

DINAMIKA DAN NYALA API PEMBAKARAN DROPLET CAMPURAN METIL LAURAT – METIL OLEAT

Lilis Yuliati ¹⁾ ✉, Nurkholis Hamidi ¹⁾, Muhamad Luthfi Lazuardi ¹⁾

¹⁾ *Mechanical Engineering Department*
Brawijaya University
MT. Haryono, 167, Malang,
East Java, INDONESIA
lilis_y@ub.ac.id
hamidy@ub.ac.id
luthfilazuardi@student.ub.ac.id

Abstract

This research intended to investigate the dynamics and flame of the droplet combustion of methyl laurate - methyl oleate blended. Methyl oleate is an unsaturated FAME with a relatively long carbon chain, frequently found as the dominant component in various biodiesel. Meanwhile, methyl laurate is a saturated FAME with a shorter carbon chain, which is the main component in coconut oil biodiesel. The methyl oleate content in the droplets was varied by 0, 20, 40, 60, 80, and 100%. Visual observations and temperature measurements were conducted on the combustion of suspended droplets with a diameter of 1.24 mm. The droplet is supported by a thermocouple junction with a wire diameter of 0.1 mm. The experimental results show that increasing of the methyl oleate content increase the ignition delay time, burning time, thermal expansion of droplets as well as fluctuations in droplet diameter and combustion temperature. Ignition delay time has a much greater value than burning time. This parameter should be suppressed to obtain more complete combustion and cleaner exhaust emissions, especially in internal compression engine applications where the time available for the combustion process is very short. This can be obtained by increasing the percentage of methyl laurate in biodiesel.

Keywords: *Methyl Oleate, Methyl Laurate, Dynamics of Droplet Combustion, Flame.*

1. PENDAHULUAN

Penipisan ketersediaan bahan bakar fosil terjadi karena permintaan energi yang meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan populasi dunia, perkembangan masif dalam bidang industri, pertumbuhan ekonomi dan pembangunan berkelanjutan yang identik dengan penggunaan energi dalam jumlah besar ^[1]. Penggunaan bahan bakar fosil, yang merupakan sumber utama untuk pemenuhan kebutuhan energi, menghasilkan emisi gas rumah kaca yang mengakibatkan pemanasan global dan perubahan iklim global. Usaha untuk mengurangi efek pemanasan global mendorong pengembangan dan penggunaan energi alternatif yang ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar hidrokarbon konvensional ^[2]. *Biodiesel* merupakan bahan bakar alternatif yang diproduksi dari material *biodegradable* yang dapat diperbarui dan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan. *Biodiesel* memiliki beberapa kelebihan lain yaitu kandungan sulfur dan senyawa aromatik yang rendah, *flash point* yang lebih tinggi dari bahan bakar diesel sehingga penyimpanannya lebih aman, pelumasan yang lebih tinggi, dan tidak beracun ^[3]. Tetapi, ditinjau dari proses pembakaran dan kandungan energinya, *biodiesel* memiliki beberapa kelemahan dibanding minyak *diesel*,

Corresponding Author:

✉ **Lilis Yuliati**

Received on: 2023-12-23

Revised on: 2024-01-03

Accepted on: 2024-01-05

yaitu tingkat konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi karena nilai kalornya yang lebih rendah, sehingga diperlukan jumlah bahan bakar yang lebih besar untuk menghasilkan tingkat keluaran daya yang sama. Nilai kalor biodiesel yang lebih rendah terutama disebabkan oleh kandungan oksigen yang lebih tinggi [4]. Selain itu, viskositas dan densitasnya tinggi sehingga menghasilkan *droplet* berukuran lebih besar dalam proses atomisasinya [5].

Sifat fisika dan kimia setiap jenis biodiesel sangat beragam, tergantung dari komposisi FAME (*Faty Acid Methyl Ester*) sebagai penyusunnya [6]. Karena itu penting untuk mengetahui karakteristik pembakaran masing-masing FAME penyusun *biodiesel*. Pengukuran *ignition delay* pada *biodiesel* minyak kedelai dan FAME yang terdiri atas metil *decanoat*, *metil laurat*, dan *metil oleat* telah dilakukan [7]. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa ketiga senyawa FAME tersebut dapat digunakan sebagai senyawa pengganti untuk merepresentasikan pembakaran biodiesel. Hasil penelitian yang lain menemukan bahwa senyawa FAME jenuh dengan rantai karbon pendek memiliki laju difusi yang cepat karena hanya terdapat beberapa ikatan intermolekuler saja dibandingkan dengan senyawa FAME berantai karbon panjang [8]. Fenomena serupa juga dikonfirmasi melalui uji pembakaran *droplet* pada FAME jenuh konstituen biodiesel bahwa laju pembakaran pada senyawa FAME berantai karbon pendek lebih cepat, berkaitan dengan konsentrasi molekul oksigen yang lebih melimpah akan mendorong laju pembakaran yang lebih tinggi [9].

