

KAJIAN PERFORMANSI MESIN GENSET OTTO DENGAN BAHAN BAKAR PREMIUM DAN BIOGAS DARI LIMBAH CAIR PABRIK KELAPA SAWIT

Agustinus S.¹, Tulus B.Sitorus², Terang UHS Ginting³, Dian M. Nasution⁴, Farel H. Napitupulu⁵, Syahril Gultom⁶, Zulkifli Lubis⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara
Jl. Almamater, Kampus USU Medan, 20155
Email: agustinus_sitio@yahoo.com

ABSTRAK

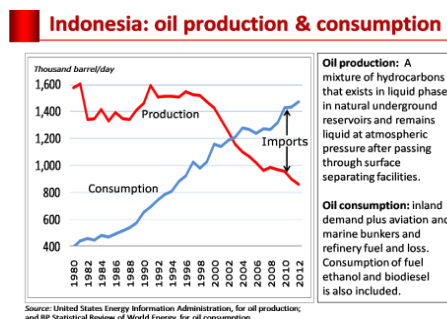
Biogas merupakan gas yang mudah terbakar (*flamable*) yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerob yang berasal dari limbah rumah tangga kotoran hewan (sapi, babi, ayam) dan sampah organik termasuk POME. POME merupakan kondensat dari proses sterilisasi cairan yang berasal dari pengolahan kelapa sawit menjadi crude palm oil. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui performansi bahan bakar biogas dan kemudian membandingkannya dengan bahan bakar premium. Performansi yang dimaksud meliputi daya, torsi, konsumsi bahan bakar spesifik, efisiensi termal, rasio udara- bahan bakar, emisi gas buang dan hasil pembakaran pada busi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan variasi beban lampu 100W, 200W, 300W, 400W, dan 500W. Penelitian ini memanfaatkan biogas yang diproduksi dari limbah cair kelapa sawit untuk digunakan sebagai bahan bakar pada mesin genset otto4-langkah STARKE tipe GFH1900LX dengan daya puncak 1,3 kW, daya rata-rata 1,0 kW, bore 55 mm, stroke 40 mm, $V_d 95 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, $V_c 10 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, rasio kompresi 10,5 : 1, dan jumlah silinder 1 silinder. Dari hasil pengujian didapat pada penggunaan bahan bakar biogas terjadi penurunan daya, torsi, efisiensi termal brake, dan AFR., Sementara itu terjadi peningkatan nilai sfc.

Kata kunci : AFR, biogas, daya, efisiensi termal brake,emisi gas buang, pome, sfc, torsi

1. PENDAHULUAN

Besarnya konsumsi energi dalam negeri Indonesia telah menambah daftar masalah nasional. Sementara itu energi fosil yakni minyak bumi dan batu bara merupakan energi yang tidak terbarukan sehingga bergantung pada ladang-ladang baru yang membutuhkan eksplorasi secara berkala.

Konsumsi BBM bersubsidi di Indonesia pada tahun 2011 mencapai 41,7 juta kiloliter (kl), dan tahun 2012 mencapai 45 juta kl. Nilai impor bahan bakar minyak mencapai 150 juta dollar AS per hari atau setara Rp 1,7 triliun per hari. Grafik dari perbandingan konsumsi minyak dan produksi minyak di Indonesia ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1 Perbandingan produksi dan konsumsi minyak Indonesia

[1]

Para peneliti di Indonesia sampai saat ini telah mengembangkan beberapa bahan bakar alternatif seperti biogas, bioethanol, biodiesel, mikrohidro, geothermal dan tenaga angin dengan tujuan untuk mengurangi beban biaya diatas. Saat ini jumlah energi terbarukan yang mampu

diproduksi sekitar 14% dari total seluruh energi yang dibutuhkan Indonesia, sementara itu target Indonesia sekitar 23% pada tahun 2025. Diperlukan kerja yang lebih keras lagi untuk mengembangkan seluruh sumber daya energi terbarukan.

