

Peran Minyak Kayu Putih Terhadap Karakteristik Pembakaran Minyak Kapuk Sebagai Bahan Bakar Alternatif

Helen Riupassa^{1*}

¹Universitas Sains Dan Teknologi Jayapura, Jayapura 99351, Indonesia

*Email: helenriu01@gmail.com

ABSTRACT

The study conducted experimental investigations on the burning rate of crude kapuk oil droplets by incorporating bio-additives derived from eucalyptus oil. The bio-additive concentration of eucalyptus oil added to the kapuk oil was 100 ppm and 300 ppm, respectively. The droplet combustion method was chosen to maximize the contact area between the air and fuel, thereby enhancing the reactivity of fuel molecules. The findings revealed that the cineol compounds present in eucalyptus oil exhibit aromatic properties and possess an asymmetrical carbon chain geometry. This characteristic has the potential to facilitate effective collisions among fuel molecules, thereby promoting combustion. This was evident from the observed increase in the burning rate. Furthermore, the observations indicated that the highest burning rate was achieved when both bio-additives were 300 ppm. These results highlight the positive impact of incorporating eucalyptus oil as a bio-additive in crude kapuk oil. The aromatic nature and unique geometric structure of cineol compounds contribute to the fuel's increased reactivity and enhanced combustion performance. By utilizing bio-additives, such as eucalyptus oil, at an optimal concentration, it is possible to further improve kapuk oil's burning characteristics and overall performance as a biofuel. These findings provide valuable insights into the development of more efficient and sustainable alternative energy sources. By understanding the molecular aspects and effects of bio-additives, researchers can continue to explore and optimize the utilization of biofuels, such as crude kapuk oil, for a greener and more environmentally friendly energy future.

Keywords: Cineole compound; crude kapuk oil; droplet combustion

PENDAHULUAN

Pentingnya sumber energi alternatif untuk mengatasi krisis energi bahan bakar yang semakin meningkat akibat pertumbuhan industri dan pertumbuhan penduduk telah mendorong pengembangan bahan bakar alternatif, terutama yang berasal dari minyak nabati murni [1]. Minyak nabati murni memiliki senyawa yang multi komponen dan peran dan efek yang berbeda dalam proses pembakaran. Salah satu masalah yang timbul dari bahan bakar minyak nabati adalah viskositasnya yang tinggi sehingga sulit terbakar [2], [3]. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian dan modifikasi peralatan, serta rekayasa bahan bakar untuk memungkinkan pembakaran minyak nabati yang efisien. Selain itu, faktor lain yang mempengaruhi pembakaran minyak nabati adalah proses atomisasi, interaksi minyak dengan api, aliran konvektif, kondisi gravitasi, dan komposisi molekul bahan bakar [4].

Penelitian sebelumnya telah menggunakan metode pembakaran single droplet dengan berbagai jenis minyak nabati, antara lain; minyak kapuk, minyak jarak, minyak bunga matahari, minyak jagung, minyak kelapa sawit, minyak kedelai, dan gliserol [5]–[8]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa minyak nabati terdiri dari dua senyawa rantai karbon, yaitu, asam lemak dan gliserol. Kedua senyawa ini terbakar pada waktu yang berbeda, di mana asam lemak terbakar lebih dulu, dan diikuti oleh gliserol. Selain itu, hasil penelitian juga mendapatkan bahwa minyak nabati murni memiliki *ignition delay* yang lebih lama, sehingga laju pembakarannya lebih lambat dan *burning life timenya* lebih lama. Oleh karena itu, salah satu solusi yang dapat digunakan adalah dengan menambahkan bio-aditif seperti minyak kayu putih untuk mengatasi kelemahan dan keterbatasan tersebut.

Di sisi lain, penelitian tentang pemanfaatan bioaditif telah banyak dilakukan, namun masih ada keterbatasannya, terutama dalam mengungkap informasi ilmiah tentang peran senyawa aditif dalam minyak nabati dari perspektif molekuler dan pengaruhnya terhadap kinerja bahan bakar.