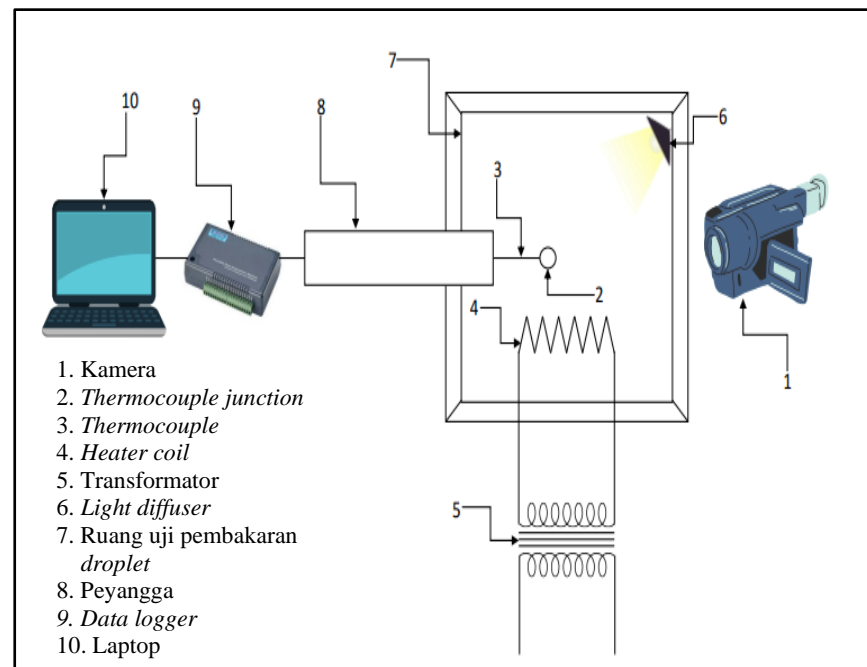
Dua faktor yang sangat berpengaruh terhadap sifat *biodiesel* adalah distribusi panjang rantai karbon dan derajat ketidakjenuhan FAME penyusun *biodiesel* [10]. *Metil oleat* merupakan salah satu senyawa FAME tak jenuh yang banyak terdapat dalam berbagai jenis *biodiesel* [11]. *Metil oleat* mempunyai 19 atom C dengan satu ikatan rangkap 2 dengan rumus kimia $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CHCH}(\text{CH}_2)_7\text{COOCH}_3$ atau secara sederhana dapat dituliskan sebagai $\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$. *Metil oleat* merupakan konstituen *biodiesel* dengan konsentrasi yang dominan pada beberapa jenis *biodiesel* seperti minyak zaitun (74,52 wt%), minyak kanola (60,33wt%), dan minyak jarak (42,81 wt%) [12]. Sehingga penting untuk mengetahui karakteristik pembakaran *droplet metil oleat* sebagai dasar untuk memperkirakan karakteristik pembakaran berbagai jenis biodiesel tersebut di atas. Selanjutnya, *metil laurat* merupakan FAME jenuh dengan rumus kimia $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOCH}_3$ atau $\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}_2$. Senyawa metil laurat merupakan konstituen dengan konsentrasi dominan pada beberapa *biodiesel* seperti minyak kelapa (44,56 wt%) dan *palm kernel oil* (48,38 wt%) [13]. Tingkat kejenuhan senyawa *metil laurat* dibandingkan senyawa tak jenuh seperti *metil oleat* mendorong stabilitas oksidatif yang lebih baik [14]. *Metil laurat* sebagai konstituen biodiesel berantai karbon pendek dan jenuh dinilai dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dalam *diesel engine*, mereduksi pembentukan NO_x karena temperatur pembakarannya yang lebih rendah, namun dengan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi karena densitas energinya yang rendah. Sebaliknya, konsentrasi senyawa FAME rantai karbon panjang seperti *metil oleat* mendorong pembentukan NO_x , HC, CO, fraksi organik volatil, dan jelaga yang meningkat [15, 16]. Pembakaran *droplet* senyawa tak jenuh dengan rantai karbon panjang menghasilkan akumulasi jelaga yang muncul di ujung nyala api membentuk ukuran api yang lebih besar [17]. Metil laurat mempunyai viskositas, *boiling temperature* serta temperatur nyala yang lebih rendah bila dibandingkan dengan *metil oleat*, sehingga lebih mudah diatomisasi dan dibakar. Viskositas yang lebih tinggi pada *metil oleat* menghambat difusi gelembung dalam pusat *droplet* menuju antar muka *droplet* sebagai daerah reaksi pembakaran [18]. Tetapi metil laurat mempunyai kandungan energi yang lebih rendah dari *metil oleat*, sehingga daya yang dapat dihasilkan dari proses pembakarannya akan lebih kecil. Campuran dari *metil oleat* dan *metil laurat* dengan komposisi tertentu diharapkan dapat menghasilkan proses atomisasi dan pembakaran yang baik, sehingga diperoleh daya yang lebih besar dengan emisi gas hasil pembakaran yang lebih bersih.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh persentase *metil oleat / metil laurat* terhadap karakteristik pembakaran *droplet* yang terdiri dari campuran metil oleat dan metil laurat. Pembakaran *biodiesel* dikontrol oleh properti fisik dan kimiawi dari konstituen penyusunnya. Setiap konstituen memiliki keunggulan pada properti tertentu namun memiliki kelemahan pada properti lainnya terhadap berbagai parameter pembakaran yang dihasilkan. Sehingga, pencampuran kedua jenis FAME ini digunakan untuk memperoleh kondisi optimum dengan mempertimbangkan beberapa parameter pembakaran melalui uji pembakaran *droplet*. Komposisi tertentu dari dua jenis FAME ini diharapkan mempunyai kecepatan pembakaran yang cukup tinggi dengan nilai kalor yang tidak terlalu rendah, sehingga menghasilkan laju pembangkitan energi atau daya yang maksimal. Kecepatan pembakaran (*burning rate*) yang tinggi penting untuk menghasilkan daya yang besar dan emisi gas hasil pembakaran yang lebih bersih pada sebuah *combustion engine*, dimana waktu yang tersedia untuk proses pembakaran sangat pendek.

