

Karakteristik dan Temperatur Nyala Api Pembakaran Biodiesel Berdasarkan Kadar Fatty Acid Methyl Esters

C.Y. Topayung, S. Nuryadin and J. Sentanuhady*

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
*E-mail: jayan@ugm.ac.id

Abstract

The recent surge in the implementation of biodiesel for the purpose of supplementing as a whole or in part as fuel for combustion processes in a wide range of industrial applications required further study of the characteristics that are the result of such processes. Based on the aforementioned trend, this paper aims to examine the combustion characteristics of various blends of fuels influenced by the variation in percentage of FAME (fatty acid methyl esters) biodiesel derived from palm oil as a substitute, conducted using a burner. The fuels were sprayed using a nozzle with a capacity of 5 gallons per hour and a spray angle of 60 degrees. The parameters measured were flame length based on time, flame propagation velocity with acceleration in an axial position in front of the nozzle, and flame temperature profile. Fuel blends with higher FAME content resulted in combustion processes that produced flames with a lower value in the observed parameters, and as the percentage increased, the value started to improve. This observation concludes that fuel properties such as density and viscosity are varied or affected based on the percentage of the fuel blend.

Keywords: biodiesel, combustion, flame, FAME, palm oil.

Abstrak

Meningkatnya penerapan biodiesel yang bertujuan untuk suplementasi secara keseluruhan atau sebagian bahan bakar untuk proses pembakaran dalam berbagai aplikasi industri memerlukan studi lebih lanjut mengenai karakteristik yang dihasilkan dari proses tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik pembakaran berbagai macam bahan bakar campuran yang dipengaruhi oleh variasi persentase biodiesel FAME (*fatty acid methyl esters*) yang berasal dari minyak sawit sebagai penggantinya, yang dilakukan dengan menggunakan alat burner. Bahan bakar disemprotkan dengan nosel 60 derajat berkapasitas 5 galon per jam. Parameter yang diukur adalah panjang nyala api berdasarkan waktu, kecepatan rambat nyala api dengan percepatan pada posisi axial di depan nosel, dan profil temperatur nyala api. Campuran bahan bakar dengan kandungan FAME yang lebih tinggi menghasilkan proses pembakaran yang menghasilkan nyala api dengan nilai yang lebih rendah pada parameter yang diamati, dan seiring dengan meningkatnya persentase, nilainya mulai meningkat. Pengamatan ini dapat menghasilkan kesimpulan bahwa properties bahan bakar seperti densitas dan viskositas bervariasi atau dipengaruhi berdasarkan persentase bahan bakar.

Kata kunci: biodiesel, pembakaran, nyala api, FAME, minyak kelapa sawit.

1. PENDAHULUAN

Dukungan global terhadap produksi dan pemanfaatan biodiesel akhir-akhir ini meningkat secara signifikan akibat krisis energi internasional, pemanasan global dan perubahan iklim, serta menipisnya bahan bakar fosil (Demirbas, 2008; Puigjaner dkk., 2015). Biodiesel, merupakan FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*) yang berasal dari minyak nabati, merupakan bahan bakar non-konvensional yang merupakan energi berkelanjutan. Biodiesel sudah diakui sebagai alternatif bahan bakar solar yang layak dan dapat dihasilkan dengan menggunakan bahan baku lokal dan memiliki kualitas fungsional yang serupa dengan bahan bakar fosil. Pembuatan biodiesel dapat menggunakan berbagai bahan baku nabati, termasuk rapeseed, kedelai, minyak sawit, dan jatropha (Alkabbashi dkk., 2009; Oza, 2013; Baroutian dkk., 2010; Han dkk., 2017; Lam dkk., 2010; Ogunkunle dan Ahmed, 2019).

Minyak kelapa sawit, sebagai salah satu produk pertanian utama di Indonesia, dapat digunakan sebagai bahan baku untuk produksi biodiesel. Biodiesel yang berbasis minyak sawit memiliki tingkat efisiensi yang sama dengan bahan bakar diesel dan juga menghasilkan lebih sedikit polusi (Teja, 2018; Senthilkumar dkk., 2015; Wirawan dkk., 2024). Selain itu, Biodiesel berbahan dasar minyak sawit dapat digunakan pada mesin diesel dengan sedikit perubahan (Nanthagopal dkk., 2019; Soloiu dkk., 2013; Yoon dkk., 2019).