Minyak kayu putih mengandung senyawa sineol yang bersifat aromatik dengan struktur geometris yang tidak simetris, dan disertai dengan keberadaan cincin aromatik yang berpotensi meningkatkan reaktivitas molekul bahan bakar. Rantai karbon dalam molekul bahan bakar memiliki struktur cincin planar yang terkonjugasi dengan elektron π yang terdelokalisasi sehingga berpotensi menciptakan induksi medan magnet (lihat Gambar 1). Medan magnet ini dapat menghasilkan interaksi tarik menarik antara molekul bahan bakar sehingga dapat mengubah struktur geometris senyawa di sekitarnya. Hal ini menyebabkan reaktivitas molekul bahan bakar meningkat dan menjadi lebih mudah terbakar. Selain itu, jarak antara rantai karbon bertambah besar sehingga ikatan van der Waals antar molekul-molekul bahan bakar melemah dan menyebabkan viskositasnya menurun [9]–[11].

Penelitian ini menggunakan minyak kapuk mentah yang dicampur dengan minyak kayu putih sebagai bio-additif. Selain itu, penggunaan minyak kapuk mentah yang tidak melalui proses tranesterifikasi dipilih karena ketersediaannya yang mudah diperoleh, meskipun memiliki kelemahan karena terdiri dari rantai karbon asam lemak jenuh. Asam lemak jenuh cenderung kaku sehingga menghasilkan viskositas dan titik nyala minyak yang lebih tinggi, dan hal ini berpotensi menghambat dan menurunkan kinerja bahan bakar.

Selain itu, penambahan bio-additive minyak kayu putih diharapkan dapat membantu meningkatkan kinerja minyak kapuk mentah sebagai bahan bakar. Dengan memahami peran senyawa sineol yang bersifat aromatik dalam meningkatkan reaktivitas dan menurunkan viskositas minyak nabati, maka diharapkan dapat dikembangkan menjadi sebuah solusi yang lebih efektif untuk mengoptimalkan penggunaan *biofuel* sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

MATERIAL DAN METODE

Metode eksperimen yang digunakan dalam penelitian difokuskan pada proses pengamatan dan eksplorasi terhadap karakteristik pembakaran bahan bakar melalui fenomena *single droplet* [12], [13]. Gambar 2 menunjukkan skema penelitiannya, di mana droplet digantungkan pada ujung termokopel dan dinyalakan menggunakan pemanas koil listrik. Metode pembakaran droplet dipilih karena sederhana dan mudah dilakukan, selain itu tidak memerlukan biaya yang besar.

Bahan baku yang digunakan adalah minyak kapuk mentah (*crude kapok oil (CKO)*), dan bioaditifnya adalah minyak kayu putih (*Eucalyptus oil (EO)*). Bahan baku minyak kapuk diperoleh dari pasar tradisional dan dicampur dengan bio-additif minyak kayu putih secara manual dengan perbandingan komposisi 100 ml : 100 ppm dan 300 ppm. Pencampuran minyak kapuk mentah dan bioaditif secara manual bertujuan untuk memotong rantai produksi seperti proses tranesterifikasi untuk menghemat proses konversi minyak nabati menjadi bahan bakar. Selanjutnya untuk mengetahui komposisi senyawa penyusun CKO dan EO dilakukan pengujian GCMS yang hasilnya disajikan pada Tabel 1 dan 2.

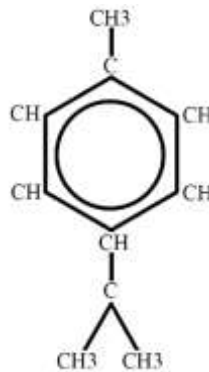
Table 1. Komposisi asam lemak minyak kapuk

| Asam lemak | Komposisi % |
|------------|-------------|
| Kaproik | 0.6 |
| Kaprilik | 8.45 |
| Kaprik | 6.1 |
| Laurik | 31.43 |
| Miristik | 18.45 |
| Palmitik | 8.4 |
| Sterik | 1.65 |
| Oleik | 5.7 |
| Linolenik | 0.05 |

Table 2. Komposisi kimia minyak kayu putih

| Rantai karbon | Rumus kimia | Komposisi % |
|-----------------------|-----------------|-------------|
| 1,8-Sineole | $C_{10}H_{18}O$ | 65.94 |
| γ -Terpena | $C_{10}H_{16}$ | 7.37 |
| Trans-Karyopilen | $C_{15}H_{24}$ | 6.31 |
| α -Terpinolena | $C_{10}H_{16}$ | 5.9 |
| 3-Cycloheksana | $C_{10}H_{18}$ | 5.85 |
| α -Humulena | $C_{15}H_{24}$ | 4.11 |
| Linalool | $C_{10}H_{18}$ | 2.57 |
| α -Eudesmal | $C_{15}H_{26}$ | 1.95 |

