



Karakteristik pembakaran *droplet* minyak nabati Indonesia

Characteristics of Indonesia vegetable oil droplet combustion

W.A. Winarko^{*1}, N. Iminnafik¹, M.N. Kustanto¹, D. Perdana²

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jember, Indonesia. HP. 088217145659

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Maarif Hasyim Latif, Sidoarjo, Indonesia

*E-mail: nasrul.teknik@unej.ac.id

ARTICLE INFO

Article History:

Received 09 June 2022

Accepted 07 September 2022

Available online 01 October 2022

Keywords:

Vegetable oil

Droplet combustion

Flame characteristic

Fuel properties



ABSTRACT

Research has been carried out on the combustion characteristics of Indonesian vegetable oil droplets. Currently, Indonesia is still developing CPO as a source of renewable fuel to replace diesel. The problem is, CPO is used as a food source so that it will affect food scarcity. Vegetable oils used in this study include CCPO, CJO, CCO and CCIO. The volume of the droplets tested was 1.25-1.31 ml and the drops were placed on a 0.1 mm type K thermocouple. The flame characteristics of the droplets tested included flame stability, ignition delay time, and temperature and flame height. The results showed that vegetable oils with higher viscosity produced more stable flames, but had low temperatures and short flames. This is because high viscosity vegetable oils produce less intense microbursts. While the ignition delays time of CCO is faster than CCPO even though it has the highest flash point. This happens because the polar nature of CCO can attract oxygen more strongly. In addition, the fatty acid content of vegetable oils also has a significant impact on fire characteristics. This is indicated by CCO which has a high content of saturated fatty acids and tends to produce a short flame.

Dinamika Teknik Mesin, Vol. 12, No. 2 October 2022, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

1. PENDAHULUAN

Minyak nabati merupakan salah satu bahan bakar yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai pengganti bahan bakar fosil karena termasuk dalam golongan energi terbarukan, ramah terhadap lingkungan, tingkat emisi polutan rendah, ketersediaan sangat berlimpah dan beraneka ragam (Deshmukh dkk., 2021; Hoang dkk., 2018; Hoang dan Nguyen, 2017; Zareh dkk., 2017). Saat ini, Indonesia masih mengembangkan *crude palm oil* (CPO) sebagai sumber bahan bakar terbarukan pengganti solar. Masalahnya, CPO merupakan sumber makanan sehingga berpengaruh terhadap kelangkaan makanan. Dengan keanekaragaman hayati yang dimiliki Indonesia, terdapat beberapa macam tumbuhan pada daerah tropis dan sub-tropis menghasilkan minyak yang tidak dimanfaatkan sebagai makanan yaitu *Crude Calophyllum Inophyllum Oil* (CCIO), *Crude Jatropha Oil* (CJO), *Crude Ceiba Petandra Oil* (CCPO) (Gamayel dkk., 2020; Hamzah dkk., 2020; Vigneshwar dkk., 2019).

Berbeda dengan bahan bakar Diesel yang merupakan campuran dari banyak senyawa hidrokarbon, minyak nabati terdiri dari tiga asam lemak yang berbeda, dalam unsur kimianya mengandung lebih banyak oksigen (Emberger dkk., 2016). Mesin Diesel sangat cocok menggunakan minyak nabati sebagai bahan bakar alternatif (Hellier dkk., 2015). Tetapi masih memiliki kelemahan diantaranya *flash point* dan viskositas tinggi serta tingkat penguapan yang rendah (Yilmaz dkk., 2018). Sehingga penggunaan minyak nabati untuk mesin Diesel kurang baik meskipun digunakan dalam jangka pendek (Mat dkk., 2018).

