

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Bioetanol

Seiring dengan meningkatnya konsumsi bahan bakar dan penggunaan kendaraan, pasokan bahan bakar minyak tak terbarukan semakin menipis di Indonesia. Hal ini menuntut perlunya beralih dari bahan bakar minyak ke bahan bakar nabati. Bioenergi adalah salah satu macam energi yang dapat dimanfaatkan, dan salah satu variannya adalah bioetanol. Bioetanol adalah salah satu bentuk energi terbarukan yang dapat dihasilkan dari berbagai macam tanaman. (Savitri, 2022).

Bioetanol merupakan zat cair yang jernih dan tidak berwarna, yang penggunaannya tidak akan menyebabkan polusi, dan ketika dibakar, ia akan menghasilkan uap air dan gas karbon dioksida (Sitorus et al., 2020). Jenis bahan bakar yang diperoleh dari sumber-sumber hayati, contohnya adalah tetes tebu atau molase. Pada formulasi tertentu, bioetanol dikenal sebagai peningkat oktan atau aditif yang lebih ramah lingkungan. Penggunaan produksi bioetanol dari bahan biomassa dapat menjadi salah satu cara untuk mengurangi konsumsi minyak bumi dan pencemaran lingkungan (Balat et al., 2008).

Bioetanol memiliki berbagai keuntungan yang menjadikannya sesuai untuk dijadikan zat aditif pada bahan bakar. Karena kandungan oksigennya yang lebih tinggi dibandingkan dengan bensin, pembakaran dapat berlangsung dengan lebih efisien, serta mengurangi emisi karbon monoksida (CO) dan polutan lainnya. Etanol yang dicampur dengan bensin meningkatkan proporsi oksigen-karbon bahan bakar karena massa totalnya sekitar 34% oksigen (Arwin et al., 2023). Di samping itu, bioetanol berasal dari sumber yang dapat diperbarui, seperti tanaman, sehingga dapat membantu mengurangi ketergantungan pada minyak bumi dan mendukung upaya untuk mengatasi perubahan iklim. Hal ini sangat krusial karena sumber energi fosil seperti minyak, batu bara, dan gas menjadi penyebab utama perubahan iklim global, menyumbang lebih dari 75% emisi gas rumah kaca dan sekitar 90% dari keseluruhan emisi karbon dioksida di bumi (Relita Maizara et al., 2024).

Dengan berbagai keunggulan ini, bioetanol berpotensi menjadi alternatif energi yang lebih bersih dan berkelanjutan dalam industri transportasi. Penggunaan bioetanol sebagai bahan tambahan bahan bakar kendaraan merupakan solusi yang tepat untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak, namun penggunaannya saat ini masih terbatas (Rifa'i et al., 2022).

Tebu di Indonesia merupakan produk pertanian penting yang memiliki banyak kegunaan selain produksi gula, termasuk pembuatan bioetanol. Kemungkinan produk pertanian dan/atau biomassa di Indonesia sangat besar dan dapat diperbaharui, dengan jumlah pati/glukosa/lignoselulosa yang cukup penting (Amrullah & Hambali, 2021). Di Provinsi Jawa Timur menjadi daerah dengan kontribusi terbesar, berdasarkan informasi mengenai hasil panen tebu yang tersedia, diperkirakan potensi molase (24% dari hasil tebu) mencapai sekitar 302,99 ribu ton di Jawa Timur dan 631,74 ribu ton di seluruh Indonesia (Agustian et al., 2021).

II.2. Molase Tebu



Gambar II. 1 Molase Tebu

(Sumarsono et al., 2025)

Pemurnian tebu menghasilkan produksi molase, atau tebu, yang dihasilkan dengan menghancurkan sebagian besar kristal sukrosa dan meninggalkan sisa senyawa padat dalam larutan (Dewi & Rasmiyana, 2025). Pada umumnya, secara kimiawi, molase mengandung senyawa gula (seperti sukrosa, glukosa, dan fruktosa) serta berbagai mineral lainnya. Untuk menyajikan pemahaman yang lebih baik tentang susunan kimia molase dari tebu, detail mengenai isi molase disusun secara teratur dalam tabel berikut.

Tabel II. 1 Komposisi Molase Tebu

Senyawa	Konsentrasi (%)	Referensi
Sukrosa	48,8	(Palmonari et al., 2020)
Fruktosa	8,45	(Sen et al., 2019)
Glukosa	7,8	(Sen et al., 2019)
Rafinosa	0,03	(Palmonari et al., 2020)
Galaktosa	0,04	(Palmonari et al., 2020)
Arabinosa	0,01	(Palmonari et al., 2020)
Levan	0,86	(Palmonari et al., 2020)
Dextran	0,79	(Palmonari et al., 2020)
Protein	4,38	(Ogunwole et al., 2020)
Abu	6,2	(Ogunwole et al., 2020)
Asam Glutamat	0,27	(Khairul et al., 2022)
Glisin	0,56	(Khairul et al., 2022)
Prolin	0,46	(Khairul et al., 2022)
Tirosin	0,87	(Khairul et al., 2022)
Valin	0,1	(Khairul et al., 2022)

