

# Pengaruh Orientasi Medan Magnet Terhadap Karakteristik Nyala Api Pembakaran Droplet *Calophyllum Inophyllum*

Wigo Ardi Winarko<sup>1\*</sup>, Nasrul Ilminnafik<sup>2</sup>, Muh Nurkoyim Kustanto<sup>2</sup>, Dony Perdana<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia

<sup>3</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Maarif Hasyim Latif, Indonesia

\*email korespondensi: wigoardi13@gmail.com

## Info Artikel

Diajukan: 22 Juni 2022

Diterima: 14 September 2022

### Keyword:

vegetable oil; droplet burning; magnetic field; flame characteristics

### Kata Kunci:

Minyak nabati; pembakaran droplet; medan magnet; karakteristik nyala api

## Abstract (10pt)

The purpose of this study was to experimentally determine the effect of how calopyllum inophilum and magnetic field variations affect flame stability, ignition delay time, temperature, and height during droplet combustion. At present, Indonesia is still developing biodiesel palm oil as a renewable fuel source to replace diesel. The problem is, biodiesel palm oil is used as a source of food so that it will have an impact on the scarcity of food. The fuel used in this study is crude calopyllum inophyllum oil which is coupled with variations in the orientation of the South - North, North - South, South - South, North - North Magnetic fields and without. The volume of the droplet tested 1.25-1.31 ml is placed in the thermocouple type K 0.1 mm which is located between 2 magnets, with a magnetic field intensity of 1.1 Tesla (11000 gauss). The results showed that the magnetic field played a role in improving the quality of combustion through its role to increase collisions between molecules to be stronger because the electron spin accelerated by the magnetic field. This effect can be seen in the direction of the North - South magnetic field which produces the highest temperature and the shortest ignition delay time. This is because the direction of the magnetic pole acts as transportation O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O across the droplet so that the resulting reaction can improve the quality of combustion.

## Abstrak (10pt)

Tujuan dari penelitian secara eksperimental ini untuk mengetahui pengaruh bagaimana calopyllum inophilum oil dan variasi medan magnet mempengaruhi stabilitas nyala, waktu tunda penyalaan, suhu, dan tinggi selama pembakaran tetesan. Saat ini, Indonesia masih mengembangkan biodiesel minyak sawit sebagai sumber bahan bakar terbarukan untuk menggantikan solar. Persoalannya, minyak sawit dijadikan sebagai sumber pangan sehingga akan berdampak pada kelangkaan pangan. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah crude calopyllum inophyllum oil yang ditambah dengan variasi orientasi medan magnet Selatan - Utara, Utara - Selatan, Selatan - Selatan, Utara - Utara dan tanpa magnet. Volume droplet yang diuji 1,25-1,31 ml ditempatkan pada thermocouple type K 0,1 mm yang terletak di antara 2 magnet, dengan intensitas medan magnet 1.1 Tesla (11000 Gauss). Hasil penelitian menunjukkan bahwa medan magnet berperan meningkatkan kualitas pembakaran melalui perannya meningkatkan tumbukan antar molekul menjadi lebih kuat karena spin elektron yang dipercepat oleh medan magnet. Pengaruh tersebut dapat dilihat pada arah medan magnet Utara - Selatan yang menghasilkan temperatur paling tinggi dan waktu tunda nyala api yang paling pendek. Ini karena arah kutub magnet berperan sebagai transport O<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O melintasi droplet sehingga reaksi yang dihasilkan mampu meningkatkan kualitas pembakaran.

## 1. Pendahuluan

Minyak nabati mentah (*Crude Vegetable Oil* atau CVO) merupakan sumber energi terbarukan dan termasuk salah satu dari sub kelompok bahan bakar cair hayati (Escobar et al., 2009; Nigam & Singh, 2011). CVO memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai pengganti minyak bumi karena rantai alkil panjang pada asam lemak minyak sangat cocok untuk mesin pengapian kompresi (Hellier et al., 2015). Dibandingkan dengan minyak bumi, CVO memiliki beberapa keunggulan antara lain rendah emisi, terbarukan, tersedia secara lokal, mampu terurai secara hayati serta memiliki *triglyceride* dalam struktur kimianya yang mengandung oksigen lebih besar (Misra & Murthy, 2010; Natarajan et al., 2008). Penggunaan CVO sebagai bahan bakar alternatif telah banyak diteliti. Tetapi, sebagian besar dikonversi menjadi biodiesel. Hal ini masih diragukan karena proses konversi dari CVO menjadi biodiesel dengan metode trans-esterifikasi (Liu et al., 2017), *degumming* (Leevijit et al., 2016) dan hidrogenasi parsial (Thunyaratchatanon et al., 2016) membutuhkan peralatan, energi, dan biaya tambahan yang cukup besar (Bautista et al., 2009; Ogden et al., 1999). Maka dari itu perlu dikembangkan agar CVO bisa digunakan langsung sebagai bahan bakar untuk memangkas biaya produksi. Selain itu, CVO juga berhasil diterapkan pada mesin yang beroperasi di area sensitif seperti area hutan, transportasi air (Blauensteiner & Gruber, 2009), dan mesin pertanian di Eropa yang memiliki 4 musim (Ettl et al., 2016). Tetapi, masih memiliki kelemahan diantaranya *flash point* dan viskositas tinggi serta tingkat penguapan yang rendah (Marlina et al., 2020). Sehingga, penggunaan minyak nabati untuk mesin diesel kurang baik meskipun digunakan dalam jangka pendek (Blin et al., 2013).

