

STUDI EKSPERIMENTAL GENERATOR ELEKTRIK BERBAHAN BAKAR BIOGAS GUNA MENDUKUNG *NET ZERO EMISSION* (NZE)

I Gede Artha Negara ¹⁾ ✉, A.A.N.B Mulawarman ¹⁾, I Gede Santosa ¹⁾, L.P. Ike Midiani ¹⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Bali
artha_negara@pnb.ac.id
bagusmulawarman@pnb.ac.id
gedesantosa@pnb.ac.id
putuikemidiani@pnb.ac.id

Abstract

Indonesia is a country that has large, widespread and diverse renewable energy potential that can support energy transition and achieve net zero emission (NZE) target by 2060 or sooner. This paper aimed to investigate characteristics of exhaust emissions and consumption fuel of biogas-fuelled electric generator. The biogas used comes from organic cow dung through an anaerobic fermentation process. About 40% vol. CH₄ content observed in biogas. A 420 CC of single cylinder generator was used in this study. Based on the results, it can be seen that biogas exhaust CO emissions are relatively lower than gasoline. CO emissions are directly proportional to the electric load. The lowest CO₂ emission was obtained at 4,7 % for biogas with 300 W electric load and 8,4 % for gasoline which is the highest emission. The concentration of hydrocarbons was observed to be 20 ppm for biogas while 64 ppm for gasoline with 300 W electric load. For the fuel consumption, biogas obtained relatively higher results than gasoline for each electric load.

Keywords: Biogas, Renewable Energy, Net Zero Emission (NZE), Electric Generator, Emission, Fuel Consumption.

1. PENDAHULUAN

Krisis energi merupakan kondisi yang dialami berbagai negara saat ini salah satunya adalah Indonesia. Tahun demi tahun cadangan energi fosil semakin menipis akibat dari eksplorasi untuk memenuhi konsumsi energi di setiap negara, sedangkan populasi pertumbuhan manusia kian meningkat yang menyebabkan meningkatnya pula konsumsi energi yang dibutuhkan ^{[1]-[4]}. Menurut Kementerian ESDM konsumsi energi Indonesia saat ini mengalami peningkatan yang signifikan yaitu pada tahun 2017 konsumsi energi melonjak hingga mencapai 1,23 miliar *barrels oil equivalent* (BOE), nilai ini meningkat sebesar 9 % dari konsumsi energi tahun sebelumnya. Berdasarkan data konsumsi tersebut sebesar 28,88 % merupakan jenis BBM, 24,82 % merupakan energi berbentuk biomassa, dan sebesar 6,44 % dari total konsumsi energi tersebut merupakan *biofuel* ^[5]. Situasi seperti ini mendorong negeri untuk melakukan strategi penghematan penggunaan energi agar bangsa tetap bertahan ditengah krisis energi yang menimpa saat ini. Disamping itu hal ini memperingatkan bahwa ketergantungan terhadap energi fosil merupakan pilihan yang kurang tepat ^[6]. Penggunaan energi fosil yang berlebihan juga memberikan dampak yang buruk pada persoalan lingkungan, dan makhluk hidup lainnya karena energi fosil (minyak bumi, batubara, gas

Corresponding Author:
✉ I Gede Artha Negara
Received on: 2022-12-02
Revised on: 2023-01-20
Accepted on: 2023-05-25

alam) dikategorikan sebagai energi yang kurang akrab terhadap lingkungan ^{[7],[8]}. Emisi gas buang CO₂ dari hasil pembakaran energi fosil telah berkontribusi besar terhadap perubahan iklim semenjak era revolusi industri tahun 1750 – 2005 ^[9].

Sesuai dengan Paris *Agreement* 2015 yaitu tentang *carbon neutral* dan *net zero emission* (NZE), bahwa banyak negara telah sepakat untuk mempercepat tercapainya NZE. *Carbon neutral* merupakan sebuah kondisi tidak adanya pelepasan emisi CO₂ ^[10]. Kondisi *carbon neutral* dan NZE dapat dicapai apabila jumlah CO₂ yang dihasilkan sama dengan jumlah CO₂ yang diserap ^[11]. Tujuan dari *carbon neutral* ini adalah untuk menjaga kenaikan temperatur global agar tidak melebihi 2 °C, dan mengupayakan di 1.5 °C ^[12]. Indonesia berkomitmen besar dalam pencapaian NZE melalui transisi energi di tahun 2060. Dalam rangka mencapai NZE serta transisi energi, diperlukan sebuah upaya salah satunya dengan memanfaatkan sumber-sumber energi baru terbarukan (EBT) sebagai bahan bakar primer ^[13]. Potensi-potensi EBT yang terdapat di Indonesia sangat besar, tersebar, dan beragam untuk mendukung ketahanan energi nasional dan pencapaian target bauran EBT ^[11]. Sumber energi terbarukan yang berpotensi dikembangkan sebagai alternatif pengganti bahan bakar minyak salah satunya adalah energi biogas. Biogas merupakan energi yang terbentuk melalui proses fermentasi dari bahan organik seperti kotoran hewan, dan limbah organik yang dapat diperbaharui ^{[14],[15]}. Proses fermentasi biogas dibantu oleh bakteri metanogenik dengan kondisi anaerob atau kedap oksigen. Biogas mengandung berbagai macam gas dengan konsentrasi yang berbeda seperti gas metana (50–70 %), karbon dioksida (25–45 %), dan gas-gas lainnya dengan konsentrasi yang rendah ^[16]. Terdapat unsur hidrogen sulfida (H₂S) dan uap air (H₂O) yang membuat biogas menjadi sangat korosif, sehingga membutuhkan filterisasi. Tingginya potensi biogas di Indonesia terlihat dari ketersediaan bahan baku biogas antara lain 13 juta ternak sapi perah dan sapi pedaging, dan sekitar 15,6 juta ternak yang setara dengan 1 juta unit digester biogas skala rumah tangga ^[17].

