



Optimalisasi Proses Transesterifikasi dalam Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Campuran *Natrium Hidroksida* dan *Kalium Hidroksida*

Guido Tampubolon¹, Yohandari Bow², Lety Trisnaliani³

^{1,2,3}Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

Email : guidotampubolon27@gmail.com¹

Abstract

The global energy crisis and increasing awareness of the environmental impact of fossil fuels have driven the development of biodiesel as an environmentally friendly and renewable alternative energy source. This study aims to optimize the performance of a transesterification apparatus in biodiesel production from used cooking oil using a 1:1 mixture of sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) as a catalyst with a concentration of 0.5 N. The process was carried out at a constant temperature of 60°C and a molar ratio of methanol to oil of 6:1. The independent variables were reaction time (20, 40, and 60 minutes) and stirring speed (300, 450, and 600 rpm). The results showed that stirring time and speed significantly influenced biodiesel yield. The highest yield of 87.50% was achieved with a reaction time of 60 minutes and a stirring speed of 600 rpm. The biodiesel samples were then analyzed based on physical and chemical parameters according to the Indonesian National Standard (SNI 7182:2015), including density, viscosity, flash point, cetane number, and calorific value. The density values ranged from 871–879 kg/m³, viscosity 3.8–5.95 cSt, flash point 107.1–127.1°C, maximum cetane number 65.4, and maximum calorific value 40.33 MJ/kg. All parameters were within the SNI standard range, confirming that the biodiesel produced met the required quality.

Keywords: Biodiesel, Transesterification, Used Cooking Oil, Mixed Catalyst, Naoh, KOH, Yield.

Abstrak

Krisis energi global dan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dari bahan bakar fosil telah mendorong pengembangan biodiesel sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja alat transesterifikasi dalam produksi biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis campuran Natrium Hidroksida (NaOH) dan Kalium Hidroksida (KOH) dengan konsentrasi 0,5 N perbandingan 1:1. Proses dilakukan pada suhu tetap 60°C dan rasio molar metanol terhadap minyak sebesar 6:1, dengan variabel bebas berupa waktu reaksi (20, 40, dan 60 menit) serta kecepatan pengadukan (300, 450, dan 600 rpm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter waktu dan kecepatan pengadukan berpengaruh signifikan terhadap persentase hasil (yield) biodiesel. Yield tertinggi sebesar 87,50% dicapai pada waktu reaksi 60 menit dan kecepatan pengadukan 600 rpm. Sampel biodiesel kemudian dianalisis berdasarkan parameter fisik dan kimia yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI 7182:2015), termasuk densitas, viskositas, titik nyala, angka setana, dan nilai kalor. Nilai densitas berkisar antara 871–879 kg/m³, viskositas 3,8–5,95 cSt, titik nyala 107,1–127,1°C, angka setana tertinggi 65,4, dan nilai kalor maksimum 40,33 MJ/kg. Seluruh parameter berada dalam

rentang standar SNI, membuktikan bahwa biodiesel yang dihasilkan memenuhi kualitas yang dipersyaratkan.

Kata kunci: *Biodiesel, Transesterifikasi, Minyak Jelantah, Katalis Campuran, Naoh, KOH, Yield.*

PENDAHULUAN

Sektor industri dan transportasi dianggap sebagai konsumen terbesar bahan bakar. Krisis minyak mentah pada pertengahan 1970-an, selain penurunan cadangan petroleum, perubahan iklim, dan masalah lingkungan, mengalihkan perhatian untuk mengembangkan sumber bahan bakar alternatif dan terbarukan untuk mengatasi tantangan ini. Dalam hal ini, biofuel seperti biodiesel, etanol, dan teknologi biogas telah mendapatkan dukungan untuk ekspansi oleh masyarakat umum, pemerintah, peneliti, dan industri. Dibandingkan dengan bahan bakar fosil, biofuel dapat terurai secara hayati dan tidak beracun. Diesel adalah salah satu fraksi distilat menengah dari petroleum dan merupakan bahan bakar transportasi yang umum digunakan. Namun, penggunaan terus-menerus bahan bakar fosil dianggap tidak ramah lingkungan karena emisi partikel, oksida karbon, sulfur dioksida, dan oksida nitrogen. Gas-gas ini berkontribusi terhadap pemanasan global. Untuk alasan ini, alternatif terbarukan dicari untuk menggantikan bahan bakar fosil (Kayode & Hart, 2019).

Indonesia kaya akan berbagai sumber daya alam yang sangat beragam dan dikonversi menjadi sumber energi, salah satunya adalah minyak bumi. Minyak bumi tergolong sebagai sumber energi tidak terbarukan, yang ketersediaannya semakin berkurang akibat meningkatnya penggunaan energi. Krisis energi pun menjadi ancaman nyata, karena cadangan minyak bumi terus menipis seiring dengan pertumbuhan populasi dan tingginya konsumsi energi global. Jika kondisi ini terus berlanjut, cadangan minyak bumi bisa habis di masa depan. Selain dampak terhadap lingkungan, tantangan lain yang dihadapi adalah mengupayakan sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui. Salah satu Solusi yang sedang dikembangkan adalah biodiesel, yang berfungsi sebagai bahan baku untuk solar (Suryanto et al., 2021).

Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dunia dan pesatnya kemajuan teknologi, kebutuhan manusia akan energi juga mengalami lonjakan yang signifikan. Hingga saat ini, sumber energi utama yang digunakan secara global masih bergantung pada bahan bakar fosil, seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara, yang umumnya diolah melalui proses pembakaran. Sudah menjadi pengetahuan umum bahwa cadangan bahan bakar fosil

terus menipis dan diperkirakan akan habis dalam waktu yang tidak terlalu lama. Selain itu, karena ketersediaannya terbatas di wilayah tertentu, penggunaan bahan bakar fosil turut memperparah pencemaran lingkungan dan memperbesar emisi gas rumah kaca akibat proses pembakarannya. Oleh karena itu, fokus penelitian energi saat ini telah beralih ke arah pengembangan sumber energi terbarukan.

