

Pengaruh komposisi FAME terhadap *burning rate* dan sifat nyala api pada pembakaran *droplet* campuran metil laurat - metil oleat - etanol

Lilis Yulianti^{a,1}, Nurkholis Hamidi^a, Winarto^a, Komang Bagas Ary Yogaswara^a,
Endrico Maelro Torong^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Brawijaya, Malang, 65145

¹lilis_y@ub.ac.id

ABSTRACT

This research is intended to determine the effect of methyl laurate - methyl oleate content on the burning rate and flame behaviour of the droplet combustion of methyl laurate - methyl oleate - ethanol blends. Methyl laurate is a saturated fatty acid methyl ester (FAME) while methyl oleate is an unsaturated FAME, which are found in many types of biodiesels. The fuels were mixture of methyl laurate and methyl oleate with various percentage and 20% ethanol of the total mixture (based on mass). The content of methyl oleate was varied as 0%, 10%, 30%, 50%, 70% and 80%, the remainder of the percentage of ethanol and methyl oleate was methyl laurate. The heating and combustion process of the droplet were recorded using camera at 60 fps and the droplet temperature was measured using R-type thermocouple connected to data logger. The results showed that increasing of methyl oleate percentage increase burning time and droplet temperature, vice versa burning rate decrease. Methyl oleate has longer carbon chains, it is related to the higher values of boiling point, latent heat of vaporization, heating value. Longer carbon chain involves more energy to break the atomic bond. The decreasing of the burning rate is affected by some phenomena mentioned above. The higher droplet temperature is related to higher flame temperature as a results of higher energy content in mixture with more methyl oleate content. Flame visualization indicates occurrence of micro explosion caused by the presence of ethanol in the fuel mixture.

Keywords: droplet combustion, methyl laurate, methyl oleate, ethanol, burning rate, micro explosion.

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590807

PENDAHULUAN

Ditengah berkembangnya motor listrik, *internal combustion engine* (ICE) akan tetap memiliki peranan penting dalam sektor transportasi dan industri karena dapat menghasilkan daya yang besar dan efisiensinya relatif tinggi [1]. *Compression ignition engine* (CIE) merupakan jenis ICE yang banyak digunakan untuk pembangkitan daya dalam industri dan transportasi karena dapat menghasilkan daya yang besar dengan efisiensi tinggi [2]. CIE menggunakan bahan bakar diesel, salah satu jenis bahan bakar fosil yang merupakan sumber emisi CO₂ (karbon dioksida) yang merupakan penyebab utama terjadinya efek rumah kaca dan *global warming*. Meningkatnya permintaan global dan kekhawatiran akan efek pemanasan global mendorong pengembangan bahan bakar alternatif. Biodiesel dan bioetanol merupakan jenis bahan bakar alternatif yang banyak dikembangkan untuk sektor transportasi. Biodiesel dibuat dari berbagai macam jenis minyak tumbuhan, seperti kelapa sawit di Asia Tenggara, minyak *rapeseed* di Eropa, dan Amerika menggunakan minyak kedelai [3]. Biodiesel bersifat ramah lingkungan karena bersifat *net zero CO₂ emission*.

Biodiesel tersusun dari berbagai jenis *fatty acid methyl ester* (FAME), dihasilkan dari proses transesterifikasi

minyak nabati (trigliserida). Setiap jenis FAME mempunyai sifat yang berbeda dipengaruhi oleh panjang rantai karbon, serta adanya ikatan jenuh atau tak jenuh didalamnya. Komposisi FAME dalam biodiesel sangat menentukan sifat dan karakteristik pembakarannya. Metil laurat adalah salah satu metil ester yang terdapat dalam biodiesel. Asam laurat banyak terdapat pada minyak kelapa [4]. Metil laurat merupakan FAME jenuh dengan panjang rantai karbon yang relatif pendek, memiliki atom karbon 13 dengan rumus kimia C₁₃H₂₆O₂. Sebaliknya, metil oleat merupakan jenis FAME dengan rantai karbon yang relatif panjang, termasuk dalam jenis FAME tak jenuh karena memiliki satu ikatan rangkap dua dengan rumus kimia C₁₉H₃₆O₂. Metil oleat merupakan komponen dominan pada banyak biodiesel dari minyak nabati, diantaranya minyak sawit, minyak zaitun, minyak canola, dan minyak jarak [5].

REVIEW LITERATUR

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan biodiesel terhadap kinerja CIE [6]-[8], ataupun untuk mengetahui karakteristik pembakaran droplet biodiesel. Penggunaan campuran diesel dengan 20% biodiesel jarak atau *castor oil* dapat mengurangi emisi CO dan CO₂ sebesar 10-22%, tetapi meningkatkan emisi NO_x

sebesar 8% [6]. Hasil penelitian berikutnya menunjukkan adanya peningkatan daya efektif dan efisiensi dengan penambahan biodiesel dan dietil eter, sedangkan emisi NO meningkat bila dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar diesel [7]. Penggunaan campuran 20% mahua biodiesel-minyak diesel meningkatkan *brake thermal efficiency* sebesar 25,7%. Penambahan ekstrak cengkeh pada campuran mahua biodiesel-minyak diesel sedikit menurunkan *brake thermal efficiency* tetapi dapat menurunkan dengan signifikan emisi NO_x [8]. Untuk memahami mekanisme bagaimana penggunaan biodiesel dapat meningkatkan kinerja mesin diesel dilakukan pengamatan pada pembakaran droplet FAME yang merupakan komponen penyusun biodiesel.

