

Analisa Energi dan Eksergi Unjuk Kerja Mesin Diesel *Dual Fuel* Diesel-Syngas Hasil Gasifikasi *Woodchips* dengan Perubahan *Air Fuel Ratio* dan Beban Daya

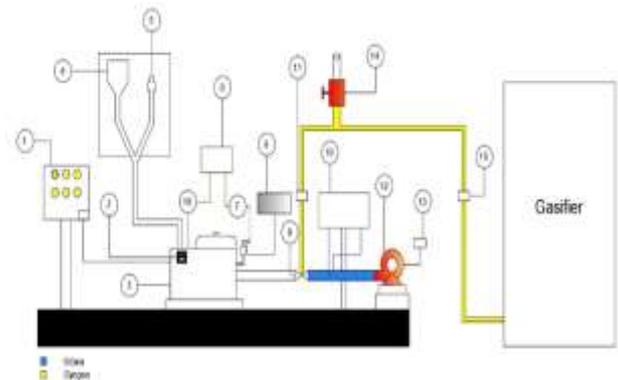
Alfisyahrin Ariwanto, dan Ary Bachtiar Krishna Putra
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: arybach@me.its.ac.id

Abstrak—Diesel *dual fuel* adalah mesin standar diesel yang ditambahkan bahan bakar lain pada *intake manifold* dan penyalaan bahan bakar dilakukan oleh semprotan solar yang disebut *pilot fuel*. Pada sistem *dual fuel* biasanya mengalami permasalahan pada berkurangnya rasio udara dan bahan bakar. Adanya pemasukan *syngas* mengakibatkan jumlah udara pembakaran berkurang. Hal ini menyebabkan nilai *AFR* menjadi rendah. Untuk mengetahui permasalahan pada karakteristik unjuk kerja mesin diesel *dual fuel* dibutuhkan sebuah analisa. Namun sejauh ini penelitian mesin diesel *dual fuel* hanya menggunakan analisa energi, sedangkan analisa energi tidak dapat menghitung *losses-losses* yang terjadi selama pengkonversian energi. Maka dari itu dibutuhkan analisa yang lebih lengkap yaitu dengan analisa eksergi. Penelitian ini akan dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan mesin diesel *generator set* dengan bantuan *blower* untuk menambahkan suplai udara pada *intake* lalu dihubungkan pada lampu pembebanan listrik. Pada penelitian ini akan dilakukan dua pengujian yaitu pengujian *single fuel* dan *dual fuel*. Pada pengujian *single fuel* menggunakan bahan bakar diesel, sedangkan pada diesel *dual fuel* dengan bahan bakar diesel-*syngas* woodchips dari kayu di sekitar kampus ITS. Mesin diesel ini dikopel dengan generator set dan diberi beban 6 Lampu dengan daya 500 W sampai 3000 W dengan interval kenaikan 500 W dan dilakukan variasi *AFR* 15, 17, 20, 22 dan 25. Penelitian ini mendapatkan hasil yaitu pada variasi *AFR* 15 menghasilkan unjuk kerja yang paling optimum. Penurunan laju konsumsi bahan bakar diesel dari 0,000220 kg/s menjadi 0,000160 kg/s. Pada efisiensi termal variasi *AFR* 15 memiliki efisiensi yang lebih besar dari variasi *AFR* yang lain akan tetapi masih dibawah efisiensi termal pada pengujian *single fuel*. Pada analisa eksergi, pengujian *dual fuel* memiliki nilai diatas *single fuel* pada total eksergi, eksergi destruksi dan eksergi *heat*. Hal ini terjadi karena substitusi diesel yang belum optimal karena laju *syngas* dijaga konstan. Terdapat juga penghematan diesel terbaik pada variasi *AFR* 15 yaitu dengan rata-rata penghematan sebesar 28%.

Kata Kunci—*AFR*, Diesel *Dual Fuel*, *Syngas*, Eksergi.

I. PENDAHULUAN

LISTRIK merupakan kebutuhan pokok manusia sekarang ini. Manusia membutuhkan listrik hampir dalam setiap aspek kehidupannya contohnya dalam transportasi, kegiatan sehari-hari, industri maupun rumah tangga. Sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan penduduk serta peningkatan target rasio elektrifikasi menjadi 100% pada tahun 2025, maka kebutuhan listrik ini diproyeksikan meningkat dengan pertumbuhan rata-rata sebesar 5,9% per tahun menjadi 1455 TWh pada tahun 2050. Pada saat ini batu bara dan bahan bakar minyak masih digunakan dalam pembangkit listrik. Yaitu sebesar 66% untuk batu bara, 5% untuk bahan bakar



Gambar 1. Skema instalasi peralatan.

Keterangan:

1. Lampu beban
2. Power meter display
3. Engine generator set
4. Gelas ukur
5. Tabung ukur
6. DAQ MX100 Yokogawa
7. Termokopel gas buang
8. Gas analyzer
9. Mixer
10. Manometer
11. Manometer
12. Blower
13. Dimmer
14. Katup syngas buang
15. Manometer
16. Termokopel blok engine

minyak dan 13 % gas. Adapun sisa sebesar 13% diisi oleh EBT. Pada aspek transportasi, manusia juga membutuhkan bahan bakar minyak untuk kendaraan bermotor. Diperkirakan jatah minyak bumi terus menurun namun kebutuhannya masih tinggi. Kondisi ini menambah ketergantungan impor energi karena pemenuhan kebutuhan bahan bakar minyak sebagian besar dari impor. Salah satu solusi terbaik untuk mengatasi keterbatasan bahan bakar minyak adalah dengan menyediakan bahan bakar dari sumber energi alternatif. Energi alternatif merupakan energi yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui dengan memanfaatkan hasil alam atau limbah yang mengandung biomassa. Energi biomassa kayu merupakan sumber energi dominan bagi masyarakat pedesaan. Lima puluh persen penduduk Indonesia masih menggunakan biomassa kayu yang dibakar langsung sebagai sumber energi dengan konsumsi sekitar 1,2 m³/orang/tahun.