Emisi gas buang dari bahan bakar fosil berkontribusi terhadap pemanasan global dan masalah lingkungan. Banyak peneliti telah melaporkan bahwa bahan bakar biodiesel merupakan pengganti bahan bakar fosil yang terbaik dalam hal menghasilkan emisi yang lebih rendah. Ketika digunakan sebagai bahan bakar, campuran biodiesel dengan bahan bakar solar dapat menurunkan emisi karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), karbon dioksida (CO₂), dan dapat juga mengurangi emisi nitrogen oksida (Malik dkk., 2017; Muralidharan dkk., 2011; Pourhoseini dan Asadi, 2017). Pembentukan CO mengalami penurunan pada putaran mesin yang lebih tinggi untuk semua campuran biodiesel-solar hingga 1700 rpm, kemudian meningkat seiring dengan putaran mesin, dan emisi CO₂ meningkat sebesar 14,28%, sedangkan emisi HC menurun sebesar 52%, emisi CO menurun sebesar 37,5%, dan emisi NO_x meningkat sebesar 36,84%. ketika rasio kompresi ditingkatkan dari 14 menjadi 18 (El-Kassaby dan Nemit-Allah, 2013). Tekanan injeksi bahan bakar pada mesin diesel berbahan bakar biodiesel-solar sawit, dan emisi CO serta jelaga ditemukan lebih rendah (Abu-Hamdeh dkk., 2020; Channapattana dkk., 2015). Pengamatan pengaruh penerapan biodiesel sebagai aditif bahan bakar pada karakteristik nyala api dan emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran telah dilakukan. Bahan bakar biodiesel menghasilkan temperatur nyala api lebih rendah, emisi CO dan CO₂ lebih rendah, dan emisi NO_x lebih tinggi dibandingkan bahan bakar konvensional (Hosseini S B dkk., 2010).

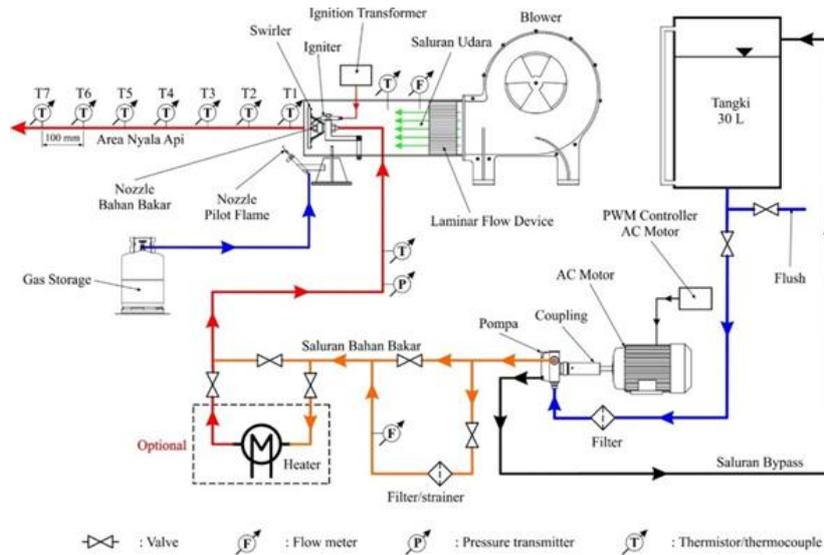
Dalam penelitian ini, karakteristik pembakaran dari berbagai presentase campuran bahan bakar biodiesel dengan bahan bakar solar pada tekanan injeksi konstan akan diamati, direkam, dianalisa dan dibandingkan dengan kondisi bahan bakar campuran yang lain dengan menggunakan burner dan pemrosesan gambar.

2. METODE PENELITIAN

A. Skematik Eksperimen

Sistem Burner yang digunakan dalam eksperimen ini terdiri dari tiga sistem utama, yaitu sistem suplai bahan bakar, sistem suplai udara dan sistem pemantik awal. Detail skema sistem burner pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Bahan bakar cair disimpan dalam tangki bahan bakar 30 liter yang dilengkapi dengan pompa injeksi bahan bakar tekanan tinggi yang digerakkan oleh motor listrik. Bahan bakar uji kemudian diinjeksikan melalui nosel 5 galon-per-jam dengan sudut injeksi 60 derajat. Di sisi lain, aliran udara disuplai oleh blower sentrifugal melalui tabung utama yang kecepatannya dapat dimonitor oleh hotwire anometer yang dipasang pada bagian hilir.

Pada bagian ujung burner dipasang pemantik untuk menginisiasikan pembakaran yang dapat dikendalikan secara manual maupun otomatis. Pengukuran temperatur pembakaran dari burner ini di ukur dengan menggunakan 7 unit thermocouple tipe K mulai T1 sampai T7 dengan interval jarak 100 mm. Penomora nyala api direkam dengan menggunakan menggunakan kamera kecepatan tinggi Phantom M310.