Khusus pada bahan bakar alternatif biogas, Indonesia memiliki bahan baku yang berlimpah untuk memproduksi biogas dalam jumlah besar. Luas kebun sawit Indonesia sekitar 13,5 juta hektar. Setiap proses produksi buah sawit yang menghasilkan 1 ton CPO maka akan menghasilkan 5 ton *Palm Oil Mill Effluent* (POME) yang masih mengandung banyak zat-zat organik. Jika sebuah pabrik kelapa sawit memiliki kapasitas 35 ton/jam akan menghasilkan biogas sekitar 600 m³/jam setara dengan 5.044 MJ/jam yang berpotensi menghasilkan listrik sekitar 1 MW (ESDM, 2012) [2]. POME umumnya mengandung 34,2% ekstrak tanpa N, 31,6% ekstrak dengan ether, 14,1% abu, 11,9% serat, dan 8,2 % protein [3].

Berikut ini merupakan tabel 1 yang menunjukkan komposisi kimia dari limbah cair POME.

Tabel 1 Komposisi POME

| Komponen | % Berat Kering |
|----------------------|----------------|
| Ekstrak dengan ether | 31,6 |
| Protein (N x 6,25) | 8,2 |
| Serat | 11,9 |
| Ekstrak tanpa N | 34,2 |
| Abu | 14,1 |
| P | 0,24 |
| K | 0,99 |
| Ca | 0,97 |
| Mg | 0,3 |
| Na | 0,08 |
| Energi (kkal/100 g) | 454 |

Sumber: Siregar.2009

Selain jumlahnya yang besar dan mudah didapat, pemanfaatan POME menjadi sumber bahan baku biogas juga akan meningkatkan nilai tambah penanganan limbah pabrik kelapa sawit dan meningkatkan kelestarian lingkungan. Produk samping hasil pengolahan POME menjadi biogas berupa zat cair dan padat masih dapat digunakan sebagai pupuk organik. Pembakaran metana dinilai lebih baik daripada membiarkan gas metana bercampur ke atmosfer, karena metana juga merupakan salah satu gas penghasil efek rumah kaca.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui performansi (daya, torsi, SFC, efisiensi termal, rasio udara – bahan bakar), pada mesin genset otto saat menggunakan bahan bakar biogas dan membandingkannya dengan bahan bakar premium.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sejarah Biogas

Biogas sendiri sebenarnya sudah ada sejak kebudayaan Mesir, China, dan Romawi Kuno. Pada waktu itu diketahui biogas telah dimanfaatkan untuk menghasilkan panas. Dan orang pertama yang mengaitkan gas bakar ini dengan proses pembusukan bahan sayuran adalah Alessandro Volta (1776), sedangkan Willam Henry pada tahun 1806 mengidentifikasi gas yang dapat terbakar tersebut sebagai metan. Kegiatan produksi biogas di India telah dilakukan semenjak abad ke-19. Alat pencerna anaerobik pertama dibangun pada tahun 1900 [4]. Negara berkembang lainnya, seperti

China, Filipina, Korea, Taiwan, dan Papua Niugini, telah melakukan berbagai riset dan pengembangan alat pembangkit biogas dengan prinsip yang sama, yaitu menciptakan alat yang kedap udara dengan bagian-bagian pokok terdiri atas pencerna (digester), lubang pemasukan bahan baku dan pengeluaran lumpur sisa hasil pencernaan (*slurry*) dan pipa penyaluran gas bio yang terbentuk (Nandiyanto, 2007) [5].

Persentasi dari biogas yang dihasilkan oleh digester ditunjukkan oleh tabel 2 [6].

