

Peningkatan Karakteristik Waktu Tunda Penyalaan (*Ignition Delay*) Droplet Minyak Pirolisis Menggunakan Carbon Quantum Dots dari Limbah Ampas Tebu

Bilal Zahron Niza¹, Akhmad Faruq Alhikami¹, Ena Marlina²

¹Department of Mechanical Engineering, Universitas Islam Malang, Malang 65144, Indonesia

Email korespondensi: bilalniza802@gmail.com

Abstrak

Riset ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh Carbon Quantum Dots (CQDs) yang disintesis dari limbah ampas tebu sebagai aditif nano terhadap karakteristik waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) droplet minyak pirolisis LDPE. Ruang lingkup riset difokuskan secara khusus pada evaluasi *ignition delay* tanpa membahas parameter pembakaran lainnya. CQDs ditambahkan ke dalam minyak pirolisis dengan konsentrasi 100 ppm dan 500 ppm, kemudian dibandingkan dengan minyak pirolisis LDPE murni serta bahan bakar petro-diesel sebagai pembanding. Pengujian dilakukan menggunakan metode pembakaran droplet tunggal pada kondisi temperatur lingkungan terkendali, dengan *ignition delay* didefinisikan sebagai selang waktu antara paparan panas awal dan munculnya nyala api pertama. Hasil riset menunjukkan bahwa penambahan CQDs secara signifikan menurunkan *ignition delay* droplet minyak pirolisis, dengan penurunan yang semakin besar pada konsentrasi CQDs yang lebih tinggi. Nilai *ignition delay* LDPE dengan 500 ppm CQDs mendekati karakteristik penyalaan petro-diesel. Kesimpulannya, Carbon Quantum Dots dari limbah ampas tebu berpotensi efektif sebagai aditif nano ramah lingkungan untuk meningkatkan performa penyalaan minyak pirolisis.

Kata kunci: Carbon quantum dots; *Ignition delay*; Minyak pirolisis; Nano aditif; Pembakaran droplet.

Abstract

This research aims to analyze the effect of Carbon Quantum Dots (CQDs) synthesized from sugarcane bagasse waste as nano-additives on the ignition delay characteristics of LDPE pyrolysis oil droplets. The research scope is strictly limited to ignition delay evaluation without considering other combustion parameters. CQDs were added to the pyrolysis oil at concentrations of 100 ppm and 500 ppm and compared with pure LDPE pyrolysis oil and petroleum diesel as a reference fuel. Single-droplet combustion experiments were conducted under controlled ambient temperature conditions, where ignition delay was defined as the time interval between initial heat exposure and the onset of visible flame. The results indicate that the addition of CQDs significantly reduces the ignition delay of pyrolysis oil droplets, with greater reductions observed at higher CQDs concentrations. The ignition delay of LDPE pyrolysis oil with 500 ppm CQDs approaches that of conventional petroleum diesel. In conclusion, sugarcane bagasse-derived Carbon Quantum Dots demonstrate strong potential as environmentally friendly nano-additives for improving the ignition performance of pyrolysis oil.

Keywords: Carbon quantum dots; Droplet combustion; Ignition delay; Nano additive; Pyrolysis oil

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi global yang diiringi dengan menurunnya cadangan bahan bakar fosil serta meningkatnya permasalahan lingkungan akibat limbah menjadi tantangan utama dalam pembangunan berkelanjutan. Di negara berkembang seperti Indonesia, limbah plastik dan limbah biomassa pertanian dihasilkan dalam jumlah besar dan sering kali belum dimanfaatkan secara optimal. Studi *life cycle assessment* menunjukkan bahwa pengelolaan limbah melalui pendekatan konversi menjadi energi (*waste-to-energy*) mampu menurunkan dampak lingkungan secara signifikan dibandingkan metode pembuangan konvensional, sekaligus berkontribusi terhadap ketahanan energi nasional [1]. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan dalam konteks ini adalah pirolisis limbah untuk menghasilkan bahan bakar cair alternatif [2].

Minyak pirolisis memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif, namun karakteristik pembakarannya masih menghadapi berbagai keterbatasan. Beberapa riset melaporkan bahwa minyak pirolisis cenderung memiliki volatilitas yang tidak seragam, kestabilan nyala yang rendah, serta waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) yang relatif lebih panjang dibandingkan bahan bakar konvensional [3–5]. Parameter *ignition delay* menjadi aspek krusial karena berkaitan langsung dengan efisiensi pembakaran, kestabilan api, serta pembentukan emisi pada sistem pembakaran droplet maupun mesin pembakaran internal.