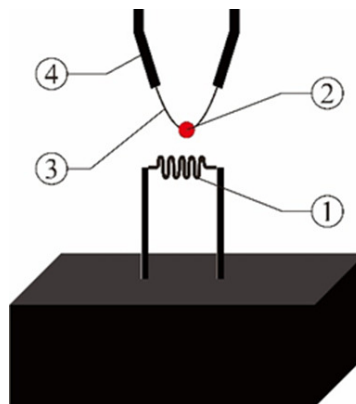
Metode pembakaran *droplet* dapat membantu menganalisis karakteristik pembakaran suatu bahan bakar yang diuji berdasarkan sifat-sifatnya (Hoxie dkk., 2014). Sifat bahan bakar seperti volatilitas, viskositas, *flash point* dan struktur molekul sangat berpengaruh terhadap karakteristik pembakaran *droplet*. Oleh karena itu, beberapa peneliti meneliti karakteristik pembakaran menggunakan metode *droplet combustion* (Qubeissi dkk., 2017; Qubeissi dkk., 2017, 2021; Coughlin dan Hoxie, 2017; Sasongko, 2019; Zhang dkk., 2018). Tetapi penelitian tersebut hanya meneliti produk turunan dari minyak nabati. Pengaruh penambahan katalis Rh₃₊ pada variasi minyak nabati CJO, *Crude Coconut Oil* (CCO), dan *Crude Sun Flower Oil* (CSFO) yang diuji pada tekanan atmosfer dan suhu kamar diamati (Nanlohy dkk., 2018). Hasil menunjukkan bahwa katalis memiliki pengaruh lebih kuat pada geometri *trigliserida* senyawa polar daripada *non polar* serta meningkatkan gaya tarik ke atom hidrogen. Namun penelitian ini tidak membahas pengaruh komposisi properties bahan bakar seperti viskositas, *flash point*, dan nilai kalor terhadap karakteristik pembakaran minyak nabati. Penelitian tentang karakteristik pembakaran minyak nabati telah beberapa kali dilakukan, namun masih banyak yang belum terungkap karena karakteristik minyak nabati terlalu kompleks.

Penelitian tentang karakteristik minyak nabati telah dilakukan dengan metode pembakaran *droplet* pada empat minyak yang berbeda, meliputi asam lemak polar dan *non polar* (Marlina dkk., 2019). Hasil penelitian menunjukkan asam lemak polar memiliki gaya tarik antar molekul lebih kuat sehingga jarak antar molekul lebih dekat. Jarak antar molekul pendek menyebabkan densitas tinggi sehingga *ignition delay time* pendek. Tetapi penelitian ini belum mengungkap lebih lanjut tentang karakteristik pembakaran lainnya seperti kestabilan, temperatur, dan tinggi nyala api. Saat ini karakteristik pembakaran minyak nabati masih menjadi masalah yang belum terpecahkan (Nakpong dan Wootthikanokkhan, 2010). Oleh karena itu, sangat penting dilakukan penelitian yang membahas tentang karakteristik pembakaran *droplet* pada minyak nabati produk Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Berbagai jenis minyak nabati mentah (*crude vegetable oil*) yaitu CCIO, CJO, CCPO, dan CCO sebagai bahan bakar dalam penelitian ini untuk mengetahui karakteristik pembakaran *droplet*. CJO dan CCPO mengandung mayoritas asam lemak tak jenuh, sedangkan CCO mengandung mayoritas asam lemak jenuh. Asam lemak CCIO merupakan kombinasi antara tiga asam lemak yaitu asam lemak jenuh, tak jenuh tunggal, dan tak jenuh ganda yang seimbang. Adapun karakteristik pembakaran meliputi temperatur, stabilitas, dan tinggi nyala api serta *ignition delay time*.

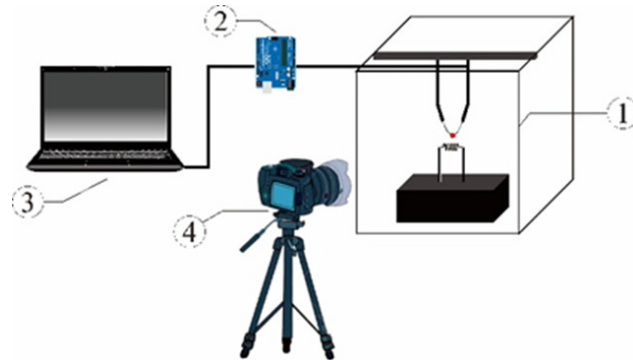
Minyak nabati sebanyak 1,25-1,31 ml diteteskan pada *thermocouple* tipe K berdiameter 0,1 mm, diletakkan 3 mm di atas *heater* 600 Watt dengan bahan kawat nikelin 0,5 mm, seperti ditunjukkan pada gambar 1. *Ignition delay time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk menyalakan *droplet*, dengan waktu dimulai setelah heater dinyalakan sampai *droplet* terbakar (terbentuk api pada *droplet*).