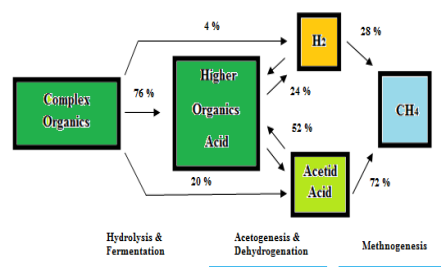
Tabel 2 Persentasi dari penyusun biogas yang dihasilkan digester

| Jenis gas | Formula | Satuan | Biogas | | |
|--------------------------|------------------|---------------------|------------|------------------|--------------|
| | | | Sewage gas | Agricultural gas | Landfill gas |
| Metana | CH ₄ | % vol. | 65-75 | 45-75 | 45-55 |
| Karbon dioksida | CO ₂ | % vol. | 20-35 | 25-55 | 25-30 |
| Karbon monoksida | CO | % vol. | <0,2 | <0,2 | <0,2 |
| Nitrogen | N ₂ | % vol. | 3,4 | 0,01-5,00 | 10-25 |
| Oksigen | O ₂ | % vol. | 0,5 | 0,01-2,00 | 1-5 |
| Hidrogen | H ₂ | % vol. | trace | 0,5 | 0 |
| Hidrogen Sulfida | H ₂ S | mg/Nm ³ | <8000 | 10-30 | <8000 |
| Amonium | NH ₃ | mg/Nm ³ | trace | 0,01-2,5 | Trace |
| Siloxanes | | mg/Nm ³ | <0,1-5,0 | Trace | <0,1-5,0 |
| Benzena, Toluena, Xylene | | mg/Nm ³ | <0,1-5,0 | 0 | <0,1-5,0 |
| CFC | | mg/Nm ³ | 0 | 20-1000 | n.a |
| Nilai kalori | | kWh/Nm ³ | 6,0-7,5 | 5,0-7,5 | 4,5-5,5 |
| Densitas | | Kg/m ³ | 1,16 | 1,16 | 1,27 |
| Wobbe index | | kWh/Nm ³ | 7,3 | | |
| Nomor Metana | | | 134 | 124,15 | 136 |

Sumber: Omid dkk, 2011

Secara garis besar proses pembentukan biogas dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu:

1. Tahap Hidrolisis (*Hydrolysis*)
 Pada tahap ini, bakteri memutuskan rantai panjang karbohidrat kompleks; protein dan lipida menjadi senyawa rantai pendek. Contohnya polisakarida diubah menjadi monosakarida, sedangkan protein diubah menjadi peptide dan asam amino.
2. Tahap Asidifikasi (*Acidogenesis* dan *Acetogenesis*)
 Pada tahap ini, bakteri (*Acetobacter aceti*) menghasilkan asam untuk mengubah senyawa rantai pendek hasil proses hidrolisis menjadi asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida. Bakteri tersebut merupakan bakteri *anaerob* yang dapat tumbuh dan berkembang dalam keadaan asam.
3. Tahap Pembentukan Gas Metana (*Methanogenesis*)
 Pada tahap ini, bakteri *Methanobacterium omelianski* mengubah senyawa hasil proses asidifikasi menjadi metana dan CO₂ dalam kondisi *anaerob*. Proses pembentukan gas metana ini termasuk reaksi eksotermis.



Gambar 2 Stage anaerobic Digestion [7]

2.2 Sifat-Sifat Biogas

Kandungan biogas sebagian besar adalah metana dan karbon dioksida maka sifat biogas di fokuskan dari kedua sifat gas tersebut. Namun kandungan biogas lain seperti nitrogen, hidrogen sulfida yang relatif kecil tidak dapat diabaikan. Contohnya hidrogen sulfida memiliki pengaruh sangat

besar untuk menyebabkan korosi jika bereaksi dengan air. Sifat-sifat umum dari biogas ditunjukkan oleh tabel 3 [8].