Selain biogas dapat dijadikan energi alternatif yang terbarukan, sisa-sisa dari hasil pembuatan biogas yang berupa slurry juga dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik yang kaya unsur-unsur untuk tanaman ^{[18]–[20]}. Khususnya di daerah Bali, potensi pengembangan energi biogas cukup besar melalui sistem peternakan sapi yang ada di desa-desa Bali. Namun demikian, hingga saat ini sebagian besar pemanfaatan biogas hanya digunakan sebatas untuk keperluan memasak, sehingga potensi energi biogas banyak tak terealisasikan. Mengingat begitu pentingnya, banyak peneliti sebelumnya telah melakukan riset terkait penggunaan energi biogas sebagai pembangkit tenaga listrik. Seperti yang dilakukan oleh Gunardi *et al.* ^[21] melakukan analisis kinerja generator elektrik berkapasitas 1000 W menggunakan bahan bakar biogas. Penelitian tersebut menunjukkan pada pembebanan 800 W generator dapat menghasilkan daya sebesar 0.888 kW, dengan torsi sebesar 2.871 Nm, dan konsumsi bahan bakar spesifik 1,007 kg/HP.h. Pada tahun 2016 Reddy *et al.* ^[22] melakukan investigasi terhadap performa dan karakteristik emisi gas buang generator elektrik berbahan bakar biogas. Hasil yang didapatkan adalah emisi CO biogas pada pembebanan penuh sebesar 0,07 % dan 7.41 % menggunakan LPG. Untuk emisi HC pada pembebanan penuh, biogas mendapat 88 ppm dan sebesar 312 ppm untuk bahan bakar LPG. Pada tahun 2021, Negara *et al.* ^[23] menguji emisi gas buang pada generator elektrik 420 CC menggunakan bahan bakar biogas yang diperkaya dengan alkohol denaturasi dan bahan bakar bensin. Penggunaan alkohol denaturasi diterapkan untuk biogas dengan komposisi metana ≤ 30 % vol. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil uji emisi CO pada keadaan pembebanan 300 W bahan bakar biogas diperkaya alkohol denaturasi mendapat hasil sebesar 1,22 % sedangkan bahan bakar bensin mendapat hasil emisi CO sebesar 3,5 %. Hasil emisi tersebut menunjukkan bahwa biogas diperkaya alkohol denaturasi menghasilkan emisi CO lebih rendah dibandingkan bahan bakar bensin.

Berdasarkan literatur yang telah dikaji, dapat dijadikan acuan dalam meningkatkan kualitas penelitian yang penulis lakukan. Penelitian ini memanfaatkan energi biogas dari kotoran sapi sebagai bahan bakar pada generator elektrik. Generator berkapasitas 6000 W dimodifikasi agar mampu beroperasi menggunakan bahan bakar biogas maupun bensin (*flexible fuel*). Sebelum biogas diaplikasikan sebagai bahan bakar, biogas mulanya difilterisasi melalui berbagai proses untuk merendahkan konsentrasi hidrogen sulfida (H_2S) yang terkandung dalam biogas. Hal ini dilakukan untuk menghindari korosi pada komponen-komponen mesin elektrik generator karena hidrogen sulfida merupakan gas yang bersifat korosif. Generator diberikan variasi pembebanan yang berbeda untuk mengetahui karakteristik bahan bakar. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik emisi gas buang dan laju konsumsi bahan bakar biogas dan bensin yang diaplikasikan pada generator elektrik. Pemanfaatan biogas sebagai bahan bakar ini diharapkan dapat berkontribusi untuk mendukung tercapainya NZE dan mampu mengatasi permasalahan krisis energi fosil.

2. METODE DAN BAHAN

2.1. Alat dan Bahan

Penelitian ini menerapkan metode eksperimental dengan melakukan pengamatan langsung terhadap objek penelitian untuk mengetahui hubungan sebab akibat dan membandingkan hasil satu dengan yang lainnya. Alat-alat yang digunakan dalam penelitian adalah: *Anaerobic digester*, *desulfurizer*, volume meter, *bag biogas*, multi gas tester, *single cylinder generator* elektrik 6000 W, bola lampu 100–300 W dan gas *emission analyser*. Biogas diproduksi dari kotoran sapi Bali melalui proses fermentasi pada anaerobik digester. Biogas didominasi oleh gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), serta gas-gas lainnya dalam jumlah yang lebih sedikit ^[24]. Komposisi biogas dari anaerobik digester dan *landfill* biogas dapat dijelaskan pada tabel 1. Bahan bakar bensin yang diaplikasikan pada mesin elektrik generator adalah jenis *pertalite* dengan nilai *research* oktane number (RON) 90 %. *Four stroke single cylinder* elektrik generator mempunyai volume silinder 420 CC dan maksimum daya 6000 W. Spesifikasi elektrik generator dapat dilihat pada tabel 2. Generator telah melalui proses modifikasi seperti tekanan kompresi ditingkatkan hingga 8 bar serta penambahan *device biogas mixer chamber* di *intake manifold* mesin untuk memudahkan beroperasi menggunakan bahan bakar biogas.