2. METODE DAN BAHAN

2.1. Material.

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah metil oleat, dengan kemurnian 99% dan metil laurat dengan kemurnian 98%. Dalam penelitian ini diamati pembakaran *droplet* campuran *metil oleat* dan *metil laurat* dengan variasi persentase *metil oleat / metil laurat*. Kandungan *metil oleat* divariasikan sebesar 0, 20, 40, 60, 80, dan 100%, masing-masing campuran bahan bakar berturut-turut diidentifikasi sebagai MO 0, MO 20, MO 40, MO 60, MO 80, dan MO 100%. Pembuatan campuran bahan bakar dilakukan secara mekanik, dengan membuat campuran sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan dalam *glass beaker*, kemudian dilakukan pengadukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* yang tertutup dengan putaran 300 rpm selama 15 menit pada temperatur dan tekanan ruang. Pengambilan data dilakukan pada instalasi penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema instalasi penelitian.

2.2. Metode.

Pengujian dilakukan dalam ruang uji pembakaran *droplet* (7). Bahan bakar yang diuji pembakaran *droplet*nya, diletakkan pada sensor pengukur temperatur yang berupa *thermocouple junction* (2) yang sekaligus berfungsi sebagai penyangga *droplet*. Termokopel (3) yang digunakan adalah termokopel tipe R (Pt - Pt/Rh wire) dengan diameter 0.1 mm. Proses pembakaran, dimulai dengan pemanasan *droplet* menggunakan *heater coil* (4) sampai nyala api padam, direkam dengan menggunakan kamera Nikon D5300 (1) dengan lensa makro AF-S Micro-Nikkor 40 mm f/2.8D. Rekaman video memiliki laju pengambilan gambar 60 fps. Temperatur *droplet* selama proses pemanasan *droplet* dan pembakaran diukur dengan termokopel tipe R yang dihubungkan dengan *data logger Advantech USB-4718 data acquisition module* (9) yang terhubung ke komputer (10). *Data logger* dan komputer merekam data temperatur *droplet* selama proses pembakaran dengan *sampling rate* sebesar 10 Hz (100 ms) dan *maximum error* sebesar $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$.

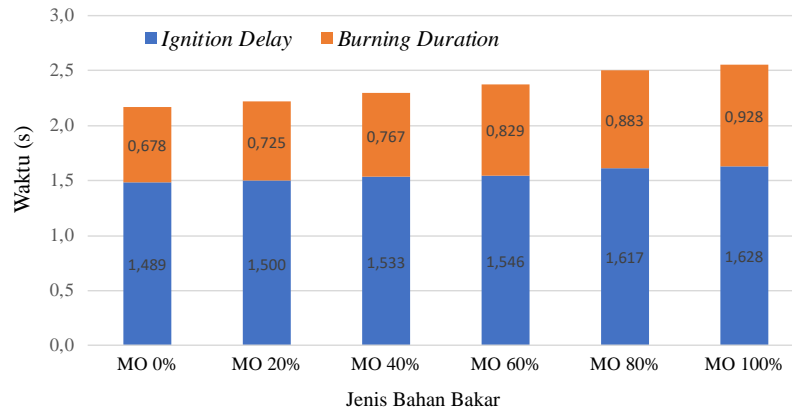
Droplet dibuat dengan meneteskan 1 μL bahan bakar cair dengan menggunakan *micro-syringe* untuk mendapatkan *droplet* dengan diameter 1.24 mm. Pengambilan data diawali dengan memanaskan *droplet* menggunakan koil *heater* (4), yang dihubungkan dengan transformator (5). *Droplet* dipanaskan dengan *heater* yang bertemperatur 700°C , dilakukan bersamaan dengan proses perekaman video menggunakan kamera Nikon D5300 dan menyalakan *data logger* untuk merekam data temperatur selama proses pembakaran. Perekaman video proses pembakaran dilakukan dengan dua metode pencahayaan, dengan menggunakan *self-lighting* dari nyala api untuk mendapatkan visualisasi nyala api, dan menggunakan metode *back lighting* untuk mendapatkan visualisasi evolusi diameter *droplet*. *Light diffuser* (6) digunakan dalam proses pengambilan data visualisasi nyala api dan *droplet* menggunakan metode *back lighting*. *Ignition delay time* adalah waktu antara *heater* terletak dibawah *droplet* hingga timbul nyala api pada *droplet*. *Burning lifetime* merupakan lama waktu pembakaran, yaitu sejak muncul nyala api sampai api padam. Kedua parameter tersebut diperoleh dari data rekaman proses pembakaran yang kemudian dipecah menjadi gambar menggunakan *software Adobe Premiere Pro*. Kecepatan pembakaran rata-rata (*average burning rate*) diperoleh dari *burning lifetime* dibagi diameter awal *droplet*. Grafik *burning rate* diperoleh dari evolusi kuadrat diameter *droplet* (menunjukkan luas permukaan *droplet*) terhadap waktu yang dinormalisasi dengan kuadrat diameter awal.

