

Eksperimental pembakaran droplet pengaruh komposisi asam lemak dan sifat fisika kimia minyak kapas dan jarak pagar terhadap karakteristik nyala api

Dony Perdana

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Maarif Hasyim Latif
Jl. Ngelom Megare No. 30, Taman, Sidoarjo, Indonesia
Corresponding author: dony_perdana@dosen.umaha.ac.id

Abstract

Depletion of fossil fuels is required to find alternative fuels that are environmentally friendly and sustainable. This research has been conducted to provide pieces of information on the characteristic of flame on fatty acid content and physicochemical properties of cottonseed oil and jatropha curcas. Droplets combustion of vegetable oil was used in this test, with droplet diameters of 0.3-0.4 mm, which were placed in a K-type thermocouple, then heated with a heating wire. Data collection includes flame evolution, temperature, height and ignition delay time. The results showed that jatropha curcas oil produced a longer flame time of 1206 milliseconds and a temperature of 763°C higher than cottonseed oil. The highest flame produced by cottonseed oil was 53.55 mm, while jatropha oil was 50.20 mm. Jatropha curcas oil has a shorter ignition delay than cottonseed oil, 9063 milliseconds and 11375 milliseconds, respectively. Content of various fatty acids and physicochemical properties of vegetable oils fuel affect the characteristics of flames resulting from on combustion process.

Keywords: vegetable oils; fatty acids; physical-chemical properties; droplet combustion; flame characteristics.

Abstrak

Semakin menipisnya bahan bakar fosil sehingga dituntut untuk menemukan bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dan produksi berkelanjutan. Tujuan dilakukan penelitian ini untuk memberikan informasi karakteristik nyala api terhadap kandungan asam lemak dan sifat fisika-kimia pada minyak biji kapas dan jarak pagar. Pembakaran *droplet* minyak nabati digunakan dalam pengujian ini, dengan diameter *droplet* 0,3-0,4 mm yang ditempatkan di *thermocouple type K*, kemudian dipanaskan dengan kawat pemanas. Pengambilan data meliputi evolusi nyala api, temperatur, tinggi dan waktu tunda penyalaan. Hasil penelitian diperoleh minyak jarak pagar menghasilkan waktu nyala api lebih lama yaitu sebesar 1206 milidetik dan temperatur lebih tinggi 763°C dibandingkan minyak biji kapas. Nyala api tertinggi dihasilkan oleh minyak biji kapas sebesar 53,55 mm, sedangkan minyak jarak pagar 50,20 mm. Minyak jarak pagar mempunyai waktu tunda penyalaan lebih singkat daripada minyak biji kapas yaitu masing masing 9063 milidetik dan 11375 milidetik. Kandungan berbagai asam lemak dan sifat fisika kimia dari bahan bakar minyak nabati mempengaruhi karakteristik nyala api yang dihasilkan dari proses pembakaran.

Kata kunci: minyak nabati; asam lemak; sifat fisika kimia; pembakaran *droplet*; karakteristik nyala api.

Pendahuluan

Pemakaian bahan bakar minyak dan fosil secara berlebihan dan tanpa ada pembaharuan dari energi alternatif lainnya

bisa membuat krisis energi di masa mendatang. Pembakaran bahan bakar fosil yang terus berlanjut untuk memenuhi permintaan energi global dipertanyakan

karena masalah emisi gas rumah kaca dan polutan yang terkenal, seperti NO_x, CO dan jelaga. Banyak bahan bakar alternatif telah diterapkan untuk mengurangi penggunaan minyak bumi, dan upaya intensif telah dilakukan dibuat untuk mengurangi total emisi dari mesin diesel. Berbagai bahan bakar beroksigen terbarukan telah digunakan sesuai dengan keamanan, biaya, aksesibilitas dan kompatibilitasnya dengan mesin diesel [1]. Minyak nabati ditemukan sebagai pilihan yang baik untuk mesin diesel yang ada dan terbukti memenuhi tiga faktor utama: pengurangan emisi, pembangunan berkelanjutan, dan permintaan energi [2]. Saat ini, perhatian baru pada pengurangan gas rumah kaca dan peningkatan pembangunan bersih untuk mempromosikan penggunaan bahan bakar terbarukan seperti bio-alkohol, minyak nabati, biomassa, biogas dan biodiesel. Biofuel adalah bahan bakar alternatif yang paling penting sebagai pengganti minyak bumi, karena sifat bahan bakarnya yang mirip dengan fosil [3].