Tabel 1. Komposisi AD biogas dan *landfill* biogas ^[25]

Komponen	AD biogas	<i>Landfill</i> biogas	Satuan
CH_4	53–70	30–65	vol%
CO_2	30–50	25–47	vol%
N_2	2–6	<1–17	vol%
O_2	0–5	<1–3	vol%
H_2S	0–2000	30–500	ppm
NH_3	<100	0–5	ppm

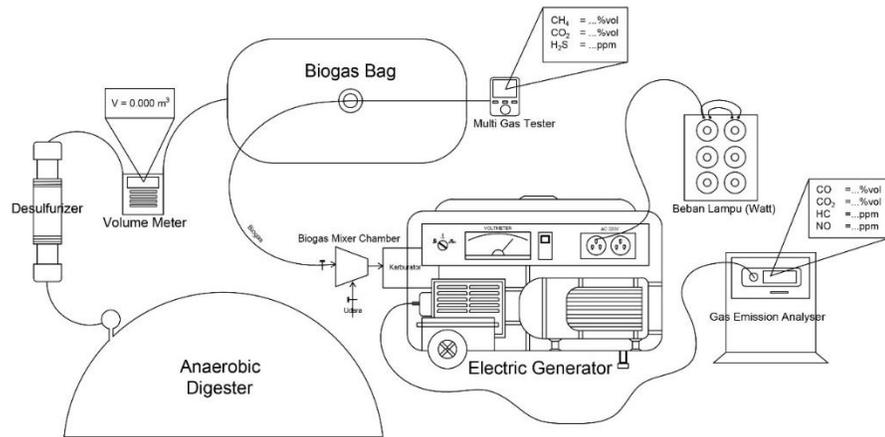
Tabel 2. Spesifikasi generator elektrik ^[23]

Parameter	Spesifikasi
Model	General ET800LE Generator
Tipe <i>Engine</i>	4 stroke, single cylinder Spark Ignition, 16 HP
Sistem pendingin	Pendingin udara
Frekuensi	50 Hz
Daya keluaran	5500 W
Daya maksimum	6000 W
Volume silinder	420 CC
Pengaturan tegangan	AVR
Sistem starter	Elektrik dan manual

2.2. Prosedur Penelitian

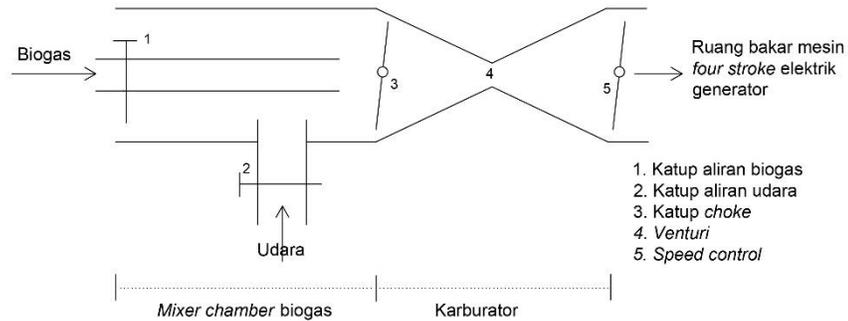
Diagram skematik penelitian generator berbahan bakar biogas dan bensin dapat dilihat pada gambar 1. Biogas diproduksi melalui proses fermentasi dari limbah organik kotoran sapi pada anaerobik digester. Biogas yang dihasilkan dari anaerobik digester dialirkan ke desulfurizer untuk difilterisasi sehingga konsentrasi H_2S menjadi rendah. Biogas bersifat korosif, oleh sebab itu perlu filterisasi dengan alat *desulfurizer* untuk mencegah terjadinya korosi pada komponen mesin elektrik generator ^[19]. Volume meter digunakan untuk mengukur volume biogas. Penelitian ini menggunakan biogas 300 liter pada setiap pengujian, yang selanjutnya ditampung dalam bag biogas. Biogas yang sudah ditampung dalam bag, kemudian dilanjutkan dengan proses pengukuran kandungan gas metana dengan alat multi gas tester. Rata-rata (CH_4) metana yang terkandung dalam biogas diperoleh sebesar 40 % vol. Generator telah dilengkapi dengan komponen yaitu *mixer chamber biogas*, untuk memudahkan generator beroperasi dengan biogas. Pada saat generator dioperasikan dengan elektrik starter, katup aliran biogas dan katup udara dibuka pada *mixer chamber* sedangkan katup bahan bakar bensin ditutup. Proses langkah hisap pada mesin menyebabkan terjadinya kevakuman dan tekanan di ruang bakar rendah, sehingga campuran biogas dan oksigen mengalir menuju ruang bakar mesin ^[26].

Generator elektrik selanjutnya melakukan langkah kompresi, dan gas sisa pembakaran keluar melalui *knapot/exhaust* yang disebut dengan langkah buang mesin. Proses pengujian dilakukan dengan kondisi varisasi pada pembebanan sebesar 100 W, 200 W, dan 300 W. Pegujian konsumsi bahan bakar dilakukan dengan mengukur lama waktu generator beroperasi dengan volume biogas yang sudah ditentukan. Pengujian emisi gas buang bahan bakar dilakukan dengan mengukur konsentrasi emisi pada exhaust mesin dengan alat gas emission analyser. Emisi gas buang yang diamati terdiri dari karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), hidrokarbon (HC), dan nitrogen monoksida (NO). Spesifikasi *exhaust gas analyser* dapat dijelaskan pada tabel 3.



