

# Analisa Energi dan Eksergi Unjuk Kerja Mesin Diesel *Dual Fuel Biodiesel (B30)-Syngas* Hasil Gasifikasi Pelet Kayu dengan Perubahan *Air Fuel Ratio* dan Beban Daya

Hendro dan Ary Bachtiar Krishna Putra

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail:* arybach@me.its.ac.id

**Abstrak**—Ketergantungan manusia akan penggunaan energi fosil sebagai sumber energi pembangkit listrik dapat direduksi dengan penggunaan *syngas* hasil gasifikasi biomassa yang dapat digunakan pada mesin diesel *dual fuel*. Pada mesin diesel *dual fuel* terdapat permasalahan berupa penurunan efisiensi termal yang disebabkan oleh rendahnya *air fuel ratio (AFR)*, sehingga mengakibatkan terjadinya campuran kaya. Untuk mengetahui parameter unjuk kerja mesin diesel *dual fuel* dapat digunakan metode analisa eksergi yang mampu menunjukkan kualitas dan kuantitas suatu energi serta besarnya *loses* selama proses konversi energi. Penelitian ini menggunakan mesin diesel *generator set* yang dihubungkan dengan pembebanan lampu yang diatur dengan daya keluaran 500W-3000W dan kenaikan interval setiap 500W. Variasi yang dilakukan adalah dengan melakukan perubahan *air fuel ratio (AFR)* serta melakukan penambahan *mass flowrate* udara yang akan memasuki ruang bakar menggunakan blower. Terdapat 5 jenis variasi AFR yang diatur oleh *dimmer* sesuai dengan kapasitas blower. Nilai AFR yang digunakan adalah 10, 15, 20, 22, dan 25. Hasil yang didapatkan berupa variasi AFR 15 memberikan hasil yang optimum terhadap unjuk kerja mesin diesel *dual fuel*. Terdapat penurunan laju konsumsi bahan bakar biodiesel yang cukup signifikan yaitu 0,0001236 kg/s (0,1236 gram/s), dibandingkan dengan sistem *single fuel* yaitu sebesar 0,000287 kg/s (0,287 gram/s). Efisiensi *thermal* sistem *single fuel* masih berada di atas sistem *dual fuel*. Namun, efisiensi *thermal* pada variasi AFR 15 masih berada diatas variasi AFR lainnya dan memiliki nilai rata-rata sebesar 20%. Efisiensi eksergi sistem *dual fuel* masih berada dibawah sistem *single fuel* yang dikarenakan penambahan *syngas* membuat kinerja mesin diesel kurang optimal. Eksergi *input* yang masuk ke mesin diesel menjadi lebih besar sedangkan daya yang dihasilkan cenderung sama. Penghematan konsumsi biodiesel terbaik berada pada variasi AFR 15 dengan rata-rata jumlah biodiesel tersubstitusi atau jumlah penghematan sebesar 58%.

**Kata Kunci**—*Air Fuel Ratio*, Eksergi, Energi, Mesin Diesel *Dual Fuel*, *Syngas*.

## I. PENDAHULUAN

**K**EBUTUHAN listrik mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk di Indonesia. Kebutuhan akan listrik ini diproyeksikan akan mengalami peningkatan yang cukup signifikan sampai pada tahun 2050, diperkirakan mencapai 2.214 TWh (BaU) atau naik 9 kali lipat dari permintaan energi listrik pada tahun 2018 yaitu hanya sebesar 254,6 TWh [1]. Namun, sumber energi listrik di Indonesia masih menggunakan sumber energi tak terbarukan seperti batu bara dan bahan bakar minyak. Pada tahun 2018, 66% pembangkit listrik di Indonesia menggunakan bahan bakar batu bara, 13% menggunakan bahan bakar gas, 5% menggunakan bahan bakar minyak dan

13% menggunakan sumber energi baru terbarukan (EBT) [2]. Pemerintah mencanangkan program pengembangan energi baru terbarukan (EBT) untuk mengurangi penggunaan sumber energi tak terbarukan. Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai sumber energi listrik adalah bioenergi (*biomass*) yang memiliki potensi yaitu mencapai 32,6 GW [1].

Metode yang digunakan untuk memanfaatkan biomassa adalah dengan proses gasifikasi. Pada proses gasifikasi terjadi proses dekomposisi termal yang menyebabkan perubahan struktur substansi. Hal ini menyebabkan bahan bakar padat akan menjadi bahan bakar gas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar kedua pada mesin diesel sistem *dual fuel*. Mesin *diesel dual fuel* merupakan mesin diesel standar yang menggunakan dua *input* bahan bakar untuk menghasilkan kerja [3]. Pada umumnya sistem *dual fuel* memiliki permasalahan pada rasio udara dan bahan bakar (*air fuel ratio, AFR*). Hal ini disebabkan adanya pemasukan *syngas* yang dapat memengaruhi turunnya nilai AFR. Nilai AFR yang rendah menyebabkan terjadinya campuran yang kaya, sehingga akan berpengaruh terhadap penurunan kinerja dari mesin diesel *dual fuel*.

Analisa dalam menemukan parameter unjuk kerja mesin diesel *dual fuel* biasanya masih menggunakan prinsip energi. Analisa energi hanya menunjukkan kuantitas dari energi yang diberikan kepada sistem serta kuantitas hasil pengkonversian energi. Namun, analisa energi tidak dapat mengetahui seberapa besar kehilangan energi dan penyebabnya. Sehingga digunakan suatu analisa yang dapat menunjukkan besarnya kehilangan energi dan lokasi kehilangan energi tersebut, metode ini dinamakan dengan analisa eksergi. Sama halnya dengan energi, eksergi juga merupakan suatu energi yang dapat dimanfaatkan, atau suatu kandungan energi yang tersedia dalam suatu substansi untuk digunakan sehingga dapat menghasilkan kerja. Konsep eksergi secara eksplisit menunjukkan suatu kualitas penggunaan energi dalam suatu proses pengkonversian. Metode eksergi ini juga digunakan untuk mengevaluasi dan perbaikan desain sistem termal dalam proses konversi energi. Sehingga penggunaan konsep eksergi ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja dari mesin diesel *dual fuel*.

Penelitian mengenai proses gasifikasi pelet kayu menunjukkan bahwa hasil *syngas* gasifikasi pelet kayu kaliandra memiliki karakteristik yang cukup baik dan telah memenuhi standar untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar *syngas* untuk sistem *dual fuel* [4]. Hal ini ditunjukkan dengan nyala api yang cenderung stabil dan berwarna *orange*.

Tabel 1.  
Parameter eksperimen

Konstan	Parameter Input		Parameter Output	
	Bervariasi		Diukur	Dihitung
	AFR	Beban Listrik		
• LHV <i>syngas</i>	• AFR 10	500 W hingga 3000 W,	• Waktu konsumsi <i>biodiesel</i> (10mL)	• Daya
• LHV <i>biodiesel</i>	• AFR 15	dengan interval kenaikan	• ΔP udara	• Bmep
	• AFR 20	20	• Debit <i>syngas</i>	• SFC
	• AFR 22	500 W	• Temperatur gas buang dan blok <i>engine</i> (°C)	• Efisiensi Termal
	• AFR 25		• Arus (A)	• AFR
			• Tegangan (V)	• <i>Biodiesel</i> tersubstitusi (%)
				• Analisa eksergi

Tabel 2.

