

Penggunaan bahan bakar terbarukan (biodiesel-hidrogen) pada mesin *diesel dual fuel* untuk mendukung *energy transition* di Indonesia

Kuntang Winangun^{1*}, Atok Setiyawan², Bambang Sudarmanta², Ghulam Asrofi Buntoro³, Robi Etdji Pangestu¹, Anas Nurgito¹, Tinovia Prasetyo¹

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jl. Budi Utomo No.10, Ponorogo, Indonesia

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

³Prodi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Ponorogo
Jl. Budi Utomo No.10, Ponorogo, Indonesia

*Corresponding author: kuntang@umpo.ac.id

Abstract

Increasing demand for oil as a fuel and declining production in refineries led to a nationwide fuel oil shortage. Hence compelling academics to develop answers, renewable energy is one of the proposed options. Compression ignition machines utilize renewable fuels such as biodiesel, crude palm oil (CPO), and hydrogen gas. Using biodiesel without modifying the engine can result in decreased thermal efficiency and increased smoke emissions. The addition of modest volumes of hydrogen gas can enhance the performance of diesel engines. The purpose of this investigation is to investigate the performance and emissions of diesel dual-fuel engines. In this investigation, a one-cylinder diesel engine with direct injection was operated at a constant 2000rpm with a 50 percent load. Flow variations of 2.5, 5, 7.5, and 10 liters per minute of hydrogen. Compared to biodiesel fuel, the results of this study indicate that a 10 lpm hydrogen flow can boost thermal efficiency by 29.85% and a 7.5 lpm hydrogen flow can increase power by 0.78 %. Moreover, the use of hydrogen gas reduces exhaust pollutants. Reduced HC, CO, and CO₂ emissions by 26ppm, 0.01%, and 2.60%, respectively, for a 10 lpm hydrogen flow.

Keywords: *diesel dual fuel; CPO biodiesel; engine performance; exhaust emissions.*

Abstrak

Peningkatan kebutuhan bahan bakar minyak, dan produksi di kilang-kilang mulai berkurang menyebabkan kelangkaan bahan bakar minyak di seluruh negara. Sehingga memaksa para peneliti untuk mencari solusi, penggunaan energi terbarukan merupakan salah satu solusi yang ditawarkan. Bahan bakar terbarukan seperti biodiesel *Crude Palm Oil* (CPO) dan gas hidrogen menjadi pilihan pada mesin penyalaan kompresi. Penggunaan biodiesel tanpa modifikasi mesin dapat menyebabkan efisiensi termal menurun dan peningkatan emisi smoke pada mesin. Penambahan gas hidrogen dalam jumlah kecil dapat meningkatkan kinerja mesin disel. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dan emisi mesin disel bahan bakar ganda. Pada penelitian kali ini penggunaan mesin disel satu silinder dengan injeksi langsung pada kecepatan konstan 2000 rpm dan beban 50%. Variasi aliran hidrogen sebesar 2.5;5;7.5;10 Liter per menit. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini, dengan penggunaan aliran hidrogen 10 lpm dapat meningkatkan efisiensi termal sebesar 29.85% dan peningkatan daya sebesar 0.78% pada aliran hidrogen 7.5 lpm dibandingkan dengan bahan bakar biodiesel. Penambahan gas hidrogen juga berdampak positif pada emisi gas buang. Terjadi penurunan emisi HC, CO, CO₂ masing-masing sebesar 26 ppm, 0.01 %, dan 2.60 % pada aliran hidrogen 10 lpm.