Dalam studi ini, bahan dasar bioetanol yang diterapkan adalah tebu. Tebu dianggap sebagai salah satu sumber terbaik untuk memproduksi bioetanol karena memiliki kandungan gula (glukosa) yang tinggi. Dari tebu, kita dapat menghasilkan molase atau sari tebu yang kaya akan sukrosa dan tidak perlu melalui proses hidrolisis tambahan. Bioetanol yang dihasilkan dari sumber gula memiliki kemampuan terbesar untuk menjadi pengganti bahan bakar fosil dalam sektor transportasi karena biaya pembuatan yang lebih murah, emisi karbon yang lebih sedikit, serta produksi yang lebih tinggi dalam liter bioetanol per hektar jika dibandingkan dengan tanaman berbasis pati yang digunakan untuk menghasilkan bioetanol (Bukar et al., 2025).

Pemanfaatan potensi molase pada Jawa Timur sudah mulai terlihat melalui aktivitas industri, salah satunya oleh PT Energi Agro Nusantara (PT Enero) yang adalah cabang dari PT Perkebunan Nusantara X. Perusahaan ini

telah memproduksi bioetanol berbasis molase dan bahkan mengekspor sekitar 4.000 meter kubik bioetanol sebagai energi alternatif ke Filipina. Fakta ini menunjukkan bahwa pengembangan bioetanol berbasis molase tebu di Indonesia bukan hanya sekadar potensi, tetapi juga sudah mulai diterapkan dalam skala industri.

II.3. Bilangan Oktan

Nilai oktan adalah ukuran dari seberapa efisien bensin terbakar atau sejauh mana bensin mudah terbakar, yang sering disebut sebagai Nomor Oktan Penelitian (RON) dan dapat dinilai melalui perbandingan antara campuran isooktana dan n-heptana (Agustina, 2021). Selain itu dapat diartikan sebagai indikator kemampuan bahan bakar dalam mencegah terjadinya knocking atau detonasi pada saat pembakaran mesin. Knocking terjadi ketika campuran udara dan bahan bakar mulai terbakar sebelum busi terbuka sehingga menimbulkan getaran dan bunyi ketukan yang dapat merusak komponen mesin. Ketika bahan bakar terkena tekanan dan suhu tinggi di ruang bakar, tingkat oktannya akan memainkan peran yang semakin signifikan dalam mengatur pembakaran yang tidak diinginkan.

Nilai oktan juga berpengaruh terhadap efisiensi dan performa mesin. Bioetanol diketahui dapat meningkatkan nilai oktan karena kandungan oksigennya yang tinggi. Penambahan bioetanol ke dalam bensin membantu memperbaiki kualitas pembakaran dan mengurangi emisi gas buang berbahaya. Oleh karena itu, pencampuran bioetanol dengan bahan bakar RON 90 dan RON 92 dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan performa mesin sekaligus mendukung efisiensi energi yang lebih ramah lingkungan.

II.4. Pertalite (RON 90)

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah Pertalite, yaitu bensin dengan Research Octane Number (RON) 90 yang banyak beredar di Indonesia. Pertalite tetap menjadi jenis bahan bakar yang paling sering digunakan, mencakup 78% dari keseluruhan penggunaan bahan bakar minyak (Silbaqolbina & Najicha, 2022). Bahan bakar minyak di Indonesia umumnya dijual berdasarkan nilai RON yang terbagi dalam beberapa kategori, seperti RON 88, RON 90, RON 92, dan RON 98. Namun, sejak diterapkannya

Keputusan Menteri ESDM Nomor 245. K/MG. 01/MEM/2022, 2023 BBM dengan RON di bawah 90 yang dikenal sebagai premium tidak lagi tersedia untuk masyarakat arena RON 90 memberikan pembakaran yang lebih efisien pada mesin kendaraan yang menggunakan teknologi terbaru jika dibandingkan dengan premium yang memiliki RON 88 (Utomo & Soedarmanto, 2024). Penghapusan Premium memicu masyarakat untuk beralih ke Pertalite, yang saat ini menjadi pilihan utama karena harganya yang lebih terjangkau dan kualitasnya yang lebih baik dibandingkan Premium.

Pertalite merupakan jenis bahan bakar minyak yang memiliki RON 90 dan diproduksi oleh Pertamina. Sesuai arahan Direktorat Jendral Minyak dan Gas Bumi, standar kualitas yang ditetapkan untuk BBM RON 90 dapat dilihat pada tabel II.2 Saat ini, RON 90 adalah kategori RON terendah yang masih dijual kepada masyarakat.