Komposisi komponen penyusun *syngas* pelet kayu

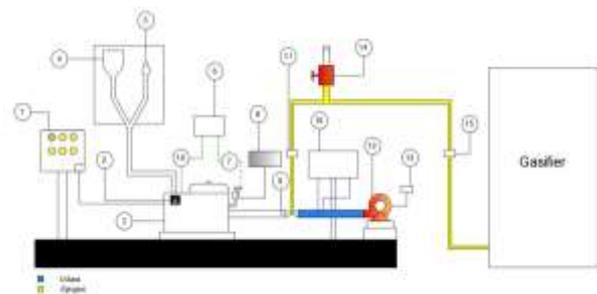
Komponen Penyusun	Persentase (%)	Massa Jenis (Kg/m <sup>3</sup> ) Pada Temperatur 339 K	Nilai LHV (kJ/m <sup>3</sup> )
H <sub>2</sub>	25,53	0,0714	10246
CO	22,19	0,989	12053
CO <sub>2</sub>	12,15	1,564	-
CH <sub>4</sub>	4,86	0,57	33906

Selain itu gasifikasi biomassa pelet kayu dianggap mampu menghasilkan gas yang cukup bagus karena sudah terjadi proses pengeringan sebelumnya. Sehingga biomassa dalam reaktor gasifikasi tidak terlalu lama mengalami proses *drying*.

Penelitian mengenai aplikasi *syngas* pelet kayu sebagai bahan bakar mesin diesel *dual fuel* yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik mesin *dual fuel diesel-syngas* pelet kayu dan substitusi diesel terhadap penggunaan *syngas* [5]. Hasil yang didapat berupa penggunaan *syngas* dapat mereduksi penggunaan bahan bakar *diesel* sebesar 22,67% terhadap penggunaan *single fuel*. Hal ini dikarenakan semakin banyak *syngas* yang masuk ke ruang bakar akan menyebabkan jumlah bahan bakar *diesel* yang dibutuhkan dalam proses pembakaran akan semakin berkurang. Namun, jumlah *syngas* yang masuk ini juga akan mengalami angka maksimal, dikarenakan jika terlalu banyak *syngas* yang berada di ruang bakar akan menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna.

Penelitian mengenai peningkatan performa dari mesin diesel *dual fuel biodiesel-syngas* serta dengan penambahan AFR (penambahan aliran massa udara) menggunakan blower [6]. Pada penelitian ini diperoleh hasil bahwa penggunaan bahan bakar *biodiesel* murni dapat direduksi dengan menggunakan sistem *dual fuel biodiesel-syngas* yaitu sebesar 49,91%. Hal ini mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

Penelitian mengenai perbandingan suatu mesin diesel *dual fuel diesel-natural gas* dengan menggunakan konsep energi dan eksergi serta dilakukan secara matematis maupun eksperimental [7]. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa proses analisa eksergi dalam mesin *dual fuel* menunjukkan performa yang lebih besar jika dibandingkan dengan analisa eksergi. Dalam suatu proses termodinamika (konversi energi), analisa eksergi dapat memperlihatkan diagram alir distribusi eksergi dari suatu kesatuan energi yang lebih jelas jika dibandingkan dengan penggunaan analisa energi.



Gambar 1. Skema instalasi peralatan.

Keterangan:

- |                         |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 1. Lampu beban          | 9. Mixer (venturi)                |
| 2. Power meter display  | 10. Manometer                     |
| 3. Engine generator set | 11. Manometer                     |
| 4. Gelas ukur           | 12. Blower                        |
| 5. Tabung ukur          | 13. Dimmer                        |
| 6. DAQ MX100 Yokogawa   | 14. Katup <i>syngas</i> buang     |
| 7. Termokopel gas buang | 15. Manometer                     |
| 8. Gas Analyzer         | 16. Termokopel blok <i>engine</i> |

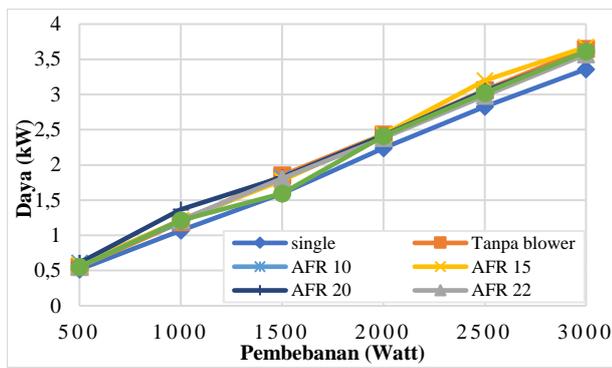
Analisa energi dan eksergi untuk mengetahui unjuk kerja dari mesin diesel *dual fuel biodiesel-syngas* hasil gasifikasi pelet kayu, dilakukan menggunakan dua metode yaitu secara eksperimental dan perhitungan. Penelitian eksperimental ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik unjuk kerja mesin diesel *dual fuel* menggunakan prinsip kesetimbangan energi. Dengan melakukan penambahan AFR diharapkan dapat meningkatkan performa dari mesin diesel. Selain penambahan AFR, juga dilakukan pengujian terhadap perubahan beban daya yang harus dibangkitkan oleh mesin diesel *dual fuel*. Sedangkan analisa eksergi dilakukan melalui perhitungan teoritis dengan menggunakan *properties* pada bahan bakar *biodiesel* maupun bahan bakar *syngas*. Hasil dari perhitungan ini akan memperlihatkan efisiensi eksergi dari proses konversi menggunakan mesin diesel *dual fuel* serta didapat diagram alir dari proses pengkonversian energi yang tidak dapat ditemukan pada penggunaan sistem kesetimbangan energi biasa. Tujuan terakhir dari penelitian ini adalah untuk mengetahui jumlah pengurangan konsumsi bahan bakar *biodiesel* terhadap penggunaan *syngas* hasil gasifikasi pelet kayu.

## II. METODE PENELITIAN

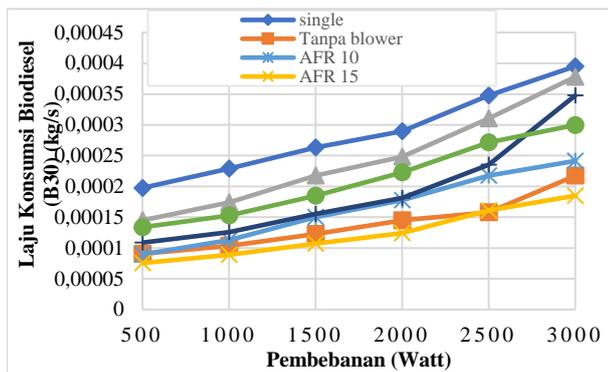
Pada penelitian ini terdapat beberapa parameter yang ingin diperoleh dengan menetapkan parameter *input* dan parameter *output* yang dinyatakan dalam Tabel 1. Komposisi *syngas* yang digunakan sama dengan komposisi *syngas* hasil penelitian [8]. Hal ini didasari oleh kesamaan beberapa parameter, yaitu *raw material* atau biomassa yang digunakan sama, yaitu menggunakan biomassa pelet kayu kaliandra, menggunakan *gasifier* tipe *downdraft* dengan nilai *equivalent ratio* (ER) pada reaktor gasifikasi yaitu 0,3. Adapun komposisi komponen gas ditunjukkan pada Tabel 2.