3. HASIL DAN DISKUSI

Dinamika dan nyala api pada pembakaran *droplet* ditunjukkan dengan beberapa parameter berupa *ignition delay* dan *burning time*, evolusi diameter dan temperatur *droplet* serta visualisasi nyala api selama proses pembakaran. Data hasil pengujian pembakaran *droplet* berupa rekaman video pembakaran *droplet* dan data temperatur pembakaran. Video pembakaran *droplet* dipecah menjadi gambar menggunakan *software Adobe Premiere Pro* dan selanjutnya diolah menggunakan *ImageJ*. Dari gambar nyala api dapat diperoleh data *ignition delay time*, *burning time*, evolusi diameter *droplet*, dan visualisasi nyala api. Setelah bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar dalam bentuk *spray* atau kumpulan *droplet*, pembakaran bahan bakar dalam *internal combustion engine* terdiri dari fase pemanasan *droplet* hingga mencapai temperatur penguapannya, tahap penguapan *droplet*, pembentukan *flammable mixture* dan reaksi pembakaran. *Flammable mixture* adalah campuran uap bahan bakar – udara dengan komposisi tertentu dalam batas *flammable limit*. Reaksi pembakaran tidak akan terjadi bila jumlah uap bahan bakar dalam campuran terlalu sedikit atau terlalu banyak. Bagian berikut menyampaikan hasil analisis dari setiap data hasil penelitian.

3.1. Ignition delay dan burning time.

Gambar 2 menunjukkan grafik *ignition delay time* dan *burning time*, disebut sebagai *droplet lifetime*, pada pembakaran *droplet* campuran metil oleat dan metil laurat. *Ignition delay time* didefinisikan sebagai interval waktu ketika *droplet* mulai terpapar pada lingkungan dengan temperatur tinggi hingga nyala api mulai dapat diamati. Pengukuran *ignition delay time* dilakukan dari awal pemanasan *droplet*, penguapan pada permukaan *droplet*, difusi uap bahan bakar ke udara untuk membentuk *flammable mixture*, hingga campuran bahan bakar – udara teroksidasi (timbul nyala api).



Gambar 2. Pengaruh konsentrasi metil oleat dan metil laurat terhadap *droplet lifetime*.

Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan persentase *metil oleat* mengakibatkan peningkatan *ignition delay time* bila dibandingkan dengan pembakaran *droplet metil laurat*. *Ignition delay time* terdiri dari dua tahapan yaitu *physical* dan *chemical ignition delay*. *Physical ignition delay time* merupakan waktu yang diperlukan untuk memanaskan dan menguapkan bahan bakar, pembentukan campuran udara - uap bahan bakar, hingga mencapai kondisi reaktif antara campuran bahan bakar dan udara, dimana campuran mencapai *auto ignition temperature*. Panas jenis, temperatur didih dan kalor laten penguapan serta difusivitas bahan bakar merupakan faktor yang mempunyai peran dominan pada periode ini, sehingga *ignition delay* lebih pendek pada bahan bakar dengan nilai lebih rendah untuk parameter-parameter tersebut di atas. Sedangkan *chemical ignition delay time* merupakan waktu yang diperlukan untuk terbentuknya populasi radikal reaktif yang menyebabkan ledakan termal pada campuran yang homogen. Waktu yang diperlukan pada periode ini dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan bakar, terutama konsentrasi spesies dengan volatilitas dan *cetane number* yang tinggi. Spesies dengan panjang rantai karbon yang lebih pendek dan massa molekul yang lebih ringan akan menguap lebih cepat. Selanjutnya, difusivitas massa juga merupakan fungsi dari panjang rantai karbon dan berat molekul, semakin panjang rantai karbon mempunyai waktu *transport* difusi yang lebih besar [7]. Uap *metil oleat* yang memiliki rantai lebih panjang lebih sulit menguap dan berdifusi ke udara untuk membentuk *flammable mixture*. Sebagai akibatnya, metil laurat lebih mudah terbakar / menyala dari pada metil oleat yang mempunyai rantai karbon lebih panjang. Kemampuan bahan bakar untuk menyerap panas, juga merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi *ignition delay time*. Secara umum dapat disimpulkan bahwa semakin panjang rantai karbon, maka periode *ignition delay* juga semakin besar.

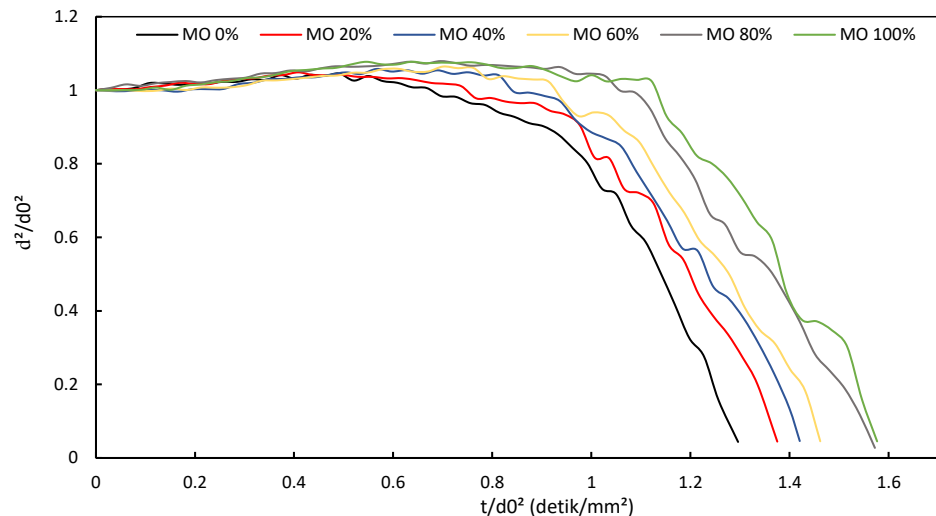
Gambar 2 juga menunjukkan lamanya *burning time* pada pembakaran *droplet* campuran *metil laurat* dan *metil oleat*. *Burning time* merupakan interval waktu antara nyala api mulai terbentuk hingga api padam, periode ini meliputi proses penguapan bahan bakar karena nyala api pembakaran, difusi uap bahan bakar dan udara pembakaran, serta reaksi kimia

