

PENGARUH PANJANG RANTAI KARBON DAN DERAJAT KETIDAKJENUHAN TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DROPLET ASAM LEMAK TUNGGAL

**Ibrahim Ahmad
Ibadurrohman**

Mahasiswa S2
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
ibadurrohman@student.ub.ac.id

Nurkholis Hamidi

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
hamidy@ub.ac.id

Lilis Yuliati

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
lilis_y@ub.ac.id

This study aimed to investigate the effect of the different carbon chain lengths and the degree of unsaturation of six fatty acids as the constituent of vegetable oils. The droplet combustion was carried out at an ambient temperature and atmospheric pressure. The variation in the carbon chain length and the degree of unsaturation resulted in different physical and chemical properties of the fuel, which affect the droplet combustion characteristics. The increase of the carbon chain length results in longer ignition delay times and shorter burning durations, as well as higher droplet temperatures, burning rate constant, and specific power output. Conversely, an increase in the degree of unsaturation with the presence of double bond results in shorter ignition delay and longer burning duration, as well as higher droplet temperatures, but lower burning rate constant and specific power output. The droplet diameter evolution divides the combustion period into unsteady burning zones and quasi-linear burning zones. The flame dimension of unsaturated fatty acid is higher due to the soot formation at the top of the flame. A bluish flame related to the higher oxygen content in the molecule can be observed in saturated fatty acids. The short-chain saturated fatty acid has a large non-luminous zone because they are rich in oxygen. In contrast, the long-chain saturated fatty acid has a narrow non-luminous zone with high flame radiation.

Keywords: Carbon Chain Length, Degree of Unsaturation, Fatty Acid, Droplet Combustion Characteristics

1. PENDAHULUAN

Bahan bakar biodiesel yang berasal dari bahan baku berbeda memiliki konsentrasi asam lemak dan properti fisikokimia dengan perbedaan yang signifikan. Densitas, viskositas, *heating value*, volatilitas, dan *cetane number* merupakan properti fisik utama dari bahan bakar yang mempengaruhi proses pembakaran pada bahan bakar biodiesel [1]. Properti fisik dan kimia yang berbeda merupakan fungsi dari komposisi asam lemak penyusun minyak nabati yang memiliki perbedaan struktur molekulnya, meliputi panjang rantai karbon, derajat ketidakjenuhan, dan percabangan rantai [2,3]. Hal paling mendasar yang membedakan antara bahan bakar petrodiesel dengan minyak nabati adalah adanya kandungan oksigen yang berkisar antara 10% hingga 20% [4]. Asam lemak merupakan senyawa hidrokarbon oksigenat panjang yang memiliki ujung gugus hidroksil (COOH) dengan rumus kimia $C_xH_yO_z$ [5,6].

Komposisi dasar dari minyak nabati tersusun atas trigliserida yang terdiri atas tiga asam lemak dan satu molekul trigliserida [7]. Panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkap karbon-karbon bervariasi pada asam lemak, sehingga digolongkan sebagai asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh. Ketidakjenuhan asam lemak mengacu pada adanya ikatan rangkap antara dua atom karbon yang berdekatan dalam rantai hidrokarbon. Asam lemak jenuh hanya tersusun atas ikatan karbon-karbon tunggal dan tidak dapat menerima hidrogen tambahan. Sedangkan asam lemak tak jenuh memiliki satu atau lebih ikatan rangkap dalam rantai

hidrokarbon [7]. Asam lemak jenuh memiliki struktur rantai karbon yang lurus sedangkan asam lemak tak jenuh memiliki struktur rantai karbon yang bengkok karena adanya ikatan rangkap dengan konfigurasi cis [4,8]. Minyak nabati yang digunakan untuk membuat biodiesel umumnya tersusun atas 10 jenis asam lemak dengan panjang rantai karbon antara 12 hingga 22. Lebih dari 90% di antaranya merupakan rantai karbon panjang antara 16 hingga 18 dengan struktur hidrokarbon oksigenat jenuh maupun tak jenuh. Asam lemak ini terdiri atas rantai jenuh, tak jenuh tunggal, dan tak jenuh ganda [5,9,10].

Kualitas dari biodiesel ditentukan oleh properti fisik dan kimianya yang berperan penting dalam aplikasinya sebagai bahan bakar pada mesin diesel. Asam lemak jenuh dengan rantai karbon panjang memiliki kualitas pembakaran yang baik karena *cetane number* yang tinggi, tetapi viskositasnya yang tinggi menyebabkan permasalahan selama proses penguapan [10]. Bahan bakar dengan massa molekul yang besar, volatilitas yang rendah, dan viskositas kinematik yang tinggi akan mengurangi performa dari *diesel engine* [11]. Properti ini juga dimiliki asam lemak jenuh dengan rantai karbon panjang. Untuk memperoleh kinerja pada temperatur rendah yang baik, biodiesel harus memiliki konsentrasi asam lemak jenuh berantai panjang yang rendah. Sedangkan untuk stabilitas oksidatif yang baik, biodiesel harus memiliki konsentrasi asam lemak jenuh dan tak jenuh tunggal, tetapi dengan konsentrasi asam lemak tak jenuh ganda yang rendah [12]. Analisis terhadap *cetane number*, emisi gas buang, kalor pembakaran, properti temperatur rendah, stabilitas oksidatif, viskositas, dan lubrisitas menghasilkan rekomendasi bahwa asam oleat merupakan senyawa terbaik untuk kualitas biodiesel yang tinggi [13].

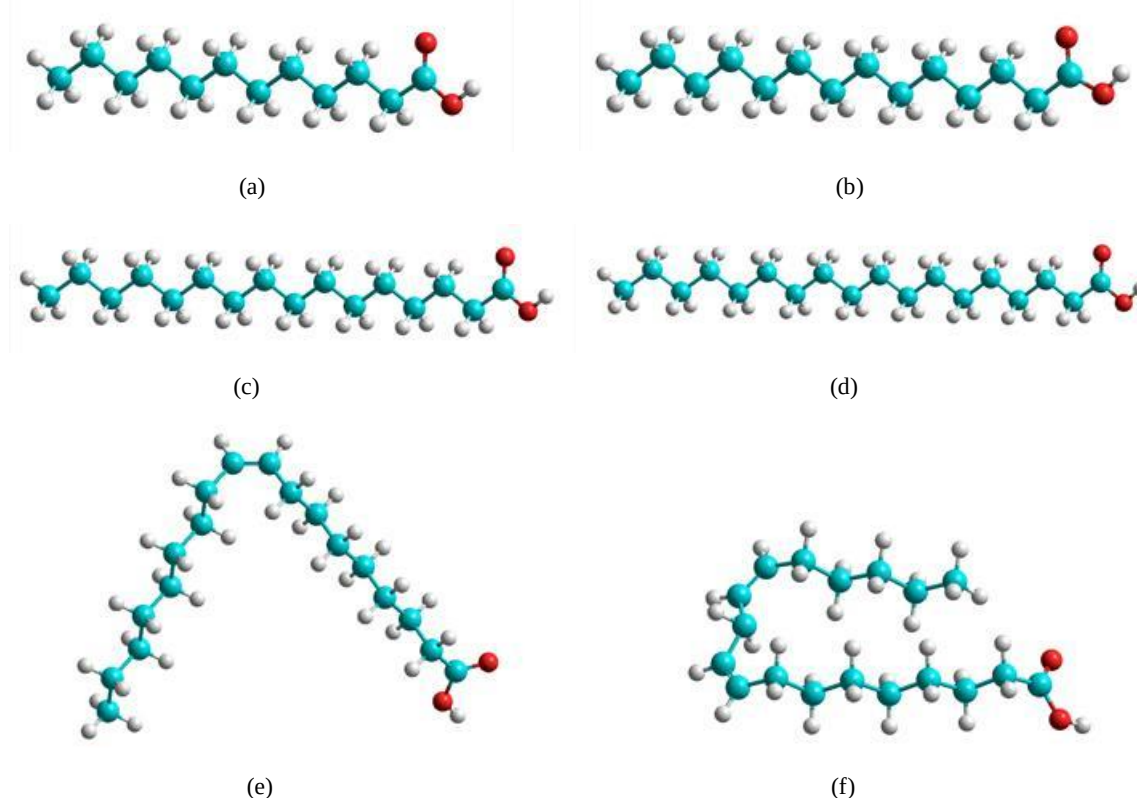
Minyak nabati yang tersusun atas trigliserida dengan beragam jenis asam lemak umumnya didominasi oleh asam lemak tak jenuh [14]. Pada jenis minyak nabati yang sama, perbedaan komposisi asam lemak penyusunnya dipengaruhi oleh kondisi iklim, musim tumbuh, dan usia tanaman [15]. Beberapa penelitian merekomendasikan pengayaan asam lemak tertentu melalui modifikasi genetik untuk meningkatkan sifat biodiesel secara keseluruhan. Kontribusi asam lemak tertentu mendukung beberapa sifat, namun memiliki efek yang tidak diinginkan pada sifat lainnya. Akibatnya, spesifikasi satu profil asam lemak tertentu untuk memperbaiki semua sifat biodiesel tidak memungkinkan. Oleh karena itu, penting untuk memutuskan apakah suatu biodiesel harus mengandung asam lemak jenuh atau asam lemak tak jenuh dalam jumlah yang lebih besar untuk mendapatkan sifat bahan bakar yang lebih baik [7]. Variasi panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkap (derajat ketidakjenuhan) secara umum keduanya menghasilkan properti bahan bakar yang diinginkan dan tidak diinginkan. Karena proporsi asam lemak tertentu pada properti bahan bakar yang berbeda akan memberikan pengaruh yang saling bertolak belakang, maka tidak mungkin menyimpulkan bahwa komposisi tunggal dengan konsentrasi optimum akan memberikan efek penuh terhadap keseluruhan properti bahan bakar [3,12]. Memecahkan masalah ini secara bersamaan sulit dilakukan karena solusi untuk salah satu masalah sering kali memperburuk masalah lain. Karakteristik minyak nabati dengan asam lemak yang kompleks dapat ditelusuri lebih jauh terkait dengan properti bahan bakar pada struktur asam lemak tunggalnya [13]. Sehingga untuk mengkarakterisasi properti dari biodiesel secara keseluruhan, maka diperlukan investigasi lebih lanjut pada asam lemak tunggal dengan perbedaan pada panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkapnya [16].