Dalam satu dekade terakhir, upaya peningkatan karakteristik pembakaran bahan bakar alternatif melalui penambahan aditif berbasis nanomaterial karbon telah banyak dilaporkan. Nano-aditif seperti

carbon nanotubes, graphene, dan partikel karbon lainnya terbukti mampu meningkatkan konduktivitas termal bahan bakar, mempercepat proses perpindahan panas, dan menurunkan *ignition delay* [6,7]. Tinjauan komprehensif oleh [6,7] menegaskan bahwa nanopartikel karbon berperan penting dalam memperbaiki proses evaporasi dan reaksi awal pembakaran droplet bahan bakar cair.

Carbon quantum dots (CQDs) merupakan salah satu nanomaterial karbon yang semakin menarik perhatian karena ukurannya yang sangat kecil (<10 nm), luas permukaan tinggi, stabilitas termal yang baik, serta potensi aktivitas katalitik selama pembakaran [8]. Keunggulan CQDs lainnya adalah kemampuannya untuk disintesis secara ramah lingkungan dari berbagai limbah biomassa, termasuk limbah pertanian [9–11,13]. Pemanfaatan ampas tebu sebagai prekursor CQDs menjadi sangat relevan, mengingat ketersediaannya yang melimpah sebagai residu industri gula di Indonesia, sekaligus mendukung konsep ekonomi sirkular dan material berkelanjutan.

Beberapa riset telah mengkaji aplikasi CQDs dalam berbagai bidang, seperti fotokatalisis dan penyimpanan energi [11,12]. Dalam konteks pembakaran bahan bakar, [14] melaporkan bahwa penambahan CQDs berbasis limbah kopi pada campuran diesel–butanol mampu memperpendek *ignition delay* dan meningkatkan stabilitas pembakaran droplet. Studi lain oleh [15,16] menunjukkan bahwa aditif *carbon dots* dan nanopartikel karbon berperan dalam meningkatkan laju perpindahan panas dan karakteristik nyala droplet bahan bakar cair.

Metode *single droplet combustion* telah digunakan secara luas sebagai pendekatan fundamental untuk menganalisis karakteristik pembakaran bahan bakar cair, termasuk waktu tunda penyalaan, dimensi api, dan mekanisme penguapan droplet [7,15]. Riset [17] menunjukkan bahwa analisis dimensi api dan perilaku nyala droplet biodiesel dapat digunakan sebagai indikator peningkatan kualitas pembakaran akibat modifikasi bahan bakar. Namun demikian, sebagian besar riset terdahulu masih berfokus pada biodiesel, diesel konvensional, atau bahan bakar terbarukan lainnya dengan penggunaan aditif berbasis nanokarbon sintetis.

Hingga saat ini, belum ditemukan riset yang secara spesifik mengkaji pengaruh penambahan carbon quantum dots yang disintesis dari limbah ampas tebu terhadap karakteristik waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) droplet minyak pirolisis. Selain itu, kajian yang mengintegrasikan pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber CQDs sekaligus sebagai aditif untuk meningkatkan kualitas pembakaran minyak pirolisis masih sangat terbatas. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya riset yang

mengombinasikan pendekatan material berkelanjutan dan analisis fundamental pembakaran droplet.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan utama riset ini adalah bagaimana pengaruh penambahan CQDs berbasis limbah ampas tebu terhadap karakteristik *ignition delay* droplet minyak pirolisis. Hipotesis yang diajukan adalah bahwa penambahan CQDs dapat memperpendek waktu tunda penyalaan melalui peningkatan laju perpindahan panas dan reaktivitas kimia pada fase awal pembakaran droplet. Tujuan riset ini adalah untuk mengkaji peran CQDs berbasis limbah biomassa dalam meningkatkan karakteristik pembakaran minyak pirolisis serta memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan aditif bahan bakar berkelanjutan.

