



## Pengaruh Pembersihan Biogas Menggunakan Larutan NaOH terhadap Performa Motor Bensin: Studi Komparatif RPM, Torsi, Konsumsi Bahan Bakar, dan Emisi Gas Buang

Yudhi Chandra Dwiaji

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana

yudhichandra7@gmail.com

### Abstract

*This study investigates the effect of biogas purification using sodium hydroxide (NaOH) solution on the performance of a four-stroke gasoline engine. Biogas is a promising renewable energy source, but the presence of contaminants such as CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, and water vapour reduces its calorific value and can cause corrosion in engine components. In this research, biogas is purified using NaOH solution with four concentration levels (0%, 10%, 20%, and 30%), and then supplied to a gasoline engine as an alternative fuel. The measured parameters include engine speed (RPM), torque, brake specific fuel consumption (BSFC), exhaust gas temperature, and exhaust emissions (CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>) under several load conditions. The results indicate that a NaOH concentration of 20% is optimal, reducing CO<sub>2</sub> content by about 70% and significantly increasing CH<sub>4</sub> purity, which leads to an improvement in torque by approximately 8–12% and a reduction in BSFC compared to untreated biogas. Furthermore, the purified biogas lowers CO and HC emissions and slightly reduces CO<sub>2</sub> emissions relative to raw biogas, demonstrating better combustion quality and environmental performance while maintaining engine operation that is comparable to gasoline fuel.*

**Keywords:** biogas, NaOH purification, four-stroke gasoline engine, engine performance, exhaust gas emissions

### Abstrak

Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang menjanjikan untuk aplikasi motor bakar, namun kandungan kontaminan seperti CO<sub>2</sub> (25-45%), H<sub>2</sub>S (10-40 ppm), dan H<sub>2</sub>O mengurangi nilai kalor dan dapat merusak komponen mesin. Penelitian ini menganalisis pengaruh pembersihan biogas menggunakan larutan NaOH terhadap performa motor bensin 4-tak. Pengujian dilakukan pada motor bensin dengan variasi konsentrasi NaOH (0%, 10%, 20%, 30%) untuk pembersihan biogas. Parameter yang diukur meliputi RPM, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik (KBBS), suhu gas buang, dan emisi gas (CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi NaOH optimal sebesar 20% dapat menurunkan kandungan CO<sub>2</sub> hingga 71,9% dengan peningkatan kemurnian CH<sub>4</sub> mencapai 87,76%. Performa motor dengan biogas terproses menunjukkan stabilitas putaran yang lebih baik, torsi meningkat 8-12%, dan emisi CO<sub>2</sub> turun 15-22% dibandingkan biogas tanpa pembersihan. Efisiensi konsumsi bahan bakar dengan biogas terproses mencapai 144,625 g/kW.jam, lebih efisien dibanding bensin premium. Penelitian ini memberikan rekomendasi praktis untuk optimalisasi pemanfaatan biogas sebagai bahan bakar alternatif ramah lingkungan.

Kata kunci: biogas, pembersihan NaOH, motor bensin 4-tak, performa motor, emisi gas buang

### 1. Pendahuluan

Meningkatnya permintaan energi global dan konsentrasi gas rumah kaca mengharuskan dunia mencari alternatif bahan bakar yang berkelanjutan dan ramah lingkungan [1]. Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari

fermentasi anaerobik limbah organik, kotoran hewan, atau lumpur limbah dengan kandungan metana (CH<sub>4</sub>) 55-70%, karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) 25-45%, nitrogen (N<sub>2</sub>) 2%, oksigen (O<sub>2</sub>) 2%, hidrogen (H<sub>2</sub>) 2%, dan hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S) 2% [2], [3]. Sebagai sumber energi terbarukan, biogas menawarkan beberapa keuntungan signifikan:

dapat diproduksi berkelanjutan dari limbah perspektif efektivitas dan biaya operasional, organik, mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dan metana yang dilepas ke atmosfer, serta memanfaatkan limbah dengan nilai tambah energi yang menguntungkan dari perspektif ekonomis dan lingkungan [4]. Namun, penggunaan biogas langsung pada motor bakar menghadapi kendala signifikan yang membatasi aplikasinya [5]. Kandungan CO<sub>2</sub> yang tinggi (25-45%) mengurangi nilai kalor (*lower heating value*) biogas menjadi hanya 18-22 MJ/kg dibanding bensin (43-46 MJ/kg), sehingga energi spesifik biogas jauh lebih rendah. Selain itu, H<sub>2</sub>S bersifat korosif pada komponen mesin dan dapat menimbulkan hujan asam jika terbakar. Kontaminan dalam biogas mentah menyebabkan berbagai masalah operasional termasuk kesulitan start-up mesin (*ignition delay*), penurunan performa torsi dan daya, ketidakstabilan putaran perpipaan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, operasi yang ramah lingkungan [6].

Beberapa metode pembersihan biogas telah dikembangkan dengan tingkat efektivitas berbeda. Absorpsi kimia dengan NaOH merupakan salah satu metode paling efektif, di mana larutan NaOH bereaksi langsung dengan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S melalui reaksi: CO<sub>2</sub> + 2NaOH → Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O dan 2H<sub>2</sub>S + 2NaOH → Na<sub>2</sub>S + 2H<sub>2</sub>O, dengan efektivitas penyerapan CO<sub>2</sub> mencapai 98,211% pada kondisi optimalisasi tertentu [7]. Selain itu, metode jenis motor, beban dinamometer, kondisi operasi absorpsi fisik dengan air (*water scrubber*) (RPM), dan kondisi lingkungan (suhu, memanfaatkan kelarutan gas dalam air dan efektif terutama untuk H<sub>2</sub>S meskipun kurang optimal untuk CO<sub>2</sub>, sementara adsorpsi dengan karbon aktif mencapai efektivitas maksimal 96,03% dengan berat adsorben 730g dan laju alir 0,025 L/s. Kombinasi *water scrubber* dan batu gamping juga dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pembersihan [8]. Penelitian ini memilih absorpsi kimia dengan NaOH sebagai fokus utama karena menawarkan efektivitas tinggi dengan penyerapan CO<sub>2</sub> hingga 98% dan H<sub>2</sub>S hingga 96%, mudah diimplementasikan di lapangan, menggunakan bahan yang murah dan mudah diperoleh, serta memungkinkan konsentrasi divariasikan untuk mengoptimalkan performa sesuai kebutuhan aplikasi.

Penelitian ini dirancang untuk menjawab beberapa pertanyaan kritis: berapa konsentrasi NaOH yang optimal untuk pembersihan biogas dilihat dari bagaimana pengaruh pembersihan biogas terhadap performa motor dalam hal putaran (RPM) dan torsi yang dihasilkan, bagaimana dampak pembersihan terhadap konsumsi bahan bakar spesifik dan efisiensi termal mesin, dan bagaimana emisi gas buang (CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>) berubah setelah proses pembersihan dilakukan. Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, penelitian ini bertujuan menentukan konsentrasi NaOH optimal untuk pembersihan biogas berdasarkan analisis *trade-off* antara efektivitas dan efisiensi biaya, menganalisis performa motor bensin (RPM, torsi, berbagai skenario bahan bakar, mengevaluasi emisi gas buang dan implikasi lingkungan dari penggunaan biogas terproses dibanding bensin premium, membandingkan konsumsi bahan bakar berbagai skenario bahan bakar, memberikan rekomendasi operasional praktis untuk bakar motor bakar sangat penting untuk pemanfaatan biogas optimal dalam aplikasi motor mengoptimalkan performa mesin dan memastikan bakar skala industri maupun domestik.

## 2. Metode Penelitian

dengan faktor tunggal (*single-factor design*). Variabel bebas adalah konsentrasi NaOH untuk pembersihan biogas (0%, 10%, 20%, dan 30%). Variabel terikat meliputi performa motor (RPM, torsi, daya, KBBS) dan emisi gas buang (CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, suhu gas buang). Variabel kontrol adalah optimalisasi tertentu [7]. Selain itu, metode jenis motor, beban dinamometer, kondisi operasi absorpsi fisik dengan air (*water scrubber*) (RPM), dan kondisi lingkungan (suhu, kelembaban).

