

Pengaruh Penambahan Syngas Hasil Gasifikasi Pelet Kayu terhadap Unjuk Kerja Mesin Diesel *Dual Fuel*

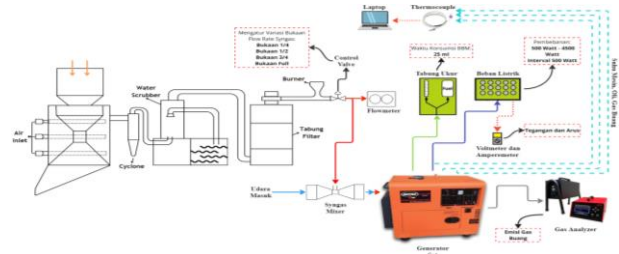
Hafidh Fajar Adani dan Bambang Sudarmanta
 Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: sudarmanta@me.its.ac.id

Abstrak—Kebutuhan energi di Indonesia semakin meningkat, sementara pasokan energi yang tersedia semakin terbatas. Kondisi ini mendorong penggunaan energi alternatif. Salah satu energi alternatif yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan adalah biomassa kayu. Biomassa kemudian diolah melalui proses gasifikasi yang menghasilkan *syngas*. *Syngas* dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar diesel sistem *dual fuel*. Oleh karena itu, pada penelitian ini terdapat penambahan *syngas* hasil gasifikasi pelet kayu pada mesin diesel. Tujuan utama untuk mengkarakterisasi unjuk kerja mesin diesel dan mendapatkan substitusi *syngas* yang maksimal pada sistem *dual fuel*. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan mesin diesel pada putaran mesin konstan 3000 rpm dengan variasi bukaan *valve syngas* dan pembebanan dari 500 watt hingga 4500 watt dengan interval kenaikan 500 watt. Sistem pemasukkan *syngas* menggunakan *mixer* secara langsung dari reaktor. *Valve syngas* dilakukan variasi bukaan 1/4, 1/2, 3/4, dan bukaan penuh. Pengukuran dilakukan terhadap arus dan tegangan listrik tiap pembebanan, waktu konsumsi biodiesel 25 ml, opasitas emisi gas buang, serta temperatur operasi: oli, mesin, dan gas buang. Hasil penelitian didapat pada variasi bukaan penuh menghasilkan unjuk kerja yang paling optimal. Penurunan *specific fuel consumption* (SFC) biodiesel sebesar 26,25% dari 0,240 kg/kWh menjadi 0,177 kg/kWh. Nilai efisiensi termal mengalami penurunan sebesar 0,6% dari kondisi *single fuel*. Nilai AFR terendah pada kondisi *dual fuel*, angka ini menurun sebesar 73% dari kondisi *single fuel*. AFR yang tidak ideal juga memberikan dampak terhadap temperatur operasi, temperatur mesin tertinggi 62°C meningkat 7,4%, temperatur oli tertinggi 112°C meningkat 9,6%, dan temperatur gas buang tertinggi 221°C meningkat 18,5% dibandingkan dengan kondisi *single fuel*. Nilai opasitas emisi didapat penurunan sebesar 36,1% dari 1,55 m⁻¹ menjadi 0,99 m⁻¹. Penambahan *syngas* dapat mensubstitusi biodiesel terbaik hingga 28,6%.

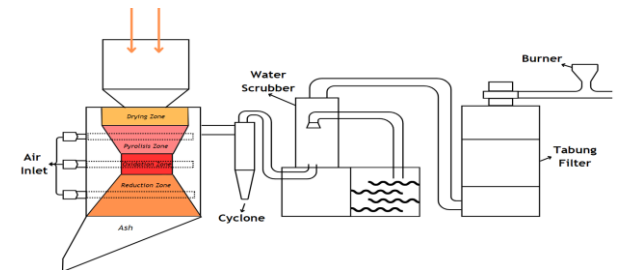
Kata Kunci—Biomassa, Pelet Kayu, Gasifikasi, *Syngas*, Diesel *Dual Fuel*.

I. PENDAHULUAN

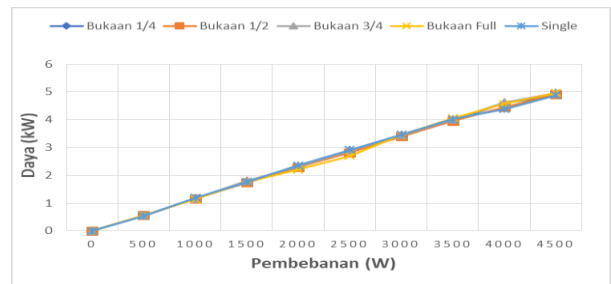
ENERGI merupakan elemen vital bagi kehidupan manusia di seluruh belahan dunia, termasuk di Indonesia. Hampir semua aktivitas manusia tidak dapat berjalan tanpa adanya energi, seperti kebutuhan rumah tangga, industri, penerangan, transportasi, dan pendidikan. Energi dapat memberikan banyak manfaat terhadap kehidupan manusia, seperti mendukung pertumbuhan ekonomi, meningkatkan taraf hidup, mempermudah akses kesehatan, dan meningkatkan kenyamanan. Konsumsi energi di Indonesia dari tahun ke tahun semakin meningkat, dibuktikan dengan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mencatat total konsumsi energi di Indonesia mencapai 1,18 miliar barel pada tahun 2022. Jumlah ini mengalami kenaikan



Gambar 1. Skema penelitian.



Gambar 2. Skema instalasi proses gasifikasi.