### A. Peralatan

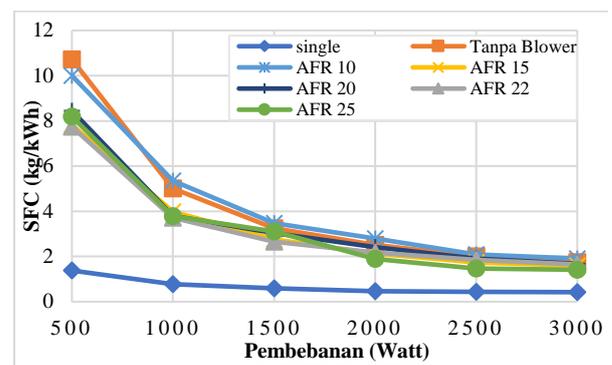
Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain: Mesin Diesel Generator Set, mesin diesel yang digunakan untuk pengujian sistem *dual fuel biodiesel syngas* hasil gasifikasi pelet kayu adalah mesin diesel *generator set SUPRA XTD7700*. Beban Listrik terdiri dari beban lampu



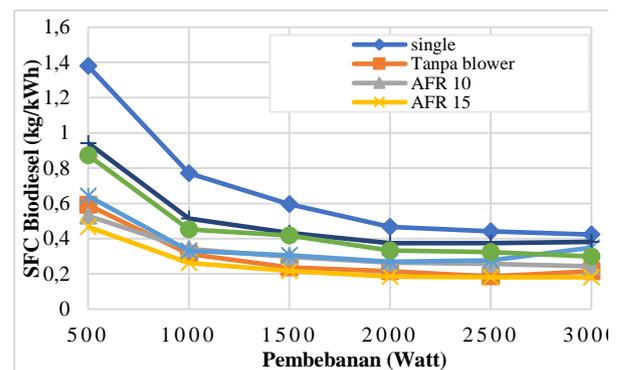
Gambar 2. Grafik daya terhadap pembebanan.



Gambar 3. Grafik laju konsumsi biodiesel terhadap pembebanan.



Gambar 4. Grafik SFC total bahan bakar terhadap pembebanan.



Gambar 5. Grafik SFC biodiesel terhadap pembebanan.

terdiri atas lampu pijar sebanyak 6 buah yang disusun secara paralel dengan konsumsi daya untuk masing-masing lampu sebesar 500 Watt. Masing-masing lampu dilengkapi dengan saklar untuk pengaturan beban bahan bakar *biodiesel*.

Bahan bakar *biodiesel* yang digunakan adalah B30 yang mengandung 30%-volume *biodiesel* dan 70%-volume minyak solar. Bahan baku *biodiesel* ini berasal dari minyak sawit (CPO) yang diperoleh melalui proses esterifikasi atau transesterifikasi.

Bahan bakar *syngas* yang digunakan merupakan hasil dari proses gasifikasi pelet kayu. Gasifier yang digunakan tipe *downdraft gasifier*. *Syngas* yang digunakan memiliki kandungan senyawa karbon yang bersifat mudah terbakar.

*Mixer* digunakan untuk mencampurkan dan memasukkan *syngas* pelet kayu kedalam saluran *intake*. Proses pemasukan *syngas* dengan sistem *dual fuel* menggunakan *mixer* sebagai tempat udara dan *syngas* dicampur sebelum masuk ke ruang bakar yang dipasang pada saluran masuk udara.

*Blower* digunakan untuk menambah suplai udara pembakaran mesin diesel. Suplai udara tambahan ini ditujukan untuk mengatasi penurunan AFR akibat tambahan *syngas* pada saluran udara masuk.

Selain itu terdapat Pipet Volumetric atau Gelas Ukur, Stopwatch, *Pitot Static Tube* dan *Manometer Digital*, *Powermeter Display*, Termokopel Tipe K, Dimmer, *Gas Analyzer*, dan DAQ MX100 Yokogawa.

### B. Metode Pengukuran

Gambar 1 menunjukkan skema instalasi peralatan yang digunakan pada penelitian ini. Pengaturan AFR dilakukan dengan penambahan laju aliran massa udara menggunakan *blower* yang diatur dengan *dimmer*. *Blower* dipasang pada saluran *intake* masukan udara. Kemudian aliran masuk *syngas* dibatasi dengan cara membuka katup gas buang *syngas* jika terjadi lonjakan produksi *syngas*. Pencampuran

*syngas* dan udara ini terjadi didalam *mixer*. Termokopel tipe K dipasang pada mesin dan saluran gas buang mesin. Selain itu juga dipasang *probe gas analyzer* pada saluran gas buang mesin, untuk mengetahui komponen penyusun dari gas buang sebagai sisa hasil pembakaran. Ketika AFR yang sudah diinginkan tercapai, mesin diesel diberikan beban lampu dimulai dari 500 Watt, kemudian dilakukan pengukuran waktu konsumsi 10 mL bahan bakar *biodiesel* (B30). Pengukuran yang diperoleh adalah nilai beda tekanan *syngas*, beda tekanan udara, temperatur gas buang, temperatur mesin, nilai arus dan tegangan listrik, serta komposisi gas buang mesin diesel. Hasil pengukuran ini akan digunakan dalam perhitungan unjuk kerja mesin diesel *dual fuel* dengan menggunakan prinsip energi dan eksergi.

### C. Perhitungan Performa Mesin Diesel Dual Fuel

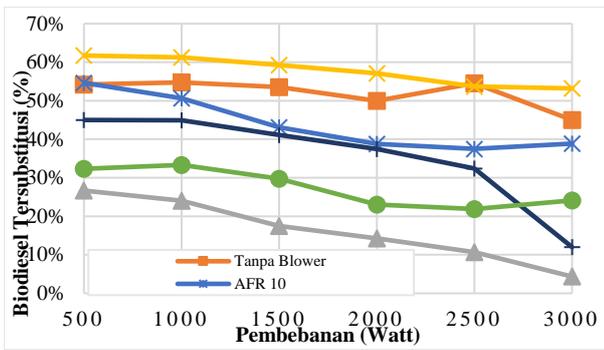
Pada penelitian ini, perhitungan daya yang dihasilkan oleh mesin *generator set* diperoleh dari pemberian listrik pada lampu dan dihitung dengan memperhatikan arus listrik dan tegangan yang terukur pada *Avometer*. Daya tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Ne = \frac{V \times I \times \text{Cos}\phi}{\eta_{\text{gen}} \times \eta_{\text{trans}}} \quad (1)$$

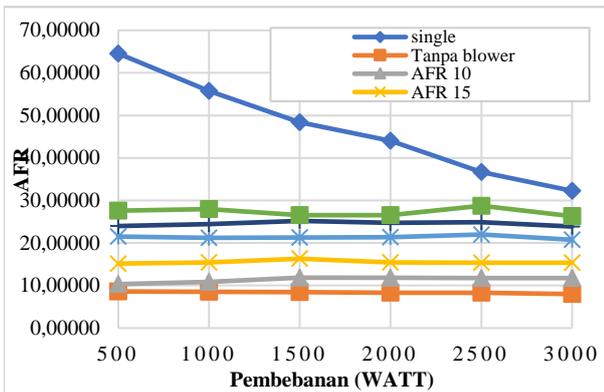
V merupakan tegangan listrik, I merupakan arus listrik,  $\eta_{\text{gen}}$  merupakan efisiensi mekanisme generator yang diperoleh dari *manual book*,  $\eta_{\text{trans}}$  adalah efisiensi transmisi yang diperoleh dari *manual book* serta  $\text{Cos}\phi$  merupakan faktor daya listrik. Konsumsi bahan bakar spesifik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{SFC} = \frac{3600 \times \dot{m}_{\text{bahan bakar}}}{Ne} \quad (4)$$

$\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$  adalah laju alir massa bahan bakar yang digunakan.