Minyak nabati merupakan bahan bakar alternatif yang meyakinkan tidak hanya terbarukan tetapi juga mudah diproduksi [4]. Komposisi asam lemak mempengaruhi sifat fisika-kimia pada minyak nabati. Asam lemak diklasifikasikan ada dua yaitu: asam lemak jenuh dan tak jenuh menurut jumlah rantai karbon ganda. Asam lemak jenuh tidak memiliki rantai karbon ganda sedangkan asam lemak tak jenuh memiliki satu atau lebih rantai karbon ganda. Komposisi asam lemak umum setiap minyak nabati berbeda-beda [5,6,7]. Asam lemak stearat, oleat dan linoleat merupakan komposisi utama minyak nabati. Tingkat kejenuhan menyebabkan minyak nabati menjadi *polar* [8]. Asam lemak tak jenuh tunggal dominan *non-polar* sedangkan jenuh dan tak jenuh ganda lebih menonjol di kutub [9]. Komposisi asam lemak dalam minyak nabati dapat mempengaruhi persentase massa berlainan [10]. Selama empat dekade terakhir telah banyak melakukan penelitian tentang karakteristik pembakaran pada mesin diesel menggunakan minyak nabati atau

turunannya. Penelitian pembakaran *coconut methyl ester* [11] dicampur dengan minyak solar dengan perbandingan adalah 0,8; 1 dan 1,2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan *coconut methyl ester* dapat mengurangi suhu api. Suhu api pembakaran meningkat dengan meningkatnya rasio ekivalensi dari 0,8-1,2. Membandingkan kinerja pembakaran berbagai biodiesel minyak sawit dengan solar dalam pembakaran, menemukan bahwa meningkatnya kandungan biodiesel minyak sawit dalam campuran bahan bakar mengurangi suhu pembakaran dan tingkat emisi NO_x, SO₂, dan CO [12]. Temuan ini serupa [13] berbagai campuran biodiesel minyak sawit dengan solar dalam pembakaran pada tiga laju aliran *nozzle* yang berbeda (1,25, 1,50, dan 1,75 US gal/jam). Semua campuran biodiesel minyak sawit memiliki suhu dinding pembakaran yang lebih rendah daripada solar untuk semua laju aliran nosel dan emisi NO_x dan CO yang lebih rendah.

Dari penjelasan diatas, semua peneliti melakukan penelitian performa dan kinerja hanya pada mesin pembakaran dalam. Karakteristik api berperan vital dalam stabilitas pembakaran yang mempengaruhi performa mesin belum banyak dibahas. Penelitian mengenai droplet combustion dengan bahan bakar minyak nabati murni ini belum banyak dilakukan oleh peneliti. Perhatian khusus harus diberikan pada penelitian tentang pembakaran tetesan minyak nabati mentah sebagai bahan bakar alternatif. Penelitian lebih lanjut diperlukan, terutama perihal pengaruh asam lemak dan sifat fisika-kimia pada minyak biji kapas dan jarak pagar dalam menstabilkan proses pembakaran. Studi ini memberikan data kestabilan pada pembakaran *droplet* yang sangat mendukung dalam proses pembakaran minyak nabati. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai dampak penggunaan biofuel pada ruang bakar, khususnya pada mesin pembakaran dalam mesin selama penggunaan jangka panjang.

Tinjauan Pustaka

Pembakaran *droplet* merupakan reaksi pembakaran yang terjadi karena adanya pergeseran massa bahan bakar, udara dan panas yang didominasi oleh nyala api difusi berbentuk bola. Pembakaran *droplet* merupakan gabungan antar proses fisika dan kimia. Proses tersebut berupa penurunan diameter bola yang semula simetris menjadi tidak simetris, hal ini disebabkan berbagai faktor, diantaranya evaporasi, difusi, radiasi, sifat heterogen dan komposisi kimia aerosol [14].