Tabel 3 Sifat-sifat umum biogas

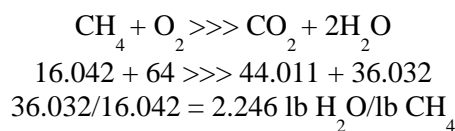
| | |
|------------------------|---|
| Komposisi | 55-70% metana, 30-45% karbon dioksida |
| Kandungan energy | 6,0-6,5 kW/m ³ |
| Kesetaraan bahan bakar | 0,6-0,65 L oil/m ³ biogas |
| batas ledakan | 6-12% biogas dalam udara |
| Igition temperature | 650-750 °C |
| Tekanankritis | 75-89 bar |
| Temperatur kritis | -82,5 °C |
| Densitas | 1,2 kg/m ³ |
| Laju bakar | 25 cm/s |
| Bau | Telur busuk (oleh karena hidrogen sulfida yang terkandung didalamnya) |

Sumber: Barik dkk, 2012

2.3 Nilai Kalor Biogas

Nilai kalor premium didapat dengan melakukan uji bom kalorimeter sebesar 43966 kJ/kg. sedangkan biogas adalah sebagai berikut:

Pembakaran metana



Jika mengasumsikan panas kondensasi air sebesar 1040 Btu/lb, maka panas kondensasi pembakaran metana sekitar 2336 Btu per pound metana yang dibakar.

$$\text{HHV} = 23,890 \text{ Btu/lb or } 994.7 \text{ Btu/ft}^3 *$$

$$\text{LHV} = 21,518 \text{ Btu/lb or } 896.0 \text{ Btu/ft}^3 *$$

* At 68 °F and 14.7 psia.

Berikut ini tabel 4 yang menunjukkan nilai LHV biogas tiap % CH₄ yang dikandung biogas [9].

Tabel 4 Nilai LHV Biogas tiap %CH₄ yang dikandungnya

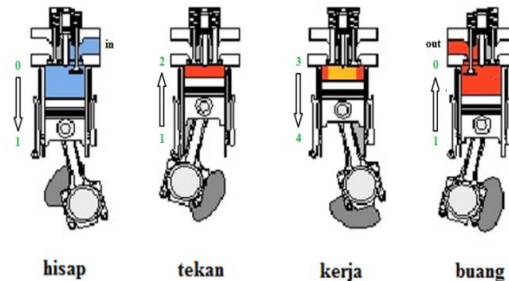
| Biogas kering [CH ₄ dan CO ₂] pada 32 F& 1 atm | | | | | |
|---|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| % volume CH ₄ | g mol wt | % berat CH ₄ | Densitas | | LHV (Btu/ft ³) |
| | | | lbs d.g/ft ³ | ft ³ /lbdg | |
| 40% | 32,8 | 19,60% | 0,0916 | 10,92 | 385 |
| 42% | 32,3 | 20,90% | 0,0900 | 11,11 | 405 |
| 44% | 31,7 | 22,30% | 0,0885 | 11,30 | 424 |
| 46% | 31,1 | 23,70% | 0,0869 | 11,50 | 443 |
| 48% | 30,6 | 25,20% | 0,0854 | 11,71 | 463 |
| 50% | 30,0 | 26,70% | 0,0838 | 11,93 | 482 |
| 52% | 29,5 | 28,30% | 0,0822 | 12,16 | 501 |
| 54% | 28,9 | 30,00% | 0,0807 | 12,39 | 520 |
| 56% | 28,4 | 31,70% | 0,0791 | 12,64 | 540 |
| 58% | 27,8 | 33,50% | 0,0776 | 12,89 | 559 |
| 60% | 27,2 | 35,40% | 0,0760 | 13,16 | 578 |
| 62% | 26,7 | 37,30% | 0,0744 | 13,43 | 598 |
| 64% | 26,1 | 39,30% | 0,0729 | 13,72 | 617 |
| 66% | 25,6 | 41,40% | 0,0713 | 14,02 | 636 |
| 68% | 25,0 | 43,70% | 0,0698 | 14,34 | 655 |
| 70% | 24,4 | 46,00% | 0,0682 | 14,66 | 675 |