Gambar 1. Skema sederhana dari pengaturan eksperimental

B. Kondisi Eksperimen

Studi ini dilakukan pada tekanan injeksi bahan bakar yang konstan sebesar 17 bar, kecepatan aliran udara dari blower sentrifugal 5.23 m/s dan temperatur bahan bakar dijaga pada temperatur kamar (32°C). Sifat-sifat dari bahan bakar biodiesel dan Pertamina Solar produksi PT Pertamina yang digunakan untuk membuat berbagai macam campuran komposisi bahan bakar ditunjukkan pada Tabel 1 (Chen dkk., 2022; Rodrigues dkk., 2013; Siraj, 2017). Setiap bahan bakar campuran biodiesel-solar yang digunakan untuk eksperimen and penelitian ditunjukkan Gambar 2.

Tabel 1. Properties Bahan Bakar.

Parameter	Satuan	B30	B40	B50	B60	B70	B80	B90	B100
Densitas (40°C)	kg/m ³	834	839.8	845.7	851.7	857.9	863.9	869.6	875.7
Viskositas (40°C)	mm ² /s	2.918	3.299	3.55	3.76	3.76	3.87	4.305	4.62
Angka Cetana	-	53.2	57.4	56.8	55.7	55.1	56.7	57.6	57.7
Flash Point	°C	74	77	82	85	90	101	116	163



Gambar 2. Setiap bahan bakar campuran biodiesel-solar

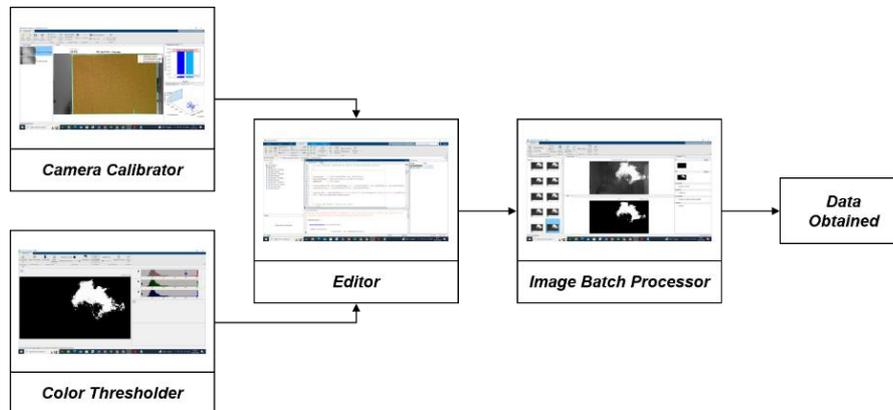
C. Pengolahan Gambar

Pada penelitian ini, panjang nyala api, kecepatan perambatan nyala api, dan percepatan nyala api didapatkan dengan menggunakan teknik pemrosesan gambar. Metode pemrosesan gambar ini didasarkan pada manipulasi matriks setiap piksel gambar dalam rangkaian gambar yang diambil selama pengamatan fenomena tersebut. Gambar diambil dengan kamera berkecepatan tinggi, Phantom M310, yang mampu menangkap hingga 6.000

gambar per detik dalam grayscale pada resolusi yang ditentukan. Gambar yang diperoleh kemudian diolah dengan MATLAB (McAndrew, 2016) sehingga menghasilkan data. Gambar 3 menunjukkan prosedur langkah demi langkah singkat untuk teknik pemrosesan gambar yang diterapkan dalam penelitian ini. Metodenya dimulai dengan kalibrasi untuk memperbaiki distorsi serta konversi nilai piksel menjadi satuan ukuran panjang.

Setelah dikalibrasi, semua gambar disaring dengan fungsi MATLAB standar untuk menghilangkan beberapa noise dan mempertajam gambar. Selanjutnya, gambar diubah dari gambar grayscale menjadi gambar hitam-putih untuk segmentasi lebih lanjut. Algoritme segmentasi gambar diukur properti objek yang terdeteksi, dalam hal ini panjang nyala api.

Kecepatan perambatan nyala api seiring bertambahnya waktu ketika nyala api mencapai panjang tertentu seperti 100, 200, 300, 400, dan 500 mm yang diukur dari titik nyala api, dengan titik 0 mm ditentukan berdasarkan panjang minimum nyala api yang terdeteksi.



Gambar 3. Proses pengolahan gambar diterapkan pada nyala api

Nilai kecepatan perambatan nyala api dihitung dengan membagi panjang nyala api yang didapatkan dari pengukuran image processing dibagi dengan waktu yang ditentukan pada saat mengukur panjang nyala api. Kemudian percepatan nyala api dihitung dengan membagi nilai kecepatan perambatan nyala api dengan waktu yang telah didefinisikan pada saat pengukuran.