Salah satu teknologi yang dapat diterapkan untuk penyediaan energi terbarukan dari biomassa adalah gasifikasi. Gasifikasi adalah proses pengkonversian bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO, CH₄, H₂) melalui

Tabel 1.
Parameter Eksperimen

Parameter Input		Parameter Output		
Konstan	Bervariasi	Diukur	Dihitung	
	AFR	Beban Listrik		
- LHV <i>syngas</i>	- AFR 15	- 500 W	- Waktu konsumsi diesel (10ml)	- Daya
	- AFR 17	- 1000 W	- ΔP udara	- Torsi
- LHV Bahan bakar diesel	- AFR 20	- 1500 W	- ΔP <i>syngas</i>	- Bmep
	- AFR 22	- 2000 W	- Temperatur gas buang dan blok mesin	- SFC
- Putaran mesin 3000 rpm	- AFR 25	- 2500 W	- Arus (A)	- Efisiensi termal
		- 3000W	- Tegangan (V)	- Diesel tersubstitusi
				- Efisiensi eksergi
				- Eksergi total
				- Eksergi destruksi
				- Eksergi <i>waste heat</i>

proses pembakaran dengan suplai udara terbatas. Reaktor tempat terjadinya proses gasifikasi disebut *gasifier*. Keuntungan dari proses gasifikasi adalah hasil pembakaran gas lebih bersih dan bahan baku biomassa yang mudah didapat. Selain itu, di antara berbagai jenis reaktor gasifikasi, tipe *downdraft* gasifier mampu menghasilkan gas yang lebih bersih (bebas tar) dan mudah dioperasikan [1]. *Syngas* yang dihasilkan dengan proses gasifikasi dapat diaplikasikan ke motor pembakaran dalam. Mesin yang menggunakan dua jenis bahan bakar yang berbeda wujudnya disebut sebagai *dual fuel*. *Syngas* yang digunakan akan menjadi bahan bakar utama sedangkan bahan bakar cair hanya digunakan untuk pengapian dari campuran bahan bakar dengan udara [2].

Diesel bahan bakar ganda atau Diesel Dual Fuel (DDF) adalah mesin standar diesel yang ditambahkan bahan bakar lain pada intake manifold dan penyalaan bahan bakar dilakukan oleh semprotan solar yang disebut *pilot fuel*. Pada internal combustion engine khususnya mesin diesel, penggunaan *syngas* tidak dapat diaplikasikan secara langsung. Karena prinsip kerja mesin diesel yaitu *compressed ignition engine (ICE)* atau penyalaan dengan tekanan yang membutuhkan bahan bakar yang memiliki kandungan cetane number. Sedangkan *syngas* tidak memiliki kandungan tersebut. Sehingga diperlukan bahan bakar pemantik yang disebut *pilot fuel*. *Pilot fuel* ini biasanya menggunakan bahan bakar solar tetapi pada penelitian ini akan diuji coba penggantian *pilot fuel* memakai bahan bakar biodiesel dengan tujuan mengurangi ketergantungan akan bahan bakar solar yang berasal dari minyak bumi [2].

Penelitian mengenai sistem *dual fuel syngas* hasil gasifikasi bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari mesin diesel *dual fuel* dengan bahan bakar biodiesel-*syngas municipal solid waste* dengan penambahan *blower* pada mesin diesel untuk menambah suplai udaramasuk pada ruang bakar [3]. Pada penelitian ini didapatkan bahwa penggunaan bahan bakar biodiesel dapat dikurangi dengan sistem *dual fuel* sebesar 49,91%.

Penelitian mengenai mesin diesel *dual fuel* menggunakan analisa energi dan eksergi bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari unjuk kerja mesin diesel *dual fuel* dengan bahan bakar diesel dan *natural gas* [4]. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa proses analisa eksergi dalam mesin diesel *dual fuel* menunjukkan performa yang lebih besar jika dibandingkan dengan analisa eksergi.

Penelitian mengenai karakteristik dari gasifikasi biomassa limbah kayu dengan variasi suhu dan reaktor dan ukuran partikel bertujuan untuk mengetahui karakteristik gasifikasi [5]. Didapatkan bahwa ukuran partikel yang lebih kecil

cenderung menghasilkan *yield gas* dengan kandungan tar dan arang lebih rendah, untuk suhu 600-800°C pengaruh perbedaan partikel terhadap *yield gas* signifikan, sedangkan pada suhu diatas 800°C *yield gas* relatif konstan.

Mesin diesel *dual fuel syngas* memiliki permasalahan pada berkurangnya rasio udara dan bahan bakar, penambahan *blower* pada intake dapat meningkatkan massa udara masuk sehingga penurunan AFR, akibat adanya penambahan *syngas* dapat dikurangi. Pada penelitian sejauh ini hanya sebatas menguraikan menggunakan analisa energi. Penambahan analisa eksergi dapat memberikan informasi lebih lengkap dibandingkan dengan analisa energi karena dapat mengetahui *losses-losses* yang terjadi saat pengkonversian energi. Maka dari itu, akan dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan analisa energi dan analisa eksergi pada diesel *dual fuel syngas* hasil gasifikasi *woodchips* dan bahan bakar diesel dengan menggunakan variasi AFR dan beban daya. Diharapkan dengan dilakukannya perubahan *air fuel ratio* dapat menambah unjuk kerja dari mesin *dual fuel* serta akan dilakukan terhadap perubahan daya. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui unjuk kerja mesin diesel dengan menggunakan analisa energi dan eksergi serta mengetahui jumlah pengurangan konsumsi bahan bakar diesel terhadap penggunaan *syngas* hasil gasifikasi *woodchips*.

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini terdapat parameter yang akan diperoleh dengan parameter *output* dan *input* yang dinyatakan dalam Tabel 1. Pada penelitian menggunakan komposisi *syngas* hasil dari penelitian yang dilakukan Ardiano [6]. Hal ini dilakukan karena beberapa parameter yaitu kesamaan biomassa yang digunakan, dan menggunakan *gasifier* tipe *downdraft*. Komposisi *syngas* ditunjukkan pada Tabel 2.

A. Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1) Mesin Diesel Generator Set

Mesin diesel yang digunakan untuk pengujian sistem *dual fuel* diesel dan *syngas* hasil gasifikasi *woodchips* adalah mesin diesel generator set SUPRA XTD7700.

2) Beban Listrik

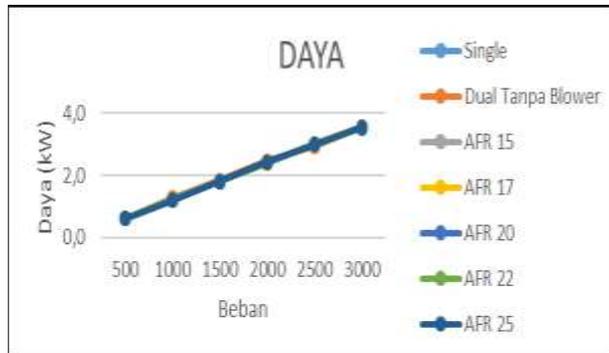
Beban terdiri dari lampu pijar sebanyak 6 buah dengan konsumsi daya masing-masing lampu 500 watt.

3) Bahan Bakar Syngas Hasil Gasifikasi Woodchips

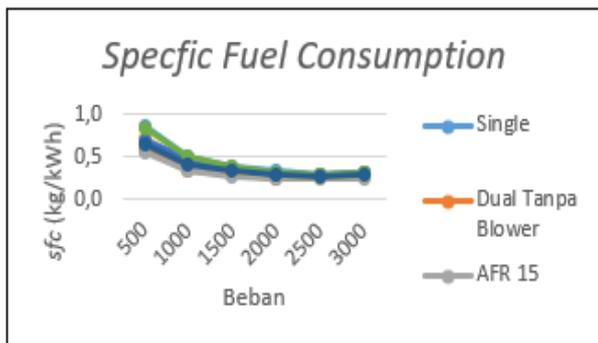
Bahan bakar *syngas* yang digunakan adalah *syngas* hasil gasifikasi *woodchips* dari *gasifier downdraft*. *Woodchips*

Tabel 2.
Komposisi Syngas

Komposisi	Persentase	Massa jenis syngas (kg/m ³) (329 K)	LHV
N ₂	43,728	1,02	
CO	17,01	1,01	12633
H ₂	4,79	0,0729	10783
CH ₄	4,9	0,528	35883
CO ₂	13,261	1,598	
O ₂	16,226	1,158	



Gambar 2. Grafik daya terhadap pembebanan.



Gambar 3. Grafik SFC diesel terhadap pembebanan.

yang digunakan merupakan kayu yang berasal dari kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

4) *Bahan Bakar Diesel*

Bahan bakar diesel yang digunakan yaitu Dexlite. Dexlite memiliki angka setana sebesar 51, dengan kandungan sulfur maksimal 1200 ppm.

5) *Mixer*

Alat ini digunakan untuk mencampur dan memasukkan syngas woodchips ke dalam saluran intake. Pemasukan syngas dengan sistem dual fuel yaitu menggunakan mixer. Mixer yaitu tempat udara dan syngas dicampur sebelum masuk ke dalam ruang bakar.

6) *Blower*

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

7) *Stopwatch*

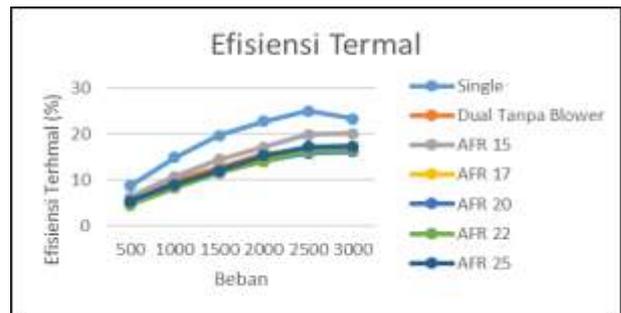
Alat ini digunakan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan mesin diesel untuk mengkonsumsi bahan bakar diesel.

8) *Gelas Ukur*

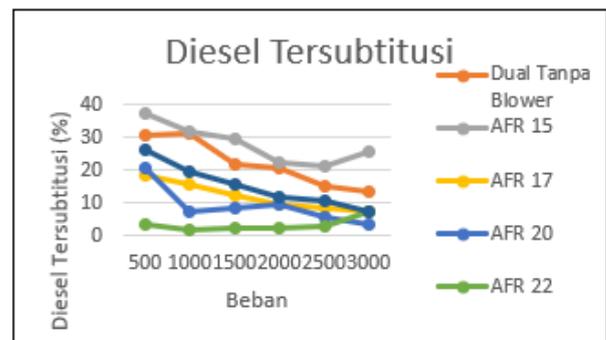
Alat ini digunakan untuk mengukur jumlah bahan bakar diesel yang dikonsumsi oleh mesin diesel.



Gambar 4. Grafik laju konsumsi bahan bakar diesel terhadap pembebanan.



Gambar 5. Grafik efisiensi termal terhadap pembebanan.



Gambar 6. Grafik diesel tersubstitusi terhadap pembebanan.

9) *Pitot Static Tube dan Manometer Digital*

Alat ini digunakan untuk mengukur jumlah udara pada pembakaran mesin diesel. Pitot tube with static wall pressure tap dihubungkan dengan inclined manometer untuk mengetahui besarnya perbedaan ketinggian cairan pada manometer.

10) *Dimmer*

Alat untuk mengatur kecepatan udara dengan mengatur kecepatan blower.

11) *Termokopel*

Alat untuk mengukur temperatur. Alat ini digunakan untuk mengukur temperatur oli, mesin dan radiator. Data temperatur yang didapat akan disimpan pada data logger.