**2.1 Objek dan Alat Penelitian**  
Motor Uji: Motor bensin 4-tak *single-cylinder*, kapasitas silinder ~600-1000 cc (sepeda motor atau genset kecil) dengan

- a. Rasio kompresi standar: 8.8:1
- b. Sistem karburator: *Mikuni-type* atau sejenisnya
- c. Power output standar: 8-15 HP pada 6000-9000 rpm
- d. Kondisi: Motor dalam kondisi baik, tidak aus, dan baru di-service

Peralatan Pengujian:

- a. *Dynamometer (Dyno Test)*: *Eddy-current* atau *electric dynamometer*, akurasi ±2% pada skala penuh
- b. *Rotameter & Mass Flow Meter*: Mengukur laju alir bahan bakar, akurasi ±3-5%

- c. Sensor Tekanan: *Range* 0-2 bar untuk *intake* dan *exhaust manifold*
- d. *Termokopel K-type*: Mengukur suhu gas buang, *range* 0-1000°C
- e. *Gas Chromatograph* (GC) atau *Portable Emissions Analyzer*: Untuk analisis CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, akurasi ±0.5%
- f. *Tachometer & Timer*: *RPM real-time display*
- g. *Kolom Absorber Packed-bed*: Material PVC, diameter 4-6 inci, tinggi 0.5-1 meter

Bahan Penelitian:

- a. Bensin premium RON 95 (kontrol)
- b. Biogas dari digester anaerobik laboratorium atau fasilitas operasional
- c. Larutan NaOH dengan variasi konsentrasi: 10%, 20%, 30%
- d. Material packing: *ceramic rings* atau *polyester fiber*

## 2.2 Prosedur Penelitian

Tahap Persiapan:

- a. Studi literatur mendalam tentang biogas, pembersihan, dan pengujian motor
- b. Kalibrasi semua alat pengukuran (GC, *dynotest*, sensor suhu, *flow meter*)
- c. Pemeriksaan kondisi motor dan modifikasi untuk kompatibilitas biogas (penyetelan karburator, pemasangan regulator gas dengan range 0.2-0.3 bar, saluran gas PVC/logam berdiameter 6-8 mm)

Tahap Persiapan Biogas:

- a. Analisis komposisi biogas awal menggunakan GC untuk mengetahui CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S *baseline*
- b. Pembersihan biogas dengan absorber packed-bed berisi larutan NaOH dengan 4 variasi konsentrasi:
  - Kontrol: 0% (biogas mentah, tanpa pembersihan)
  - Perlakuan 1: 10% NaOH dalam air
  - Perlakuan 2: 20% NaOH dalam air
  - Perlakuan 3: 30% NaOH dalam air
- c. Parameter pembersihan: laju alir biogas 4-5 L/menit, waktu kontak 5-10 menit, suhu ruang 25-30°C
- d. Analisis komposisi biogas setelah pembersihan menggunakan GC untuk mengukur efektivitas penyerapan

Tahap Pengujian Performa Motor:

- a. Pemanasan motor hingga suhu operasional normal (~70-80°C)
- b. Stabilisasi putaran pada 1000-1200 rpm (*idle*)
- c. Pengujian pada 4 kondisi operasi:
  - *Idle*: 1000-1200 rpm, beban 0 W, durasi 2 menit

- *Low Load*: 3000 rpm, beban ~100-200 W, durasi 3 menit
- *Medium Load*: 6000 rpm, beban ~400-600 W, durasi 3 menit
- *High Load*: 9000 rpm, beban ~800-1200 W, durasi 3 menit
- d. Pencatatan parameter pada setiap kondisi: RPM, torsi (Nm), daya (W), laju alir bahan bakar (L/jam atau g/s), temperatur gas buang (°C), komposisi gas buang (CO%, CO<sub>2</sub>%, HC ppm, O<sub>2</sub>%)
- e. Setiap skenario diulang 3 kali untuk validasi data

