

Karakteristik Pembakaran Droplet Minyak Biji Kapuk yang Dipengaruhi Oleh Medan Magnet

Yuke Hary Laksono^{1*}, Wigo Ardi Winarko²

^{1,2} Jurusan Teknik Alat Berat, Akademi Teknik Alat Berat Indonesia, Malang, Indonesia

*Corresponding author: yuke@akabi.ac.id

Abstract

The urgent need for alternative energy sources, driven by the decreasing availability of fossil fuels, has placed biofuels as a key research area in energy conversion technology. Crude Ceiba Pentandra Oil (CCPO), a largely underutilized non-edible vegetable oil, has potential as an alternative fuel. This study examines the effect of magnetic field pole orientation on the combustion behavior of CCPO fuel droplets, including flame evolution, ignition delay time, combustion temperature, and flame height. Five test conditions were used, namely north-south (N-S), south-north (S-N), north-north (N-N), south-south (S-S), and a control without a magnetic field. The results showed that the application of a magnetic field affected the combustion characteristics of CCPO droplets compared to the condition without a magnetic field. The U-S orientation produced the best combustion performance, characterized by higher temperature and flame height, shorter ignition delay time, and shorter flame lifetime compared to other orientations. These results indicate that in addition to magnetic field intensity, magnetic field pole orientation also plays a role in determining the combustion characteristics of CCPO droplets. These findings provide new insights into the influence of magnetic field pole orientation on biofuel combustion and have the potential to be an approach to improving the combustion performance of vegetable oils.

Keywords: *Ceiba pentandra, biofuel, magnetic field, droplet combustion, ignition delay time*

Abstrak

Kebutuhan mendesak akan sumber energi alternatif, didorong oleh menurunnya ketersediaan bahan bakar fosil, telah menempatkan biofuel sebagai bidang penelitian utama dalam teknologi konversi energi. *Crude Ceiba Pentandra Oil* (CCPO), minyak nabati nonpangan yang masih kurang dimanfaatkan, memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif. Studi ini mengkaji pengaruh orientasi kutub medan magnet terhadap perilaku pembakaran droplet bahan bakar CCPO, yang meliputi evolusi nyala api, *ignition delay time*, temperatur pembakaran, dan tinggi api. Lima kondisi pengujian digunakan, yaitu utara-selatan (U-S), selatan-utara (S-U), utara-utara (U-U), selatan-selatan (S-S), serta kontrol tanpa medan magnet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan medan magnet memengaruhi karakteristik pembakaran droplet CCPO dibandingkan kondisi tanpa medan magnet. Orientasi U-S menghasilkan performa pembakaran terbaik, ditandai dengan temperatur dan tinggi api yang lebih tinggi, *ignition delay time* yang lebih singkat, serta umur nyala yang lebih pendek dibandingkan orientasi lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa selain intensitas medan magnet, orientasi kutub medan magnet juga berperan dalam menentukan karakteristik pembakaran droplet CCPO. Temuan ini memberikan wawasan baru mengenai pengaruh orientasi kutub medan magnet terhadap pembakaran biofuel dan berpotensi menjadi salah satu pendekatan untuk meningkatkan performa pembakaran minyak nabati.

Kata kunci: *Ceiba pentandra, biofuel, medan magnet, droplet combustion, ignition delay time*

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan akan energy terutama minyak bumi terus menerus mengalami peningkatan setiap tahunnya. Hal ini akan banyak berdampak terhadap ketidak seimbangan lingkungan yang ada di bumi. Beberapa dampak penggunaan minyak bumi yang bisa dirasakan saat ini adalah terjadinya peningkatan suhu di bumi yang mengakibatkan es di kutub utara dan selatan mencair [1], selain itu juga terjadi

penurunan kualitas udara yang disebabkan oleh emisi gas buang sisa pembakaran dari mesin berbahan bakar minyak bumi [2]. Hal ini juga nantinya akan menimbulkan masalah besar pada kesehatan umat manusia.

Dari beberapa aspek kerugian serta dampak yang terjadi pada lingkungan dan manusia, perlu dilakukan penelitian untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas sumber energy baru dan terbarukan yang ramah

DOI: <https://doi.org/10.24127/trb.v15i1.4636>

Received 20 October 2025; Received in revised form 26 November 2025; Accepted 20 July 2026

Available online 27 July 2026



terhadap lingkungan. Dari beberapa temuan energy alternative yang ramah lingkungan, beberapa tahun terakhir banyak penelitian dilakukan pada minyak nabati [3]–[8]. Penelitian menyebutkan bahwa minyak nabati memiliki karakteristik yang hampir mirip dengan minyak diesel sehingga sangat berpotensi menjadi bahan bakar alternatif [9]. Selain memiliki karakteristik yang mirip dengan solar, minyak nabati juga sangat ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas buang [10], proses ekstraksi minyak nabati juga tidak merusak alam. Hal ini juga dapat menjadi pertimbangan mengapa minyak nabati sangat mungkin untuk dijadikan sebagai pengganti minyak bumi.