12) *Power Meter Display*

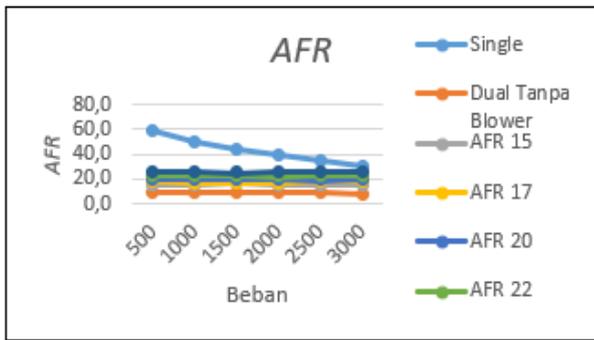
Alat ini digunakan untuk mengamati tegangan dan arus listrik yang mengalir ke pembebanan lampu.

13) *Gas Analyzer*

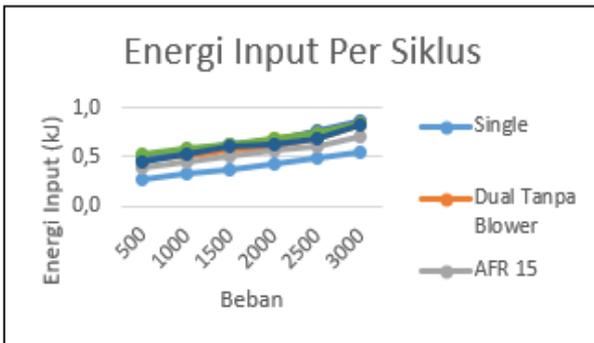
Alat ini digunakan untuk menguji dan mendeteksi emisi gas buang dari mesin diesel sebagai produk pembakaran.

14) *DAQ MX 100 YOKOGAWA*

Alat ini digunakan untuk membaca hasil pengukuran dari termokopel yang sudah terpasang.



Gambar 7. Grafik AFR terhadap pembebanan.



Gambar 8. Grafik energi input per siklus.

B. Metode Pengukuran

Skema alat yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Pemvariasian AFR dilakukan dengan cara merubah laju aliran massa udar menggunakan *dimmer* pada *blower*. Lalu laju aliran *syngas* dibatasi dengan cara mengatur katup buang *syngas* apabila laju aliran *syngas* meningkat. Pencampuran *syngas* dilakukan dengan menggunakan *mixer* yang diletakkan sebelum saluran masuk udara pada mesin diesel. Termokopel tipe K akan diletakkan pada dua tempat yaitu pada gas buang dan blok mesin serta pada gas buang akan diletakkan juga *probe gas analyzer*. Ketika AFR yang sudah diinginkan tercapai maka beban lampu akan dimulai pada 500 Watt, lalu dilakukan pengukuran konsumsi bahan bakar diesel sebanyak 10 ml. Hasil pengukuran yang didapatkan antara lain beda tekanan udara, beda tekanan *syngas*, arus, tegangan, temperatur gas buang dan blok mesin serta komposisi gas buang mesin diesel. Hasil perhitungan ini kemudian digunakan untuk mengetahui unjuk kera mesin diesel.

C. Perhitungan Unjuk Kerja Mesin Diesel Dual Fuel

Pada penelitian ini, perhitungan daya didapatkan dengan pengukuran tegangan dan arus yang terbaca pada *power meter display* dan dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos \varphi}{\eta_{gen} \times \eta_{trans}} \tag{1}$$

V merupakan tegangan, I adalah arus listrik, η_{gen} merupakan efisiensi generator, η_{trans} adalah efisiensi transmisi, $\cos\varphi$ merupakan faktor daya listrik.

Untuk perhitungan SFC menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$SFC = \frac{3600 \times \dot{m}_{\text{bahan bakar}}}{Ne} \tag{2}$$

$\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$ merupakan laju aliran massa bahan bakar yang terukur.

Untuk menghitung diesel yang tersubstitusi oleh syngas menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Diesel tersubstitusi} = \frac{\dot{m}_{\text{diesel single}} - \dot{m}_{\text{diesel dual}}}{\dot{m}_{\text{diesel single}}} \tag{3}$$

$\dot{m}_{\text{diesel dual}}$ merupakan laju aliran massa bahan bakar diesel pada sistem *dual fuel*.

Untuk perhitunga nilai *air fuel ratio* menggunakan persmaan sebagai berikut:

$$\text{Diesel tersubstitusi} = \frac{\dot{m}_{\text{udara}}}{\dot{m}_{\text{diesel single}} + \dot{m}_{\text{syngas}}} \tag{4}$$

\dot{m}_{udara} merupakan laju aliran massa udara yang tersuplai pada *intake*.

Nilai Efisiensi termal dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{th} = \frac{Ne}{\sum(\dot{m} \times LHV)_{\text{bahan bakar}}} \times 100\% \tag{5}$$

LHV bahan bakar adalah nilai kalor bawah dari masing-masing bahan bakar.

Nilai energi iniput per siklus dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Energi input per siklus} = (t \times \dot{m}_{\text{diesel dual}} \times LHV_{\text{diesel}}) + (t \times \dot{m}_{\text{syngas}} \times LHV_{\text{diesel}}) \tag{6}$$

t merupakan waktu yang dibutuhkan piston untuk mencapai sañtu siklus.

Untuk perhitungan eksergi *chemical* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{X}_{chem} = \dot{n}_p \sum_{i=1}^i y_i \bar{x}_i + \dot{n}_{H_2O} \bar{x}_{H_2O}^{chem} \tag{7}$$

y_i merupakan persentase dari masing-masing komposisi gas buang. \bar{x}_i merupakan nilai standard eksergi *chemical* pada masing-masing komposisi gas buang. \dot{n} merupakan laju alir mol dari gas buang.

Untuk perhitungan eksergi *physical* dapat menggunakan persmaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{physic} = \dot{n}_p \sum_{k=1}^j y_k M_k [(h_k - h_{k0}) - T_0(s_k - s_{k0})] \\ + [\dot{n}_{H_2O} (h_{H_2O} - h_{H_2O_0}) - T_0(s_{H_2O} - s_{H_2O_0})] \end{aligned} \tag{8}$$

T_0 merupakan suhu referensi lingkungan. h dan s merupakan entalpi dan entropi dari masing-masing komposisi gas buang.