Laju evaporasi dan pembakaran meningkat dikarenakan pengaruh luas permukaan bahan bakar juga semakin meningkat pada sistem pembakaran. Reaksi pembakaran timbul saat *droplet* dipanaskan menghasilkan uap bahan bakar, kemudian berdifusi dengan udara. Keadaan konveksi alami mempengaruhi reaksi udara dengan bahan bakar yang tidak terbakar akan mengarah naik ke ujung nyala api. Bentuk nyala api pada pembakaran *droplet* diakibatkan oleh gravitasi dekat *droplet*. Tidak adanya gaya apung saat *microgravity* menyebabkan bentuk nyala api akan berupa lingkaran. Akan tetapi, pada waktu keadaan gravitasi normal, bentuk nyala api elips dan panjang keatas, hal ini dipengaruhi dorongan gas panas ke atas oleh gaya apung. Nyala api yang dihasilkan dalam keadaan konveksi paksa tidak terbentuk bulat hal ini disebabkan karena nyala api mengikuti arah aliran.

Metode Penelitian

1. Komposisi asam lemak dan sifat fisika-kimia minyak nabati

Minyak nabati yang diujikan adalah minyak biji kapas dan jarak pagar, diperoleh dari produk komersial. Komposisi asam lemak jenuh (*saturated*), asam lemak tak jenuh (*unsaturated*) dan sifat fisika-kimia dari minyak nabati [15].

2. Peralatan Eksperimental

Eksperimen dilakukan dengan memakai perangkat eksperimental secara

skematis ditunjukkan pada Gambar 1. *Droplet* minyak biji kapas dan jarak pagar dipasang pada *thermocouple type K* dari material Pt/Rh13% berdiameter 0.1 mm. *Droplet* memiliki diameter sekitar 0,3-0,4 mm, kemudian dinyalakan menggunakan pemanas kawat listrik berbahan Ni-Cr diameter 0.7 mm. Panjang kawat adalah 30 mm yang memiliki hambatan 1.02. Pemanas kawat listrik dinyalakan dengan catu daya 6 V DC dengan arus listrik 5 A.

3. Akuisisi Data

Thermocouple type K dihubungkan ke perekam data *arduino UNO R3 atmega 328* dengan frekuensi 0,01 Hz untuk mengirim sinyal suhu nyala api ke laptop. Gambar nyala api direkam dengan menggunakan kamera video berkecepatan tinggi (120 *fps*) Fuji ZR, mulai api menyala sampai padam dan disimpan di *sim card*. Aplikasi *Free Video to JPG Converter* digunakan dari hasil perekaman untuk mengolah pengukuran dengan satuan milidetik. Perangkat lunak berupa *Image J bundled* dengan 64-bit *Java 1.8.0-112* mengubah *file* gambar menjadi beberapa bingkai. Evolusi nyala api, temperatur, tinggi dan waktu tunda penyalaan diukur menggunakan aplikasi *Corel Draw*. Dalam semua kasus dilakukan pengukuran sampai 10 kali percobaan.



Gambar 1. Instalasi pembakaran droplet: (1) elemen pemanas (2) thermocouple (3) droplet (4) data logger (5) laptop dan (6) kamera berkecepatan tinggi

Hasil dan Pembahasan

1. Pengaruh komposisi minyak nabati terhadap evolusi nyala api

Terlihat pada Gambar 2 visualisasi evolusi nyala api terhadap perubahan waktu selama pembakaran. Kestabilan nyala api terjadi pada minyak jarak pagar hal ini ditunjukkan dengan waktu mulai terbakar pada 67 milidetik sampai padam setelah 1206 milidetik. Sedangkan pada minyak biji kapas setelah melewati waktu 938 milidetik nyala api padam. Pembakaran asam lemak

tak jenuh menyebabkan waktu nyala api panjang dan konstan, karena asam oleat (oleic acid) tinggi serta titik nyala (flash point) yang rendah. Fakta ini menunjukkan bahwa asam lemak tak jenuh (unsaturated) dalam minyak nabati bersifat lebih reaktif dan memiliki titik nyala terendah sehingga mudah menguap dan bercampur dengan udara untuk terbakar [16]. Minyak nabati terbakar dalam tiga tahap, yaitu pembakaran asam lemak tak jenuh, asam lemak jenuh dan gliserol.