Gambar 1. Diagram skematik penelitian

Skematik *mixer chamber biogas* dapat dilihat pada gambar 2. *Mixer* dilengkapi dengan gate valve untuk pengaturan laju udara dan katup pipa aliran biogas. Cara kerja *mixer* yaitu diawali dengan membuka katup aliran biogas dan udara sehingga ketika mesin beroperasi biogas mampu mengalir ke karburator dan bercampur dengan oksigen. Selanjutnya biogas yang sudah bercampur dengan oksigen mengalir menuju ruang bakar mesin. Tekanan kompresi mesin elektrik generator sebesar 8 bar.



Gambar 2. Skematik biogas *mixer chamber*

Tabel 3. Spesifikasi *exhaust gas analyser* [27]

Parameter Pengukuran	Range Pengukuran	Resolusi
CO	0–10% vol.	0.01% vol.
HC	0–20.000 ppm	10 ppm (>2000 ppm)
CO ₂	0–20% vol.	0.1% vol.
NO	0–5000 ppm	1 ppm

Persamaan reaksi pembakaran pada mesin four stroke generator elektrik menggunakan bahan bakar biogas dan bensin dapat dilihat pada persamaan (1) dan (2) [22]. Reaksi gas metana biogas dengan oksigen membentuk karbon dioksida dan uap air, begitu pula dengan reaksi antara bensin dengan oksigen menghasilkan produk karbon dioksida dan uap air.



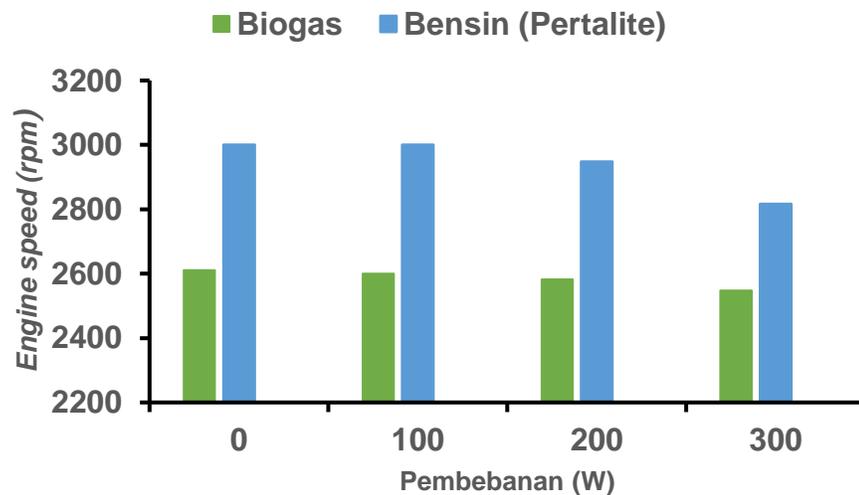
Konsumsi bahan bakar dapat dihitung berdasarkan volume bahan bakar dibagi dengan waktu yang diperlukan sesuai dengan persamaan debit yang tertera pada persamaan (3) ^[23]

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

dimana Q merupakan debit bahan bakar (liter/mnt), V merupakan volume bahan bakar (liter), dan t merupakan waktu (menit).

3. HASIL DAN DISKUSI

Parameter pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik bahan bakar biogas dan bensin divariasikan terhadap pembebanan pada bola lampu. Nilai rata-rata pada setiap parameter pengujian dicatat dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Adapun pengujian yang dilakukan adalah uji emisi gas buang dan uji konsumsi masing-masing bahan bakar. Putaran *revolution per minute* (RPM) mesin elektrik generator dapat diamati pada gambar 3 antara bahan bakar biogas dan bensin.