STANDAR DAN MUTU (SPESIFIKASI) BAHAN BAKAR MINYAK JENIS BENSIN 90 YANG DIPASARKAN DI DALAM NEGERI						
No	Karakteristik	Satuan	Batasannya		Metode Uji	
			Min.	Maks.	ASTM	Lain
1.	Bilangan Oktana Angka Oktana Riset (RON)		90,0	-	D 2699	
2.	Stabilitas Oksidasi	menit	360	-	D 525	
3.	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05 ¹⁾	D 2622 atau D 4294 atau D 5453 atau D 7039	
4.	Sulfur Mercaptan	% m/m	-	0.002 ²⁾	D 3227	
5.	Kandungan Timbal (Pb)	g/l	Injeksi timbal tidak diizinkan; Dilaporkan		D 3237 atau D 5059	
6.	Kandungan Logam					
	- Mangan	mg/l	-	1 ³⁾	D 3831 atau D 5185	-
	- Besi (Fe)	mg/l	-	1 ³⁾		UOP 391
7.	Kandungan Oksigen	% m/m	-	2,7 ⁴⁾	D 4815 atau D 6839 atau D 5599	
8.	Kandungan Olefin	% v/v	dilaporkan		D 1319 atau D 6839 atau D 6730	
9.	Kandungan Aromatik	% v/v	dilaporkan		D 1319 atau D 6839 atau D 6730 atau D 5580	
10.	Kandungan Benzena	% v/v	dilaporkan		D 5580 atau D 6839 atau D 6730 atau D 3606	
11.	Distilasi :					
	- 10% vol. penguapan	°C	-	74	D 86	
	- 50% vol. penguapan	°C	-	77 125		
	- 90% vol. penguapan	°C	-	180		
	- Titik didih akhir	°C	-	215		
	- Residu	% vol	-	2,0		
12.	Sedimen	mg/l	-	1	D 5452	
13.	Unwashed gum	mg/100 ml	-	70	D 381	
14.	Washed gum	mg/100 ml	-	5	D 381	
15.	Tekanan Uap	kPa	45	69	D 5191 atau D 323	
16.	Berat Jenis (pada suhu 15 °C)	kg/m ³	715	770	D 4052 atau D 1298	
17.	Korosi bilah tembaga			Kelas 1b	D 130	
28.	Penampilan visual		Jernih dan terang			Visual
19.	Warna		Hijau			Visual

Gambar II. 2 Standar Mutu Pertalite

(Kepdirjen Minyak Dan Gas Bumi No.486.K/10/DJM.S/2017)

II.5. Pertamina (RON 92)

Pertamax merupakan bahan bakar bensin dengan Research Octane Number (RON) 92 yang diproduksi oleh Pertamina dan termasuk dalam kategori BBM nonsubsidi. Dengan nilai oktan yang lebih tinggi dibandingkan

Pertalite, Pertamax dirancang untuk memenuhi kebutuhan mesin kendaraan modern yang memiliki rasio kompresi lebih tinggi serta sistem pembakaran yang lebih presisi. Nilai RON yang lebih besar membuat Pertamax lebih mampu menahan terjadinya knocking atau detonasi, sehingga pembakaran dapat berlangsung lebih stabil dan efisien di dalam ruang bakar.

BBM dengan RON 92 umumnya menghasilkan proses pembakaran yang lebih sempurna, mendukung peningkatan performa mesin, serta memberikan respons tenaga yang lebih optimal pada berbagai kondisi putaran mesin. Selain itu, penggunaan Pertamax cenderung menghasilkan emisi yang lebih bersih pada kendaraan berteknologi terbaru karena karakteristik kimia bahan bakar yang lebih stabil dan sesuai dengan standar mesin modern.

Sebagai BBM dengan kualitas yang lebih tinggi dibandingkan BBM beroktan rendah, Pertamax banyak direkomendasikan untuk kendaraan berteknologi injeksi, rasio kompresi menengah hingga tinggi, dan sistem pengapian elektronik. Penggunaannya juga banyak dipilih oleh konsumen yang mengutamakan efisiensi bahan bakar dan kehalusan performa mesin.

Dengan karakteristik tersebut, Pertamax sering digunakan sebagai pembanding dalam penelitian terkait kualitas pembakaran dan performa mesin, termasuk studi mengenai penambahan bioetanol sebagai aditif peningkat nilai oktan pada bahan bakar. Penggunaan RON 92 memberikan gambaran lebih jelas mengenai bagaimana variasi nilai oktan dan komposisi bahan bakar memengaruhi proses pembakaran, efisiensi mesin, serta emisi gas buang.

No.	KARAKTERISTIK	SATUAN	BATASAN MIN	BATASAN MAX	METODE UJI
1	Bilangan Oktana Riset (RON)	RON	92.0	-	ASTM D2699
2	Stabilitas Oksidasi	menit	480	-	ASTM D525
3	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0.05 ¹⁾	ASTM D2622
4	Kandungan Timbal (Pb)	g/l	-	0.013 ²⁾	ASTM D3237
5	Kandungan Fosfor	mg/l	-	-	ASTM D3231
6	Kandungan Logam (Mn, Fe, dll)	mg/l	-	-	ASTM D3831
7	Kandungan Silikon	mg/kg	-	-	ICP-AES
8	Kandungan Oksigen	% m/m	-	2.7 ³⁾	ASTM D4815
9	Kandungan Olefin	% v/v	-	*)	ASTM D1319
10	Kandungan Aromatik	% v/v	-	50.0	ASTM D1319
11	Kandungan Benzena	% v/v	-	5.0	ASTM D4420
12	Distilasi :				ASTM D86
	10% Vol Penguapan	°C	-	70	
	50% Vol Penguapan	°C	77	110	
	90% Vol Penguapan	°C	130	180	
	Titik Didih Akhir	°C	-	215	
	Residu	% vol	-	2.0	
13	Sedimen	mg/l	-	1	ASTM D5452
14	Unwashed Gum	mg/100 ml	-	70	ASTM D381
15	Washed Gum	mg/100 ml	-	5	ASTM D381
16	Tekanan Uap	kPa	45	60	ASTM D5191 atau ASTM D323
17	Berat Jenis (pada suhu 15 °C)	kg/m ³	715	770	ASTM D4052 atau ASTM D1298
18	Korosi Bilah Tembaga	merit		Kelas 1	ASTM D130
19	Uji Doctor			Negatif	IP 30
20	Sulfur Mercaptan	% massa	-	0.002	ASTM D3227
21	Penampilan Visual			Jernih dan Terang	
22	Warna			Biru	
23	Kandungan Pewarna	gr/100 l	-	0.13	