pembakaran. *Burning time* dipengaruhi oleh proses penguapan bahan bakar yang masih berbentuk cair, pencampuran uap bahan bakar – udara, dan kinetika reaksi bahan bakar (kecepatan pembakaran) yang terjadi bersamaan dengan adanya nyala api pada *droplet* yang sudah mulai terbakar. *Burning time* meningkat dengan bertambahnya persentase *metil oleat*. *Metil oleat* mempunyai waktu nyala api yang paling lama bila dibandingkan dengan pembakaran *droplet* metil laurat ataupun campuran *metil oleat – metil laurat*.

Gambar 2 menunjukkan bahwa *ignition delay time* memiliki nilai yang jauh lebih besar dari nilai *burning time*. Karena itu perlu dicari metode atau kondisi agar dapat mengurangi nilai *ignition delay time* secara signifikan. Nilai *ignition delay* dan *burning time* merupakan parameter penting pada proses pembakaran dalam mesin *diesel*, karena dua parameter ini berhubungan dengan daya yang dihasilkan dari proses pembakaran serta sempurna atau tidaknya pembakaran yang akan mempengaruhi emisi yang dihasilkan. Pembakaran pada mesin *diesel* berlangsung pada waktu yang sangat singkat, terutama pada putaran yang tinggi. *Burning time* yang rendah sama dengan *burning rate* yang tinggi, dapat menghasilkan daya yang besar dengan emisi gas hasil pembakaran yang lebih bersih, karena proses pembakaran lebih mendekati kondisi pembakaran sempurna. Hal tersebut juga penting karena biodiesel memiliki nilai kalor yang lebih rendah dari pada minyak *diesel* (solar), untuk menghasilkan daya yang sama diperlukan pembakaran biodiesel yang lebih banyak dalam waktu yang sama (kecepatan pembakarannya lebih besar). Dalam hal ini *metil oleat* merupakan representasi dari *biodiesel*, karena merupakan jenis FAME yang banyak ditemukan dalam berbagai jenis *biodiesel* dalam jumlah yang cukup dominan.

3.2. Evolusi diameter *droplet* dan kecepatan pembakaran.

Bagian ini menjelaskan perubahan yang terjadi pada *droplet* selama proses pembakaran *droplet metil oleat, metil laurat* dan campuran *metil oleat – metil laurat*. Gambar 3 menunjukkan evolusi diameter *droplet* sejak dipanaskan dengan *heater* hingga *droplet* habis/nyala api padam.



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi metil oleat dan metil laurat terhadap evolusi diameter *droplet*.

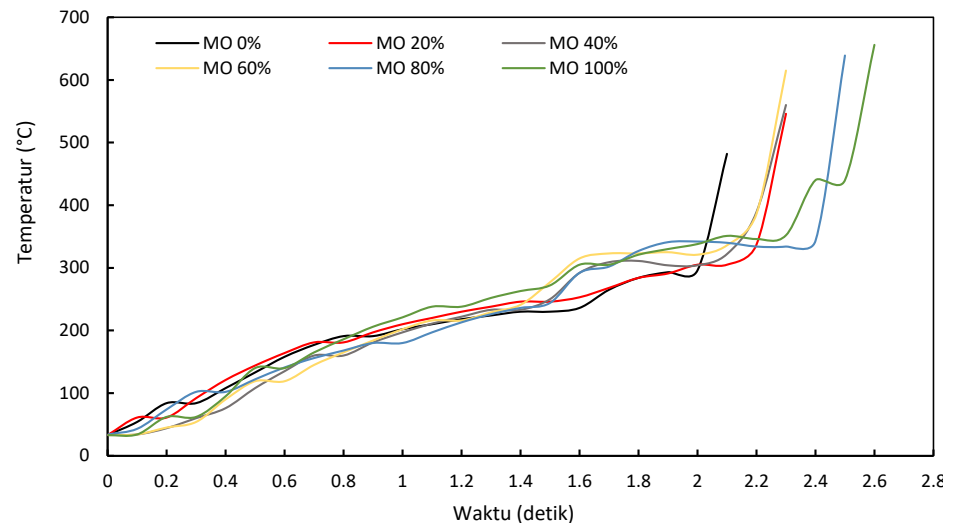
Gambar 3 menunjukkan bahwa *droplet* mengalami ekspansi atau peningkatan diameter *droplet* selama proses pemanasan (selama periode *ignition delay time*). Selama proses pemanasan diameter *droplet* meningkat, karena penurunan densitas selama temperatur *droplet* meningkat. Ketika *droplet* telah mencapai temperatur didihnya, penguapan akan terjadi pada permukaan *droplet*. Saat penguapan mulai terjadi, diameter *droplet* akan terus

bertambah atau berkurang tergantung pada faktor mana yang lebih dominan, penurunan densitas karena *thermal expansion* yang menyebabkan peningkatan diameter atau penurunan diameter karena penguapan *droplet*. Ekspansi *droplet* maksimum terjadi pada saat api mulai menyala atau beberapa saat sebelum api menyala.