Pengujian pada enam jenis asam lemak tunggal dilakukan melalui pembakaran *droplet*. Pembakaran *droplet* sangat penting untuk memahami mekanisme pada pembakaran *spray* di mana sebelum terjadi pembakaran pada metode ini bahan bakar teratomisasi menjadi banyak *droplet* berukuran kecil [17]. Pembakaran *droplet* tunggal akan merepresentasikan *droplet* yang terbentuk pada pembakaran *spray*. Pada beberapa penelitian terdahulu, uji pembakaran *droplet* banyak dilakukan pada minyak nabati dan biodiesel yang terdiri atas senyawa multikomponen [18–22]. Pada penelitian tersebut, fenomena-fenomena yang diamati selama pembakaran *droplet* dikaitkan dengan konsentrasi senyawa yang paling dominan dalam bahan bakar. Padahal, adanya senyawa-senyawa lain dalam konsentrasi kecil tentunya juga memberikan efek terhadap pembakaran yang dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengungkap bagaimana peranan masing-masing senyawa asam lemak tunggal yang banyak terkandung dalam berbagai jenis minyak nabati. Pada penelitian terdahulu, belum pernah dilakukan studi terkait perbedaan panjang rantai karbon dan perbedaan jumlah ikatan rangkap terhadap karakteristik pembakaran yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembakaran *droplet* pada asam lemak tunggal yang bervariasi pada panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkapnya. Karakteristik pembakaran *droplet* yang diamati meliputi *ignition delay time*, *burning duration*, temperatur *droplet*, evolusi diameter *droplet*, *burning rate constant*, *specific power output*, dan visualisasi nyala api. Karakteristik pembakaran *droplet* pada masing-masing asam lemak dikaitkan dengan properti fisik dan kimia dari asam lemak tersebut.

2. METODE DAN BAHAN

2.1 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan enam jenis asam lemak tunggal berupa asam lemak jenuh dan tak jenuh yang umumnya dominan pada beragam jenis minyak nabati dengan variasi pada panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkapnya. Pada asam lemak jenuh tidak memiliki ikatan rangkap dengan rumus umum molekulnya yaitu $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$. Asam lemak jenuh berfase padat pada temperatur ruang karena memiliki *melting point temperature* yang relatif tinggi. Asam lemak jenuh yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas asam laurat ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$), asam miristat ($\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2$), asam palmitat ($\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$), dan asam stearat ($\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$). Sedangkan asam lemak tak jenuh memiliki ikatan rangkap dengan rumus umum molekulnya untuk *monounsaturated fatty acid* yaitu $\text{C}_n\text{H}_{2n-1}\text{COOH}$ dan untuk *di-unsaturated fatty acid* yaitu $\text{C}_n\text{H}_{2n-3}\text{COOH}$. Asam lemak tak jenuh berfase cair karena adanya ikatan rangkap menurunkan nilai *melting point* di bawah temperatur ruang. Asam lemak tak jenuh yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas asam oleat ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) dan asam linoleat ($\text{C}_{18}\text{H}_{32}\text{O}_2$).



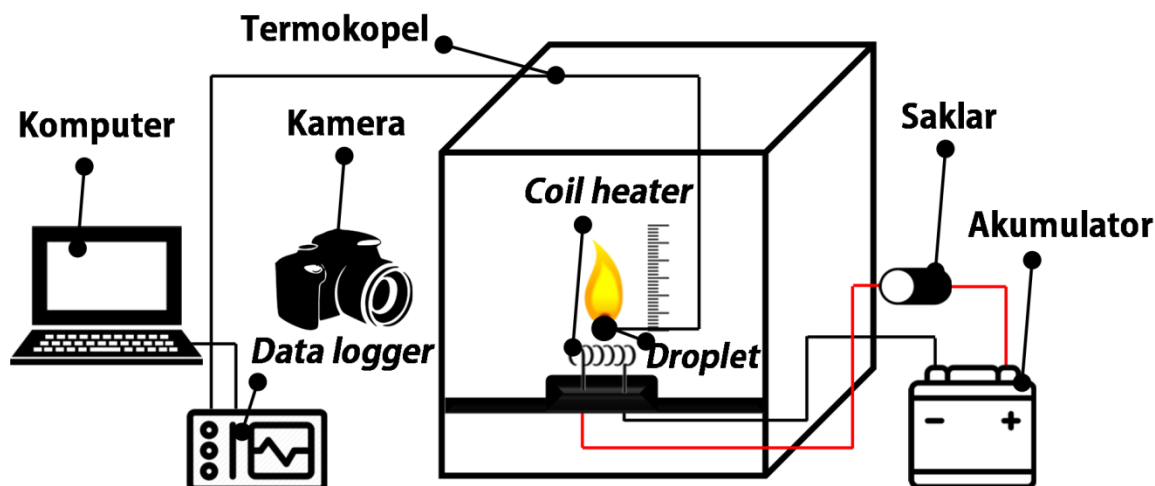
Gambar 1: Struktur geometri a) asam laurat, b) asam miristat, c) asam palmitat, d) asam stearat, e) asam oleat, f) asam linoleat

2.2 Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkap terhadap karakteristik pembakaran *droplet* pada asam lemak dengan instalasi penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Metode pengujian senyawa asam lemak tunggal dengan menggunakan *droplet* berdiameter 1,8 mm dengan toleransi $\pm 0,05$ mm yang dibentuk menggunakan *microsyringe* dan ditempatkan pada *thermocouple junction*. Pengujian ini dilakukan pada tekanan atmosfer dan temperatur ruangan. Setiap asam lemak diberi perlakuan *preheating* dalam bejana berisi air dengan pemanasan dan dipertahankan pada temperatur sebesar 75°C (*melting point* maksimum pada asam stearat sebesar 71°C) untuk mengondisikan seluruh asam lemak pada fase cairnya. Termokopel tipe K yang terbuat dari material Al-Cr dengan diameter sebesar 100- μm dihubungkan ke input Advantech *data logger* sedangkan output dari *data logger* dihubungkan ke komputer. *Software* DAQNav-USB4718 dengan kesalahan maksimum pada pembacaan sebesar $\pm 1,5^\circ\text{C}$ (untuk pengoperasian termokopel tipe K) digunakan untuk mencatat temperatur *droplet* selama pengujian dengan frekuensi pencatatan data sebesar 10 Hz. Kemudian data disimpan dalam komputer dalam bentuk format *comma-separated values* (CSV) yang dibaca dengan menggunakan Microsoft Excel.

Kamera Nikon D3400 digunakan untuk memvisualisasikan nyala api selama pengujian dengan pengaturan *frame rate* sebesar 60 fps. Kamera diletakkan pada 5 cm lurus dan sejajar dengan *thermocouple*

junction. Sedangkan *thermocouple junction* diletakkan dengan jarak 3 mm di atas *coil heater*. Akumulator digunakan sebagai penyuplai daya listrik untuk memanaskan *coil heater* hingga menyala terang dan mencapai temperatur sebesar ± 720 °C. Kemudian *coil heater* digunakan untuk memanaskan *droplet* hingga mencapai temperatur penyalanya. Kamera dan *data logger* secara bersamaan mulai mencatat ketika *coil heater* telah diletakkan tepat di bawah *droplet*. Selanjutnya *coil heater* di geser menjauh ketika *droplet* mulai menyala untuk meminimalisir efek transfer panas dari *coil heater* selama pembakaran *droplet* berlangsung.



Gambar 2: Skema instalasi penelitian

Selanjutnya, data visualisasi nyala api dipisahkan sebanyak 60 gambar untuk setiap 1 sekon menggunakan aplikasi Adobe Premiere Pro 2019. Analisis perubahan diameter *droplet* dan visualisasi nyala api dengan *post-processing method* dilakukan menggunakan aplikasi ImageJ. *Ignition delay time* dihitung ketika awal temperatur *droplet* mulai berubah dari temperatur lingkungan hingga awal nyala api dapat teramati. Sedangkan, *burning duration* dihitung dari awal nyala api hingga api padam. Setiap pengukuran dikalikan dengan faktor skala yang telah diketahui, dan hasilnya merupakan ukuran piksel aktual. Luasan *droplet* diperoleh dengan menghitung jumlah piksel dalam *droplet*. Setelah luasannya diketahui, maka diameter *droplet* dapat diperoleh. Selanjutnya, dimensi nyala api diperoleh dengan menghitung jumlah piksel dari garis lurus yang ditarik dari bawah *non-luminous zone* hingga ujung nyala api. Metode ini diulang sebanyak 5 kali pada masing-masing asam lemak untuk meningkatkan keakuratan data. Oleh karena itu, hanya data dengan diameter awal *droplet* yang sesuai saja yang datanya akan diolah. *Error bars* pada grafik *ignition delay time*, *burning duration*, dan *specific power output* menunjukkan besarnya standar deviasi pada setiap variasi pengambilan data. Plot data pada grafik tersebut merupakan nilai rata-rata dari setiap pengambilan data.

Pada penelitian ini, salah satu variabel kontrol penelitian yang digunakan adalah diameter *droplet* yang ekuivalen dengan volume *droplet*. Oleh karena itu, analisis kandungan energi pada bahan bakar perlu dinyatakan dalam setiap satuan volumenya sebagai *energy density* ($\text{HHV}_{\text{volumetric}}$) yang dirumuskan pada Persamaan 1 berikut:

$$\text{Energy density} = \text{HHV}_{\text{gravimetric}} \times \rho \quad (1)$$

Dengan $\text{HHV}_{\text{gravimetric}}$ merupakan nilai *heating value* tiap satuan massa (kJ/gram) dan ρ merupakan densitas bahan bakar (gram/cm³). Parameter pengukuran terhadap laju pembakaran pada asam lemak dinyatakan sebagai *burning rate constant*. Parameter ini mengukur kemiringan evolusi dari kuadrat diameter terhadap waktu pembakaran yang dihitung menggunakan rumus *d² law* pada Persamaan 2.

$$K = \frac{D_0^2 - D^2}{t} \quad (2)$$

Dengan K merupakan *burning rate constant* (mm²/s), D_0 merupakan diameter awal *droplet* (mm), D merupakan diameter *droplet* pada waktu t (mm), dan t merupakan waktu pembakaran (s). Setelah *burning rate constant* diketahui, maka dapat diperoleh nilai *specific power output* pembakaran. Pada analisis *burning rate constant* hanya melibatkan kecepatan pembakaran. Sedangkan, pada analisis *specific power output*, besarnya daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan pembakaran dan densitas energi dari bahan bakar. Nilai *specific power output* pada pembakaran *droplet* asam lemak dihitung menggunakan Persamaan 3 Sebagai berikut:

$$P_{\text{specific}} = K \times \rho \times \text{HHV}_{\text{gravimetric}} \quad (3)$$

Dengan P_{specific} adalah *specific power output* (kJ/m.s), K merupakan *burning rate constant* (m²/s), dan ρ merupakan densitas bahan bakar (gram/m³), dan $\text{HHV}_{\text{gravimetric}}$ merupakan nilai kalor bahan bakar tiap satuan massa (kJ/gram).

3. HASIL DAN DISKUSI

Tabel 1 menunjukkan properti fisik dan kimia asam lemak pada perbedaan panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkap. Properti asam lemak dan karakteristik pembakarannya dipengaruhi oleh struktur molekul, panjang rantai karbon, derajat ketidakjenuhan, dan posisi ikatan rangkap pada senyawa asam lemak [7,23]. Panjang rantai karbon pada asam lemak berdampak pada properti fisik yang dihasilkan [9]. Semakin jenuh bahan bakar dengan semakin pendeknya rantai karbon menghasilkan massa molekul yang lebih ringan tetapi memiliki volatilitas yang tinggi dan konsentrasi oksigen reaktif dalam molekul yang lebih tinggi [24]. Densitas dari bahan bakar merupakan besar massa tiap satuan volumenya. Secara umum, densitas dipengaruhi oleh berat molekulnya yang memiliki perbandingan terbalik. Nilai densitas berkurang dengan semakin panjang rantai karbon dan meningkat dengan adanya ikatan rangkap [12,25]. Nilai HHV dari asam lemak dapat diprediksi berdasarkan berat molekul, densitas, dan jumlah atom karbonnya. Nilai HHV meningkat dengan semakin panjang rantai karbon, tetapi adanya ikatan rangkap akan menurunkan nilainya [4,5].