Gambar 3. Grafik daya fungsi beban.

sebesar 28,31% dibandingkan tahun sebelumnya sebesar 924,2 juta. Hal ini dapat disebabkan adanya perkembangan zaman, pertumbuhan ekonomi, perkantoran, jumlah pabrik, dan pertambahan jumlah penduduk yang semakin banyak, sementara pasokan energi yang tersedia semakin terbatas. Cadangan minyak Indonesia menurun, pada tahun 2021 tercatat sebanyak 3,95 miliar barel. Salah satu faktor yang menyebabkan keterbatasan adalah tingginya tingkat ketergantungan terhadap minyak bumi [1]. Selain dari ketersediaan yang terbatas, energi fosil dalam penggunaannya dapat menimbulkan isu pencemaran lingkungan dan pemanasan global. Oleh sebab itu dari permasalahan-permasalahan yang terjadi dibutuhkan adanya pengembangan terhadap energi terbarukan dan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan sebagai upaya untuk mendorong pengurangan konsumsi energi fosil. Salah satu energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan di Indonesia adalah biomassa.

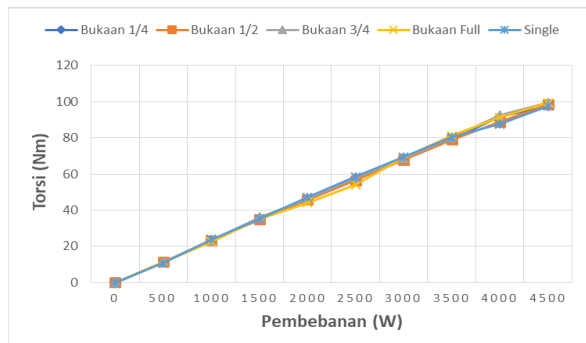
Biomassa yang tersedia di Indonesia memiliki jumlah yang sangat banyak dan jenis yang sangat beragam diantaranya

Tabel 1.

Komposisi Kandungan Syngas Pelet Kayu		
Komponen Penyusun	Persentase (%)	Massa Jenis (Kg/m ³) Pada Temperatur 329K
N ₂	43,728	1,02
CO	17,01	1,01
H ₂	4,79	0,0729
CH ₄	4,9	0,528
CO ₂	13,261	1,598
O ₂	16,226	1,158

Tabel 2.

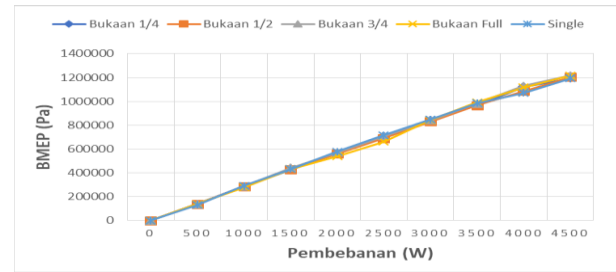
Nilai LHV Kandungan Syngas		
Nilai Kalor Bawah (LHV)		
CO (kJ/m ³)	H ₂ (kJ/m ³)	CH ₄ (kJ/m ³)
12633	10783	35883



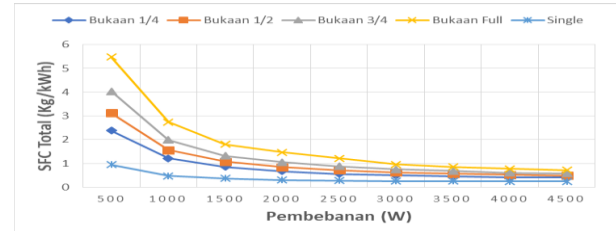
Gambar 4. Grafik torsi fungsi beban.

sekam padi, tandan kosong kelapa sawit, bonggol jagung, serbuk kayu, potongan kayu, dan lainnya. Biomassa ini dihasilkan dari berbagai sektor seperti limbah industri dan pertanian. Biomassa yang umumnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar berasal dari bahan yang memiliki nilai ekonomi rendah atau sisa hasil panen setelah produk utamanya diambil. Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat tinggi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi, dengan total mencapai 146,7 ton per tahun [2]. Salah satu biomassa yang memiliki potensi di Indonesia adalah kayu, kayu di Indonesia memiliki potensi yang besar karena ketersediaannya yang banyak dan mudah didapat. Data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) mencatat Indonesia memiliki total luas kawasan hutan mencapai 125,7 juta hektare atau 65,5 persen dari luas daratan. Data Badan Pusat Statistik mencatat produksi kayu di Indonesia dari tahun ke tahun mengalami peningkatan, pada tahun 2022 produksi kayu mencapai 64,65 juta meter kubik. Limbah ini sangat berpotensi jika dimanfaatkan dengan baik sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar energi fosil, sehingga dapat mengurangi tingginya tingkat ketergantungan terhadap minyak bumi. Salah satu pemanfaatan biomassa yang efisien adalah gasifikasi.

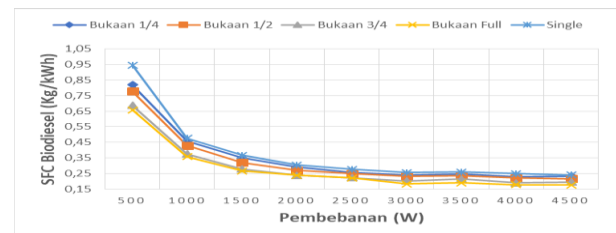
Gasifikasi adalah proses konversi termokimia bahan bakar, seperti batu bara, biomassa, dan limbah menjadi syngas (CO, CH₄, H₂) [3]. Proses konversi dari bahan bakar padat (biomassa) menjadi syngas terjadi dengan cara memanfaatkan proses pembakaran pada suhu tinggi dengan suplai udara yang masuk pada reaktor terbatas. Proses ini merupakan salah satu cara paling efisien untuk mengkonversi energi yang tersimpan dalam biomassa, dan menjadi salah satu alternatif terbaik untuk pemanfaatan kembali limbah padat. gasifikasi memiliki kelebihan diantaranya gas lebih mudah menyala, emisi yang dihasilkan lebih sedikit, dan gas



Gambar 5. Grafik BMEP fungsi beban.



