

Karakteristik Pembakaran Droplet Campuran Metil Oleat – Etanol dengan Penambahan Multi -Walled Carbon Nanotubes

Lilis Yuliati, Nurkholis Hamidia, Ibrahim Ahmad Ibadurrohman, Ilham Ridwan Pujohastarto

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Brawijaya, Malang
lilis_y@ub.ac.id

Abstract

This research intended to investigate the combustion characteristics of methyl oleic – ethanol blend with OH functionalized multi-walled carbon nanotubes (MWCNT-OH) addition. Methyl oleic is an unsaturated fatty acid methyl ester, which is a constituent of various biodiesels. The observed fuel was a mixture of Methyl oleic with 20% vol of ethanol. MWCNT-OH content was varied by 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm, and 500 ppm (wt based). The presence of ethanol in the droplets is intended to promote the microexplosion phenomenon, generating smaller droplets and a shorter burning time. The experimental results show that the MWCNT-OH addition on the droplet of Methyl oleic – ethanol blend decreased the ignition delay and droplet burning time, while the constant burning rate and droplet temperature (and flame temperature) were increased. Reducing ignition delay time due to the higher thermal conductivity of nanofluid droplets results in more effective heat absorption from the environment and better heat transport inside the droplet. Hence, droplet vaporization, flammable mixture formation and ignition occur in a shorter time. Furthermore, this condition encourages a higher burning rate and a lower droplet burning time. The higher droplet and flame temperatures are related to the higher heating value of the methyl oleic – ethanol – MWCNT-OH mixture and higher droplet burning rate, which results in a higher heat release rate.

Keywords: Droplet combustion characteristics, methyl oleic – ethanol blend, MWCNT-OH

1. Pendahuluan

Biodiesel merupakan bahan bakar pengganti minyak diesel yang dihasilkan dari proses transesterifikasi minyak nabati. Biodiesel bersifat terbarukan, ramah lingkungan, *biodegradable*, tidak beracun, memiliki *cetane number* yang tinggi, tidak menyebabkan peningkatan kadar karbondioksida di atmosfer serta memiliki kandungan sulfur yang rendah sehingga mampu mengurangi efek gas rumah kaca dibandingkan dengan bahan bakar diesel [1-3]. Biodiesel tersusun dari bermacam-macam jenis *fatty acid methyl ester* (FAME), dengan berbagai panjang rantai karbon dengan ikatan tunggal (*saturated FAME*) ataupun mengandung ikatan rangkap (*unsaturated FAME*). Sifat dari biodiesel sangat dipengaruhi oleh komposisi dari FAME penyusunnya [4]. Pengetahuan mengenai propertis dan karakteristik pembakaran dari setiap FAME penyusun biodiesel dapat digunakan untuk membuat biodiesel dengan karakteristik pembakaran yang lebih baik [5-6].

Disamping kelebihan tersebut di atas, biodiesel memiliki beberapa kekurangan ketika digunakan sebagai bahan bakar pengganti biodiesel, diantaranya biodiesel memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan bahan bakar diesel yang akan mengganggu proses injeksi dan menyebabkan pengatomisasian bahan bakar yang buruk, memiliki temperatur nyala yang lebih tinggi dari pada bahan bakar diesel sehingga lebih sulit dinyalakan, serta memiliki nilai kalor yang lebih rendah bila dibandingkan dengan bahan bakar diesel [7-9]. Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menambahkan bahan bakar cair yang memiliki

viskositas rendah dan mempunyai temperatur didih yang rendah. Salah satunya adalah etanol, yang merupakan salah satu jenis alkohol dengan dua buah rantai karbon [10]. Penambahan etanol menghasilkan penurunan viskositas larutan, selain itu etanol memiliki temperatur didih dan temperatur nyala yang lebih rendah. Pembakaran etanol diharapkan menjadi pemicu pembakaran metil oleat yang merupakan representasi dari biodiesel.