Penelitian mengenai karakteristik pembakaran droplet dilakukan pada bahan bakar metil laurat dan metil stearat, yang merupakan *saturated* FAME dengan panjang rantai karbon berbeda, serta pada metil oleat yang merupakan *unsaturated* FAME dengan panjang rantai karbon sama dengan metil stearat [9]. Derajat ketidakjenuhan mempunyai pengaruh penting pada pembakaran droplet FAME. Adanya ikatan rangkap (*unsaturated* FAME) pada molekul dengan jumlah rantai karbon yang sama menghasilkan laju penguapan yang lebih tinggi, *ignition delay* dan *burning time* yang lebih pendek, serta *burning rate* dan temperatur pembakaran yang lebih tinggi. Penelitian selanjutnya dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan etanol pada asam lemak dan metil ester terhadap mekanisme pembakaran dropletnya [10]. Dalam penelitian ini digunakan asam laurat dan asam oleat sebagai representasi penyusun minyak nabati, serta metil laurat dan metil oleat sebagai representasi FAME penyusun biodiesel. Penambahan etanol mengakibatkan terjadinya *droplet thermal expansion* dan *microexplosion* pada pembakaran droplet campuran metil laurat - etanol dan metil oleat - etanol. Dua hal ini merupakan mekanisme yang secara efektif meningkatkan luas total permukaan droplet, yang menyebabkan peningkatan kontak difusi antara uap bahan bakar dan udara sehingga dapat mengurangi *ignition delay* dan *burning time*, serta meningkatkan *burning rate* dan temperatur pembakaran. Walaupun etanol mempunyai nilai kalor yang lebih rendah, tetapi peningkatan *burning rate* yang signifikan menghasilkan laju pembangkitan kalor dan temperatur pembakaran yang lebih tinggi. Penelitian mengenai karakteristik pembakaran droplet metil laurat, metil oleat dan campuran metil laurat - metil oleat telah dilakukan [11]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kandungan metil oleat dalam droplet mengakibatkan peningkatan *ignition delay* dan

burning time, serta *volumetric heat release rate* dan temperatur pembakaran yang lebih tinggi. Peningkatan *volumetric heat release rate* dan temperatur pembakaran disebabkan oleh nilai kalor metil oleat yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan laju pembangkitan energi yang lebih besar walaupun mempunyai *burning time* yang lebih lama atau *burning rate* yang lebih kecil. Droplet dengan kandungan metil oleat yang lebih besar mempunyai *thermal expansion* dan fluktuasi diameter droplet yang lebih besar.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat - etanol dengan perubahan komposisi FAME, yaitu metil laurat dan metil oleat, dalam *blended fuel* dengan kandungan etanol tetap. Dari hasil penelitian diharapkan diperoleh komposisi campuran FAME - etanol yang memiliki sifat nyala api yang dapat menghasilkan laju pembakaran dan laju pembangkitan energi yang tinggi.

METODOLOGI

Material/bahan penelitian

Karakteristik pembakaran diamati pada pembakaran droplet yang merupakan campuran dari metil laurat - metil oleat - etanol, dengan variasi persentase metil oleat dan metil laurat pada kandungan etanol yang dijaga konstan sebesar 20% (berdasarkan massa). Bahan bakar merupakan campuran dari metil laurat dengan kemurnian 98%, metil oleat dengan kemurnian 99%, dan etanol dengan kemurnian 99,9%. Persentase metil oleat divariasikan sebesar 0%, 10%, 30%, 50%, 70% dan 80%. Persentase metil laurat = 100% - (% etanol + % metil oleat). Tabel 1 menunjukkan komposisi campuran bahan bakar dan sistem penamaannya.

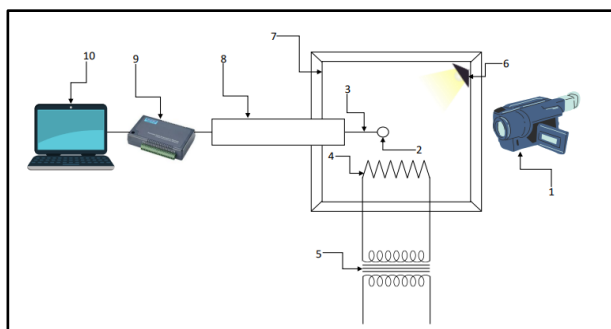
Tabel 1. Komposisi FAME – etanol dalam campuran bahan bakar

Variasi	Metil Oleat	Metil Laurat	Etanol
O0L80E	0 gr (0%)	8 gr (80%)	2 gr (20%)
O10L70E	1 gr (10%)	7 gr (70%)	2 gr (20%)
O30L50E	3 gr (30%)	5 gr (50%)	2 gr (20%)
O50L30E	5 gr (50%)	3 gr (30%)	2 gr (20%)
O70L10E	7 gr (70%)	1 gr (10%)	2 gr (20%)
O80L0E	8 gr (80%)	0 gr (0%)	2 gr (20%)

Setiap jenis campuran dibuat sebanyak 10 gr, dengan kandungan etanol 2 gr dan campuran metil oleat - metil laurat sebanyak 8 gr. Pencampuran bahan bakar dilakukan dalam *glass beaker* pada *hot plate magnetic stirrer* tanpa pemanasan dengan pengadukan pada putaran sedang 300 rpm selama 15 menit.