Tabel 1. Komposisi kimia minyak nabati

| Fatty acid types | Flash point (°C) | Vegetable oils | |
|------------------|------------------|-------------------------|----------------|
| | | Jatropha curcas oil (%) | Cotton oil (%) |
| Saturated acid | Caprylic acid | 176 | - |
| | Capric acid | 181 | - |
| | Lauric acid | 185 | - |
| | Myristic acid | 196 | 0.1 |
| | Palmitic acid | 201 | 15 |
| | Stearic acid | 206 | 7 |
| | Arachidic acid | 208 | 0.2 |
| Unsaturated acid | Oleic acid | 80 | 44.7 |
| | Linoleic acid | 77 | 32.8 |
| | Linolenic acid | 61 | 0.2 |
| | Eicosanoic acid | 85 | 0.1 |

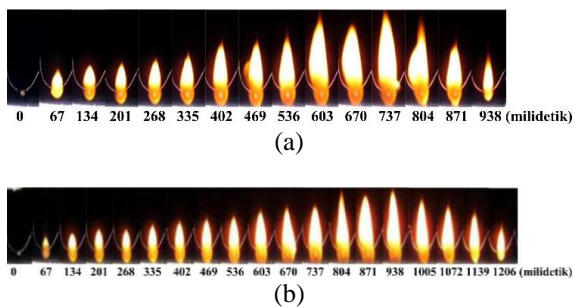
Tabel 2. Sifat fisika minyak nabati

| | ASTM methode | Instrument | Model | Value | |
|--------------------------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------|
| | | | | Jatropha curcas oil | Cotton seed oil |
| Density at 40°C (kg/m ³) | D1298 | Hydrometer | Nikky, Japan | 921 | 955 |
| Kinematic vizcosity at 40°C (cSt) | D445 | Kinematic viscometer | Leybold Didactic, Germany | 35.48 | 41.65 |
| Flash point (°C) | D93 | Pensky-Martens closed cup tester | Leybold Didactic Germany | 240 | 250 |
| Caloric value (kcal/kg) | D240 | Bom calorimeter | Parr Instrumen UAS | 9,860.25 | 9,478.87 |
| pH | D6423 | pHep tester | UAS HANNA Instrument UAS | 4.5 | 4.0 |

Evolusi pembakaran minyak biji kapas dan jarak pagar menunjukkan dua perbedaan yang signifikan, yang pertama

adalah bentuk apinya dan kemudian luas zona reaksi utama. Minyak biji kapas apinya lebih lebar (Gambar 2a) sedangkan pada

minyak jarak pagar memiliki bentuk api lurus/ramping (Gambar 2b). Bentuk dan luas daerah nyala api pada setiap minyak nabati mempunyai kandungan asam lemak jenuh (*saturated*) dan tak jenuh (*unsaturated*) berbeda-beda. Minyak biji kapas menghasilkan nyala api lebar, hal ini disebabkan pertama karena asam palmitat (*palmitic acid*) dengan titik nyala (*flash point*) tinggi. Titik nyala api semakin tinggi, semakin panjang waktu yang diperlukan untuk terbakar. Banyaknya kandungan asam lemak jenuh maka bertambah lebar nyala api yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa penguapan minyak biji kapas lebih sulit daripada minyak jarak pagar, karena minyak biji kapas memiliki nilai viskositas dan titik nyala lebih tinggi, menyebabkan uap bahan bakar bereaksi dengan oksidator dibutuhkan waktu yang lama.



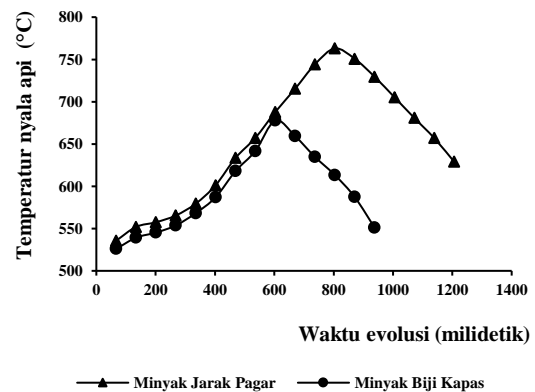
Gambar 2. Evolusi nyala api pada: (a) minyak biji kapas dan (b) minyak jarak pagar