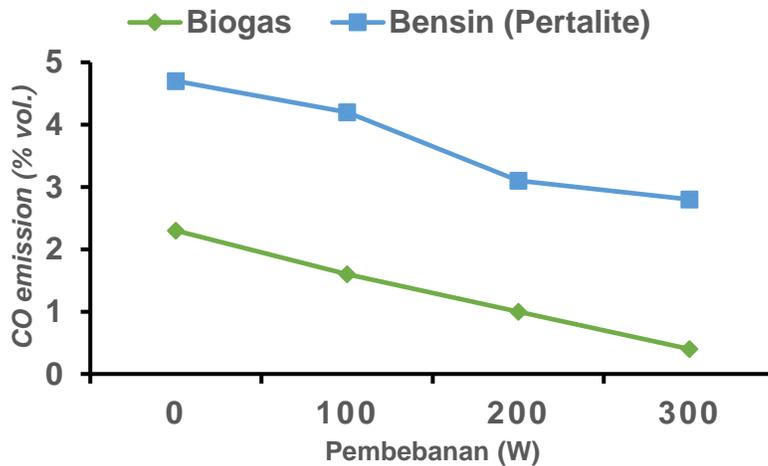


Gambar 3. Perbandingan rpm mesin terhadap pembebanan

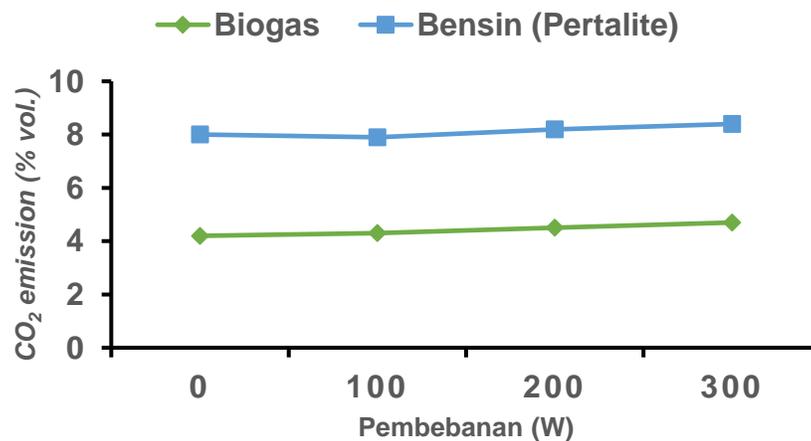
Revolution per minute (RPM) merupakan sebuah nilai yang merepresentasikan putaran poros engkol (*crankshaft*) mesin yang dihitung dalam satu menit. Sesuai yang dijelaskan pada gambar 3, tiada perbedaan signifikan yang terjadi pada hasil rpm antara bahan bakar biogas dan bensin. Putaran rpm mengalami penurunan seiring bertambahnya pembebanan mesin pada semua variasi bahan bakar biogas dan bensin. Pada pembebanan sebesar 300 W putaran rpm bahan bakar bensin 10 % lebih tinggi dibandingkan biogas, begitu pula pada putaran rpm pada pembebanan 0 W bahan bakar bensin 14 % lebih tinggi. Putaran rpm mesin dipengaruhi oleh nilai kalor yang terkandung pada bahan bakar, dimana biogas mempunyai nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar bensin ^[19]. Semakin tinggi nilai kalor bahan bakar maka rpm yang dapat tercapai semakin tinggi pula.

3.1. Emisi Gas Buang

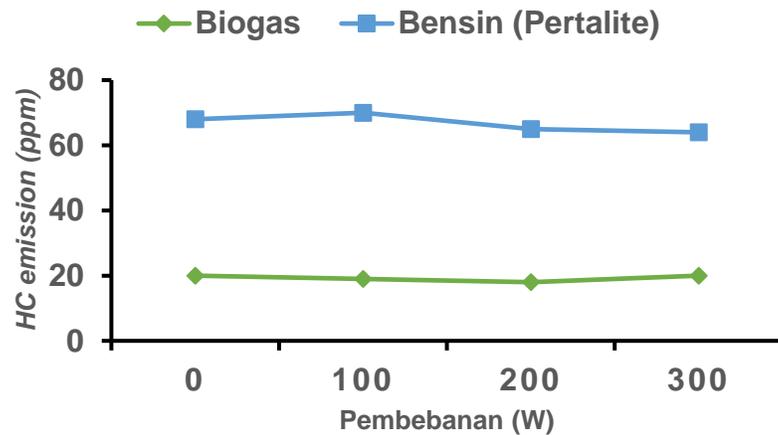
Emisi gas buang adalah gas hasil sisa pembakaran bahan bakar bercampur oksigen yang terbuang ke lingkungan. Faktor yang mempengaruhi emisi gas buang yaitu jenis bahan bakar, komposisi, dan rasio. Proses pengujian emisi gas buang bahan bakar dilakukan pada saat generator beroperasi dengan variasi pembebanan yang diberikan. Gas *analyser* digunakan untuk menghitung parameter tingkat emisi gas buang bahan bakar. Parameter gas yang diuji antara lain CO, CO₂, HC, dan NO. Tinggi rendahnya emisi gas buang merupakan karakteristik yang dimiliki oleh bahan bakar itu sendiri. Semakin rendah emisi gas buang yang dihasilkan maka bahan bakar tersebut dikategorikan bahan bakar yang ramah lingkungan, dan sebaliknya apabila emisi gas buang yang dihasilkan tinggi maka bahan bakar tersebut kurang akrab lingkungan [28]. Emisi gas buang yang rendah merupakan kondisi yang sangat diharapkan saat ini, karena upaya tersebut dapat mempercepat transisi energi menuju *net zero emission* (NZE). Selain itu mengacu pada pernyataan *paris agreement* yaitu mewujudkan kondisi *carbon neutral*. Uji emisi gas buang disajikan pada gambar 4-7.



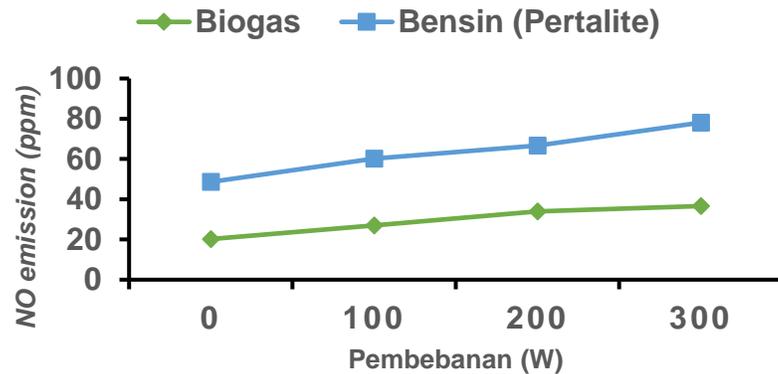
Gambar 4. Pengaruh pembebanan terhadap emisi karbon monoksida (CO)



Gambar 5. Pengaruh pembebanan terhadap emisi karbon dioksida (CO₂)



Gambar 6. Pengaruh pembebanan terhadap emisi hidrokarbon (HC)



Gambar 7. Pengaruh pembebanan terhadap emisi nitrogen monoksida (NO)