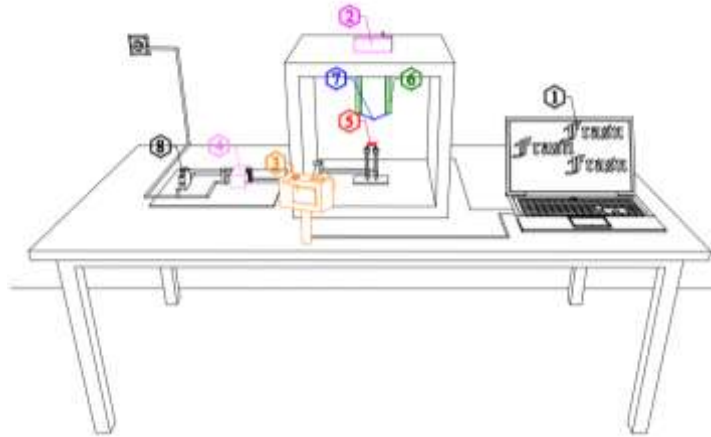
Selain komposisi senyawa multi komponen yang dimiliki bahan bakar CKO dan bio-aditif EO. Dari Gambar 1 juga dapat dilihat bahwa potensi terjadinya gaya tarik-menarik dan induksi magnet antar atom akan semakin meningkat dengan lintasan delokalisasi elektron yang terdapat pada senyawa sineol.



Gambar. 1. Struktur molekul dan delokalisasi elektron senyawa sineol

Selain itu, berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, maka dapat dikembangkan sebuah analisis dan hipotesis bahwa ikatan rangkap pada senyawa sineol berpotensi menyebabkan delokalisasi elektron, meningkatkan gaya tarik menarik antar atom, dan mengakibatkan ketidakseimbangan energi ikatan pada molekul-molekul bahan bakar [14]. Selain itu, dampak dari ketidakseimbangan ini adalah munculnya resonansi atom dan meningkatnya reaktivitas molekul bahan bakar. Faktor-faktor tersebut dapat mengubah dan melemahkan struktur geometri rantai karbon CKO sehingga bahan bakar mudah terbakar.

Di lain pihak, diperlukan penyederhanaan untuk memahami perilaku dan kompleksitas nyala api yang terjadi saat proses pembakaran di ruang bakar, maka oleh karena itu, untuk membuktikan hipotesis yang telah dijelaskan sebelumnya tentang pengaruh bio-aditif terhadap karakteristik pembakaran CKO; maka pengamatan dilakukan terhadap fenomena dan karakteristik pembakaran bahan bakar pada droplet, dan metode pembakaran bahan bakar droplet didasarkan pada penelitian sebelumnya, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2 [15].