Gambar 1. Posisi *thermocouple* dan *droplet*. 1. *heater*, 2. *droplet*, 3. *thermocouple*, 4. *holder thermocouple*

Thermocouple dihubungkan data logger untuk merekam temperatur *droplet* yang dimulai ketika *heater* dinyalakan dan temperatur nyala api *droplet* mulai menyala hingga padam. Nyala api *droplet* yang terbentuk

pada *thermocouple* direkam menggunakan video kamera dengan kecepatan 180 fps (*freme per second*) dan resolusi 1280 x 720 *pixels*. Gambar 2 menunjukkan instalasi penelitian.



Gambar 2. Alat eksperimen. 1. *combustion chamber*, 2. *data logger*, 3. *laptop*, 4. *high speed camera*

Dari rekaman video diperoleh *ignition delay time* menggunakan *software movavi video*. Selanjutnya video dikonversi menjadi gambar menggunakan *free video to jpg*. Gambar yang diperoleh diolah menggunakan *ImageJ* untuk mendapatkan data stabilitas dan tinggi nyala api. Data temperatur yang terekam pada *data logger* diolah menggunakan *microsoft excel* untuk mengetahui grafik temperatur selama pembakaran.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum mendapatkan data penelitian diperlukan data properties bahan bakar yang ditampilkan pada tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Sifat kimia dan titik nyala asam lemak minyak nabati murni

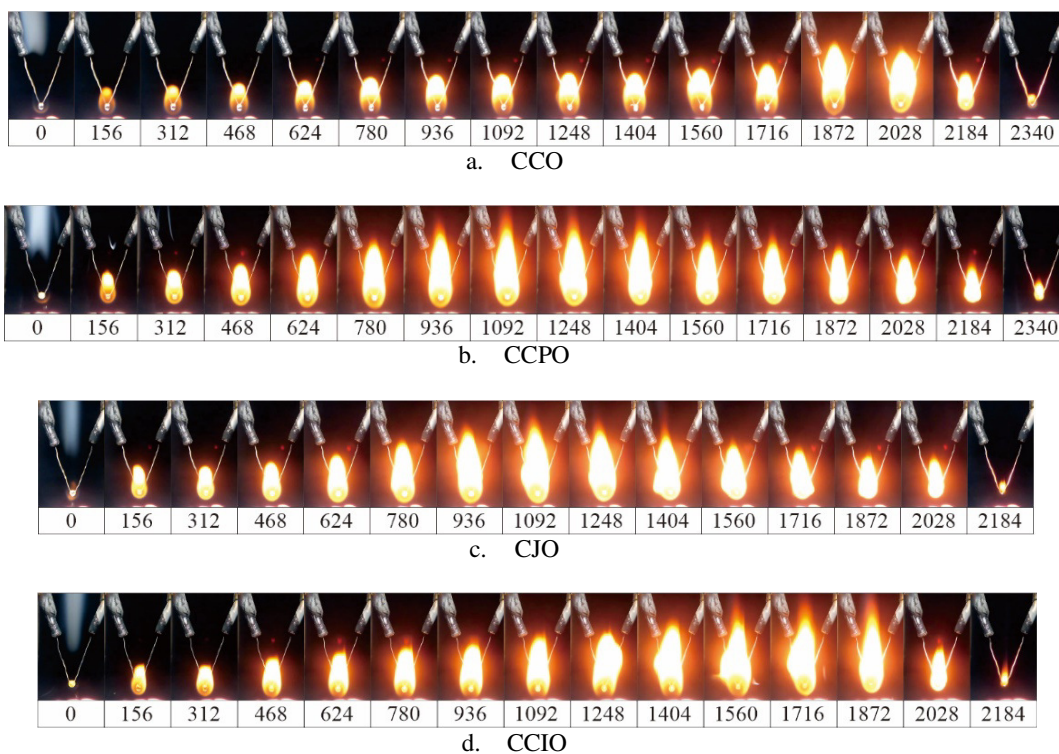
Komposisi kimia tipe (xx, y)	Flash point	Value			
		CCPO ^(a)	CJO ^(a)	CCO ^(a)	CCIO ^(b)
	(°C)	(%)	(%)	(%)	(%)
<i>Caprylic acid</i>	176	–	–	7,0	–
<i>Capric acid</i>	181	–	–	5,4	–
<i>Lauric acid</i>	185	–	–	48,9	0,75
<i>Saturated acid</i>					
<i>Myristic acid</i>	196	0,79	0,1	20,2	0,7
<i>Palmitic acid</i>	201	19,2	15,0	8,4	14,3
<i>Stearic acid</i>	206	2,6	7,0	2,5	15,3
<i>Arachidic acid</i>	208	0,25	0,2	–	–
<i>Oleic acid</i>	80	21,88	44,7	6,2	37,9
<i>Unsaturated acid</i>					
<i>Linoleic acid</i>	77	53,78	32,8	1,4	28,3
<i>Linolenic acid</i>	61	1,5	0,2	–	0,17
<i>Eicosanoic acid</i>	85	–	0,1	–	–
<i>Saturated acid</i>		22,84	23,2	92,4	31,05
<i>Monounsaturated acid</i>		21,88	44,7	6,2	37,9
<i>Polyunsaturated acid</i>		55,28	33,1	1,4	28,47