Terdapat beberapa minyak nabati yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternative. Tetapi, sebagian besar produksi minyak nabati di dimanfaatkan untuk memasok kebutuhan minyak makanan. Salah satu minyak nabati yang memiliki potensi cukup bagus dan juga tidak dimanfaatkan sebagai minyak makanan adalah minyak biji kapuk / *Crude Ceiba Pentandra Oil* (CCPO). Tetapi terdapat beberapa faktor yang menjadi penghambat penerapan CCPO menjadi bahan bakar pengganti solar.

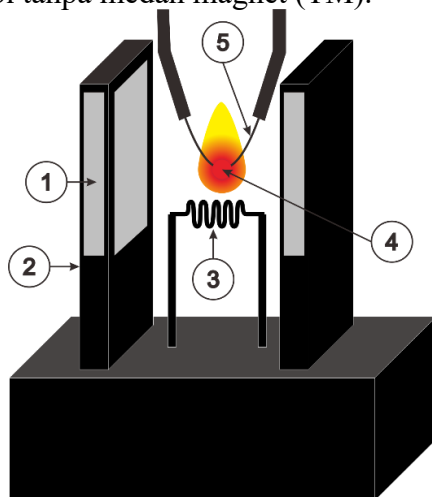
Salah satu hal yang menjadi penghambat serta memiliki dampak signifikan ialah factor propertis dari CCPO. Jika ditinjau dari sifat fisiknya, CCPO memiliki viskositas yang terlalu tinggi yang menyebabkan proses deformasi minyak menjadi butiran droplet akan lebih sulit [11]–[13]. Sedangkan jika ditinjau dari sifat kimianya, CCPO termasuk dalam minyak polar yang memiliki rantai asam lemak yang lurus dan tidak bercabang sehingga proses reaksi pembakaran menjadi lebih lambat [14]. Akan tetapi nilai kalor yang dimiliki oleh CCPO lebih tinggi jika dibandingkan dengan minyaak nabati lainnya [15]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk menggali potensi yang dimiliki CCPO agar bisa digunakan secara langsung sebagai bahan bakar.

Dalam upaya meningkatkan kualitas pembakaran agar dapat setara atau bahkan lebih baik daripada bahan bakar mesin diesel, beberapa peneliti melakukan penambahan medan magnet secara langsung pada CVO [16], [17]. Dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa medan magnet mampu berperan menurunkan viskositas bahan bakar, mempercepat terjadinya nyala api dan mampu meningkatkan penguapan bahan bakar [18], [19]. Perubahan properties bahan bakar tersebut terjadi karena adanya molekul hydrocarbon yang menjadi lebih selaras karena pengaruh medan magnet [20]. Selain berpengaruh terhadap properties bahan bakar medan magnet juga mampu menurunkan emisi gas buang serta meningkatkan efisiensi pembakaran [21]. Dengan intensitas medan magnet yang berbeda efisiensi pembakaran dan emisi yang dihasilkan juga terjadi perbedaan [22].

Berdasarkan hasil-hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa aplikasi medan magnet memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan performa pembakaran bahan bakar nabati, termasuk CCPO. Pengaruh medan magnet yang mampu memodifikasi sifat fisikokimia bahan bakar seperti viskositas, kestabilan molekul, serta kecepatan penguapan memberikan peluang besar dalam mengoptimalkan proses pembakaran agar lebih efisien dan bersih. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada konfigurasi magnet tarik-menarik dan tolak-menolak, sedangkan pengaruh orientasi kutub magnet terhadap pembakaran droplet CCPO belum banyak diteliti secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami secara mendalam hubungan antara orientasi dan intensitas medan magnet terhadap karakteristik pembakaran CCPO, sehingga dapat diperoleh konfigurasi medan magnet yang paling efektif dalam meningkatkan kualitas pembakaran.

2. Metode Penelitian

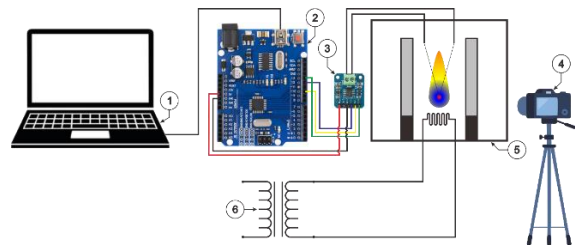
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental melalui observasi langsung terhadap objek uji. Bahan bakar yang digunakan adalah Crude Ceiba Pentandra Oil (CCPO) yang sama dengan penelitian sebelumnya [5]. Dalam pengambilan data penelitian, CCPO dipaparkan pada medan magnet berkekuatan 1,1 Tesla dengan jarak antar kutub sebesar 0,6 mm. Perlakuan medan magnet diterapkan dalam empat konfigurasi arah kutub. Pada medan tarik menarik terdapat 2 konfigurasi yaitu selatan–utara (S–U) dan utara–selatan (U–S), sedangkan pada arak medan magnet tolak menolak terdapat 2 konfigurasi yaitu selatan–selatan (S–S) dan utara–utara (U–U), serta satu kondisi kontrol tanpa medan magnet (TM).



