ketahanannya terhadap kompresi tinggi. Ketika dikombinasikan dengan 10% bioetanol, interaksi antara tingginya angka oktan dan suplai oksigen ekstra ini menciptakan pembakaran yang sangat ramah lingkungan. Jika dibandingkan dengan standar yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2023, hasil pengujian pada variasi optimal (terutama PM 10% dengan HC 90 ppm) berhasil memenuhi dan berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan, yaitu CO maksimal 0,5% dan HC maksimal 100 ppm pada kondisi *idle*.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan campuran bioetanol pada bahan bakar RON 92 secara signifikan mampu memperbaiki kualitas gas buang, dengan PM 10% sebagai variabel paling optimal. Hasil pengujian menunjukkan nilai emisi tertinggi terdapat pada bensin murni (PM 0%) sebesar 0,35% (CO) dan 125 ppm (HC) akibat ketiadaan oksigen bawaan. Angka ini berhasil ditekan hingga batas terendah pada PM 10% berkat akselerasi *flame speed* dan reaksi oksidasi yang tuntas dari suplai oksigen etanol. Meskipun emisi HC cenderung meningkat kembali pada kadar yang lebih tinggi (PM 15%–20%) akibat efek pendinginan dan *flame quenching*, inovasi pencampuran ini secara keseluruhan terbukti mampu menghasilkan performa pembakaran yang lebih stabil dan memenuhi standar regulasi emisi dari pemerintah.

#### IV.4. Hasil Uji Statistik

Test Of Between-Subjects Effects					
Dependent Variable	Source	df	Mean Square	F	Sig.
Torsi	Variasi RON	1	15824.250	52.825	<0.001
	Variasi Bahan Bakar	4	753.231	2.514	0.049
	Variasi RON*Variasi Bahan Bakar	4	356.585	1.190	0.323
Daya	Variasi RON	1	6153.909	13.898	<0.001
	Variasi Bahan Bakar	4	326.236	0.737	0.570
	Variasi RON*Variasi Bahan Bakar	4	137.327	0.310	0.870
SFC	Variasi RON	1	0.006	14.582	<0.001
	Variasi Bahan Bakar	4	0.001	2.540	0.047
	Variasi RON*Variasi Bahan Bakar	4	0.000133	0.322	0.863
CO	Variasi RON	1	0.009	289.000	<0.001
	Variasi Bahan Bakar	4	0.009	307.056	<0.001
	Variasi RON*Variasi Bahan Bakar	4	0.003	104.833	<0.001
HC	Variasi RON	1	80.033	100.042	<0.001
	Variasi Bahan Bakar	4	858.633	1073.292	<0.001
	Variasi RON*Variasi Bahan Bakar	4	97.200	121.500	<0.001

#### Intrepretasi Hasil :

## 1. Torsi

### a. Variasi RON

Nilai  $p (< 0,001) < 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi RON memiliki pengaruh yang signifikan terhadap torsi kendaraan.

### b. Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p (0,049) < 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi bahan bakar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap torsi kendaraan.

### c. Interaksi antara Variasi RON dan Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p (0,323) > 0,05$ , hal ini berarti  $H_0$  diterima sehingga interaksi antara variasi RON dan variasi bahan bakar tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap torsi kendaraan.

## 2. Daya

### a. Variasi RON

Nilai  $p (< 0,001) < 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi RON memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya kendaraan.

### b. Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p (0,570) > 0,05$ , hal ini berarti  $H_0$  diterima sehingga variasi bahan bakar tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya kendaraan.

### c. Interaksi antara Variasi RON dan Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p (0,870) > 0,05$ , hal ini berarti  $H_0$  diterima sehingga interaksi antara variasi RON dan variasi bahan bakar tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya kendaraan.

## 3. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

### a. Variasi RON

Nilai  $p (< 0,001) < 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga variasi RON memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsumsi bahan bakar spesifik.

### b. Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p$  ( $0,047$ )  $< 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga variasi bahan bakar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsumsi bahan bakar spesifik.

c. Interaksi antara Variasi RON dan Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p$  ( $0,863$ )  $> 0,05$ , hal ini berarti  $H_0$  diterima sehingga interaksi antara variasi RON dan variasi bahan bakar tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsumsi bahan bakar spesifik.

4. Emisi CO

a. Variasi RON

Nilai  $p$  ( $< 0,001$ )  $< 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga variasi RON memiliki pengaruh yang signifikan terhadap emisi CO.

b. Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p$  ( $< 0,001$ )  $< 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga variasi bahan bakar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap emisi CO.

c. Interaksi antara Variasi RON dan Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p$  ( $< 0,001$ )  $< 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga interaksi antara variasi RON dan variasi bahan bakar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap emisi CO.