Metode pembakaran *droplet* mengetahui karakteristik pembakaran bahan bakar berdasarkan sifat fisika maupun kimianya (Hoxie et al., 2014). Karakteristik pembakaran CVO masih belum banyak yang diungkapkan karena sangat kompleks. Senyawa CVO tersusun atas unsur-unsur multikomponen, yaitu asam lemak jenuh, asam lemak tak jenuh tunggal, asam lemak tak jenuh ganda, dan gliserol (Nanlohy et al., 2018). Komposisi asam lemak jenuh yang tinggi pada CVO akan juga dapat menjadi kelemahan ketika dijadikan sebagai bahan bakar mesin kompresi.

Untuk mengatasi kelemahan yang dimiliki minyak nabati, beberapa peneliti menggunakan magnet untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan menurunkan emisi (Niaki et al., 2020; Oommen et al., 2020; Tipole et al., 2022). Penambahan magnet dapat meningkatkan sifat bahan bakar seperti menyelaraskan molekul hidrokarbon yang berpengaruh terhadap perubahan *properties* bahan bakar sehingga efisiensi pembakaran dan emisi polutan menjadi lebih baik (Jain, 2012). Jika medan magnet diterapkan dengan kekuatan yang cukup dan durasi yang sesuai, viskositas bahan bakar akan berkurang secara signifikan (Oommen et al., 2019) efek magnetik juga menyebabkan terjadinya perubahan molekul bahan bakar dari kluster menjadi dekluster (Okoronkwo et al., 2010) dan mampu menurunkan tegangan permukaan (Khedvan, 2015). Dengan meningkatnya *intensitas* medan magnet tegangan permukaan hidrokarbon berkurang (Hayakawa et al., 2019). Selain itu, beberapa penelitian telah melakukan penelitian tentang efek medan magnet yang ditempatkan di saluran bahan bakar untuk mengetahui polusi dan emisi energi hasil pembakaran mesin diesel dan mesin bensin (Faris et al., 2012), (El Fatih & Saber, 2010). Dengan menggunakan empat intensitas magnet yang berbeda (0G,

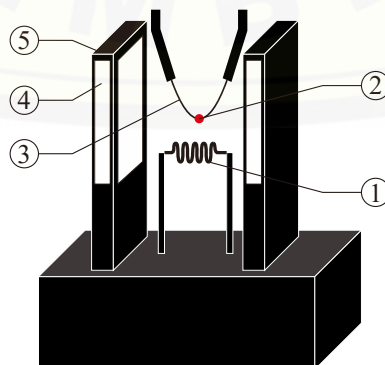
3200G, 4800G dan 6400G) terjadi peningkatan efisiensi termal sebesar 3,9% dan penghematan bahan bakar sebesar 13,8% yang disebabkan oleh peningkatan efisiensi pembakaran (Oommen et al., 2020). Peningkatan medan magnet hingga 9000 Gauss mampu menurunkan emisi CO<sub>2</sub> dan HC masing-masing menjadi 30% dan 40%, dan meningkatkan konsumsi bahan bakar menjadi sekitar 9% hingga 14%, namun CO<sub>2</sub> meningkat hingga 10% (Faris et al., 2012). Penggunaan medan magnet pada bahan bakar juga dapat meningkatkan temperatur pembakaran (Ulfiana et al., 2021). Medan magnet juga mengontrol penyebaran api melalui mobilitas elektron dalam molekul minyak nabati dan melalui sifat paramagnetik oksigen dan sifat diamagnetik H<sub>2</sub>O, yang membawa panas ke produk (Soebiyakto et al., 2020b).