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki prospek menjanjikan adalah biomassa. Biomassa menyumbang sekitar 13% dari total konsumsi energi global dan dikenal sebagai sumber energi terbarukan yang paling fleksibel serta mudah dimanfaatkan. Biomassa dapat berasal dari berbagai jenis bahan organik, termasuk tanaman yang cepat tumbuh maupun limbah organik, sehingga menjadikannya pilihan yang layak untuk memenuhi kebutuhan energi modern, seperti pembangkitan listrik dan produksi bahan bakar.

Dalam hal ini, biodiesel yang dihasilkan dari minyak nabati atau lemak hewani muncul sebagai salah satu alternatif yang menjanjikan untuk menggantikan bahan bakar diesel berbasis minyak bumi dalam mesin diesel. Biodiesel merupakan bahan bakar cair yang bersifat terbarukan, berasal dari sumber daya hayati, dan telah menunjukkan potensi untuk digunakan baik secara murni maupun sebagai campuran dengan solar konvensional pada mesin diesel tanpa perlu dilakukan perubahan besar pada sistem mesin. Selain itu, penggunaan biodiesel dapat membantu menurunkan emisi gas buang seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon yang belum terbakar, partikel padat, serta sulfur dioksida (SO₂). Oleh karena itu, analisis terhadap berbagai rasio campuran biodiesel dengan solar menjadi krusial, baik dari sisi perlindungan lingkungan maupun pemenuhan standar bahan bakar dan kebutuhan energi di sektor pertanian (Ulukardesler, 2023).

Biodiesel, secara khusus, telah diakui sebagai alternatif yang menjanjikan karena penggunaannya dalam mesin pembakaran kompresi (CI), baik secara murni maupun dalam bentuk campuran, dapat menurunkan emisi gas berbahaya seperti karbon monoksida dan hidrokarbon yang tidak terbakar. Hal ini dimungkinkan karena biodiesel tidak mengandung sulfur. Proses produksi biodiesel dilakukan melalui reaksi transesterifikasi dengan menggunakan minyak nabati, lemak hewani, biomassa kering, atau minyak non-edibel bersama alkohol dan katalis. Namun, penggunaan minyak nabati sebagai bahan baku berisiko mengganggu ketahanan pangan global dan meningkatkan harga jual biodiesel. Oleh karena itu, kini fokus lebih diarahkan pada pemanfaatan bahan non-edibel sebagai bahan baku biodiesel untuk menekan biaya produksinya (Jain et al., 2023).

Dengan meningkatnya pertumbuhan industri, bertambahnya populasi global, serta kemajuan teknologi yang pesat, kebutuhan energi manusia juga semakin tinggi. Saat ini, Sebagian besar energi yang digunakan di dunia masih bergantung pada bahan bakar fosil, seperti minyak bumi, gas alam, dan batubara. Salah satu alternatif energi terbarukan yang dapat digunakan adalah biodiesel (Ramadhani et al., 2024). Namun, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil menimbulkan berbagai permasalahan, seperti penipisan cadangan sumber daya alam, fluktuasi harga energi, serta dampak negatif terhadap lingkungan, termasuk emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan (Tjiwidjaja & Salima, 2023).

Biodiesel adalah jenis bahan bakar yang dibuat dari minyak nabati atau lemak hewani melalui proses transesterifikasi. Proses ini melibatkan reaksi antara senyawa ester dan alkohol dengan bantuan katalis, sehingga memproduksi metil dari asam lemak (Fatty Acid Methyl Ester/FAME) yang dapat digunakan pada mesin diesel. Secara kimia, biodiesel tergolong dalam mono alkil ester atau metil ester dengan rantai karbon yang berkisar antara 12 hingga 20. Karakteristik ini membedakannya dari petroleum diesel (solar), yang utama tersusun dari senyawa hidrokarbon.

Biodiesel adalah mono-alkil ester yang dihasilkan dari asam lemak minyak nabati atau lemak hewani, sehingga lebih ramah lingkungan, tidak mencemari udara, mudah terurai secara alami, dan dapat diperbaharui. Oleh karena itu, biodiesel memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai solusi terhadap keterbatasan pasokan minyak bumi. Salah satu cara untuk memproduksi biodiesel adalah melalui proses esterifikasi asam lemak dari minyak nabati atau transesterifikasi trigliserida dengan alkohol. Proses ini menghasilkan dua produk utama, yaitu metil ester (biodiesel) dan gliserin sebagai produk sampingan (Dimawarnita et al., 2021).

Minyak nabati bisa dijadikan sumber utama bahan baku biodiesel karena berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbarui. Beberapa jenis minyak yang sering digunakan untuk produksi biodiesel antara lain minyak kelapa sawit, minyak kelapa, dan minyak jarak. Di antara ketiganya, kelapa sawit memiliki produktivitas tertinggi, yaitu 5.950 liter per hektar per tahun, lebih tinggi dibandingkan kelapa yang menghasilkan 2.689 liter per hektar per tahun, dan biji jarak yang menghasilkan 1.892 liter per hektar per tahun. Minyak kelapa sawit sangat melimpah dan tersebar luas di Indonesia, sehingga memiliki potensi besar sebagai

bahan baku utama biodiesel. Salah satu produk turunannya yang banyak dijumpai di pasaran adalah minyak curah, yang selain mudah didapatkan, juga memiliki harga yang lebih terjangkau. Oleh karena itu, minyak curah dapat menjadi alternatif yang tepat dalam produksi biodiesel.

Esterifikasi merupakan reaksi antara asam karboksilat dan alkohol yang menghasilkan ester. Pada proses ini, asam lemak bebas yang terdapat dalam trigliserida diubah menjadi metil ester, dengan air sebagai produk samping. Untuk mengatasi pembentukan air dalam reaksi ini, metanol dapat ditambahkan dalam jumlah berlebih, karena air akan larut dalam metanol dan tidak menghambat reaksi. Reaksi transesterifikasi antara minyak nabati dan metanol berlangsung dengan bantuan katalis untuk menghasilkan biodiesel. Katalis yang umum digunakan dalam proses ini biasanya berupa basa atau asam homogen. Keberhasilan transesterifikasi dipengaruhi oleh berbagai faktor yang perlu diperhatikan guna meningkatkan produksi biodiesel. Salah satu faktor utama adalah jenis katalis yang digunakan, karena berperan penting dalam proses konversi minyak nabati menjadi biodiesel (Abdulkareem & Nasir, 2022).