5. Emisi HC

a. Variasi RON

Nilai  $p$  ( $< 0,001$ )  $< 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga variasi RON memiliki pengaruh yang signifikan terhadap emisi HC.

b. Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p$  ( $< 0,001$ )  $< 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga variasi bahan bakar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap emisi HC.

c. Interaksi antara Variasi RON dan Variasi Bahan Bakar

Nilai  $p$  ( $< 0,001$ )  $< 0,05$ , hal ini berarti tidak ada alasan untuk menerima  $H_0$  sehingga interaksi antara variasi RON dan variasi

bahan bakar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap emisi HC.

#### **IV.5. Evaluasi Hasil Pengujian dan Analisis Statistik**

Berdasarkan analisis grafik, penambahan bioetanol memberikan peningkatan torsi yang paling optimal pada kadar campuran 15% untuk RON 90 (PL 15%) dan 10% untuk RON 92 (PM 10%). Hal ini didorong oleh oksigenasi bioetanol yang memperbaiki tekanan pembakaran. Sementara itu, daya maksimal tertinggi tetap dihasilkan oleh bensin murni, namun campuran 10%–15% tetap menjaga output daya yang sangat kompetitif. Secara statistik, uji *Two Way ANOVA* mengonfirmasi analisis grafik ini. Hasil uji menunjukkan bahwa variasi RON dan variasi campuran bahan bakar memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap perubahan torsi (nilai  $p < 0,05$ ). Untuk parameter daya, jenis RON terbukti memberikan pengaruh signifikan ( $p < 0,001$ ), namun variasi campuran bioetanol tidak menunjukkan perbedaan rata-rata yang signifikan secara statistik ( $p = 0,570$ ). Hal ini membuktikan bahwa penambahan etanol (terutama pada kadar ideal 10%-15%) mampu mendongkrak torsi secara nyata tanpa menyebabkan kerugian daya yang drastis.

Analisis grafik menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) paling efisien (terendah) dicapai oleh variasi PL 15% dan PM 15% khususnya pada putaran menengah. Penggunaan campuran hingga 20% terbukti kurang efektif karena menyebabkan pemborosan akibat rendahnya nilai kalor bioetanol. Temuan grafis ini divalidasi oleh analisis SPSS, di mana baik jenis bahan bakar (RON) maupun variasi campuran bioetanol terbukti memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ) terhadap tingkat konsumsi bahan bakar mesin. Ini menjawab rumusan masalah bahwa komposisi campuran yang tepat sangat krusial dalam menyeimbangkan antara efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar yang ekonomis.

Penambahan bioetanol terbukti sangat efektif menekan gas polutan. Analisis grafik memperlihatkan bahwa emisi terendah dicapai pada campuran 5%–10% untuk RON 90, dan campuran 10% untuk RON 92, yang keseluruhannya berada jauh di bawah ambang batas Peraturan Menteri LHK

No. 8 Tahun 2023. Evaluasi statistik SPSS semakin mempertegas hal tersebut. Hasil uji membuktikan bahwa variasi jenis bahan bakar (RON), persentase campuran bioetanol, serta interaksi di antara kedua faktor tersebut memberikan pengaruh yang sangat signifikan (nilai  $p < 0,001$ ) terhadap penurunan kadar emisi Karbon Monoksida (CO) dan Hidrokarbon (HC). Kandungan oksigen berlebih dalam bioetanol secara konsisten memfasilitasi proses oksidasi yang lebih sempurna selama pembakaran.

Berdasarkan sintesis hasil pengujian performa, efisiensi, dan emisi yang diperkuat oleh validasi statistik menggunakan uji *Two-Way* ANOVA, dapat disimpulkan bahwa variabel PL 15% (campuran 15% bioetanol pada RON 90) merupakan komposisi paling optimal dibandingkan sembilan variabel lainnya. Keunggulan variabel ini berkorelasi langsung dengan peran bioetanol sebagai peningkat angka oktan (*octane booster*) yang sangat efektif, terutama pada bahan bakar dasar beroktan rendah seperti RON 90. Penambahan bioetanol mendongkrak ketahanan detonasi (*anti-knock*) bahan bakar gabungan, sehingga memungkinkan terjadinya titik pengapian yang lebih presisi dan terkontrol yang pada gilirannya menghasilkan torsi puncak tertinggi secara absolut sebesar 132 Nm. Meskipun analisis statistik membuktikan bahwa pemilihan bahan bakar dasar (perpindahan dari RON 90 ke RON 92) memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap stabilitas dan karakteristik pembakaran sejak kondisi awal, variabel PL 15% memberikan margin lonjakan performa (*improvement*) yang paling masif karena kandungan oksigennya mampu mengompensasi kelemahan RON 90 secara maksimal tanpa mengalami degradasi tenaga akibat rendahnya nilai kalor. Dengan demikian, kadar 15% pada RON 90 ditetapkan sebagai titik keseimbangan ideal (*sweet spot*) yang berhasil menjawab rumusan masalah mengenai komposisi bahan bakar yang mampu menghasilkan performa mekanis tertinggi sekaligus mencapai tingkat efisiensi konsumsi energi dan kualitas emisi gas buang yang paling ramah lingkungan.