Kata kunci: *diesel dual fuel; biodiesel CPO; kinerja mesin; emisi gas buang.*

Pendahuluan

Kebutuhan pasokan energi merupakan permasalahan yang dirasakan oleh seluruh negara di dunia. Energi fosil masih menjadi dominan yang digunakan untuk menunjang kehidupan manusia di berbagai negara. Empat sektor yang membutuhkan energi terbanyak, yaitu sector industry, transportasi, rumah tangga, dan komersial. Sektor transportasi termasuk urutan kedua dari pengguna energi terbesar untuk memenuhi kebutuhan manusia [1]. Sektor transportasi sebagian besar didominasi oleh kendaraan yang beroperasi dengan mesin disel karena kemudahan pengoperasian dan efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi dibandingkan dengan kendaraan lainnya. Namun cadangan energi fosil saat ini semakin berkurang di setiap tahun, hal tersebut membuat pemerintah maupun para peneliti memikirkan untuk mencari solusi dari permasalahan energi fosil. Salah satu solusi yang ditawarkan para peneliti adalah menciptakan sumber energi terbarukan seperti biodiesel, bioetanol, biogas, bioarang, dll [2–5]. Akhir-akhir ini, banyak peneliti tertarik dengan energi hidrogen yang bersih, terbarukan, dan berkelanjutan dalam kondisi tertentu [6][7]. Penggunaan hidrogen tidak dapat langsung digunakan pada mesin disel, harus dengan bahan bakar pilot sebagai pematik dari proses pembakaran didalam ruang bakar.

Solusi lain yang ditawarkan oleh banyak peneliti untuk masalah ketergantungan penggunaan bahan bakar minyak adalah penggunaan biodiesel untuk mesin disel [2]. Biodiesel merupakan sumber energi terbarukan yang diperoleh dari limbah minyak, lemak hewan dan sebagian besar dari minyak nabati melalui reaksi transesterifikasi. Keunggulan utama biodiesel adalah terbarukan dan berkelanjutan. Juga diketahui bahwa pembakaran biodiesel lebih baik karena menghasilkan emisi karbon monoksida yang lebih rendah ke alam. Namun sebaliknya, penggunaan biodiesel memiliki beberapa sisi negatif seperti masalah konsistensi pasokan minyak mentah, konsumsi bahan

bakar yang lebih tinggi yang disebabkan oleh nilai kalor yang lebih rendah, nilai viskositas yang tidak tepat, sifat kerja dingin yang buruk dan nilai emisi oksida nitrogen (NO_x) yang tinggi karena lebih tinggi [8]. Penggunaan biodiesel dapat dicampur dengan solar atau tanpa dicampur pada mesin diesel tanpa melakukan modifikasi apapun pada mesin yang ada [9,10].

Pengoperasian mesin bahan bakar ganda dengan cara menyuntikkan bahan bakar gas ke dalam intake manifold bersama udara yang dinyalakan oleh biodiesel sebagai bahan bakar pilot atau pematik. Beberapa peneliti sudah melakukan penelitian tentang penggunaan hidrogen pada mesin disel [11–15], penelitian dengan penambahan gas hidrogen dan hidroksi pada bahan bakar biodiesel dari mikroalga, daya dan torsi mesin mengalami penurunan dengan penggunaan biodiesel mikroalga (tanpa hidrogen)[11]. Selanjutnya eksperimen pada mesin diesel 4 silinder dengan variasi laju aliran hidrogen dan HHO pada beban yang berbeda, hasil penelitian menunjukkan emisi HC menurun pada torsi tinggi, NO_x meningkat seiring penambahan Hidrogen dan HHO karena turunnya temperatur [12][13]. CO_2 dan smoke menurun karena pengurangan kadar karbon. Sistem *dual fuel* memiliki keuntungan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar diesel, meningkatkan efisiensi termal mesin, menurunkan emisi gas buang CO dan THC [14][15].

Pemanfaatan biodiesel dari kelapa sawit yang ketersediaannya sangat melimpah di Indonesia, dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif mesin diesel dan ramah lingkungan. Namun penggunaan biodiesel 100% memiliki dampak negatif pada kinerja mesin, untuk memperbaiki kinerja tersebut maka dapat ditambahkan gas hidrogen. Nilai kalor pada gas hidrogen lebih tinggi diharapkan dapat memperbaiki kinerja mesin diesel. Sehingga diperlukan teknologi *Diesel Dual Fuel* (DDF) pada mesin diesel untuk mengaplikasikan kedua jenis bahan bakar tersebut.