Gambar 6. Grafik SFC total fungsi beban.



Gambar 7. Grafik SFC biodiesel fungsi beban.

yang dihasilkan lebih mudah dikontrol [4].

Mesin diesel dengan sistem *dual fuel* merupakan mesin diesel yang dimodifikasi sehingga dapat menggunakan dua bahan bakar yaitu bahan bakar diesel (biodiesel) dan bahan bakar gas (*syngas*). Bahan bakar gas ditambahkan pada *intake manifold* bercampur dengan udara. Pembakaran pada diesel *dual fuel* perlu dibantu dengan bahan bakar biodiesel atau disebut sebagai *pilot fuel*. *Pilot fuel* diperlukan sebagai bahan bakar pemantik. Penggunaan *syngas* pada sistem *dual fuel* mesin diesel dapat meningkatkan unjuk kerja dan efisiensi mesin dengan nilai substitusi biodiesel dan *syngas*. Oleh karena itu akan dilakukan penelitian dengan memvariasikan *flowrate syngas* dengan bukaan *valve* pada mesin diesel, sehingga diharapkan mendapat performa optimum dari mesin diesel *dual fuel* dengan bahan bakar biodiesel dan gas hasil gasifikasi pelet kayu.

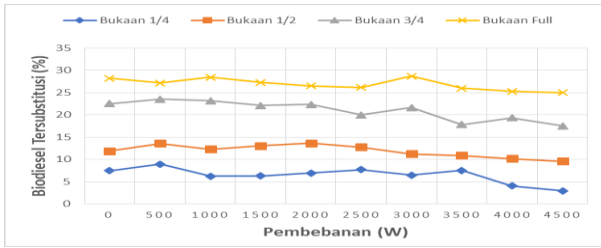
II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode Penelitian

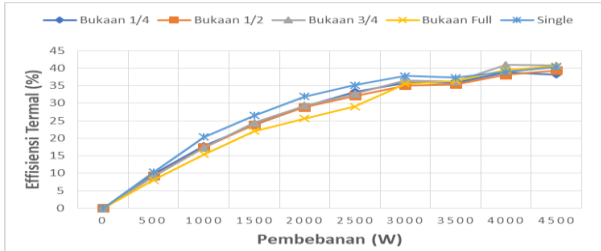
Penelitian dilakukan secara eksperimental untuk memanfaatkan gas yang dihasilkan dari gasifikasi (*syngas*) pelet kayu menggunakan reaktor tipe *downdraft* dan mesin diesel berkapasitas 5 kWh. Biomassa yang digunakan kayu, kemudian diolah menjadi pelet. Pengujian dilakukan dengan cara biomassa melalui proses gasifikasi dan akan menghasilkan *syngas*. *Syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi selanjutnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar mesin diesel *dual fuel*.

B. Alat Uji

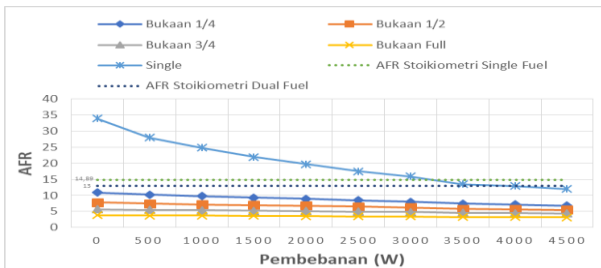
Alat uji yang digunakan dalam penelitian ini yaitu mesin diese Supra tipe XTD7700 model *electric starter*, reaktor



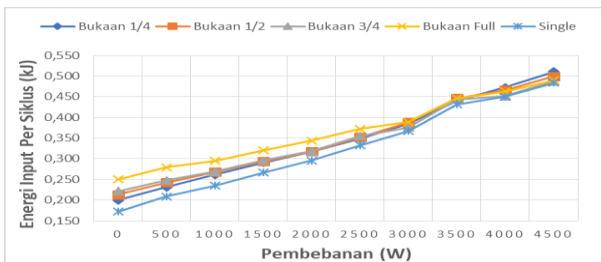
Gambar 8. Grafik biodiesel tersubstitusiusi fungsi beban.



Gambar 9. Grafik efisiensi termal fungsi beban.



Gambar 10. Grafik AFR fungsi beban.



Gambar 11. Grafik AFR fungsi beban.

gasifikasi, beban listrik, bahan bakar gas (*syngas*) hasil gasifikasi pelet ka yu, bahan bakar diesel, gas *analyzer*, dan *mixer*.

C. Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian yaitu tabung ukur, *stopwatch*, *amperemeter*, *voltmeter*, *flowmeter*, dan *thermocouple*.