2. Pengaruh komposisi minyak nabati terhadap temperatur nyala api

Temperatur minyak biji kapas dan jarak pagar ditunjukkan pada Gambar 3. Minyak jarak pagar mulai terbakar pada temperatur 535,75 °C dibandingkan dengan minyak biji kapas pada 526 °C. Ada kemungkinan minyak jarak pagar menyerap lebih banyak energi di awal pembakaran daripada minyak biji kapas. Temperatur yang dihasilkan oleh kedua minyak trendnya naik kemudian turun bersamaan dengan berkurangnya diameter *droplet* saat pembakaran. Minyak jarak pagar menghasilkan temperatur tertinggi sebesar 763 °C sedangkan minyak biji kapas 677,75 °C, kemudian nyala api padam dengan diikuti penurunan temperatur masing-

masing sebesar 629 °C dan 551 °C. Temperatur maksimum terjadi menjelang akhir pembakaran, karena *droplet* seluruhnya terbakar. Hal ini terjadi karena peningkatan laju penguapan dan luas permukaan mengubah perilaku molekul, semakin tinggi laju penguapan mengakibatkan diameter *droplet* semakin kecil. Temperatur nyala minyak nabati dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu rantai karbon dan jumlah ikatan ganda (menunjukkan derajat ketidajenuhan).

Disamping itu temperatur dipengaruhi oleh nilai kalor bahan bakar, laju pembakaran, titik nyala, dan kehilangan panas akibat radiasi. Peningkatan panas hasil pembakaran asam lemak tak jenuh pada minyak nabati ditunjukkan dengan meningkatnya banyaknya kandungan karbon. Asam lemak tak jenuh mempunyai ikatan ganda menyebabkan molekul menjadi lemah dan membuatnya tidak stabil, sangat reaktif dan lebih mudah teroksidasi, sehingga lebih cepat terbakar. Hal ini dipengaruhi asam lemak tak jenuh mempunyai titik nyala paling rendah (Tabel 1).



Gambar 3. Temperatur nyala api terhadap waktu evolusi

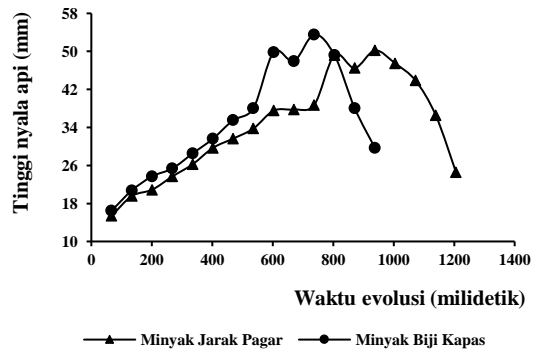
Laju pembakaran yang meningkat menghasilkan temperatur tinggi pada nyala api. Laju pelepasan energi dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu titik nyala, nilai kalor (Tabel 2) dan durasi pembakaran (Gambar 2). Minyak jarak pagar memiliki titik nyala rendah dan nilai kalori yang lebih tinggi dibandingkan dengan minyak biji kapas,

sehingga menghasilkan temperatur tinggi dibandingkan minyak biji kapas. Nilai kalor semakin tinggi, temperatur yang dihasilkan semakin meningkat.

3. Pengaruh komposisi minyak nabati terhadap tinggi nyala api

Gambar 4 menunjukkan ketinggian nyala api pada pembakaran *droplet* minyak biji kapas dan jarak pagar yang diukur dari evolusi nyala api (Gambar 2). Tinggi nyala api pada minyak biji kapas dan jarak pagar trendnya mengalami peningkatan, setelah mencapai tinggi maksimum nyala api mengalami penurunan. Nyala api tertinggi sebesar 53,55 mm pada minyak biji kapas disaat 737 milidetik selepas itu trendnya mengalami penurunan sebesar 29,7 mm pada waktu 938 milidetik kemudian nyala api padam. Sedangkan tinggi nyala api pada minyak jarak pagar lebih rendah daripada minyak biji kapas yaitu sebesar 50,2 mm pada saat 938 milidetik. Asam lemak tak jenuh pada minyak jarak pagar lebih besar daripada minyak biji kapas (Tabel 1).