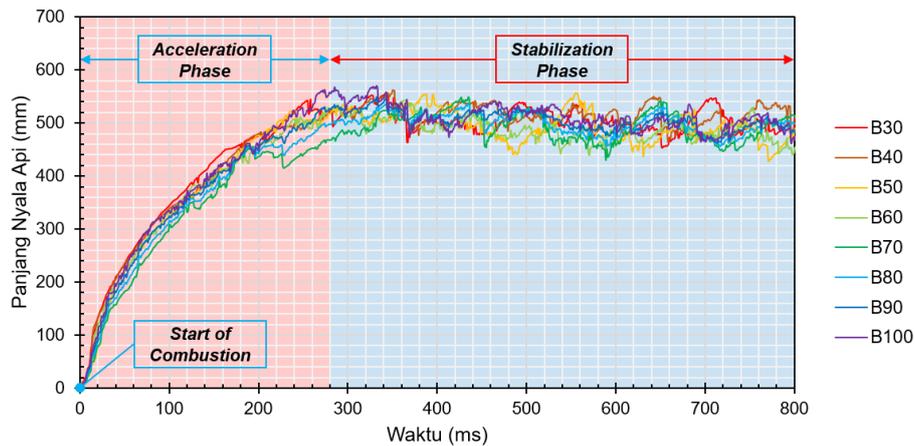
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data pembakaran menggunakan buner dan pemrosesan gambar telah dilakukan di Laboratorium Konversi Energi, Universitas Gadjah Mada dengan berbagai kondisi bahan bakar campuran pada tekanan injeksi konstan 17 bar. Selanjutnya, karakterisasi pembakaran dilakukan dengan cara memproses gambar dari hasil perekaman kamera berkecepatan tinggi menjadi data yang dapat ditampilkan menjadi grafik. Berikut adalah hasil diskusi dan pembahasan terkait fenomena-fenomena yang dapat diamati.

A. Fase Percepatan dan Stabilisasi Nyala Api

Profil panjang nyala api hasil proses pembakaran pada berbagai macam bahan bakar campuran biodiesel-solar dengan durasi waktu 800 ms ditunjukkan oleh Gambar 4. Panjangnya diukur dalam satuan milimeter yang ditampilkan pada grafik sumbu vertikal dan waktu satuan milisecond pada sumbu horizontal.

Secara keseluruhan, nyala api dapat dikategorikan menjadi dua fase, yaitu fase percepatan (*acceleration*) dan fase stabilisasi (*stabilization*). Fase percepatan, terjadi mulai dari awal proses pembakaran (*start of combustion*) hingga mencapai waktu 280 ms. Pada fase ini panjang api berubah dengan sangat cepat hingga waktu ke 40 ms,



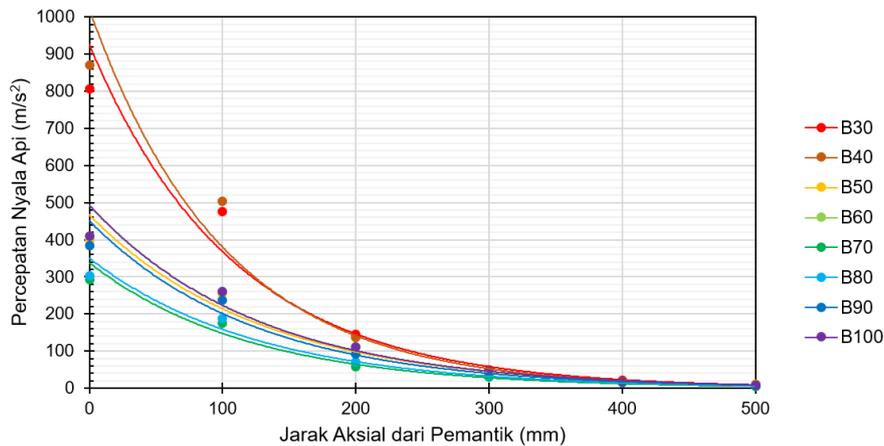
Gambar 4. Profil pengaruh variasi campuran bahan bakar biodiesel-solar terhadap panjang nyala api

kemudian sedikit menurun perubahan jaraknya hingga waktu ke 280 ms. Hal ini disebabkan efek energi inisiasi dari pemantik eksternal masih mendominasi proses reaksi pembakaran, sehingga perubahan percepatan pembakaran tampak sangat tinggi hingga waktu 40 ms, walaupun begitu efek dari energi pemantik akan berkurang dengan semakin jauhnya nyala api dari sumber pemantik. Pada fase akselerasi mulai dari waktu 0 ms hingga 280 ms, tampak dengan jelas bahwa bahan bakar B30 memiliki percepatan paling tinggi diikuti dengan B40 dan bahan bakar lainnya. Dengan meningkatnya kandungan FAME dalam bahan bakar, maka heating value dari berkurang sehingga menyebabkan kecepatan perambatan api juga berkurang. Hal ini juga dikonfirmasi (Hasib *dkk.*, 2011) bahwa dengan meningkatnya kandungan FAME, makan akan memperlambat laju pembakaran yang disebabkan oleh meningkatnya densitas dan viskositas pada setiap bahan bakar campuran biodiesel-solar. Akibatnya, atomisasi akan menghasilkan droplet yang lebih besar, yang pada akhirnya mengurangi kemampuannya untuk bercampur dengan udara (Han *dkk.*, 2017; Park *dkk.*, 2011) dan menghasilkan pembakaran yang kurang efisien.