*Apabila kandungan olefin di atas 20%, hasil pengujian angka stabilitas oksidasi minimum 1000 menit

Gambar II. 3 Standar Mutu Pertamina

(Spesifikasi Produk BBM, BBN, dan LPG resmi Pertamina)

II.6. Motor Bakar

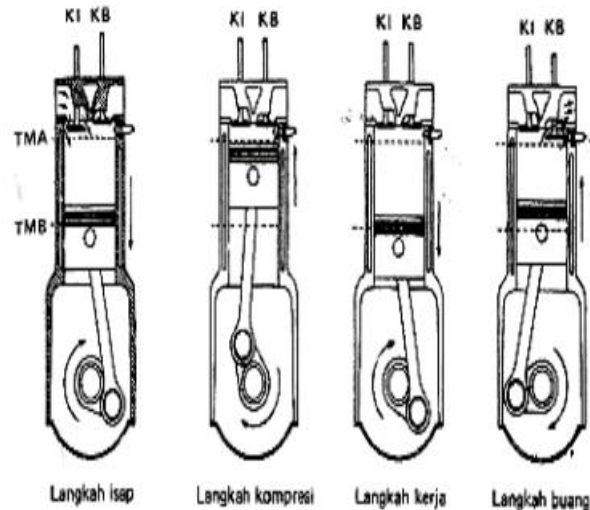
Motor bakar adalah alat yang mengonversi energi yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas melalui proses yang disebut pembakaran. Setelahnya, energi panas tersebut dikonversi menjadi energi mekanik yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan kendaraan atau peralatan lain.

Berdasarkan jenis bahan bakar yang kita ketahui, mesin pembakaran dalam dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu mesin berbahan bakar bensin dan mesin berbahan bakar diesel. Mesin bensin memanfaatkan kombinasi antara bahan bakar dan udara yang masuk ke ruang pembakaran lalu dinyalakan oleh percikan dari busi. Sementara itu, mesin diesel menggunakan solar yang disuntikkan secara langsung ke dalam udara bertekanan dan bersuhu tinggi di ruang pembakaran, sehingga proses pembakaran terjadi secara otomatis.

Dalam studi ini, jenis mesin yang diteliti adalah mesin bensin dengan metode pembakaran dalam tipe empat tahap. Cara kerja mesin empat langkah meliputi langkah hisap, langkah kompresi, langkah usaha, dan langkah buang. Kualitas bahan bakar, termasuk nilai oktan dan kandungan aditif, sangat

memengaruhi proses pembakaran di dalam mesin bensin. Sebagai hasilnya, studi ini juga menyelidiki dampak dari penambahan bioetanol dalam RON 90 dan RON 92 untuk memahami pengaruhnya terhadap tenaga, torsi, penggunaan bahan bakar, dan emisi gas buang pada mesin berbahan bakar bensin.

II.7. Prinsip Kerja Motor Bensin 4 Langkah



Gambar II. 4 Langkah Kerja Motor Bensin 4 Langkah
(Yohanes, 2016)

Mesin 4 langkah adalah tipe mesin yang memerlukan empat gerakan piston dalam satu siklus operasinya, yang berarti piston bergerak maju dan mundur dua kali (Winoko et al., 2022). Untuk lebih memahaminya, satu siklus kerja mesin dilakukan melalui empat gerakan piston (torak), yang setara dengan dua putaran poros engkol (crankshaft) dan satu putaran poros nok (camshaft). Titik tertinggi yang dicapai piston di dalam silinder dinamakan titik mati atas (TMA), sedangkan titik terendahnya disebut titik mati bawah (TMB). Metode operasional mesin empat langkah ini dapat dijelaskan dalam urutan langkah hisap, kompresi, usaha, dan buang.

1. Langkah Hisap (*Intake Stroke*)

Piston bergerak dari titik mati atas (*Top Dead Center/TDC*) menuju titik mati bawah (*Bottom Dead Center/BDC*). Katup masuk (*intake valve*) terbuka, sedangkan katup buang (*exhaust valve*) tertutup. Gerakan piston ke bawah menciptakan kevakuman di dalam silinder, sehingga

campuran udara dan bahan bakar masuk ke ruang bakar melalui katup masuk. Jumlah campuran yang masuk sangat dipengaruhi oleh bukaan katup, tekanan atmosfer, dan sistem pemasukan bahan bakar yang digunakan (karburator atau injeksi). Langkah ini menentukan volume udara dan bahan bakar yang akan dibakar pada tahap berikutnya.