biogas kering

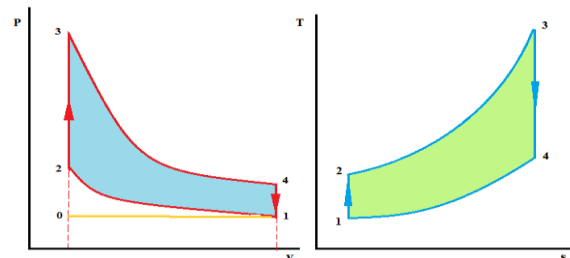
Sumber: David Ludington, 2006

2.4 Motor Bakar 4 Langkah

Mesin otto ditemukan oleh [Nikolaus Otto](#) merupakan [mesin motor bakar fengan pembakaran dalam](#) yang menggunakan nyala busi saat proses pembakaran, dirancang untuk menggunakan bahan bakar bensin atau yang sejenis. Mesin ini terbagi 2 yakni, motor bakar 2 langkah dan 4 langkah. Pada motor bensin 2- langkah, siklus terjadi dalam dua gerakan torak atau dalam satu putaran poros engkol. Sedangkan motor bensin 4-langkah, pada satu siklus terjadi dalam 4-langkah [10]. Berikut adalah gambar siklus otto ideal 4 langkah :



Gambar 3 Langkah-langkah mesin otto 4 tak



Gambar 4 Diagram P-v dan T-s Siklus Otto Ideal

2.5 Performansi Motor bakar

Berikut merupakan rumus-rumus yang digunakan untuk menghitung performansi motor bakar [11].

a. Torsi dan Daya

$$P_B = \frac{2 \times \pi \times n}{60} T \quad (1)$$

$$P = V \times I \quad (2)$$

Dimana : P_B = Daya keluaran (Watt)

N = putaran mesin (rpm)

T = Torsi (N.m)

b. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

$$Sfc = \frac{\dot{m}_f \times 10^3}{P_B} \quad (3)$$

Dimana : Sfc = konsumsi bahan bakar spesifik (g/kW.h)

\dot{m}_f = laju aliran bahan bakar (kg/jam)

c. Efisiensi thermal brake

$$\eta_b = \frac{P_B}{\dot{m}_f \cdot LHV \cdot \eta_c} \times 3600 \quad (4)$$

Dimana : η_b = efisiensi thermal brake

LHV = nilai kalor bawah bahan bakar (kj/kg)

η_c = efisiensi pembakaran; diasumsikan 97%

d. Rasio Udara - Bahan Bakar

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (5)$$

Dimana : \dot{m}_a = laju aliran udara didalam mesin

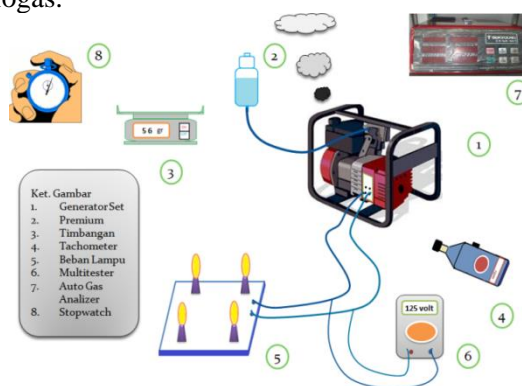
3. Metode Penelitian

Bahan yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah premium murni yang didapat dari SPBU Pertamina dan Biogas yang diproduksi oleh Lembaga Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Sumatera Utara.

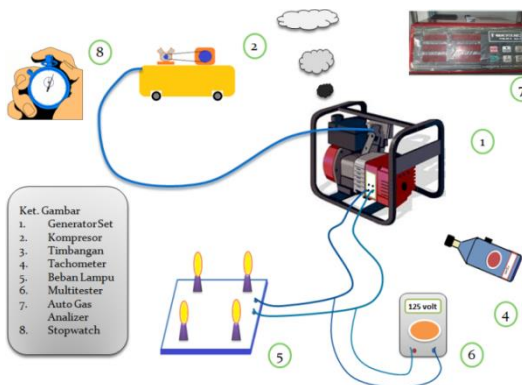
Biogas yang diproduksi berasal dari limbah cair pabrik kelapa sawit atau sering disebut POME (*Palm Oil Milf Effluent*) yang di fermentasikan dengan bakteri anaerob di dalam sebuah biodigester.