Tabel 1. Properti fisik dan kimia asam lemak

Properti	Asam Laurat	Asam Miristat	Asam Palmitat	Asam Stearat	Asam Oleat	Asam Linoleat	Referensi
Rumus molekul	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	[7]
%massa C, H, O	72,0; 12,0; 16,0	73,7; 12,3; 14,0	75,0; 12,5; 12,5	76,1; 12,7; 11,2	76,6; 12,1; 11,3	77,2; 11,4; 11,4	-
Struktur	12:0	14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	[7]
Berat molekul (gr/mol)	200,3	228,4	256,4	284,5	282,5	280,5	[4]
Densitas (gr/cm ³)	0,8679	0,8528	0,8527	0,847	0,895	0,902	[6,28]
Viskositas (mm ² /s)	7,12	8,11	8,58	8,94	19,91	13,46	[6,29]
Higher heating value (MJ/kg)	36,62	37,65	38,67	39,69	39,62	39,55	[30]
Melting point (°C)	44	58	63	71	16	-5	[4]
Boiling point (°C)	225	250,5	350	360	286	229	[26,28];
Flash point (°C)	185	196	201	206	80	77	[31]
Kalor laten penguapan (kJ/kg)	190,12	210,7	221,42	242,15	140,2	-	[32,33]
Kalor spesifik (J/mol.K)	404,28	432,01	463,36	501,5	282,47	-	[6]

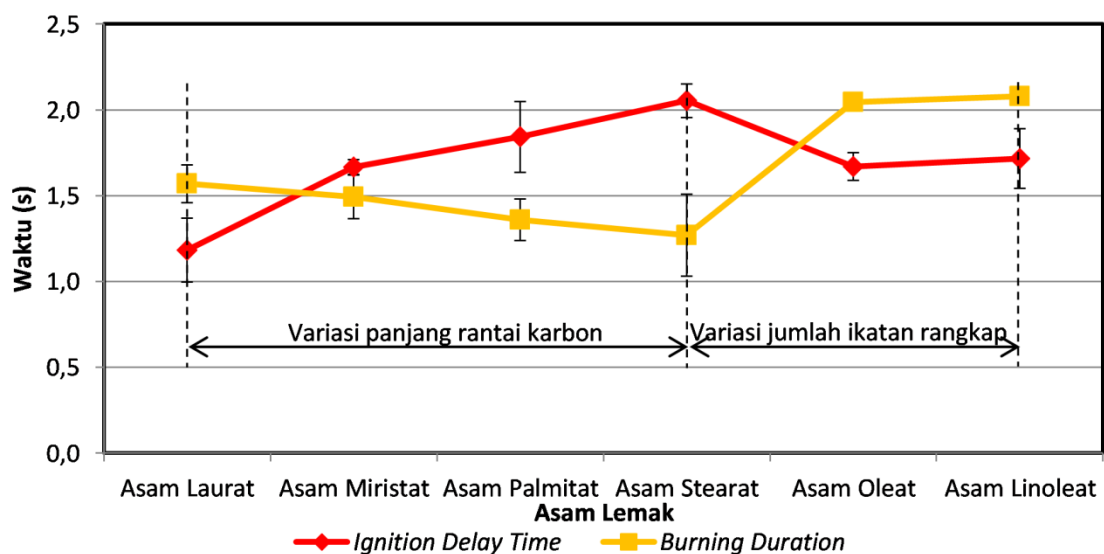
Posisi alil pada ikatan rangkap dalam struktur molekul asam oleat dan linoleat menyebabkan rentan terhadap oksidasi [26]. Adanya ikatan rangkap pada asam oleat dan linoleat membentuk konfigurasi cis-cis yang akan menurunkan gaya tarik antarmolekul sehingga nilai *melting point* lebih rendah. Nilai *melting point* tinggi dengan peningkatan panjang rantai karbon dan nilainya lebih rendah dengan bertambahnya jumlah ikatan rangkap. Asam lemak jenuh berantai panjang umumnya berfase padat pada temperatur ruang, sedangkan asam lemak tak jenuh berfase cair karena nilai *melting point* yang lebih rendah [4]. *Boiling point* merupakan temperatur yang diperlukan untuk memutus interaksi antarmolekul yang ada dalam fluida [8]. Energi yang diperlukan untuk mencapai *boiling point* disebut sebagai kalor spesifik. Kalor spesifik merupakan kalor sensibel yang diperlukan untuk meningkatkan temperatur asam lemak sebesar 1°C untuk mencapai *boiling point temperature*. Sedangkan kalor laten penguapan merupakan jumlah kalor yang diperlukan untuk mengonversi 1 kg asam lemak pada fase cairnya menjadi fase gas pada tekanan tertentu [7].

Flash point pada asam lemak turun dengan peningkatan derajat ketidakjenuhan dan nilainya berbanding terbalik dengan volatilitas bahan bakar [2,12]. *Flash point* merupakan ukuran kecenderungan bahan bakar

untuk membentuk campuran yang mudah terbakar di udara. Nilainya adalah temperatur terendah di mana bahan bakar cair akan menguap membentuk campuran yang mudah terbakar di udara dan memiliki hubungan positif dengan viskositas fluida [4]. Viskositas meningkat dengan semakin panjang rantai karbon karena peningkatan jumlah interaksi antarmolekulnya yang acak menghasilkan interaksi van der Waals yang lebih tinggi di antara molekul yang berdekatan. Viskositas juga meningkat dengan bertambahnya derajat ketidakteraturan dan hal ini juga dipengaruhi oleh konfigurasi ikatan pada konfigurasi cis [4,8]. Asam oleat memiliki viskositas tertinggi dibandingkan jenis asam lemak lainnya [27].

3.1 Ignition Delay Time dan Burning Duration

Gambar 3 menunjukkan perbedaan periode *ignition delay time* rata-rata dan *burning duration* rata-rata untuk setiap variasi perbedaan panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkap pada asam lemak. Nilai *ignition delay time* rata-rata meningkat dengan semakin panjang rantai karbon dan nilainya berkurang dengan adanya ikatan rangkap. Nilai *ignition delay time* rata-rata pada asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat, berturut-turut sebesar 1,18 s, 1,67 s, 1,84 s, 2,05 s, 1,67 s, dan 1,72 s. *Error bars* pada setiap plot data merupakan besarnya standar deviasi pada masing-masing pengujian.



Gambar 3: Ignition delay time dan burning duration

Garzon *et al.* [34] menyebutkan bahwa periode *ignition delay time* dibagi menjadi dua, yaitu *physical ignition delay* dan *chemical ignition delay*. Selama periode *physical ignition delay*, bahan bakar menguap, bercampur dengan udara membentuk campuran homogen, kemudian dipanaskan hingga temperatur penyalan. Viskositas menjadi properti yang dominan pada periode ini. Asam lemak dengan rantai karbon yang panjang memiliki viskositas tinggi karena gaya ikat antar atom yang kuat dan hal ini menghambat proses pencampuran antara udara dan bahan bakar. Sehingga, asam lemak dengan rantai panjang (asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat) memiliki *ignition delay time* yang panjang.

Selanjutnya, pada *chemical ignition delay* merupakan waktu yang diperlukan untuk membentuk populasi radikal reaktif yang berkaitan dengan komposisi kimia bahan bakar terutama konsentrasi spesies dengan volatilitas yang rendah. Pada bahan bakar dengan *boiling point* rendah memiliki volatilitas yang tinggi. Peningkatan panjang rantai karbon menyebabkan volatilitas bahan bakar dan difusivitasnya berkurang. Oleh karena itu, asam lemak dengan rantai karbon panjang (asam stearat, oleat, dan linoleat) memerlukan waktu transpor difusif yang lebih lama selama periode *ignition delay time*. Pada senyawa asam lemak berantai karbon pendek, terutama asam laurat memiliki tekanan uap yang lebih tinggi, sehingga rentan untuk mengalami evaporasi. Kalor spesifik dan kalor laten penguapan menjadi faktor selanjutnya yang menentukan periode *delay time*. Keduanya merupakan besarnya energi yang diperlukan untuk meningkatkan temperatur dan mengubah fase bahan bakar menjadi uap selama periode *delay time*. Oleh karena itu, asam stearat dengan nilai kalor laten penguapan tertinggi yaitu sebesar 242,15 kJ/kg dan juga kalor spesifik tertinggi yaitu sebesar 501,5 J/mol.K memiliki periode *ignition delay* paling panjang untuk variasi panjang rantai karbon.

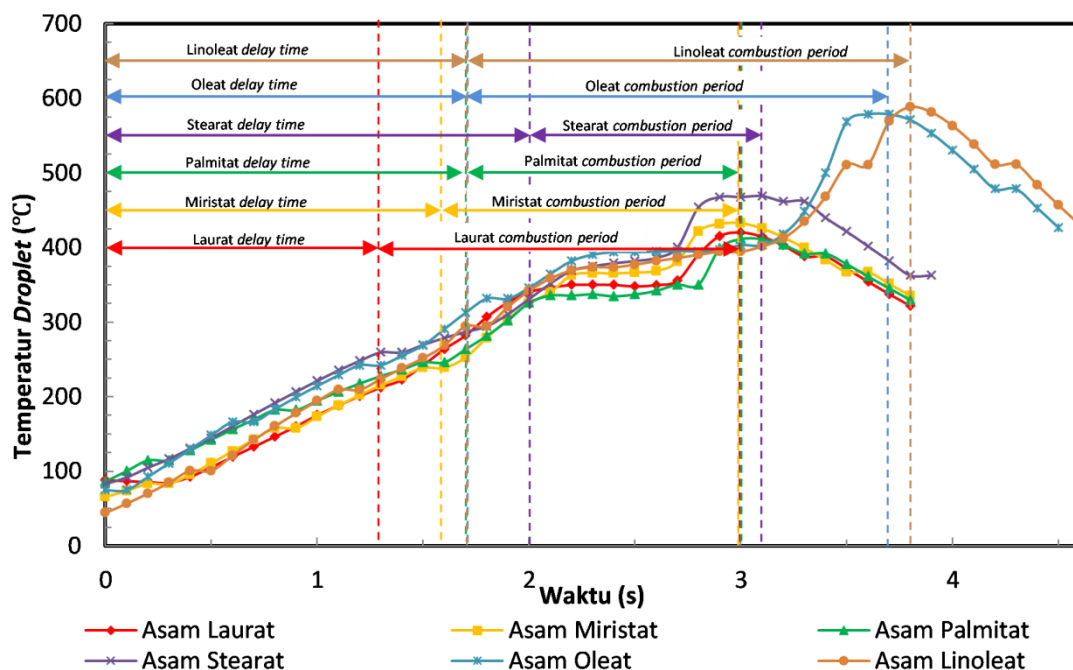
Kecenderungan yang berbeda dapat diamati pada variasi jumlah ikatan rangkap yang berkaitan dengan stabilitas oksidasi. Asam lemak jenuh memiliki kestabilan oksidasi yang cukup baik, sedangkan kenaikan

tingkat ketidakjenuhan menyebabkan stabilitas oksidasi turun secara eksponensial [9]. Stabilitas oksidasi menurun dengan bertambahnya kandungan asam lemak tak jenuh ganda (*polyunsaturated fatty acid*). Proses degradasi oksidatif dimulai dengan abstraksi atom hidrogen dari karbon yang berdekatan dengan ikatan rangkap C=C, yang disebut gugus alil dan gugus bis-alil. Hal ini menyebabkan asam oleat dan asam linoleat memiliki periode *ignition delay* yang lebih singkat dibandingkan asam stearat.