2. Langkah Kompresi (Compression Stroke)

Sesudah piston mencapai posisi terendah (BDC), ia bergerak kembali ke posisi tertinggi (TDC). Pada tahap ini, kedua katup menutup rapat sehingga campuran udara dan bahan bakar terperangkap di ruang pembakaran. Pergerakan piston keatas mengompresi campuran ini, menurunkan volumenya, meningkatkan tekanannya, dan menciptakan suhu yang lebih tinggi. Kompresi yang baik akan menghasilkan pembakaran yang lebih efektif serta tenaga yang lebih besar. Nilai perbandingan kompresi mesin memegang peranan penting dalam kinerja pada langkah ini.

3. Langkah Usaha (Power Stroke)

Beberapa saat sebelum piston mencapai TDC pada akhir langkah kompresi, busi mengeluarkan percikan api untuk memulai pembakaran campuran udara dan bahan bakar. Pembakaran tersebut menghasilkan tekanan dan suhu yang sangat tinggi, mendorong piston bergerak ke bawah menuju BDC. Ini merupakan satu-satunya langkah yang menghasilkan tenaga mekanik yang digunakan untuk memutar poros engkol, yang kemudian diteruskan ke sistem transmisi dan roda kendaraan. Kualitas bahan bakar, nilai oktan, dan pencampuran yang baik sangat memengaruhi efisiensi langkah ini.

4. Langkah Buang (Exhaust Stroke)

Setelah piston mencapai BDC, piston bergerak kembali menuju TDC dengan katup buang terbuka dan katup masuk tetap tertutup. Pergerakan piston ke atas ini mengeluarkan sisa hasil pembakaran (gas buang) dari ruang bakar melalui katup buang menuju sistem pembuangan. Proses pembuangan yang baik akan mencegah terjadinya sisa gas pembakaran yang tertinggal di dalam silinder, sehingga langkah hisap berikutnya dapat membawa masuk campuran udara dan bahan bakar baru dengan kualitas yang optimal.

Motor bensin empat langkah banyak digunakan pada kendaraan roda dua dan roda empat karena memiliki efisiensi pembakaran yang lebih baik, emisi gas buang yang lebih rendah, dan umur pakai mesin yang lebih panjang dibandingkan mesin dua langkah. Selain itu, desain empat langkah juga lebih ramah lingkungan karena pembakarannya lebih sempurna, sehingga cocok untuk mendukung pemanfaatan bahan bakar alternatif seperti bioetanol.

II.8. Emisi Gas Buang

Gas buang kendaraan atau emisi gas buang adalah gas sisa yang dilepaskan ke udara melalui saluran buang kendaraan (Sitanggung et al., 2024). Proses pembakaran di ruang bakar tidak selalu berjalan dengan baik, sehingga menghasilkan berbagai jenis senyawa kimia yang memiliki karakteristik dan dampak yang berbeda. Secara umum, gas buang ini mengandung karbon monoksida (CO) yang berbahaya, oksida nitrogen (NO_x) yang dapat menyebabkan hujan asam dan masalah pernapasan, hidrokarbon (HC) yang bisa menyebabkan pembentukan kabut asap, karbon dioksida (CO_2) yang termasuk gas rumah kaca, uap air (H_2O) yang merupakan hasil dari pembakaran hidrogen, nitrogen (N_2) yang berasal dari atmosfer, serta timbal (Pb) yang dapat terlihat jika bahan bakar mengandung senyawa timbal. (Mara et al., 2019).

Kandungan setiap unsur dalam emisi gas buang dipengaruhi oleh berbagai aspek, seperti mutu bahan bakar, angka oktan, komposisi aditif, rasio udara terhadap bahan bakar, serta kondisi sistem pembakaran. Pemanfaatan bahan bakar dengan angka oktan tinggi dan kadar oksigen lebih tinggi, seperti bioetanol, dapat meningkatkan efisiensi proses pembakaran sehingga mengurangi emisi CO dan HC yang dikeluarkan ke atmosfer. Dalam studi ini, pengujian emisi gas buang dilaksanakan untuk mengetahui dampak penambahan bioetanol dari tebu pada RON 90 dan RON 92 terhadap komposisi gas buang kendaraan, terutama dalam upaya untuk mengurangi emisi berbahaya yang dapat memberikan dampak negatif bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Pengujian dilaksanakan untuk menilai kadar emisi gas yang dihasilkan oleh mesin diesel maupun mesin bensin pada kendaraan roda empat. Untuk mesin bensin, pengujian dilakukan dengan menggunakan perangkat bernama Gas Analyzer dalam keadaan kendaraan *idle*. Ketika kendaraan dalam keadaan tidak bergerak, ia memproduksi emisi yang menunjukkan seberapa baik bahan bakar terbakar, seberapa efisien energi digunakan, serta kesehatan mesin dan pengaruhnya terhadap lingkungan (Hermansyah & Koto, 2024). Dalam pengujian ini, emisi gas buang akan diukur dengan fokus pada dua parameter, yaitu kadar karbon monoksida (CO) dan jumlah hidrokarbon (HC).