Gambar 1. Ilustrasi perangkat pengujian pembakaran droplet minyak biji kapuk dengan berbagai konfigurasi medan magnet: 1. Magnet permanent, 2. Pemegang magnet, 3. Pemanas, 4. Bahan bakar, 5. Sensor thermocouple

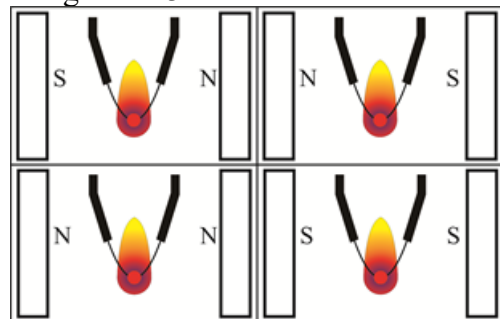
Untuk dapat terjadi pembakaran, mula-mula bahan bakar (CCPO) diletakkan pada thermocouple tipe K dengan diameter kawat sebesar 0,1 mm sehingga membentuk droplet dengan volume yang sudah ditentukan yaitu 1,25-1,31 μl . Untuk memastikan volume tetap sama, setiap data yang dihasilkan juga di ukur diameternya menggunakan software image J. Kemudian saat saat droplet sudah terbentuk heater akan dinyalakan sampai menyentuh temperature tertentu sehingga dapat membakar CCPO.

Ketika CCPO terbakar pada thermocouple, camera high speed sony ZV1 (4) akan merekam nyala api selama pembakaran berlangsung. Pada saat yang bersamaan, temperatur nyala api direkam secara kontinu menggunakan sistem akuisisi data yang terdiri atas Arduino Uno (2) dan modul penguat thermocouple AD8495 (3). Sinyal temperatur yang diperoleh dari thermocouple dikondisikan oleh modul AD8495 sebelum dikirim ke Arduino Uno untuk proses perekaman dan penyimpanan data secara real-time pada komputer. Karena nyala api yang dihasilkan cukup kecil maka dibutuhkan combustion chamber (1) supaya nyala api yang terbentuk tidak terpengaruh oleh angin dari luar.



Gambar 2. Rangkaian perangkat eksperimen: 1. Laptop, 2. Arduino Uno, 3. Modul Thermocouple, 4. High speed Camera, 5. Ruang pembakaran

Dalam perlakuan medan magnet, dua buah magnet ditempatkan sejauh 20 mm satu sama lain. Empat jenis susunan arah kutub diterapkan dalam eksperimen ini untuk mengamati pengaruh orientasi medan terhadap karakteristik bahan bakar. Masing-masing magnet memiliki kekuatan sebesar 11.000 gauss, sebagaimana divisualisasikan dalam gambar 3.



Gambar 3. Skema variasi orientasi medan magnet berdasarkan arah kutub pada percobaan pembakaran droplet

Setiap kondisi pengujian dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan untuk

menjamin reproduktibilitas hasil eksperimen. Video hasil pembakaran diolah menggunakan perangkat lunak Image J untuk memperoleh parameter karakteristik pembakaran, sedangkan data temperatur diolah menggunakan microsoft excel sebagai dasar analisis dan perbandingan antar kondisi pengujian.

3. Hasil dan Pembahasan

Data sifat kimia dan fisika CCPO

Sebelum melakukan pembahasan mendalam pada hasil penelitian, diperlukan beberapa data terkait bahan bakar yang digunakan. Pada minyak nabati data yang dapat diperoleh merupakan sifat fisika dan kimia. Dalam sifat fisika tersebut akan ditampilkan pada table nilai kalor tang dimiliki CCPO sedangkan data sifat kimia akan dijelaskan pada tabel 1 yang isinya meliputi kandungan asam lemak yang dimiliki oleh CCPO. Sementara sifat fisiknya ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 1. Kandungan senyawa utama dalam minyak mentah Ceiba Pentandra (CCPO) [4]

Chemical composition		Flash point (°C)	Value (%)
Saturated acid	<i>Caprylic acid</i>	176	–
	<i>Capric acid</i>	181	–
	<i>Lauric acid</i>	185	–
	<i>Myristic acid</i>	196	0.79
	<i>Palmitic acid</i>	201	19,2
	<i>Stearic acid</i>	206	2.6
	<i>Arachidic acid</i>	208	0.25
Unsaturated acid	<i>Oleic acid</i>	80	21.88
	<i>Linoleic acid</i>	77	53.78
	<i>Linolenic acid</i>	61	1.5
	<i>Eicosanoic acid</i>	85	–
Saturated acid			22.84
Monounsaturated acid			21.88
Polyunsaturated acid with two or more double bonds			55.28