Katalis merupakan zat yang berfungsi mempercepat laju reaksi tanpa mengalami perubahan atau mempengaruhi komposisi zat dalam reaksi. Umumnya, katalis berinteraksi dengan reaktan selama proses berlangsung, tetapi pada akhir reaksi, katalis dapat kembali ke bentuk semula, sehingga jumlahnya tetap sama sebelum dan sesudah reaksi (Setiadji et al., 2017).

Katalis homogen, seperti asam (H_2SO_4) dan basa (larutan NaOH atau KOH), sering dipakai dalam produksi biodiesel. Namun, pemakaian katalis ini memiliki beberapa kekurangan. Proses pemisahan katalis dari produk tergolong sulit, tidak dapat digunakan kembali, dan pada akhirnya menjadi limbah yang berpotensi mencemari lingkungan. Selain itu, katalis homogen dapat bereaksi dengan asam lemak bebas (ALB) membentuk sabun, yang dapat menghambat proses pemurnian, mengurangi hasil biodiesel, serta meningkatkan konsumsi katalis dalam reaksi (Padil et al., 2012).

Untuk menyelesaikan masalah tersebut, diperlukan pengembangan lebih lanjut dengan mengganti katalis yang digunakan menjadi katalis basa homogen, seperti kalium hidroksida (KOH) dan NaOH. Oleh karena itu, penelitian ini berjudul "Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah melalui Proses Transesterifikasi dengan Katalis Campuran NaOH dan KOH."

Pengujian kualitas biodiesel mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI 718:2015), yang mencakup uji densitas, viskositas, cetane number, dan titik nyala. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang energi, dengan menemukan sumber energi alternatif yang lebih baik serta menyempurnakan proses produksi biodiesel agar lebih efisien dan berkualitas tinggi.

Saat ini, sistem energi global masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil, yang berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan dan peningkatan emisi gas rumah kaca. Kondisi ini telah mendorong banyak negara untuk menetapkan target penurunan emisi karbon sebesar 43% pada tahun 2030, serta menjaga agar kenaikan suhu global tidak melebihi batas yang telah ditetapkan. Dalam konteks ini, biodiesel menjadi salah satu solusi alternatif, karena dapat digunakan langsung pada mesin diesel tanpa perlu modifikasi besar dan memiliki potensi untuk menurunkan emisi CO₂ hingga 80%. Selama sepuluh tahun terakhir, produksi biodiesel global mengalami peningkatan sekitar 4–14%. Meski demikian, tantangan terbesar dalam pengembangannya adalah tingginya biaya bahan baku lipid, yang menyumbang sekitar 60–80% dari total biaya produksi (Cerón Ferrusca et al., 2023).

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbarui, yang banyak dikembangkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi biodiesel, baik dari segi teknologi proses maupun pemilihan bahan baku dan katalis. Suryanto et al. (2021) merancang sebuah mesin produksi biodiesel dengan sistem kontinyu berkapasitas 400 liter per jam, yang menunjukkan efisiensi tinggi dengan rata-rata hasil sebelum modifikasi sebesar 87,49% dan meningkat menjadi 89,31% setelah modifikasi. Sementara itu, Ishaq et al. (2021) meneliti pengaruh variasi katalis KOH terhadap kualitas biodiesel dari minyak jelantah dengan metode pemanasan minyak hingga 60°C dan pencampuran metanol dengan KOH dalam beberapa takaran, yang bertujuan untuk mendapatkan reaksi transesterifikasi yang optimal. Di sisi lain, Mirzayanti et al. (2020) memanfaatkan tempurung kelapa sebagai katalis alternatif dalam proses konversi minyak curah menjadi biodiesel. Penelitian ini menggunakan variasi katalis 0,5 hingga 2,5 wt/wt dan rasio molar minyak terhadap metanol 1:3 hingga 1:9, serta menghasilkan yield tertinggi sebesar 89%. Ketiga penelitian tersebut menunjukkan bahwa baik sistem produksi, jenis katalis, maupun kondisi reaksi sangat memengaruhi kualitas dan efisiensi biodiesel, sehingga

penting untuk terus mengembangkan metode yang lebih efektif dan ekonomis dalam produksi biodiesel.

Biodiesel merupakan bahan bakar yang berasal dari biomassa dan dapat digunakan sebagai pengganti solar berbasis minyak bumi. Keunggulan utama biodiesel adalah sifatnya yang terbarukan serta lebih ramah lingkungan, karena emisi gas rumah kaca yang dihasilkannya jauh lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil. Dengan demikian, biodiesel memiliki peluang besar untuk menjadi solusi permasalahan energi, khususnya di negara-negara berkembang yang tidak memiliki produksi minyak sendiri (Fadhilah et al., 2018). Tujuan dari penelitian ini mendapatkan waktu proses transesterifikasi dan kecepatan pengadukan yang optimal untuk menghasilkan % yield biodiesel tertinggi. Mendapatkan waktu proses transesterifikasi dan kecepatan pengadukan yang optimal berdasarkan karakteristik biodiesel yang dihasilkan. Rumusan masalah dari penelitian ini : Bagaimana pengaruh waktu proses transesterifikasi dan kecepatan pengadukan terhadap % yield. Bagaimana mendapatkan waktu proses transesterifikasi dan kecepatan pengadukan yang terbaik dari karakteristik produk biodiesel yang dihasilkan.

KAJIAN TEORI

Biodiesel

Biodiesel merupakan bahan bakar terbarukan berupa ester monoalkil asam lemak rantai panjang yang diperoleh dari minyak nabati atau lemak hewani melalui proses esterifikasi dan/atau transesterifikasi. Ester yang dihasilkan umumnya berupa metil ester (FAME) atau etil ester, tergantung jenis alkohol yang digunakan. Secara teknis, biodiesel memiliki sifat fisik dan kimia yang mendekati solar konvensional sehingga dapat digunakan pada mesin diesel tanpa modifikasi berarti (Singh et al., 2021).