Tetapi penambahan etanol dalam bahan bakar biodiesel mengakibatkan penurunan nilai kalor, karena etanol memiliki nilai kalor yang lebih rendah dari biodiesel. Selain itu etanol juga mempunyai nilai konduktivitas termal yang lebih rendah dari pada bahan bakar diesel [11]. Untuk mengatasi efek negatif dari penambahan etanol, pada bahan bakar biodiesel dapat ditambahkan MWCNT-OH, yang merupakan nano partikel yang memiliki nilai kalor dan konduktivitas termal lebih tinggi dari pada etanol maupun bahan bakar diesel [12].

Biodiesel tersusun dari berbagai jenis FAME, yang masing – masing memiliki sifat dan karakteristik pembakaran yang berbeda-beda. Mengetahui sifat dan karakteristik dari setiap FAME penyusun biodiesel dapat digunakan untuk memperkirakan karakteristik biodiesel dengan komposisi tertentu. Metil oleat merupakan FAME yang terdapat dalam berbagai jenis biodiesel dengan kandungan antara 10% sampai 75%, dapat ditemui pada minyak kedelai, minyak sawit, minyak jagung, minyak jarak dan minyak zaitun [13]. Karena terdapat dalam berbagai jenis biodiesel, mengetahui karakteristik pembakaran metil oleat s

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembakaran campuran droplet metil oleat - etanol dengan penambahan MWCNT-OH. Karakteristik pembakaran droplet yang diamati meliputi *ignition delay time*, *droplet burning time*, temperatur droplet, evolusi diameter droplet dan dimensi nyala api selama proses pembakaran.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan pada pembakaran droplet campuran metil oleat-etanol dengan penambahan MWCNT-OH. Droplet dibuat dari campuran 80%



- | | |
|----------------|---------------------------|
| 1. Komputer | 7. Kamera |
| 2. Data logger | 8. Aki |
| 3. Termokopel | 9. Saklar |
| 4. Droplet | 10. Penyangga coil heater |
| 5. Coil heater | |
| 6. Skala | |

Gambar 1. Skema instalasi penelitian

Coil heater dinyalakan dan dipanaskan hingga mencapai temperatur 750°C. Pada waktu yang sama, campuran metil oleat – etanol – MWCNT-OH sebanyak 0,5 µL diambil dengan menggunakan *micro syringe* dan diteteskan pada ujung *thermo couple junction* (4) untuk membentuk droplet dengan diameter $1 \pm 0,05$ mm. Setelah temperatur *coil heater* mencapai 750°C, *heater* di letakkan 3 mm di bawah droplet bersamaan dengan awal perekaman data temperatur menggunakan termokopel – *data logger* – komputer dan perekaman data visualisasi pembakaran droplet menggunakan kamera video. Saat timbul nyala api pada droplet, *coil heater* dimatikan dan dijauhkan dari droplet, perekaman data temperatur dan visualisasi nyala api dilanjutkan hingga nyala api padam. Pencatatan data temperatur dilakukan dengan *sampling rate* 10 data/detik dan rekaman video dilakukan dengan *frame rate* sebesar 60 fps. Dari rekaman video pembakaran droplet, dipecah

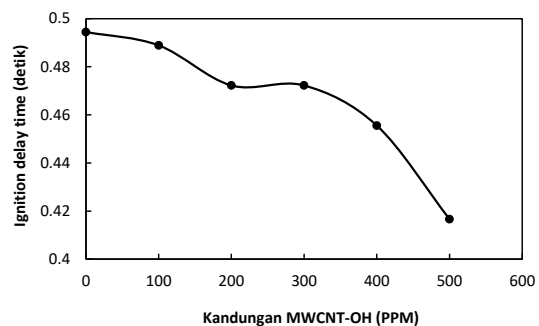
metil oleat dan 20% etanol (berdasarkan volume), dengan penambahan MWCNT-OH. Kandungan MWCNT-OH dalam campuran metil oleat - etanol divariasikan sebesar 100 PPM, 200 PPM, 300 PPM, 400 PPM dan 500 PPM (berdasarkan massa). Pencampuran metil oleat – etanol – MWCNT-OH dilakukan dengan pengadukan dalam *glass beaker* menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan putar 250 rpm dengan lama pengadukan selama 15 menit. Karakteristik pembakaran droplet diamati pada instalasi penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