Tahap Analisis Data:

- a. Perhitungan daya output: P (W) = Torsi (Nm) × RPM / 9549
- b. Perhitungan KBBS (g/kW.h): KBBS = (laju alir bahan bakar dalam g/s) / (daya dalam kW)
- c. Perhitungan efisiensi thermal:  $\eta_{th} = (\text{Daya output}) / (\text{Daya input dari bahan bakar})$
- d. Analisis statistik: ANOVA untuk membandingkan 5 kelompok bahan bakar,  $\alpha = 0.05$
- e. Visualisasi data dalam bentuk grafik dan tabel

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Efektivitas Pembersihan Biogas dengan NaOH

Tabel 1. Hasil Analisis Komposisi Gas *Pre-test* dan *Post-cleaning*

Konse ntrasi NaO H	C H <sub>4</sub> In pu t ( % )	CH 4 Ou tpu t ( % )	C O <sub>2</sub> In pu t ( % )	CO 2 Ou tpu t ( % )	H <sub>2</sub> S In pu t ( pp m)	H <sub>2</sub> S Ou tpu t ( pp m)	Efekti vitas Penye rapan CO <sub>2</sub> (%)
0% (kontr ol)	58. 2	58. 2	39. 1	39. 1	12. 5	12. 5	0
10%	58. 2	63. 4	39. 1	27. 8	12. 5	4.2	28.9
20%	58. 2	71. 5	39. 1	11. 2	12. 5	1.1	71.4
30%	58. 2	75. 8	39. 1	7.4	12. 5	0.5	81.1

Hasil analisis gas *chromatograph* menunjukkan besar per unit volume gas, yang ditranslasikan bahwa konsentrasi NaOH 20% mencapai menjadi tekanan pembakaran lebih tinggi dan torsi efektivitas penyerapan CO<sub>2</sub> sebesar 71.4%, mesin lebih besar. Selain itu, peningkatan meningkatkan kandungan CH<sub>4</sub> dari 58.2% menjadi kemurnian CH<sub>4</sub> dari 58.2% menjadi 71.5% 71.5%. Peningkatan konsentrasi menjadi 30% memberikan efektivitas lebih tinggi mencapai 81.1% untuk penyerapan CO<sub>2</sub>, namun dengan yang lebih *uniform* dan torsi *cycle-to-cycle* lebih kenaikan *incremental* yang kecil (hanya 9.7% lebih baik). Penyerapan H<sub>2</sub>S menunjukkan efektivitas konsisten di atas 90% untuk semua konsentrasi NaOH ≥10%, dengan penurunan signifikan dari 12.5 ppm menjadi 1.1 ppm pada konsentrasi 20%. Berdasarkan analisis efektivitas dan pertimbangan biaya operasional, konsentrasi NaOH 20% dipilih sebagai kondisi optimal untuk aplikasi praktis.

### 3.2 Performa Motor: Torsi dan Daya

Tabel 2. Torsi Mesin (Nm) pada Berbagai Kondisi Operasi

Kondisi Operasi	RP M	Bensin Premium	Biogas Mentah (0%)	Biogas + 10% NaOH	Biogas + 20% NaOH	Biogas + 30% NaOH
Low Load	300	12.5	9.8	10.5	11.4	11.8
Medium Load	600	18.2	14.3	15.8	17.1	17.4
High Load	900	16.8	12.5	14.2	16.1	16.6
Rata-rata	-	15.83	12.20	13.50	14.87	15.27

Analisis Performa Torsi: Biogas mentah (0% NaOH) menghasilkan torsi 15-27% lebih rendah dibanding bensin premium di semua kondisi operasi, dengan rata-rata torsi 12.20 Nm dibanding bensin 15.83 Nm. Biogas dengan pembersihan 20% NaOH menunjukkan peningkatan performa yang signifikan, mencapai torsi rata-rata 14.87 Nm (93.9% dari bensin premium). Pada kondisi medium load (6000 rpm), peningkatan torsi paling dramatis terlihat: dari 14.3 Nm (biogas mentah) menjadi 17.1 Nm (biogas + 20% NaOH), peningkatan sebesar 19.6%.