Kategori	Tahun Pembuatan	Parameter			Metode Uji
		Karbon Monoksida (CO)	Hidrokarbon (HC)	Opasitas	
Berpenggerak motor bakar cetus api (bensin)					
Kategori M	< 2007	4%	1000ppm		Kondisi diam (<i>Idle</i>)
	2007-2018	1%	150ppm		
	>2018	0.5%	100ppm		
Kategori N dan Kategori O	< 2007	4%	1100ppm		
	2007-2018	1%	200ppm		
	>2018	0.5%	150ppm		
Berpenggerak motor bakar penyalaan kompresi (diesel)					
Kategori M, Kategori N dan Kategori O					
JBB ≤ 3,5 ton	< 2010			65% HSU	Percepatan bebas
	2010-2021			40% HSU	
	>2021			30% HSU	
GVW > 3,5 ton	< 2010			65% HSU	
	2010-2021			40% HSU	
	>2021			35% HSU	

Gambar II. 5 Ambang Batas Emisi Gas Buang
([Permen LHK No. 8 Tahun 2023](#))

II.9. Parameter Kerja Mesin

Dalam menilai kinerja mesin, ada beberapa faktor penting yang menjadi acuan, yaitu daya, torsi, dan konsumsi bahan bakar spesifik (Specific Fuel Consumption/SFC) (Hermawan et al., 2021). Ketiga faktor ini terhubung satu sama lain untuk menentukan sejauh mana mesin mampu menghasilkan tenaga serta seberapa efisien mesin tersebut dalam memanfaatkan bahan bakar.

1. Daya

Daya merupakan kemampuan mesin untuk melakukan kerja dalam suatu satuan waktu. Semakin besar daya yang dihasilkan, semakin besar

pula kemampuan mesin dalam menggerakkan beban. Daya mesin dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar yang terbakar, efisiensi proses pembakaran, serta kapasitas silinder. Pada mesin, daya dalam satuan internasional (SI) diukur dalam Watt (W) sehingga dalam perhitungan daya dapat dihitung dengan rumus seperti berikut (Prasetyo et al., 2022):

$$P = \frac{2\pi \times T \times N}{60 \times 1000} \quad (1)$$

Dimana :

P = Daya (Kilo Watt)

T = Torsi (N.m)

N = Putaran Mesin (rpm)

2. Torsi

Besaran torsi merupakan sebuah ukuran yang digunakan untuk menentukan energi yang dihasilkan oleh objek yang berputar pada porosnya (Pakan & Fadli, 2021). Ukuran torsi dinyatakan dalam satuan Newton meter (Nm). Pentingnya nilai torsi tidak dapat diabaikan karena ini mempengaruhi kapasitas mesin untuk menggerakkan beban pada kecepatan tertentu. Mesin yang memiliki torsi tinggi biasanya lebih efisien dalam menarik atau menggerakkan beban berat, bahkan pada RPM yang rendah. Torsi di lambangkan dengan huruf T, berikut persamaan dalam perhitungan torsi:

$$T = m \times g \times b \quad (2)$$

Dimana :

T = Torsi (N.m)

m = Besar Beban Pengereman (kg)

g = Konstanta Gravitasi (m/s²)

b = Jarak Benda ke Pusat Rotasi (m)

3. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Specific Fuel Consumption/SFC)

SFC merupakan indikator efektivitas mesin dalam memanfaatkan bahan bakar untuk menghasilkan energi. Angkanya dinyatakan dalam gram per kilowatt-jam (g/kWh). Saat membandingkan mesin satu sama lain yang diperhatikan bukanlah konsumsi bahan bakar per jam, tetapi konsumsi bahan bakar yang spesifik, yang menunjukkan

jumlah bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan daya dari unit tersebut (KÜÇÜKSARIYILDIZ et al., 2021). Nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan bahwa mesin itu lebih efisien, karena memerlukan lebih sedikit bahan bakar untuk menghasilkan satuan daya yang sama. Faktor-faktor yang memengaruhi SFC meliputi keadaan operasi mesin, rancangan mesin, dan mutu bahan bakar yang digunakan. Menurut (Prasetyo et al., 2022) nilai SFC (Konsumsi Bahan Bakar Spesifik) menggunakan persamaan rumus berikut:

$$SFC = \frac{FC}{P} \quad (3)$$

Dimana :

$$SFC = \text{Specific Fuel Consumption} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{kW}} \times \text{jam} \right)$$

FC = Banyak bahan bakar yang dikonsumsi mesin per unit waktu (Kg/ml)

P = Daya (Kw)

$$FC = \left(\frac{b}{t} \right) \times \rho \times \left(\frac{3600}{1000} \right) \quad (4)$$

b = Volume bahan bakar (ml)

ρ = Massa jenis bahan bakar (gr/ml)

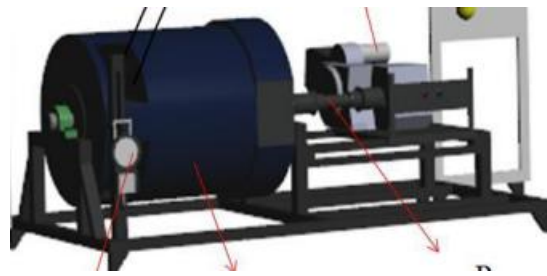
t = waktu yang dibutuhkan mesin saat bekerja (detik)

II.10. Dinamometer

Dinamometer merupakan perangkat pengukur yang berfungsi untuk menilai kinerja mesin, terutama terkait dengan daya dan torsi yang dihasilkan. Secara umum, dinamometer beroperasi dengan memberikan beban tertentu pada mesin atau kendaraan, lalu mencatat reaksi mesin terhadap beban itu. Data yang diperoleh dari pengukuran ini dapat dimanfaatkan untuk menganalisis performa mesin, efisiensi penggunaan bahan bakar, hingga tingkat emisi gas buang.