Gambar 6. Grafik substitusi biodiesel terhadap pembebanan.



Gambar 7. Grafik substitusi biodiesel terhadap pembebanan.

Untuk memperoleh besarnya nilai udara yang cukup dalam pembakaran bahan bakar sistem *dual fuel* digunakan persamaan:

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bio\ d} + \dot{m}_s} \quad (5)$$

$\dot{m}_{udara}$  merupakan laju alir massa udara,  $\dot{m}_{bio\ d}$  merupakan laju alir massa pada biodiesel sistem *dual fuel* dan  $\dot{m}_s$  merupakan laju alir massa pada *syngas*. Nilai efisiensi *thermal* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\eta_{th} = \frac{Ne}{\sum(\dot{m} \times LHV)_{bahan\ bakar}} \times 100\% \quad (6)$$

$LHV_{bahan\ bakar}$  merupakan nilai kalor bawah pada bahan bakar.

Perhitungan nilai energi *input* per siklus untuk sistem *dual fuel* dapat menggunakan persamaan:

$$Energi\ input\ per\ siklus = (t \times \dot{m}_{bio\ d} \times LHV_{bio}) + (t \times \dot{m}_s \times LHV_s) \quad (7)$$

$t$  merupakan waktu yang dibutuhkan piston untuk mencapai satu siklus,  $LHV_{bio}$  merupakan nilai kalor bawah biodiesel dan  $LHV_s$  merupakan nilai kalor bawah *syngas*.

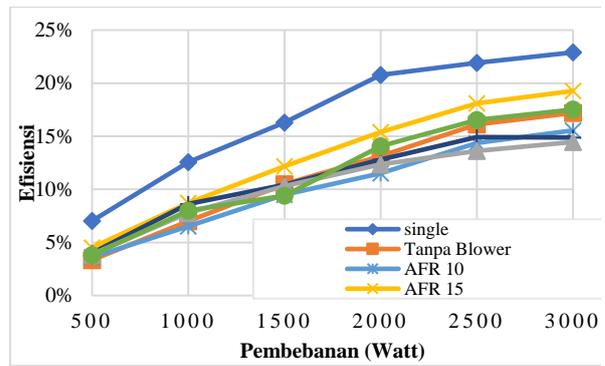
Untuk mengetahui besarnya penghematan atau besarnya biodiesel yang tersubstitusi pada sistem *dual fuel* dapat menggunakan persamaan:

$$Biodiesel\ tersubstitusi = \frac{\dot{m}_{bio\ s} - \dot{m}_{bio\ d}}{\dot{m}_{bio\ s}} \times 100\% \quad (8)$$

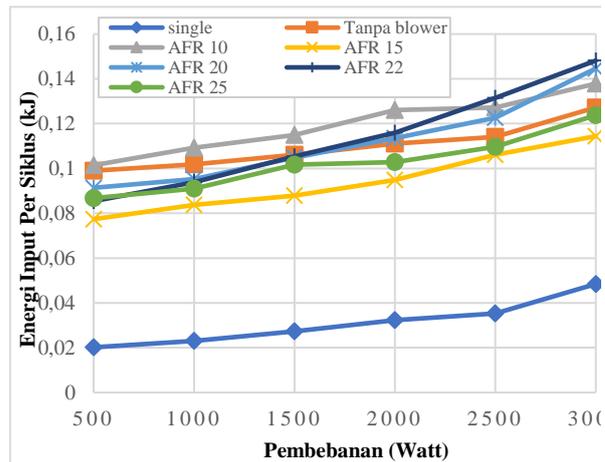
$\dot{m}_{bio\ s}$  adalah laju alir massa pada biodiesel sistem *single fuel*. Perhitungan eksergi *chemical* menggunakan persamaan:

$$\dot{X}_{chem} = \dot{n}_p \sum_{i=1}^j y_i \bar{x}_i + \dot{n}_{H_2O} \bar{x}_{H_2O}^{chem} \quad (9)$$

Dengan  $y_i$  merupakan persentase dari setiap komponen gas buang,  $\bar{x}_i$  merupakan *standard chemical* eksergi dari masing-masing komponen gas buang. Penghitungan *mol flow rate*  $H_2O$  menggunakan persamaan yang sama dengan



Gambar 8. Grafik efisiensi *thermal* terhadap pembebanan.



Gambar 9. Grafik efisiensi *thermal* terhadap pembebanan.

menghitung *mol flow rate* gas buang. Perhitungan Eksergi fisik dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\dot{X}_{physic} = \dot{n}_p \sum_{k=1}^k y_k \bar{M}_k [(h_k - h_{k0}) - T_0 (s_k - s_{k0})] + \dot{n}_{H_2O} [(h_{H_2O} - h_{H_2O0}) - T_0 (s_{H_2O} - s_{H_2O0})] \quad (10)$$

$h$  dan  $s$  merupakan nilai entalpi dan entropi untuk setiap komponen penyusun gas buang. Nilai eksergi gas buang dapat diketahui menggunakan persamaan:

$$\dot{X}_{gas} = \dot{X}_{physic} + \dot{X}_{chem}$$

Jumlah eksergi yang masuk kedalam ruang bakar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\dot{X}_{enters} = \dot{n}_d \left( \sum_{i=1}^j y_i \bar{x}_i \right)_d + \dot{n}_g \left( \sum_{j=1}^j y_j \bar{x}_j \right)_g \quad (11)$$

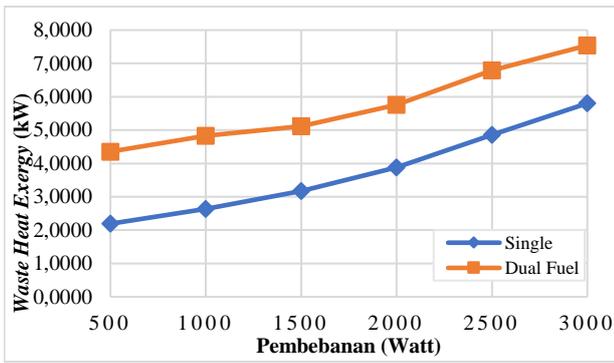
Besarnya *waste heat* eksergi atau besarnya eksergi panas yang dibuang ke lingkungan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\dot{X}_{heat} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \dot{Q} \quad (12)$$