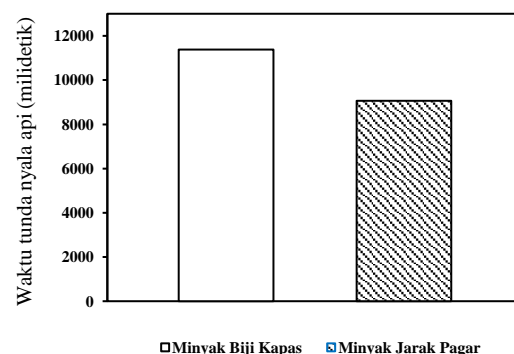
Perbedaan ketinggian nyala api ini diakibatkan: pertama, asam lemak jenuh dan tak jenuh yang berbeda. Asam lemak tak jenuh semakin tinggi, menyebabkan penguapan terjadi sangat singkat. Sehingga proses reaksi difusi dengan udara menghasilkan pembakaran lebih cepat menyebabkan tinggi nyala api lebih pendek. Sedangkan minyak biji kapas dengan komposisi asam lemak jenuh dominan, hal ini menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk terbakar lebih lama. Hal ini menegaskan asam lemak tak jenuh makin reaktif daripada asam lemak jenuh. Kedua, tingginya titik nyala asam lemak jenuh menyebabkan keterlambatan waktu penguapan. Ketiga, jumlah rantai karbon dan ikatan ganda pada minyak nabati mempengaruhi tinggi nyala api. Kandungan karbon yang tinggi meningkatkan panas pada pembakaran asam lemak tak jenuh.



Gambar 4. Tinggi nyala api terhadap waktu evolusi

4. Pengaruh komposisi minyak nabati terhadap waktu tunda nyala api

Waktu tunda nyala api pada pembakaran *droplet* dengan mengukur periode antara awal pemanasan (saat *droplet* berada di kawat pemanas) dan awal mulai terbentuk nyala api (munculnya nyala api pertama) ditunjukkan pada Gambar 5. Waktu tunda nyala api pada minyak biji kapas sebesar 11375 milidetik lebih lama daripada minyak jarak pagar sebesar 9063 milidetik. Waktu tunda penyalaan yang singkat pada minyak nabati disebabkan oleh: pertama, viskositas yang berperan penting dalam pembakaran. Bahan bakar dengan viskositas rendah menyebabkan waktu tunda pengapian lebih singkat. Viskositas minyak jarak pagar yang lebih rendah daripada minyak biji kapas (lihat Tabel 2), sehingga mempercepat reaksi pembakaran karena asam lemak tak jenuh.



Gambar 5. Waktu tunda nyala api terhadap evolusi nyala api

Karakteristik mempengaruhi sifat fisik minyak nabati seperti viskositas,

densitas, dan nilai kalor [17], sehingga secara signifikan mempengaruhi waktu tunda penyalaan. Kedua, titik nyala pada bahan bakar pada masing-masing minyak nabati yang berbeda-beda, dengan titik nyala yang rendah pada minyak jarak pagar mengakibatkan waktu tunda pengapian lebih cepat. Hal ini disebabkan minyak jarak pagar memiliki potensi yang lebih besar untuk menarik oksigen, menyebabkan bahan bakar bereaksi dengan oksigen makin cepat, sehingga terbentuk nyala api [18]. Ketiga, banyaknya molekul ikatan ganda atau lebih menyebabkan ikatan menjadi lemah, tidak stabil, reaktif dan mudah teroksidasi, sehingga menghasilkan reaksi pembakaran lebih singkat.

Kesimpulan

Penelitian eksperimental yang komprehensif dilakukan untuk membandingkan sifat kandungan asam lemak minyak nabati murni untuk bahan bakar alternatif. Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dibahas, kesimpulan dari hasil investigasi disimpulkan. Perbedaan sifat fisika kimia pada berbagai minyak nabati akan menghasilkan karakteristik pembakaran yang berbeda-beda. Minyak jarak pagar mempunyai kandungan asam lemak tak jenuh tinggi dan titik nyala api rendah sehingga menghasilkan tinggi nyala api pendek, umur nyala api yang lebih panjang dan waktu tunda penyalaan lebih pendek. Jumlah rantai karbon ikatan ganda dan nilai kalor mempengaruhi tingginya temperatur nyala api.