Selain kekuatan medan magnet, penelitian tentang pengaruh arah medan magnet juga telah dilakukan Perdana et, al (Perdana et al., 2020). Hasil penelitian menunjukkan arah medan magnet berpengaruh terhadap kecepatan pembakaran laminar. Dengan mengubah arah medan magnet, gaya magnet juga dapat mengubah bentuk nyala api, mengubah pertukaran panas antara gas dengan permukaan bahan bakar dan laju pembakaran terjadi perubahan (Zhang & Wei, 2021). Perbedaan arah medan magnet juga mampu meningkatkan kecepatan rambatan api (Soebiyakto et al., 2020a). Sayangnya, penelitian tersebut hanya membahas karakteristik nyala api pada pembakaran premix saja. Sangat penting dilakukan penelitian yang membahas tentang peran medan magnet terhadap karakteristik pembakaran droplet *Calophyllum Inophyllum*.

## 2. Metode Penelitian

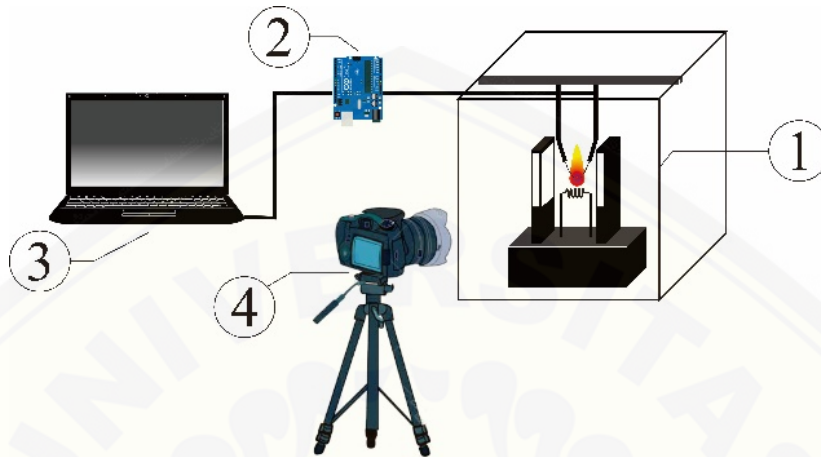
Penelitian ini menggunakan *Crude Calopyllum Inophillum Oil* (CCIO) yang diberi tambahan medan magnet dengan empat variasi arah medan yaitu selatan - utara (S-U), utara -selatan (U-S), selatan - selatan (S-S), utara – utara (U-U) serta tanpa magnet (TM) sebagai pembanding untuk mengetahui karakteristik pembakaran droplet. Setiap variabel percobaan dilakukan sebanyak 5x untuk mengetahui keakuratan data yang di ambil. Adapun karakteristik pembakaran meliputi stabilitas nyala api, waktu tunda, temperatur dan tinggi.

Minyak nabati sebanyak 1,25-1,31 ml ditetaskan pada *thermocouple* tipe K berdiameter 0,1 mm, diletakkan 3 mm di atas *heater* 600 Watt dengan bahan kawat nikelin 0,5 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. *Ignition delay time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk menyalakan *droplet*, dimana waktu dimulai setelah *heater* dinyalakan sampai droplet terbakar (terbentuk api pada droplet).



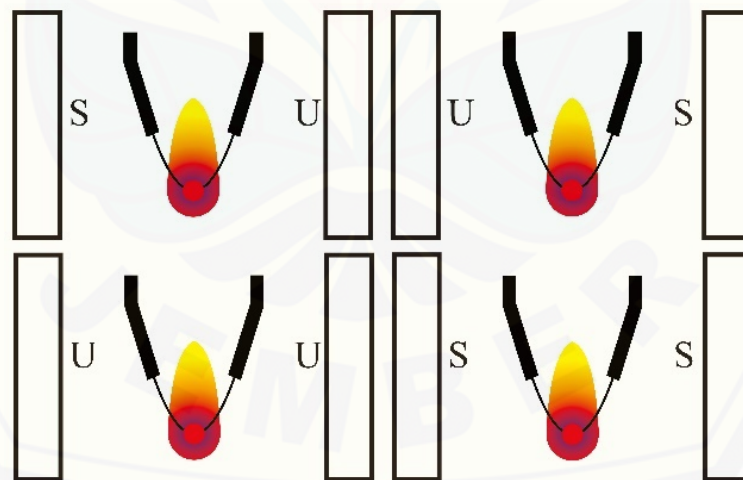
**Gambar 1.** Posisi droplet dan *thermocouple*: 1. Heater, 2. Droplet, 3. *Thermocouple*, 4. Magnet permanen, 5. Holder magnet

*Thermocouple* dihubungkan data *logger* untuk merekam *temperatur droplet* yang dimulai ketika *heater* dinyalakan sampai nyala api padam. Pada saat terbentuk nyala api, *heater* kemudian dimatikan untuk mengetahui temperatur nyala api yang sebenarnya. Nyala api *droplet* yang terbentuk pada *thermocouple* direkam menggunakan video kamera dengan kecepatan 180 fps (*frame per second*) dan resolusi 1280 x 720 *pixels*. Gambar 2 menunjukkan instalasi penelitian.