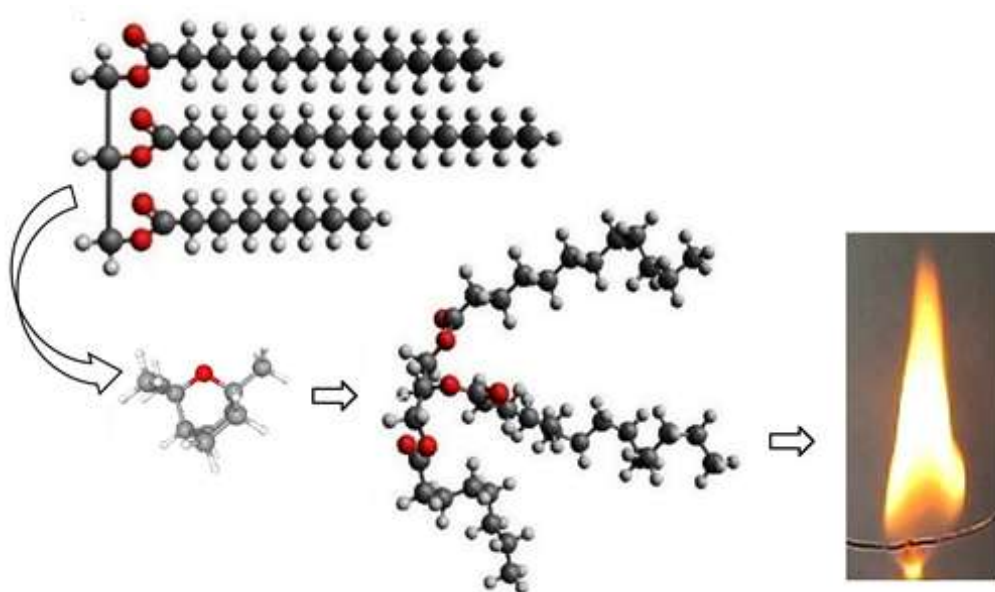


Gambar 2. Skema penelitian

1. Laptop
2. Data logger
3. Kamera
4. Trafo 5A (12 V)
5. Kawat Ni-Cr (diameter 0,90 mm)
6. Termokopel
7. Droplet
8. Pemuats arus (MCB)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan karakteristik laju difusi-pembakaran minyak kapuk mentah dengan penambahan minyak kayu putih yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh senyawa aromatik sineol terhadap kinerja bahan bakar telah dilakukan. Gambar 3 menunjukkan gambaran tentang interaksi molekuler antara senyawa sineol dengan rantai karbon trigliserida CKO. Terlihat bahwa senyawa aromatik pada minyak kayu putih memiliki peran dan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik pembakaran bahan bakar CKO.



Gambar 3. Interaksi molekuler antara trigliserida minyak kapuk mentah dengan sineol

Selain itu, Gambar 3 juga menunjukkan bahwa gugus hidroksil pada senyawa sineol dapat menghasilkan interaksi tarik menarik dengan atom oksigen pada rantai karbon trigliserida CKO, di mana atom oksigen bersifat terisolasi dan nonpolar. Analisis ini sangat masuk akal karena Tabel 2 menunjukkan bahwa sebagian besar komposisi minyak kayu putih terdiri atas sineol yaitu sebesar 65,94 %. Terbentuknya molekul H₂O berpotensi menimbulkan proses transesterifikasi alami sehingga gugus karboksil pada rantai karbon trigliserida CKO putus dan terpisah dari asam lemak. Analisis ini sesuai dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan droplet minyak jarak dan minyak sawit mentah tanpa aditif namun mengalami proses pemanasan awal dan penambahan medan magnet [16] untuk menghasilkan uap panas berupa molekul H₂O, yang berperan dalam pemecahan gugus karboksil dari asam lemak sehingga meningkatkan reaktivitas molekul bahan bakar.