Gambar 3 menunjukkan bahwa *thermal expansion* pada *droplet* semakin besar dengan meningkatnya persentase *metil oleat* dalam campuran bahan bakar. Hal tersebut berhubungan dengan nilai kalor laten penguapan metil oleat yang lebih besar serta viskositasnya yang lebih tinggi. Viskositas yang tinggi menunjukkan kekuatan ikatan antar molekul yang lebih besar, sehingga molekul-molekul *metil oleat* lebih sulit untuk meninggalkan kluster molekulnya. Kalor laten penguapan yang lebih tinggi mengakibatkan laju penguapan *droplet* yang lebih kecil. Hal tersebut mengakibatkan diameter *droplet* mengalami ekspansi lebih besar bila dibandingkan dengan metil laurat. Setelah timbul nyala api, kemiringan kurva d^2/d_0^2 terhadap t/d_0^2 mempunyai nilai yang hampir sama, tetapi terlihat bahwa evolusi diameter *droplet* pada metil laurat mempunyai kurva dengan lintasan yang lebih halus. Sementara *droplet* dengan kandungan metil oleat mempunyai garis kurva yang sedikit fluktuatif.

3.3. Temperatur *Droplet*.

Studi ini menggunakan teknik *suspended droplet* dengan menggunakan termokopel sebagai penyangga sekaligus untuk mengukur evolusi temperatur *droplet* selama pengujian. Melalui teknik ini dapat diketahui beberapa parameter pembakaran meliputi *ignition point temperature*, waktu saat mencapai *ignition point*, dan laju perubahan temperatur.



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi metil laurat dan metil oleat terhadap temperatur pembakaran *droplet*.

Gambar 4 menunjukkan temperatur *droplet* selama proses pembakaran, dimulai sejak *droplet* dipanaskan dengan *heater*, api menyala sampai api padam. Temperatur pembakaran berhubungan dengan besarnya daya yang dibangkitkan selama proses pembakaran, yang dipengaruhi oleh nilai kalor bahan bakar dan kecepatan pembakaran. Semakin tinggi laju pelepasan kalor volumetriknya maka temperatur pembakaran juga akan semakin tinggi. Temperatur pembakaran *droplet* juga berkaitan dengan dimensi nyala api, di mana temperatur pembakaran yang tinggi memiliki densitas gas yang ringan, sehingga menghasilkan ukuran api yang lebih besar dan mengarah ke atas karena pengaruh konveksi alamiah. *Metil oleat* sebagai senyawa FAME dengan rantai karbon panjang memiliki

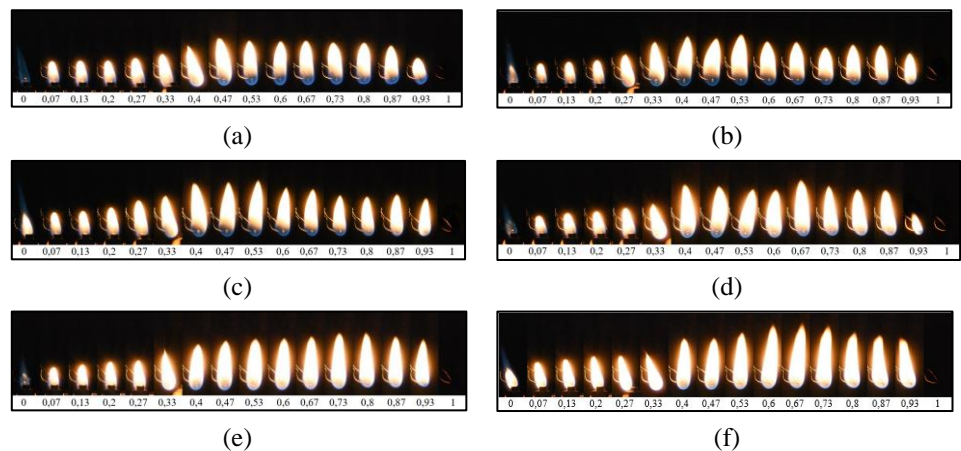
densitas energi yang besar, sehingga dalam volume *droplet* yang sama sebagai variabel kontrol dalam studi ini, energi volumetrik yang terkandung dalam metil oleat lebih besar daripada metil laurat. Perbedaan kandungan energi ini menghasilkan perbedaan temperatur pembakaran *droplet*.

Semakin tinggi konsentrasi *metil oleat* dalam campuran bahan bakar, temperatur pembakaran *droplet* meningkat. Namun, konsentrasi *metil oleat* yang lebih tinggi juga memerlukan *ignition point* yang lebih besar untuk tercapainya proses pembakaran. Hal ini sesuai dengan semakin panjangnya *ignition delay* pada Gambar 2 seiring bertambahnya konsentrasi *metil oleat* dalam campuran bahan bakar. *Combustible mixture* pada *metil oleat* sebagai senyawa dengan rantai karbon panjang tercapai pada temperatur yang lebih tinggi. *Metil oleat* memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan metil laurat. Dalam prespektif molekuler, viskositas yang tinggi mengindikasikan lebih besarnya energi ikatan antar molekul, sehingga dibutuhkan energi yang lebih besar dengan menyerap kalor lebih banyak untuk pemutusan ikatannya.