Periode *ignition delay* akan mempengaruhi awal mulanya pembakaran, laju difusi, dan durasi pembakaran yang terjadi setelahnya. Nilai *burning duration* rata-rata berkurang dengan semakin panjang rantai karbon dan nilainya meningkat dengan semakin banyak ikatan rangkap. Nilai *burning duration* rata-rata pada asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat, berturut-turut sebesar 1,57 s, 1,49 s, 1,36 s, 1,27 s, 2,05 s, dan 2,08 s. Peningkatan temperatur *droplet* menghasilkan laju transpor massa dan penguapan bahan bakar yang lebih tinggi. Hal ini menyebabkan laju gasifikasi bahan bakar yang lebih tinggi dibandingkan laju difusi dan konsumsi bahan bakar. Sehingga uap bahan bakar terakumulasi dalam jumlah banyak yang akan meningkatkan *burning rate* [35]. Pinheiro *et al.* [36] mengaitkan *burning duration* yang singkat dengan naiknya temperatur gas pembakaran. Temperatur *droplet* yang tinggi dengan semakin panjang rantai karbon menghasilkan *burning duration* yang lebih singkat pada asam stearat. Namun hal ini tidak berlaku pada asam oleat dan linoleat yang memiliki temperatur *droplet* yang lebih tinggi dibandingkan asam stearat (Gambar 4). Pada panjang rantai karbon yang sama, asam lemak tak jenuh memiliki densitas yang tinggi (Tabel 1). Densitas dari asam lemak merupakan fungsi dari temperatur pembakarannya. Peningkatan energi kinetik molekul berupa kenaikan temperatur *droplet* menyebabkan densitasnya menurun. Energi kinetik yang besar diperlukan untuk meregangkan ikatan antarmolekul berupa peningkatan temperatur selama tahap awal pembakaran. Asam lemak dengan densitas tinggi memiliki jarak antarmolekul yang sempit. Sehingga hal ini menyebabkan laju penguapan terhambat selama proses pembakaran dan menghasilkan *burning duration* yang panjang pada asam oleat dan asam linoleat.

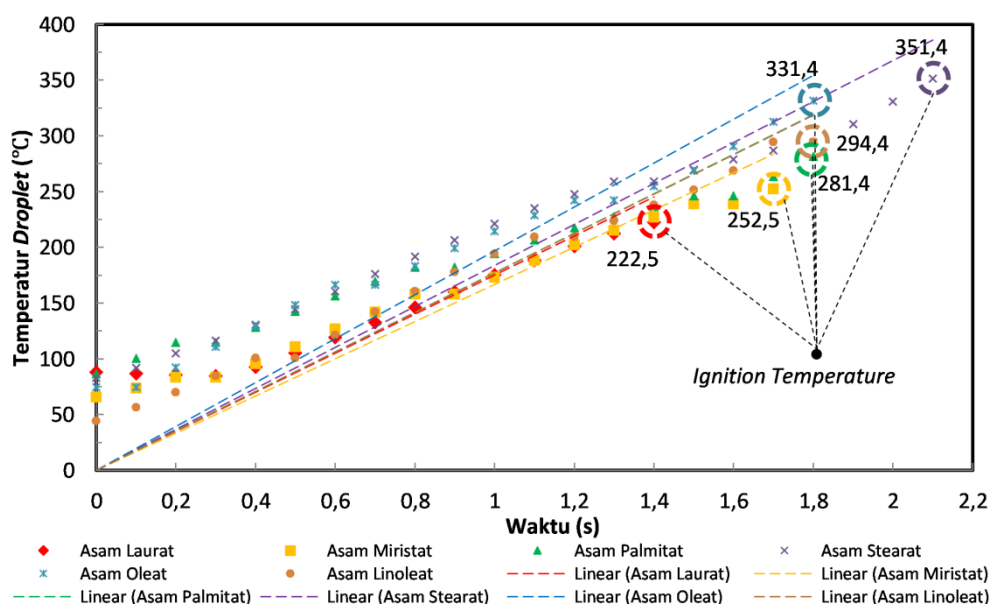
3.2 Temperatur Droplet

Transfer panas pada *droplet* terjadi karena tumbukan dari molekul-molekul gas bertemperatur tinggi. Ketika *droplet* terpapar pada lingkungan yang panas, *droplet* menyerap kalor dalam jumlah besar melalui kontak dengan molekul-molekul gas bertemperatur tinggi sehingga temperatur permukaan *droplet* meningkat secara drastis [37]. *Droplet* menguap ketika *boiling point temperature* tercapai di mana proses gasifikasi terjadi pada setiap komponen bahan bakar [19]. Pembakaran pada *droplet* diawali dengan evaporasi *droplet* dan kemudian pembakaran terjadi pada garis kesetimbangan antara difusi uap bahan bakar dari permukaan *droplet* dan difusi oksigen ke dalam *droplet* yang ditandai oleh nyala api pada *droplet* [38].



Gambar 4: Temperatur droplet selama periode *ignition delay* dan periode pembakaran

Gambar 4 menunjukkan perubahan temperatur *droplet* selama periode *ignition delay* dan periode pembakaran. Temperatur *droplet* rata-rata selama periode *ignition delay* hingga periode pembakaran pada asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat, berturut-turut adalah sebesar 243,1 °C, 244,4 °C, 246,9 °C, 278,1 °C, 310,8 °C, dan 317,4 °C. Temperatur *droplet* meningkat dan mencapai nilai maksimumnya di akhir pembakaran ketika *droplet* telah habis terbakar dan *thermocouple junction* berkontak langsung dengan nyala api. Temperatur pembakaran *droplet* dipengaruhi oleh nilai *heating value* bahan bakar, *burning rate*, dan adanya *heat loss* berupa radiasi melalui gas dan jelaga dari nyala api [20]. Nilai HHV_{volumetric} atau besarnya *energy density* bahan bakar dihitung menggunakan Persamaan 1. Dari persamaan ini, *energy density* pada asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat, berturut-turut adalah 31,78 kJ/cm³, 32,11 kJ/cm³, 32,97 kJ/cm³, 33,62 kJ/cm³, 35,46 kJ/cm³, dan 35,67 kJ/cm³. Nilai *energy density* yang diperoleh sebanding dengan temperatur pembakaran *droplet*. Semakin panjang rantai karbon dan adanya ikatan rangkap meningkatkan nilai *energy density* yang menyebabkan temperatur *droplet* meningkat. Dengan meningkatnya panjang rantai karbon, *burning rate* meningkat, dan *heating value* bahan bakar juga meningkat karena proporsi *combustible matter* (atom C dan H) lebih besar. Hal ini menyebabkan temperatur *droplet* pada asam stearat lebih tinggi dibandingkan dengan senyawa dengan rantai karbon yang lebih pendek. Sedangkan pada variasi ikatan rangkap, meskipun *burning rate* pada asam oleat dan asam linoleat lebih rendah dibandingkan dengan asam stearat (Gambar 7), namun nilai *energy density* relatif tinggi dibandingkan pada asam stearat. Sehingga menghasilkan temperatur *droplet* yang tinggi dengan adanya ikatan rangkap.



Gambar 5: Droplet ignition temperature

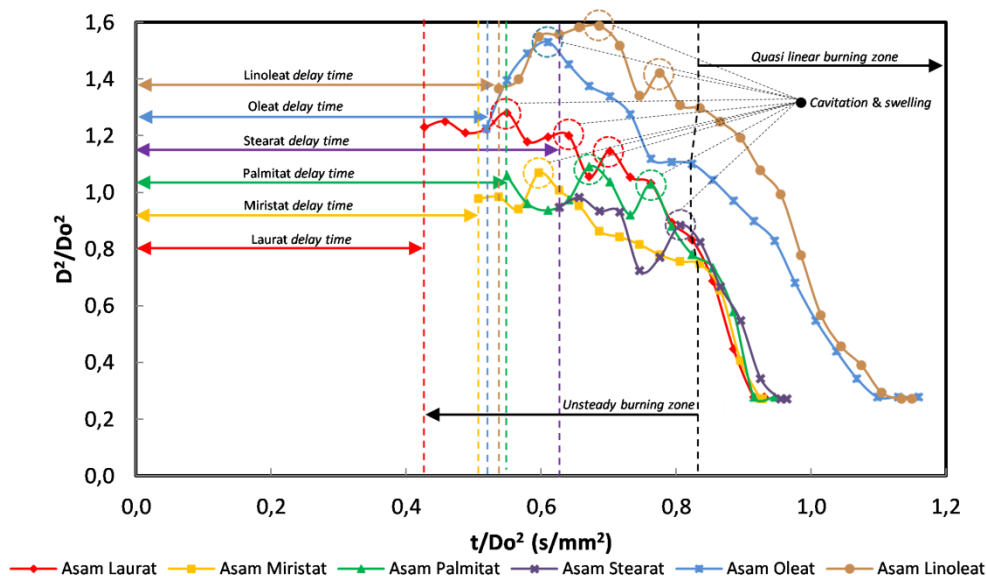
Gambar 5 menunjukkan kenaikan temperatur *droplet* selama periode *ignition delay* dengan nilai pada titik terakhirnya merupakan temperatur penyalan *droplet*. Selama periode ini, temperatur *droplet* dipengaruhi oleh efektivitas bahan bakar dalam menyerap kalor dari *coil heater*. Setelah mencapai 0,4 s, pada waktu yang sama temperatur *droplet* cenderung lebih tinggi dengan semakin panjang rantai karbon pada asam lemak jenuh. Sebaliknya, senyawa asam lemak tak jenuh memiliki temperatur *droplet* lebih rendah dibandingkan asam stearat. Kecenderungan ini cukup signifikan diamati pada asam linoleat dengan perbedaan temperatur *droplet* cukup besar dibandingkan asam stearat.