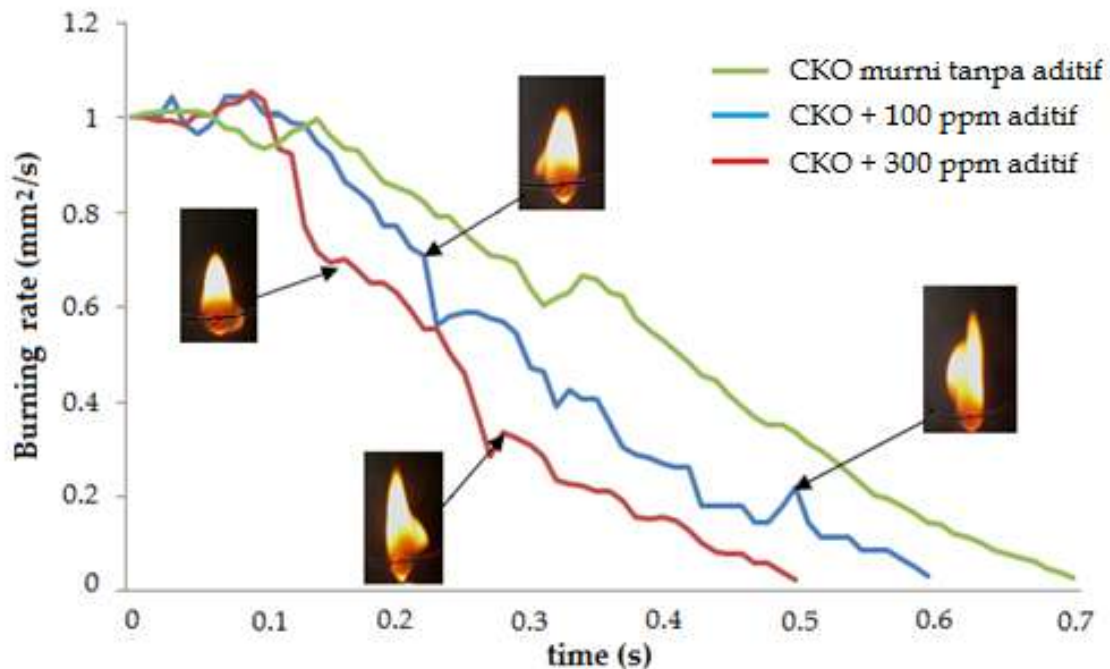
Di sisi lain, dengan adanya senyawa sineol maka berpotensi menghasilkan ikatan baru yang dapat meningkatkan jumlah massa dan panjang rantai karbon CKO. Hal ini dapat menyebabkan jarak antar molekul bahan bakar menjadi lebih dekat, sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan efektif sangat besar. Fenomena ini dapat meningkatkan reaktivitas molekul bahan bakar sehingga bahan bakarnya mudah terbakar dan laju difusi pembakaran meningkat. Analisis ini sangat beralasan karena terkonfirmasi dan diperkuat dengan hasil pengujian yang dapat dilihat pada Gambar 4. Di mana dari Gambar 4 terlihat bahwa, penambahan minyak kayu putih sebagai bio-aditif bahan bakar CKO berdampak signifikan terhadap laju pembakaran. Dari hasil pengamatan terlihat bahwa *burning life time* tercepat dicapai ketika campuran bahan bakar CKO mengandung 300 ppm minyak kayu putih, dan selanjutnya diikuti oleh 100 ppm minyak kayu putih, dan yang terendah dicapai oleh bahan bakar CKO murni tanpa bio-additive. Hasil ini menunjukkan bahwa minyak kayu putih sebagai bio-aditif terbukti sangat efektif untuk meningkatkan kinerja bahan bakar, di mana hal ini terklarifikasi dengan adanya peningkatan terhadap laju pembakaran bahan bakar.

Selain itu, kehadiran gugus hidroksil dalam senyawa sineol juga memiliki peran yang signifikan terhadap kinerja bahan bakar. Gugus hidroksil yang terdiri dari atom hidrogen yang terikat pada atom oksigen (-OH), memainkan peran penting dalam interaksi molekuler. Gugus hidroksil yang ada pada senyawa sineol berinteraksi dengan atom oksigen pada gugus karboksil CKO dalam bahan bakar, dan menghasilkan pembentukan ikatan van der Waals yang lemah antara molekul-molekul bahan bakar. Ikatan ini memiliki kekuatan yang relatif rendah dibandingkan dengan ikatan kovalen, namun dapat memberikan kontribusi penting terhadap reaktivitas molekul bahan bakar.

Kelemahan ikatan van der Waals ini mempengaruhi karakteristik reaksi pembakaran, di mana molekul bahan bakar dengan ikatan van der Waals yang lemah menjadi lebih reaktif dan mudah putus, sehingga meningkatkan laju pembakaran.

Selain itu, dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa adanya peningkatan energi sesaat setelah terjadi pembakaran, di mana fenomena ini menunjukkan bahwa adanya peningkatan laju pembakaran, dan hal unik yang muncul adalah, lonjakan energi ini terjadi tanpa disertai ledakan mikro. Akan tetapi, untuk bahan bakar CKO dengan bio-aditif, lonjakan energi terjadi lebih cepat, yaitu sekitar 0,1 detik, dan sebaliknya, CKO tanpa bio-aditif menunjukkan lonjakan yang lebih lambat, yaitu sekitar 0,15 detik.

Secara keseluruhan, terlihat jelas bahwa laju pembakaran ketiga bahan bakar sesuai dengan volatilitasnya yang tinggi, di mana terbukti oleh garis grafik laju pembakaran yang berfluktuasi. Selain itu, adanya ledakan mikro dalam bahan bakar CKO yang ditambahkan bio-aditif terjadi pada waktu dan kecepatan penyalaan yang berbeda, sehingga semakin mengkonfirmasi hasil dan fenomena ini.