Ucapan terimakasih

Terimakasih kepada Rektor dan Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Maarif Hasyim Latif yang membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

Referensi

[1] E. Alptekin, "Emission, injection and combustion characteristics of

- biodiesel and oxygenated fuel blends in a common rail diesel engine," *Energy*, vol. 119, pp. 44–52, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.069.
- [2] G. Ramya, T. Sivakumar, M. Arif, and Z. Ahmed, "Application of Microporous Catalysts in the Production of Biofuels from Non Edible Vegetable Oils and Used Restaurant Oil," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 37, no. 8, pp. 878–885, 2015, doi: 10.1080/15567036.2011.590855.
- [3] C. A. Scaldaferrri and V. M. D. Pasa, "Production of jet fuel and green diesel range biohydrocarbons by hydroprocessing of soybean oil over niobium phosphate catalyst," *Fuel*, vol. 245, pp. 458–466, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.179.
- [4] M. Gülüm and A. Bilgin, "Measurements and empirical correlations in predicting biodiesel-diesel blends' viscosity and density," *Fuel*, vol. 199, pp. 567–577, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.03.001.
- [5] A. Atmanli, E. Ileri, and B. Yüksel, "Experimental investigation of engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with diesel-n-butanol-vegetable oil blends," *Energy Convers Manag*, vol. 81, pp. 312–321, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.02.049.
- [6] D. C. Rakopoulos, C. D. Rakopoulos, E. G. Giakoumis, A. M. Dimaratos, and M. A. Founti, "Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: Sunflower, cottonseed, corn and olive," *Fuel*, vol. 90, no. 11, pp. 3439–3446, 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2011.06.009.
- [7] A. Koder *et al.*, "Combustion and emission characteristics of a 2.2L common-rail diesel engine fueled with jatropha oil, soybean oil, and diesel fuel at various EGR-rates,"

- Fuel*, vol. 228, pp. 23–29, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.147.
- [8] L. C. Meher, C. P. Churamani, M. Arif, Z. Ahmed, and S. N. Naik, “Jatropha curcas as a renewable source for bio-fuels - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 397–407, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.065.
- [9] J. Parcerisa, D. G. Richardson, M. Rafecas, R. Codony, and J. Boatella, “Fatty acid, tocopherol and sterol content of some hazelnut varieties (*Corylus avellana* L.) harvested in Oregon (USA),” *Journal of Chromatography A*, vol. 805, no. 1-2, pp. 259–268, 1998, doi.org/10.1016/S0021-9673(98)00049-1.
- [10] M. Plank, G. Wachtmeister, K. Thuneke, E. Remmele, and P. Emberger, “Effect of fatty acid composition on ignition behavior of straight vegetable oils measured in a constant volume combustion chamber apparatus,” *Fuel*, vol. 207, pp. 293–301, 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.06.089.
- [11] M. S. A. Malik, A. I. Mohamad Shaiful, M. S. Mohd Ismail, M. N. Mohd Jaafar, and A. M. Sahar, “Combustion and emission characteristics of coconut-based biodiesel in a liquid fuel burner,” *Energies*, vol. 10, no. 4, 2017, doi: 10.3390/en10040458.
- [12] M. Nazri Mohd Ja, W. Zaidi Wan Omar, M. Roslan Rahim, I. Azmi, and M. Hisyam Abdullah, “Study on Combustion Performance of Palm Oil Biodiesel Blend,” *Jurnal Teknologi*, vol. 69, pp. 127–131, 2014, doi:10.11113/jt.v69.3324.
- [13] A. Ganjehkaviri, M. N. Mohd Jaafar, S. E. Hosseini, and A. B. Musthafa, “Performance evaluation of palm oil-based biodiesel combustion in an oil burner,” *Energies*, vol. 9, no. 2, 2016, doi: 10.3390/en9020097.
- [14] A. Stagni, A. Cuoci, A. Frassoldati, E. Ranzi, and T. Faravelli, “Numerical investigation of soot formation from microgravity droplet combustion using heterogeneous chemistry,” *Combustion and Flame*, vol. 189, pp. 393–406, 2018, doi: 10.1016/j.combustflame.2017.10.029.
- [15] D. Perdana, I. N. G. Wardana, L. Yuliati, and N. Hamidi, “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*, vol. 5, no. 8–95, pp. 65–75, 2018, doi: 10.15587/1729-4061.2018.144243.
- [16] D. Perdana, L. Yuliati, N. Hamidi, and I. N. G. Wardana, “The Role of Magnetic Field Orientation in Vegetable Oil Premixed Combustion,” *Journal of Combustion*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/2145353.
- [17] M. Zhu, H. Y. Setyawan, Z. Zhang, and D. Zhang, “Effect of n-butanol addition on the burning rate and soot characteristics during combustion of single droplets of diesel–biodiesel blends,” *Fuel*, vol. 265, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117020.
- [18] G. Knothe, “Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters,” *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 10, pp. 1059–1070, 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.002.