Fase berikutnya setelah fase percepatan adalah fase stabilisasi yang dimulai pada waktu 280 ms. Pada fase stabilisasi ini menunjukkan bahwa panjang nyala api mengalami fluktuasi dengan rata-rata sekitar 500 mm. Fluktuasi ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa nyala api mengalami pemadaman sebagian dimana sebagian kecil dari bagian depan nyala api pecah karena daerah bertemperatur rendah (Wang *dkk.*, 2013).

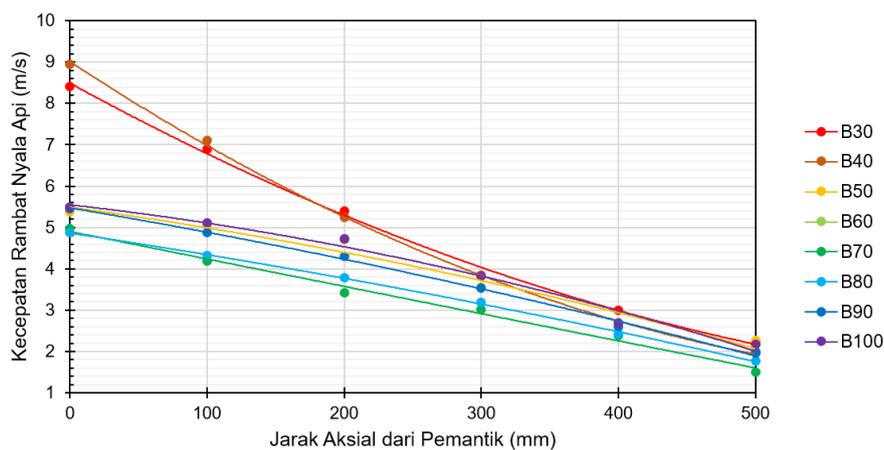
Profil kecepatan rambat nyala api dari berbagai bahan bakar mulai B30 hingga B100 sepanjang sumbu horizontal dari permukaan nozzle hingga jarak 500 mm ditampilkan pada Gambar 5. Kecepatan propagasi nyala api bahan bakar B30 dan B40 di sepanjang sumbu axial mendominasi sekitar 8.5 hingga 9 m/s pada awal proses pembakaran, kemudian menurun perlahan-lahan hingga mencapai 2 m/s pada jarak 500 mm dari nozzle. Sedangkan kecepatan propagasi nyala api untuk bahan bakar B50 hingga B100, jauh dibawah kecepatan propagasi nyala api bahan bakar B30 dan B40, yaitu sekitar 5 – 5.5 m/s di permukaan nozzle dan kemudian menurun hingga sekitar 2 m/s pada jarak 500 m/s.

Selanjutnya profil percepatan nyala api sepanjang sumbu axial mulai dari permukaan nozzle hingga jarak 500 mm dari nozzle ditunjukkan pada Gambar 6. Percepatan nyala api untuk bahan bakar B30 dan B40 sangat tinggi pada daerah permukaan nozzle, yaitu sekitar 800 m/s² hingga 880 m/s², kemudian menurun secara eksponensial hingga 0 m/s² di posisi 500 mm dari permukaan nozzle. Sebagai perbandingan, percepatan nyala api untuk bahan bakar B50 hingga B100 sekitar 300 – 400 m/s² pada pisisi permukaan nozzle dan kemudian menurun secara eksponensial hingga 0 m/s² di posisi 500 mm dari permukaan nozzle.