Gambar 4. Evolusi pembakaran CKO

Selain itu, bentuk api yang asimetris menunjukkan adanya fenomena ledakan mikro, di mana hal ini menunjukkan besarnya reaktivitas molekul bahan bakar [17]. Salah satu faktor penyebabnya adalah adanya penambahan bio-aditif ke dalam CKO yang berpotensi meningkatkan tumbukan efektif antara molekul bahan bakar melalui peningkatan jumlah massa, makin panjangnya rantai karbon, dan jarak antar molekul yang makin dekat. Analisis ini didasarkan pada penelitian sebelumnya yang menggunakan bahan bakar minyak tanah, minyak kapuk dengan ekstrak pinang, dan logam cair [18]. Penelitian sebelumnya juga mendapatkan bahwa ledakan mikro sangat berhubungan dengan volatilitas yang dihasilkan dari adanya pergerakan partikel satelit [19].

Di lain pihak, senyawa sineol juga memainkan peran yang berbeda dalam mempengaruhi kinerja bahan bakar, di mana jika dilihat dari struktur senyawa sineol dan komposisi molekulnya (lihat Tabel 1 dan Tabel 2) terlihat bahwa sebagian besar senyawa asam lemak dalam CKO dan EO bersifat stabil dan jenuh. Analisis ini didukung oleh besarnya potensi interaksi asam lemak sineol dan CKO yang menghasilkan induksi medan magnet atau adanya induksi akibat gaya elektromagnetik. Gaya-gaya ini menciptakan hubungan tarik menarik dan tolak menolak antar molekul-molekul bahan bakar, di mana mengakibatkan struktur geometris rantai karbon CKO berubah. Proses ini mengarah pada adanya pembentukan sebuah geometri rantai karbon baru, di mana senyawa sineol berhasil menyusup di antara rantai karbon trigliserida CKO sehingga memperbesar atau memperlebar jarak antara rantai karbon asam lemak.

Selain itu, karena jarak antara rantai karbon bertambah besar dan melemahnya gaya ikatan van der Waals antar rantai karbon maka viskositas menurun, maka mengakibatkan bahan bakar terbakar dengan lebih cepat, dan meningkatkan laju pembakaran [9]. Fenomena ini terklarifikasi dari data dan hasil uji pembakaran dan konsisten dengan penelitian kami sebelumnya yang menggunakan kombinasi minyak kelapa mentah dengan penambahan katalis cair [20].

Selain itu, secara umum dapat dilihat bahwa untuk CKO dengan aditif, peningkatan laju pembakaran terjadi pada waktu yang berbeda. Fenomena ini muncul karena komposisi bahan bakar yang terdiri dari senyawa yang multikomponen (lihat Tabel 1 dan 2) memiliki sifat dan titik nyala yang berbeda. Analisis ini sangat masuk akal karena sesuai dengan penelitian sebelumnya [9] tentang pengaruh penggunaan bio-aditif pada pembakaran minyak nabati mentah, yang dibahas dengan perspektif yang berbeda.

Selain itu, dari hasil analisis dan pengamatan menunjukkan bahwa dengan adanya senyawa sineol maka molekul-molekul bahan bakar memiliki jarak tumbukan yang efektif, yang secara signifikan berkontribusi terhadap interaksi antar molekuler dan reaktivitas molekul-molekul bahan

bakar. Di mana, senyawa sineol terbukti berperan melemahkan gaya van der Waals antara rantai karbon dan antar molekul bahan bakar, sehingga mempengaruhi kekuatan ikatan antarmolekul dan jarak tumbukan efektif selama proses pembakaran bahan bakar.

Di sisi lain, adanya peningkatan laju reaksi pembakaran akibat kehadiran sineol berpotensi memberikan manfaat yang signifikan di mana efisiensi pembakaran menjadi yang lebih tinggi. Selain itu, dengan meningkatnya laju pembakaran, maka lebih banyak energi yang dihasilkan dalam waktu yang lebih singkat, mengoptimalkan penggunaan bahan bakar dan mengurangi polusi yang dihasilkan. Efisiensi yang lebih tinggi juga menggambarkan bahwa adanya potensi terhadap penggunaan bahan bakar yang lebih efisien jika diaplikasikan pada kendaraan atau mesin, hal ini menunjukkan bahwa penggunaan minyak kapuk mentah dengan penambahan aditif minyak kayu putih memiliki peluang besar digunakan sebagai bahan bakar alternatif sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan bahan bakar konvensional seperti solar.