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi beban daya secara berturut-turut 100 W, 200 W, 300W , 400 W dan 500 W.

Berikut ini gambar 5 dan gambar 6 yang menunjukkan skema pengujian pada bahan bakar premium dan bahan bakar biogas.



Gambar 5 Skema pengujian premium



Gambar 6 Skema pengujian biogas

Saat beban daya diberikan maka dilakukan pengukuran besarnya tegangan, dan kuat arus yang dihasilkan dengan menggunakan multitester. Sementara untuk menghitung besarnya putaran yang dihasilkan mesin digunakan tachometer. Pada premium, lamanya pengujian dilakukan selama 5 menit tiap variasi beban dan kemudian diukur besarnya massa bahan bakar yang berkurang pada tangki. Pada biogas, pengujian dilakukan dengan mengalirkan biogas dari tangki kapasitas 100 L tekanan sekitar 6 bar menggunakan selang ke karburator yang telah di modifikasi sebelumnya. Mesin dinyalakan sampai isi tangki menjadi kosong dan waktunya diukur dengan stopwatch.

4. Hasil Pengujian

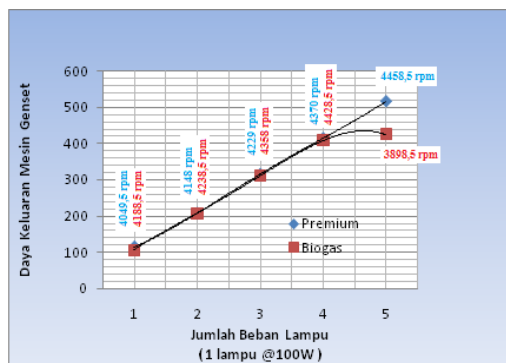
Setelah dilakukan pengujian kurang lebih 1 bulan lamanya di LP3M USU, maka didapat hasilnya sebagai berikut :

4.1 Daya

Pada bahan bakar premium jika jumlah lampu beban daya ditambah, maka putaran dan daya keluaran semakin besar. Pada premium dengan beban 1 lampu mesin genset mengeluarkan putaran keluaran sebesar 4049,5 rpm daya sebesar 114,1 watt, dan pada beban 5 lampu mesin genset menghasilkan putaran keluaran sekitar 4458,5 rpm daya sebesar 517,635 watt.

Pada biogas dengan beban 1 lampu mesin genset mengeluarkan putaran keluaran sebesar 4188,5 rpm dan daya sebesar 107,25 watt, pada beban 4 lampu mesin genset menghasilkan putaran keluaran sekitar 4428,5 rpm dan daya sebesar 407,79 watt. Pada beban 5 lampu mesin genset menghasilkan putaran keluaran sekitar 3898,5 rpm dan daya sebesar 424,74 watt. Turun nya putaran dan daya keluaran disebabkan oleh kandungan CO₂ pada bahan bakar biogas yang mencapai 30-40%. Oleh kandungan tersebut, laju pembakaran biogas menjadi lambat dan nilai kalor bahan bakar biogas menjadi kecil. Akhirnya biogas menumpuk pada ruang bakar, pembakaran menjadi tidak efisien yang ditunjukkan dengan turunnya putaran dan di ikuti dengan turunnya daya yang dihasilkan mesin genset.

Berikut gambar 7 yang menunjukkan besarnya daya yang dihasilkan oleh premium dan biogas.