Tinjauan Pustaka

Parameter kinerja mesin diesel yang dibahas dalam artikel ini meliputi daya, efisiensi termal, dan *Hydrogen Energy Share*. Adapun penjelasannya sebagai berikut:

1. Daya mesin merupakan daya yang diberikan untuk mengatasi beban yang diberikan. Untuk pengukuran digunakan peralatan Dynamometer sehingga didapatkan torsi. Daya yang dihasilkan pada mesin diesel yang dikopel dengan generator listrik dapat dihitung berdasarkan beban pada generator listrik dan dinyatakan sebagai daya efektif pada generator (N_e). Hubungan tersebut dinyatakan dengan persamaan 1:

$$N_e = \frac{V \times I \times \cos\theta}{\eta_{generator} \times \eta_{transmisi}} \text{ (watt)} \quad (1)$$

Dimana:

N_e : Daya mesin (Watt), V : Tegangan listrik (Volt), I : Arus listrik (Ampere), η_{gen} : Efisiensi mekanisme generator (0,9), η_{trans} : Efisiensi transmisi (0,95), $\cos\theta$: Faktor daya listrik ($\cos\theta=1$).

2. Efisiensi termal (BTE) adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang disimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam. Berikut persamaan 2:

$$BTE = \frac{N_e}{(\dot{m}_{B100} \times LHV_{B100}) + (\dot{m}_{H2} \times LHV_{H2})} \quad (2)$$

Dimana :

BTE: Break thermal efficiency (%), N_e : Daya mesin (Watt), \dot{m}_{B100} : massa biodiesel (kg/jam), LHV_{B100} : Low Heat Value biodiesel (kkal/kg), \dot{m}_{H2} : massa hidrogen (kg/jam), LHV_{H2} : Low Heat Value hidrogen (kkal/kg)

3. *Hydrogen Energy Share* (HES) merupakan seberapa banyak H_2 yang berkontribusi pada bahan bakar biodiesel, Persamaan 3 yang digunakan untuk mendapatkan nilai hidrogen mass share adalah sebagai berikut: H

$$HES = \frac{\dot{m}_{hydrogen} \times LHV_{hydrogen}}{\dot{m}_{hydrogen} \times LHV_{hydrogen} + \dot{m}_{B100} \times LHV_{B100}} \quad (3)$$

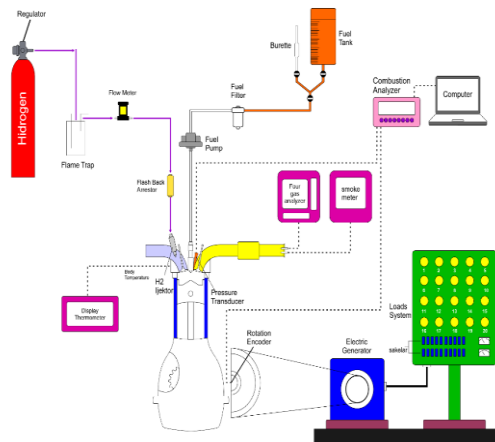
Dimana:

HES: *Hydrogen Energy Share* (%), \dot{m}_{B100} : massa biodiesel (kg/jam), LHV_{B100} : Low Heat Value biodiesel (kkal/kg), \dot{m}_{H2} : massa hidrogen (kg/jam), LHV_{H2} : Low Heat Value hidrogen (kkal/kg).