Prosedur penelitian

Pengambilan data pembakaran droplet dilakukan pada instalasi penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Droplet dibuat dari 1 μL campuran bahan bakar dengan menggunakan *micro syringe*. Droplet dengan diameter 1.24 mm dibuat pada *thermocouple junction* (2). Termokopel (3) yang digunakan adalah Type R dengan diameter 0.1 mm, diletakkan pada penyangga termokopel (8). Droplet dinyalakan dengan sistem *coil heater* (4-5) yang diletakkan 3 mm di bawah droplet. Sistem penyangga droplet dan *coil heater* diletakkan dalam ruang uji (7) yang dilengkapi dengan sistem pencahayaan *backlighting* (6) untuk perekaman visualisasi droplet dan nyala api. Droplet dibentuk pada *thermocouple junction* dan pada saat yang bersamaan *coil heater* dipanaskan hingga mencapai temperatur 750°C . *Coil heater* digeser dan diletakkan di bawah droplet, saat droplet mulai menyala *coil heater* dimatikan dan digeser menjauh dari droplet. Bersamaan dengan peletakan *coil heater* di bawah droplet, sistem pengukur temperatur droplet dan kamera (1) untuk merekam proses pemanasan dan pembakaran droplet dinyalakan. Kamera dan alat pengukur temperatur dimatikan saat nyala api padam. Sistem pengukur temperatur yang digunakan terdiri dari termokopel (3) – *data logger* (DAQNavisUB4718) (9) – komputer (10). Pencatatan temperatur dilakukan dengan *sampling rate* 10 data/detik, dengan $t = 0$ adalah saat *coil heater* mulai diletakkan di bawah droplet, yaitu saat pemanasan droplet dimulai. Perekaman visualisasi nyala api menggunakan kamera dengan *frame rate* 60 fps. Kamera dilengkapi dengan *macro lens* untuk mendapatkan gambar droplet yang lebih jelas, sehingga dapat menangkap gambar dinamika droplet dan nyala api selama proses pemanasan dan pembakaran droplet.



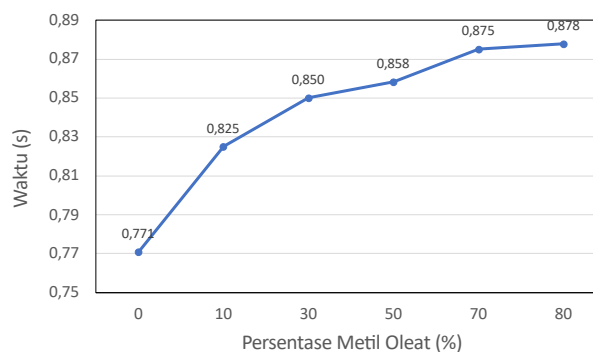
Gambar 1. Skema instalasi penelitian.

Data rekaman video yang berupa visualisasi nyala api dan evolusi diameter droplet dipecah menjadi foto/gambar nyala api dan droplet selama proses pembakaran. Pengukuran dimensi nyala api dan diameter droplet dilakukan pada foto/gambar menggunakan *software ImageJ*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Droplet burning time dan droplet burning rate

Burning time adalah interval waktu antara droplet mulai menyala hingga nyala api padam. Data ini diperoleh dari jumlah *frame* gambar (foto yang diperoleh dari pemecahan video) dimana terdapat nyala api, dikalikan dengan 1/60 detik. Nilai dari *burning time* droplet ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Droplet burning time* pada pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat - etanol.

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin besar kandungan metil oleat dalam droplet maka *burning time* juga semakin meningkat. Metil oleat dan metil laurat merupakan dua jenis metil ester asam lemak yang banyak ditemui sebagai komponen biodiesel. Keduanya memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda, yang secara signifikan mempengaruhi karakteristik pembakaran droplet. Peningkatan *burning time* droplet dengan meningkatnya kandungan metil oleat berhubungan dengan *properties* dari masing-masing metil ester. Metil oleat mempunyai rantai karbon yang lebih panjang dan berat molekul yang lebih besar bila dibandingkan dengan metil laurat. Hal tersebut mengakibatkan metil oleat mempunyai viskositas, densitas, *flash point*, titik didih, kalor laten penguapan, dan nilai kalor yang lebih tinggi dari metil laurat. Perbedaan sifat tersebut akan mempengaruhi karakteristik pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat dengan tambahan etanol.