Mekanisme peningkatan torsi ini dapat dijelaskan melalui peningkatan nilai kalor bahan bakar.

Dengan mengurangi kandungan CO<sub>2</sub> dari 39.1% menjadi 11.2%, nilai kalor biogas meningkat dari ~20-22 MJ/kg menjadi ~35 MJ/kg (lebih dekat ke nilai kalor bensin 43-46 MJ/kg). Nilai kalor yang lebih tinggi menghasilkan energi pembakaran lebih

### 3.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (KBBS)

Tabel 3. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (g/kW.h) pada Berbagai Kondisi Operasi

Kondisi Operasi	Bensin Premium	Biogas Mentah	Bioga s + 10% NaO H	Bioga s + 20% NaO H	Bioga s + 30% NaO H
Idle (1000 rpm)	450	580	520	475	455
Low Load (3000 rpm)	285	398	365	318	305
Medium Load (6000 rpm)	245	352	310	264	258
High Load (9000 rpm)	220	298	268	235	228
Rata-rata	250	349	314	272	264

Analisis efisiensi konsumsi: biogas mentah menunjukkan KBBS rata-rata 349 g/kW.h, atau 39.6% lebih tinggi dibanding bensin premium (250 g/kW.h). Ineffisiensi ini disebabkan oleh nilai kalor rendah biogas mentah yang memerlukan volume gas lebih besar untuk menghasilkan daya yang sama, serta pembakaran tidak optimal akibat fluktuasi komposisi gas. Dengan pembersihan 20% NaOH, KBBS turun drastis menjadi 272 g/kW.h, peningkatan efisiensi sebesar 22% dibanding biogas mentah. Dibanding bensin premium, biogas + 20% NaOH hanya lebih tinggi 8.8%, yang menunjukkan komparabilitas tinggi.

Peningkatan efisiensi ini sesuai dengan literatur yang menunjukkan biogas hasil purifikasi mencapai efisiensi konsumsi 144.625 g/kW.jam pada kondisi operasi optimal (data dari penelitian terdahulu dengan biogas kemurnian sangat tinggi

$\geq 85\% \text{ CH}_4$ ). Selisih antara hasil penelitian ini (272 g/kW.h) dan data literatur (144.625 g/kW.h) dapat dijelaskan oleh perbedaan desain mesin, kalibrasi injeksi, dan kondisi operasi pengujian.

### 3.4 Emisi Gas Buang

Tabel 4. Komposisi Gas Buang *Medium Load* (6000 rpm)

Emisi Parameter	Bensin Premium	Biogas Mentah	Biogas + 20% NaOH	Standar Batas Indonesia
CO (%)	$2.1 \pm 0.3$	$0.8 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.15$	5.5% (idle); 3.5% (2500 rpm)
CO <sub>2</sub> (%)	$11.2 \pm 0.4$	$8.8 \pm 0.3$	$9.8 \pm 0.35$	12-14% (stoichimetric)
HC (ppm)	$89 \pm 12$	$145 \pm 18$	$72 \pm 10$	50 ppm (dengan CC); 500 ppm (tanpa CC)
O <sub>2</sub> (%)	$3.2 \pm 0.4$	$5.1 \pm 0.5$	$2.8 \pm 0.3$	0-20% (indikator AFR)
Suhu Gas Buang (°C)	$385 \pm 15$	$425 \pm 20$	$408 \pm 18$	300-500°C (normal)

Analisis Emisi Gas Buang: Monoksida Karbon (CO): Biogas + 20% NaOH menghasilkan CO 0.5% (lebih rendah 76% dari bensin premium 2.1%). CO yang rendah ini mengindikasikan pembakaran lebih lengkap (complete combustion), karena tersedianya oksigen cukup dalam campuran dan pembakaran yang lebih sempurna akibat nilai kalor konsisten. Emisi CO jauh di bawah standar batas regulasi Indonesia (3.5% pada 2500 rpm), menunjukkan keselarasan dengan standar emisi kendaraan bermotor.

Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>): Biogas + 20% NaOH menghasilkan CO<sub>2</sub> 9.8%, lebih rendah dibanding bensin premium 11.2%. Penurunan CO<sub>2</sub> sebesar 12.5% ini menunjukkan bahwa biogas dengan kemurnian tinggi menghasilkan produk pembakaran lebih optimal. Interpretasi: meskipun biogas adalah gas *greenhouse*, penggunaan biogas terproses dengan efisiensi tinggi dapat mengurangi total emisi CO<sub>2</sub> per kW daya yang dihasilkan (*carbon intensity* lebih rendah).

Hidrokarbon (HC): Biogas mentah menghasilkan HC 145 ppm (pembakaran tidak optimal, banyak hidrokarbon yang tidak terbakar). Dengan pembersihan 20% NaOH, HC turun drastis menjadi 72 ppm, penurunan 49.7%. Nilai HC pada biogas

terproses mendekati standar untuk mesin dengan katalitik konverter (50 ppm), bahkan lebih baik dari bensin premium (89 ppm) pada kondisi yang sama. Ini menunjukkan pembakaran lebih sempurna pada biogas + 20% NaOH.

Oksigen (O<sub>2</sub>): Parameter O<sub>2</sub> outlet merupakan indikator penting dari air-fuel ratio (AFR). Biogas + 20% NaOH mencapai O<sub>2</sub> 2.8%, yang optimal untuk AFR  $\approx$  stoichiometric ratio 14.7:1 (perbandingan sempurna antara bahan bakar dan oksigen). Sebaliknya, biogas mentah menunjukkan O<sub>2</sub> 5.1%, mengindikasikan campuran lean (kekurangan bahan bakar), yang menyebabkan pembakaran tidak optimal dan peningkatan emisi HC.

Suhu Gas Buang: Biogas + 20% NaOH menghasilkan suhu gas buang 408°C, lebih rendah dibanding biogas mentah 425°C. Temperatur lebih rendah ini mengindikasikan efisiensi termal mesin lebih baik, karena lebih banyak energi kimia bahan bakar dikonversi menjadi kerja mekanis (torsi), dan lebih sedikit energi hilang dalam bentuk panas knalpot.

### 3.5 Stabilitas Putaran Mesin

Observasi kualitatif pada penggunaan biogas mentah, putaran mesin tidak stabil dengan terdengar "terengah-engah" pada *idle* (*hunting RPM*  $\pm$ 50 rpm, artinya putaran berfluktuasi antara 1050-1150 rpm). Ketidakstabilan ini disebabkan oleh fluktuasi nilai kalor biogas dan variabilitas komposisi gas dari siklus ke siklus.

Sebaliknya, dengan biogas + 20% NaOH, putaran mesin stabil dan *smooth* pada *idle*  $1100 \pm 5$  rpm (*hunting* hanya  $\pm$ 5 rpm). Stabilitas yang jauh lebih baik ini menunjukkan bahwa kemurnian CH<sub>4</sub> tinggi memastikan nilai kalor konsisten antar siklus. Akibatnya, propagasi nyala api (*flame speed*) stabil, tekanan pembakaran *uniform cycle-to-cycle*, menghasilkan *torsi output* yang konsisten dan putaran mesin *smooth*.

### 3.6 Efisiensi Termal

Efisiensi termal dihitung menggunakan formula:  $\eta_{th} = (\text{Daya Output}) / (\text{Daya Input dari Bahan Bakar})$ , di mana Daya input = laju alir bahan bakar (kg/s)  $\times$  nilai kalor bahan bakar (J/kg).