Tabel 2. Karakter fisik CCPO [23]

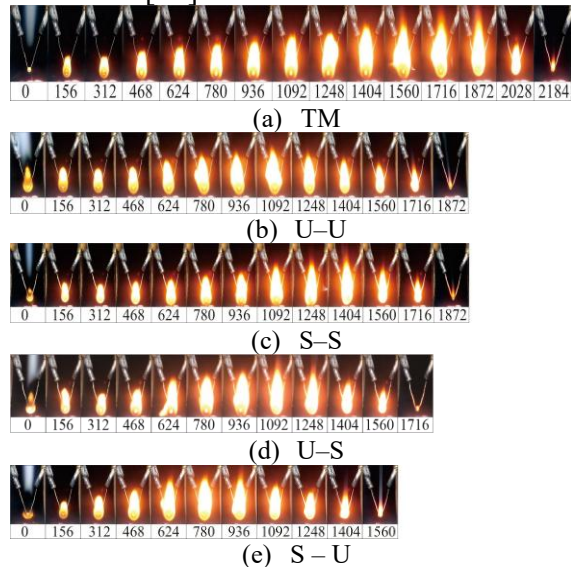
Property	ASTM method	Instrument	Value
Density at 40 °C (kg/m ³)	D1298	Hydrometer	974
Kinematic viscosity at 40 °C (cSt)	D445	Kinematic Viscometer	45,55
Flash point (°C)	D93	Pensky-Martens closed cup tester	260
Caloric value (kcal/kg)	D240	Bom Calorimeter	9,700.56
pH	D6423	pHep tester	5

Dari pengamatan yang telah dilakukan selama penelitian terdapat 4 variabel yang digunakan. Masing-masing variable penelitian tersebut akan dijelaskan detail terkait hasil dan pembahasannya.

Evolusi api

Pengamatan evolusi api selama penelitian ditunjukkan pada gambar 4. CCPO dengan variasi medan magnet dan tanpa magnet masing masing memiliki karakteristik api yang berbeda baik bentuknya, tinggi apinya maupun umur nyala api selama pembakaran. Pada pengamatan api CCPO tanpa dipengaruhi medan magnet menunjukkan pembakaran berlangsung selama 2184 ms. Pada pengamatan yang berbeda yaitu ketika api CCPO dipengaruhi magnet, terdapat 4 kondisi yang berbeda dan masing masing kondisi magnet dapat mempengaruhi karakteristik api secara visual terutama jika ditinjau dari umur nyala. Medan magnet dengan kondisi tarik menarik pada arah kutub S-U maupun U-S cenderung menghasilkan umur nyala api lebih pendek yaitu masing masing 1560 ms dan 1716 ms sedangkan pada kondisi arah medan magnet tolak menolak umur nyala api cenderung lebih panjang dan masing masing kutub U-U dan S-S menghasilkan umur nyala api yang sama 1872 ms tetapi masih terdapat perbedaan jika dibandingkan dengan tanpa

medan magnet yang menghasilkan umur 2184 ms. Perbedaan umur yang dihasilkan ini sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang melaporkan bahwa penerapan medan magnet dapat mempercepat proses pembakaran bahan bakar cair [24].



Gambar 4. Perkembangan bentuk nyala api selama proses pembakaran droplet minyak biji kapuk pada konfigurasi arah medan magnet yang berbeda serta kondisi tanpa medan magnet

Umur nyala api yang semakin pendek ketika terpengaruh medan magnet terjadi diduga karena medan magnet memengaruhi proses pembakaran melalui perubahan karakteristik transport oksigen di sekitar zona reaksi. Saat proses pembakaran berlangsung tanpa dipengaruhi medan magnet, uap bahan bakar dan molekul oksigen berdifusi secara alami menuju zona reaksi sehingga proses pembakaran berlangsung lebih lambat. Ketika medan magnet diterapkan dan mempengaruhi api, molekul oksigen (O_2) yang bersifat paramagnetik diduga mengalami perubahan distribusi di sekitar zona reaksi sehingga proses pencampuran antara uap bahan bakar dan oksigen menjadi lebih efektif. Akibatnya, laju reaksi oksidasi meningkat sehingga proses pembakaran berlangsung lebih singkat. Meningkatnya intensitas pembakaran ini ditandai dengan semakin banyaknya benjolan yang muncul pada api sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Namun demikian, karena penelitian ini tidak

mengamati fenomena internal droplet secara langsung, munculnya benjolan pada nyala api belum dapat disimpulkan sebagai fenomena *micro-explosion* dan masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Temperature Api