Proses pembakaran droplet dapat dibagi dalam 2 tahap, 1) pemanasan dan penguapan droplet, 2) pembakaran droplet. *Droplet lifetime* adalah total waktu yang diperlukan untuk proses pemanasan - penguapan droplet (*ignition delay time*) ditambah dengan waktu pembakaran droplet (*droplet burning time*). Proses pemanasan dan penguapan droplet secara signifikan dipengaruhi oleh sifat panas jenis bahan bakar, titik didih, dan kalor laten penguapan. Ketika droplet pada temperatur ruang diletakkan pada *thermocouple junction*, kemudian dipanaskan dengan

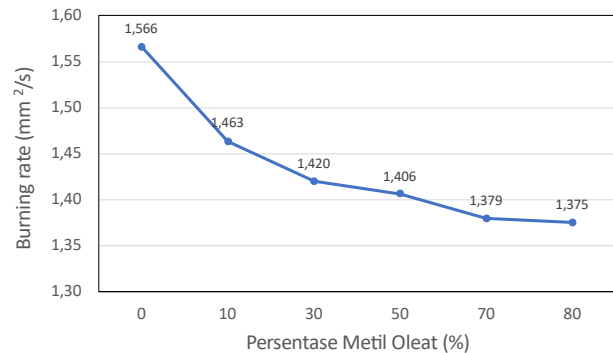
coil heater, mula-mula temperatur droplet naik hingga mencapai temperatur jenuhnya. Bagian bahan bakar dalam droplet yang telah mencapai temperatur jenuhnya akan menguap lebih dulu, sedangkan bagian bahan bakar yang belum mencapai temperatur didihnya akan terus meningkat temperaturnya selama dipanasi dengan *coil heater*. Temperatur didih yang paling rendah hingga paling tinggi dimiliki berturut-turut oleh etanol, metil laurat dan metil oleat. Sehingga droplet dengan kandungan metil oleat yang lebih besar memerlukan waktu yang lebih lama untuk menguap dan membentuk campuran yang dapat menyala (*flammable mixture*). *Flammable mixture* merupakan komposisi campuran udara – uap bahan bakar dimana campuran ini akan terbakar atau menyala saat temperaturnya mencapai temperatur nyalanya. Bila kandungan bahan bakar dalam campuran lebih rendah atau lebih tinggi dari batas *flammable mixture* (disebut sebagai *flammability limit*), campuran ini tidak akan dapat terbakar atau menyala walaupun terpapar pada suhu yang sangat tinggi, diatas temperatur nyalanya. Metil oleat mempunyai nilai yang lebih besar untuk ketiga properties tersebut bila dibandingkan dengan metil laurat. Ketika droplet dipanaskan dengan daya pemanasan yang sama, maka droplet dengan kandungan metil oleat yang lebih banyak memerlukan waktu yang lebih lama untuk menyala, yaitu mempunyai *ignition delay time* yang lebih tinggi.

Burning time yang lebih lama pada pembakaran droplet dengan kandungan metil oleat yang lebih banyak berhubungan dengan sifat metil oleat yang mempunyai kalor laten penguapan dan temperatur nyala yang lebih tinggi, serta volatilitas dan laju difusi yang lebih rendah bila dibandingkan dengan etanol dan metil laurat. Kalor penguapan yang lebih tinggi membutuhkan lebih banyak energi untuk menguapkan metil oleat. Hal ini menyebabkan proses penguapan menjadi lebih lambat dan memperpanjang *burning time*. Molekul metil oleat yang lebih besar dan kompleks memiliki laju difusi yang lebih rendah dibandingkan molekul metil laurat dan etanol. Laju difusi yang rendah ini menghambat pencampuran antara uap bahan bakar dengan udara untuk membentuk *flammable mixture*. Faktor-faktor tersebut menyebabkan waktu pembakaran droplet dengan kandungan metil oleat yang lebih banyak menjadi lebih panjang.

Bila dibandingkan dengan pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat [11], adanya penambahan etanol dalam droplet mengakibatkan perubahan *burning time* yang tidak terlalu signifikan, tetapi *ignition delay time* dan *droplet lifetime* mengalami penurunan yang cukup besar. Hal ini

berhubungan dengan jumlah bahan bakar yang menguap dan *flammable mixture* yang terbentuk, serta kalor yang dihasilkan pada saat awal api menyala. Etanol dalam droplet menguap dan terbakar terlebih dahulu mempunyai peranan penting dalam mekanisme penguapan dan pembakaran dari droplet yang masih tersisa. Penambahan etanol pada metil laurat mengakibatkan bertambahnya *burning time* pembakaran droplet, sebaliknya penambahan etanol pada metil oleat mengakibatkan berkurangnya *burning time* pembakaran droplet [11]. Pada kedua jenis FAME tersebut penambahan etanol mengakibatkan pengurangan *ignition delay time* dan *droplet lifetime* secara signifikan.

Nilai dari *average droplet burning rate* pada pembakaran droplet diperoleh dari nilai luas permukaan droplet pada waktu $t = 0$ dibagi dengan lamanya waktu pembakaran droplet (*droplet burning time*). Gambar 3 menunjukkan nilai dari *average burning rate* pada pembakaran droplet campuran metil laurat - metil oleat - etanol.



Gambar 3. *Average burning rate* pada pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat - etanol.