Proyeksi Efisiensi Termal Berdasarkan Literatur:

- Bensin Premium: ~30-35% *efficiency thermal*
- Biogas Mentah: ~22-25% (rendah karena nilai kalor lebih kecil 20-22 MJ/kg dan pembakaran tidak optimal)
- Biogas + 20% NaOH: ~28-32% (meningkat signifikan ke kisaran bensin premium, karena nilai kalor meningkat ~35 MJ/kg dan pembakaran lebih sempurna)

Peningkatan efisiensi termal pada biogas terproses menunjukkan bahwa pembersihan biogas bukan hanya meningkatkan performa mesin, tetapi juga meningkatkan rasio energi *useful output* terhadap energi *input*, yang menghasilkan operasi mesin lebih efisien secara keseluruhan.

### 3.7 Pembahasan Integrasi Hasil

Hasil penelitian menunjukkan tren yang konsisten: c. peningkatan kemurnian CH<sub>4</sub> (melalui penyerapan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S menggunakan NaOH) menghasilkan peningkatan performa motor (torsi, daya), penurunan konsumsi bahan bakar spesifik (KBBS), dan reduksi emisi gas buang polutan (CO, HC). Mekanisme fundamental adalah peningkatan nilai kalor bahan bakar dan konsistensi komposisi gas, d. yang menyebabkan pembakaran lebih lengkap dan efisien [9].

Konsentrasi NaOH 20% dipilih sebagai optimal berdasarkan analisis multi-kriteria: efektivitas penyerapan CO<sub>2</sub> mencapai 71.4% (sudah cukup baik), H<sub>2</sub>S turun 91.2%, peningkatan torsi 8-12%, peningkatan efisiensi konsumsi 22% vs biogas mentah, dan emisi signifikan turun. Peningkatan e. konsentrasi menjadi 30% memberikan efektivitas sedikit lebih baik (81.1% CO<sub>2</sub>, vs 71.4% pada 20%), namun dengan biaya NaOH lebih tinggi dan peningkatan performa mesin minimal (torsi + HC hanya 1-2% lebih baik), sehingga tidak sebanding dengan kenaikan biaya operasional.

Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan konsentrasi NaOH optimal pada rentang 2.5-3.5 M (setara dengan ~10-15% w/v) [10], dengan efektivitas penyerapan CO<sub>2</sub> mencapai 71.9% dan peningkatan kemurnian CH<sub>4</sub> hingga 87.76%. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa pembersihan biogas dengan NaOH 20% adalah solusi praktis dan ekonomis untuk meningkatkan pemanfaatan biogas sebagai bahan bakar motor bakar.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini telah mendemonstrasikan pengaruh signifikan pembersihan biogas menggunakan larutan NaOH terhadap performa motor bensin. Beberapa kesimpulan utama dapat diambil:

- a. Konsentrasi NaOH Optimal: Konsentrasi NaOH 20% dipilih sebagai kondisi optimal berdasarkan efektivitas dan efisiensi biaya. Pada konsentrasi ini, penyerapan CO<sub>2</sub> [2] mencapai 71.4% (menurunkan kandungan dari 39.1% menjadi 11.2%), penyerapan H<sub>2</sub>S mencapai 91.2%, dan peningkatan kemurnian CH<sub>4</sub> dari 58.2% menjadi 71.5%.
- b. Peningkatan Performa Motor: Biogas + 20%

NaOH menghasilkan peningkatan performa motor yang signifikan. Torsi meningkat 8-12% pada berbagai kondisi operasi, dengan rata-rata torsi 14.87 Nm (93.9% dari bensin premium). Daya motor meningkat sebanding dengan peningkatan torsi, menunjukkan performa mesin yang lebih baik.

Efisiensi Konsumsi Bahan Bakar: KBBS pada biogas + 20% NaOH mencapai 272 g/kW.h, peningkatan efisiensi 22% dibanding biogas mentah (349 g/kW.h). Dibanding bensin premium (250 g/kW.h), biogas terproses hanya lebih tinggi 8.8%, menunjukkan komparabilitas tinggi.

Reduksi Emisi Gas Buang: Biogas + 20% NaOH menghasilkan emisi lebih rendah dibanding alternatif lainnya. CO berkurang 76% (2.1% → 0.5%), HC berkurang 49% (89 ppm → 72 ppm), CO<sub>2</sub> berkurang 12.5% (11.2% → 9.8%). Emisi jauh di bawah standar regulasi lingkungan Indonesia, menunjukkan ramah lingkungan.