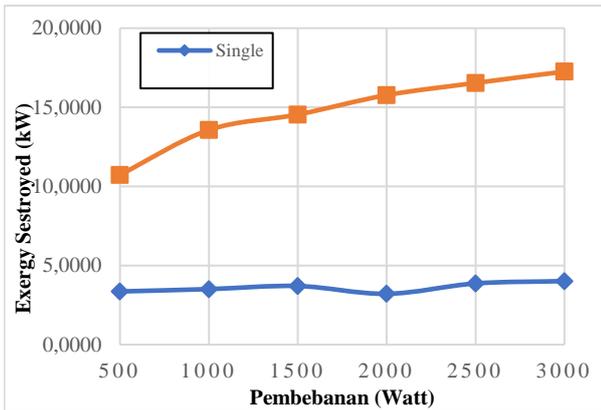
Dengan  $T_0$  merupakan temperatur lingkungan pengujian,  $T_m$  merupakan temperatur gas buang yang baru keluar dari mesin. Nilai  $Q$  atau kalor bahan bakar dapat diketahui dengan berdasarkan  $LHV$  kedua bahan bakar.

Destroyed eksergi menggambarkan besarnya eksergi yang hilang selama proses konversi energi. Eksergi ini tidak berubah menjadi panas ataupun menjadi kerja. Besarnya *destroyed* eksergi ini dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\dot{X}_{destroyed} = \dot{X}_{enters} - \dot{X}_{gas} - \dot{X}_{work} - \dot{X}_{heat} \quad (13)$$



Gambar 10. Grafik waste heat eksergi terhadap pembebanan.



Gambar 11. Grafik eksergi destroyed terhadap pembebanan.

$\dot{X}_{work}$  merupakan besar daya yang dibangkitkan oleh mesin diesel *dual fuel*.

Dengan mengetahui nilai eksergi yang terdapat pada proses pembakaran mesin diesel *dual fuel* maka nilai efisiensi eksergi mesin diesel *dual fuel* dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan:

$$\epsilon = \frac{\dot{X}_{work}}{\dot{X}_{enters}} \quad (14)$$

### III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

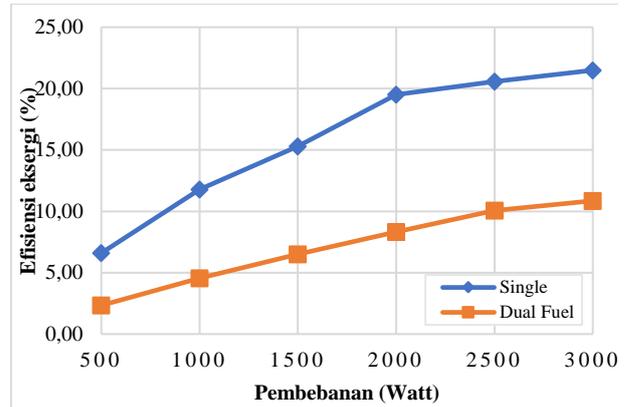
#### A. Analisa Grafik Unjuk Kerja Berdasarkan Prinsip Energi

Pada sub bab ini menampilkan penjelasan mengenai unjuk kerja dari mesin diesel *generator set* sistem *single fuel* maupun *dual fuel* yang digambarkan ke dalam beberapa grafik. Variasi yang dilakukan pada sistem *dual fuel* adalah perubahan AFR yang dilakukan dengan penambahan udara serta pembatasan jumlah *syngas* yang masuk ke dalam ruang bakar. Nilai AFR yang digunakan adalah 10, 15, 20, 22, dan 25. Analisa yang dilakukan berupa:

##### 1) Analisa Grafik Daya Terhadap Pembebanan

Gambar 2 menunjukkan grafik daya terhadap pembebanan. Pada Gambar 2 tersebut memperlihatkan bahwa terjadi peningkatan daya yang dihasilkan oleh mesin diesel *generator set* terhadap kenaikan beban. Untuk setiap variasi AFR tidak terlalu memperlihatkan perubahan nilai daya yang signifikan.

Pada mesin diesel *generator set* putaran mesin dijaga konstan secara otomatis. Pada mesin diesel yang digunakan, putaran mesin berada di angka 3000 rpm. Sehingga kenaikan daya bergantung pada kenaikan beban yang diberikan kepada mesin diesel *generator set*. Idealnya, seiring dengan kenaikan pembebanan putaran mesin akan mengalami penurunan



Gambar 12. Grafik efisiensi eksergi terhadap pembebanan.

sedikit. Hal ini dikarenakan beban yang lebih besar diberikan sehingga kerja mesin sedikit lebih berat. Untuk menanggulangi hal ini peran *governor* sangat berpengaruh untuk menginjeksikan bahan bakar lebih agar putaran mesin tetap konstan. Sehingga nilai tegangan untuk setiap pembebanannya akan konstan.

Pembebanan yang diberikan untuk setiap variasi bernilai sama. Sehingga daya yang dihasilkan untuk setiap kenaikan beban pun akan sama. Hal ini terlihat pada Gambar 2 yang memperlihatkan bahwa *trendline* dari grafik memiliki kenaikan bersifat linear. Pada Gambar 2 terlihat pula, bahwa besarnya nilai daya yang dihasilkan sistem *dual fuel* lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem *single fuel*. Hal ini dapat dipengaruhi oleh besarnya tegangan yang tidak konstan untuk setiap pembebanannya. Pembebanan yang tidak konstan ini dikarenakan putaran mesin juga tidak konstan. Sehingga besarnya nilai daya yang dihasilkan untuk pengujian sistem *single fuel* berbeda dengan sistem *dual fuel*. Adanya perbedaan ini diperoleh sebagai akibat tidak konstannya nilai putaran mesin yang digunakan selama proses pengujian. Putaran yang tidak konstan ini dapat disebabkan oleh keadaan mesin yang belum *steady* ketika dilakukannya pengambilan data. Dimana *governor* pada mesin diesel *generator set* masih memerlukan waktu untuk melakukan penajaganan putaran mesin agar kembali konstan.

##### 2) Analisa Grafik Mass Flow Rate Biodiesel Terhadap Pembebanan

Pada Gambar 3 memperlihatkan besarnya laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* untuk setiap kenaikan beban. Pada grafik tersebut terlihat bahwa terdapat kenaikan laju konsumsi seiring dengan pertambahan pembebanan. Konsumsi bahan bakar *biodiesel* terbesar terjadi pada sistem *single fuel* dimana untuk daya maksimum (3000 Watt) konsumsi bahan bakar maksimum ada di angka 0,0003950 kg/s (0,395 gram/s). Sedangkan untuk konsumsi bahan bakar yang paling sedikit diperoleh pada variasi AFR 15 dimana pada beban maksimum (3000 Watt) laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* adalah sebesar 0,0001849 kg/s (0,1849 gram/s).