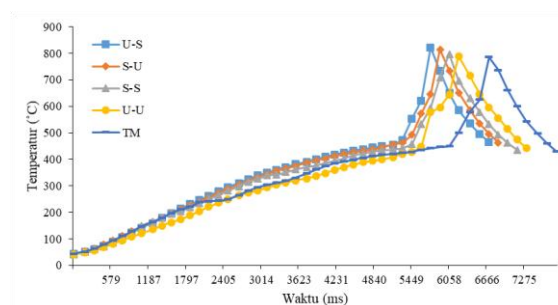
Dari temperature yang terekam pada data logger, setiap bentuk api yang ditampilkan secara visual pada gambar 4 mampu menghasilkan temperature yang berbeda-beda. Perbedaan masing masing temperature tersebut dapat diamati pada gambar 5. Temperature api paling tinggi dihasilkan oleh nyala api dengan arah medan magnet U-S temperature api yang mencapai $821,75^\circ\text{C}$ kemudian di ikuti arah medan S-U 815°C . Untuk variasi arah medan magnet tolak menolak temperature yang dihasilkan masing-masing arah kutub magnet juga terjadi peningkatan jika dibandingkan dengan tanpa magnet. Pada arah S-S temperature yang dihasilkan $796,75^\circ\text{C}$ sedangkan arah kutub U-U $789,25^\circ\text{C}$.

Peningkatan temperatur api akibat pengaruh medan magnet diduga terjadi karena medan magnet memengaruhi proses pembakaran melalui peningkatan efektivitas pencampuran antara uap bahan bakar dan oksigen di sekitar zona reaksi. Kondisi tersebut memungkinkan proses oksidasi berlangsung lebih intensif sehingga laju pelepasan panas (heat release rate) meningkat dan temperatur nyala api menjadi lebih tinggi.

Orientasi kutub U-S menghasilkan temperatur tertinggi dibandingkan konfigurasi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa orientasi medan magnet kemungkinan menghasilkan distribusi medan magnet yang lebih efektif di sekitar droplet sehingga memengaruhi proses transport oksigen menuju zona reaksi. Mengingat molekul oksigen bersifat paramagnetik, keberadaan medan magnet diduga dapat memengaruhi distribusi lokal oksigen di sekitar nyala sehingga meningkatkan peluang terjadinya reaksi oksidasi antara uap bahan bakar dan oksigen. Peningkatan laju oksidasi tersebut selanjutnya meningkatkan laju pelepasan

panas (*heat release rate*) yang tercermin dari meningkatnya temperatur maksimum nyala api.

Selain mekanisme transport oksigen, beberapa penelitian juga mengusulkan bahwa medan magnet dapat memengaruhi dinamika pasangan radikal (*radical pair mechanism*) melalui perubahan keadaan spin elektron, sehingga berpotensi memengaruhi laju reaksi kimia selama pembakaran. Namun demikian, penelitian ini tidak melakukan pengukuran spesies radikal, distribusi oksigen, maupun karakterisasi struktur kimia bahan bakar setelah perlakuan medan magnet. Oleh karena itu, mekanisme tersebut belum dapat dikonfirmasi secara langsung dan masih memerlukan penelitian lanjutan menggunakan teknik karakterisasi seperti Laser-Induced Fluorescence (LIF), Electron Spin Resonance (ESR), FTIR, atau simulasi numerik.



Gambar 5. Temperatur api pembakaran CCPO variasi arah medan magnet dan tanpa magnet

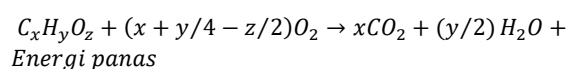
Tinggi api

Pengaruh medan magnet dengan berbagai orientasi terhadap proses pembakaran droplet CCPO secara signifikan tercermin pada karakteristik tinggi api maksimum yang dihasilkan. Medan magnet dengan orientasi Utara-Selatan (U-S) terbukti memberikan performa paling optimal dengan tinggi api maksimum hampir mencapai 12 mm, jauh lebih tinggi dibandingkan orientasi Utara-Utara (U-U) maupun tanpa medan magnet (TM). Secara umum, tinggi api pada pembakaran droplet dipengaruhi oleh laju evaporasi bahan bakar, jumlah uap bahan bakar yang terbentuk,

proses difusi oksigen menuju zona reaksi, serta laju pelepasan panas (*heat release rate*).

Secara fisika, kondisi ini menunjukkan bahwa orientasi U-S mampu meningkatkan laju evaporasi bahan bakar sehingga pembentukan uap bahan bakar berlangsung lebih cepat dan proses pencampuran dengan oksigen menjadi lebih efektif. Sebaliknya, orientasi medan magnet U-U menghasilkan api yang paling rendah dibandingkan orientasi medan magnet lainnya, bahkan lebih rendah dibandingkan tanpa medan magnet. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa orientasi kutub magnet berpotensi memengaruhi karakteristik pembakaran droplet meskipun intensitas medan magnet yang digunakan sama. Salah satu mekanisme yang diusulkan dalam berbagai penelitian adalah interaksi medan magnet dengan molekul oksigen yang bersifat paramagnetik sehingga memengaruhi distribusi oksigen di sekitar zona reaksi dan selanjutnya memengaruhi laju oksidasi bahan bakar.