menjadi frame gambar, dan dari frame gambar ini ditentukan *ignition delay time*, *droplet burning time*, dan data dimensi api. *Ignition delay time* sama dengan jumlah *frame* gambar mulai dari *heater* diletakkan di bawah droplet hingga saat pertama timbul nyala api dikalikan dengan 1/60 detik. Sedangkan *droplet burning time* ditentukan dari jumlah *frame* gambar sejak terlihat nyala api hingga api padam dikalikan dengan 1/60 detik. Dari data yang diperoleh dibuat grafik *ignition delay time*, *droplet burning time*, temperatur droplet, evolusi diameter droplet serta dimensi nyala api yang merepresentasikan daerah reaksi pembakaran.

3. Hasil dan Pembahasan

Ignition delay time.

Rentang waktu antara droplet terpapar panas dari *coil heater* (koil pemanas diletakkan di bawah droplet) hingga timbul nyala api disebut sebagai *ignition delay time*. Gambar 2 menunjukkan pengaruh penambahan MWCNT-OH terhadap *ignition delay time* pada pembakaran droplet campuran metil oleat – etanol.



Gambar 2. Pengaruh penambahan MWCNT-OH terhadap *ignition delay time* pada pembakaran droplet campuran metil oleat - etanol

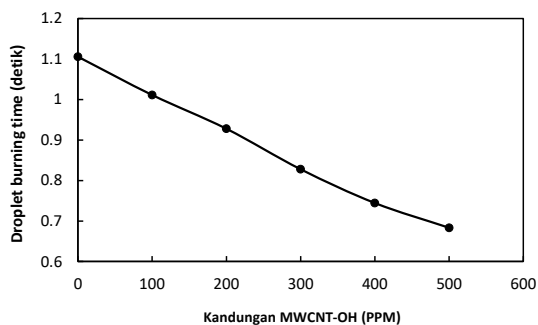
Gambar di atas menunjukkan bahwa *ignition delay time* berkurang dengan bertambahnya kandungan MWCNT-OH dalam droplet. Hal ini dikarenakan MWCNT-OH memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dari metil oleat dan etanol. MWCNT-OH terdispersi secara merata di dalam

droplet, terletak dibagian permukaan ataupun di dalam droplet. Saat droplet terpapar panas dari *coil heater* (secara konveksi dan radiasi), MWCNT-OH memiliki peran penting untuk menghantarkan panas dari permukaan droplet ke bagian dalam droplet. Adanya MWCNT-OH di dalam droplet juga mengakibatkan penyerapan kalor secara radiasi oleh droplet juga semakin meningkat. Sehingga proses peningkatan temperatur dan penguapan droplet, serta pembentukan *flammable mixture* (campuran uap bahan bakar – udara) terjadi pada waktu yang lebih singkat.

Dalam proses pembakaran, *ignition delay time* terdiri dari *physical ignition delay time* dan *chemical ignition delay time*. *Physical ignition delay time* terdiri dari proses pemanasan droplet hingga mencapai temperatur didihnya, penguapan droplet, dan pencampuran uap bahan bakar dengan udara pembakaran hingga membentuk *flammable mixture*. *Chemical ignition delay time* merupakan waktu yang diperlukan oleh *flammable mixture* untuk mencapai kondisi reaktif, atau kondisi dimana reaksi kimia mulai terjadi. Penambahan MWCNT-OH secara signifikan dapat mengurangi *physical ignition delay time*.

Droplet burning time.