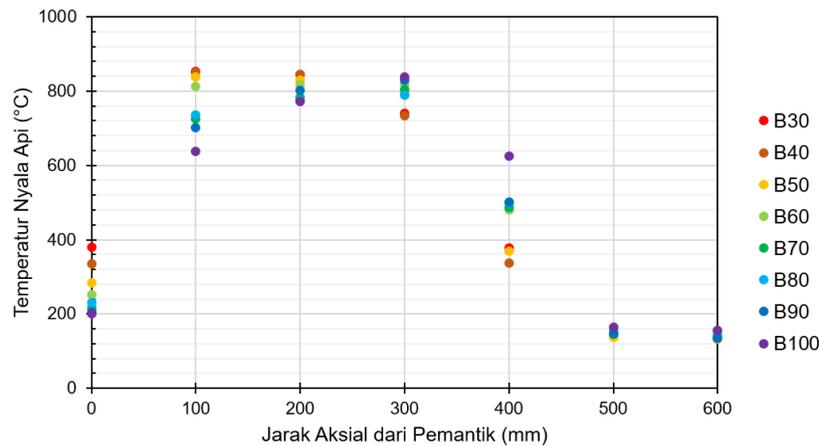
Gambar 5. Profil pengaruh variasi campuran bahan bakar biodiesel-solar terhadap percepatan nyala api

Propagasi kecepatan dan percepatan nyala api seperti ditunjukkan pada masing-masing Gambar 5 dan Gambar 6, menunjukkan bahwa bahan bakar campuran biodiesel-solar dengan kandungan FAME terendah (seperti B30 dan B40) menghasilkan nyala api dengan kecepatan dan percepatan perambatan nyala api yang lebih tinggi untuk setiap jarak axial yang diukur, hal ini disebabkan karena B30 dan B40 memiliki kadar FAME yang rendah bila dibandingkan dengan dengan bakar B50 – B100, kandungan FAME yang rendah akan menyebabkan densitas dan viskositas bahan bakar campuran juga rendah. Sehingga droplet yang keluar dari nozzle pada proses atomisasi menjadi lebih kecil dan menghasilkan pencampuran bahan bakar dan udara lebih homogen, selanjutnya akan menyebabkan pembakaran menjadi lebih sempurna. Pembakaran yang sempurna akan meyebabkan kecepatan dan percepatan nyala api lebih tinggi, sehingga pada Gambar 5 dan Gambar 6, kecepatan dan percepatan nyala api pada pembakaran B30 dan B40 jauh lebih tinggi. Gambar 5 dan Gambar 6 juga mengindikasikan bahwa sekitar B35 adalah batas perubahan kecepatan dan percepatan nyala api secara signifikan. Argumentasi ini juga diperkuat oleh hasil penelitian (Mehra dkk., 2023) dan (Gómez-Meyer dkk., 2012) bahwa



Gambar 6. Profil pengaruh variasi campuran bahan bakar biodiesel-solar terhadap kecepatan perambatan nyala api

bahan bakar dengan kadar FAME yang lebih tinggi menghasilkan ukuran droplet yang kurang efektif untuk proses pencampuran bahan bakar dan udara sehingga proses pembakaran menghasilkan kecepatan rambat nyala api yang rendah. Selanjutnya, jarak axial yang lebih dekat dengan titik penyalan mencatat kecepatan dan percepatan rambat api paling tinggi untuk setiap bahan bakar campuran biodiesel-solar, seiring bertambahnya jarak nilainya terus menurun hingga rata-rata sekitar 1.8 m/s pada jarak 500 mm dari depan nozzle.



Gambar 7. Profil pengaruh variasi campuran bahan bakar biodiesel-solar terhadap distribusi temperatur aksial

B. Temperatur Nyala Api

Distribusi temperatur nyala api dari proses pembakaran berbagai bahan bakar campuran biodiesel-solar sepanjang sumbu axial ditunjukkan oleh Gambar 7. Jarak axial dari pemantik pengapian dalam mm ditunjukkan pada sumbu horizontal dan temperatur terukur dalam celsius ($^{\circ}\text{C}$) ditunjukkan pada sumbu vertikal.

Secara umum, pola profil temperatur api secara keseluruhan bahan bakar adalah membentuk pola kurva dimana temperatur rata-rata di titik 0 mm sekitar 350°C , kemudian meningkat hingga temperatur rata-rata 780°C pada jarak 200 – 300 mm dari pemantik pengapian. Selanjutnya temperatur akan menurun hingga suhu 180°C di titik 600 mm dari pemantik pengapian. Temperatur api dari bahan bakar B30 dan B40 pada 0 mm lebih tinggi bila dibandingkan dengan bahan bakar lain, akan tetapi B100 dan B90 menghasilkan temperatur yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan temperatur bahan bakar B30 maupun B40 pada posisi setelah 200 mm dari pemantik pengapian. Jelaskan fenomenanya.

Keseluruhan, ada dua poin yang dapat disimpulkan dari grafik tersebut. Pertama, kandungan FAME pada bahan bakar campuran biodiesel-solar menghasilkan distribusi temperatur di mana tiga titik pengukuran pertama menunjukkan bahwa bahan bakar campuran rendah mencapai temperatur pembakaran lebih tinggi (Ganjehkaviri *dkk.*, 2016; Monirul *dkk.*, 2015); namun, empat titik berikutnya menunjukkan bahan bakar campuran biodiesel-solar yang lebih tinggi. Kedua, profil temperatur dari pembakaran setiap bahan bakar campuran biodiesel-solar menunjukkan pola dimana, pengukuran temperatur yang tinggi secara rata-rata, dan konsisten terletak pada bagian tengah nyala api (*flame kernel*).