2. Metode

Riset ini merupakan eksperimen laboratorium yang bertujuan menganalisis pengaruh penambahan Carbon Quantum Dots (CQDs) berbasis limbah ampas tebu terhadap karakteristik waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) droplet minyak pirolisis LDPE. Variasi bahan bakar yang diuji meliputi LDPE murni, LDPE dengan penambahan CQDs sebesar 100 ppm dan 500 ppm, serta petro-diesel sebagai bahan bakar pembandingan. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi potensi aditif nanokarbon dalam meningkatkan reaktivitas penyalaan bahan bakar cair alternatif berbasis limbah plastik.

Minyak pirolisis LDPE diperoleh melalui proses pirolisis limbah plastik LDPE hingga menghasilkan fraksi minyak cair. Carbon Quantum Dots disintesis dari limbah ampas tebu menggunakan metode hidrotermal ramah lingkungan, yang menghasilkan partikel nano karbon dengan gugus fungsi aktif. Pemanfaatan ampas tebu sebagai prekursor CQDs dipilih karena ketersediaannya yang tinggi, sifat berkelanjutan, serta kemampuannya menghasilkan CQDs dengan karakteristik termal dan katalitik yang baik.

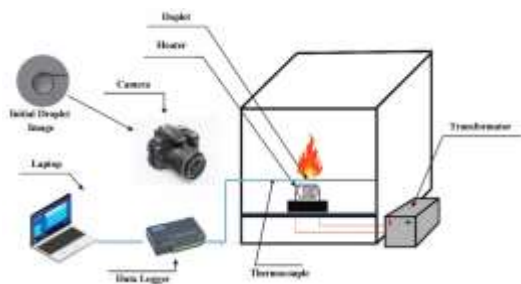


Gambar 1. Proses pembuatan Carbon Quantum Dots

Pendekatan eksperimental yang digunakan dalam riset ini selaras dengan temuan [3] yang melaporkan bahwa penambahan aditif nanokarbon pada minyak pirolisis mampu meningkatkan karakteristik pembakaran melalui percepatan proses penyalaan

awal. Metode sintesis Carbon Quantum Dots berbasis *hydrothermal treatment* (HTC) dipilih karena mampu menghasilkan partikel karbon berukuran nano dengan gugus fungsi aktif dan stabilitas termal yang baik, sehingga mendukung peningkatan reaktivitas bahan bakar selama fase awal pembakaran. Selain itu, pemanfaatan CQDs hasil HTC dari limbah biomassa dinilai efektif dalam meningkatkan perpindahan panas dan interaksi reaksi kimia pada pembakaran droplet, sebagaimana ditunjukkan pada studi pembakaran droplet berbasis CQDs oleh [14]. Evaluasi karakteristik *ignition delay* menggunakan metode pembakaran droplet tunggal juga sejalan dengan pendekatan yang digunakan oleh. [16], yang menegaskan bahwa variasi konsentrasi aditif nanokarbon berpengaruh signifikan terhadap waktu tunda penyalan dan stabilitas nyala bahan bakar cair.

CQDs kemudian ditambahkan ke dalam minyak pirolisis LDPE dengan konsentrasi 100 ppm dan 500 ppm, lalu didispersikan menggunakan *ultrasonic bath* hingga diperoleh campuran yang homogen dan stabil. Metode dispersi ini bertujuan untuk mencegah aglomerasi partikel nano dan memastikan interaksi optimal antara CQDs dan bahan bakar selama proses pembakaran.



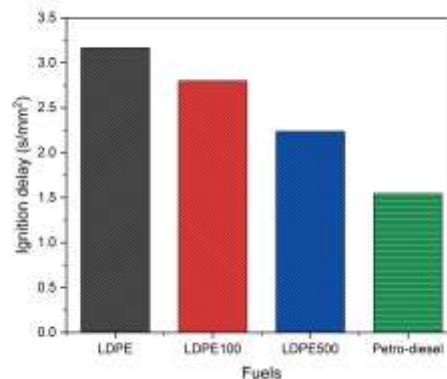
Gambar 2.Skema eksperimental pengujian *ignition delay* droplet bahan bakar

Pengujian *ignition delay* dilakukan menggunakan metode pembakaran droplet tunggal di dalam ruang bakar tertutup dengan sistem pemanas dan temperatur terkontrol. Droplet bahan bakar dengan volume seragam ditempatkan pada kedudukan inert, sementara temperatur lingkungan dipantau menggunakan termokopel tipe K yang terhubung ke data logger. Proses pemanasan hingga terjadinya penyalan direkam menggunakan kamera berkecepatan tinggi. Waktu tunda penyalan didefinisikan sebagai selang waktu antara paparan awal droplet terhadap lingkungan panas hingga munculnya nyala api pertama. Setiap variasi bahan bakar diuji dengan pengulangan untuk menjamin keterulangan dan konsistensi data.