Berdasarkan hasil pengujian emisi gas buang bahan bakar, terdapat beberapa hasil yang signifikan pada parameter pengujian. Hasil emisi gas buang CO bahan bakar biogas dan bensin mengalami penurunan selama peningkatan beban listrik seperti yang dapat diamati pada gambar 4. Pada pengujian pembebanan 0 W bahan bakar bensin menghasilkan emisi gas buang CO tertinggi yaitu 4,7%, sedangkan emisi CO biogas hanya sebesar 2,3 %. Pada pembebanan 300 W emisi bahan bakar bensin menurun menjadi 2,8 % begitu pula emisi CO biogas menjadi 0,4 %. Secara keseluruhan emisi gas buang CO yang dihasilkan biogas relatif lebih rendah dibandingkan bahan bakar bensin, hal ini dikarenakan karakteristik bahan bakar biogas yang berasal dari proses fermentasi dengan bantuan bakteri metanogenik ^[16]. Biogas terbentuk dari bahan-bahan organik seperti kotoran sapi dengan proses anaerob atau keadaan bebas oksigen. Hal ini menyebabkan biogas menghasilkan emisi CO lebih rendah karena biogas merupakan bahan bakar terbarukan dan ramah lingkungan. Bensin menghasilkan emisi CO yang lebih tinggi, bensin merupakan bahan bakar yang dihasilkan dari proses distilasi minyak bumi. Pada umumnya bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi menghasilkan emisi gas buang CO yang relatif tinggi dari bahan bakar yang dapat diperbaharui seperti biogas ^[26].

Emisi gas buang CO₂ biogas dan bensin dijelaskan pada gambar 5. Pada pembebanan 0 W emisi CO₂ bahan bakar biogas dan bensin adalah 4,2 % dan 8 %. Untuk pembebanan di 300 W emisi CO₂ bahan bakar biogas 4,7 % dan emisi bensin sebesar 8,4 %. Secara

keseluruhan emisi CO₂ bensin relatif lebih tinggi dibandingkan bahan bakar biogas. CO₂ merupakan gas polutif yang dihasilkan dari reaksi pembakaran. Konsentrasi CO₂ yang tinggi biasanya dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batubara [29]. Emisi CO₂ biogas menurun seiring bertambahnya pembebanan mesin. Gambar 6 merupakan hasil emisi gas buang HC dari masing-masing bahan bakar. Sesuai yang dapat diamati bahan bakar bensin menghasilkan emisi gas buang HC relatif lebih tinggi daripada biogas. Hasil emisi HC tertinggi bahan bakar biogas terjadi pada pembebanan 0 W dan 300 W yaitu sebesar 20 ppm. Untuk emisi HC bahan bakar bensin tertinggi terjadi pada pembebanan 100 W sebesar 70 ppm. Konsentrasi emisi HC dipengaruhi oleh kualitas pembakaran pada mesin. Hal ini sejalan dengan karakteristik bahan bakar bensin mengandung hidrokarbon tinggi yang tersusun dari oktana dan heptana, dibandingkan biogas yang hanya tersusun dari metana [22]. Pada dasarnya emisi gas HC terbentuk dari senyawa bahan bakar yang terbakar tidak habis ketika proses pembakaran.

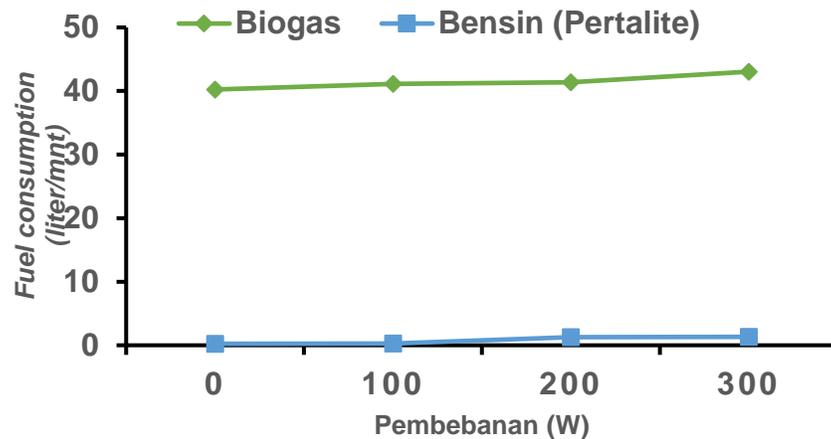
Emisi pembakaran gas buang NO biogas dan bensin dengan variasi pembebanan dapat dilihat pada gambar 7. Emisi NO dihasilkan pada temperatur tinggi mesin dan dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen didalam ruang bakar serta jenis bahan bakar mesin [30]. Dari hasil pengamatan emisi NO, tidak ada perbedaan signifikan antara bahan bakar biogas dan bensin. Kedua jenis bahan bakar menunjukkan peningkatan emisi NO seiring bertambahnya pembebanan. Emisi NO tertinggi teramati pada pembebanan 300 W sebesar 78,1 ppm untuk bensin dan 36,6 ppm pada bahan bakar biogas dengan pembebanan yang sama. Berdasarkan hasil pengujian emisi gas buang mesin elektrik generator bahan bakar biogas dan bensin, secara keseluruhan biogas mendapatkan hasil emisi gas buang yang lebih rendah dibandingkan bensin dari setiap parameter uji. Hal ini menunjukkan bahwa biogas merupakan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan daripada bahan bakar bensin. Selain itu, penggunaan biogas sebagai bahan bakar merupakan sebuah solusi untuk menekan jumlah pelepasan emisi karbon ke atmosfer dan mampu mengakselerasi komitmen Indonesia mencapai NZE pada tahun 2060.