Gambar 5. Evolusi api CKO tanpa bioaditif



Gambar 6. Evolusi api CKO dengan penambahan 100 ppm bioaditif



Gambar 7. Evolusi api CKO dengan penambahan 300 ppm aditif

Selain itu, dari hasil analisis diperoleh juga bahwa pengaruh jarak tumbukan dan interaksi antar molekul bahan bakar yang dipengaruhi oleh keberadaan senyawa sineol dapat memiliki efek yang signifikan pada pembakaran seperti yang terlihat pada evolusi api dari Gambar 5 sampai Gambar 7. Jarak tumbukan antar molekul bahan bakar yang optimal adalah faktor penting dalam menentukan efisiensi dan laju pembakaran. Interaksi antar molekul bahan bakar yang terjadi dengan efektif memastikan bahwa reaksi pembakaran dapat berjalan secara efisien dan menghasilkan energi yang baik. Akan tetapi, jika interaksi antar molekul bahan bakar terganggu atau terhambat oleh kehadiran senyawa sineol, maka hal ini dapat mengurangi efisiensi pembakaran dan menghasilkan produk samping yang tidak diinginkan yaitu Karbon monoksida (CO) yang beracun.

Fenomena ini menunjukkan bahwa dalam mengoptimalkan kinerja bahan bakar, maka pemahaman yang mendalam tentang peran bioaditif seperti sineol sangatlah penting, di mana

dengan memahami peran dan pengaruh dari senyawa sineol, maka formulasi bahan bakar dapat dioptimalkan dengan menyesuaikan komposisi dan volume bioaditif yang tepat pada campuran abhan bakar.

KESIMPULAN

Penyelidikan terhadap karakteristik laju pembakaran CKO dengan penambahan bio-aditif minyak kayu putih telah dilakukan dan menghasilkan beberapa temuan ilmiah yang signifikan, antara lain; sifat aromatik yang terdapat pada senyawa sineol minyak kayu putih terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja bahan bakar CKO. Di mana, senyawa sineol berperan dalam meningkatkan jarak efektif antar molekul bahan bakar, meskipun minyak kapuk bersifat jenuh dan kaku, namun senyawa sineol berhasil melemahkan ikatan van der Waals antar rantai karbon. Peran ini efektif dalam meningkatkan reaktivitas molekul bahan bakar sehingga kinerja laju pembakaran yang lebih baik dari CKO tanpa bioaditif minyak kayu putih

Selain itu, dengan proses pencampuran bahan bakar minyak kapuk dan bioaditif minyak kayu putih secara manual, dan dengan meniadakan proses transesterifikasi dan pemanasan awal, maka penggunaan minyak kayu putih sebagai bio-aditif berpeluang besar untuk menghemat energi dan biaya produksi bahan bakar sehingga berpotensi besar untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Aktar, M. M. Alam, and A. Q. Al-Amin, "Global economic crisis, energy use, CO2 emissions, and policy roadmap amid COVID-19," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 26, pp. 770–781, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2020.12.029.
- [2] H. Y. Nanlohy, "Comparative Studies on Combustion Characteristics of Blended Crude Jatropa Oil with Magnetic Liquid Catalyst and DEX under Normal Gravity Condition," *J. Mech. Eng. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 79–88, 2021, doi: 10.17977/um016v5i22021p079.
- [3] Wardoyo, A. S. Widodo, W. Wijayanti, and I. N. G. Wardana, "The Role of Areca catechu Extract on Decreasing Viscosity of Vegetable Oils," *Sci. World J.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/8827427.
- [4] J. Wang, X. Wang, H. Chen, Z. Jin, and K. Xiang, "Experimental study on puffing and evaporation characteristics of jatropa straight vegetable oil (SVO) droplets," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 119, pp. 392–399, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.130.
- [5] H. Y. Nanlohy, I. N. G. Wardana, N. Hamidi, L. Yuliati, and T. Ueda, "The effect of Rh3+ catalyst on the combustion characteristics of crude vegetable oil droplets," *Fuel*, vol. 220, no. December 2017, pp. 220–232, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.02.001.
- [6] R. Kale and R. Banerjee, "Understanding spray and atomization characteristics of butanol isomers and isoctane under engine like hot injector body conditions," *Fuel*, vol. 237, pp. 191–201, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.FUEL.2018.09.142.
- [7] Á. Muelas, P. Remacha, and J. Ballester, "Droplet combustion and sooting characteristics of UCO biodiesel, heating oil and their mixtures under realistic conditions," *Combust. Flame*, vol. 203, pp. 190–203, May 2019, doi: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2019.02.014.
- [8] H. Y. Nanlohy, I. N. G. Wardana, M. Yamaguchi, and T. Ueda, "The role of rhodium sulfate on the bond angles of triglyceride molecules and their effect on the combustion characteristics of crude jatropa oil droplets," *Fuel*, vol. 279, p. 118373, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.118373.
- [9] C. C. Lee, M. V. Tran, B. T. Tan, G. Scribano, and C. T. Chong, "A comprehensive review on the effects of additives on fundamental combustion characteristics and pollutant formation of biodiesel and ethanol," *Fuel*, vol. 288, no. September, p. 119749, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119749.
- [10] H. Riupassa, S. Suyatno, and H. Y. Nanlohy, "Identifying the Effect of Aromatic Compounds on the Combustion Characteristics of Crude Coconut Oil Droplet," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 2, no. 6–122, pp. 6–14, 2023, doi: 10.15587/1729-