D. Skema Penelitian

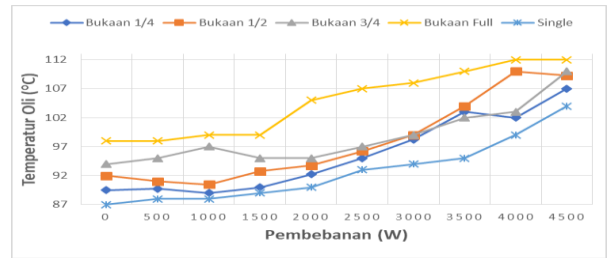
Skema penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

E. Prosedur Pengujian

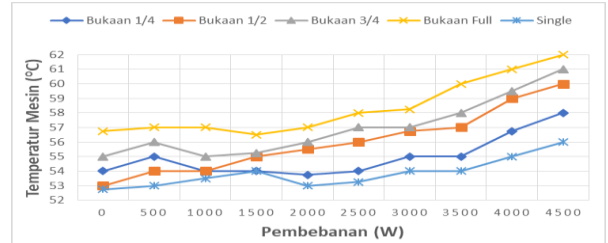
Prosedur pengujian gasifikasi tipe *downdraft* menggunakan mesin diesel sistem *dual fuel* untuk mengetahui pengaruh dari penambahan *syngas* terhadap unjuk kerja mesin diesel.

1) Persiapan Pengujian

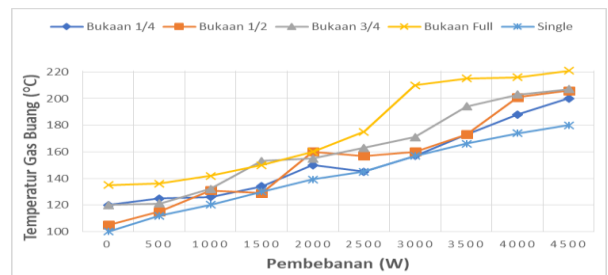
Hal-hal yang perlu dipersiapkan yaitu memeriksa kondisi mesin diesel, reaktor gasifikasi dan *syngas* hasil gasifikasi pellet kayu, pembebanan dan kelistrikan serta mempersiapkan alat pengambilan data.



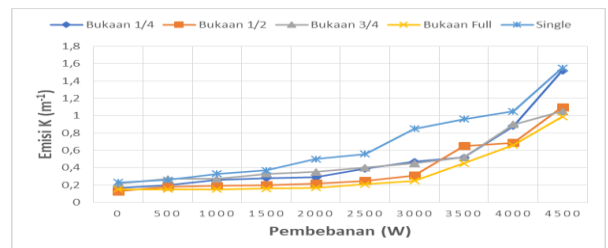
Gambar 12. Grafik temperatur oli fungsi beban.



Gambar 13. Grafik temperatur mesin fungsi beban.



Gambar 14. Grafik temperatur gas buang fungsi beban.



Gambar 15. Grafik opasitas emisi fungsi beban.

2) Kondisi Operasi Gasifikasi

Sebelum mel akukan pengujian sistem *dual fuel* bahan bakar biodiesel dan *syngas* hasil gasifikasi pelet kayu, perlu dipastikan kondisi operasi gasifikasi telah stabil dan *syngas* yang dihasilkan telah konstan (Gambar 2).

3) Pengujian Single Fuel

Pada tahap ini dilakukan percobaan dengan putaran mesin tetap dan variasi beban listrik dari 500-4500 watt dengan *interval* kenaikan 500 watt. Data yang perlu dicatat yaitu waktu konsumsi bahan bakar, tegangan dan arus listrik, temperature oli, mesin, dan gas buang serta opasitas emisi gas buang.

4) Pengujian Dual fuel

Metode yang dilakukan sama seperti *single fuel* dengan tambahan variasi bukaaan *valve syngas*. Variasi bukaaan *valve* yaitu bukaaan ¼, bukaaan ½, bukaaan ¾, dan bukaaan penuh.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Pendukung

Data pendukung pada penelitian ini meliputi:

1) *Densitas Syngas*

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ariwanto & Putra dalam penelitiannya terdahulu menggunakan bahan penelitian yang sama, komposisi yang ada dalam *syngas* adalah ditunjukkan pada Tabel 1 [5].

Kemudian dicari densitas *syngas* dengan persamaan berikut:

$$\rho_{syngas} = \sum_{i=1}^n (X_i \times \rho_i)$$

Dengan X_i adalah persentase volume unsur kimia yang terkandung (%) dan ρ_i adalah massa jenis masing-masing unsur kimia yang terkandung (kg/m^3). Didapatkan nilai ρ_{syngas} sebesar $1,0468 kg/m^3$.

2) *Nilai Kalor Bawah (LHV)*

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$LHV_{syngas} = \sum_{i=1}^n (Y_i \times LHV_i)$$

Dengan Y_i adalah persentase volume gas yang terbakar (CO, H_2, CH_4) dan LHV_i adalah nilai kalor bawah *syngas* (CO, H_2, CH_4) (Tabel 2). Y_i untuk gas $CO = 17,01 \% = 0,1701$, Y_i untuk gas $H_2 = 4,79 \% = 0,0479$ dan Y_i untuk gas $CH_4 = 4,9 \% = 0,049$. Setelah proses perhitungan, didapatkan hasil $LHV_{syngas} = 4225,74 kJ/kg$.

B. *Perhitungan Unjuk Kerja*

Perhitungan unjuk kerja menggunakan sistem *dual fuel* dengan variasi bukaan $\frac{1}{2}$ atau ekuivalen dengan \dot{m}_{syngas} sebesar $0,000366 kg/s$. Perhitungan dilakukan pada pembebanan lampu 1000 watt.