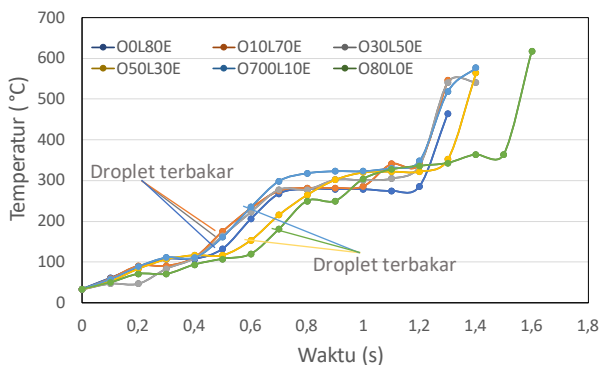
Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai kecepatan pembakaran semakin berkurang dengan semakin bertambahnya persentase metil oleat didalam droplet. Kecepatan pembakaran rata-rata atau *average burning rate* menyatakan pengurangan luas permukaan droplet rata-rata tiap satuan waktu selama droplet menyala (*burning time*). Karena setiap campuran bahan bakar mempunyai diameter awal droplet yang sama, maka grafik *average burning rate* merupakan konstanta, yaitu luas permukaan droplet pada $t = 0$, dibagi dengan nilai *burning time* yang terdapat pada Gambar 2. Pada persentase yang rendah, adanya metil oleat menyebabkan penurunan *average burning rate* secara signifikan, tetapi pada persentase metil oleat yang relatif besar penurunan *average burning rate* relatif kecil.

Perhitungan nilai *average burning rate* dilakukan selama droplet menyala, yaitu selama periode *burning time*. Walaupun metil oleat merupakan *unsaturated*

FAME yang memiliki kestabilan oksidasi lebih rendah, tetapi metil oleat mempunyai rantai karbon yang lebih panjang, berat molekul dan kalor laten penguapan yang lebih besar, serta koefisien difusivitas massa yang lebih rendah sehingga *flammable mixture* terbentuk lebih lambat. Hal-hal tersebut menyebabkan droplet dengan kandungan metil oleat yang lebih besar mempunyai *average burning rate* yang lebih rendah. Grafik yang menunjukkan nilai *burning rate* sesaat, tidak merupakan garis lurus (fungsi linier), parameter ini tidak dibahas di dalam artikel ini. Nilai *burning rate* sesaat merupakan kemiringan pada grafik d^2/d_0^2 terhadap t/d_0^2 .

Temperatur pembakaran droplet

Temperatur pembakaran droplet diukur menggunakan *thermocouple junction* yang sekaligus berfungsi sebagai penyangga droplet. Temperatur yang terukur adalah temperatur droplet dengan adanya pengaruh temperatur *coil heater* (selama fase pemanasan - penguapan droplet/*ignition delay time*) dan temperatur nyala api disekeliling droplet (selama fase pembakaran droplet/*burning time*). Temperatur droplet digambarkan sebagai fungsi dari waktu sepanjang *droplet lifetime*. Waktu $t = 0$ detik adalah saat *coil heater* mulai diletakkan dibawah droplet. Gambar 4 menunjukkan temperatur droplet selama proses pembakaran untuk berbagai komposisi bahan bakar.



Gambar 4. Temperatur pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat - etanol.

Total waktu yang ditunjukkan pada masing-masing kurva pada Gambar 4 menunjukkan *droplet lifetime*, dari $t = 0$ sampai titik droplet terbakar adalah *ignition delay time* dan dari titik droplet terbakar hingga titik terakhir adalah *droplet burning time*. Tetapi waktu pembakaran yang diperoleh pada Gambar 2 sedikit berbeda dengan waktu pada Gambar 4. Hal ini disebabkan data pada Gambar 2 diperoleh dari data visualisasi nyala api dengan jumlah pengambilan data 60 *frame* per detik, sedangkan *sampling rate* untuk pengambilan data temperatur pada Gambar 4 adalah 10 data per detik. Grafik pada Gambar 2 mempunyai

ketelitian yang lebih baik dari pada grafik pada Gambar 4.

Gambar 4 menunjukkan bahwa gradien temperatur pada pembakaran droplet campuran metil laurat - etanol pada saat pemanasan dan awal pembakaran lebih besar dari pada gradien temperatur pada pembakaran droplet campuran metil oleat - etanol. Campuran ini terbakar lebih cepat dan mempunyai temperatur maksimum lebih rendah. Metil laurat mempunyai panas jenis dan kalor penguapan yang lebih rendah sehingga mempunyai kenaikan temperatur yang lebih besar dan menguap lebih cepat saat dipanaskan. Bahan bakar ini membentuk *flammable mixture* pada waktu yang lebih singkat dan menyala lebih awal. Tetapi kandungan energi pada droplet campuran metil laurat - etanol lebih rendah sehingga menghasilkan kalor dan temperatur maksimum yang lebih rendah selama proses pembakaran. Pada akhir proses pembakaran, temperatur pembakaran naik dengan gradien yang curam, karena pada waktu tersebut droplet hampir menguap sepenuhnya dan sensor termo kopel terpapar langsung pada nyala api, sehingga temperaturnya naik secara cepat. Bila dibandingkan dengan pembakaran droplet metil laurat [11], penambahan etanol mengakibatkan temperatur maksimum yang lebih rendah. Hal tersebut disebabkan nilai kalor etanol yang lebih rendah dari laurat karena kandungan oksigen yang cukup besar didalamnya, sekitar 35% dari massa etanol adalah oksigen. Etanol mempunyai volatilitas yang tinggi, temperatur nyala rendah, dan mendorong terbentuknya *flammable mixture* dengan cepat, sehingga dapat mengurangi *ignition delay time* dengan sangat signifikan.