Droplet burning time didefinisikan sebagai lama waktu pembakaran droplet, dimulai sejak timbul nyala api hingga api padam, ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh penambahan MWCNT-OH terhadap *droplet burning time* pada pembakaran droplet campuran metil oleat - etanol

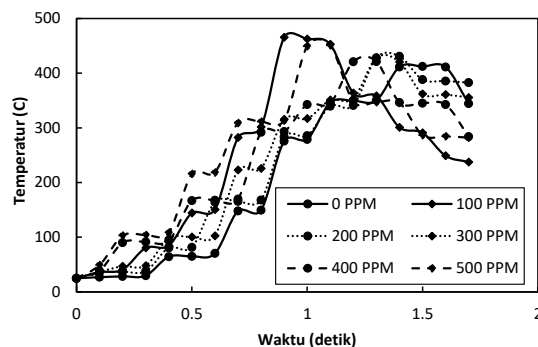
Waktu yang diperlukan untuk pembakaran droplet semakin berkurang dengan meningkatnya kandungan MWCNT-OH. Penambahan MWCNT-OH sebagai zat aditif pada campuran metil oleat - etanol mampu meningkatkan nilai *heating value* dan konduktivitas termal bahan bakar. Konduktivitas termal yang tinggi berperan penting dalam meningkatkan perpindahan panas dan peningkatan temperatur droplet selama proses pembakaran. Nano fluida memiliki kemampuan menyerap panas radiasi yang lebih besar bila dibandingkan campuran metil oleat – etanol. Selain itu, konduktivitas termal nano fluida yang lebih tinggi dan pergerakan partikel nano di dalam droplet dapat

mempercepat transfer panas di dalam droplet. Hal ini mengakibatkan pembakaran terjadi lebih cepat, menghasilkan laju pelepasan kalor yang lebih tinggi, sehingga waktu yang diperlukan untuk menguapkan dan membakar uap bahan bakar menjadi lebih singkat. Kondisi tersebut menghasilkan *burning time droplet* menjadi lebih pendek atau singkat.

Dalam aplikasi pembakaran bahan bakar biodiesel di dalam *internal combustion engine*, *ignition delay* dan *burning time* yang pendek merupakan hal yang sangat menguntungkan. Karena waktu yang tersedia untuk pembakaran dalam setiap siklus kerja *internal combustion engine* menjadi lebih pendek. Pengurangan *ignition delay* dan *burning time* dapat menghasilkan emisi gas hasil pembakaran yang lebih bersih, karena pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar menjadi lebih sempurna.

Temperatur droplet

Temperatur droplet diukur menggunakan *thermocouple junction* yang sekaligus berfungsi sebagai penyangga droplet. Temperatur yang terukur merupakan temperatur droplet yang dipengaruhi juga oleh temperatur nyala api disekeliling droplet.



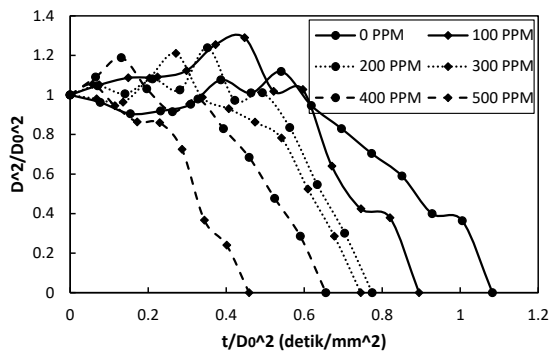
Gambar 4. Pengaruh penambahan MWCNT-OH terhadap temperatur droplet

Proses perubahan temperatur droplet dimulai dari awal pemanasan menggunakan *coil heater*, terjadi proses penguapan droplet dan pembentukan *flammable mixture*, terbentuk nyala api hingga api padam. Droplet akan menguap ketika *boiling point temperature* tercapai dan proses gasifikasi akan terjadi pada setiap komponen bahan bakar. Adanya etanol dalam campuran bahan bakar menyebabkan sebagian droplet menguap lebih cepat dan bahan bakar menyala lebih awal. Hal ini berhubungan dengan *boiling point* dan *ignition temperature* dari etanol yang lebih rendah dari pada campuran droplet. Ketika droplet menyerap kalor secara konveksi dan radiasi dari lingkungan bertemperatur tinggi, temperatur droplet akan meningkat. Proses penguapan mulai terjadi saat etanol mencapai temperatur didihnya, sementara metil oleat yang belum mencapai temperatur didihnya temperaturnya akan terus meningkat.