1) *Mass Flow Rate Syngas*

$$\dot{m}_{syngas} = \rho_{syngas} \times Q_{syngas}$$

$$\dot{m}_{syngas} = 1,0468 \frac{kg}{m^3} \times 21 l/min \times \frac{1}{60 s} \times \frac{1}{1000}$$

$$\dot{m}_{syngas} = 0,000366 kg/s$$

2) *Mass Flow Rate Udara*

$$\dot{m}_{udara} = \rho_{udara} \times Q_{udara}$$

$$\dot{m}_{udara} = 1,2 \frac{kg}{m^3} \times 0,00303 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m}_{udara} = 0,00364 kg/s$$

3) *Mass Flow Rate Biodiesel*

$$\dot{m}_{biodieseldual} = \frac{m_{biodiesel}}{t_{biodiesel}} \left(\frac{kg}{s} \right)$$

Menghitung massa biodiesel:

$$m_{biodiesel} = \rho_{biodiesel} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times V_{biodiesel} (m^3)$$

$$m_{biodiesel} = 860 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times 0,000025 (m^3)$$

$$m_{biodiesel} = 0,0215 kg$$

Mass flow rate biodiesel pada percobaan *single fuel* dengan pembebanan 1000 watt:

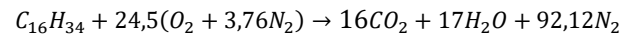
$$\dot{m}_{biodieselsingle} = \frac{0,0215 (kg)}{136 \left(\frac{s}{s} \right)}$$

$$\dot{m}_{biodieselsingle} = 0,000158 kg/s$$

Dengan metode yang sama didapatkan *mass flow rate* biodiesel pada percobaan *dual fuel* dengan pembebanan 1000 watt dan variasi \dot{m}_{syngas} sebesar $0,000366 kg/s$ yaitu $0,000138 kg/s$.

4) *AFR Stoikiometri*

Untuk pembakaran stoikiometri diperoleh reaksi pembakaran sebagai berikut:



Berdasarkan reaksi pembakaran diatas, maka untuk perhitungan AFR stoikiometri pada kondisi *single fuel* menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$(AFR)_s = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum n_i Mw_i)_{udara}}{(\sum n_i Mw_i)_{bahan bakar}}$$

$$(AFR)_s = \frac{(24,5 \times 4,76)}{1} \times \frac{28,85}{226}$$

$$(AFR)_s = 14,89$$

Dengan,

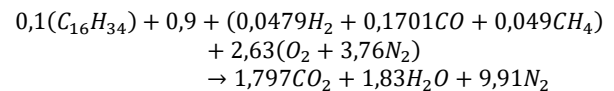
$$n_{udara} = 24,5$$

$$n_{bahan bakar} = 1$$

$$Mw_{udara} = 28,85 kg/kmol$$

$$Mw_{bahan bakar} = 226 kg/kmol$$

Pengukuran AFR stoikiometri pada kondisi *dual fuel* menggunakan bahan bakar diesel dan *syngas* pelet kayu dengan perbandingan komposisi bahan bakar diesel sebesar 10% dan *syngas* sebesar 90%. Reaksi pembakaran stoikiometri diperoleh sebagai berikut:



Berdasarkan reaksi pembakaran diatas, maka perhitungan AFR stoikiometri pada kondisi *dual fuel* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$(AFR)_s = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum n_i Mw_i)_{udara}}{(\sum n_i Mw_i)_{bahan bakar}}$$

$$(AFR)_s = \frac{(2,63 \times 4,76)}{1} \times \frac{28,85}{(22,6 + 5,078)}$$

$$(AFR)_s = 13$$

Dengan,

$$n_{udara} = 2,63$$

$$n_{bahan bakar} = 1$$

$$Mw_{udara} = 28,85 kg/kmol$$

$$Mw_{bahan bakar} = 22,6 kg/kmol$$

$$Mw_{syngas} = 5,078 kg/kmol$$

5) *Daya*

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos \phi}{\eta_{generator} \times \eta_{transmisi} \times 1000} (kW)$$

Dengan,

$$Ne = \text{daya mesin (kW)}$$

- V = tegangan listrik (volt)
- I = Arus listrik (ampere)
- $\eta_{generator}$ = efisiensi generator (0,9)
- $\eta_{transmisi}$ = efisiensi transmisi (0,95)
- $\cos\phi$ = faktor daya listrik ($\cos\phi$) = 1.

Daya untuk percobaan diesel *dual fuel* pada pembebanan 1000 watt dengan variasi \dot{m}_{syngas} 0,000366 kg/s yaitu 1,165 kW.

6) Torsi

$$Mt = \frac{60000 \times Ne}{n} (Nm)$$

Dengan,

Mt = Torsi (Nm)

Ne = Daya (kW)

n = Putaran mesin (rpm)

Torsi untuk percobaan diesel *dual fuel* pada pembebanan 1000 watt dengan variasi \dot{m}_{syngas} 0,000366 kg/s yaitu 23,29 N/m.

7) Tekanan Efektif Rata-Rata (BMEP)

$$BMEP = \frac{Ne \times Z \times 4500}{A \times l \times n \times i} (kg/cm^2)$$

Dengan,

Ne = Daya poros mesin (kW)

A = Luas penampang piston (m^2)

Z = 1 (mesin 2 langkah) / 2 (mesin 4 langkah)

l = Panjang langkah piston (m)

n = Putaran mesin (rpm)

i = Jumlah silinder

BMEP untuk percobaan diesel *dual fuel* pada pembebanan 1000 watt dengan variasi \dot{m}_{syngas} 0,000366 kg/s yaitu 284991,67 Pa.