Keunggulan biodiesel meliputi sifatnya yang bebas sulfur, biodegradable, tidak beracun, memiliki angka setana tinggi, serta emisi gas buang yang lebih rendah dibandingkan diesel berbasis minyak bumi. Oleh karena itu, biodiesel berpotensi mendukung pengurangan emisi karbon dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil (Dimawarnita et al., 2021). Namun, penggunaan minyak nabati pangan sebagai bahan baku menimbulkan isu kompetisi pangan–energi dan meningkatkan biaya produksi. Hal ini mendorong penelitian terhadap bahan baku alternatif yang lebih berkelanjutan dan ekonomis (Alsaiari et al., 2024).

Menurut ASTM D6751, biodiesel didefinisikan sebagai bahan bakar diesel berbasis ester monoalkil dari asam lemak rantai panjang yang berasal dari minyak nabati atau lemak hewani, dengan biodiesel murni dikenal sebagai B100. Standar ini mengatur parameter mutu utama seperti viskositas, titik nyala, angka setana, dan kandungan sulfur (Demirbas, 2009).

Bahan Baku Biodiesel

Bahan baku biodiesel bervariasi antar negara, antara lain minyak kedelai, rapeseed, bunga matahari, dan minyak kelapa sawit. Di Indonesia dan Malaysia, minyak kelapa sawit merupakan sumber utama biodiesel. Namun, pemanfaatan minyak pangan memicu kekhawatiran terhadap ketahanan pangan global. Oleh karena itu, bahan baku non-edible dan limbah semakin banyak dikaji, seperti minyak jelantah, PFAD (Palm Fatty Acid Distillate), minyak jatropha, minyak karanja, mikroalga, serta lemak hewani (Alsultan et al., 2021).

Penggunaan bahan baku limbah memberikan keuntungan ganda, yaitu menurunkan biaya produksi dan mengurangi pencemaran lingkungan. Minyak jelantah dan PFAD khususnya dinilai potensial karena ketersediaannya yang melimpah serta nilai ekonominya yang rendah.

Minyak Jelantah

Minyak jelantah merupakan minyak goreng yang telah digunakan berulang kali dan mengalami degradasi kimia, ditandai dengan meningkatnya kadar asam lemak bebas (FFA), kandungan air, serta produk oksidasi. Penggunaan minyak secara berulang menyebabkan reaksi oksidasi dan hidrolisis yang menurunkan kualitas minyak (Pasaribu et al., 2023).

Sebagai bahan baku biodiesel, minyak jelantah memiliki keunggulan dari sisi ekonomi dan keberlanjutan karena tidak bersaing dengan kebutuhan pangan. Namun, tingginya kadar FFA dan air menjadi kendala utama karena dapat memicu pembentukan sabun pada proses transesterifikasi. Oleh sebab itu, minyak jelantah memerlukan tahap pra-perlakuan berupa esterifikasi sebelum diproses lebih lanjut (Monika et al., 2023).

Reaksi Esterifikasi

Esterifikasi merupakan reaksi antara asam lemak bebas dan alkohol dengan bantuan katalis asam, yang bertujuan menurunkan kadar FFA dalam minyak. Tahap ini sangat penting terutama untuk bahan baku dengan FFA tinggi agar mencegah pembentukan sabun pada proses transesterifikasi. Reaksi esterifikasi bersifat reversibel, sehingga kelebihan alkohol atau penghilangan produk reaksi digunakan untuk mendorong reaksi ke arah pembentukan ester (Megawati et al., 2022; Saini, 2017).

Secara umum, minyak dengan kadar FFA di atas 2–2,5% memerlukan esterifikasi awal agar proses transesterifikasi dapat berlangsung secara optimal (Aziz et al., 2011).

Reaksi Transesterifikasi

Transesterifikasi merupakan tahap utama dalam produksi biodiesel, yaitu reaksi antara trigliserida dan alkohol rantai pendek (metanol atau etanol) dengan bantuan katalis, menghasilkan metil ester asam lemak (biodiesel) dan gliserol sebagai produk samping. Katalis yang umum digunakan adalah NaOH atau KOH karena laju reaksinya yang cepat dan efisien (Shahab & Husnah, 2022).

Efektivitas reaksi transesterifikasi dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti rasio mol minyak–alkohol, jenis dan konsentrasi katalis, suhu dan waktu reaksi, kadar FFA, kandungan air, serta intensitas pencampuran. Suhu reaksi yang meningkat dapat mempercepat reaksi, namun suhu yang terlalu tinggi berisiko memicu reaksi saponifikasi (Africana, 2024). Karena kesederhanaan proses dan biaya yang relatif rendah, transesterifikasi menjadi metode paling umum dalam produksi biodiesel dari minyak nabati maupun minyak limbah (Belkhanchi et al., 2021).

Metanol

Metanol (CH_3OH) merupakan alkohol paling sederhana yang banyak digunakan dalam produksi biodiesel karena reaktivitasnya tinggi, harga relatif murah, dan mudah bercampur dengan katalis basa. Dalam proses metanolisis, metanol bereaksi dengan trigliserida untuk membentuk metil ester (biodiesel) dan gliserol. Sifat metanol yang polar, mudah menguap, dan mudah terbakar menuntut penanganan yang hati-hati dalam proses produksi.

Katalis

Katalis berperan penting dalam mempercepat laju reaksi esterifikasi dan transesterifikasi. Katalis yang digunakan dalam produksi biodiesel meliputi katalis homogen, heterogen, dan enzimatik. Katalis homogen seperti NaOH dan KOH paling umum digunakan karena murah, mudah diperoleh, dan mampu menghasilkan konversi tinggi dalam waktu singkat (Pratiwi et al., 2023).

Katalis heterogen menawarkan keunggulan dalam kemudahan pemisahan dan potensi penggunaan ulang, sementara katalis enzim memberikan selektivitas tinggi namun masih terkendala biaya dan waktu reaksi yang panjang (Saini, 2017).

Proses Pencucian

Pencucian biodiesel dilakukan setelah transesterifikasi untuk menghilangkan sisa katalis, gliserol, dan alkohol yang tidak bereaksi. Proses ini umumnya menggunakan air hangat dan dilakukan beberapa kali hingga biodiesel yang diperoleh menjadi jernih. Tahap pemisahan selanjutnya menghasilkan metil ester dengan tingkat kemurnian yang lebih tinggi.