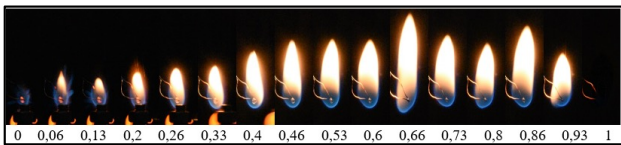
Campuran metil oleat - etanol mempunyai gradien temperatur yang lebih rendah saat pemanasan dan awal pembakaran, setelah api menyala gradien temperatur meningkat lebih besar. Bahan bakar terbakar dalam waktu yang lebih lama dan mempunyai temperatur maksimum yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan metil oleat mempunyai panas jenis dan kalor laten penguapan yang lebih besar, sehingga mempunyai kenaikan temperatur yang lebih rendah saat pemanasan. Tetapi, metil oleat mempunyai nilai kalor yang lebih besar sehingga menghasilkan lebih banyak kalor selama proses pembakaran mengakibatkan kenaikan temperatur yang lebih besar. Temperatur pembakaran yang tinggi berhubungan dengan jumlah kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran.

Gradien temperatur selama proses pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat - etanol dengan persentase metil oleat hingga 30% mempunyai

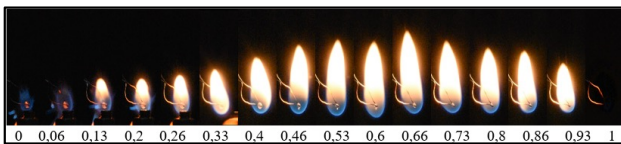
gradien temperatur yang serupa dengan gradien temperatur pada pada pembakaran droplet campuran metil laurat - etanol. Campuran bahan bakar dengan persentase metil oleat 50% memiliki kecenderungan gradien temperatur yang serupa dengan pembakaran droplet metil oleat - etanol. Gradien temperatur pada pembakaran droplet bahan bakar dengan kandungan metil oleat 70% mempunyai kecenderungan yang berbeda, gradien temperatur naik dengan cepat, baik pada awal pembakaran sampai akhir pembakaran. Pembakaran terjadi pada waktu yang relatif singkat dengan temperatur maksimum yang cukup tinggi, dan total pembangkitan energi yang juga relatif tinggi sehubungan dengan temperatur yang relatif tinggi selama proses pembakaran droplet. Hal tersebut berhubungan dengan fenomena *microexplosion* yang terjadi pada pembakaran metil oleat - metil laurat - etanol, yang akan dibahas pada bagian berikutnya dalam artikel ini.

Sifat dan visualisasi nyala api

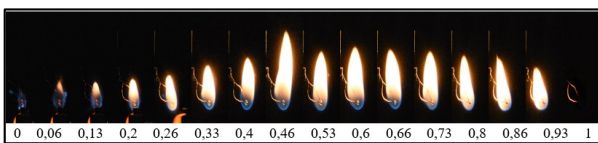
Visualisasi nyala api menggambarkan evolusi nyala api sejak awal proses pembakaran sampai api padam. Nyala api selama proses pembakaran ditampilkan pada *normalized time* (waktu dibagi dengan lama pembakaran untuk masing-masing droplet). Penggunaan *normalized time* berguna untuk menunjukkan perbandingan evolusi nyala api selama proses pembakaran untuk setiap jenis campuran bahan bakar.



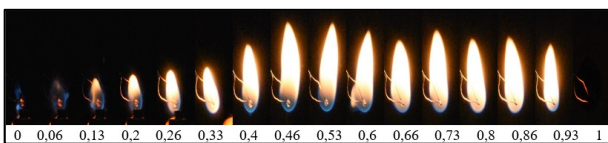
Gambar 5. Visualisasi api pembakaran O0L80E.



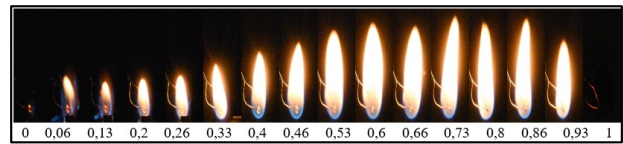
Gambar 6. Visualisasi api pembakaran O10L70E.



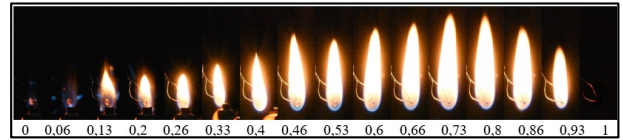
Gambar 7. Visualisasi api pembakaran O30L50E.



Gambar 8. Visualisasi api pembakaran O50L30E.



Gambar 9. Visualisasi api pembakaran O70L10E.



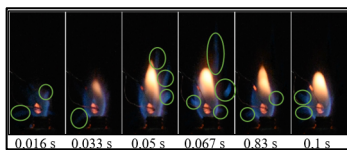
Gambar 10. Visualisasi api pembakaran O80L0E.