Nilai dari eksergi gas buang dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{X}_{gas} = \dot{X}_{physic} + \dot{X}_{chem} \tag{9}$$

Nilai dari yang masuk kedalam ruang bakar dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{X}_{enters} = \dot{n}_d \left(\sum_{i=1}^i y_i \bar{x}_i \right)_d + \dot{n}_g \left(\sum_{j=1}^j y_j \bar{x}_j \right)_g \tag{10}$$

Untuk nilai eksergi *waste heat* dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{X}_{heat} = \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \dot{Q} \tag{11}$$

T_m merupakan temperatur yang dihasilkan pada gas buang. Q merupakan nilai kalor yang masuk pada ruang bakar.

Eksergi destruksi dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{X}_{\text{destroyed}} = \dot{X}_{\text{enters}} - \dot{X}_{\text{gas}} - \dot{X}_{\text{work}} - \dot{X}_{\text{heat}} \quad (12)$$

X_{work} merupakan kerja yang dihasilkan oleh mesin diesel. dalam penelitian ini yaitu daya yang terbaca pada *power meter display*.

Untuk menghitung efisiensi eksergi pada mesin diesel dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{\dot{X}_{\text{work}}}{\dot{X}_{\text{enters}}} \quad (13)$$

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Grafik dengan Prinsip Energi

Pada sub bab ini akan menampilkan dan menjelaskan tentang grafik hasil dari pengujian beserta analisisnya. Grafik digambarkan dalam bentuk fungsi pembebanan listrik dari 500 watt hingga 3000 watt. Terdapat 5 variasi rasio udara-bahan bakar yang digunakan yang masing-masing variasi digambarkan dengan garis yang berbeda. Variasi rasio udara-bahan bakar yaitu 15, 17, 20, 22, dan 25. Selain itu juga terdapat pengujian *single fuel* yang akan digambarkan pada garis *single fuel*.

1) Grafik Daya Terhadap Pembebanan

Daya merupakan hasil usaha mesin persatuan waktu yang dinyatakan dalam watt atau kilowatt. Gambar 2 merupakan grafik daya terhadap pembebanan untuk *dual fuel*. Pada diesel generator set bekerja dan menghasilkan tegangan listrik. Pada saat bekerja diesel generator set harus menjaga putarannya pada 3000 rpm untuk mendapatkan tegangan listrik yang konstan. Akan tetapi seiring dengan bertambahnya beban maka akan menyebabkan putaran generator menurun. Putaran pada generator dijaga dengan cara mengontrol jumlah bahan bakar diesel yang diinjeksikan pada ruang bakar. Maka dari itu untuk menjaga putaran generator tetap konstan jumlah bahan bakar diesel yang diinjeksikan semakin banyak seiring dengan penambahan beban.

Pada sistem *dual fuel*, untuk mendapatkan putaran generator yang konstan pada 3000 rpm jumlah bahan bakar diesel yang diinjeksikan ke ruang bakar akan diatur oleh *governor* mesin.

Sehingga analisa yang didapatkan yaitu seiring bertambahnya beban maka akan membutuhkan daya yang lebih besar juga yang akan diberikan dengan cara menambahkan bahan bakar diesel yang diinjeksikan ke ruang bakar. Semakin banyak bahan bakar yang terbakar maka semakin banyak energi yang dihasilkan, dari energi kimia ke energi panas dan mekanik. Semakin banyak energi yang dihasilkan maka semakin besar daya yang dihasilkan *engine* sesuai dengan kebutuhan untuk mengatasi beban yang diberikan. Nilai tegangan (V), \cos , η_{gens} , $\eta_{\text{transmisi}}$ bernilai konstan maka besarnya nilai N_e berbanding lurus dengan nilai arus listrik (I). Maka dari itu dapat dikatakan bahwa semakin bertambahnya beban yang diberikan, menyebabkan tingginya arus listrik yang dihasilkan.

2) Grafik Specific Fuel Consumption Diesel Terhadap Pembebanan

Dapat dilihat dari Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin tinggi pembebanan maka akan semakin menurun nilai *sfc*nya. Pada grafik dapat dilihat bahwa pengujian *single fuel* memiliki nilai *sfc* yang lebih tinggi *dual fuel*. Hal ini disebabkan oleh *syngas* yang mensubstitusi bahan bakar diesel. Laju aliran bahan bakar diesel akan menurun dan mengakibatkan nilai *sfc* akan semakin rendah pada pembebanan yang sama. Pada Gambar 3 didapatkan untuk nilai *sfc* terendah pada pengujian *dual fuel* dengan variasi AFR yaitu 15.

3) Grafik Laju Aliran Bahan Bakar Diesel Terhadap Pembebanan

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa laju aliran massa bahan bakar diesel meningkat seiring dengan bertambahnya pembebanan yang diberikan. Hal ini terjadi karena saat beban dinaikkan maka putaran mesin diesel generator akan berkurang, agar putaran menjadi konstan 3000 rpm maka *governor* akan menyuplai bahan bakar diesel lebih banyak. Pada Gambar 4 juga terlihat bahwa pada satu titik pembebanan yang sama, pengujian *dual fuel* mendapatkan nilai lebih rendah dibanding dengan pengujian pada *single fuel*. Hal ini terjadi karena *syngas* mensubstitusi bahan bakar diesel dan mengakibatkan laju aliran massa bahan bakar diesel akan menurun. Pada grafik pada Gambar 4 didapatkan nilai terendah untuk laju aliran massa bahan bakar diesel yaitu pada pemvariasian AFR 15.