Mesin diesel *dual fuel* diharapkan dapat mengurangi laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* dan ini terlihat pada grafik bahwa terjadi pengurangan konsumsi bahan bakar tersebut. Setiap perubahan AFR juga mengambil peranan penting dalam laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* hal ini dikarenakan ketika penambahan AFR dilakukan penambahan udara yang masuk kedalam ruang bakar, yang menyebabkan

banyaknya *syngas* yang ikut terbakar juga akan berperan dalam proses penurunan laju konsumsi bahan bakar tadi. Pada penelitian ini diperoleh bahwa AFR 15 memberikan pengaruh yang signifikan terhadap terhadap laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* dimana rata-rata laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* adalah sebesar 0,0001236 kg/s (0,1236 gram/s) jauh lebih sedikit jika dibandingkan dengan rata-rata laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* pada sistem *single fuel* yaitu sekitar 0,000287 kg/s (0,287 gram/s).

### 3) Analisa Grafik Specific Fuel Consumption (SFC) Terhadap Pembebanan

Gambar 4 merupakan grafik *Specific Fuel Consumption* (SFC) total bahan bakar terhadap pembebanan. Nilai SFC bahan bakar campuran kedua bahan bakar (*biodiesel-syngas*) mengalami penurunan untuk setiap kenaikan beban. Pada grafik terjadi penurunan yang tajam untuk semua variasi AFR dari beban 500 Watt sampai dengan 1500 Watt, kemudian dari beban 1500 Watt sampai 3000 Watt mengalami penurunan yang cenderung landai. Pada Gambar 4, nilai SFC sistem *single fuel* menunjukkan nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem *dual fuel*.

Berdasarkan persamaan untuk menghitung besarnya nilai SFC pada sistem dual fuel dengan adanya penambahan AFR yang dilakukan dengan penambahan udara mengakibatkan *syngas* yang masuk pun akan semakin banyak, sehingga konsumsi bahan bakar total akan bertambah pula. Tetapi kondisi ini juga dapat menyebabkan penurunan bahan bakar *biodiesel* yang diinjeksikan. Dari grafik 4.5 terlihat bahwa SFC paling kecil berada pada AFR 15 dengan SFC rata-rata sebesar 3,1008 kg/kWh.

Gambar 5 memperlihatkan besarnya SFC *biodiesel* untuk setiap variasi yang diberikan. Terlihat bahwa SFC sistem *single fuel* berada paling tinggi diantara yang lainnya. Hal ini berkaitan dengan besarnya laju konsumsi bahan bakar *biodiesel*. Namun secara keseluruhan terjadi penurunan nilai SFC untuk setiap kenaikan bebannya.

Pada Gambar 5 dapat disimpulkan bahwa *syngas* telah dapat mensubstitusi bahan bakar *biodiesel* dan *syngas* mengambil peranan dalam menggantikan bahan bakar *biodiesel* untuk mengatasi beban listrik. Nilai SFC yang berbeda pada tiap variasi dengan kondisi pembebanan yang sama, disebabkan oleh jumlah *syngas* yang menggantikan bahan bakar *biodiesel* itu sendiri. Sehingga jika jumlah *syngas* yang masuk ke ruang bakar semakin banyak akan menyebabkan penurunan nilai dari SFC, teori ini sesuai dengan perumusan SFC itu sendiri.

### 4) Analisa Grafik Substitusi Biodiesel Terhadap Pembebanan

Gambar 6 merupakan grafik besarnya substitusi bahan bakar *biodiesel* terhadap pembebanan. Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa penvariasian AFR memiliki peranan yang sangat penting terhadap besarnya substitusi *biodiesel*. *Trendline* grafik menunjukkan penurunan substitusi *biodiesel* yang cukup konstan terhadap penambahan beban. Penurunan substitusi bahan bakar *biodiesel* ini menunjukkan bahwa LHV dari *syngas* tidak mampu memenuhi kebutuhan tanggungan daya yang diberikan. Sehingga *biodiesel* diinjeksikan semakin banyak setiap kenaikan bebannya.

Penambahan *syngas* memang diharapkan mampu mensubstitusi dari bahan bakar *biodiesel*. AFR 15

memberikan substitusi terbesar dengan rata-rata substitusi *biodieseln*nya adalah sebesar 58%. Sedangkan untuk variasi AFR lainnya masih berada dibawah substitusi *biodiesel* sistem *dual fuel* tanpa menggunakan *blower*. Hal ini dikarenakan jumlah udara yang diberikan antar satu variasi berbeda-beda. Sehingga jumlah *syngas* yang masuk pun juga berbeda. Selain itu pada sistem *dual fuel* tanpa menggunakan *blower* menggunakan *syngas* yang konstan dan juga tinggi. Sedangkan untuk sistem *dual fuel* dengan menggunakan *blower* dilakukan penjagaan laju aliran *syngas* yang masuk hal ini mengakibatkan jumlah *syngas* yang tersubstitusi pun akan berkurang. Pada penelitian ini didapatkan substitusi *biodiesel* optimum berada pada nilai AFR 15.

### 5) Analisa Grafik Rasio Udara-Bahan Bakar (AFR)

Gambar 7 merupakan grafik dari rasio kebutuhan udara-bahan bakar pada sistem *single fuel* maupun *dual fuel*. Pada Gambar 7 terlihat bahwa penambahan *syngas* dapat menurunkan nilai AFR pada mesin diesel *dual fuel*. Untuk sistem *single fuel* memiliki nilai AFR dengan rentang 64 untuk beban terendah dan turun menjadi 32 pada pembebanan tinggi. Sedangkan pada sistem *dual fuel* tanpa *blower* terjadi penurunan AFR yang sangat signifikan menjadi 8. Adanya penambahan *syngas* membuat bahan bakar menjadi lebih banyak, sedangkan jumlah udara yang masuk tidak terlalu berbeda. Penurunan nilai AFR pada sistem *dual fuel* ini dikarenakan *syngas* juga membutuhkan udara sendiri dalam proses pembakarannya. Berdasarkan perhitungan kebutuhan udara stoikiometri dari *syngas* diperoleh bahwa untuk proses pembakaran sempurna *syngas* dibutuhkan AFR sebesar 8. Hal inilah yang menyebabkan penurunan nilai AFR untuk sistem *dual fuel* cukup signifikan. Jika didasarkan pada teori pembakaran pada sistem *dual fuel*, *syngas* juga mengambil peranan udara dalam proses pembakaran, sehingga kebutuhan udara pembakaran pada sistem *dual fuel* menjadi lebih kecil. Dengan penambahan udara menggunakan *blower* diharapkan mampu menambahkan pasokan udara pembakaran. Namun kenyataannya semakin besar udara yang ditambahkan akan mengakibatkan semakin banyak bahan bakar *syngas* yang masuk ke ruang bakar. Pada penelitian ini digunakan variasi AFR, penjagaan AFR dilakukan dengan mengubah nilai laju aliran masa udara yang akan diberikan serta melakukan pengaturan terhadap laju *syngas* yang akan memasuki ruang bakar. Dengan melakukan perubahan laju aliran udara dan laju aliran *syngas* pada setiap pembebanan, maka mengakibatkan besarnya kontribusi *syngas* dalam mensubstitusi *biodiesel* (B30) menjadi kurang optimal.