Stabilitas Operasional: Putaran mesin pada biogas + 20% NaOH stabil dengan *hunting RPM* minimal ( $\pm 5$  rpm) dibanding biogas mentah ( $\pm 50$  rpm). Stabilitas ini mencerminkan konsistensi komposisi dan nilai kalor bahan bakar.

Penelitian ini memberikan rekomendasi operasional praktis: pemanfaatan biogas sebagai bahan bakar motor bakar memerlukan pembersihan dengan *absorber packed-column* NaOH 20% untuk mengoptimalkan performa, efisiensi, dan emisi. Teknologi ini terbukti ekonomis, mudah diimplementasikan, dan memberikan hasil performa setara dengan bensin premium sambil memberikan manfaat lingkungan yang signifikan melalui pengurangan emisi gas rumah kaca dan polutan udara.

## Daftar Rujukan

- [1] U. R. T. O. N. Coe, “Pengaruh Emisi Gas Rumah Kaca : Studi Kasus Sektor Energi , Pupuk , Dan Kebakaran Hutan Di Sumatera Pengaruh Emisi Gas Rumah Kaca : Studi Kasus Sektor Energi , Pupuk , Dan Kebakaran Hutan Di Sumatera,” Vol. 3, No. 6, 2025.
- [2] M. Zidan, A. Andari, F. D. Hastuti, H. Tri, and N. Risha, “Program Pengabdian Masyarakat Pemanfaatan Biogas Sebagai Terbarukan Di Dusun Jambu Sumber Energi Rekonstruksi Pendidikan di Indonesia,” vol. 8, no. 1, pp. 488–499, 2025.

- [3] Y. Tengker *et al.*, “Potensi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas ( PLTBg [8] ) Di Universitas Sam Ratulangi,” pp. 1–11, 2005.
- [4] A. W. Agustin, P. Studi, P. Fisika, and U. Jember, “Potensi Pemanfaatan Biogas Dari Sampah Organik Sebagai Sumber Energi Terbarukan,” vol. 2, no. 6, pp. 1109–1116, [9] 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i6.2841.
- [5] A. F. Hery, Z. Septiropa, and D. A. N. F. Romadhi, “Pemanfaatan biogas / landfillgas Sebagai Bahan Bakar Mesin Bensin 1 silinder 4 Langkah”.
- [6] A. Kusairi and S. Kelvin, “Pemanfaatan Biogas Sebagai Bahan Bakar Generator Set [10] Motor Bensin,” vol. 16, no. 1, pp. 113–128, 2015.
- [7] D. Analisa, P. Laju, and A. Absorben, “PROSES ABSORBSI GAS CO<sub>2</sub> DALAM BIOGAS MENGGUNAKAN ALAT ABSORBER TIPE PACKING DENGAN ANALISA PENGARUH LAJU ALIR ABSORBEN Naoh,” vol. 09, no. 02, 2018.
- T. Soehartanto, Sarwono, and R. D. Noryati, “Pengembangan Teknologi Purifikasi Biogas (Kandungan Gas H<sub>2</sub>S Dan CO<sub>2</sub>) dengan Mempergunakan Kombinasi Wet Scrubber-Batu Gamping,” no. Cinia, pp. 73–77, 2016.
- S. T. Mesin, F. Teknik, U. N. Surabaya, S. T. Mesin, F. Teknik, and U. N. Surabaya, “Analisis Tekanan Efektif Rata-Rata Honda Vario 160cc Dengan Pertalite Dan Biopertalite Bekatul Beras Putih Nur Andika Permana Yoga Muhaji Abstrak,” pp. 1–8, 2022.
- K. J. Hardy, A. W. Dewangga, and N. K. Sari, “Optimasi Pengaruh Konsentrasi Pelarut NaOH dan Ukuran Partikel Abu Pada Silica Dioksida ( Sio 2 ) dari Sekam Padi dengan Response Surface Methodology,” vol. X, no. 4, pp. 15760–15769, 2025.