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilakukan di laboratorium rekayasa termal dan sistem energi teknik mesin FTIRS-ITS. Fokus Pengujian pada kinerja dan emisi gas buang pada mesin diesel yang menggunakan bahan bakar biodiesel kelapa sawit dan gas hidrogen. Biodiesel *Crude Palm Oil* (CPO) diperoleh dari PT. Wilmar Nabati Indonesia, sedangkan gas hidrogen diperoleh dari PT. Samator. Pengujian dilakukan pada mesin diesel silinder tunggal yang dijalankan dengan kecepatan konstan 2000rpm. Penelitian dimulai dengan memodifikasi mesin diesel bahan bakar tunggal menjadi mesin diesel bahan bakar ganda, atau disebut dengan mesin Diesel Dual Fuel (DDF). Mekanisme pemasukan Gas hidrogen (H_2) diinjeksikan pada intake manifold dan bercampur bersama dengan udara masuk. Sedangkan pemasukan bahan bakar biodiesel diinjeksikan langsung kedalam ruang bakar. Aliran gas hidrogen diukur menggunakan flow meter, dan bahan bakar biodiesel menggunakan gelas ukur dengan kapasitas 25 ml. Pengukuran kinerja mesin menggunakan generator elektrik yang diberi beban lampu. Pengujian dilakukan pada kecepatan konstan dan beban konstan 50% beban mesin maksimal 5kW. Bahan bakar yang digunakan adalah Biodiesel dan gas hidrogen dengan variasi: Biodiesel (B100), BH2.5 (B100 dan 2.5 LPM), BH5 (B100 dan 5 LPM), BH7.5 (B100 dan 7.5 LPM), dan BH10 (B100 dan 10 LPM). Pengujian kinerja mesin meliputi: efisiensi termal, daya, dan konsumsi bahan bakar. Pengujian emisi gas buang mesin berfokus pada smoke opacity, CO, HC, CO_2 , dan

EGT. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema peralatan pengujian

Mesin yang digunakan untuk pengujian adalah Diamond DI 800, direct injection, satu silinder, water cooling, 4-stroke. Secara detail spesifikasi mesin pada Tabel 1. Properties bahan bakar biodiesel kelapa sawit dan gas hidrogen dapat dilihat pada

Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi mesin pengujian

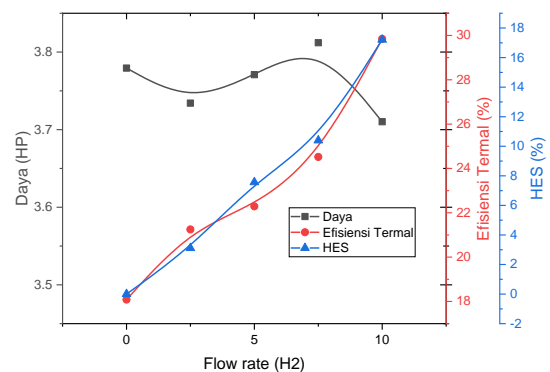
Description	Spesifikasi
Model	DI 800 H
Type	Satu silinder, empat Langkah
Combustion system	Direct injection
Bore x stroke	82 x 78 mm
Displacement	411 cc
Maximum power	7 HP (5.22 kW)/2200 rpm
Continous power	6 HP (4.47 kW)/2000 rpm
Compression Ratio	18:1
Pilot injection timing	13° BTDC
Cooling system	Hopper

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar biodiesel CPO dan hidrogen

Properties	Biodiesel CPO	Hidrogen
Massa Jenis pada 15°C (kg/m ³)	875	0,085
Viskositas Kinematic 40°C (mm ² /s (cSt))	4,5	0
Angka Setana (Min)	58	5-10
Titik Nyala (mangkok tertutup) (°C, Min)	140	
Titik Kabut (°C, Max)	15,4	
Lower Heat Value (kJ/kg)	39.910	119.810
Auto Ignition Temperature (°C)	>101	585
Stoichiometric Air-Fuel Ratio	12,5	34,3

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian pada penelitian ini menyajikan pengaruh penggunaan bahan bakar biodiesel kelapa sawit (B100) dengan gas hidrogen pada mesin disel bahan bakar ganda. Hasil yang ditampilkan meliputi efisiensi termal, konsumsi bahan bakar spesifik, daya, emisi smoke opacity, CO, HC, CO₂, dan EGT dari mesin disel berbahan bakar ganda.