Asam stearat dengan rantai karbon yang panjang memiliki *flash point* yang tinggi dan volatilitas yang lebih rendah karena *boiling point temperature* yang lebih tinggi. Sehingga permukaan *droplet* perlu pemanasan hingga mencapai temperatur yang lebih tinggi pada 351,4°C untuk menghasilkan campuran yang dapat menyala. Kalor laten penguapan yang tinggi pada asam lemak berantai karbon panjang menyebabkan molekul cair asam lemak memiliki gaya antarmolekul yang kuat. Hal ini juga menyebabkan lebih banyak energi panas yang dibutuhkan untuk memutus ikatan menjadi molekul tunggal untuk membentuk fase gas ketika mencapai *boiling point temperature*. Adanya ikatan rangkap akan menurunkan nilai *flash point*, *boiling point*, dan kalor laten penguapannya. Sehingga pada panjang rantai karbon yang sama, asam oleat dan linoleat akan mencapai temperatur penyalannya terlebih dahulu dibandingkan dengan asam stearat meskipun dengan temperatur

droplet yang lebih rendah. Hal ini selaras dengan dugaan Marlina *et al.* [19] yang menyatakan bahwa *crude jatropha oil* dan *crude sunflower oil* dengan konsentrasi asam lemak tak jenuh lebih dominan memiliki *ignition temperature* yang lebih rendah dibandingkan *crude coconut oil* dan *crude palm oil*.

3.3 Evolusi Diameter *Droplet*

Pada Gambar 6 menunjukkan perubahan *normalized squared droplet diameter* terhadap *normalized time* selama periode pembakaran. Nilai D merupakan diameter *droplet* pada waktu spesifik, D_0 merupakan diameter awal *droplet*, dan t merupakan *droplet lifetime*. Selama periode awal *preheating* dengan *coil heater*, semua diameter *droplet* bahan bakar membesar secara bertahap dibandingkan diameter awalnya karena ekspansi termal dan kavitasi. Proses nukleasi homogen terjadi ketika *droplet* mencapai temperatur *superheated* menyebabkan gelembung terbentuk pada bagian tengah *droplet* yang akan meningkatkan volume *droplet*. Gelembung yang telah mencapai permukaan *droplet* akan memecah dan melepaskan sejumlah uap. Seluruh *droplet* akhirnya terbakar pada interval waktu masing-masing setelah periode *ignition delay*. *Droplet* pada tahap awal pembakaran mengalami kavitasi, pembengkakan, dan terdistorsi, sehingga menghasilkan perubahan diameter yang fluktuatif. Fluktuasi ini dapat dikaitkan dengan proses yang terjadi pada periode ini, terdiri atas kavitasi yang menyebabkan terbentuknya rongga dalam *droplet*, *swelling* yang menghasilkan pembengkakan akibat adanya kavitasi, dan secara bersamaan terjadi pembakaran pada permukaan *droplet* [18,20,39]. Kavitasi dan *swelling* menyebabkan peningkatan diameter *droplet*, sedangkan proses pembakaran pada permukaan *droplet* menyebabkan diameternya berkurang. Hal ini menyebabkan terjadinya fluktuasi ukuran diameter *droplet* pada *unsteady burning zone*. Selanjutnya pada *quasi linear burning zone* merupakan periode pembakaran yang tidak terdapat lagi kavitasi dan *swelling* sehingga diameter *droplet* berkurang dengan laju perubahan yang hampir linier. Pada akhir periode pembakaran, dapat diamati bahwa diameter *droplet* tidak berubah yang mengindikasikan bahwa bahan bakar telah sepenuhnya habis terbakar, namun masih terdapat nyala api selama beberapa saat. Nilai dari D^2/D_0^2 pada akhir pembakaran tidak sama dengan nol (sebesar 0,955 mm) karena merupakan pengukuran dari diameter *thermocouple junction* ketika *droplet* telah habis terbakar.



Gambar 6: Hubungan antara *normalized squared droplet diameter* terhadap *normalized time*

Pada tahap awal pembakaran, laju transfer massa bahan bakar dan laju penguapannya relatif rendah karena temperatur *droplet* yang masih rendah. Sehingga laju pengurangan diameter *droplet* pada periode ini masih relatif lambat [35]. Perbedaan laju perubahan diameter pada asam lemak jenuh dengan asam lemak tak jenuh berkaitan dengan viskositasnya. Hal ini dapat diamati pada asam lemak tak jenuh (oleat dan linoleat) dengan viskositas yang tinggi menghasilkan ekspansi diameter *droplet* yang besar selama periode pembakaran. Sehingga pada akhir *unsteady burning zone*, diameter *droplet* pada asam oleat dan asam linoleat masih relatif tinggi dan nilainya masih lebih besar dibandingkan diameter awalnya. Sebaliknya, pada akhir *unsteady burning zone* untuk asam lemak jenuh (laurat, miristat, palmitat, dan stearat) memiliki diameter *droplet* yang lebih kecil dibandingkan diameter awalnya.

Tabel 2. Ekspansi maksimum D^2/D_0^2 dan temperatur peralihan *unsteady burning zone* menuju *quasi linear*

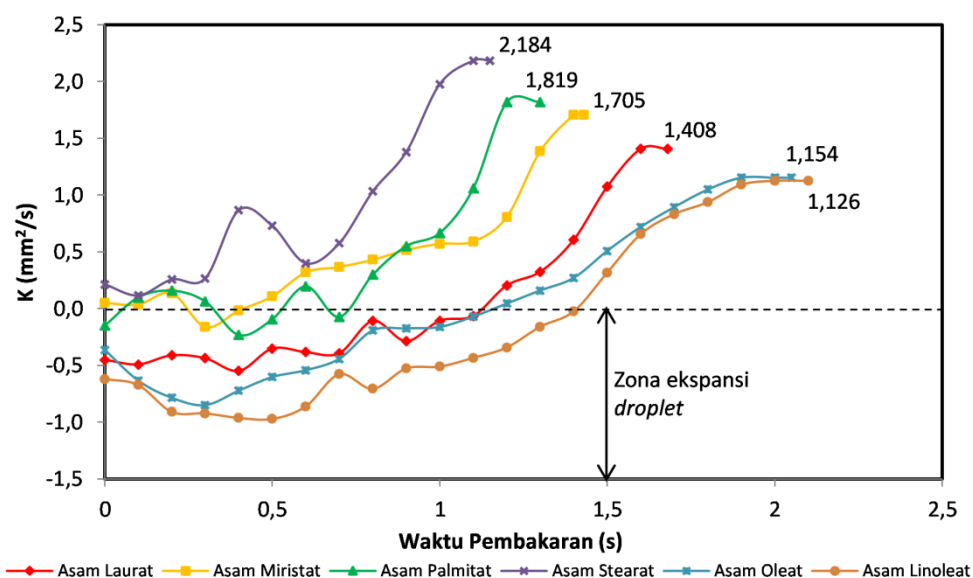
burning zone

Properti	Asam Laurat	Asam Miristat	Asam Palmitat	Asam Stearat	Asam Oleat	Asam Linoleat
D^2/D_0^2 maksimum	1,281	1,069	1,092	0,982	1,531	1,587
Temperatur peralihan <i>droplet</i> (°C)	349,5	380,9	341,8	386,1	393,8	385,9

Tabel 2 menunjukkan nilai ekspansi maksimum diameter *droplet* yang berkaitan dengan besarnya densitas bahan bakar. Senyawa asam lemak jenuh berantai pendek (laurat) dan asam lemak tak jenuh (oleat dan linoleat) memiliki densitas yang lebih tinggi karena jarak antarmolekulnya yang lebih kecil. Oleh karena itu, diperlukan energi kinetik yang lebih besar untuk meregangkan ikatan antarmolekulnya yang menyebabkan ekspansi diameter *droplet* lebih tinggi. Selanjutnya, pada *quasi linear burning zone* laju penurunan diameter *droplet* linier sesuai dengan teori D^2 law dengan laju yang hampir sama baik pada asam lemak jenuh maupun asam lemak tak jenuh. Hal ini dapat diamati pada Tabel 2 bahwa temperatur peralihan *droplet* saat menuju *quasi linear burning zone* juga relatif sama pada rentang 349,5–393,8°C. Namun, perbedaan ukuran diameter *droplet* pada peralihan antara *unsteady burning zone* ke *quasi linear burning zone* pada asam lemak jenuh dengan asam lemak tak jenuh akan menghasilkan durasi pembakaran yang berbeda. Asam lemak tak jenuh (oleat dan linoleat) dengan ekspansi diameter *droplet* yang lebih besar memerlukan durasi pembakaran yang lebih panjang hingga *droplet* habis terbakar sepenuhnya. Pada variasi panjang rantai karbon, asam laurat memiliki *burning duration* paling panjang karena memiliki ekspansi diameter *droplet* paling tinggi di antara asam lemak jenuh lainnya.

3.4 Burning Rate Constant

Pada kebanyakan studi terkait pembakaran *droplet*, *burning rate constant* dihitung dari kemiringan kurva eksperimental antara $(D/D_0)^2$ terhadap t/D_0^2 pada Gambar 6 berdasarkan regresi liniernya [41,42]. Prinsip menghitung *burning rate constant* adalah dengan membagi kuadrat diameter awal *droplet* dengan total *droplet lifetime* yang dievaluasi dari awal api menyala hingga api padam. Perbedaan kecenderungan pada *burning rate* berkaitan dengan perbedaan properti bahan bakarnya dan nilai *burning rate* yang lebih tinggi berkaitan dengan dekomposisi termal bahan bakar mejadi molekul-molekul yang lebih kecil ketika terpapar temperatur yang tinggi selama periode *ignition delay* [43,44].



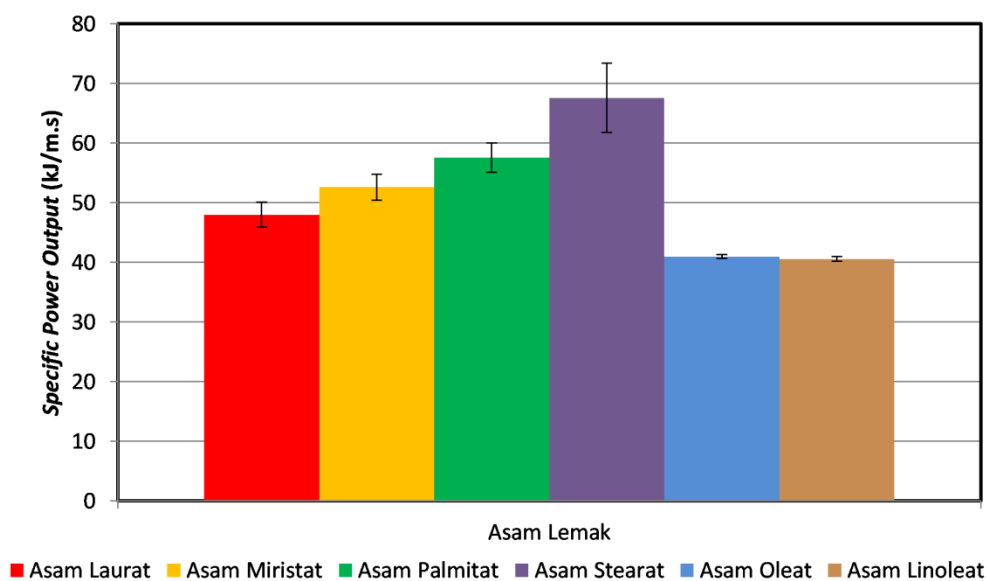
Gambar 7: Burning rate constant

Diameter *droplet* untuk menghitung *burning rate constant* merupakan diameter *droplet* efektif yang didefinisikan sebagai diameter ekuivalen yang diperoleh berdasarkan luasan *droplet* pada waktu (t) spesifik [43]. Pada grafik, nilai *burning rate constant* pada asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearat,

asam oleat, dan asam linoleat berturut-turut adalah sebesar 1,408 mm²/s, 1,705 mm²/s, 1,819 mm²/s, 2,184 mm²/s, 1,154 mm²/s, dan 1,126 mm²/s. Nilai ini merupakan *burning rate constant* keseluruhan yang diperoleh pada akhir pembakaran ketika nyala api padam. Nilai *burning rate constant* bertanda negatif terjadi ketika *droplet* mengalami ekspansi volume sehingga diameternya lebih besar dibandingkan diameter awal. Seluruh diameter *droplet* pada pengujian ini memiliki diameter awal yang sama, sehingga nilai *burning rate constant* terbesar adalah pada asam stearat yang memiliki *burning duration* paling singkat.