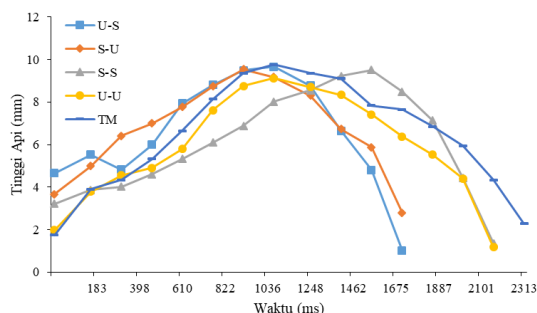
Secara kimia, kehadiran medan magnet khususnya orientasi U-S diduga memfasilitasi reaksi oksidasi trigliserida CCPO sehingga proses pembakaran berlangsung lebih intensif dibandingkan konfigurasi medan magnet lainnya. Beberapa penelitian juga mengusulkan bahwa medan magnet dapat memengaruhi dinamika pasangan radikal (*radical pair mechanism*) yang berpotensi meningkatkan laju reaksi pembakaran [25]–[27]. Namun demikian, mekanisme tersebut masih berupa hipotesis karena penelitian ini tidak melakukan pengukuran konsentrasi radikal bebas maupun karakterisasi struktur kimia bahan bakar setelah perlakuan medan magnet. Secara reaksi, trigliserida CCPO bereaksi dengan oksigen menjadi karbon dioksida, air, serta energi panas mengikuti reaksi:



Peningkatan laju oksidasi tersebut diduga berkontribusi pada peningkatan tinggi api serta kestabilan pembakaran

dibandingkan kondisi tanpa medan magnet maupun orientasi U–U yang kurang efektif dalam mempercepat reaksi oksidasi trigliserida.

Dengan demikian, penerapan medan magnet dengan orientasi U–S secara fisika maupun kimia menunjukkan kecenderungan paling efektif dalam meningkatkan efisiensi dan kestabilan proses pembakaran droplet CCPO. Sebaliknya, medan magnet orientasi U–U justru menurunkan efektivitas pembakaran, bahkan lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa medan magnet. Hasil ini mempertegas bahwa selain intensitas medan magnet, orientasi kutub magnet juga berperan terhadap karakteristik pembakaran droplet CCPO. Namun demikian, penelitian ini belum melakukan pemetaan distribusi medan magnet maupun pengukuran distribusi oksigen di sekitar zona pembakaran, sehingga mekanisme yang mendasari perbedaan karakteristik pembakaran pada masing-masing orientasi kutub masih memerlukan validasi lebih lanjut melalui simulasi numerik atau pengukuran eksperimental.



Gambar 6. Grafik perbandingan ketinggian nyala api hasil pembakaran CCPO pada berbagai konfigurasi arah medan magnet dan kondisi tanpa medan magnet.

Waktu Tunda Penyalaan

Durasi keterlambatan penyalaan (ignition delay time) pada setiap konfigurasi medan magnet menunjukkan variasi waktu yang signifikan. Berdasarkan visualisasi pada Gambar 7, arah kutub magnet utara–selatan (U–S) menghasilkan waktu penyalaan tercepat, yakni 5304 ms, disusul oleh arah selatan–utara (S–U) dengan waktu 5460 ms. Tetapi ignition delay time pada pembakaran CCPO tanpa dipengaruhi

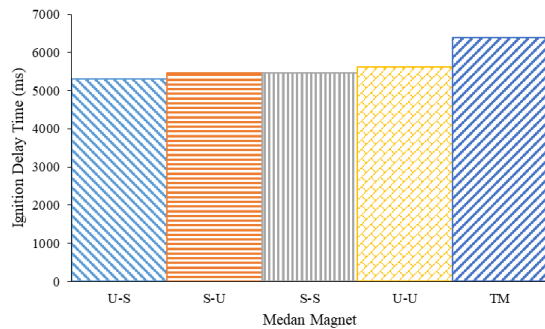
medan magnet terjadi perbedaan waktu yang signifikan yaitu 6396 ms.

Hal ini menunjukkan bahwa penerapan medan magnet mampu mempercepat proses penyalaan droplet CCPO. Secara umum, *ignition delay time* dipengaruhi oleh proses perpindahan panas menuju droplet, laju evaporasi bahan bakar, serta pembentukan campuran uap bahan bakar dan oksigen yang mencapai kondisi mudah terbakar (*flammable mixture*). Semakin cepat droplet mengalami evaporasi dan membentuk campuran yang mudah terbakar, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai penyalaan menjadi lebih singkat.