Gambar 2. Daya, efisiensi termal, dan Hidrogen Energy Share terhadap variasi aliran hidrogen

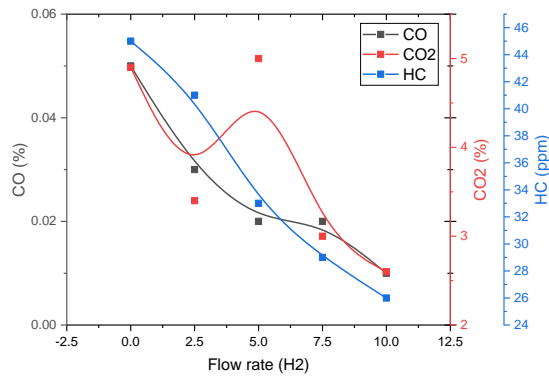
Bahan bakar biodiesel kelapa sawit memiliki nilai densitas lebih tinggi dibandingkan solar dan gas hidrogen. Cetane number yang merupakan salah satu sifat bahan bakar krusial, diketahui bahwa biodiesel kelapa sawit memiliki cetane number yang tinggi dibandingkan dengan solar. Selain itu, penentuan viskositas kinematik menunjukkan bahwa viskositas lebih tinggi dengan bahan bakar biodiesel. Beberapa kelebihan dan kekurangan pada bahan bakar biodiesel dibandingkan solar, dan mempengaruhi karakteristik performa dan hasil uji emisi dari mesin diesel.

Pada Gambar 2 menjelaskan hasil pengujian daya, efisiensi termal, dan hidrogen energy share terhadap aliran hidrogen yang berbeda dengan beban mesin konstan 50%. Daya mesin pada penggunaan bahan bakar biodiesel memiliki nilai yang tinggi, hal tersebut dipengaruhi dari karakteristik bahan bakar dengan nilai cetane number yang tinggi dari bahan bakar biodiesel. Kehadiran gas hidrogen mempengaruhi daya mesin pada beban mesin 50%. Pada aliran hidrogen 5lpm terjadi penurunan daya dibandingkan dengan single fuel biodiesel, hal tersebut berdampak pada knocking mesin diesel yang tinggi. Namun, setelah bertambah semakin banyak aliran hidrogen yang dimasukkan ke dalam ruang bakar dapat meningkatkan daya mesin. Peningkatan maksimal pada aliran hidrogen 7.5lpm sebesar 0.8% dibandingkan dengan biodiesel. Nilai kalor yang lebih tinggi dan kecepatan nyala hidrogen lebih cepat serta peningkatan pembakaran dengan molekul hidrogen dapat menyebabkan peningkatan keluaran daya mesin, hal tersebut juga dijelaskan oleh peneliti sebelumnya [16].

Secara umum, efisiensi termal meningkat seiring dengan peningkatan aliran hidrogen. Efisiensi termal bahan bakar biodiesel memiliki nilai terendah dibandingkan dengan bahan bakar ganda. Ini mungkin karena nilai kalor gas hidrogen tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan biodiesel

kelapa sawit. Variasi efisiensi termal versus aliran hidrogen ditunjukkan pada Gambar 2. Penambahan gas hidrogen, berdampak pada peningkatan efisiensi termal pada mesin diesel. Dengan Teknik memasukan gas hidrogen melalui intake manifold secara dapat menyebabkan hilangnya bahan bakar yang terbuang tanpa melalui proses pembakaran di dalam ruang bakar, selain itu juga mengurangi efisiensi volumetric karena sebagian udara digantikan oleh gas hidrogen [17]. Peningkatan efisiensi termal yang cukup besar pada beban 50% telah diamati. Peningkatan efisiensi termal sebesar 18.09%, 21.25%, 22.29%, 24.52%, 29.85% untuk Biodiesel (B100), BH2.5, BH5, BH7.5, dan BH10 masing-masing. Kehadiran hidrogen dalam jumlah yang lebih tinggi menyebabkan pembakaran lebih cepat karena hidrogen memiliki sifat mudah terbakar, sehingga dapat menyebabkan efisiensi termal meningkat. Peningkatan tersebut disebabkan karena proses pembakaran yang lebih cepat dari yang diinginkan sehingga menyebabkan waktu pelepasan panas lebih singkat untuk menghasilkan efisiensi termal dan melepas panas [18].