Pada temperatur lingkungan, *burning rate* untuk pembakaran *droplet* meningkat dengan peningkatan temperatur *droplet* serta penurunan kalor laten penguapan, densitas, dan *boiling point* bahan bakar [20]. Pada variasi panjang rantai karbon, semakin panjang rantai karbon memiliki temperatur *droplet* (Gambar 4) yang lebih tinggi dan densitas yang lebih rendah sehingga memiliki nilai *burning rate constant* yang semakin tinggi. Meskipun nilai kalor laten penguapan dan *boiling point* bahan bakar meningkat dengan semakin panjang rantai karbon, namun pengaruhnya tidak signifikan dibandingkan dengan pengaruh dari temperatur *droplet* dan densitas bahan bakar. Pada asam lemak dengan panjang rantai karbon 18, adanya ikatan rangkap menurunkan nilai *burning rate constant*. Hal ini berkaitan dengan semakin tingginya densitas bahan bakar yang menyebabkan diameter *droplet* pada asam oleat dan linoleat meningkat cukup tinggi pada awal pembakaran. Selama periode awal pembakaran, laju pengurangan diameter asam lemak dengan ikatan rangkap lambat karena densitas yang tinggi. Asam lemak dengan densitas tinggi memiliki jarak antarmolekul sempit yang menyebabkan molekul-molekul gas terperangkap dalam *droplet*. Densitas dari asam lemak merupakan fungsi dari temperatur pembakarannya, sehingga peningkatan energi kinetik molekul berupa kenaikan temperatur *droplet* menyebabkan densitasnya menurun. Asam lemak tak jenuh dengan densitas bahan bakar yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan densitas pada asam lemak jenuh menghasilkan nilai *burning rate constant* yang rendah.

Selain karena tingginya densitas, viskositas yang tinggi pada asam lemak tak jenuh yang berkaitan dengan stabilitas oksidatif menjadi faktor utama penyebab rendahnya nilai *burning rate constant*. Stabilitas oksidatif bahan bakar dipengaruhi oleh ketidakjenuhan. Secara umum, ketidakjenuhan yang lebih tinggi mengarah pada stabilitas oksidatif yang lebih rendah yang tergantung pada jumlah dan posisi ikatan rangkap. Kestabilan bahan bakar yang rendah pada asam oleat dan asam linoleat dapat menyebabkan peningkatan viskositasnya [12]. Ekspansi diameter *droplet* yang besar terjadi karena tingginya viskositas pada asam oleat dan asam linoleat akan menghambat laju evaporasi bahan bakar [45]. Laju evaporasi pada asam lemak tak jenuh lebih lambat dibandingkan asam lemak jenuh selama periode pembakaran yang diakibatkan tingginya viskositas bahan bakar. Hal ini menghasilkan nilai *burning rate constant* dengan nilai negatif yang cukup lama selama periode pembakaran. Viskositas akan turun ketika temperatur pembakaran meningkat, hal ini akan menghasilkan laju penguapan yang lebih cepat dengan *burning rate constant* yang bernilai positif hingga akhir pembakaran.



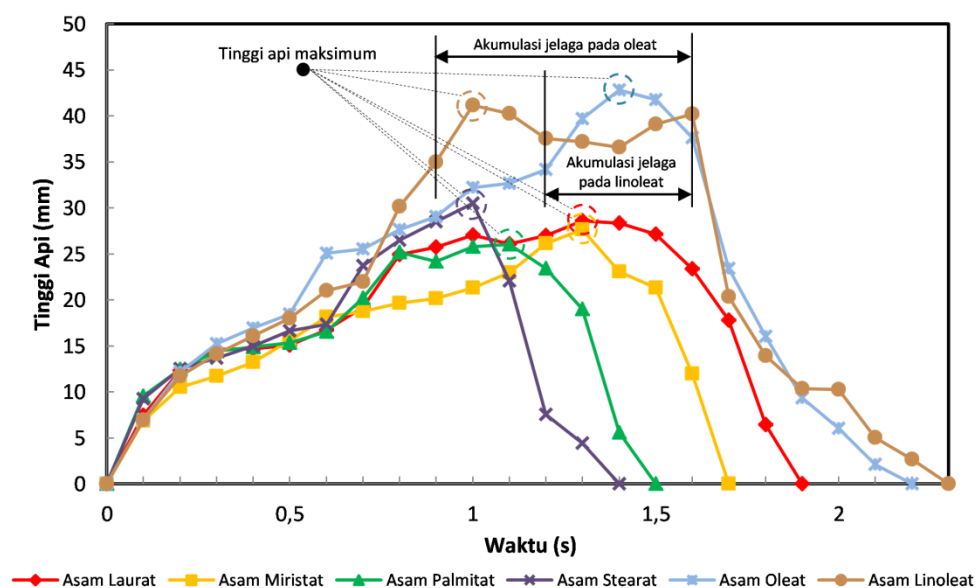
Gambar 8: Specific power output

Burning rate merupakan salah satu properti dari pembakaran *single droplet* yang akan mempengaruhi

besarnya daya yang dihasilkan selama proses pembakaran. Semakin besar nilai *burning rate*, maka laju penguapan bahan bakar selama periode pembakaran tinggi, yang akan menghasilkan *power output* besar [38]. Bahan bakar dengan densitas yang tinggi juga mampu menghasilkan *power output* yang lebih besar selama pembakaran [46]. Analisis *burning rate* hanya memberikan informasi terkait kecepatan pembakaran. Untuk memperoleh besarnya daya yang dihasilkan, maka perlu melibatkan densitas energi yang memberikan perbedaan kandungan energi dalam bahan bakar. *Specific power output* merupakan parameter kuantitatif yang menunjukkan perbedaan daya yang dibangkitkan selama proses pembakaran. *Specific power output* meningkat dengan semakin panjang rantai karbon dan nilainya turun drastis dengan adanya ikatan rangkap. Nilai *specific power output* rata-rata pada asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat, berturut-turut adalah sebesar 47,99 kJ/m.s, 52,59 kJ/m.s, 57,55 kJ/m.s, 67,58 kJ/m.s, 40,97 kJ/m.s, dan 40,56 kJ/m.s. Tendensi ini sebanding dengan kecenderungan dari *burning rate constant* pada pembahasan sebelumnya. Asam stearat memiliki nilai *specific power output* paling besar karena laju pembakaran yang paling tinggi untuk semua variasi dan densitas energi yang paling besar untuk variasi panjang rantai karbon. Meskipun asam oleat dan asam linoleat memiliki densitas energi yang besar, rendahnya laju pembakaran pada asam lemak tak jenuh menghasilkan *specific power output* yang lebih rendah dibandingkan asam lemak jenuh.

3.5 Visualisasi Nyala Api

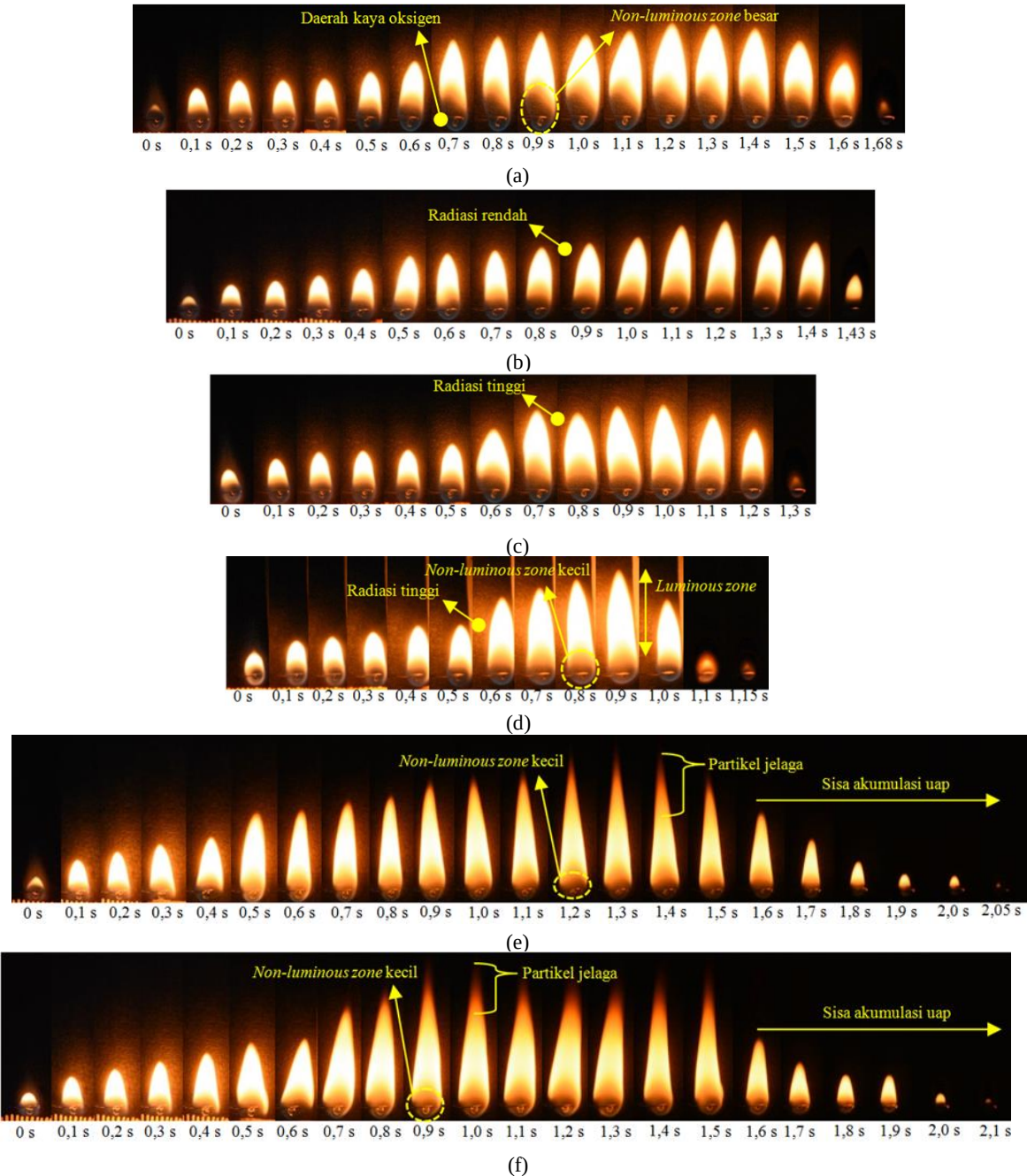
Visualisasi nyala api digunakan untuk menganalisa karakteristik pembakaran pada setiap asam lemak secara kualitatif. Gambar 9 menunjukkan evolusi tinggi nyala api selama periode pembakaran, sedangkan Gambar 10 menunjukkan visualisasi nyala api dari awal api menyala hingga api padam. Pada pembakaran *droplet*, bahan bakar menguap karena terpapar lingkungan yang panas, kemudian berdifusi dengan udara di sekitar *droplet* hingga membentuk fase gas. Ketika uap pada permukaan *droplet* telah mencapai titik nyalanya dalam rentang *flammability limit*, *droplet* akan mulai terbakar dan menghasilkan nyala api yang mengelilingi seluruh *droplet* dan menghasilkan produk pembakaran [17,34].