Pada penelitian ini digunakan variasi AFR, penjagaan AFR dilakukan dengan mengubah nilai laju aliran masa udara yang akan diberikan serta melakukan pengaturan terhadap laju *syngas* yang akan memasuki ruang bakar. Dengan melakukan perubahan laju aliran udara dan laju aliran *syngas* untuk setiap pembebanannya, maka mengakibatkan besarnya kontribusi *syngas* dalam mensubstitusi *biodiesel* (B30) menjadi kurang optimal. Penambahan laju alir massa udara akan menyebabkan kenaikan laju aliran *syngas* yang masuk ke ruang bakar, dan akan dapat mensubstitusi bahan bakar *biodiesel* yang lebih banyak [6]. Sedangkan pada penelitian ini, penjagaan terhadap AFR dilakukan dengan cara mengontrol atau membatasi laju aliran *syngas*. Hal ini menjadi faktor utama yang dapat mempengaruhi nilai dari

beberapa parameter unjuk kerja mesin diesel *dual fuel* lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem *single fuel*.

#### 6) Analisa Grafik Efisiensi Thermal Terhadap Pembebanan

Gambar 8 merupakan grafik efisiensi *thermal* terhadap pembebanan. Pada grafik tersebut memperlihatkan bahwa terjadi kenaikan efisiensi *thermal* untuk setiap kenaikan pembebanan. Nilai efisiensi *thermal* sistem *single fuel* berada di atas efisiensi *thermal* sistem *dual fuel* dimana pada beban 3000 Watt sistem *single fuel* memiliki efisiensi *thermal* sebesar 23%. Untuk sistem *dual fuel* efisiensi tertinggi ada pada AFR 15 yaitu sebesar 20%. Serta didapat bahwa variasi AFR juga berpengaruh terhadap perubahan efisiensi *thermal*.

Berdasarkan persamaan perhitungan, efisiensi *thermal* bergantung pada nilai daya dan besarnya perkalian LHV dan laju alir massa dari bahan bakar. Dikarenakan daya yang dihasilkan oleh setiap variasi AFR pada sistem *dual fuel* maupun sistem *single fuel* cenderung sama untuk setiap kenaikan beban, maka parameter yang berpengaruh terhadap hasil efisiensi *thermal* adalah laju aliran massa dari bahan bakar *biodiesel* maupun bahan bakar *syngas*. Semakin besar laju aliran bahan bakar yang masuk ke ruang bakar, akan mengakibatkan turunnya nilai efisiensi *thermal* mesin tersebut.

Pada kondisi ini memperlihatkan bahwa efisiensi *thermal* sistem *dual fuel* masih rendah jika dibandingkan dengan sistem *single fuel*, tetap dengan penambahan AFR dapat meningkatkan nilai efisiensi *thermal* tersebut jika dibandingkan dengan sistem *dual fuel* tanpa menggunakan *blower*. Namun untuk beberapa variasi AFR masih ada yang berada dibawah sistem tanpa *blower*. Hal ini berkaitan erat dengan jumlah udara yang masuk ke ruang bakar. dan juga dibatasinya jumlah *syngas* yang masuk untuk melakukan penyamaan nilai AFR tersebut. hal ini menjadi perhatian yang lebih dalam menentukan nilai udara dan pembatasan nilai *syngas* yang masuk kedalam ruang bakar. Selain itu mesin diesel dikonstruksi untuk penggunaan bahan bakar diesel murni, sedangkan penelitian ini menggunakan bahan bakar *biodiesel* yang dicampurkan dengan *syngas*, yang mana nilai LHV dari kedua bahan bakar ini juga lebih kecil jika dibandingkan dengan LHV diesel murni. Hal ini lah yang menyebabkan efisiensi *thermal* dari sistem *dual fuel* lebih rendah jika dibandingkan sistem *single fuel*. Pada penelitian ini diperoleh besarnya AFR optimal untuk menghasilkan efisiensi *thermal* terbesar pada sistem *dual fuel* adalah sebesar 15 dengan efisiensi *thermal* 20%.

#### 7) Analisa Grafik Energi Input per Siklus Terhadap Pembebanan

Energi input per siklus merupakan energi yang dibutuhkan oleh mesin untuk melakukan kerja dalam setiap siklusnya. Gambar 9 menunjukkan besarnya energi input per siklus untuk setiap kenaikan pembebanan. Gambar 9 menunjukkan bahwa energi *input* mengalami kenaikan untuk setiap kenaikan pembebanan. Penambahan *syngas* juga mengambil peranan penting dalam meningkatkan energi input untuk setiap siklusnya. Hal ini terlihat dengan lebih besarnya energi *input* sistem *dual fuel* jika dibandingkan dengan sistem *single fuel*. Perubahan AFR juga berperaruh dengan besarnya energi *input* untuk setiap siklusnya. AFR 10 membutuhkan energi yang paling besar, kemudian turun seiring dengan penambahan AFR hingga mencapai titik yang paling sedikit

pada AFR 15, kemudian naik kembali untuk AFR yang lebih besar.

Kenaikan nilai energi *input* per siklus dipengaruhi oleh banyaknya bahan bakar yang mengalir ke dalam ruang bakar. Semakin banyaknya *biodiesel* yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan menyebabkan semakin banyak energi yang dibutuhkan untuk setiap siklusnya. Kemudian mengakibatkan naiknya energi *input* per siklus untuk setiap kenaikan pembebanan. Selain itu dengan penambahan *syngas* juga menyebabkan semakin banyak bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. Di mana *syngas* juga memiliki nilai LHV tersendiri sehingga menyebabkan besarnya nilai energi input per siklus untuk sistem *dual fuel* lebih tinggi. Idealnya dengan penambahan udara akan mengurangi besarnya energi input per siklus. Dikarenakan dengan semakin besarnya udara yang mengalir akan menyebabkan semakin banyak *syngas* yang dapat mensubstitusikan *biodiesel* [6]. Sedangkan pada penelitian ini diperoleh bahwa kenaikan AFR belum mampu menurunkan kebutuhan energi input per siklus untuk sistem *dual fuel*. Hal ini disebabkan belum optimalnya substitusi *syngas* terhadap bahan bakar *biodiesel* (B30) sehingga laju aliran bahan bakar *biodiesel* (B30) masih cukup tinggi.

#### B. Analisa Grafik Unjuk Kerja Berdasarkan Prinsip Eksergi

Sub bab ini memperlihatkan beberapa grafik terkait analisa unjuk kerja mesin diesel *generator set* pada sistem *single fuel* maupun *dual fuel*. Analisa grafik unjuk kerja berdasarkan prinsip eksergi pada sistem *dual fuel* hanya dilakukan pada satu variasi optimum saja yaitu pada variasi AFR 15. Adapun analisis yang dilakukan berupa:

##### 1) Analisa Grafik Waste Heat Eksergi

*Waste heat* eksergi atau eksergi panas merupakan besarnya panas yang dibuang ke lingkungan sebagai efek dari proses pembakaran bahan bakar. panas ini ditimbulkan sebagai produk hasil reaksi kimia pembakaran dan dibuang bersamaan dengan gas buang. Pada Gambar 10 memperlihatkan besarnya eksergi panas yang dilepaskan ke lingkungan, grafik tersebut terlihat bahwa untuk setiap kenaikan beban terdapat kenaikan eksergi panas yang dilepaskan.