(a) (Perdana dkk., 2018); (b) (Belagur dan Chitimi, 2013)

Tabel 2. Sifat fisika minyak nabati

Property	ASTM method	Value			
		CCPO ^(a)	CJO ^(a)	CCO ^(a)	CCIO ^(b)
Densitas at 40 °C (kg/m ³)	D1298	974	921	936	910
Viskositas Kinematik at 40 °C (cSt)	D445	45,55	35,48	55,55	32,48
Flash point (°C)	D93	260	240	265	235
Nilai kalor (kcal/kg)	D240	9.700,56	9.860,25	8.837,3	9.338,8

(a) (Perdana dkk., 2018); (b) (Belagur dan Chitimi, 2013)

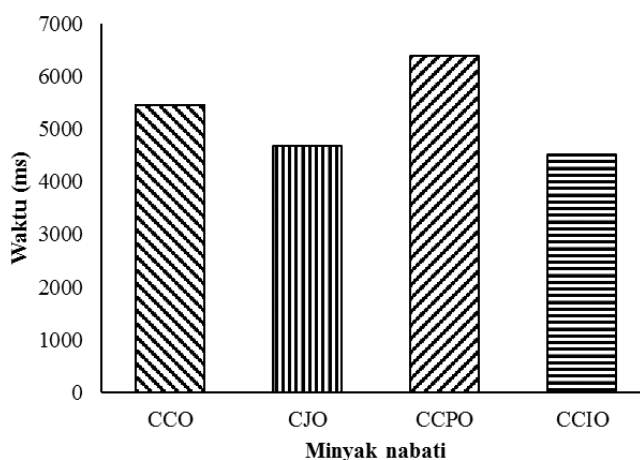


Gambar 3. Evolusi nyala api pada variasi minyak nabati

Kestabilan nyala api pembakaran *droplet* variasi minyak nabati ditunjukkan pada gambar 3. Nyala api CJO dan CCIO padam pada 2.184 ms sedangkan CCO dan CCPO padam pada 2.340 ms. Hal ini menunjukkan bahwa CJO dan CCIO lebih mudah menguap karena nilai viskositas yang lebih rendah. Selain itu, ledakan mikro yang terjadi pada CJO dan CCIO lebih intens dibandingkan dengan minyak lainnya. Hal ini dimungkinkan viskositas bahan bakar rendah, molekul bergerak sangat luasa sehingga proses nukleasi pada *droplet* menjadi lebih cepat. Nukleasi terjadi ketika di dalam *droplet* terbentuk gelembung yang disebabkan oleh temperatur *superheated* (Hamid dkk., 2021). Gelembung tersebut akan bergerak kemudian pecah dan melepaskan uap yang terperangkap dalam *droplet*. Hal ini mengakibatkan munculnya *secondary atomisation* sehingga proses pembakaran yang terjadi lebih cepat. Pada pembakaran minyak nabati asam lemak jenuh yang terbakar terlebih dahulu kemudian disusul asam lemak jenuh, selanjutnya gliserol (Nanlohy dkk., 2018). Kandungan asam lemak pada CCIO yang seimbang antara asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh sehingga menghasilkan waktu pembakaran yang cepat dan nyala api yang terang. Hal ini dimungkinkan karena proses transisi pembakaran asam lemak terjadi sangat cepat sehingga menimbulkan ledakan mikro yang semakin besar. Selain itu, jika kita