**Gambar 2.** Alat experiment: 1. *Combustion chamber*, 2. *Data logger*, 3. *Laptop*, 4. *High speed Camera*

Magnet permanen yang digunakan merupakan magnet neodmium berlapis nikel grade N45 dengan dimensi 40×25×10 mm dan intensitas medan magnet 1,1 T (11000 gauss). Jarak antara magnet pada saat pengujian 20mm dengan variasi 4 kutub magnet yang berbeda seperti ditunjukkan Gambar 3.



**Gambar 3.** Orientasi medan magnet

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Data sifat fisika dan kimia minyak nabati

Sebelum mendapatkan data penelitian diperlukan data *properties* bahan bakar yang ditampilkan pada Tabel 1 dan 2.

**Tabel 1.** Sifat fisika minyak nabati

Property	Metode ASTM	CCIO <sup>(a)</sup>
Densitas at 40 °C (kg/m <sup>3</sup> )	D1298	910
Viskositas Kinematik at 40 °C (cSt)	D445	32,48
Flash point (°C)	D93	235
Nilai kalor (kcal/kg)	D240	9,338.8

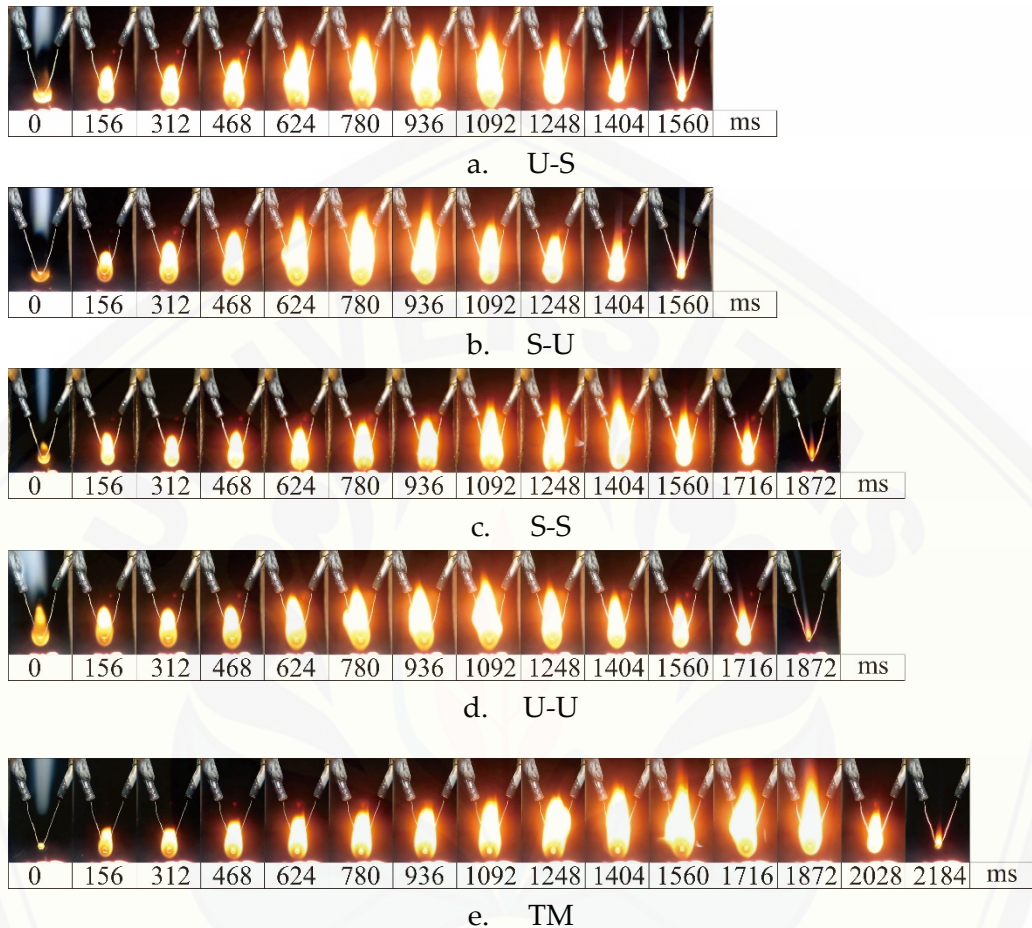
(a): (Belagur & Chitimi, 2013)