Data *ignition delay* dianalisis secara kuantitatif dan dibandingkan antar variasi bahan bakar untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi CQDs terhadap karakteristik penyalan droplet minyak pirolisis LDPE. Hasilnya dibandingkan dengan petro-diesel

sebagai referensi guna menilai efektivitas aditif CQDs dalam meningkatkan performa penyalan serta potensi penerapannya sebagai bahan bakar alternatif yang berkelanjutan.

3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 3.*Ignition delay times of the fuels.*

Hasil pengujian *ignition delay* droplet untuk berbagai variasi bahan bakar ditunjukkan pada **Gambar 3**. Grafik tersebut menyajikan nilai *ignition delay* yang telah diolah dan dinormalisasi terhadap luas permukaan droplet, sehingga perbandingan antar bahan bakar dapat dilakukan secara objektif. Terlihat bahwa droplet minyak pirolisis LDPE murni memiliki *ignition delay* tertinggi, yaitu sekitar 3,1 s/mm². Penambahan Carbon Quantum Dots (CQDs) ke dalam minyak pirolisis LDPE menyebabkan penurunan *ignition delay* secara signifikan, dengan nilai sekitar 2,8 s/mm² untuk LDPE 100 ppm dan 2,2 s/mm² untuk LDPE 500 ppm. Sementara itu, petro-diesel menunjukkan *ignition delay* terendah, yaitu sekitar 1,5 s/mm².

Tren penurunan *ignition delay* yang konsisten seiring peningkatan konsentrasi CQDs menunjukkan bahwa aditif CQDs berperan aktif dalam mempercepat proses penyalan droplet minyak pirolisis LDPE. Hal ini mengindikasikan peningkatan reaktivitas termal dan kimia bahan bakar akibat keberadaan partikel nano karbon di dalam matriks bahan bakar.

Secara fundamental, *ignition delay* pada pembakaran droplet dipengaruhi oleh dua tahap utama, yaitu pemanasan droplet hingga mencapai kondisi reaktif dan tahap reaksi kimia awal dengan oksigen. Nilai *ignition delay* yang tinggi pada LDPE murni menunjukkan bahwa minyak pirolisis LDPE memiliki keterbatasan dalam penyerapan panas dan reaktivitas awal dibandingkan bahan bakar konvensional. Penambahan CQDs terbukti mampu memperpendek waktu tunda penyalan, yang diduga berasal dari peningkatan konduktivitas termal efektif bahan bakar serta efek katalitik permukaan CQDs yang mempercepat reaksi oksidasi awal.

Pada konsentrasi CQDs yang lebih tinggi (500 ppm), penurunan *ignition delay* menjadi lebih signifikan, menunjukkan bahwa peningkatan jumlah partikel nano karbon memperbesar luas permukaan aktif dan mempercepat transfer panas dari lingkungan ke dalam droplet. Fenomena ini sejalan dengan konsep dasar bahwa material nano karbon dapat bertindak sebagai *thermal enhancer* sekaligus *combustion promoter*, sehingga mempercepat transisi dari fase pemanasan ke fase reaksi kimia. Dengan demikian, hipotesis bahwa penambahan CQDs dari limbah ampas tebu dapat meningkatkan karakteristik penyalan minyak pirolisis LDPE dapat diterima.



Gambar 4.Awal nyala api pada droplet

Hasil riset ini menunjukkan kesesuaian yang baik dengan berbagai studi sebelumnya terkait peningkatan karakteristik pembakaran bahan bakar cair menggunakan aditif nanokarbon. [3] Melaporkan bahwa doping aditif nanokarbon pada minyak pirolisis plastik mampu menurunkan *ignition delay* dan meningkatkan stabilitas pembakaran akibat peningkatan transfer panas dan aktivitas reaksi permukaan. Temuan serupa juga dilaporkan oleh [4], yang menunjukkan bahwa penambahan aditif nano pada bahan bakar biodiesel dapat mempercepat proses penyalan dan meningkatkan efisiensi pembakaran.