3.2. Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar merupakan pengujian untuk menentukan volume bahan bakar yang diperlukan oleh mesin untuk beroperasi dalam waktu tertentu. Konsumsi bahan bakar dapat dihitung berdasarkan pada persamaan (3). Pentingnya pengujian konsumsi bahan bakar ini dilakukan yaitu untuk mengetahui performa mesin terhadap laju bahan bakar ketika beroperasi, sehingga mesin dapat dikatakan irit ataupun boros bahan bakar. Hasil pengujian konsumsi bahan bakar disajikan pada tabel 4 dan gambar 8.

Tabel 4. Konsumsi bahan bakar

No	Bahan bakar	Pembebanan (Watt)	Konsumsi bahan bakar (Liter/mnt)
1	Biogas	0	40.24.00
		100	41.12.00
		200	41.38.00
		300	43.04.00
2	Bensin (<i>Pertalite</i>)	0	00.23
		100	00.27
		200	01.28
		300	01.32



Gambar 8. Pengaruh pembebanan terhadap konsumsi bahan bakar

Seperti yang terlihat pada gambar 8, konsumsi bahan bakar bensin pada pembebanan 0 W memperoleh hasil konsumsi terendah yaitu 0,23 L/mnt, sedangkan konsumsi bensin dengan hasil tertinggi didapatkan pada pembebanan 300 W yaitu sebesar 1,32 L/mnt. Untuk konsumsi bahan bakar biogas pada pembebanan 0 W mendapat hasil 40,24 L/mnt, dan hasil konsumsi tertinggi diperoleh pada pembebanan 300 W yaitu sebesar 43,04 L/mnt. Berdasarkan hasil pengujian, dapat teramati bahwa konsumsi bahan bakar biogas lebih tinggi dibandingkan dengan konsumsi bahan bakar bensin pada setiap parameter uji. Hal ini disebabkan oleh kandungan nilai kalor bahan bakar biogas lebih rendah dari bensin [23]. Faktor lain yang menyebabkan meningkatnya konsumsi bahan bakar adalah pembebanan daya listrik yang diaplikasikan pada generator. Pembebanan daya listrik berbanding lurus terhadap konsumsi bahan bakar, semakin tinggi beban yang diberikan mesin maka semakin tinggi pula konsumsi bahan bakar yang diperlukan generator untuk beroperasi [31].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian emisi gas buang dan konsumsi bahan bakar yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan emisi gas buang CO yang dihasilkan biogas relatif lebih rendah dibandingkan bahan bakar bensin. Emisi CO biogas pembebanan 300 W memperoleh hasil 0,04 % dan sebesar 2,8 % untuk emisi bahan bakar bensin. Untuk emisi gas buang CO₂, biogas memperoleh hasil sebesar 4,7 % pada pembebanan 300 W dan sebesar 8,4 % untuk emisi bensin. Emisi gas buang HC tertinggi diperoleh oleh bahan bakar bensin yaitu sebesar 70 ppm pada pembebanan 100 W. Konsumsi bahan bakar tertinggi diperoleh pada bahan bakar biogas yaitu sebesar 43,04 L/mnt pembebanan 300 W, sedangkan bahan bakar bensin memperoleh konsumsi bahan bakar sebesar 1,32 L/mnt. Pada pembebanan 0 W biogas memperoleh konsumsi bahan bakar sebesar 40,04 L/mnt dan sebesar 0,23 L/mnt untuk bahan bakar bensin. Saran yang penulis dapat sampaikan untuk penelitian berikutnya adalah menambah pembebanan elektrik hingga mendekati 100 % dari beban maksimum generator. Penting juga mengetahui torsi mesin ketika beroperasi dengan bahan bakar biogas. Purifikasi lanjut disarankan untuk memperoleh biogas dengan konsentrasi metana tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Poudyal, P. Loskot, R. Nepal, R. Parajuli, and S. K. Khadka, "Mitigating the current energy crisis in Nepal with renewable energy sources," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 116, no. 1, 2019.