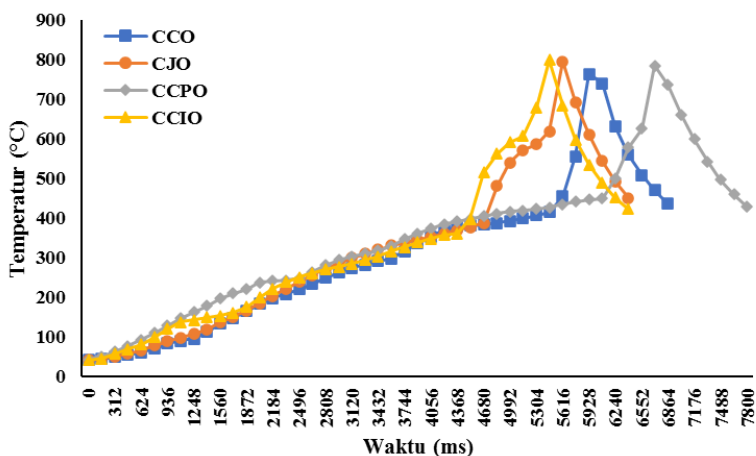
lihat pada gambar 3 terjadi perbedaan warna nyala api yang dihasilkan. CCO menghasilkan warna nyala api paling terang kemudian disusul CCIO. Hal ini terjadi karena kandungan asam lemak *lauric* dan *myristic* yang dimiliki CCO sangat tinggi sehingga partikel jelangga yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan asam minyak lainnya (Zhu dkk., 2020).

Gambar 4 menunjukkan *ignition delay time* yang dihasilkan masing-masing minyak nabati. CCIO memiliki *ignition delay time* paling singkat yaitu 4.524 ms, kemudian di ikuti oleh CJO 4.680 ms, CCO 5.460 ms, dan CCPO 6.396 ms. Perbedaan ini karena pengaruh nilai *flash point* minyak nabati berbeda-beda dengan CJO dan CCIO memiliki *flash point* rendah menghasilkan *ignition delay time* lebih cepat. Tetapi terdapat perbedaan pada CCO yang nilai *flash point* lebih tinggi menghasilkan *ignition delay time* lebih singkat dibandingkan dengan CCPO. Seperti pada tabel 2, CCO mengandung asam lemak jenuh yang tinggi sehingga proses oksidasi lebih stabil yang menyebabkan penyalaan cepat (Alviso dkk., 2020). Sedangkan, kandungan asam lemak tak jenuh ganda pada CCPO memiliki stabilitas oksidasi yang rendah sehingga proses penyalaan terjadi lebih lambat. Selain itu, asam lemak polar CCO memiliki kemampuan menarik oksigen lebih kuat sehingga minyak nabati lebih cepat bereaksi dengan oksigen dan terbentuk nyala api (Perdana dkk., 2018). Hal ini yang menyebabkan CCO memiliki *ignition delay time* lebih cepat dibandingkan CCPO.