Pada kondisi tanpa medan magnet, viskositas CCPO yang relatif tinggi diduga menyebabkan proses perpindahan panas dan evaporasi berlangsung lebih lambat sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik nyala menjadi lebih lama. Sebaliknya, pada perlakuan medan magnet, beberapa penelitian melaporkan bahwa medan magnet berpotensi memengaruhi sifat fisik bahan bakar, seperti viskositas, sehingga laju evaporasi dapat meningkat. Selain itu, karena molekul oksigen bersifat paramagnetik, keberadaan medan magnet diduga memengaruhi distribusi oksigen di sekitar droplet sehingga proses pembentukan campuran uap bahan bakar–oksigen berlangsung lebih efektif dan mempercepat terjadinya penyalaan.

Menariknya, orientasi kutub U–S menghasilkan ignition delay time yang lebih singkat dibandingkan orientasi S–U meskipun kedua konfigurasi memiliki intensitas medan magnet yang sama. Hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik pembakaran tidak hanya dipengaruhi oleh besar medan magnet, tetapi juga kemungkinan dipengaruhi oleh orientasi kutub magnet. Perbedaan tersebut diduga berkaitan dengan distribusi medan magnet di sekitar droplet yang memengaruhi proses evaporasi awal maupun transport oksigen menuju zona reaksi. Namun demikian, penelitian ini belum melakukan pemetaan distribusi medan magnet maupun pengukuran distribusi oksigen sehingga

mekanisme tersebut masih memerlukan validasi lebih lanjut.



Gambar 7. Perbandingan waktu tunda penyalaan pada proses pembakaran CCPO dengan berbagai arah medan magnet dan kondisi tanpa medan magnet

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengevaluasi pengaruh medan magnet terhadap karakteristik pembakaran droplet minyak biji kapuk (Crude Ceiba Pentandra Oil, CCPO). Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan, beberapa kesimpulan penting dapat diambil:

1. Penerapan medan magnet memberikan perubahan yang signifikan terhadap karakteristik pembakaran droplet CCPO, yang ditunjukkan oleh perubahan evolusi nyala api, temperatur pembakaran, tinggi api, dan ignition delay time. Orientasi kutub medan magnet menghasilkan karakteristik pembakaran yang berbeda meskipun menggunakan intensitas medan magnet yang sama.
2. Orientasi kutub Utara–Selatan (U–S) menghasilkan performa pembakaran terbaik, ditandai dengan temperatur dan tinggi api yang lebih tinggi serta ignition delay time yang lebih singkat dibandingkan orientasi lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa orientasi kutub medan magnet merupakan salah satu faktor yang memengaruhi karakteristik pembakaran droplet CCPO.

3. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa minyak biji kapuk memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif yang dapat ditingkatkan karakteristik pembakarannya melalui penerapan medan magnet. Temuan ini memberikan kontribusi baru mengenai pengaruh orientasi kutub medan magnet terhadap pembakaran droplet minyak nabati, yang masih jarang dilaporkan pada penelitian sebelumnya..

Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengkaji mekanisme yang mendasari pengaruh orientasi kutub medan magnet terhadap pembakaran droplet melalui karakterisasi distribusi medan magnet, pengukuran spesies reaktif, maupun simulasi numerik

Ucapan terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada DRTPM Diktiristek atas dukungan pendanaan melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP), sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga berterima kasih kepada institusi asal atas dukungan fasilitas penelitian, serta kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan teknis, diskusi ilmiah, dan kontribusi lain yang sangat berarti selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini.

Referensi

- [1] J. Hansen *et al.*, “Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 16, no. 6, 2016.
- [2] B. Wang, B. Wang, B. Lv, and R. Wang, “Impact of Motor Vehicle Exhaust on the Air Quality of an Urban City,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 22, no. 8, 2022.