4) Grafik Efisiensi Termal Terhadap Pembebanan

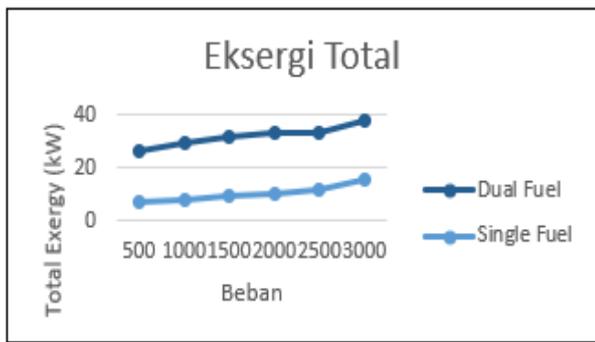
Efisiensi termal merupakan ukuran yang menunjukkan unjuk kerja alat tersebut yang menunjukkan unjuk kerja alat tersebut seperti yang ditunjukkan Gambar 5.

Saat dalam keadaan *dual fuel*, laju aliran *syngas* dijaga konstan pada setiap pembebanannya. Seiring dengan penambahan beban maka laju aliran bahan bakar diesel juga akan meingkat, tetapi rasio penambahan beban lebih besar dibandingkan dengan laju aliran bahan bakar diesel. sehingga menyebabkan nilai efisiensi termal naik pada setiap pembebanannya. Grafik menunjukkan pada kondisi *single fuel* dan *dual fuel* saat pembebanan 2500 watt hingga 3000 watt akan mencapai titik maksimum kemudian akan konstan dikarenakan pada pembebanan tinggi jumlah energi input yang masuk ke ruang bakar sudah terlalu banyak atau campuran bahan bakar menjadi kaya.

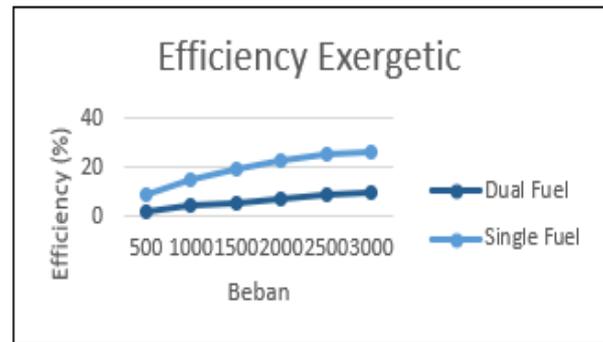
Dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 5 didapatkan efisiensi termal terbaik untuk sistem *dual fuel* yaitu pada variasi *af* 15. Pada pengujian *dual fuel* pembakaran terjadi secara tidak optimal yang artinya penyalaan dari *syngas* itu sendiri terlambat. Hal ini terjadi karena mutu atau kualitas dari *syngas woodchips*, karena *woodchips* yang digunakan berasal dari berbagai jenis kayu tidak hanya satu jenis kayu. Hal ini dapat mengakibatkan penyalaan *syngas* yang terlambat dan energi pada *syngas* sebagian besar tidak memberi kontribusi pada energi mekanik.

5) Grafik Diesel Tersubstitusi Terhadap Pembebanan

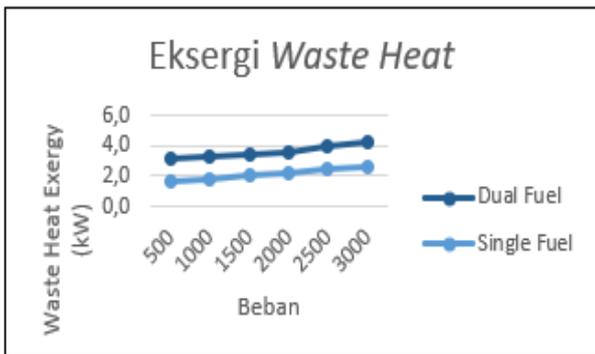
Pada Gambar 6 dapat dilihat tren garis yang menurun seiring dengan penambahan beban. Hal ini disebabkan oleh semakin tinggi beban yang diberikan pada diesel generator



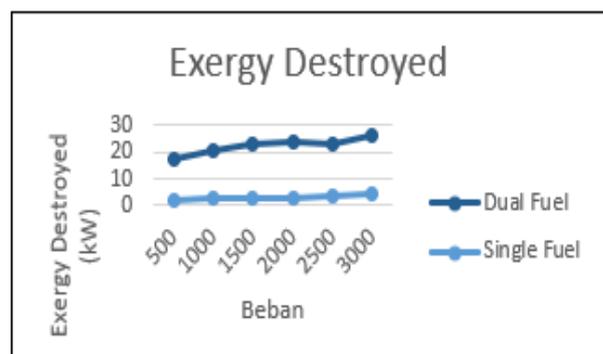
Gambar 9. Grafik eksergi total terhadap pembebanan.



Gambar 11. Grafik efisiensi eksergi terhadap pembebanan.



Gambar 10. Grafik eksergi waste heat terhadap pembebanan.



Gambar 12. Grafik eksergi destruksi terhadap pembebanan.

maka akan meningkatkan bahan bakar diesel yang terinjeksi ke dalam ruang bakar. Maka dari itu diesel yang tersubstitusi oleh *syngas* akan menurun seiring peningkatan beban. Dapat dilihat pada grafik didapatkan untuk diesel tersubstitusi terbaik pada variasi *afr* 15. *Afr* 15 berada pada campuran miskin maka dari itu bahan bakar diesel pada konsumsi bahan bakar yang paling rendah. Akan tetapi untuk pemvariasian AFR yang lain memiliki persentase diesel tersubstitusi yang lebih rendah. Hal ini dapat terjadi karena *syngas* belum optimal mensubstitusi bahan bakar diesel sedangkan laju aliran *syngas* harus dijaga konstan.

6) Grafik AFR Terhadap Pembebanan

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa penambahan *syngas* dapat menurunkan nilai AFR. Pada pengujian *single fuel* memiliki nilai AFR pada pembebanan rendah yaitu 59 hingga pembebanan tinggi menurun sampai 30. Sedangkan pada pengujian *dual fuel* terjadi penurunan AFR hingga menjadi 8. Pada pengujian *dual fuel* udara yang masuk sebagian akan tersubstitusi dengan *syngas* sehingga membuat bahan bakar menjadi lebih banyak sedangkan udara yang masuk menjadi lebih sedikit sedangkan *syngas* itu sendiri juga membutuhkan udara untuk pembakarannya hal inilah yang membuat nilai AFR pada sistem *dual fuel* menurun. berdasarkan perhitungan kebutuhan udara stoikiometri dari *syngas* didapatkan bahwa untuk proses pembakaran sempurna *syngas* membutuhkan AFR sebesar 8. Hal inilah yang mengakibatkan nilai AFR pada pengujian *dual fuel* menurun.