Selain itu, studi [5] mengenai karakteristik penyalan bahan bakar cair di ruang bakar volume konstan menunjukkan bahwa bahan bakar dengan *ignition delay* lebih pendek memiliki kecenderungan reaktivitas yang lebih tinggi dan kestabilan nyala yang lebih baik. Penurunan *ignition delay* pada LDPE beraditif CQDs yang mendekati karakteristik petrodiesel menunjukkan bahwa pendekatan ini efektif dalam meningkatkan performa bahan bakar alternatif berbasis limbah plastik. Pemanfaatan CQDs dari ampas tebu juga sejalan dengan konsep keberlanjutan dan pemanfaatan limbah biomassa, sebagaimana dilaporkan oleh [7, 8].

Secara teoretis, hasil riset ini memperkuat pemahaman bahwa penambahan Carbon Quantum Dots dapat memodifikasi mekanisme penyalan droplet melalui peningkatan konduktivitas termal dan penurunan energi aktivasi reaksi awal. Hal ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan model pembakaran droplet bahan bakar beraditif nano, khususnya untuk bahan bakar alternatif berbasis limbah plastik.

Secara terapan, penurunan *ignition delay* minyak pirolisis LDPE melalui penambahan CQDs membuka peluang pemanfaatan bahan bakar ini sebagai

alternatif yang lebih kompetitif terhadap bahan bakar fosil konvensional. Penggunaan CQDs dari limbah ampas tebu tidak hanya meningkatkan performa pembakaran, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular dengan memanfaatkan dua jenis limbah, yaitu limbah plastik dan limbah biomassa. Dengan demikian, pendekatan ini berpotensi diterapkan pada sistem pembakaran skala kecil hingga menengah, seperti burner industri atau aplikasi energi terdistribusi, dengan peningkatan kestabilan penyalan dan efisiensi termal.

4. Kesimpulan

Riset ini berhasil menjawab tujuan untuk meningkatkan karakteristik waktu tunda penyalan (*ignition delay*) droplet minyak pirolisis LDPE melalui penambahan Carbon Quantum Dots (CQDs) yang disintesis dari limbah ampas tebu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa minyak pirolisis LDPE murni memiliki *ignition delay* paling tinggi, sedangkan penambahan CQDs pada konsentrasi 100 ppm dan 500 ppm mampu menurunkan *ignition delay* secara bertahap dan signifikan, dengan performa penyalan yang semakin mendekati karakteristik petrodiesel. Temuan ini secara logis menunjukkan bahwa CQDs berperan dalam meningkatkan reaktivitas termal dan kimia bahan bakar, yang ditunjukkan oleh percepatan proses pemanasan droplet dan inisiasi reaksi oksidasi awal, sehingga memperpendek waktu tunda penyalan.

Secara teoretis, hasil riset ini menguatkan konsep bahwa aditif nanokarbon dapat menurunkan hambatan energi awal pada proses penyalan droplet bahan bakar cair melalui peningkatan konduktivitas termal dan efek katalitik permukaan. Secara terapan, penggunaan CQDs berbasis limbah ampas tebu pada minyak pirolisis LDPE membuka peluang pengembangan bahan bakar alternatif yang lebih reaktif, stabil, dan berkelanjutan dengan memanfaatkan limbah plastik dan biomassa secara simultan. Untuk penyempurnaan dan peningkatan daya guna hasil riset, diperlukan studi lanjutan yang mengevaluasi pengaruh variasi temperatur lingkungan, ukuran droplet, serta konsentrasi CQDs yang lebih luas, serta analisis lanjutan seperti pendekatan Arrhenius dan pengujian pada sistem pembakaran semprot atau mesin guna memvalidasi kinerja bahan bakar pada kondisi aplikasi nyata.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan riset ini, baik dalam bentuk penyediaan sarana, prasarana, maupun pendanaan. Ucapan terima kasih disampaikan kepada laboratorium tempat riset ini dilaksanakan atas fasilitas dan dukungan teknis yang diberikan selama proses eksperimen. Penulis juga menyampaikan

apresiasi kepada dosen pembimbing dan rekan-rekan yang telah memberikan arahan, diskusi ilmiah, serta bantuan selama pelaksanaan dan penyusunan riset ini.