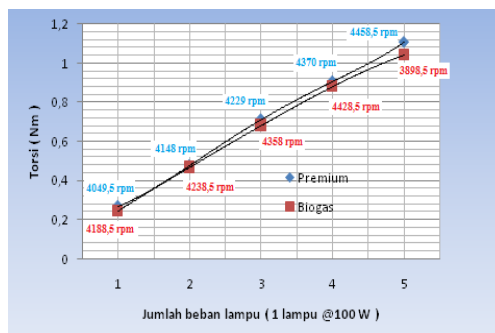


Gambar 7 Grafik Perbandingan Daya Premium dan Biogas

4.2 Torsi

Pada bahan bakar premium jika jumlah lampu beban daya ditambah, maka torsi yang dihasilkan semakin besar. Pada premium dengan beban 1 lampu mesin genset mengeluarkan putaran keluaran sebesar 4049,5 rpm torsi sebesar 0,269 Nm, dan pada beban 5 lampu putaran keluar sekitar 4458,5 rpm torsi 1,019 Nm.

Dari gambar 8 dapat kita lihat bahwa torsi yang dihasilkan biogas beban 2 lampu sampai 4 lampu tidak begitu jauh berbeda, namun saat genset berbahan bakar biogas diberi beban 5 lampu, torsinya menurun dibandingkan premium. Torsi menurun disebabkan oleh putaran yang dihasilkan mesin menurun.



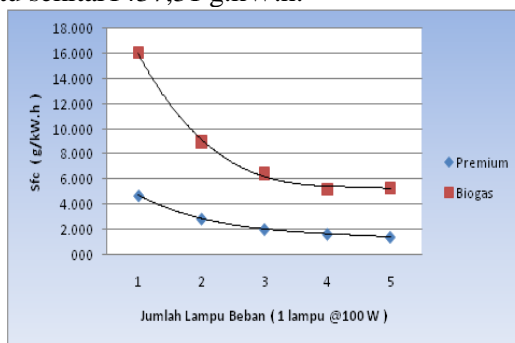
Gambar 8 Grafik Perbandingan Torsi Premium dan Biogas

4.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Pada bahan bakar premium dan biogas, jika jumlah lampu beban daya ditambah maka nilai sfc semakin kecil.

Dari gambar 9 dibawah dapat kita lihat bahwa biogas memiliki nilai sfc lebih besar dibandingkan dengan premium. Hal ini dikarenakan laju bahan bakar pada bahan bakar biogas lebih besar daripada premium.

Nilai sfc yang paling besar ditunjukkan oleh bahan bakar biogas pada beban 1 lampu dengan daya sekitar 107,25 Watt pada putaran 4188,5 rpm yaitu sekitar 16037,30 g/kW.h. Dan nilai sfc terkecil ditunjukkan oleh bahan bakar premium pada beban 5 lampu dengan daya sekitar 517,635 W pada putaran 4458,5 rpm yaitu sekitar 1437,31 g.kW.h.



Gambar 9 Grafik Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Premium dan Biogas

4.4 Efisiensi Termal Brake

Pada bahan bakar premium dan biogas, jika jumlah lampu beban daya ditambah maka nilai efisiensi termal nya semakin besar.

Dari gambar 10 dibawah menunjukkan bahwa premium memiliki nilai efisiensi termal brake lebih besar dibandingkan dengan biogas. Hal ini dikarenakan laju bahan bakar pada bahan bakar biogas lebih besar daripada premium.

Gambar 10 menunjukkan efisiensi termal tertinggi berada pada bahan bakar premium dengan beban 5 lampu saat daya keluaran 517,635 W saat putaran sebesar 4458,5 rpm yaitu 5,87%. Dan efisiensi termal terendah ditunjukkan oleh bahan bakar biogas dengan beban 1 lampu saat daya keluaran sebesar 107,25 W saat putaran 4188,5 rpm yaitu 1,31%.

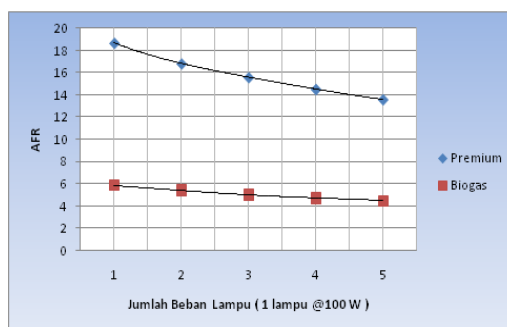


Gambar 10 Grafik Perbandingan Efisiensi Thermal Brake Premium dan Biogas

4.5 Rasio Udara Bahan Bakar

Pada bahan bakar premium dan biogas, jika jumlah lampu beban daya ditambah maka nilai AFR nya semakin kecil.