Pada penelitian ini digunakan variasi AFR, penjagaan AFR dilakukan dengan mengubah laju aliran pada *blower* serta melakukan penjagaan nilai laju aliran *syngas*. Dengan melakukan perubahan laju aliran udara dan laju aliran *syngas* mengakibatkan substitusi *syngas* terhadap bahan bakar diesel menjadi kurang optimal.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Fandi A., penambahan laju aliran udara akan meningkatkan laju aliran

syngas yang masuk pada ruang bakar dan menyebabkan substitusi dari *syngas* terhadap bahan bakar diesel akan lebih banyak [3]. Sedangkan pada penelitian ini dilakukan penjagaan AFR dengan cara perubahan laju aliran udara dan penjagaan nilai laju aliran *syngas*. Hal ini menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi rendahnya nilai unjuk kerja mesin diesel pada sistem *dual fuel*.

7) Grafik Energi Input Per Siklus Terhadap Pembebanan

Energi input per siklus merupakan energi yang dibutuhkan dalam setiap siklus kerja motor pembakaran dalam. Dapat dilihat pada Gambar 8 bahwa nilai energi input akan meningkat seiring dengan penambahan beban. Hal ini terjadi karena peningkatan beban akan mengakibatkan turunnya putaran mesin, maka dari itu untuk menjaga putaran pada mesin tetap konstan pada 3000 rpm membutuhkan energi yang lebih besar juga. Untuk menghasilkan energi input yang lebih besar maka bahan bakar diesel yang terinjeksikan pada ruang bakar akan semakin banyak

Dapat dilihat juga bahwa nilai energi input per siklus pada sistem *dual fuel* memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengujian *single fuel*. Pada setiap daya yang sama dengan adanya penambahan *syngas* menyebabkan proses pencampuran bahan bakar menjadi lebih kaya sehingga setiap siklus yang sama kebutuhan energi yang digunakan untuk proses pembakaran menjadi lebih baik untuk pembebanan yang sama pada setiap siklusnya.

B. Analisis Grafik Dengan Prinsip Eksergi

Pada sub bab ini akan menampilkan dan menjelaskan tentang grafik hasil dari pengujian beserta analisa menggunakan prinsip eksergi. Grafik digambarkan dalam bentuk fungsi pembebanan listrik dari 500 watt hingga 3000 watt. Terdapat 2 variasi yaitu pada saat kondisi *single fuel* dan pada saat *dual fuel*. Pada saat *dual fuel* menggunakan variasi

afr 15. Grafik digambarkan dalam garis, untuk single akan mewakili single fuel dan untuk dual mewakili *dual fuel*.

1) Grafik Eksergi Total Terhadap Pembebanan

Eksergi total merupakan seluruh eksergi yang dapat dimanfaatkan menjadi kerja dengan kata lain eksergi total merupakan eksergi input. Dalam penelitian ini menggunakan input yaitu bahan bakar diesel dan *syngas*. Maka dari itu eksergi total pada penelitian ini yaitu seluruh eksergi dari bahan bakar diesel dan bahan bakar *syngas*. Sedangkan bahan bakar diesel dan *syngas* berada pada keadaan suhu ruangan, maka dari itu hanya eksergi kimia dari kedua bahan bakar tersebut yang menjadi inputnya. Didapatkan juga grafik untuk total eksergi terhadap pembebanan yang ditunjukkan Gambar 9.

Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa seiring meningkatnya pembebanan maka nilai dari total eksergi akan semakin tinggi. Saat pembebanan meningkat maka bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar akan semakin bertambah. Semakin tinggi laju aliran bahan bakar diesel maka akan meningkatkan total eksergi dari bahan bakar inputnya. Dapat dilihat juga pada grafik bahwa untuk pengujian *dual fuel* memiliki total eksergi yang lebih tinggi dibanding dengan pengujian *single fuel*. Penambahan *syngas* yaitu bahan bakar kedua dapat meningkatkan total eksergi pada mesin tersebut. Dengan kata lain pengujian *dual fuel* memiliki potensi menghasilkan kerja yang lebih tinggi dibanding dengan pengujian *single fuel*.

2) Grafik Eksergi Waste Heat Terhadap Pembebanan

Hasil dari pembakaran selain energi mekanik yaitu panas. *Waste heat* eksergi merupakan panas yang terbuang ke lingkungan saat temperatur kerja. Semakin tinggi temperatur yang dilepaskan ke lingkungan saat mesin bekerja akan meningkatkan panas yang terbuang. Dan semakin rendah temperatur yang dilepaskan ke lingkungan akan mengurangi panas yang terbuang.

Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa seiring meningkatnya pembebanan maka nilai dari eksergi *waste heat* akan meningkat juga. Saat pembebanan meningkat maka laju aliran bahan bakar akan meningkat. Semakin banyak bahan bakar yang terbakar akan membuat temperatur yang dilepaskan ke lingkungan akan semakin banyak. Semakin tinggi temperatur yang dilepaskan ke lingkungan maka panas yang terbuang akan semakin tinggi. Dapat dilihat juga bahwa pada pengujian *dual fuel* mendapatkan nilai eksergi *waste heat* yang lebih tinggi dibanding dengan pengujian *single fuel*. Hal ini disebabkan oleh penambahan *syngas* dapat menambah jumlah panas yang dapat dihasilkan dalam ruang bakar.