Temperatur *droplet* meningkat seiring waktu menunjukkan terjadinya peningkatan laju konsumsi bahan bakar. Sebaliknya, di awal pembakaran laju peningkatan temperatur tidak terlalu signifikan karena pada tahap ini laju penguapan bahan bakar lebih tinggi daripada laju konsumsi bahan bakar. Menjelang api padam di akhir pembakaran, terjadi peningkatan temperatur *droplet* secara signifikan, berkaitan dengan ukuran *droplet* yang relatif kecil, sehingga memperbesar kontak nyala api pembakaran dengan termokopel. Pembakaran berakhir saat temperatur puncak *droplet* tercapai yang kemudian diikuti padamnya api. Temperatur puncak *droplet* tertinggi diperoleh pada konsentrasi metil oleat 100% yang berkaitan dengan kandungan energinya yang besar.

3.4. Visualisasi Nyala Api.

Visualisasi nyala api selama proses pembakaran *droplet metil laurat*, metil oleat dan campuran *metil oleat – metil laurat* ditunjukkan pada Gambar 5 – 10. Bentuk nyala api memanjang ke atas *droplet* karena efek *buoyancy force*. Uap bahan bakar memiliki temperatur tinggi dan densitas rendah, dan cenderung bergerak ke atas. Selanjutnya uap bahan bakar - udara berdifusi dan terbakar membentuk nyala api difusi dengan warna *orange*. Secara umum terlihat bahwa pembakaran *droplet metil oleat* mempunyai dimensi nyala api yang lebih besar dari pada pembakaran *droplet metil laurat*.



Gambar 5. Visualisasi nyala api pada pembakaran *droplet* (a) MO 0%, (b) MO 20%, (c) MO 40%, (d) MO 60%, (e) MO 80%, dan (f) MO 100%.

Gambar 5(a) dan (f) menunjukkan bahwa pembakaran *droplet metil laurat* dan *metil oleat* murni mempunyai karakteristik nyala api yang berbeda. Nyala api pada pembakaran metil oleat mempunyai dimensi (dalam hal ini tinggi nyala api) yang lebih besar. Selain itu, pada pembakaran *droplet metil laurat* terdapat nyala api berwarna biru pada bagian bawahnya, sedangkan pada pembakaran *droplet metil oleat* murni keseluruhan nyala api berwarna *orange* dari pangkal bawah hingga ujung atas nyala api. Bagian nyala api yang berwarna biru menunjukkan adanya pembakaran *premixed* dengan rasio ekuivalen mendekati satu. Hal tersebut mungkin terjadi ketika uap bahan bakar di bawah *droplet* berdifusi secara cepat dengan udara hingga terbentuk *flammable mixture* dengan komposisi campuran udara – bahan bakar mendekati kondisi stoikiometri. Sedangkan uap *metil oleat* berdifusi lebih lambat, menghasilkan nyala api difusi secara keseluruhan, termasuk pada bagian bawah *droplet*. Hal tersebut bersesuaian dengan hasil penelitian ^[7] yang menyatakan bahwa koefisien difusi bahan bakar hidrokarbonnya merupakan fungsi dari panjang rantai karbon. Semakin panjang rantai karbonnya, maka koefisien difusinya semakin berkurang. Secara umum terlihat pada Gambar 5(a)-(f) bahwa penambahan persentase metil oleat akan meningkatkan tinggi rata-rata dari nyala api. Dan semakin banyak persentase *metil oleat*, nyala api berwarna biru pada bagian bawah *droplet* akan semakin mengecil. Hal tersebut disebabkan oleh dua faktor yaitu temperatur pembakaran pada *droplet metil oleat* lebih tinggi, menghasilkan *buoyancy force* yang lebih besar dan pergerakan uap bahan bakar ke arah atas yang lebih cepat dan jauh. Faktor berikutnya adalah koefisien difusi uap *metil oleat* yang lebih lambat, sehingga memerlukan daerah yang lebih luas untuk mencapai kondisi campuran dengan komposisi yang terletak dalam interval *flammable mixture*.

Intensitas cahaya yang lebih terang pada daerah di sekitar *droplet metil oleat* juga disebabkan oleh adanya pembentukan partikel jelaga selama proses pembakarannya ^[19]. Gambar 5(f) menunjukkan bahwa nyala api metil oleat memancarkan panas radiasi ke daerah sekelilingnya dengan cakupan area yang lebih luas, ditunjukkan dengan adanya daerah berwarna kekuningan di sekitar nyala api. Sedangkan pada pembakaran metil laurat daerah ini hanya terdapat pada area sangat sempit disekitar nyala api saja. Gambar 5(a)-(f) menunjukkan bahwa nyala api pada pembakaran *droplet metil laurat*, *metil oleat* dan campurannya mempunyai lebar nyala api yang hampir sama, tetapi *boundary thermal layer* yang terbentuk disekitar nyala api berbeda secara signifikan. Semakin besar persentase *metil oleat* semakin luas *boundary thermal layer* yang terbentuk. Daerah ini mempunyai peranan yang sangat penting dalam proses *flame spread* pada pembakaran sekelompok *droplet* dengan distribusi tertentu ^[18]. Pembentukan partikel jelaga dalam pembakaran *metil oleat* mencegah terbentuknya nyala api berwarna biru pada daerah di sekitar *droplet*, dimana mungkin terbentuk *flammable mixture* dengan komposisi mendekati stoikiometri.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, proses pembakaran *droplet* campuran *metil oleat*, yang merupakan FAME tak jenuh dengan rantai karbon relatif panjang dan komponen dominan dalam berbagai biodiesel, dengan metil laurat telah dilaksanakan dengan baik. Metil laurat merupakan FAME jenuh dengan rantai karbon yang relatif pendek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persentase *metil oleat* dalam campuran bahan bakar mengakibatkan beberapa hal sebagai berikut:

- Peningkatan *ignition delay* dan *burning time* yang diakibatkan oleh panas jenis, temperatur didih, kalor laten penguapan, dan viskositas *metil oleat* yang lebih besar, sedangkan difusivitas massa uap bahan bakar lebih lambat.
- *Thermal expansion* yang lebih besar dan evolusi diameter *droplet* mempunyai garis kurva yang lebih fluktuatif.