Hydrogen Energy Share (HES) merupakan pembagian energi proporsi hidrogen dari total energi yang dimasukkan ke dalam ruang bakar. Pada Gambar 2 dijelaskan bahwa HES akan semakin meningkat karena laju aliran gas hidrogen di jaga konstan untuk beban mesin 50%, sementara laju aliran bahan bakar biodiesel akan menyesuaikan pembebanan yang diberikan. Semakin tinggi aliran hidrogen, bahan bakar biodiesel yang diinjeksikan keruang bakar akan semakin berkurang. HES terbesar terjadi pada laju aliran 2.5lpm, 5lpm, 7.5lpm, dan 10lpm mencapai 3.11%, 7.57%, 10.40% dan 17.21%. Hal ini mendukung penelitian terdahulu yang menjelaskan bahwa maksimal HES di sekitar 40% sebelum mengalami knocking [19].



Gambar 3. Emisi HC, CO, dan CO₂ terhadap aliran hidrogen

Peningkatan pangsa energi hidrogen, terjadi peningkatan emisi Hidrokarbon tertentu. Kenaikan emisi HC tertinggi terjadi pada bakar biodiesel murni. Penambahan gas hidrogen kedalam biodiesel semakin banyak dapat menurunkan emisi HC. Penurunan maksimal pada aliran hidrogen 10lpm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, sebesar 42.22% dibandingkan dengan bahan bakar tunggal biodiesel. Sifat serupa dari pengaruh hidrogen pada emisi hidrokarbon dikonfirmasi oleh data literatur [7].

Induksi gas hidrogen menyebabkan penurunan emisi CO dan CO₂, hal tersebut merupakan hal normal dan wajar. Gambar 3 menunjukkan bahwa dengan peningkatan gas hidrogen ke dalam ruang bakar, menyebabkan emisi CO dan CO₂ semakin menurun. Hal tersebut serupa dengan penelitian yang lalu mengenai emisi CO dan CO₂, emisinya menurun dengan peningkatan aliran gas hidrogen, karena bahan bakar hidrokarbon digantikan oleh bahan bakar tanpa karbon dalam strukturnya [17]. Fakta ini tercermin dalam emisi CO₂. Penurunan emisi CO juga merupakan efek dari fenomena yang dijelaskan tetapi juga karena hidrogen mempercepat proses pembakaran, meningkatkan fase pembakaran kinetik dan dengan demikian menciptakan kondisi yang lebih baik untuk pembakaran sempurna. Aliran hidrogen maksimal 10 lpm menyebabkan penurunan emisi CO signifikan kurang lebih dari 5 kali dari bahan bakar tunggal biodiesel.

Kesimpulan

Pada pekerjaan ini dapat disimpulkan tentang efek penambahan gas hidrogen pada mesin *diesel dual fuel* berbahan bakar biodiesel kelapa sawit, meliputi kinerja mesin dan emisi gas buang mesin di beban mesin 50%, bahwa terjadi peningkatan kinerja mesin akibat penambahan gas hidrogen. Peningkatan terjadi pada efisiensi termal dengan aliran hidrogen maksimal 10lpm sebesar 29.85%. Selain itu terjadi peningkatan daya sebesar 0.78% pada aliran hidrogen 7.5lpm dibandingkan dengan bahan bakar biodiesel. Faktor penambahan gas hidrogen juga berdampak positif pada emisi gas buang. Terjadi penurunan emisi HC, CO, CO₂ masing-masing sebesar 26ppm, 0.01%, dan 2.60% pada aliran hidrogen 10lpm.

Ucapan terimakasih

Pada kesempatan ini penulis pertama mengucapkan terimakasih kepada Badan Penelitian dan Pengembangan Perguruan Tinggi Pimpinan Pusat Muhammadiyah yang telah memberikan dana penelitian dengan nomor kontrak 1687.206/PD/I.3/D/2022.