Gambar 9: Evolusi nyala api selama pembakaran *droplet*

Dimensi nyala api meningkat pada tahap awal pembakaran *droplet* akibat pemanasan dan pengaruh akumulasi uap bahan bakar di sekitar permukaan *droplet* selama periode *ignition delay*. Perubahan profil api selama periode pembakaran dipengaruhi oleh jumlah akumulasi uap pada *droplet*. Dengan meningkatnya temperatur *droplet*, laju transpor massa bahan bakar dan laju penguapan meningkat yang menyebabkan laju gasifikasi bahan bakar lebih tinggi daripada konsumsi bahan bakar dan laju difusi antara uap dengan udara atmosfer. Selanjutnya akumulasi uap bahan bakar dalam jumlah besar akan meningkatkan laju pembakaran dan meningkatkan dimensi api. Pada tahap selanjutnya, dengan berkurangnya diameter *droplet*, laju gasifikasi bahan bakar lebih rendah dari laju konsumsinya. Sehingga uap bahan bakar terus berkurang yang menyebabkan tinggi api berkurang secara bertahap [35]. Tinggi api rata-rata pada asam laurat, asam miristat, asam palmitat, asam stearat, asam oleat, dan asam linoleat, berturut-turut adalah sebesar 20,14 mm, 18,06 mm, 18,04 mm, 17,52 mm, 23,57 mm, dan 23,16 mm. Pada variasi panjang rantai karbon, semakin panjang rantai karbon

memiliki *burning duration* yang lebih singkat. Hal ini menyebabkan dimensi nyala api pada asam stearat paling rendah karena akumulasi uap yang terbentuk cepat terbakar. Pada variasi jumlah ikatan rangkap, adanya ikatan rangkap pada molekul asam lemak berkorelasi erat dengan pembentukan partikel jelaga selama pembakaran [24,40]. Akumulasi jelaga pada bagian atas nyala api menghasilkan dimensi api pada asam oleat dan asam linoleat yang lebih tinggi dibandingkan pada asam lemak jenuh.



Gambar 10: Visualisasi nyala api pada (a) asam laurat, (b) asam miristat, (c) asam palmitat, (d) asam stearat, (e) asam oleat, (f) asam linoleat

Ukuran *luminous zone* pada nyala api meningkat dan kemudian perlahan turun seiring waktu. Peningkatan ini terjadi akibat pemanasan *droplet* dan pengaruh akumulasi uap bahan bakar pada awal pembakaran *droplet* [22]. Pada akhir pembakaran, laju difusi lebih mendominasi dibandingkan laju evaporasi karena *droplet* telah habis terbakar yang menyebabkan api padam [47]. Tingginya volatilitas pada asam oleat dan asam linoleat menyebabkan api tetap menyala relatif lama di akhir pembakaran sebelum akhirnya nyala api padam seperti ditunjukkan pada Gambar 10 [35]. Pada variasi jumlah ikatan rangkap, hal ini menyebabkan *burning duration* pada asam oleat dan linoleat jauh lebih panjang dibandingkan asam stearat. Sebaliknya, pada

variasi panjang rantai karbon volatilitas bahan bakar semakin rendah dengan semakin panjang rantai karbon. Sehingga menghasilkan *burning duration* yang lebih singkat.

Luminositas api (tingkat kecerahan api) menjadi parameter pengukuran secara kualitatif dari pembentukan jelaga dan nilainya sebanding dengan besarnya temperatur *droplet* [48]. Meskipun kedua parameter ini tidak berkaitan secara langsung, di mana temperatur api yang tinggi bukanlah faktor penentu untuk menghasilkan jelaga yang lebih tinggi [49]. Oksigen yang terikat secara kimiawi dalam struktur molekul senyawa oksigenat mampu mendorong pembakaran dan menekan pembentukan jelaga. Prekursor jelaga terbentuk di antara permukaan *droplet* dengan bagian *flame front*, yang kemudian bergerak ke atas karena konveksi alami menghasilkan konsentrasi jelaga pada bagian atas nyala api [20]. Konsentrasi oksigen yang lebih tinggi pada molekul menghasilkan jelaga yang lebih rendah [50]. Selain itu, bahan bakar dengan berat molekul yang besar berpotensi terhadap pembentukan jelaga [48]. Jelaga yang terakumulasi pada bagian atas nyala api berkaitan dengan efek gaya apung terkait dengan kandungan oksigen yang rendah [44]. Hal ini dapat diamati pada asam oleat dan asam linoleat dengan konsentrasi oksigen dalam molekulnya yang lebih rendah dibandingkan pada asam lemak jenuh dan berat molekulnya yang tinggi menghasilkan akumulasi jelaga pada bagian atas nyala api, sehingga dimensi api lebih tinggi.

Nyala api kebiruan dengan luminositas rendah dapat diamati pada asam lemak dengan kandungan oksigen yang tinggi. Kandungan oksigen yang tinggi terutama pada asam lemak dengan rantai karbon pendek (asam laurat) akan mendorong pembakaran yang lebih sempurna, sehingga menghasilkan jelaga yang rendah. Dengan meningkatnya konsentrasi oksigen, reaksi eksotermik dalam nyala api menghasilkan energi yang cukup untuk mengionisasi molekul gas, sehingga menghasilkan nyala api kebiruan pada asam lemak jenuh. [10,18]. Hal ini akan memperluas *non-luminous zone* pada pembakaran asam lemak yang dapat diamati pada asam laurat memiliki *non-luminous zone* yang besar. Sebaliknya, konsentrasi oksigen paling rendah sebesar 11,2% pada asam stearat menghasilkan *non-luminous zone* yang kecil dan menghasilkan radiasi yang tinggi dari nyala api pada *luminous zone* yang dapat diamati pada pantulan *background* gelap di belakang nyala api. Sehingga asam stearat memiliki luminositas paling cerah pada variasi panjang rantai karbon. Sebaliknya, pada asam oleat dan asam linoleat memiliki *non-luminous zone* yang lebih kecil karena temperatur *droplet* yang tinggi menghasilkan luminositas yang lebih cerah. Radiasi nyala api yang tinggi terjadi akibat terjadinya pembentukan jelaga yang diindikasikan dengan nyala api yang berwarna kuning cerah. Terbentuknya jelaga pada asam oleat dan linoleat menghasilkan dimensi nyala api yang lebih tinggi dibandingkan dengan asam lemak jenuh [35]. Viskositas yang tinggi pada asam oleat dan asam linoleat juga menjadi faktor terhadap pembentukan jelaga [4].

4. KESIMPULAN

Struktur molekul asam lemak dengan perbedaan panjang rantai karbon dan jumlah ikatan rangkap pada asam laurat, miristat, palmitat, stearat, oleat, dan linoleat memberikan perbedaan properti fisik dan kimianya. Perbedaan properti ini memiliki pengaruh penting terhadap karakteristik pembakaran yang dihasilkan selama periode *ignition delay* dan periode pembakaran. Berikut adalah beberapa temuan utama yang diperoleh dari penelitian ini:

1. Pada asam lemak jenuh dengan rantai karbon panjang memiliki periode *ignition delay* panjang dan *burning duration* yang lebih singkat. Adanya ikatan rangkap memperpendek *ignition delay* namun *burning duration* menjadi lebih panjang.
2. Asam lemak tak jenuh memiliki temperatur *droplet* yang lebih tinggi dibandingkan asam lemak jenuh karena densitas energi yang lebih tinggi.
3. Fluktuasi pada diameter *droplet* berkaitan dengan kavitas, *swelling*, dan pembakaran *droplet* yang terjadi secara bersamaan. Hal ini dipengaruhi oleh viskositas dan densitas bahan bakar yang menghasilkan perbedaan ukuran *droplet* pada daerah peralihan antara *unsteady burning zone* dan *quasi liner burning zone*.
4. Nilai *burning rate constant* dipengaruhi oleh temperatur *droplet* dan densitas pada asam lemak jenuh. Sedangkan pada asam lemak tak jenuh *burning rate constant* dipengaruhi oleh nilai densitas dan viskositas bahan bakar.
5. *Specific power output* yang besar yang merupakan fungsi dari laju pembakaran dan nilai densitas energi bahan bakar. Konsentrasi yang melimpah untuk asam lemak jenuh berantai panjang pada berbagai jenis minyak nabati disarankan penggunaannya karena memiliki pembangkitan daya yang besar.
6. Visualisasi nyala api merepresentasikan pembakaran *droplet* secara kualitatif. Asam lemak tak jenuh memiliki dimensi api yang tinggi karena akumulasi jelaga pada bagian atas nyala api. Asam lemak berantai pendek memiliki *non-luminous zone* yang lebih luas karena memiliki konsentrasi oksigen dalam molekul yang tinggi.

5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dana dari Direktorat Jenderal Sumber Daya Iptek dan Dikti Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia melalui program beasiswa Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU).