4. KESIMPULAN

Hasil observasi penelitian ini jelas menunjukkan bahwa biodiesel yang berasal dari FAME dapat menjadi kandidat potensial untuk bahan bakar burner sebagai suplemen bahan bakar fosil.

Selama proses pembakaran tiap bahan bakar campuran biodiesel-solar, pola pembakaran yang konsisten yaitu nyala api dengan fase percepatan (*acceleration*) dan fase stabilisasi (*stabilization*). Akan tetapi tiap pembakaran bahan bakar campuran biodiesel-solar memiliki karakteristik kecepatan dan juga percepatan rambat nyala api yang berbeda antara satu kondisi dengan kondisi lainnya, yang diakibatkan ada perbedaan viskositas dan densitas masing-masing bahan bakar yang diuji sebagai konsekuensi perbedaan persentase FAME pada tiap bahan bakar campuran biodiesel-solar. Bahan bakar campuran biodiesel-solar yang memiliki persentase FAME yang rendah seperti B30 dan B40 akan memiliki viskositas dan densitas yang lebih rendah, dan akan menghasilkan kecepatan dan percepatan rambat nyala api berturut-turut 900 m/s dan 880 m/s^2 . Variasi persentase FAME pada tiap bahan bakar campuran biodiesel-solar menunjukkan bahwa bahan bakar B30 dan B40 memiliki temperatur nyala api yang tertinggi pada awal pembakaran, namun pada bahan bakar B100 memiliki temperatur paling tinggi pada fase stabilisasi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Laboratorium Konversi Energi Departemen Teknik Mesin dan Industri - Universitas Gadjah Mada dan Innovation Center for Automotive - Universitas Gadjah

Mada untuk dukungan fasilitas dan alat ukur, PT PLN (Persero) Puslitbang untuk dukungan fasilitas Burner Rig, serta PT. Wilmar Nabati Indonesia untuk bantuan bahan bakar FAME.

6. DAFTAR PUSTAKA

- N.H. Abu-Hamdeh, R.A.R. Bantan, A. Alimoradi, dan S.H. Pourhoseini, 2020. The effect of injection pressure on the thermal performance and emission characteristics of an oil burner operating on B20 palm oil biodiesel-diesel blend fuel. *Fuel*, Vol. 278, p. 118174.
- A. N. Alkabbashi, M. Z., Alam, M. E. S., Mirghani, dan A. M. A. Al-Fusaiel, 2009. Biodiesel production from Crude Palm Oil by transesterification process. *Journal of Applied Sciences*, 9(17), 3166–3170.
- N.P. Oza, 2013. A review of recent research on palm oil biodiesel as fuel for CI engine. *International Journal of Applied Research and Studies*, Vol. 2, pp. 1–4.
- S. Baroutian, M.K. Aroua, A.A.A. Raman, dan N.M.N. Sulaiman, 2010. Potassium hydroxide catalyst supported on palm shell activated carbon for transesterification of palm oil. *Fuel Processing Technology*, Vol. 91, pp. 1378–1385.
- S.B. Teja, 2018. Experimental investigation on the performance, emission and combustion characteristics of DI Diesel engine with linseed methyl ester along with methanol carburization. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 6470–6480.
- S.V. Channapattana, A.A. Pawar, dan P.G. Kamble, 2015. Effect of injection pressure on the performance and emission characteristics of VCR engine using Honne biodiesel as a fuel. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, pp. 1316–1325.
- C. Chen, D. Mira, Z. Xing, dan X. Jiang, 2022. Thermophysical property prediction of biodiesel mixtures at extreme conditions using molecular dynamics simulation. *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 367, p. 120423.
- A. Demirbas, Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines. In *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer London, 2008.
- M. El-Kassaby dan M. A. Nemit-Allah, 2013. Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel/diesel fuel. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 52, pp. 1–11.
- A. Ganjehkaviri, M.N. Mohd Jaafar, S.E. Hosseini, dan A.B. Musthafa, 2016. Performance evaluation of palm oil-based biodiesel combustion in an oil burner. *Energies*, Vol. 9, pp. 1–10.
- J.S. Gómez-Meyer, S. R. Gollahalli, R. N. Parthasarathy, dan J.E. Quiroga, 2012. Laminar flame speed of soy and canola biofuels. *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, Vol. 4, pp. 75–83.
- D. Han, J. Zhai, Y. Duan, D. Ju, H. Lin, dan Z. Huang, 2017. Macroscopic and microscopic spray characteristics of fatty acid esters on a common rail injection system. *Fuel*, Vol. 203, pp. 370–379.
- Z.M. Hasib, J. Hossain, S. Biswas, dan A. Islam, 2011. Bio-diesel from mustard oil: A renewable alternative fuel for small diesel engines. *Modern Mechanical Engineering*, Vol. 1, pp. 77–83.
- S.B Hosseini, K. Bashirnezhad, A.R. Moghiman, Y. Khazraii, dan N. Nikoofal, 2010. Experimental comparison of combustion characteristic and pollutant emission of gas oil and biodiesel. *International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Sciences*, Vol. 4, pp. 1372–1375.
- M.K. Lam, K.T. Lee, dan A.R. Mohamed, 2010. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances*, Vol. 28, pp. 500–518.
- M.S.A. Malik, A.I. Mohamad Shaiful, M.S. Mohd Ismail, M.N. Mohd Jaafar, dan A.M. Sahar, 2017. Combustion and emission characteristics of coconut-based biodiesel in a liquid fuel burner. *Energies*, Vol. 10, pp. 1–12.
- A. McAndrew, *A computational introduction to digital image processing*. Taylor and Francis Group, 2016.
- K.S. Mehra, J. Pal dan V. Goel, 2023. A comprehensive review on the atomization and spray characteristics of renewable biofuels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 56, p. 103106.
- I.M. Monirul, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, N.W.M. Zulkifli, H.K. Rashedul, M.M. Rashed, H.K. Imdadul, dan M.H. Mosarof, 2015. A comprehensive review on biodiesel cold flow properties and oxidation stability along with their improvement processes. *RSC Advances*, Vol. 5, pp. 86631–86655.
- K. Muralidharan, D. Vasudevan, dan K.N. Sheeba, 2011. Performance, emission and combustion characteristics of biodiesel fuelled variable compression ratio engine. *Energy*, Vol. 36, pp. 5385–5393.
- K. Nanthagopal, B. Ashok, R.S. Garnepudi, K. R. Tarun, dan B. Dhinesh, 2019. Investigation on diethyl ether as an additive with Calophyllum Inophyllum biodiesel for CI engine application. *Energy Conversion and Management*, Vol. 179, pp. 104–113.
- O. Ogunkunle, dan N.A. Ahmed, 2019. A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. *Energy Reports*, Vol. 5, pp. 1560–1579.