### 3.2 Kestabilan nyala api pada variasi orientasi medan magnet

Dilihat pada Gambar 4. penambahan medan magnet pada pembakaran *droplet* mampu meningkatkan ledakan mikro yang ditandai dengan adanya benjolan pada nyala api dan menurunkan stabilitas nyala api yang ditandai dengan umur nyala api yang semakin singkat, baik medan magnet tolak maupun tarik. Hal ini terjadi karena elektron yang ada pada bahan bakar bergerak lebih energetik karena pengaruh intensitas medan magnet yang mengganggu kestabilan ikatan asam lemak minyak nabati dengan merangsang elektron pada asam lemak dan gliserol melompat meninggalkan orbitnya. Medan magnet mengikat atom karbon dari senyawa trigliserida, sehingga atom karbon pada minyak nabati mampu untuk terurai. Atom atau molekul yang melepaskan dan menerima elektron menjadi radikal, sehingga lebih mudah terjadi kontak akibat adanya gaya tarik menarik yang kuat antar molekul oleh medan magnet. Bergeraknya elektron bahan bakar tersebut akan membuat ikatan molekul bahan bakar menjadi lemah sehingga viskositas bahan bakar akan menurun dan proses penguapan bahan bakar menjadi lebih cepat.

Medan magnet S-S dan U-U memberi pengaruh yang relatif lebih kecil karena pada medan magnet S-S dan U-U terjadi penurunan kuat medan magnet akibat dari kutub magnet yang saling tolak menolak. Dari evolusi nyala api yang ditunjukkan pada Gambar 4 (c dan d) terlihat bahwa waktu pembakaran yang terjadi menjadi lebih singkat tetapi *intensitas* ledakan mikro juga relatif lebih rendah. Ini terjadi karena partikel yang bersifat *paramagnetic* bergerak mengikuti arah medan sedangkan partikel yang bersifat *diamagnetic* cenderung bergerak berlawanan dengan arah medan magnet. Hal tersebut mengakibatkan salah satu partikel yang ada dibawa oleh gaya magnet bergerak keluar dari nyala api sehingga partikel menjadi selaras. Pada arah medan magnet S-S partikel O<sub>2</sub> akan bergerak masuk melintasi nyala api karena arah medan magnet keluar dari kutub, sedangkan pada kutub U-U partikel *paramagnetic* yaitu H<sub>2</sub>O bergerak masuk melintasi nyala api karena arah medan magnet masuk menuju api. Kedua hal ini mengakibatkan reaksi pembakaran yang terjadi tidak maksimal. Jika dibandingkan dengan medan magnet S-U dan U-S, umur nyala api menjadi lebih dipersingkat. Selain itu ledakan mikro yang terjadi pada nyala api menjadi lebih *intens* yang mengindikasikan bahwa molekul yang ada pada bahan bakar bergerak semakin cepat. Hal ini terjadi karena pada medan magnet tarik, partikel H<sub>2</sub>O akan bergerak masuk melintasi nyala api dari kutub selatan menuju utara

sedangkan partikel  $O_2$  bergerak masuk melewati nyala api dari kutub utara menuju ke selatan yang mengakibatkan terjadinya tumbukan antar partikel. Tumbukan antara kedua partikel tersebut mengakibatkan ikatan molekul menjadi lebih lemah sehingga proses reaksi bahan bakar menjadi lebih baik.