Gambar 11 menunjukkan pada AFR tertinggi dimiliki oleh bahan bakar premium pada beban 1 lampu saat putaran sebesar 4049,5 rpm dan daya keluaran sebesar 114,1 watt yaitu 18,68. Dan AFR terendah ditunjukkan oleh biogas pada beban 5 lampu saat putaran sebesar 3898,5 rpm dan daya keluaran sebesar 424,74 watt yaitu 4,5.



Gambar 11 Grafik Perbandingan Rasio Udara Bahan Bakar Premium dan Biogas

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

Bahan bakar biogas dapat menghasilkan daya dan torsi maksimum sebesar 424,74 Watt dan 1,04 Nm pada mesin genset otto. Daya dan torsi ini sekitar 42% dan 49% dari daya dan torsi maksimum yang bisa dihasilkan premium dengan mesin yang sama.

Nilai laju bahan bakar pada biogas yang lebih besar dari pada premium mengakibatkan nilai konsumsi bahan bakar spesifik biogas lebih besar dan nilai efisiensi termal brake biogas lebih kecil daripada bahan bakar premium. Nilai konsumsi bahan bakar spesifik terkecil dihasilkan oleh bahan bakar premium pada beban 500 Watt putaran 4458,5 rpm yakni sebesar 1437,31 g/kWh. Dan nilai konsumsi bahan bakar spesifik terbesar dihasilkan oleh bahan bakar biogas pada beban 100 Watt putaran 4188,5 rpm yakni sekitar 16037,3 g/kWh. Efisiensi thermal brake terkecil dihasilkan oleh bahan bakar biogas pada beban 100 Watt putaran 4188,5 rpm yakni sebesar 1,31%. Dan efisiensi thermal brake terbesar dihasilkan oleh bahan bakar premium pada beban 500 Watt putaran 4458,5 rpm yakni sekitar 5,87%.

Pada proses pembakaran, bahan bakar biogas memerlukan udara yang lebih sedikit daripada bahan bakar premium. Rasio udara bahan bakar (AFR) terendah terjadi pada pengujian dengan menggunakan bahan bakar biogas pada beban daya 500 Watt putaran mesin 3898,5 rpm yaitu sebesar 4,5. Sedangkan AFR tertinggi terjadi pada pengujian dengan menggunakan bahan bakar premium pada beban daya 100 Watt putaran mesin 4049,5 rpm yaitu sebesar 18,67.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.useia.org.2013>
- [2] <http://www.esdm.org.2012>
- [3] Siregar, Parpen. 2009. *Produksi Biogas Melalui Pemanfaatan Limbah Cair Kelapa Sawit dengan Digester Anaerob*
- [4] <http://wikipedia.org.2014>
- [5] Nandiyanto, Asep Bayu. 2007. *Biogas Sebagai Peluang Pengembangan Energi Alternatif*. Jurnal Energi Alternatif
- [6] Omid, Mirzamohammad, Assadi.2011. *Literature Review and Map for Using Biogas in Internal Combustion Engines*. University of Stavanger Norway.
- [7] Marchaim. 2012. *Stage anaerobic digestion*
- [8] Barik dan Murugan.2012. *Production And Application Of Biogas As Gaseous Fuel For Internal Combustion*. NIOT. India
- [9] Ludington David, 2006. *Calculating the Heat Value of Biogas*. New York.
- [10] Arismunandar, Wiranto. *Penggerak Mula Motor Bakar Torak*. Edisi kelima. Penerbit ITB Bandung, 1998
- [11] Pulkrabek, Willard W. *Engineering Fundamentals Of The Internal Combustion Engine*. Prentice Hall, New Jersey