Terdapat dua tipe dasar dinamometer yang umum digunakan, yaitu dinamometer mesin dan dinamometer sasis. Dinamometer dipakai untuk menciptakan simulasi jalan, baik untuk mesin (dengan menggunakan dinamometer mesin) maupun untuk kendaraan secara keseluruhan (dengan memanfaatkan dinamometer sasis) (Kapasitas et al., 2022). Lebih rincinya

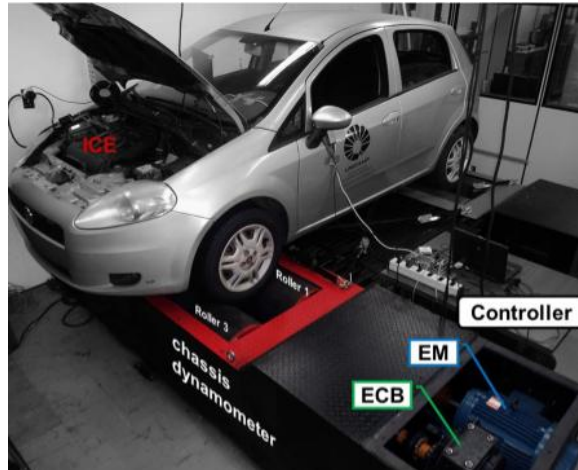
dinamometer mesin berfungsi untuk menentukan daya secara langsung pada poros engkol atau flywheel mesin yang diambil dari kendaraan. Sementara itu, dinamometer sasis mengukur daya yang diteruskan ke roda kendaraan, sehingga memberikan gambaran yang lebih akurat tentang kinerja kendaraan karena sudah memperhitungkan pengaruh dari sistem transmisi, roda, dan gesekan mekanis yang lain.



Gambar II. 6 Engine Dinamometer

(Santoso et al., 2015)

Dinamometer sasis sering kali digunakan dalam penelitian karena lebih efisien, tidak memerlukan pemisahan mesin dari kendaraan, dan dapat memberikan data kinerja yang lebih akurat sesuai dengan kondisi berkendara di jalan. Pengukuran umumnya dilakukan dengan meletakkan roda penggerak kendaraan di atas roller dinamometer, lalu kendaraan dioperasikan pada berbagai tingkat putaran mesin. Alat ini akan merekam besaran daya dan torsi yang dihasilkan.



Gambar II. 7 Sasis Dinamometer

(Augusta et al., 2023)

Dalam penelitian ini, dinamometer digunakan untuk mengetahui pengaruh campuran bioetanol berbasis tebu pada RON 90 dan RON 92 terhadap performa mesin, khususnya daya dan torsi kendaraan. Data hasil pengukuran dinamometer juga menjadi dasar dalam membandingkan efisiensi bahan bakar serta perubahan emisi gas buang akibat penggunaan bahan bakar campuran tersebut.

II.11. Penelitian yang Relevan

Penelitian yang relevan adalah penelitian yang telah dilaksanakan oleh peneliti sebelumnya dan masih memiliki hubungan dengan studi yang akan dilakukan. Di bab ini, akan dipaparkan hasil dari penelitian yang relevan yang menjadi dasar teori untuk penelitian yang dilakukan oleh penulis.

Tabel II. 2 Penelitian Relevan

No	Penelitian	Penulis	Hasil
1.	Study on the performance of the Otto engine by using mixtures of gasoline-bioethanol of nira	(Sitorus et al., 2020)	Kinerja mesin Otto dengan campuran bensin dan bioetanol dari nira pada variasi E0, E10, E20, dan E30. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bioetanol meningkatkan angka oktan,

		<p>memperbaiki pembakaran, dan menghasilkan daya serta efisiensi mesin yang lebih baik dibandingkan bensin murni. Selain itu, emisi karbon monoksida (CO) menurun seiring bertambahnya kadar bioetanol, meskipun nilai kalor bahan bakar menjadi lebih rendah pada campuran dengan konsentrasi tinggi.</p>
2.	<p>Analysis of fuel pressure on the performance of motorcycle engine with ethanol fuel (Irawan et al., 2021)</p>	<p>Meneliti pengaruh tekanan pompa bahan bakar terhadap performa motor berbahan bakar etanol. Hasilnya, pada tekanan 3,5 bar mesin mampu menghasilkan daya maksimum 6 HP pada 8000 rpm, torsi maksimum 5,5 Nm pada 7500 rpm, serta konsumsi bahan bakar spesifik terendah 0,409 kg/HPh. Hal ini menunjukkan etanol murni dapat digunakan pada motor 4-tak dengan penyesuaian tekanan bahan bakar.</p>
	<p>Eco-Friendly Motorcycle Technology: Examining the Impact of Banana Peel-Based Catalytic Converters on CO (Wagino et al., 2024)</p>	<p>Campuran bensin dengan 20% bioetanol, yang dikombinasikan dengan katalis dari kulit pisang pada sepeda motor Yamaha Vega ZR. Penelitian ini menunjukkan bahwa katalis kulit pisang mampu</p>