Gambar 4. *Ignition delay time* pada variasi minyak nabati

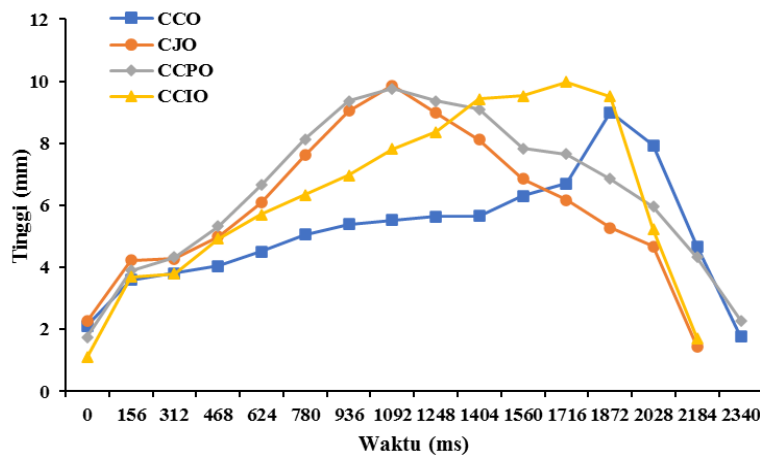
Pembakaran pada *droplet* diawali dengan evaporasi *droplet* kemudian pembakaran terjadi pada garis kesetimbangan antara difusi uap bahan bakar dari permukaan *droplet* dan difusi oksigen ke dalam *droplet* yang ditandai oleh nyala api pada *droplet* (Waluyo dkk., 2020). Temperatur *droplet* selama proses pembakaran masing-masing minyak nabati ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar. 5. Temperatur pembakaran variasi minyak nabati terhadap waktu

CCIO menghasilkan temperatur paling tinggi kemudian diikuti CJO, CCPO, dan terendah CCO. Hal ini disebabkan ledakan mikro masing-masing minyak memiliki intensitas yang berbeda. Akibatnya, proses oksidasi *droplet* menjadi cepat dan berdampak pada kenaikan temperatur pembakaran (Nanlohy, 2017). Dari empat minyak yang di uji, CCO menghasilkan temperatur yang paling rendah. Hal ini terjadi karena CCO bersifat polar. Karena kepolaran tersebut energi yang dibutuhkan untuk merubah fasenya dari cair menjadi uap lebih besar. Sehingga, sebagian energi panas hasil pembakaran diserap untuk menguapkan bahan bakar yang masih cair (Perdana dkk., 2020). Selain itu, nilai kalor yang dimiliki oleh CCO juga relatif kecil jika dibandingkan dengan minyak lainya seperti disajikan pada tabel 1. CCIO memiliki komposisi kandungan asam lemak yang seimbang antara asam lemak jenuh, asam lemak tak jenuh, dan asam lemak tak jenuh ganda diuntungkan karena nilai densitas yang dimiliki juga sangat rendah. Densitas yang dimiliki minyak nabati sangat berperan terhadap temperatur yang dihasilkan. Minyak nabati yang memiliki densitas yang rendah cenderung memiliki jarak antar molekul yang lebih luas. Sehingga pada saat proses pembakaran terjadi mobilitas elektron bahan bakar lebih cepat. Dengan meningkatnya mobilitas elektron bahan bakar, gesekan antar molekul juga terjadi lebih kuat sehingga energi panas yang dihasilkan akan meningkat.

Tinggi nyala api ditunjukkan pada gambar 6. Nyala api paling tinggi dihasilkan CCIO sedangkan paling rendah pada CCO. Hal ini terjadi karena densitas akan mempengaruhi besar atau kecilnya nyala api yang dihasilkan. Meningkatnya densitas minyak nabati berdampak pada udara akan lebih sulit untuk menembus lapisan bahan bakar sehingga reaksi pembakaran yang terjadi akan semakin lambat. Selain itu, meningkatnya densitas juga akan menurunkan kecepatan pembakaran yang berarti rambatan nyala api semakin lambat. Tetapi terjadi perbedaan tinggi nyala api yang signifikan antara CCO dan CCPO meskipun densitas CCO lebih rendah. Terjadinya perbedaan tersebut disebabkan oleh kandungan asam lemak pada CCO didominasi asam lemak jenuh yang memiliki *flash point* tinggi. Hal ini mengakibatkan terjadi penurunan energi yang dihasilkan selama pembakaran karena sebagian energi dipakai untuk menguapkan minyak nabati. Dengan berkurangnya energi yang dihasilkan akan menghambat laju rambatan nyala api, sehingga nyala api yang dihasilkan kecil (Veronica dkk., 2017).