Daftar Pustaka

- [1] E. R. K. Neo, G. C. Y. Soo, D. Z. L. Tan, K. Cady, K. T. Tong dan J. S. C. Low, "Life cycle assessment of plastic waste end-of-life for India and Indonesia," *Resources, Conservation and Recycling*, p. 174:105774, November 2021.
- [2] M. I. Jahirul, M. G. Rasul, D. Schaller, M. M. K. Khan, M. M. Hasan dan M. A. Hazrat, "Transport fuel from waste plastics pyrolysis – A review on technologies, challenges and opportunities," *Energy Conversion and Management*, p. 258:115451, April 2022.
- [3] E. Marlina, A. F. Alhikami, M. Siyamuiddin, R. Aniza, W. C. Wang, A. S. Tijani, M. S. Mustapa dan T. , "Enhancing the combustion characteristics of plastic pyrolytic oils by doping nanocarbon additives for alternative energy," *Energy*, p. 322:135355, 2025.
- [4] A. F. Alhikami, C. E. Yao dan W. C. Wang, "A study of the spray ignition characteristics of hydro-processed renewable diesel, petroleum diesel, and biodiesel using a constant volume combustion chamber," *Combustion and Flame*, vol. 223, pp. 55-64, 2021.
- [5] M. S. Gad dan S. Jayaraj, "A comparative study on the effect of nano-additives on the performance and emissions of a diesel engine run on Jatropa biodiesel," *Fuel*, p. 267:117168, 2020.
- [6] Fayad MA, El-Sayed AM, Tsolakis A. Impact of adding nanoparticles into oxygenated fuel blends on combustion and emission characteristics: a review. *Energy Convers Manag*. 2025;297:117611.
- [7] Zhang Y, Li X, Wang Z, Chen H. A comprehensive review of liquid fuel droplet evaporation and combustion behavior with carbon-based nanoparticles. *Fuel*. 2024;342:127963.
- [8] H. Baweja dan K. Jeet, "Economical and green synthesis of graphene and carbon quantum dots from agricultural waste," *Materials study Express*, p. 6(8):0850g8, 2019.
- [9] S. Pandiyan, L. Arumugam, S. P. Srengan, R. Pitchan, P. Sevugan, K. Kannan, G. Pitchan, T. A. Hegde dan V. Gandhirajan, "Biocompatible Carbon Quantum Dots Derived from Sugarcane Industrial Wastes for Effective Nonlinear Optical Behavior and Antimicrobial Activity Applications," *ACS Omega*, pp. 5:30363-30372, 2020.
- [10] M. W. Nugraha, N. H. Z. Abidin, S. dan N. S. Sambudi, "Synthesis of tungsten oxide/ amino-functionalized sugarcane bagasse derived-carbon quantum dots (WO₃/N-CQDs) composites for methylene blue removal," *Chemosphere*, p. 277:130300, August 2021.
- [11] M. Tian, C. Hu, J. Yu dan L. Chen, "Carbon quantum dots (CQDs) mediated Z-scheme g-C₃N₄-CQDs/BiVO₄ heterojunction with enhanced visible light photocatalytic degradation of Paraben," *Chemosphere*, p. 323:138248, 2023.
- [12] G. Arora, N. S. Sabran, C. W. Liew, C. Y. Ng, F. W. Low, P. K. Singh dan H. K. Jun, "Characterization of green-synthesized carbon quantum dots from spent coffee grounds for EDLC electrode applications," *Chemical Physics Impact*, p. 9:100767, December 2024.
- [13] O. Z. Moran, F. D. Monge, A. R. Juarez, C. G. Munoz, P. Z. Moran, O. S. Sanchez dan J. D. Reyes, "Synthesis and characterization of fluorescent carbon dots obtained from citrus x sinensis by an eco-friendly method," *Results in Chemistry*, p. 11:101788, October 2024.
- [14] Zapata-Hernández C, Hernández JJ, García-Contreras R, Amell A. Impact of CQDs on droplet combustion. *Heliyon*. 2024;10(9):e27627.
- [15] Gallego A, Rentería J, Herrera B. Ignition delay of diesel-carbon nanotube blends. *Energies*. 2023;16(23):7740.
- [16] Parveg M, Hossain AK, Rasul MG. Effects of carbon dots on droplet combustion. *Fuel*. 2025;356:129526.
- [17] Hanief H, Marlina E, Alhikami AF. Analisis dimensi api biodiesel metode single droplet. *J Tek Mesin*. 2025;22(5):88–90.