Parameter Karakteristik Biodiesel

Karakteristik biodiesel ditentukan melalui beberapa parameter utama, yaitu viskositas, densitas, titik nyala, dan angka setana. Viskositas berpengaruh terhadap sistem injeksi dan kualitas pembakaran, sedangkan titik nyala berkaitan dengan keamanan penyimpanan. Angka setana menunjukkan kemampuan bahan bakar untuk menyala secara spontan, sementara densitas memengaruhi efisiensi pembakaran dan daya mesin. Di Indonesia, mutu biodiesel harus memenuhi standar SNI 7182:2015 agar layak digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama empat bulan, yaitu dari Maret hingga Juni 2025. Seluruh rangkaian penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia, Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang.

Alat dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan meliputi reaktor berpengaduk, tangki pemisah, heater berpengaduk, panel kontrol, motor pengaduk, pompa, termokopel, neraca analitik, serta peralatan gelas laboratorium standar (gelas ukur, gelas kimia, erlenmeyer, pipet, dan labu takar).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak goreng bekas sebagai bahan baku, metanol 98% sebagai alkohol reaktan, katalis natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH), serta aquadest untuk proses pencucian.

Desain Fungsional Alat

Perancangan alat produksi biodiesel didasarkan pada fungsi setiap komponen utama, yaitu reaktor berpengaduk sebagai tempat berlangsungnya reaksi transesterifikasi dengan kontrol suhu dan kecepatan pengadukan, tangki pemisah untuk memisahkan biodiesel dan gliserol berdasarkan perbedaan densitas, heater berpengaduk untuk proses pencucian

biodiesel, serta panel kontrol yang berfungsi mengatur suhu, kecepatan pengadukan, dan pengoperasian sistem. Sistem pendukung lainnya meliputi pompa pemindah fluida, motor pengaduk, dan pengontrol suhu digital.

Desain Struktural Alat

Struktur alat produksi biodiesel terdiri atas satu unit reaktor berpengaduk, satu unit tangki pemisah, satu unit heater berpengaduk, dan satu panel kontrol. Seluruh komponen dirancang dalam bentuk prototype dengan konfigurasi terintegrasi, sebagaimana ditunjukkan pada desain dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D). Spesifikasi material dan ukuran alat disesuaikan dengan kebutuhan proses laboratorium.

Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan untuk menganalisis pengaruh waktu reaksi dan kecepatan pengadukan terhadap karakteristik biodiesel yang dihasilkan melalui proses transesterifikasi.

1. Variabel Penelitian

Variabel tetap meliputi volume minyak jelantah sebesar 1.000 mL, suhu reaksi 60 °C, dan volume larutan katalis dalam metanol sebesar 250 mL. Variabel bebas terdiri atas waktu reaksi (20, 40, dan 60 menit) serta kecepatan pengadukan (300, 450, dan 600 rpm).

Parameter yang diamati meliputi densitas, viskositas, titik nyala, angka setana, dan nilai kalor biodiesel.

Prosedur Penelitian

1. Persiapan

Minyak jelantah, metanol, serta larutan katalis NaOH dan KOH dengan konsentrasi 0,5 N disiapkan sesuai kebutuhan percobaan.

2. Proses Pembuatan Biodiesel

Minyak jelantah dimasukkan ke dalam reaktor berpengaduk dan dipanaskan hingga suhu 60 °C. Selanjutnya, metanol dan katalis ditambahkan secara bertahap, kemudian campuran diaduk sesuai variasi kecepatan dan waktu yang telah ditentukan. Setelah reaksi selesai, campuran dialirkan ke tangki pemisah untuk memisahkan biodiesel dan gliserol berdasarkan perbedaan densitas.

3. Proses Pencucian

Biodiesel yang diperoleh dicuci menggunakan aquadest hangat pada suhu 60 °C dengan pengadukan ringan. Proses pencucian diulang hingga air pencuci menjadi jernih, yang menandakan biodiesel telah bersih dari sisa katalis, gliserol, dan pengotor lainnya.

Analisis Karakteristik Biodiesel

Analisis kualitas biodiesel meliputi pengujian viskositas (ISO 12058), densitas (ASTM D1298), titik nyala (ASTM D92), angka setana (ASTM D5856), dan nilai kalor (ASTM D5865). Hasil pengujian dibandingkan dengan standar mutu biodiesel SNI 7182:2015.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja alat transesterifikasi dalam proses pembuatan biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis campuran NaOH dan KOH dengan konsentrasi 0,5 N variasi 1:1. Variabel tetap dalam penelitian ini adalah suhu waktu reaksi sebesar 60 °C dan rasio molar metanol terhadap minyak sebesar 6:1. Adapun variable bebas yang digunakan adalah waktu reaksi (20, 40, 60 menit) serta kecepatan pengadukan (300, 450, dan 600 rpm).

Tabel 1. Analisa Biodiesel Berdasarkan % Yield

NaOH : KOH	No	Waktu (Menit)	Temperatur (°C)	Kecepatan Pengadukan (Rpm)	% Yield
1 : 1	1	20 Menit	60 °C	300	73,91
				450	76,09
				600	77,72
	2	40 Menit	60 °C	300	78,80
				450	80,98
				600	82,61
	3	60 Menit	60 °C	300	83,70
				450	85,87
				600	87,50

Berdasarkan data pengujian terhadap waktu reaksi dan kecepatan pengadukan dalam proses transesterifikasi menggunakan katalis campuran NaOH:KOH (perbandingan 1:1), diperoleh hasil sebagai berikut:

Pada waktu reaksi 20 menit, *yield* tertinggi terjadi pada kecepatan 600 rpm sebesar 77,72%. Peningkatan waktu menjadi 40 menit menunjukkan peningkatan *yield* yang cukup

signifikan, yaitu hingga 82,61% pada 600 rpm. *Yield* tertinggi dicapai pada waktu reaksi 60 menit dan kecepatan pengadukan 600 rpm, yaitu sebesar 87,50%. Dengan demikian, kondisi optimum dalam penelitian ini adalah pada waktu reaksi 60 menit, suhu 60°C, dan kecepatan pengadukan 600 rpm, menghasilkan % *yield* sebesar 87,50%. Analisa dilakukan di Laboratorium Kimia Analisa Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang. Berikut adalah hasil analisa dari sampel:

Tabel 2. Analisa Biodiesel Berdasarkan Karakteristik

Analisa Biodiesel						
Sampel	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (cSt)	Titik Nyala (°C)	Sampel	Cetane Number	Nilai Kalor (Mj/kg)
S1	871	3,8	118,1	S2	53,0	38,7247
S2	875	5,12	113,4	S5	65,4	40,3312
S3	875	5,38	115	S8	56,0	39,3845
S4	875	4,28	112,3			
S5	877	5,57	110,8			
S6	878	4,11	107,1			
S7	878	5,35	127,1			
S8	878	5,95	119			
S9	879	5,43	121,1			

Karakteristik fisik dan kimia biodiesel dari sampel S1 hingga S9 menunjukkan variasi nilai densitas, viskositas, titik nyala, *cetane number*, dan nilai kalor. Densitas biodiesel berkisar antara 871 hingga 879 kg/m³, dengan nilai tertinggi pada sampel S9 (879 kg/m³) dan terendah pada S1 (871 kg/m³). Viskositas kinematik biodiesel berada pada rentang 3,8 hingga 5,95 cSt, dengan nilai tertinggi ditunjukkan oleh S8 dan terendah oleh S1.

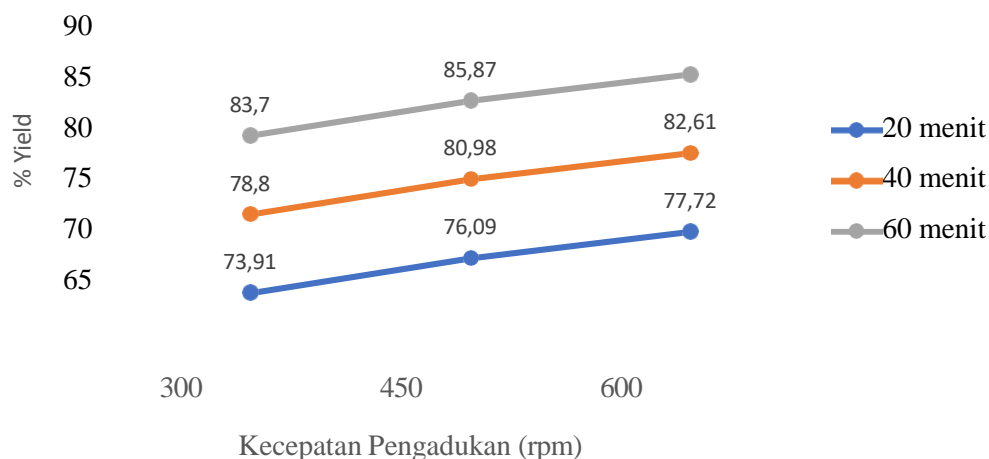
Titik nyala (*flash point*) biodiesel menunjukkan nilai antara 107,1°C (S6) hingga 127,1°C (S7), di mana titik nyala yang tinggi menunjukkan keamanan yang lebih baik terhadap penyalan tak disengaja. Nilai *Cetane Number* tertinggi ditunjukkan oleh S5 yaitu sebesar 65,4, diikuti oleh S8 (56,0) dan S2 (53,0), sedangkan nilai terendah pada sampel lain tidak tersedia. Sedangkan nilai kalor biodiesel berkisar antara 38,7247 MJ/kg (S1) hingga 40,3312 MJ/kg (S5). Nilai kalor tertinggi ini menunjukkan efisiensi energi yang lebih besar.

Pembahasan Hasil Penelitian

Peningkatan waktu reaksi dan kecepatan pengadukan berpengaruh signifikan terhadap mutu biodiesel. Semakin lama waktu reaksi dan semakin cepat pengadukan, maka % *yield*

biodiesel meningkat karena reaksi transesterifikasi berlangsung lebih sempurna. Densitas dan viskositas cenderung menurun, menandakan biodiesel lebih murni dan encer. Titik nyala dan *cetane number* meningkat, menunjukkan kualitas pembakaran yang lebih baik. Sementara itu, nilai kalor juga meningkat karena kandungan energi biodiesel menjadi lebih tinggi akibat reaksi yang lebih efektif. Hal ini membuktikan bahwa pengaturan waktu dan kecepatan pengadukan sangat menentukan kualitas biodiesel yang dihasilkan.

Pengaruh Waktu dan Kecepatan Terhadap % Yield



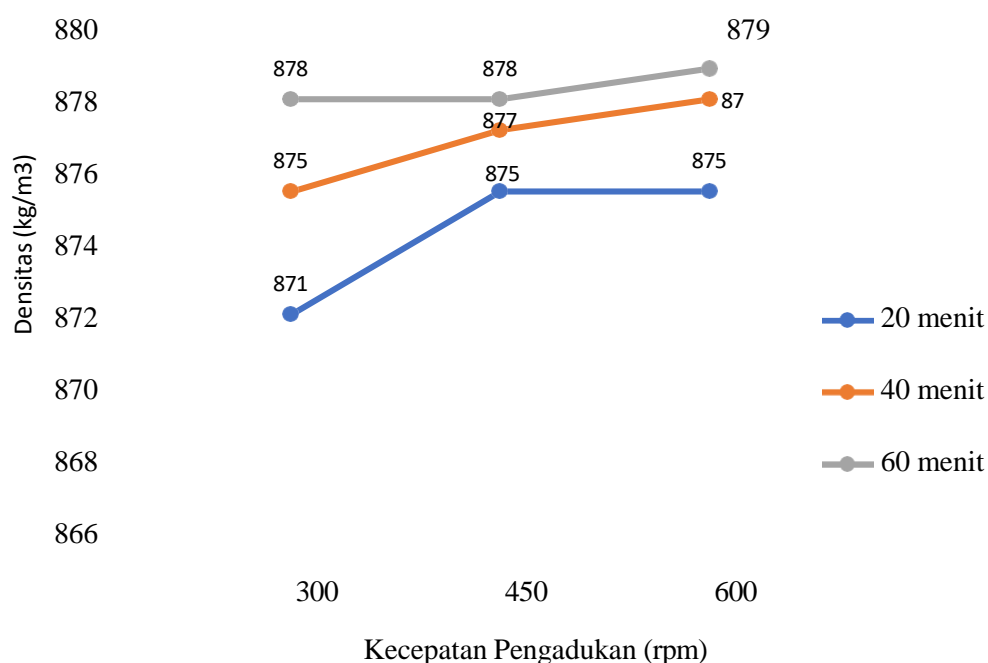
Gambar 1. Grafik Hubungan Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap % Yield Biodiesel yang dihasilkan