Referensi

- [1] I. C. Setiawan and M. Setiyo, "Renewable and Sustainable Green Diesel (D100) for Achieving Net Zero Emission in Indonesia Transportation Sector," *Automot. Exp.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–2, 2022, doi: 10.31603/ae.6895.
- [2] A. Setiyawan, K. Winangun, and V. Sania, "Effect of Stored Dextrite and Palm Oil Biodiesel on Fuel Properties, Performance, and Emission of Single-Cylinder Diesel Engines BT - Recent Advances in Renewable Energy Systems," 2022, pp. 333–340.
- [3] K. Winangun, F. Masykur, M. Malyadi, and R. Cahyono, "Characteristics of Peanut Shell and Rice Husk Briquettes Using The

- Microwave Oven Torrefaction Method,” *J. R.E.M (Rekayasa Energi Manufaktur)*, vol. 4, no. 2, pp. 129–130, 2019.
- [4] I. N. W. K. W. F. N. R. Puspitasari, “Aplikasi Gas Hho Pada Sepeda Motor Injeksi Dengan Modifikasi ECU aftermarket (timing pengapian),” vol. 13, no. 02, pp. 553–562, 2022.
- [5] R. S. Jatmiko, K. Winangun, and M. Malyadi, “Pengaruh Pencampuran Bahan Bakar Pertalite Dengan Bio Etanol Terhadap Peforma Mesin Injeksi Yamaha Vixion 150Cc Tahun 2011,” *Komputek*, vol. 3, no. 1, p. 33, 2019, doi: 10.24269/jkt.v3i1.200.
- [6] C. Dhanasekaran, “Hydrogen Gas as a Fuel in Direct Injection Diesel Engine,” *J. Inst. Eng. Ser. C*, vol. 97, no. 2, pp. 157–162, 2016, doi: 10.1007/s40032-015-0196-7.
- [7] T. Miyamoto, “Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 20, pp. 13138–13149, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.06.144.
- [8] J. Xue, T. E. Grift, and A. C. Hansen, “Effect of biodiesel on engine performances and emissions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 1098–1116, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.016.
- [9] D. Yuvenda, B. Sudarmanta, A. Wahjudi, and O. Muraza, “Improved combustion performances and lowered emissions of CNG-diesel dual fuel engine under low load by optimizing CNG injection parameters,” *Fuel*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120301976>.
- [10] A. A. Trihatmojo, D. Yuvenda, and B. Sudarmanta, “The effects of pilot injection timing on the combustion process and exhaust emissions in dual-fuel diesel engine using biodiesel-CNG at high load,” in *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2187, no. December, doi: 10.1063/1.5138286.
- [11] E. Uludamar, “Effect of hydroxy and hydrogen gas addition on diesel engine fuelled with microalgae biodiesel,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 38, pp. 18028–18036, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.075.
- [12] N. Castro, “An experimental investigation of the performance and emissions of a hydrogen-diesel dual fuel compression ignition internal combustion engine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 156, pp. 660–667, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.078.
- [13] B. Subramanian and V. Thangavel, “Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 25479–25492, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.280.
- [14] H. Koten, “Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 22, pp. 10511–10519, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.146.
- [15] S. Nag, P. Sharma, A. Gupta, and A. Dhar, “Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 23, pp. 12163–12175, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.120.
- [16] K. Winangun, A. Setiyawan, and B. Sudarmanta, “The combustion characteristics and performance of a Diesel Dual-Fuel (DDF) engine fueled by palm oil biodiesel and hydrogen gas,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 42, no. November 2022, p.

- 102755, 2023, doi:
10.1016/j.csite.2023.102755.
- [17] K. G.-R. and A. J. Wojciech Tutak,
“Combustion and Emission
Characteristics of a Biodiesel-
Hydrogen Dual-Fuel Engine,” *Appl.
Sci.*, no. x, 2020, doi:
doi:10.3390/app10031082.
- [18] D. Boopathi, A. Sonthalia, and S.
Devanand, “Experimental
investigations on the effect of
hydrogen induction on performance
and emission behaviour of a single
cylinder diesel engine fuelled with
palm oil methyl ester and its blend
with diesel,” *J. Eng. Sci. Technol.*,
vol. 12, no. 7, pp. 1972–1987, 2017.
- [19] S. V. Karthic, M. Senthil kumar, P.
Pradeep, and S. Vinoth Kumar,
“Assessment of hydrogen-based dual
fuel engine on extending knock
limiting combustion,” *Fuel*, vol. 260,
no. October 2019, p. 116342, 2020,
doi: 10.1016/j.fuel.2019.116342.