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai temperatur droplet cenderung meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi MWCNT-OH. Sifat dari MWCNT-OH yaitu memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan memiliki luas permukaan yang besar. Dengan konduktivitas termal yang tinggi, terjadi peningkatan suhu pembakaran akibat distribusi panas yang meningkat dari sumber panas menuju droplet. Hal ini menyebabkan reaksi pembakaran bisa cepat terjadi. Besarnya luas permukaan MWCNT berpengaruh pada besarnya kontak area sebagai tempat pengoksidasian molekul bahan bakar sehingga pembakaran terjadi lebih efisien.

Evolusi diameter droplet.

Evolusi diameter droplet menunjukkan perubahan diameter droplet selama proses pembakaran. Pengukuran diameter droplet dalam penelitian ini menggunakan metode pengukuran *projected area method*, yaitu dengan membuat plot gambar yang dibinarisasi terlebih dahulu dan menentukan jumlah pixel dalam suatu luasan area tertentu, kemudian membuat lingkaran ekuivalen (memiliki luas yang sama) yang akan digunakan untuk menghitung luas lingkaran ekuivalen dan diameter droplet. Melalui tahapan ini dapat diketahui evolusi atau perubahan diameter droplet yang merupakan dasar untuk menentukan nilai *burning rate constant*.



Gambar 5. Pengaruh penambahan MWCNT-OH terhadap evolusi diameter droplet pada pembakaran campuran metil oleat - etanol

Gambar 5 menunjukkan bahwa setiap campuran menunjukkan penurunan diameter droplet dengan bertambahnya waktu pembakaran. Tetapi, pada awal proses pembakaran terlihat adanya pembesaran diameter droplet dan selama beberapa waktu diameter droplet mengalami kontraksi dan ekspansi (diameter droplet fluktuatif terhadap waktu). Pembesaran diameter droplet pada awal proses pembakaran terjadi karena adanya ekspansi volume droplet karena peningkatan temperatur menyebabkan penurunan nilai densitas liquid. Selain itu adanya etanol didalam droplet yang menguap terlebih dahulu dan terjebak di dalam droplet, menyebabkan terbentuknya gelembung uap di dalam droplet. Seiring dengan semakin banyaknya jumlah uap dan semakin membesarnya ukuran gelembung, diameter droplet

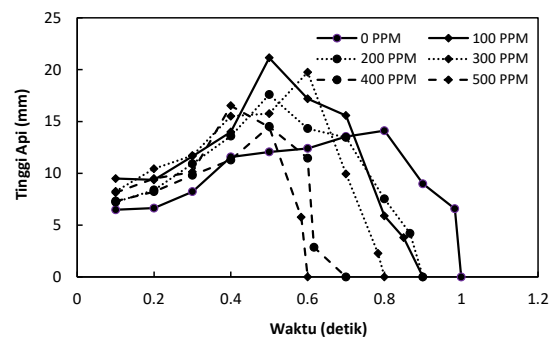
akan semakin membesar. Kontraksi (pengecilan diameter droplet) terjadi karena terjadinya *microexplosion* yang menyebabkan keluarnya gas/uap yang terjebak didalam droplet, yang mungkin diikuti dengan terlemparnya sebagian droplet yang masih berbentuk cair. Hal ini mengakibatkan terjadinya fluktuasi ukuran droplet pada awal proses pembakaran.