Dari Gambar 1. menunjukkan Pengaruh waktu reaksi dan pengaruh kecepatan pengadukan % *yield* biodiesel. Yield biodiesel meningkat dari 73,91% (20 menit, 300 rpm) menjadi 87,50% (60 menit, 600 rpm). Hal ini menunjukkan bahwa waktu reaksi yang lebih lama memberikan kesempatan reaksi transesterifikasi berjalan lebih sempurna. Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi kinetika yang bergantung pada waktu untuk menyelesaikan konversi trigliserida menjadi metil ester (biodiesel). Pengaruh kecepatan pengadukan, kecepatan pengadukan yang lebih tinggi meningkatkan % *yield* karena dapat mempercepat kontak antara metanol dan minyak jelantah, serta mengurangi hambatan difusi pada antar muka dua fase. Pada kecepatan 600 rpm di setiap waktu reaksi (20, 40, 60 menit), % *yield* selalu lebih tinggi dibandingkan 450 rpm dan 300 rpm. Yield tertinggi sebesar 87,50% dicapai pada waktu reaksi 60 menit dengan kecepatan pengadukan 600 rpm, disusul oleh 82,61% pada 40 menit dan 77,72% pada 20 menit di kecepatan yang sama.

Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk menentukan kualitas biodiesel yang dihasilkan. Densitas merupakan salah satu parameter penting karena berpengaruh terhadap performa pembakaran dan efisiensi energi dari bahan bakar tersebut. Densitas yang sesuai standar menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki karakteristik fisik yang mendekati bahan bakar diesel konvensional.

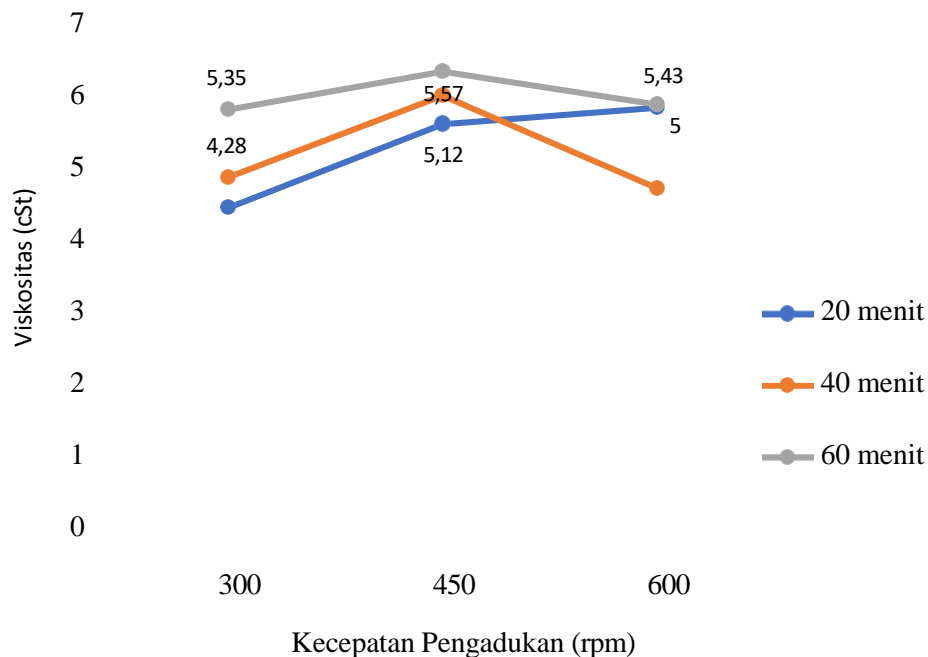
Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran densitas dengan Sembilan sampel biodiesel (S1 – S9), dengan nilai berkisar antara 871 kg/m^3 hingga 879 kg/m^3 . Hasil ini masih berada dalam rentang yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI 7182:2015), yaitu $850 - 890 \text{ kg/m}^3$.



Gambar 2. Grafik Hubungan Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Densitas yang dihasilkan

Seluruh hasil pengukuran menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan dari reaksi transesterifikasi menggunakan katalis campuran NaOH dan KOH berada dalam batas yang sesuai dengan standar. Hal ini menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berjalan secara efektif dalam menghasilkan biodiesel dengan sifat fisik yang baik.

Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Viskositas



Gambar 3. Grafik Hubungan Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Viskositas yang dihasilkan

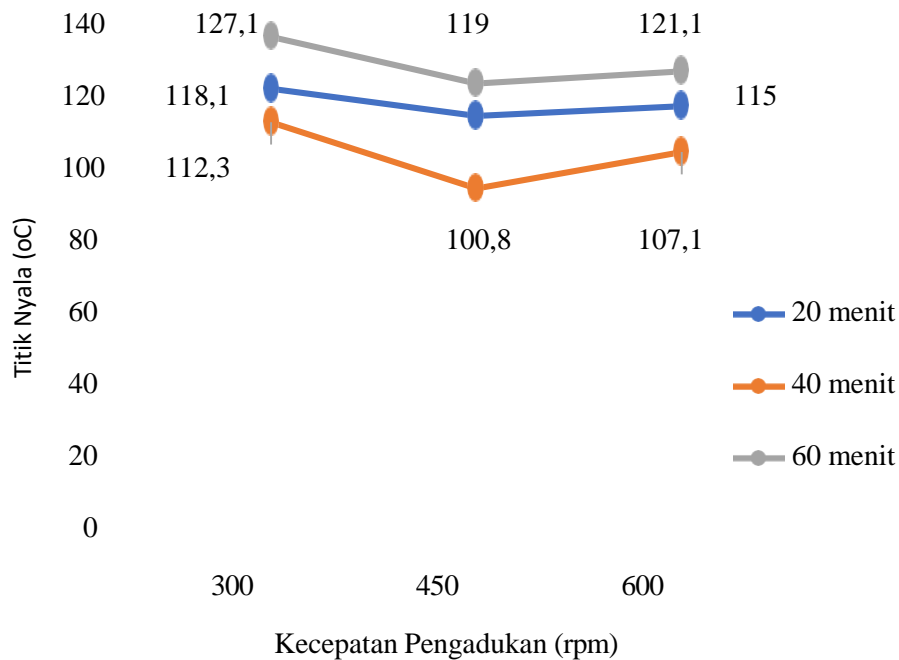
Pengujian viskositas dilakukan untuk mengetahui sejauh mana mutu biodiesel yang dihasilkan mendekati standar kualitas bahan bakar biodiesel yang sesuai. Viskositas merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan performa bahan bakar, khususnya dalam proses atomisasi di dalam mesin diesel.