Gambar 6. Tinggi nyala api pada variasi minyak nabati terhadap waktu

4. KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian tentang karakteristik pembakaran *droplet* pada berbagai jenis minyak nabati. Perbedaan *properties* pada variasi minyak nabati menghasilkan karakteristik pembakaran berbeda-beda. Terbukti viskositas dan *flash point* yang lebih kecil menghasilkan nyala api kurang stabil dan *ignition delay time* yang lebih pendek, serta temperatur dan nyala api lebih tinggi karena kemampuan perubahan fase dari gas menjadi uap terjadi lebih cepat. Sedangkan *ignition delay time* CCO menduduki peringkat 3 tercepat meskipun memiliki *flash point* paling tinggi. Ini terjadi karena sifat polar CCO memiliki kemampuan menarik oksigen lebih kuat. Selain itu, asam lemak polar dan non polar minyak nabati berpengaruh terhadap temperatur dan tinggi nyala api. Pada CCO temperatur dan tinggi nyala api relatif kecil karena sifat polar yang dimiliki CCO mengandung lebih banyak asam lemak jenuh sehingga membutuhkan energi yang lebih besar untuk merubah menjadi uap. Kombinasi seimbang antara asam lemak jenuh, tak jenuh, dan tak jenuh ganda yang dimiliki CCIO terbukti mampu menghasilkan kualitas pembakaran yang lebih baik. Hal ini dibuktikan dengan temperatur pembakaran yang paling tinggi serta *ignition delay time* yang paling pendek.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Qubeissi, M., Sazhin, S.S., Elwardany, A.E., Modelling of blended diesel and biodiesel fuel droplet heating and evaporation, *Fuel*, 187, 2017.
- Al Qubeissi, Mansour, Al-Esawi, N., Sazhin, S.S., Droplets heating and evaporation: an application to diesel-biodiesel fuel mixtures, *ILASS–Europe*, 2017.
- Al Qubeissi, Mansour, Sazhin, S.S., Al-Esawi, N., Kolodnytska, R., Khanal, B., Ghaleeh, M., Elwardany, A., Heating and evaporation of droplets of multicomponent and blended fuels: A review of recent modeling approaches, *Energy and Fuels*, 35(22), 2021.
- Alviso, D., Artana, G., Duriez, T., Prediction of biodiesel physico-chemical properties from its fatty acid composition using genetic programming, *Fuel*, 264, 2020.
- Belagur, V.K., Chitimi, V.R., Few physical, chemical and fuel related properties of calophyllum inophyllum linn (honno) oil and its blends with diesel fuel for their use in diesel engine, *Fuel*, 109, 2013.
- Che Mat, S., Idroas, M.Y., Hamid, M.F., Zainal, Z.A., Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: A review, *In Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2018.
- Coughlin, B., Hoxie, A., Combustion characteristics of ternary fuel blends: Pentanol, butanol and vegetable oil, *Fuel*, 196, 2017.
- Deshmukh, G.K., Rehman, A., Gupta, R., Combustion and emission characteristics of a compression-ignition engine fuelled with transesterified-jatropha biodiesel-diesel blends, *International Journal of Renewable Energy Research*, 11(2), 2021.
- Emberger, P., Hebecker, D., Pickel, P., Remmele, E., Thuncke, K., Emission behaviour of vegetable oil fuel compatible tractors fuelled with different pure vegetable oils, *Fuel*, 167, 2016.
- Gamayel, A., Mohammed, M.N., Al-Zubaidi, S., Yusuf, E., A potential study on droplet combustion performance of vegetable oil-clove oil blend, *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(5), 2020.
- Hamid, N., Yuliati, L., Ibadurrohman, I.A., Pengaruh panjang rantai karbon dan derajat ketidakjenuhan terhadap karakteristik pembakaran droplet asam lemak tunggal, *Rekayasa Mesin*, 12(2), 315–323, 2021.