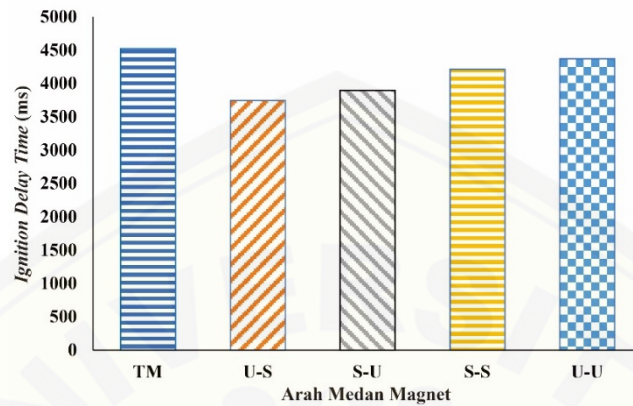


**Gambar 4.** Stabilitas nyala api pada variasi orientasi medan magnet dan tanpa magnet

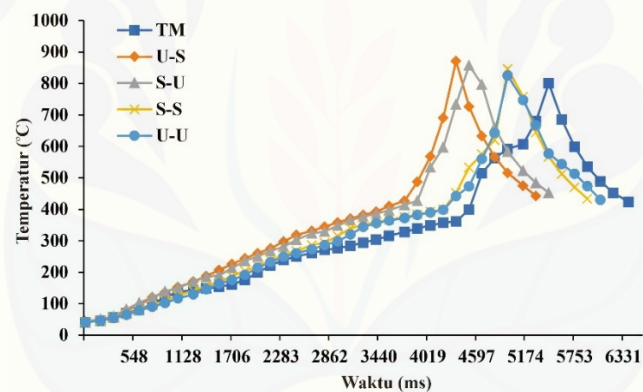
### 3.3 Ignition delay time

Ditunjukkan pada Gambar 5. Selain menurunkan stabilitas nyala api, penambahan medan magnet juga mampu mempercepat *ignition delay time*. Hal ini menandakan bahwa medan magnet tidak hanya bereaksi pada saat terjadinya nyala api tetapi juga bereaksi terhadap bahan bakar yang ditandai dengan semakin pendeknya *ignition delay time* yang terjadi. Penurunan *ignition delay time* tersebut terjadi karena medan magnet mampu membantu partikel  $O_2$  dan partikel  $H_2O$  masuk melintasi *droplet* seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Masuknya  $O_2$  dan  $H_2O$  melintasi *droplet* tersebut mengakibatkan tumbukan partikel bahan bakar semakin besar sehingga ikatan molekul bahan bakar menjadi lemah. Melemahnya ikatan molekul yang ada pada bahan bakar tersebut akan memperlebar jarak antar molekul sehingga mempermudah  $O_2$  masuk yang mengakibatkan reaksi antara bahan bakar dan  $O_2$  menjadi lebih cepat. Selain itu medan magnet juga mampu menurunkan viskositas bahan bakar dan tegangan permukaan (Oommen et al., 2019). Viskositas bahan bakar yang menurun membuat molekul lebih bebas bergerak sehingga proses nukleasi yang terjadi pada *droplet* menjadi

lebih cepat. Nukleasi pada pembakaran *droplet* terjadi ketika bahan bakar mencapai temperatur *superheated* menyebabkan gelembung terbentuk pada bagian dalam *droplet* (Ibadurrohman et al., 2021). Hal ini mengakibatkan terjadinya ledakan mikro sehingga terjadi *secondary atomisation* yang membuat proses pembakaran terjadi akan lebih cepat.



Gambar 5. Ignition delay time CCIO terhadap variasi orientasi medan magnet dan tanpa magnet



Gambar 6. Temperatur CCIO terhadap waktu pembakaran pada variasi orientasi medan magnet dan tanpa magnet

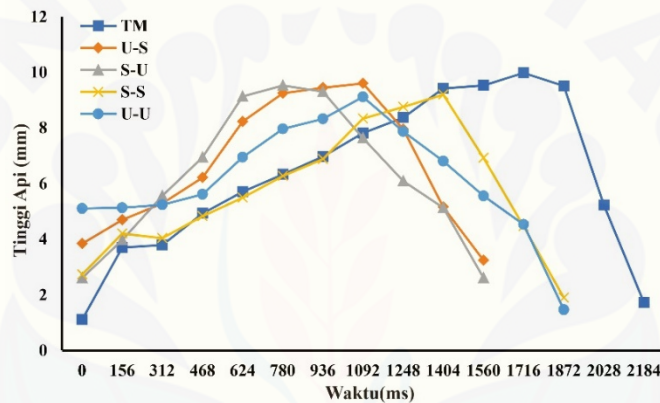
### 3.4 Temperatur minyak nabati pada orientasi medan magnet

Dengan ditambah medan magnet tren temperatur yang dihasilkan juga mengalami peningkatan baik pada medan magnet tarik maupun tolak. Gambar 6 menunjukkan peningkatan temperatur paling signifikan terjadi pada arah medan magnet U-S yang mencapai 71,74 °C lebih tinggi. Tetapi pada medan magnet S-S peningkatan temperatur yang terjadi tidak terlalu signifikan. Hal ini terjadi karena pada arah medan magnet S-S partikel H<sub>2</sub>O sebagai sumber panas bergerak keluar dari nyala api. Keluarnya partikel H<sub>2</sub>O pada saat proses pembakaran tersebut mengakibatkan panas nyala api yang terjadi tidak maksimal. Namun, pada arah medan magnet U-S terjadi peningkatan putaran spin elektron dan spin hydrogen yang disebabkan oleh orientasi magnet global. Hal ini dikarenakan bumi memiliki medan magnet dinamik sehingga kutub utara medan magnet bumi mudah bergeser (Perdana et al., 2020). Pergeseran magnet bumi tersebut mengakibatkan terjadi ketidakstabilan medan magnet sehingga menyebabkan putaran spin elektron dan spin hidrogen berbeda dari para menjadi

orto. Hal ini juga berdampak pada reaksi pembakaran yang terjadi karena kecepatan spin elektron yang tinggi akan berdampak pada reaksi tumbukan antar molekul yang terjadi sehingga temperatur yang dihasilkan nyala api juga semakin maksimal.