Peran MWCNT-OH adalah meningkatkan penyerapan kalor yang baik dengan membuat laju peningkatan temperatur dan penguapan droplet menjadi lebih cepat. Saat didekatkan pada sumber panas, droplet akan menguap dan membentuk *flammable mixture*, selanjutnya terjadi pembakaran atau nyala api setelah *flammable mixture* mencapai temperatur nyalanya. Pada Gambar 5 terlihat bahwa dengan semakin tingginya kandungan MWCNT-OH fluktuasi diameter droplet diawal pembakaran berkurang secara signifikan, dan diameter droplet menurun dengan gradien yang tajam. Hal tersebut dimungkinkan oleh efektifnya proses penyerapan dan perpindahan panas didalam droplet, yang menghasilkan penguapan yang lebih cepat dan memicu *microexplosion* dalam skala yang lebih besar. Hal tersebut menghasilkan pengurangan diameter droplet yang signifikan.

Evolusi perubahan diameter droplet berhubungan erat dengan nilai *burning rate constant*. Kemiringan kurva perubahan diameter droplet yang lebih curam, menghasilkan nilai *burning rate constant* yang lebih besar, dan waktu pembakaran yang lebih singkat. Kondisi ini merupakan hal yang diperlukan untuk menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna dalam *internal combustion engine*. Lebih lanjut kondisi tersebut dapat menghasilkan emisi gas hasil pembakaran yang lebih bersih.

Dimensi nyala api.

Nyala api menunjukkan daerah atau zona reaksi antara uap bahan bakar dan udara sebagai *oxidizer*. Dimensi nyala api selama proses pembakaran ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengaruh penambahan MWCNT-OH terhadap tinggi nyala api pada pembakaran droplet campuran metil oleat - etanol

Tinggi api pada pembakaran droplet sangat bergantung pada karakteristik penyebaran api. Dimensi api memanjang secara vertikal seiring dengan bertambahnya waktu pembakaran. Dimensi nyala api meningkat pada tahap awal pembakaran droplet yang disebabkan oleh pemanasan droplet dan pengaruh akumulasi uap bahan bakar pada sekitar permukaan droplet selama periode *ignition delay time*.

Pada awal pembakaran, dimensi nyala api meningkat secara signifikan akibat terpaparnya droplet oleh sumber panas dan pengaruh akumulasi uap bahan bakar di sekitar permukaan droplet selama periode *ignition delay time*. Perubahan profil api selama proses pembakaran dipengaruhi oleh jumlah akumulasi uap pada droplet. Dengan meningkatnya temperatur droplet, laju difusi bahan bakar dan laju penguapan meningkat. Selanjutnya akumulasi uap bahan bakar dalam jumlah besar akan meningkatkan laju pembakaran dan meningkatkan dimensi api. Penambahan MWCNT-OH mempengaruhi peningkatan laju penguapan dari bahan bakar droplet akibat konduktivitas termal yang tinggi. Sedangkan etanol berperan sebagai bahan dengan kaya kandungan oksigen mampu mereduksi tinggi api karena kebutuhan oksigen pada pembakaran di sekitar droplet lebih terpenuhi. Campuran etanol menghasilkan bahan bakar dengan densitas yang rendah. Rendahnya densitas berpengaruh pada berkurangnya pembentukan jelaga. Semakin sedikit jelaga yang terbentuk, tinggi nyala api semakin kecil.