8) Specific Fuel Consumption (SFC)

$$SFC_{single} = \frac{3600 \times \dot{m}_{biodiesel\ single}}{Ne} \left(\frac{kg}{kWh} \right)$$

Dengan,

Ne = Daya poros mesin (kW)

$\dot{m}_{biodiesel\ single}$ = Laju aliran bahan bakar *single fuel* (kg/s)

Untuk nilai SFC *single fuel* dengan pembebanan 1000 watt yaitu 0,477 kg/kWh, sedangkan untuk *dual fuel* dengan pembebanan 1000 watt dengan variasi \dot{m}_{syngas} 0,000366 kg/s yaitu 1,561 kg/kWh.

9) Biodiesel Tersubstitusi

Besar biodiesel tersubstitusi dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{\dot{m}_{biodiesel\ single} - \dot{m}_{biodiesel\ dual}}{\dot{m}_{biodiesel\ single}} \times 100\%$$

Dengan,

$\dot{m}_{biodiesel\ single}$ = Pemakaian biodiesel pada pengujian *single fuel* (kg/s)

$\dot{m}_{biodiesel\ dual}$ = Pemakaian biodiesel pada pengujian *dual fuel* (kg/s)

Besar biodiesel tersubstitusi *syngas* pada pembebanan 1000W dengan variasi *mass flow rate syngas* 0,000366 kg/s adalah 12,258%.

10) Efisiensi Termal

$$\left(\frac{Ne}{\dot{m}_{biodiesel} \times LHV_{biodiesel} + \dot{m}_{syngas} \times LHV_{syngas}} \right) \times 100\%$$

Dengan,

Ne : Daya (kW)

$\dot{m}_{biodiesel}$: *Mass flow rate* biodiesel (kg/s)

\dot{m}_{syngas} : *Mass flow rate syngas* (kg/s)

Efisiensi termal pada pembebanan 1000 watt dengan variasi *mass flow rate syngas* 0,000366 kg/s yaitu 17,38%.

C. Perhitungan Efisiensi Volumetrik

Nilai efisiensi volumetrik dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$VE = \frac{\dot{m}_{udara} \times Z \times 60}{\rho_{udara} \times V_d \times n} \times 100\%$$

Dengan,

\dot{m}_{udara} = Laju alir massa udara masuk (kg/s)

V_d = Volume silinder

n = Putaran mesin (rpm)

Z = 1 (mesin 2 langkah) / 2 (mesin 4 langkah)

$$VE = \frac{0,00392 \times 2 \times 60}{1,2 \frac{kg}{m^3} \times 0,000418 m^3 \times 3000} \times 100\%$$

$$VE = 31,26\%$$

D. Perhitungan AFR

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahanbakar}}$$

Dengan,

\dot{m}_{udara} : 0,00392 kg/s

$\dot{m}_{bahanbakar}$: 0,00016 kg/s

Single fuel pada pembebanan 1000 watt, didapatkan AFR = 24,79.

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{biodiesel\ dual} + \dot{m}_{syngas}}$$

Dengan,

\dot{m}_{udara} : 0,00364 kg/s

$\dot{m}_{biodieseldual}$: 0,000139 kg/s

\dot{m}_{syngas} : 0,000366 kg/s

Dual fuel pada pembebanan 1000 watt dan variasi *mass flow rate syngas* sebesar 0,00036 kg/s, didapatkan AFR = 7,20.

E. Perhitungan Energi Input per Siklus

$$(t \times \dot{m}_{biodiesel} \times LHV_{biodiesel}) + t \times \dot{m}_{syngas} \times LHV_{syngas}$$

Dengan,

$\dot{m}_{biodieseldual}$: 0,000139 kg/s

\dot{m}_{syngas} : 0,000366 kg/s

$LHV_{biodiesel}$: 37144 kJ/kg

LHV_{syngas} : 4225 kJ/kg

Energi input per siklus pada *dual fuel* pada pembebanan 1000 watt dengan variasi *mass flow rate syngas* 0,00036 kg/s yaitu 0,268 kJ.

F. Analisis Grafik

Analisa grafik pada penelitian ini meliputi:

1) Daya

Dapat dilihat pada Gambar 3 daya terhadap pembebanan menunjukkan *trend* yang linear seiring dengan kenaikan beban. Kurva yang dihasilkan juga berhimpit atau cenderung sama pada semua variasi *dual fuel* maupun *single fuel*. Hal ini menunjukkan bahwa daya yang diperlukan akan meningkat seiring dengan bertambahnya beban listrik yang diberikan, sebagai kompensasi bertambahnya bahan bakar yang masuk ke ruang bakar. Penambahan bahan bakar menyebabkan semakin banyak energi yang dapat dikonversikan menjadi energi panas dan mekanik dengan udara yang cukup. Energi tersebut meningkatkan daya mesin seiring dengan beban yang diberikan, umumnya jika putaran mesin tetap konstan, daya akan sebanding dengan kenaikan beban.

2) Torsi

Grafik torsi pada Gambar 4 membentuk *trend* linear dan berhimpit atau cenderung sama seiring dengan kenaikan beban pada seluruh variasi. Besar nilai torsi bergantung pada nilai daya dan putaran mesin. Berdasarkan grafik torsi fungsi pembebanan, pada beban yang sama antara kondisi *single fuel* dan *dual fuel*, nilai torsi hampir tidak ada perubahan. Hal ini sesuai dengan perumusan torsi ketika putaran mesin konstan.

3) Tekanan Efektif Rata-Rata (BMEP)

Secara umum bentuk grafik BMEP Gambar 5 terhadap fungsi beban listrik membentuk garis linear mengikuti bentuk ideal dari grafik BMEP fungsi beban listrik dengan perbedaan nilai BMEP yang kecil antara masing-masing variasi laju alir massa *syngas*.