Eksergi panas dipengaruhi oleh temperatur gas buang, sehingga semakin tinggi temperatur gas buang maka semakin tinggi pula eksergi panas yang dilepaskan ke lingkungan. Selain itu, besarnya eksergi panas juga dipengaruhi oleh besarnya jumlah bahan bakar. Pada Gambar 10 terlihat bahwa dengan penambahan beban menyebabkan laju aliran bahan bakar bertambah untuk menjaga mesin tetap pada putaran konstan sehingga besarnya nilai kalor yang dihasilkan akan semakin tinggi dan menyebabkan kenaikan temperatur gas buang untuk setiap kenaikan bebannya. Selain itu, pada grafik juga terlihat bahwa sistem *dual fuel* memiliki eksergi panas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem *single fuel* hal ini diakibatkan jumlah bahan bakar yang terbakar juga menjadi lebih banyak. Dan *syngas* yang masuk ke ruang bakar tadi terbakar secara menyeluruh hal ini juga dapat memicu kenaikan temperatur gas buang dikarenakan nilai kalor sebagai akibat proses pembakaran dua bahan bakar meningkat.

### 2) Analisa Grafik Destroyed Eksergi

Pada Gambar 11 terlihat bahwa terjadi kenaikan eksergi *destroyed* untuk setiap kenaikan pembebanan pada sistem *dual fuel*, sedangkan untuk sistem *single fuel* cenderung stabil. Hal ini disebabkan oleh penambahan temperatur dan laju bahan bakar terhadap kenaikan beban. Jika dilihat berdasarkan persamaan, peningkatan eksergi *destroyed* ini sangat bergantung terhadap nilai eksergi yang lainnya. Pada grafik terlihat bahwa besarnya eksergi *destroyed* sistem *dual fuel* lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem *single fuel*. Hal ini dikarenakan besarnya energi input dari sistem *single fuel* sudah cukup mengatasi beban yang diberikan, sehingga energi *syngas* berubah menjadi eksergi *destroyed* inilah yang menyebabkan eksergi *destroyed dual fuel* lebih tinggi jika dibandingkan sistem *single fuel*.

### 3) Analisa Grafik Efisiensi Eksergi

Efisiensi eksergi merupakan perbandingan antara eksergi kerja yang dapat dimanfaatkan dengan eksergi enters atau eksergi total yang diberikan. Gambar 12 memperlihatkan bahwa terjadi kenaikan efisiensi eksergi untuk setiap kenaikan bebannya. Selain itu pada grafik juga terlihat bahwa efisiensi eksergi sistem *single fuel* lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem *dual fuel*. Sistem *single fuel* memiliki efisiensi eksergi terbesar yaitu 21,49% sedangkan untuk sistem *dual fuel* memiliki efisiensi eksergi sebesar 10,85%.

*Efisiensi* eksergi sangat bergantung terhadap jumlah bahan bakar yang diberikan yang nantinya akan dihitung sebagai laju aliran molar. Dengan penambahan *syngas* dapat mensubstitusi bahan bakar *biodiesel* sehingga dapat mengurangi nilai eksergi enters yang masuk sehingga besarnya *efisiensi* eksergi sistem *dual fuel* lebih besar jika dibandingkan dengan sistem *single fuel*. Namun pada grafik terlihat bahwa *efisiensi* eksergi sistem *dual fuel* masih lebih kecil. Hal ini karena penambahan *syngas* menyebabkan semakin banyaknya eksergi enters yang mengalir semakin besar sedangkan besaran daya atau eksergi kerja yang dihasilkan masih sama. Keberadaan *syngas* belum memberikan substitusi optimal terhadap *biodiesel*. Selain itu, mesin yang digunakan merupakan mesin diesel yang menggunakan bahan bakar murni, sehingga penggunaan bahan bakar lainnya akan menyebabkan kinerja dari mesin tersebut kurang optimal.

## IV. KESIMPULAN

Dari penelitian dan pengujian mesin diesel *dual fuel* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut. Perubahan AFR memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap unjuk

kerja mesin diesel *dual fuel*. Dimana AFR 15 menghasilkan unjuk kerja maksimum untuk beberapa parameter.

Terdapat penurunan laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* yang cukup signifikan yaitu 0,0001236 kg/s (0,1236 gram/s) jauh lebih sedikit jika dibandingkan dengan rata-rata laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* pada sistem *single fuel* yaitu sekitar 0,000287 kg/s (0,287 gram/s).

Dengan penurunan laju konsumsi bahan bakar *biodiesel* menyebabkan SFC dari sistem *dual fuel* juga mengalami penurunan, yang mengindikasikan penghematan terhadap penggunaan sistem *dual fuel*.

Effisiensi thermal sistem *single fuel* masih berada diatas sistem *dual fuel*. Namun efisiensi AFR 15 masih berada diatas variasi AFR lainnya dan memiliki nilai efisiensi thermal rata-rata sebesar 20%.

Efisiensi eksergi sistem *dual fuel* masih berada dibawah sistem *single fuel*. Hal ini dikarenakan *syngas* masih belum mampu melakukan substitusi yang optimal terhadap *biodiesel*. Hal ini terjadi karena pembatasan jumlah *syngas* yang masuk ke ruang bakar untuk melakukan penjagaan terhadap nilai AFR.

Penghematan konsumsi bahan bakar *biodiesel* terbaik berada pada variasi AFR 15 dengan rata-rata jumlah *biodiesel* tersubstitusi atau jumlah penghematan sebesar 58%.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dewan Energi Nasional (DEN), *Indonesia Energy Outlook 2019*. Jakarta: Sekretaris Jenderal DEN, 2019.
- [2] BPPT RI, *Outlook Energi Indonesia 2021*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2021.
- [3] B. Sudarmanta, "Dual Fuel Engine Performance Using Biodiesel and Syn-gas From Rice Husk Downdraft Gasification for Power Generation," in *International Seminar on Sustainable Biomass Production and Utilization: Challenges and Opportunities*. 2015.
- [4] U. Siregar, A. Lestari, L. Rusniarsyah, and C. Siregar, "Fuel Substitution By Wood Gasification For Diesel Electricity Generator," in *International Seminar on Sustainable Biomass Production and Utilization: Challenges and Opportunities*. 2020.
- [5] E. Sutherasak, W. Pirompugd, W. Ruengphrathuengsuka, and S. Sanitjai, "Use of producer gas from wood pellet on dual fuel for a diesel-engine generator," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 9, no. 10, pp. 1365--1370, 2020.
- [6] F. A. Ekabimaranto, "Karakteristik Unjuk Kerja Mesin Diesel Sistem Dual Fuel Biodiesel-Syngas Hasil Gasifikasi Pelet Municipal Solid Waste (MSW) dengan Variasi Mass Flow Rate Udara menggunakan Blower," Departemen Teknik Mesin: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [7] Y. J. R. da Costa, A. G. B. de Lima, C. R. Bezerra Filho, and L. de Araujo Lima, "Energetic and exergetic analyses of a dual-fuel diesel engine," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4651--4660, 2012.
- [8] E. Madadian, L. Amiri, and M. Lefsrud, "Thermodynamic analysis of wood pellet gasification in a downdraft reactor for advanced biofuel production," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, no. 7, pp. 3665--3676, 2020.