- S.H. Park, H.J. Kim, dan C.S. Lee, 2011. Study on the dimethyl ether spray characteristics according to the diesel blending ratio and the variations in the ambient pressure, energizing duration, and fuel temperature. *Energy and Fuels*, Vol. 25, pp. 1772–1780.
- S.H. Pourhoseini dan R. Asadi, 2017. An experimental study of optimum angle of air swirler vanes in liquid fuel burners. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 139, pp. 1–5.
- L. Puigjaner, M. Pérez-Fortes, dan J.M. Láinez-Aguirre, 2015. Towards a carbon-neutral energy sector: Opportunities and challenges of coordinated bioenergy supply chains-A PSE approach. *Energies*, Vol. 8, pp. 5613–5660.
- E. Rodrigues, D.D.E. Mecânica, C. Universitário, A. Humberto, D.A. Castelo, dan D.D.E. Química, 2013. Thermophysical properties of diesel/biodiesel blends. *Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, pp. 6577–6584.
- S. Senthilkumar, G. Sivakumar, dan S. Manoharan, 2015. Investigation of palm methyl-ester bio-diesel with additive on performance and emission characteristics of a diesel engine under 8-mode testing cycle. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 54, pp. 423–428.
- S. Siraj, 2017. Effects of thermal, physical, and chemical properties of biodiesel and diesel blends. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 2, p. 24.
- V. Soloiu, J. Weaver, H. Ochieng, B. Vlcek, C. Butts, dan M.Jansons, 2013. Evaluation of peanut fatty acid methyl ester sprays, combustion, and emissions, for use in an indirect injection diesel engine. *Energy and Fuels*, Vol. 27, pp. 2608–2618.
- Q. Wang, L. Hu, F. Tang, X. Zhang, dan M. Delichatsios, 2013. Characterization and comparison of flame fluctuation range of a turbulent buoyant jet diffusion flame under reduced- and normal pressure atmosphere. *Procedia Engineering*, Vol. 62, pp. 211–218.
- S.S. Wirawan, M.D. Solikhah, H. Setiaprada, dan A. Sugiyono, 2024. Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 189, p. 113911.
- S.K. Yoon, J.C. Ge, dan N.J. Choi, 2019. Influence of fuel injection pressure on the emissions characteristics and engine performance in a CRDI diesel engine fueled with palm biodiesel blends. *Energies*, Vol. 12, p. 3837.