4) Spesific Fuel Consumption (SFC)

Berdasarkan grafik Gambar 6 pada kondisi *dual fuel* dengan variasi in *syngas* bukaan penuh merupakan kondisi maksimum dengan nilai SFC yang terbesar. Pada setiap variasi penambahan *syngas* akan mempengaruhi nilai SFC semakin besar. Hal ini disebabkan aliran massa *syngas* semakin besar. Pada grafik saat beban listrik 500 watt dan aliran *syngas* bukaan penuh didapat nilai SFC sebesar 5,481 kg/kWh, angka ini mengalami kenaikan dari kondisi *single fuel* sebesar 0,946 kg/kWh.

Pada Gambar 7 didapat nilai SFC tertinggi pada saat beban terendah, pada variasi bukaan penuh didapat sebesar 0,658 kg/kWh dibandingkan dengan *single fuel* sebesar 0,946 kg/kWh dan terus mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya beban. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa konsumsi biodiesel mengalami penurunan yang cukup signifikan dengan adanya penambahan *syngas* yang masuk ke ruang bakar melalui variasi bukaan *valve syngas*. Semakin besar bukaan *valve syngas*, maka semakin besar juga penurunannya. Hal ini dapat disimpulkan bahwa jumlah *syngas* yang masuk ke ruang bakar dapat menggantikan sejumlah bahan bakar biodiesel untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan untuk mengatasi beban listrik..

5) Biodiesel Tersubstitusi

Berdasarkan grafik Gambar 8 dilihat bahwa jumlah persentase biodiesel tersubstitusi yang terbaik didapat pada variasi bukaan penuh. Hal ini disebabkan lebih besarnya laju aliran *syngas* yang masuk pada variasi bukaan penuh mampu

mensubstitusi bahan bakar biodiesel dengan baik sebagai bahan bakar sekunder, namun tidak dapat sepenuhnya menggantikan bahan bakar utama (biodiesel).

6) Efisiensi Termal

Pada Gambar 9 dapat dilihat nilai efisiensi termal tertinggi ada pada kondisi *single fuel*. Hal ini dapat disebabkan besar energi input bahan bakar yang masuk ke ruang bakar lebih besar pada kondisi *dual fuel* untuk beban yang sama. Pada kondisi *dual fuel*, laju aliran *syngas* konstan untuk tiap variasi pada setiap pembebanan. Seiring dengan kenaikan beban, maka laju aliran bahan bakar biodiesel akan semakin meningkat, tetapi rasio penambahan beban lebih besar dibandingkan dengan laju aliran bahan bakar. Sehingga menyebabkan nilai efisiensi termal meningkat pada setiap pembebanan.

7) AFR

Pada pengujian *single fuel* Gambar 10 didapat nilai AFR pada pembebanan rendah yaitu 34 hingga pembebanan tinggi menurun sampai 12. Sedangkan pada pengujian *dual fuel* mengalami penurunan AFR pada pembebanan rendah yaitu 4 hingga pembebanan tinggi menurun sampai 3 pada variasi bukaan penuh. Hal ini disebabkan oleh jumlah bahan bakar yang masuk ke ruang bakar pada kondisi *dual fuel* lebih besar disebabkan oleh besarnya laju alir massa *syngas*, meskipun dengan penambahan *syngas* dapat mengurangi laju alir massa biodiesel. Semakin besar laju alir *syngas*, maka semakin sedikit udara yang masuk ke mesin melalui *intake manifold*. Pada pengujian *dual fuel* sebagian udara yang masuk akan tersubstitusi dengan *syngas* sehingga bahan bakar yang masuk semakin banyak sedangkan udara yang masuk menjadi lebih sedikit.

8) Energi Input per Siklus

Dari Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai energi input meningkat seiring dengan penambahan beban. Hal ini dapat terjadi karena peningkatan beban akan menurunkan putaran mesin, untuk menjaga putaran mesin tetap konstan pada 3000 rpm membutuhkan energi yang lebih besar juga. Selain itu semakin besar laju alir massa *syngas* yang masuk ke ruang bakar juga meningkatkan nilai energi input per siklus. Energi input per siklus tertinggi tercapai pada kondisi *dual fuel* dibandingkan dengan pengujian *single fuel*.

9) Temperatur Oli, Mesin, dan Gas Buang

Pada Gambar 12 terlihat bahwa kenaikan beban listrik akan menyebabkan kenaikan temperatur oli. Selain itu semakin besar laju alir massa *syngas* berpengaruh terhadap kenaikan temperatur oli, dimana temperatur tertinggi didapat pada bukaan penuh. Ketika beban tinggi maka bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar akan semakin banyak untuk menjaga putaran mesin tetap konstan, semakin banyak juga bahan bakar yang dikonversikan menjadi energi mekanik dan panas. Dapat dilihat pada grafik temperatur oli tertinggi didapat saat variasi bukaan penuh. Temperatur oli mengalami kenaikan sebesar 7,14% atau selisih 8°C dibandingkan dengan kondisi *single fuel*. Pada variasi bukaan penuh bahan bakar tidak terbakar secara optimal. Pembakaran *syngas* terlambat sehingga mengakibatkan energi pada *syngas* tidak meningkatkan energi mekanik. Sebagian besar energinya berubah menjadi energi panas yang terbuang ke lingkungan (*heatloss*) sehingga temperatur oli meningkat.