Visualisasi nyala api untuk setiap campuran bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 5 - 10. Nyala api campuran metil laurat-etanol mempunyai bagian berwarna biru pada bagian bawah *flame front*. Nyala api berwarna biru biasanya berhubungan dengan pembakaran campuran udara - bahan bakar dengan komposisi yang mendekati stoikiometri atau campuran miskin bahan bakar. Hal ini menunjukkan difusi uap bahan bakar - udara yang terjadi dengan cepat pada bagian bawah droplet untuk membentuk campuran yang mendekati stoikiometri. Sebagian besar uap bahan bakar bergerak ke arah atas karena pengaruh gaya *buoyancy* menghasilkan campuran kaya bahan bakar pada bagian atas droplet. Nyala api berwarna kuning-oranye menunjukkan pembakaran campuran kaya bahan bakar dengan pembentukan partikel jelaga di dalamnya. Semakin besar kandungan metil oleat di dalam droplet, semakin sedikit bagian nyala api yang berwarna biru. Hal tersebut menunjukkan difusivitas uap metil oleat - udara yang lebih lambat, sehingga sulit untuk membentuk campuran udara - bahan bakar yang mendekati kondisi stoikiometri. Rendahnya difusivitas uap metil oleat juga ditunjukkan dengan tinggi nyala api yang lebih besar dengan bertambahnya persentase metil oleat. Difusivitas yang lebih rendah memerlukan waktu yang lebih lama dan ruang yang lebih besar untuk membentuk *flammable mixture*, ini mengakibatkan ukuran *flame front* lebih besar. Gambar 9 dan 10 menunjukkan siluet warna oranye disekeliling *flame front*, hal ini mungkin berhubungan dengan radiasi termal yang lebih besar dari nyala api.

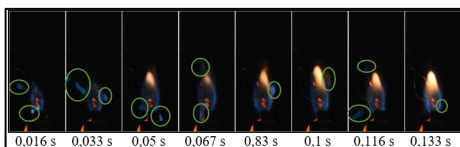
Visualisasi nyala api untuk setiap jenis bahan bakar pada Gambar 5 - 10 menunjukkan bahwa pada awal pembakaran seluruh nyala api didominasi oleh warna biru. Nyala api ini merupakan pembakaran etanol, yang menguap dan terbakar terlebih dahulu karena memiliki temperatur didih dan temperatur nyala yang rendah. Adanya kandungan oksigen yang tinggi pada etanol, memudahkan terbentuknya campuran stoikiometri yang menghasilkan nyala api berwarna biru. Etanol yang terdapat dalam droplet tidak

menguap dan terbakar bersama-sama dengan komponen bahan bakar lainnya. Tetapi menguap dan terbakar lebih dahulu, yang mana proses ini memicu dan mempercepat reaksi pembakaran metil oleat dan metil laurat, dan membentuk interaksi tertentu selama proses pembakarannya. Interaksi antara komponen bahan bakar selama proses pembakaran ini yang diharapkan dapat memperbaiki mekanisme pembakaran bahan bakar sehingga dapat menghasilkan pembakaran dalam *engine* untuk kinerja yang lebih baik.

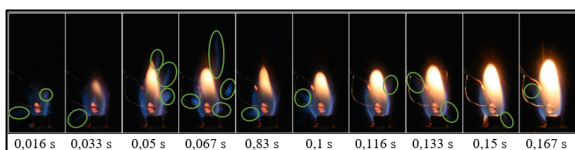
Visualisasi nyala api diatas juga menunjukkan adanya percikan atau loncatan nyala api diluar nyala api utama/*main flame front*. Percikan nyala api ini terjadi karena adanya *microexplosion*. *Microexplosion* adalah ledakan yang terjadi karena penguapan droplet yang tersusun dari beberapa jenis bahan bakar dengan temperatur didih yang berbeda secara signifikan. Saat uap dari komponen yang mempunyai titik didih lebih rendah terjadi dibagian dalam droplet, terbentuk gelembung uap yang ukurannya akan semakin membesar seiring dengan semakin banyaknya uap yang terbentuk. Ekspansi uap ini akan terhalang oleh fase liquid yang terdapat disekelilingnya, mengakibatkan terjadinya kenaikan tekanan uap dalam droplet. Jika tekanan uap ini cukup tinggi, dapat menyebabkan terjadinya ledakan droplet yang dikenal dengan *microexplosion*. Gambar 11 – Gambar 13 menunjukkan *microexplosion* yang terjadi pada pembakaran droplet dengan kandungan metil oleat berturut-turut sebesar 0%, 30% dan 80%.



Gambar 11. *Microexplosion* pada pembakaran O0L80E.



Gambar 12. *Microexplosion* pada pembakaran O30L50E.



Gambar 13. *Microexplosion* pada pembakaran O80L0E.

Waktu pada Gambar 11 - 13 menunjukkan waktu pembakaran yang sebenarnya, dengan $t = 0$ adalah saat *coil heater* diletakkan dibawah droplet. Terjadinya *microexplosion* meningkat, baik dalam jumlah