- [2] F. Dawood, M. Anda, and G. M. Shafiullah, “Hydrogen production for energy: An overview,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3847–3869, 2020.
- [3] I. G. N. N. Santhiarsa, “Rancang Bangun Alat Konversi Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Dengan Metode Pirolisis Untuk Penanganan Sampah Plastik,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 189–196, 2022.
- [4] I. G. A. Negara, “Analisis Monitoring Temperatur dan Kelembaban Udara Alami Berbasis Teknologi Mikrokontroler,” *J. Inov. Tek. dan Edukasi Teknol.*, vol. 3, no. 1, pp. 32–39, 2023.
- [5] B. C. Purnomo, A. Widiyanto, S. Munahar, A. H. Purwantini, L. Muliawanti, and M. I. Rosyidi, “Implementasi Energi Biogas Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Kabupaten Boyolali,” *Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 3, pp. 219–228, 2020.
- [6] M. A. Siregar, W. S. Damanik, and S. Lubis, “Analisa Energi pada Alat Desalinasi Air Laut Tenaga Surya Model Lereng Tunggal,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, p. 193, 2021.
- [7] Mawardi, M. K. Wiguna, S. M. Katjong, and F. Azis, “Teknologi Hybrid Energi angin dan Energi Matahari Sebagai Sumber Energi Listrik,” *J. Electr. Enggining*, vol. 2, no. 2, pp. 100–106, 2021.
- [8] B. Rachmat and I. Garniwa, “Perancangan Sistem Berbasis Gelombang Laut untuk Tambahan Energi Angin pada PLTB,” *J. Pendidik. Tambusai*, vol. 6, pp. 13374–13381, 2022.
- [9] A. E. Setyono and B. F. T. Kiono, “Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050,” *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 3, pp. 154–162, 2021.
- [10] X. Zeng, G. Chen, S. Luo, Y. Teng, Z. Zhang, and T. Zhu, “Renewable transition in the power and transport sectors under the goal of carbon-neutral in Sichuan, China,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 738–748, 2022.
- [11] I. Utami, M. A. Riski, and D. R. Hartanto, “Nuclear Power Plants Technology to Realize Net Zero Emission 2060,” *Int. J. Bus. Manag. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 158–162, 2022.
- [12] L. Chen, G. Msigwa, M. Yang, A. I. Osman, S. Fawzy, and D. W. Rooney, *Strategies to achieve a carbon neutral society: a review Intergovernmental Panel on Climate Change*, vol. 20, no. 4. Springer International Publishing, 2022.
- [13] V. Renewable, E. Vre, P. Sistem, K. Di, R. A. Aprilianto, and R. M. Ariefianto, “Peluang Dan Tantangan Menuju Net Zero Emission (NZE) Menggunakan Peluang Dan Tantangan Menuju Net Zero Emission (NZE) Menggunakan Variable Renewable Energy (VRE) Pada Sistem Ketenagalistrikan Di Indonesia,” no. December, 2021.
- [14] A. Lindfors, L. Hagman, and M. Eklund, “The Nordic biogas model: Conceptualization, societal effects, and policy recommendations,” *City Environ. Interact.*, vol. 15, no. June, p. 100083, 2022.
- [15] M. Jeremiah, B. Kabeyi, and O. A. Olanrewaju, “ScienceDirect Technologies for biogas to electricity conversion,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 774–786, 2022.
- [16] R. Feiz, M. Johansson, E. Lindkvist, J. Moestedt, S. N. Pålledal, and F. Ometto, “The biogas yield, climate impact, energy balance, nutrient recovery, and resource cost of biogas production from household food waste—A comparison of multiple cases from Sweden,” *J. Clean. Prod.*, vol. 378, no. February, 2022.

- [17] R. Situmeang, J. Mazancová, and H. Roubík, “*Technological, Economic, Social and Environmental Barriers to Adoption of Small-Scale Biogas Plants: Case of Indonesia*,” *Energies*, vol. 15, no. 14, 2022.
- [18] H. M. Zabed, S. Akter, J. Yun, G. Zhang, Y. Zhang, and X. Qi, “*Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities*,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 117, no. January, 2020.
- [19] A. Calbry-Muzyka, H. Madi, F. Rüscher-Pfund, M. Gandiglio, and S. Biollaz, “*Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste*,” *Renew. Energy*, vol. 181, pp. 1000–1007, 2022.
- [20] I. Angelidaki et al., “*Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives*,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 36, no. 2, pp. 452–466, 2018.
- [21] A. Gunardi, M. S. Wibowo, V. Panjaitan, L. Trisnaliani, and S. Pujiastuti, “*Biomethan Pada Unit Clpdtr Analysis of Generator Performance Fueled With Biogas and Biomethane on Clpdtr Unit*,” *Prosiding*, vol. 01, no. 01, pp. 6–10, 2020.
- [22] K. S. Reddy, S. Aravindhan, and T. K. Mallick, “*Investigation of performance and emission characteristics of a biogas fuelled electric generator integrated with solar concentrated photovoltaic system*,” *Renew. Energy*, vol. 92, pp. 233–243, 2016.
- [23] I. G. A. Negara, T. Gde, T. Nindhia, I. W. Surata, T. S. Nindhia, and S. K. Shukla, “*Method on Utilization of Low Quality Biogas as a Fuel for 4 Stroke Spark Ignition Engine of Electric Generator*,” *Key Eng. Mater.*, vol. 877, pp. 147–152, 2021.
- [24] M. C. Santoso, I. A. D. Giriantari, and W. G. Ariastina, “*Studi Pemanfaatan Kotoran Ternak Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Di Bali*,” *Spektrum*, vol. 6, no. 4, pp. 58–65, 2019.
- [25] N. de Nooijer et al., “*On concentration polarisation in a fluidized bed membrane reactor for biogas steam reforming: Modelling and experimental validation*,” *Chem. Eng. J.*, vol. 348, no. March, pp. 232–243, 2018.
- [26] I. K. Nugraheni and M. M. A. Pratama, “*Pengukuran Penggunaan Bahan Bakar Biofuel (Premium dan Bioetanol) terhadap Kinerja Mesin Bensin 4 Tak*,” *J. Elem.*, vol. 5, no. 1, p. 01, 2018.
- [27] A. D. 2200 F. P. E. *Analyser*, “*AVL DiTEST Gas 2301*,” 2014.
- [28] S. Suhartini, Y. P. Lestari, and I. Nurika, “*Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste*,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 230, no. 1, 2019.
- [29] Y. Park et al., “*Fuel property impacts on gaseous and PM emissions from a multi-mode single-cylinder engine*,” *Fuel*, vol. 331, no. P1, p. 125641, 2023.
- [30] P. Marjanen et al., “*Exhaust emissions from a prototype non-road natural gas engine*,” *Fuel*, vol. 316, no. February, 2022.
- [31] S. Bößner, T. Devisscher, T. Suljada, C. J. Ismail, A. Sari, and N. W. Mondamina, “*Barriers and opportunities to bioenergy transitions: An integrated, multi-level perspective analysis of biogas uptake in Bali*,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 122, no. January, pp. 457–465, 2019.