- [3] S. Syahrudin, I. N. G. Wardana, D. Widhiyanuriyawan, and L. Yuliati, "The Effects of the Polarity and Molecular Dynamic Energy of Bamboo Activated Carbon on the Degumming Process of Calophyllum inophyllum Oil," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1097, no. 1.
- [4] D. Perdana, I. N. G. Wardana, L. Yuliati, and N. Hamidi, "The role of fatty acid structure in various pure vegetable oils on flame characteristics and stability behavior for industrial furnace," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 5, no. 8–95, pp. 65–75, 2018.
- [5] W. A. Winarko, N. Ilminnafik, M. N. Kustanto, and D. Perdana, "Karakteristik pembakaran droplet minyak nabati Indonesia," vol. 12, no. 2, pp. 103–110, 2022.
- [6] N. Ilminnafik, A. Iwananda, M. N. Kustanto, and R. Z. K. Nisa, "KINERJA DAN EMISI MESIN DIESEL 1 SILINDER BERBAHAN BAKAR CAMPURAN BIODIESEL NYAMPLUNG DAN ETANOL," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 2, 2023.
- [7] R. Z. K. Nisak, N. Ilminnafik, and S. Junus, "Performance and Emissions of Mixed Ethanol-Biodiesel Calophyllum Inophyllum Fueled Diesel Engine," *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.*, vol. 9, no. 8, pp. 1124–1128, 2021.
- [8] R. Z. K. Nisak, N. Ilminnafik, S. Pambudi, D. H. T. Prasetyo, and Y. A. Nugraha, "Potensi Biofuel Sebagai Alternatif Substitusi Bahan Bakar Minyak Rima," vol. 5, pp. 62–73, 2023.
- [9] I. N. G. Wardana, "Combustion characteristics of jatropa oil droplet at various oil temperatures," *Fuel*, 2010.
- [10] P. Hellier, N. Ladommatos, and T. Yusaf, "The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions," *Fuel*, vol. 143, 2015.
- [11] B. Sudarmanta, D. S. Kawano, and L. B. Bakar, "Pemodelan numerik karakteristik semprotan biodiesel minyak jarak dengan type injektor pressurized swirl atomizer," no. April, 2004.
- [12] J. M. Rallison, "DEFORMATION OF SMALL VISCOUS DROPS AND BUBBLES IN SHEAR FLOWS," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 16, 1984.
- [13] I. C. V. M. Santos, P. F. Oliveira, and C. R. E. Mansur, "FACTORS THAT AFFECT CRUDE OIL VISCOSITY AND TECHNIQUES TO REDUCE IT: A REVIEW," *Brazilian J. Pet. Gas*, vol. 11, no. 2, 2017.
- [14] E. Marlina, I. N. G. Wardana, L. Yuliati, and W. Wijayanti, "The effect of fatty acid polarity on the combustion characteristics of vegetable oils droplets," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 494, no. 1.
- [15] D. Perdana, "Eksperimental pembakaran droplet pengaruh komposisi asam lemak dan sifat fisika kimia minyak kapas dan jarak pagar terhadap karakteristik nyala api," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 88–95, 2023.
- [16] Okoronkwo, Nwachukwu, Ngozi – Olehi, and Igbokwe, "The effect of electromagnetic flux density on the ionization and the combustion of fuel (An economy design project)," *Am. J. Sci. Ind. Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 527–

- 531, 2010.
- [17] L. P. Oommen and G. N. L. Kumar, "A Study on the Effect of Magnetic Field on the Properties and Combustion of Hydrocarbon Fuels," *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 9, no. 3, pp. 89–98, 2019.
- [18] D. Perdana, S. Adiwidodo, Subagyo, and W. A. Winarko, "the Role of Perforated Plate and Orientation of the Magnetic Fields on Coconut Oil Premixed Combustion," *INMATEH - Agric. Eng.*, vol. 67, no. 2, pp. 77–84, 2022.
- [19] W. A. Winarko, N. Ilminnafik, M. N. Kustanto, and D. Perdana, "Peran Orientasi Medan Magnet Pada Karakteristik Nyala Api Droplet *Calophyllum Inophyllum*," *J. Keteknikan Pertan.*, vol. 10, no. 3, 2022.
- [20] S. Jain, "Experimental Investigation of Magnetic Fuel Conditioner (M.F.C) in I.C. engine," *IOSR J. Eng.*, vol. 02, no. 07, pp. 27–31, 2012.
- [21] A. S. Faris *et al.*, "Effects of magnetic field on fuel consumption and exhaust emissions in two-stroke engine," in *Energy Procedia*, 2012, vol. 18, pp. 327–338.
- [22] L. P. Oommen, K. G. Narayanappa, and S. K. Vijayalakshmi, "Experimental Analysis of Synergetic Effect of Part-Cooled Exhaust Gas Recirculation on Magnetic Field-Assisted Combustion of Liquefied Petroleum Gas," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 45, no. 11, 2020.
- [23] W. A. Winarko, N. Ilminnafik, M. N. Kustanto, and D. Perdana, "Karaktersitik pembakaran droplet minyak nabati Indonesia," *Din. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 2, p. 103, 2022.
- [24] D. Perdana, S. Adiwidodo, M. Choifin, and W. A. Winarko, "The effect of magnetic field variations in a mixture of coconut oil and jatropha on flame stability and characteristics on the premixed combustion," *EUREKA, Phys. Eng.*, vol. 2021, no. 5, pp. 13–22, 2021.
- [25] C. T. Rodgers, "Magnetic field effects in chemical systems," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 81, no. 1. 2009.
- [26] B. Brocklehurst, "Magnetic fields and radical reactions: Recent developments and their role in nature," *Chemical Society Reviews*, vol. 31, no. 5. 2002.
- [27] O. Öztürk and M. Taştan, "A review of magnetic field assisted combustion," *Int. J. Energy Stud.*, vol. 9, no. 1, 2024.