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] BENJUMEA, P., AGUDELO, J. R., & AGUDELO, A. F., "Effect of the degree of unsaturation of biodiesel fuels on engine performance, combustion characteristics, and emissions", *Energy and Fuels*, v. 25, n. 1, pp. 77-85, Desember 2010.
- [2] ALVISO, D., ARTANA, G. & DURIEZ, T., "Prediction of biodiesel physico-chemical properties from its fatty acid composition using genetic programming", *Fuel*, v. 264, Desember 2019.
- [3] ISLAM, M. A., AYOKO, G. A., BROWN, R., STUART, D. & HEIMANN, K., "Influence of fatty acid structure on fuel properties of algae derived biodiesel", *Procedia Engineering*, v. 56, pp. 591-596, 2013.
- [4] FOLAYAN, A. J., ANAWE, P. A. L., ALADEJARE, A. E. & AYENI, A. O., "Experimental investigation of the effect of fatty acids configuration, chain length, branching and degree of unsaturation on biodiesel fuel properties obtained from lauric oils, high-oleic and high-linoleic vegetable oil biomass", *Energy Reports*, v. 5, pp. 793–806, Juli 2019.
- [5] FERDINAND, W., SAKO, A., FOFANA, A. & BLAISE, K., "Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiesel fuels", *Energy*, v. 35, pp. 4949-4954, September 2010.
- [6] SAJJADI, B., RAMAN, A. A. A. & ARANDIYAN, H., "A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: Composition, specifications and prediction models", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 63, pp. 62–92, Mei 2016.
- [7] GOPINATH, A., SAIRAM, K., VELRAJ, R. & KUMARESAN, G., "Effects of the properties and the structural configurations of fatty acid methyl esters on the properties of biodiesel fuel : a review", In: *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, pp. 1-34, 2014.
- [8] BERMAN, P., MEIRI, N., COLNAGO, L. A., MORAES, T. B., LINDER, C., LEVI, O., PARMET, Y., SAUNDERS, M. & WIESMAN, Z., "Study of liquid-phase molecular packing interactions and morphology of fatty acid methyl esters (biodiesel)", *Biotechnology for Biofuels*, v. 8, no. 1, pp. 1–16, 2015.
- [9] ALLEMAN, T. L., MCCORMICK, R. L., CHRISTENSEN, E. D., FIORONI, G., MORIARTY, K. & YANOWITZ, J., *Biodiesel handling and use guide*, 5 ed., United States, The National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [10] DESHMUKH, S., KUMAR, R. & BALA, K., "Microalgae biodiesel: A review on oil extraction, fatty acid composition , properties and effect on engine performance and emissions", *Fuel Processing Technology*, v. 191, pp. 232–247, Mei 2019.
- [11] ZAHAN, K. A. & KANO, M., "Biodiesel production from palm oil, its by-products, and mill effluent: A review", *Energies*, v. 11, no. 8, pp. 1–25, Agustus 2018.
- [12] HOEKMAN, S. K., BROCH, A., ROBBINS, C., CENICEROS, E. & NATARAJAN, M., "Review of biodiesel composition, properties, and specifications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, pp. 143–169, Oktober 2011.
- [13] KNOTHE, G., "Designer biodiesel: optimizing fatty ester composition to improve fuel properties", *Energy and Fuels*, v. 22, pp. 1358–1364, 2008.
- [14] LEVINE, F., KAYEA, R. V., WEXLER, R., SADVARY, D. J., MELICK, C. & SCALA, J. L., "Heats of combustion of fatty acids and fatty acid esters", *Journal of the American Oil Chemist Society*, v. 91, no. 2, pp. 235–249, Oktober 2013.
- [15] MUANRUKSA, P. & KAEWKANNETRA, P., "Combination of fatty acids extraction and enzymatic esterification for biodiesel production using sludge palm oil as a low-cost substrate", *Renewable Energy*, v. 146, pp. 901-906, Juli 2019.
- [16] MEIRI, N., BERMAN, P., COLNAGO, L. A., MORAES, T. B., LINDER, C. & WIESMAN, Z., "Liquid-phase characterization of molecular interactions in polyunsaturated and n-fatty acid methyl

- esters by ¹H low-field nuclear magnetic resonance”, *Biotechnology for Biofuels*, v. 8, no. 1, pp. 1–12, 2015.
- [17] WANG, J., ZHANG, H., ZHANG, Q., QIAO, X., WANG, X. & JU, D., “Flame spread and combustion characteristics of two adjacent jatropa oil droplets,” *Fuel*, v. 285, Agustus 2020.
 - [18] OOI, J. B., YAP, J.-H., TRAN, M.-V. & LEONG, J. C. K., “Experimental Investigation on the Droplet Burning Behavior of Diesel-Palm Biodiesel Blends”, *Energy Fuels*, v. 33, pp. 11804-11811, September 2019.
 - [19] MARLINA, E., WIJAYANTI, W., YULIATI, L. & WARDANA, I. N. G., “The role of pole and molecular geometry of fatty acids in vegetable oils droplet on ignition and boiling characteristics”, *Renewable Energy*, v. 145, pp. 596–603, Juni 2019.
 - [20] ZHU, M., SETYAWAN, H. Y., ZHANG, Z. & ZHANG, D., “Effect of n-butanol addition on the burning rate and soot characteristics during combustion of single droplets of diesel-biodiesel blends”, v. 265, Januari 2020.
 - [21] FAIK, A. M. & ZHANG, Y., “Liquid-phase dynamics during the two-droplet combustion of diesel-based fuel mixtures”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 115, Februari 2020.
 - [22] LI, T. X., ZHU, D. L., AKAFUAH, N. K., SAITO, K. & LAW, C. K., “Synthesis, droplet combustion , and sooting characteristics of biodiesel produced from waste vegetable oils”, *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 33, no. 2, pp. 2039–2046, September 2010.
 - [23] AGGARWAL, S. K., “Single droplet ignition: Theoretical analyses and experimental findings”, *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 45, pp. 79–107, Juni 2014.
 - [24] ZHU, L., CHEUNG, C. S. & HUANG, Z., “Impact of chemical structure of individual fatty acid esters on combustion and emission characteristics of diesel engine”, *Energy*, v. 107, pp. 305–320, April 2016.
 - [25] GIAKOUMIS, E. G. & SARAKATSANIS, C. K., “Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition”, *Fuel*, v. 222, pp. 574–585, Maret 2018.
 - [26] KNOTHE, G., “Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters”, *Fuel Processing Technology*, v. 86, no. 10, pp. 1059–1070, 2005.
 - [27] KNOTHE, G. & STEIDLEY, K. R., “Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures”, *Fuel*, v. 86, no. 16, pp. 2560–2567, Maret 2007.
 - [28] LIEBERT, M. A., “Final report on the safety assessment of oleic acid, lauric acid, palmitic acid, myristic acid, and stearic acid”, *Journal of The American College of Toxicology*, v. 6, no. 3, pp. 321-401, 1987.
 - [29] KNOTHE, G. & STEIDLEY, K. R., “Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components”, *Fuel*, v. 84, no. 9, pp. 1059–1065, Februari 2005.
 - [30] FASSINOU, W. F., “Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids’ HHV”, *Energy*, v. 45, pp. 798–805, Juli 2012.
 - [31] PERDANA, D., WARDANA, I. N. G., YULIATI, L. & HAMIDI, N., “The role of fatty acid structure in various pure vegetable oils on flame characteristics and stability behavior for industrial furnace”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, v. 5, no. 8, pp. 65–75, 2018.
 - [32] ALKAN, C. & SARI, A., “Fatty acid/poly (methyl methacrylate) (PMMA) blends as form-stable phase change materials for latent heat thermal energy storage”, *Solar Energy*, v. 82, pp. 118–124, Agustus 2007.
 - [33] DHIVYA, S., HUSSAIN, S. I., SHEELA, S. J. & KALAISELVAM, S., “Experimental study on microcapsules of Ag doped ZnO nanomaterials enhanced Oleic-Myristic acid eutectic PCM for thermal energy storage”, *Thermochimica Acta*, v. 671, pp. 70–82, November 2018.
 - [34] GARZÓN, N. A. N., OLIVEIRA, A. A. M. & BAZZO, E., “An ignition delay correlation for compression ignition engines fueled with straight soybean oil and diesel oil blends”, *Fuel*, v. 257, Agustus 2019.
 - [35] HAN, K., PANG, B., MA, X., CHEN, H., SONG, G. & NI, Z., “An experimental study of the burning characteristics of acetone-butanol-ethanol and diesel blend droplets”, *Energy*, v. 139, pp. 853–861, Agustus 2017.
 - [36] PINHEIRO, A. P., VEDOVOTO, J. M., NETO, A. D. S. & WACHEM, B. G. M. V., “Ethanol droplet

- evaporation: effects of ambient temperature, pressure and fuel vapor concentration”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 143, Agustus 2019.
- [37] XIAO, H., ZHAO, L., LI, Z., WEI, M. & GUO, G., “Development of a simplified model for droplet vaporization,” *Thermal Science*, v. 20, no. 1, pp. 337–345, 2016.
 - [38] WALUYO, B., WARDANA, I. N. G., YULIATI, L., SASONGKO, M. N. & SETIYO, M., “The role of polar ethanol induction in various iso-octane ethanol fuel blend during single droplet combustion”, *Fuel Processing Technology*, v. 199, November 2019.
 - [39] SIDQI, B., ROSYADI, F. & WARDANA, I. N. G. BURNING., “Burning Rate Constants and Microexplosion Phenomena Measurements of Droplet Combustion”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 5, no. 1, pp. 59-67, 2014.
 - [40] HELLIER, P., LADOMMATOS, N. & YUSAF, T., “The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions”, *Fuel*, v. 143, pp. 131-143, November 2014.
 - [41] BASU, S. & MIGLANI, A., “Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 96, pp. 482–503, Februari 2016.
 - [42] HAN, K., CHEN, H., YANG, B., MA, X., SONG, G. & LI, Y., “Experimental investigation on droplet burning characteristics of diesel-benzyl azides blend”, *Fuel* v. 190, pp. 32–40, November 2016.
 - [43] ANDO, S., WU, Y., NAKAYA, S. & TSUE, M., “Droplet combustion behavior of oxidatively degraded methyl laurate and methyl oleate in microgravity,” *Combustion and Flame*, v. 214, pp. 199-210, 2020.
 - [44] MUELAS, Á., REMACHA, P. & BALLESTER, J., “Droplet combustion and sooting characteristics of UCO biodiesel, heating oil and their mixtures under realistic conditions”, *Combustion and Flame*, v. 203, pp. 190–203, Februari 2019.
 - [45] KNOTHE, G. & STEIDLEY, K. R., “Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components”, *Fuel*, v. 84, pp. 1059-1065, Februari 2005.
 - [46] XUE, S., STEINBERGER, Y. & WANG, J. S., “Biodiesel potential of nonfood plant resources from Tsinling and Zhongtiao biodiesel potential of nonfood plant resources from Tsinling and Zhongtiao mountains of China”, *Bioenergy Research*, v. 6, pp. 1104-1117, Juni 2013.
 - [47] FAROUK, T. I., WON, S. H. & DRYER, F. L., “Sub-millimeter sized multi-component jet fuel surrogate droplet combustion: physicochemical preferential vaporization effects”, *Proceedings of the Combustion Institute*, pp. 1-11, September 2020.
 - [48] XU, Y., FAROUK, T. I., HICKS, M. C. & AVEDISIAN, C. T., “Initial diameter effects on combustion of unsupported equi-volume n-heptane/iso-octane mixture droplets and the transition to cool flame behavior: experimental observations and detailed numerical modeling”, *Combustion and Flame*, v. 220, pp. 82–91, 2020.
 - [49] PASTOR, J. V, GARCÍA, A., MICÓ, C. & GARCÍA-CARRERO, A. A., “Experimental study of influence of liquefied petroleum gas addition in hydrotreated vegetable oil fuel on ignition delay, flame lift off length and soot emission under diesel-like conditions,” *Fuel*, v. 260, Oktober 2019.
 - [50] JHA, S. K., FERNANDO, S. & TO, S. D. F., “Flame temperature analysis of biodiesel blends and components”, *Fuel*, v. 87, no. 10, pp. 1982–1988, November 2007.