Berdasarkan grafik Gambar 13 didapat temperatur mesin tertinggi terjadi pada variasi bukaan penuh. Temperatur mesin mengalami kenaikan sebesar 9,6% atau selisih 6°C jika dibandingkan dengan kondisi *single fuel*.

Pada grafik Gambar 14 didapat variasi bukaan penuh memiliki temperatur gas buang tertinggi dibandingkan dengan pengujian *single fuel*. Temperatur gas buang tertinggi mencapai 221°C, angka ini mengalami kenaikan sebesar 18,5% atau selisih 41°C dengan kondisi *single fuel* pada variasi bukaan penuh.

10) Opasitas Emisi

Berdasarkan grafik Gambar 15 terlihat bahwa opasitas emisi terendah didapat pada kondisi *dual fuel* dengan variasi bukaan penuh. Opasitas emisi pada variasi bukaan penuh saat pembebanan maksimal didapat 0,99 m⁻¹ jika dibandingkan dengan *single fuel* sebesar 1,55 m⁻¹. Hal ini menunjukkan dengan adanya penambahan *syngas* berpengaruh terhadap penurunan opasitas emisi gas buang yang dihasilkan. Hal ini dapat terjadi karena campuran *syngas* dan biodiesel menghasilkan pembakaran yang lebih bersih. Selain itu, penggunaan *syngas* mensubstitusi biodiesel sehingga pemakaian bahan bakar biodiesel lebih sedikit.

IV. KESIMPULAN

Penambahan *syngas* pada mesin diesel *dual fuel* memberikan pengaruh yang besar terhadap unjuk kerja mesin diesel *dual fuel*. Pada variasi bukaan penuh didapat unjuk kerja maksimum untuk beberapa parameter berikut: (1) *Specific fuel consumption* (SFC) total mengalami kenaikan pada kondisi *dual fuel*, pada variasi *syngas* bukaan penuh dengan beban maksimal didapat 0,720 kg/kWh. Angka ini mengalami kenaikan sebesar 66,6% dibandingkan dengan kondisi *single fuel* yaitu 0,240 kg/kWh. (2) *Specific fuel consumption* (SFC) biodiesel saja mengalami penurunan pada kondisi *dual fuel*, pada variasi *syngas* bukaan penuh dengan beban maksimal didapat 0,177 kg/kWh. Angka ini mengalami penurunan sebesar 26,25% dibandingkan dengan kondisi *single fuel* yaitu 0,240 kg/kWh. (3) *Air fuel ratio* (AFR) *dual fuel* pada pembebanan maksimal didapat AFR 3,21 pada variasi *syngas* bukaan penuh. Angka ini

mengalami penurunan 73,23% dibandingkan dengan kondisi *single fuel* sebesar AFR 13. (4) Efisiensi termal pada pembebanan maksimal didapat 40,61% pada variasi *syngas* bukaan penuh. Angka ini mengalami penurunan sebesar 0,6% dibandingkan dengan kondisi *single fuel* sebesar 40,36%. (5) Energi input per siklus pada pembebanan maksimal didapat sebesar 0,49 kJ pada variasi *syngas* bukaan penuh. Angka ini mengalami penurunan sebesar 1,22% jika dibandingkan dengan kondisi *single fuel* sebesar 0,48 kJ.

Penambahan variasi laju aliran massa *syngas* memberikan pengaruh terhadap kondisi operasi mesin diesel. Pada variasi bukaan penuh didapat kondisi operasi mesin untuk beberapa parameter berikut: (1) Temperatur operasi mengalami kenaikan pada ketiga titik, temperatur mesin tertinggi 62°C meningkat 7,4%, temperatur oli tertinggi 112°C meningkat 9,6%, dan temperatur gas buang tertinggi 221°C meningkat 18,5% dibandingkan dengan kondisi *single fuel*. (2) Opasitas emisi pada variasi bukaan penuh mengalami penurunan. Opasitas emisi pada saat pembebanan maksimal didapat 0,99 m⁻¹ jika dibandingkan dengan *single fuel* sebesar 1,55 m⁻¹. Angka ini mengalami penurunan sebesar 36,1% dibandingkan dengan kondisi *single fuel*. Biodiesel tersubstitusi maksimal didapat sebesar 28,6% pada variasi *syngas* bukaan penuh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Sunarjanto and D. Kusumantoro, "Optimasi mewujudkan ketahanan energi nasional: penanganan lingkungan dan migas non konvensional," *Lembaran Publ. Miny. dan Gas Bumi*, vol. 49, no. 3, pp. 243–253, 2015, doi: 10.29017/LPMGB.49.3.1200.
- [2] L. Parinduri and T. Parinduri, "Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan," *JET (Journal Electr. Technol.)*, vol. 5, no. 2, pp. 88–92, 2020, doi: 10.30743/jet.v5i2.2885.
- [3] P. Prasetyadi and others, "Gas hidrogen dari tandan kosong kelapa sawit melalui proses super-critical water gasification (scwg)," *J. Rekayasa Lingkung.*, vol. 13, no. 2, pp. 214–221, 2020, doi: 10.29122/jrl.v13i2.4687.
- [4] A. Arhamsyah, "Pemanfaatan biomassa kayu sebagai sumber energi terbarukan," *Indones. J. Ind. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 42–48, 2010, doi: 10.24111/jriih.v2i1.914.
- [5] A. Ariwanto and A. B. K. Putra, "Analisa energi dan eksergi unjuk kerja mesin diesel dual fuel diesel-syngas hasil gasifikasi woodchips dengan perubahan air fuel ratio dan beban daya," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 2, pp. B259–B266, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i2.79546.