### 3.5 Tinggi nyala api

Pada saat pembakaran droplet berlangsung ditambah medan magnet, terjadi penurunan tinggi nyala api pada setiap variasi arah medan magnet yang diuji. Jika dilihat pada Gambar 7, dampak semakin pendeknya nyala api ketika ditambah medan magnet terjadi pada arah magnet U-U dan S-S. Ini terjadi karena pada medan magnet U-U dan S-S elektron bergerak lebih selaras yang mengakibatkan terjadinya penurunan ledakan mikro yang terjadi. Selain itu, reaksi tumbukan antar molekul juga relatif kecil karena adanya molekul yang bergerak keluar dari nyala api. Tetapi terjadi peningkatan pergerakan elektron menjadi lebih cepat sehingga pembakaran yang dihasilkan juga lebih baik jika dibandingkan dengan tanpa magnet.



**Gambar 7.** Tinggi nyala api CCIO terhadap waktu pembakaran pada variasi orientasi medan magnet dan tanpa magnet

### 4. Simpulan

Telah dilakukan penelitian tentang karakteristik pembakaran droplet pada minyak nabati dengan variasi orientasi medan magnet. Medan magnet berperan meningkatkan kualitas pembakaran melalui perannya meningkatkan tumbukan antar molekul. Pengaruh tersebut dapat dilihat pada arah medan magnet U-S yang menghasilkan temperatur paling tinggi dan *ignition delay time* yang pendek. Ini karena arah kutub magnet berperan sebagai *transport* O<sub>2</sub> dan panas yang dibawa H<sub>2</sub>O melintasi droplet sehingga reaksi yang dihasilkan mampu meningkatkan kualitas pembakaran.

### 5. Referensi

Bautista, L. F., Vicente, G., Rodríguez, R., & Pacheco, M. (2009). Optimisation of FAME production from waste cooking oil for biodiesel use. *Biomass and Bioenergy*, 33(5). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.01.009>

Belagur, V. K., & Chitimi, V. R. (2013). Few physical, chemical and fuel related properties of calophyllum inophyllum linn (honne) oil and its blends with diesel fuel for their use in diesel engine. *Fuel*, 109, 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.015>



- Blauensteiner, H., & Gruber, G. (2009). Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Survey on Oil Quality. *2ndVegOil: Publishable Final Project Report*, 22. [http://workspace.bananahill.net/library/Biofuel/2009\\_Blauensteiner\\_H\\_and\\_Gruber\\_G\\_2nd\\_Gen\\_Veg\\_Oil\\_Qual.pdf](http://workspace.bananahill.net/library/Biofuel/2009_Blauensteiner_H_and_Gruber_G_2nd_Gen_Veg_Oil_Qual.pdf)
- Blin, J., Brunschwig, C., Chapuis, A., Changotade, O., Sidibe, S. S., Noumi, E. S., & Girard, P. (2013). Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines - Towards specifications for a standard in West Africa. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 22). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.018>
- El Fatih, F. A., & Saber, G. M. (2010). Effect of fuel magnetism on engine performance and emissions. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(12), 6354–6358.
- Escobar, J. C., Lora, E. S., Venturini, O. J., Yáñez, E. E., Castillo, E. F., & Almazan, O. (2009). Biofuels: Environment, technology and food security. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Issues 6–7). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.014>
- Ettl, J., Bernhardt, H., Thuneke, K., Emberger, P., & Remmele, E. (2016). Transient emission and fuel consumption measurements on plant oil tractors. *Landtechnik*, 71(2), 44–54. <https://doi.org/10.1515/lt.2016.3121>
- Faris, A. S., Al-Naseri, S. K., Jamal, N., Isse, R., Abed, M., Fouad, Z., Kazim, A., Reheem, N., Chalooob, A., Mohammad, H., Jasim, H., Sadeq, J., Salim, A., & Abas, A. (2012). Effects of magnetic field on fuel consumption and exhaust emissions in two-stroke engine. *Energy Procedia*, 18, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.044>
- Hayakawa, M., Vialetto, J., Anyfantakis, M., Takinoue, M., Rudiuk, S., Morel, M., & Baigl, D. (2019). Effect of moderate magnetic fields on the surface tension of aqueous liquids: A reliable assessment. *RSC Advances*, 9(18). <https://doi.org/10.1039/c9ra00849g>
- Hellier, P., Ladommatos, N., & Yusaf, T. (2015). The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. *Fuel*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.021>
- Hoxie, A., Schoo, R., & Braden, J. (2014). Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets. *Fuel*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.036>
- Ibadurrohman, I. A., Hamidi, N., & Yuliati, L. (2021). Pengaruh Panjang Rantai Karbon dan Derajat Ketidakjenuhan terhadap Karakteristik Pembakaran Droplet Asam Lemak Tunggal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(2), 331–347. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.02.11>
- Jain, S. (2012). Experimental Investigation of Magnetic Fuel Conditioner (M.F.C) in I.C. engine. *IOSR Journal of Engineering*, 02(07), 27–31. <https://doi.org/10.9790/3021-02712731>
- Khedvan, A. V. G. (2015). Review on Effect of Magnetic Field on Hydrocarbon Refrigerant in Vapor Compression Cycle. *Internatioal Journal of Scientific Engineering and Technology*, 04(07), 1374–1378.
- Leevijit, T., Prateepchaikul, G., Maliwan, K., Mompiboon, P., Okaew, S., & Eiadtrong, S. (2016). Production, properties, and utilization of degummed/esterified mixed crude palm oil-diesel blends in an automotive engine without preheating. *Fuel*, 182, 509–516. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.007>