- Hamzah, N.H.C., Khairuddin, N., Siddique, B.M., Hassan, M.A., Potential of jatropha curcas L. as biodiesel feedstock in Malaysia: A concise review, *In Processes*, 8 (7), 2020.
- Hellier, P., Ladommatos, N., Yusaf, T., The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions, *Fuel*, 143, 2015.
- Hoang, A.T., Nguyen, V.T., Emission characteristics of a diesel engine fuelled with preheated vegetable oil and biodiesel, *Philippine Journal of Science*, 146(4), 2017.
- Hoang, A.T., Noor, M.M., Pham, X.D., Comparative analysis on performance and emission characteristic of diesel engine fueled with heated coconut oil and diesel fuel, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 11(1), 2018.
- Hoxie, A., Schoo, R., Braden, J., Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets, *Fuel*, 120, 2014.
- Marlina, E., Wardana, I.N.G., Yuliati, L., Wijayanti, W., The effect of fatty acid polarity on the combustion characteristics of vegetable oils droplets, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 494(1), 2019.
- Nakpong, P., Wootthikanokkhan, S., High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand. *Renewable Energy*, 35(8), 2010.
- Nanlohy, H.Y., Karakteristik pembakaran droplet minyak jarak pada berbagai suhu minyak. Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri, 15(1), 659–664, 2017.
- Nanlohy, H.Y., Wardana, I.N.G., Hamidi, N., Yuliati, L., Ueda, T., The effect of Rh^{3+} catalyst on the combustion characteristics of crude vegetable oil droplets, *Fuel*, 2018.
- Perdana, D., Wardana, I.N.G., Yuliati, L., Hamidi, N., The role of fatty acid structure in various pure vegetable oils on flame characteristics and stability behavior for industrial furnace, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018.
- Perdana, D., Yuliati, L., Hamidi, N., Wardana, I.N.G., The role of magnetic field orientation in vegetable oil premixed combustion, *Journal of Combustion*, 2020.
- Sasongko, M.N., Droplet combustion characteristic of biodiesel produced from waste cooking oil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 494(1), 2019.
- Veronica, S., Putri, R.H., Fitriani, F., Ramadhan, M.L., Riki, M., Reynaldo, S., Imran, F.A., Nugroho, Y.S., Effect of density on forward and upward smoldering combustion of cellulosic material, *AIP Conference Proceedings*, 1826, 2017.
- Vigneshwar, V., Krishnan, S.Y., Kishna, R.S., Srinath, R., Ashok, B., Nanthagopal, K., Comprehensive review

- of calophyllum inophyllum as a feasible alternate energy for CI engine applications, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 2019.
- Waluyo, B., Wardana, I.N.G., Yuliati, L., Sasongko, M.N., Setiyo, M., The role of polar ethanol induction in various iso-octane ethanol fuel blend during single droplet combustion, *Fuel Processing Technology*, 199, 2020.
- Yilmaz, N., Atmanli, A., Vigil, F.M., Quaternary blends of diesel, biodiesel, higher alcohols and vegetable oil in a compression ignition engine, *Fuel*, 212, 2018.
- Zareh, P., Zare, A.A., Ghobadian, B., Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking based biodiesel as fuel in a diesel engine, *Energy*, 139, 2017.
- Zhang, Y., Huang, R., Huang, Y., Huang, S., Zhou, P., Chen, X., Qin, T., Experimental study on combustion characteristics of an n-butanol-biodiesel droplet, *Energy*, 160, 2018.
- Zhu, M., Setyawan, H.Y., Zhang, Z., Zhang, D., Effect of n-butanol addition on the burning rate and soot characteristics during combustion of single droplets of diesel–biodiesel blends, *Fuel*, 265, 2020.