Emissions with Biogasoline Fuel	menurunkan emisi gas buang, terutama karbon monoksida (CO) hingga 18 persen. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pemanfaatan bioetanol dalam bahan bakar dapat dipadukan dengan teknologi ramah lingkungan lainnya untuk menekan pencemaran udara.
4. Impact of Bioethanol Concentration in Gasoline on SI Engine Sustainability (Rimkus et al., 2024)	Campuran bioetanol-bensin hingga E70 pada mesin Internasional. Penelitian ini menemukan bahwa torsi dan efisiensi termal meningkat, sementara emisi CO, HC, dan NOx menurun signifikan. Meski demikian, konsumsi bahan bakar meningkat akibat nilai kalor etanol lebih rendah, dan diperlukan penyesuaian waktu pengapian untuk campuran etanol tinggi.
5. Research on Bioethanol/Gasoline Ratios and Engine Spark Ignition Control for Energy and Environmental Sustainability of Vehicles (Rimkus et al., 2023)	Menjelaskan bahwa semakin tinggi kadar bioetanol, maka torsi rem dan efisiensi termal mesin meningkat. Campuran bioetanol juga terbukti menurunkan emisi CO dan HC, meskipun pada konsentrasi yang tinggi terjadi peningkatan emisi karbon dioksida (CO ₂).

		Selain itu, penelitian ini menemukan perlunya penyesuaian waktu pengapian karena sifat etanol yang memperpanjang ignition delay.
6.	Effects of blending bioethanol with gasoline on spark-ignition engine – A review (Deshmukh & Pande, 2022)	Pencampuran bioetanol dengan bensin secara umum mampu meningkatkan angka oktan bahan bakar serta mengurangi emisi gas buang, khususnya CO, HC, dan NOx. Campuran bioetanol pada kisaran 10–20 persen dinilai paling optimal karena dapat meningkatkan performa mesin sekaligus menjaga efisiensi penggunaan bahan bakar. Namun, penelitian ini juga menekankan adanya keterbatasan berupa nilai kalor etanol yang lebih rendah dibandingkan bensin serta potensi masalah pada stabilitas campuran.
7.	Impact of Bioethanol and VCO Oil Additives on Power Output and Exhaust Gas Emissions in a 2-Stroke Gasoline Engine (Septiningsih et al., 2025)	Penggunaan bioetanol dan Virgin Coconut Oil (VCO) pada sepeda motor dua langkah memberikan pengaruh positif terhadap performa mesin dan emisi gas buang. Campuran VCO dengan 500 ml bioetanol menghasilkan daya mesin yang

paling tinggi, sekaligus memperlihatkan perbaikan proses pembakaran yang ditandai dengan berkurangnya emisi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC).

Berdasarkan penelitian relevan pada Tabel 2, penelitian kali ini memiliki beberapa perbedaan yang cukup mendasar dibandingkan penelitian terdahulu. Mayoritas penelitian sebelumnya menggunakan bensin standar internasional dengan RON 92 sebagai campuran bioetanol, sedangkan penelitian ini difokuskan pada RON 90 dan RON 92 yang merupakan bahan bakar paling banyak digunakan masyarakat Indonesia setelah Premium dihapus, sehingga hasilnya lebih aplikatif terhadap kondisi nyata konsumsi BBM nasional. Dari sisi objek penelitian, sebagian besar studi sebelumnya masih terbatas pada sepeda motor atau mesin uji stasioner dengan kapasitas kecil, sementara penelitian ini menggunakan kendaraan roda empat Mitsubishi Xpander 2017 Exceed yang lebih relevan dengan kebutuhan transportasi masyarakat saat ini, sekaligus memberikan nilai kebaruan karena studi bioetanol pada mobil masih jarang dilakukan di Indonesia.

Selain itu, parameter yang diuji dalam penelitian ini juga lebih komprehensif. Jika penelitian sebelumnya cenderung hanya menyoroti daya atau emisi, penelitian ini mengukur daya, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), dan emisi gas buang sekaligus, sehingga hasilnya dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai efek bioetanol terhadap performa mesin maupun dampak lingkungannya. Dari sisi bahan baku, penelitian terdahulu menggunakan nira, bioetanol murni (E100), bahkan kombinasi dengan Virgin Coconut Oil maupun katalis kulit pisang. Sementara itu, penelitian ini menekankan pada bioetanol berbasis tebu (molase) yang potensinya besar di Indonesia, sekaligus selaras dengan program pemerintah dalam mengembangkan energi terbarukan berbasis tebu dan singkong sebagai bahan bakar nabati.