3) Grafik Efisiensi Eksergi Terhadap Pembebanan

Efisiensi eksergi merupakan perbandingan antara bahan bakar yang digunakan dengan energi yang dibangkitkan, dengan kata lain *output* berbanding dengan *input*. Dalam pengujian ini bahan bakar yang digunakan yaitu bahan bakar diesel dan *syngas* sedangkan untuk keluarannya yaitu dalam bentuk daya untuk membangkitkan listrik. Untuk membangkitkan daya listrik bahan bakar yang terbakar pada ruang bakar akan terkonversi menjadi energi mekanik. Energi mekanik inilah yang menggerakkan generator dan membangkitkan listrik. Akan tetapi tidak semua bahan bakar yang terbakar akan menjadi energi mekanik dan

menghasilkan daya. Maka dari itu dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan Gambar 11.

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa seiring meningkatnya pembebanan maka efisiensi eksergi akan meningkat. Semakin tinggi pembebanan maka pembakaran bahan bakar akan semakin optimal dan menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi. Akan tetapi pada beban 2500 watt hingga 3000 watt grafik cenderung konstan, hal ini disebabkan bahan bakar yang diinjeksikan meningkat untuk mempertahankan putaran pada mesin yaitu 3000 rpm. Dapat dilihat juga untuk pengujian *single fuel* memiliki nilai efisiensi eksergi yang lebih tinggi dibanding dengan pengujian *dual fuel*. Hal ini dikarenakan penambahan *syngas* mengakibatkan eksergi *enters* yang tinggi sedangkan daya listrik yang dihasilkan tidak jauh berbeda dengan pengujian *single*.

4) Grafik Eksergi Destruks Terhadap Pembebanan

Eksergi destruksi merupakan eksergi yang terbuang atau tidak termanfaatkan. Eksergi destruksi dapat terjadi saat pencampuran bahan bakar, ataupun panas yang hilang ke lingkungan. Saat eksergi destruksi tidak memiliki nilai atau 0, maka pemanfaatan bahan bakar tersebut optimal dan menjadi energi yang termanfaatkan. Eksergi destruksi ditunjukkan dalam Gambar 12.

Dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 12 bahwa seiring meningkatnya pembebanan maka eksergi destruksinya semakin tinggi. Hal ini disebabkan meningkatnya beban akan meningkatkan laju aliran bahan bakar diesel. semakin tinggi laju aliran diesel maka eksergi inputnya akan semakin besar sedangkan untuk mesin diesel generator mengatasi beban yang diberikan sudah cukup maka dari itu membuat eksergi destruksinya meningkat. Dapat dilihat bahwa pada pengujian *dual fuel* memiliki eksergi destruksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengujian pada *single fuel*. Hal ini terjadi karena penambahan *syngas* menyebabkan eksergi input yang besar sedangkan *syngas* belum mensubstitusi bahan bakar diesel dengan optimal dan menghasilkan kerja untuk mengatasi beban yang diberikan tidak jauh berbeda dengan yang ada pada pengujian *single fuel*.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian dan pengujian mesin diesel dual fuel dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut : (1) Penambahan *afr* pada mesin *diesel dual fuel* memberikan pengaruh yang cukup terhadap unjuk kerja mesin diesel dual fuel . Pada variasi AFR 15 menunjukkan hasil kerja yang maksimum untuk beberapa parameter berikut : (a) Terdapat penurunan laju konsumsi bahan bakar diesel yang tersubstitusi oleh *syngas* yaitu sebesar 0,000160 kg/s dibanding dengan saat *single fuel* yaitu 0,000220 kg/s. (b) Penurunan laju konsumsi bahan bakar diesel menyebabkan turunnya *sfc* sehingga mendapatkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan pengujian *single fuel*. (c) Pada variasi AFR 15 memiliki efisiensi termal diatas variasi AFR lainnya yaitu dengan rata-rata efisiensi termal 14,771%, akan tetapi efisiensi termal tersebut masih berada dibawa efisiensi termal saat pengujian *single fuel*. (d) Temperatur mesin dan temperatur gas buang pada variasi AFR 15 memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengujian *single fuel*, hal ini menandakan bahwa masih banyak energi panas yang terbuang. (2) Pada dual fuel memiliki total eksergi, eksergi

destruksi dan eksergi heat yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengujian single fuel. Akan tetapi memiliki efisiensi eksergi yang lebih rendah dibanding dengan pengujian single fuel. Hal ini terjadi karena syngas belum optimal mensubstitusi diesel. hal ini terjadi karena laju aliran syngas dijaga konstan selama pengujian. (3) Terdapat nilai diesel yang tersubstitusi oleh bahan bakar syngas terbesar pada AFR 15 dengan rata-rata diesel tersubstitusi yaitu 28%

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Antolini, S. S. Ail, F. Patuzzi, M. Grigiante, and M. Baratieri, "Experimental investigations of air-CO₂ biomass gasification in reversed downdraft gasifier," *Fuel*, vol. 253, pp. 1473–1481, 2019.
- [2] A. H. Alim, "Karakterisasi Unjuk Kerja Sistem Dual-Fuel (Syngas Hasil Gasifikasi RDF Dan Bensin) Pada Generator Set Motor Bensin Honda EC 2900 L Dengan Variasi AFR," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2020.
- [3] F. A. Ekabimaranto, "Karakterisasi unjuk Kerja Mesin Diesel Sistem Dual Fuel Biodiesel-Syngas Hasil Gasifikasi Pellet Municipal Solid Waste (MSW) dengan Variasi Mass Flow Rate Udara Menggunakan Blower," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [4] 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.
- [5] B. Sudarmanta, D. Sungkono, S. Darsopuspito, and I. Kadarisman, "Pengaruh suhu reaktor gasifier dan ukuran partikel terhadap karakterisasi gasifikasi biomassa limbah kayu pada reaktor gasifier tipe downdraft," *Jur. Tek. Mesin ITS, Surabaya, Indones.*, 2011.
- [6] F. Ardianto, "Karakterisasi gasifikasi biomassa serpihan kayu pada reaktor downdraft sistem batch dengan variasi air fuel ratio (AFR) dan ukuran biomassa," *Tek. Mesin. ITS Nop. Surabaya*, 2011.