- Peningkatan temperatur pembakaran yang berhubungan dengan laju pelepasan kalor volumetrik yang lebih tinggi.
- Dimensi dan *luminosity* nyala api yang lebih besar yang mempunyai efek positif pada proses *flame spreading*.

PERNYATAAN TERIMA KASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada Komang Bagas Ary Yogaswara, Nanda Fahrul Rhomadoni, dan Anasrullah yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Maneechakr dan S. Karnjanakom, "A combination of 2k factorial with Box-Behnken designs for FAME production via methanolysis of waste cooking palm oil over low-cost catalyst," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 5, hal. 103389, 2019.
- [2] S. Basu dan A. Miglani, "Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review," *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 96, 2016, hal. 482–503, 2016.
- [3] E. G. Giakoumis, "Analysis of 22 vegetable oils' physico-chemical properties and fatty acid composition on a statistical basis, and correlation with the degree of unsaturation," *Renewable Energy*, vol. 126, hal. 403–419, 2018.
- [4] A. T. Hoang, "Combustion behavior, performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel containing cerium oxide nanoparticles: A review," *Fuel Processing Technology*, vol. 218, hal. 106840, 2021.
- [5] E. Marlina, W. Wijayanti, L. Yuliati, dan I. N. G. Wardana, "The role of pole and molecular geometry of fatty acids in vegetable oils droplet on ignition and boiling characteristics," *Renewable Energy*, vol. 145, hal. 596–603, 2020.
- [6] P. X. Pham, K. T. Nguyen, T. V. Pham, dan V. H. Nguyen, "Biodiesels manufactured from different feedstock: From fuel properties to fuel atomization and evaporation," *ACS Omega*, vol. 5, no. 33, hal. 20842–20853, 2020.
- [7] A. J. Marchese, T. L. Vaughn, K. Kroenlein, dan F. L. Dryer, "Ignition delay of fatty acid methyl ester fuel droplets: Microgravity experiments and detailed numerical modeling," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no. 2, hal. 2021–2030, 2011.
- [8] N. Meiri, P. Berman, L. A. Colnago, T. B. Moraes, C. Linder, dan Z. Wiesman, "Liquid-phase characterization of molecular interactions in polyunsaturated and n-fatty acid methyl esters by 1H low-field nuclear magnetic resonance," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 8, no. 1, hal. 1–12, 2015.
- [9] I. A. Ibadurrohman, N. Hamidi, L. Yuliati, dan B. A. Valentino, "Experimental investigation on the effect of carbon chain length to the droplet combustion characteristic of fatty acid methyl ester," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1034, hal. 012060, 2021.
- [10] L. Zhu, C. S. Cheung, dan Z. Huang, "Impact of chemical structure of individual fatty acid esters on combustion and emission characteristics of diesel engine," *Energy*, vol. 107, hal. 305–320, 2016.

- [11] C. V. Naik, C. K. Westbrook, O. Herbinet, W. J. Pitz, dan M. Mehl, “Detailed chemical kinetic reaction mechanism for biodiesel components methyl stearate and methyl oleate,” *Proceedings of the Combustion Institute.*, vol. 33, no. 1, hal. 383–389, 2011.
- [12] A. Gopinath, K. Sairam, R. Velraj, dan G. Kumaresan, “Effects of the properties and the structural configurations of fatty acid methyl esters on the properties of biodiesel fuel: a review,” *Journal of Automobile Engineering*, vol. 229, no. 3, hal. 1–34, 2014.
- [13] W. Ferdinand, A. Sako, A. Fofana, dan K. Blaise, “Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiesel fuels,” *Energy*, vol. 35, hal. 4949–4954, 2010.
- [14] S. Ando, Y. Wu, S. Nakaya, dan M. Tsue, “Droplet combustion behavior of oxidatively degraded methyl laurate and methyl oleate in microgravity,” *Combustion and Flame*, vol. 214, hal. 199–210, 2020.
- [15] P. X. Pham, H. Wang, Z. D. Ristovski, and R. J. Brown, “Engine Performance Characteristics for Biodiesels of Different Degrees of Saturation and Carbon Chain Lengths,” *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, vol. 6, no. 1, hal. 188–198, 2013.
- [16] T. Ahmed, A. Kourmatzis, P. X. Pham, dan A. R. Masri, “Droplet evaporation modeling of electrified fatty acid methyl esters,” *Fuel*, vol. 231, hal. 244–252, 2018.
- [17] N. Hamidi, I. Ahmad Ibadurrohman, L. Yuliati, W. Winarto, dan D. B. Darmadi, “The Effect of Alcohol Compounds on Droplet Combustion Characteristics of Unsaturated Fatty Acid of Linoleic Acid,” *Trends in Sciences.*, vol. 20, no. 7, hal. 6720, 2023.
- [18] I. A. Ibadurrohman, N. Hamidi, L. Yuliati, Winarto, dan 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, hal. 126371, 2023.
- [19] Ooi JB, Yap J, Tran M, dan Leong K., “Experimental investigation on the droplet burning behavior of diesel-palm biodiesel blends,” *Energy Fuels*, Vol. 33, no. 11, hal. 11804–11811, 2019.