ledakan droplet maupun dalam interval waktu terjadinya *microexplosion*, dengan bertambahnya kandungan metil oleat dalam droplet. Setiap droplet mempunyai kandungan etanol yang sama sebesar 20%. *Microexplosion* lebih sedikit terjadi pada campuran metil laurat - etanol, hal ini dikarenakan metil laurat - etanol membentuk campuran yang lebih homogen. Selain itu metil laurat mempunyai viskositas yang lebih kecil, sehingga uap yang terbentuk di dalam droplet dapat bergerak menembus metil laurat cair disekelilingnya dan bergerak menuju permukaan droplet. Sebagian uap dapat keluar dari dalam droplet tanpa mengakibatkan terjadinya *microexplosion*. Sebaliknya pada metil oleat, uap yang terbentuk dalam droplet akan terakumulasi didalamnya karena tidak bisa melewati metil oleat yang mempunyai viskositas tinggi. Uap yang terus mengalami pemanasan akan mengakibatkan tekanannya semakin tinggi, bila tekanan uap ini cukup besar maka akan terjadi *microexplosion*. Fenomena *microexplosion* merupakan hal yang menguntungkan dalam pembakaran droplet, karena dapat mempercepat waktu pembakaran droplet (*droplet burning time*). *Droplet lifetime* campuran metil oleat - metil laurat - etanol jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan *droplet lifetime* campuran metil oleat - metil laurat saja [11]. Tanpa adanya penambahan etanol, waktu pembakaran metil oleat 36.87% lebih besar bila dibandingkan terhadap waktu pembakaran metil laurat. Dengan adanya penambahan etanol, perbedaan kedua nilai diatas berkurang menjadi 13,88%. Penurunan nilai ini menunjukkan pentingnya pengaruh etanol terhadap pembakaran metil oleat, yang berhubungan dengan terjadinya *microexplosion* yang intensif pada pembakaran campuran metil oleat-etanol.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, proses pembakaran droplet campuran metil oleat - metil laurat - etanol dengan persentase etanol tetap sebesar 20% telah dilakukan. Persentase metil oleat dan metil laurat divariasikan dari 0% hingga 80%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan metil oleat dalam droplet mengakibatkan terjadinya beberapa hal sebagai berikut:

- Peningkatan *ignition delay time* dan penurunan *average burning rate* yang berhubungan dengan berat molekular, viskositas, temperatur didih, kalor laten penguapan dan temperatur nyala metil oleat yang lebih besar.
- Temperatur maksimum selama proses pembakaran yang lebih tinggi, sehubungan dengan nilai kalor

metil oleat dan *heat release* yang lebih tinggi. Adanya kandungan metil laurat menyebabkan peningkatan gradien temperatur pada tahap awal proses pembakaran.

- Intensitas dan durasi waktu terjadinya *microexplosion* semakin meningkat pada droplet dengan tambahan etanol. Penambahan etanol mempunyai efek yang lebih signifikan pada pembakaran droplet dengan kandungan oleat yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas pendanaan penelitian dengan kontrak Nomor: 17/UN10.F07/PN/2024. Kami juga menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada semua pihak yang telah membantu dalam pengambilan data selama penelitian ini yang sangat mendukung keberhasilan penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Lilis Yuliati: merencanakan penelitian, mengawasi pelaksanaan eksperimen, menulis bagian utama manuskrip.

Nurkholis Hamidi: setup peralatan eksperimen, menganalisis data eksperimen merevisi dan menyunting manuskrip akhir.

Winarto: menganalisis data eksperimen merevisi dan menyunting manuskrip akhir.

Komang Bagas Ary Yogaswara dan Endrico Maelro Torong: mengambil dan mengolah data penelitian, menulis draft artikel ilmiah.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini telah didanai dari dana Penelitian DIPA Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Nomor: 17/UN10.F07/PN/20.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Han, L. M. T. Somers, R. Cracknell, A. Joedicke, and R. Wardle, Experimental investigation of ethanol/diesel dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine, *Fuel*, 275 (2020) 117867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>.
- [2] A. Roy, Y. Dabhi, H. Brahmbhatt, S.K. Chourasia, Effect of emulsified fuel based on dual blend of Castor-Jatropha biodiesel on CI engine performance and emissions, *Alexandria Eng. J.* 60 (2021) 1981–1990.

<https://doi.org/10.1016/j.aje.2020.12.003>.

- [3] W. Ferdinand, A. Sako, A. Fofana, dan K. Blaise, 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*. 113 (2017) 660–668.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.006>.

- [4] 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*. 113 (2017) 660–668.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.006>.

- [5] 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 biodieselfuel: a review, *Journal of Automobile Engineering*, 229 (2014) 1–34.

<https://doi.org/10.1177/0954407014541103>.

- [6] M. Khalaf, T. Xuan, W. A. Abdel-Fadeel, H.M.M. Mustafa, S. Abdelhady, M.F.C. Esmail, A comparative study of diesel engine fueled by Jatropha and Castor biodiesel: Performance, emissions, and sustainability assessment, *Process Safety and Environmental Protection*, 188 (2024) 453–466.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.137>.

- [7] G. Ergen, Comprehensive analysis of the effects of alternative fuels on diesel engine performance combustion and exhaust emissions: Role of biodiesel, diethyl ether, and EGR, *Thermal Science and Engineering Progress* 47 (2024) 102307.

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102307>.

- [8] A. Prabu, Influence of introducing clove antioxidant into blends of diesel and biodiesel fuels on engine performance, *Next Energy* 2 (2024) 100047.

<https://doi.org/10.1016/j.nxener.2023.100047>.

- [9] I.A. Ibadurrohman, N. Hamidi, L. Yuliati, The role of the unsaturation degree on the droplet combustion characteristics of fatty acid methyl ester, *Alexandria Engineering Journal*, 61 (2022) 2046–2060.

<https://doi.org/10.1016/j.aje.2021.07.038>.

- [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*, 334 (2023) 126731.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126731>.

- [11] L. Yuliati, N. Hamidi, M.L. Lazuardi, dinamika dan nyala api pembakaran droplet campuran metil laurat – metil oleat, *Jurnal Rekayasa Mesin* 14 (2023) 779 – 789. <https://doi.org/10.21776/jrm.v14i3.1764>.