- 4061.2023.272289.
- [11] Á. Muelas, P. Remacha, and J. Ballester, "Droplet combustion and sooting characteristics of UCO biodiesel, heating oil and their mixtures under realistic conditions," *Combust. Flame*, vol. 203, pp. 190–203, 2019, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.02.014.
- [12] H. Y. Nanlohy and H. Riupassa, "An Experimental Study on the Ignition Behavior of Blended Fuels Droplets with Crude Coconut Oil and Liquid Metal Catalyst," *Automot. Exp.*, vol. 3, no. 2, pp. 39–45, 2020, [Online]. Available: <https://journal.unimma.ac.id/index.php/AutomotiveExperiences/article/view/3481>.
- [13] Y. Xu, I. Keresztes, A. M. Condo, D. Phillips, P. Pepiot, and C. T. Avedisian, "Droplet combustion characteristics of algae-derived renewable diesel, conventional #2 diesel, and their mixtures," *Fuel*, vol. 167, pp. 295–305, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2015.11.036.
- [14] Suyatno, H. Riupassa, S. Marianingsih, and H. Y. Nanlohy, "Characteristics of SI engine fueled with BE50-Isooctane blends with different ignition timings," *Heliyon*, vol. 9, no. 1, p. e12922, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.HELIYON.2023.E12922.
- [15] H. Y. Nanlohy, I. N. G. Wardana, N. Hamidi, and L. Yuliati, "Combustion characteristics of crude jatropha oil droplets using rhodium liquid as a homogeneous combustion catalyst," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 299, no. 1, pp. 0–7, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/299/1/012090.
- [16] K. Han, Q. Lin, and M. Liu, "Experimental study on the micro-explosion characteristics of biodiesel/1-pentanol and biodiesel/ methanol blended droplets," *Renew. Energy*, vol. 196, pp. 261–277, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.06.104.
- [17] T. I. Farouk, D. Dietrich, F. E. Alam, and F. L. Dryer, "Isolated n-decane droplet combustion - Dual stage and single stage transition to 'Cool Flame' droplet burning," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 2, pp. 2523–2530, 2017, doi: 10.1016/j.proci.2016.07.015.
- [18] M. Alherbawi, G. McKay, H. R. Mackey, and T. Al-Ansari, "Jatropha curcas for jet biofuel production: Current status and future prospects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, no. September 2020, p. 110396, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110396.
- [19] A. Hoxie, R. Schoo, and J. Braden, "Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets," *Fuel*, vol. 120, pp. 22–29, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.11.036.
- [20] S. Piazzzi, S. S. Ail, V. Benedetti, F. Patuzzi, and M. Baratieri, "Fuel-lean combustion synthesized cobalt catalysts for Fischer-Tropsch reaction," *Catal. Today*, no. April, pp. 0–1, 2020, doi: 10.1016/j.cattod.2020.06.088.