- Liu, Y., Tu, Q., Knothe, G., & Lu, M. (2017). Direct transesterification of spent coffee grounds for biodiesel production. *Fuel*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.094>
- Marlina, E., Wijayanti, W., Yuliati, L., & Wardana, I. N. G. (2020). The role of pole and molecular geometry of fatty acids in vegetable oils droplet on ignition and boiling characteristics. *Renewable Energy*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.064>
- Misra, R. D., & Murthy, M. S. (2010). Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine - A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.010>
- Nanlohy, H. Y., Wardana, I. N. G., Hamidi, N., Yuliati, L., & Ueda, T. (2018). The effect of Rh<sub>3</sub><sup>+</sup> catalyst on the combustion characteristics of crude vegetable oil droplets. *Fuel*, 220, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.001>
- Natarajan, R., Karthikeyan, N. S., Agarwaal, A., & Sathiyarayanan, K. (2008). Use of vegetable oil as fuel to improve the efficiency of cooking stove. *Renewable Energy*, 33(11), 2423–2427. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.022>
- Niaki, S. R. A., Zadeh, F. G., Niaki, S. B. A., Mouallem, J., & Mahdavi, S. (2020). Experimental investigation of effects of magnetic field on performance, combustion, and emission characteristics of a spark ignition engine. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 39(2). <https://doi.org/10.1002/ep.13317>
- Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 37, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>
- Ogden, J. M., Steinbugler, M. M., & Kreutz, T. G. (1999). Comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development. *Journal of Power Sources*, 79(2). [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00057-9)
- Okoronkwo, Nwachukwu, Ngozi–Olehi, & Igbokwe. (2010). The effect of electromagnetic flux density on the ionization and the combustion of fuel (An economy design project). *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 1(3), 527–531. <https://doi.org/10.5251/ajsir.2010.1.3.527.531>
- Oommen, Libin P., & Kumar, G. N. (2020). Influence of Magneto-combustion on regulated emissions of an automotive engine under variable speed operation. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 12(1), 109–112. <https://doi.org/10.4273/ijvss.12.1.25>
- Oommen, Libin P., & N, K. G. (2019). A Study on the Effect of Magnetic Field on the Properties and Combustion of Hydrocarbon Fuels. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(3), 89–98. <https://doi.org/10.24247/ijmperdjun20199>
- Oommen, Libin Panavelil, Narayanappa, K. G., & Vijayalakshmi, S. K. (2020). Experimental Analysis of Synergetic Effect of Part-Cooled Exhaust Gas Recirculation on Magnetic Field-Assisted Combustion of Liquefied Petroleum Gas. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(11). <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04696-z>
- Perdana, D., Yuliati, L., Hamidi, N., & Wardana, I. N. G. (2020). The Role of Magnetic Field Orientation in Vegetable Oil Premixed Combustion. *Journal of Combustion*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/2145353>

- Soebiyakto, G., Wardana, I. N. G., Hamidi, N., & Yuliati, L. (2020a). Addition of bio-additive as a catalyst of burning vegetable oil influenced by 4 pole magnetic field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(6–104). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198308>
- Soebiyakto, G., Wardana, I. N. G., Hamidi, N., & Yuliati, L. (2020b). Premixed Combustion of Vegetable Oil in a Cylinder with 4 Magnetic Poles. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 55(3). <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.55.3.48>
- Thunyaratchatanon, C., Luengnaruemitchai, A., Chollacoop, N., & Yoshimura, Y. (2016). Catalytic upgrading of soybean oil methyl esters by partial hydrogenation using Pd catalysts. *Fuel*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.026>
- Tipole, P., Karthikeyan, A., Bhojwani, V., Deshmukh, S., Babar, H., & Tipole, B. (2022). Examining the impact of magnetic field on fuel economy and emission reduction in I.C. engines. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1). <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1667434>
- Ulfiana, A., Nufus, T. H., Ridwan, E., Ekayuliana, A., Slamet Abadi, C., Apriana, A., & Susanto, I. (2021). A Study Of Bioethanol fuel Characteristics In the Combustion Chamber of Gasoline Engine Using magnetization Technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224235>
- Zhang, Z., & Wei, Z. (2021). Experiment and simulation of the effects of non-uniform magnetic field on the regression rate of PMMA. *Combustion and Flame*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.003>