4. Kesimpulan

Dari hasil diskusi pada bagian hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Penambahan MWCNT-OH berpengaruh dalam menurunkan *ignition delay* dan *droplet burning time* pada pembakaran droplet campuran metil oleat dan etanol.
- Penambahan MWCNT-OH dapat meningkatkan proses penyerapan kalor oleh droplet, sehingga menghasilkan peningkatan temperatur dan *constant burning rate* yang lebih tinggi.
- Peningkatan kandungan MWCNT-OH menghasilkan peningkatan laju evolusi diameter droplet, atau pengurangan ukuran diameter droplet menjadi lebih besar.
- Peningkatan kandungan MWCNT-OH mengakibatkan penurunan dimensi nyala api.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala dan PLP Laboratorium Mesin-mesin Fluida yang telah membantu pelaksanaan penelitian untuk publikasi dalam seminar SNTTM XI.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Han, L.M.T. Somers, R. Cracknell, A. Joedicke, R. Wardle, "Experimental investigation of ethanol/diesel dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine", *Fuel*, Vol. 275, September, p. 117867, 2020, doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867.
- [2] M. Tongroon, A. Suebwong, M. Kananont, J. Aunchaisri, "High quality jatropha biodiesel (H-FAME) and its application in a common rail diesel engine", *Renew. Energy*, Vol. 113, December p. 660–668, 2017, doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.006.
- [3] A. Mahalingam, Y. Devarajan, S. Radhakrishnan, S. Vellaiyan, B. Nagappan, "Emissions analysis on mahua oil biodiesel and higher alcohol blends in diesel engine", *Alexandria Eng. J.*, Vol. 57, Issue 4, December, p. 2627–2631, 2018, doi.org/10.1016/j.aej.2017.07.009.
- [4] I.A. Ibadurrohman, N. Hamidi, L. Yuliati, "The role of the unsaturation degree on the droplet combustion characteristics of fatty acid methyl ester", *Alexandria Eng. J.*, Vol. 61, Issue 3, March, p. 2046–2060, 2022, doi.org/10.1016/j.aej.2021.07.038.
- [5] A.J. Folayan, P.A.L. Anawe, A.E. Aladejare, A.O. Ayeni, "Experimental investigation of the effect of fatty acids configuration, chain length, branching and degree of unsaturation on biodiesel fuel properties obtained from lauric oils, high-oleic and high-linoleic vegetable oil biomass", *Energy Reports*, Vol. 5, November, p. 793–806, 2019, doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.013.
- [6] M. Plank, G. Wachtmeister, E. Remmele, K. Thuncke, P. Emberger, "Ignition characteristics of straight vegetable oils in relation to combustion and injection parameters, as well as their fatty acid composition", *Fuel Processing Technology*, Vol. 167, December, p. 271–280, 2017, doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.07.007.
- [7] K. Han, Y. Liu, C. Wang, J. Tian, Z. Song, Q. Lin, K. Meng, "Experimental study on the evaporation characteristics of biodiesel-ABE blended droplets", *Energy*, Vol. 236, December, p. 121453, 2021, doi.org/10.1016/j.energy.2021.121453.
- [8] E. Torres-Jimenez, M.S. Jerman, A. Gregorc, I. Lisek, M.P. Dorado, B. Kegl, "Physical and chemical properties of ethanol-diesel fuel blends", *Fuel*, Vol. 90, February, p. 795–802, 2011, doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.045.
- [9] H. Kuszewski, "Experimental investigation of the autoignition properties of ethanol-biodiesel fuel blends", *Fuel*, Vol. 235, January, p. 1301–1308, 2019, doi.org/10.1016/j.fuel.2018.

08.146.

- [10] I.A. Ibadurrohman, N. Hamidi, L. Yuliati, Winarto, M. Mikami, "The impact of ethanol addition on the droplet combustion mechanism of saturated and unsaturated fatty acid/fatty acid methyl ester molecules", *Fuel*, Vol. 334, February, p. 126731, 2023, doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126731.
- [11] K. Meng, Y. Wu, Q. Lin, F. Shan, W. Fu, K. Zhou, "Microexplosion and ignition of biodiesel/ethanol blends droplets in oxygenated hot co-flow", *Journal of the Energy Institute*, Vol. 92, Issue 5, October, p. 1527–1536, 2019, doi.org/10.1016/j.joei.2018.07.021.
- [12] A.I. El-seesy, A.K. Abdel-rahman, M. Bady, S. Ookawara, "Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel mixtures with multi-walled carbon nanotubes additives", *Energy Conversion and Management*, Vol. 135, March, p. 373–393, 2017, doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.090.
- [13] S.K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Ceniceros, M. Natarajan, "Review of biodiesel composition, properties, and specifications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, Issue 1, January, p. 143–169, 2012, doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143.