Berdasarkan hasil pengujian viskositas pada tabel di atas, diperoleh rentang viskositas antara 3.80 cSt hingga 5.95 cSt. Nilai viskositas tertinggi sebesar 5.95 cSt diperoleh pada sampel ke-8, sementara viskositas terendah sebesar 3.80 cSt terjadi pada sampel ke-1.

Standar viskositas biodiesel menurut SNI 7182:2015 berkisar antara 2.3 – 6.0 cSt pada suhu 40°C. Dengan demikian, seluruh sampel dalam penelitian ini masih berada dalam batas satandar nasional yang diperbolehkan. Nilai viskositas yang bervariasi ini dipengaruhi oleh parameter proses seperti suhu, rasio molar, jenis dan konsentrasi katalis, serta waktu reaksi transesterifikasi. Viskositas yang terlalu rendah juga bisa menunjukkan adanya kelebihan metanol yang belum terpisahkan dengan baik setelah proses pencucian biodiesel. Secara keseluruhan, hasil viskositas menunjukkan bahwa formulasi campuran katalis NaOH dan KOH dalam konsentrasi 0,5 N dapat menghasilkan biodiesel dengan mutu viskositas yang baik.

Pengaruh Waktu dan Kecepatan Terhadap Titik Nyala

Uji titik nyala dilakukan untuk mengetahui suhu minimum dimana uap biodiesel dapat terbakar sesaat setelah terkena api. Titik nyala ini menjadi indikator penting dalam menentukan keamanan penyimpanan dan transportasi bahan bakar biodiesel. Adapun Standar SNI biodiesel uji titik nyala yaitu SNI 7182 : 2015 minimum 100°C.

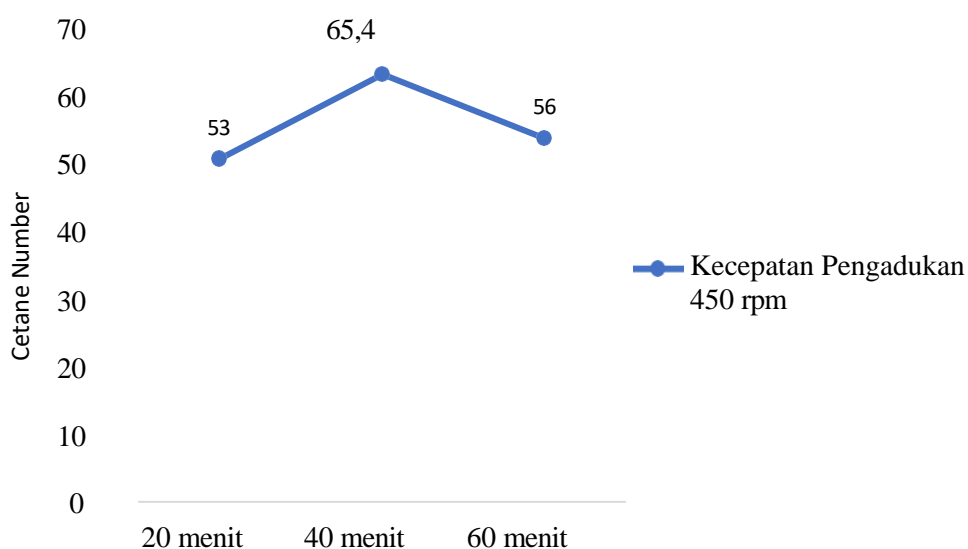


Gambar 4. Grafik Hubungan Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pegadukan Terhadap Titik Nyala yang Dihasilkan

Dari gambar 4 menunjukkan hubungan antara waktu reaksi (20, 40, 60 menit) serta kecepatan pengadukan (300, 450, 600 rpm) terhadap titik nyala (°C) biodiesel yang dihasilkan. Semakin lama waktu reaksi dan semakin tinggi kecepatan pengadukan, maka titik nyala yang dihasilkan cenderung meningkat. Dari data yang didapatkan titik nyala terendah berada pada waktu 40 menit dengan kecepatan pengadukan 450 rpm dengan nilai 100,8 °C, sedangkan untuk titik nyala tertinggi berada pada waktu 60 menit dengan kecepatan pengadukan 300 rpm dengan nilai 127,1 °C. Dari data yang didapatkan bahwa seluruh sampel termasuk kualitas sampel biodiesel berdasarkan titik nyala sudah baik, karena sudah termasuk dalam standar SNI 7182:2015, yang mensyaratkan titik nyala berada diatas nilai minimum 100 °C. Hal ini menunjukkan bahwa proses produksi biodiesel yang digunakan dalam penelitian ini sudah stabil dan mampu menghasilkan biodiesel dengan kualitas yang memenuhi standar titik nyala.

Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap *Cetane Number*

Cetane Number (angka setana) adalah salah satu sifat bahan bakar terpenting yang mengukur karakteristik penyalaan otomatis bahan bakar pada mesin diesel bertenaga. Angka setana yang lebih tinggi menunjukkan bahan bakar yang lebih mudah menyala dan terbakar lebih bersih di dalam mesin diesel. Jadi bahan bakar yang memiliki angka setana yang lebih tinggi menunjukkan tingkat pembakaran yang lebih tinggi, penundaan penyalaan yang lebih pendek dan pembakaran bahan bakar yang tidak bersuara dan lebih halus. Sebaliknya jika angka setana yang lebih rendah menyebabkan mesin sulit dihidupkan di lingkungan dingin, timbulnya polutan dari knalpot mesin dan mengalami penundaan pengapian. Adapun standar SNI nya adalah Minimal 51.



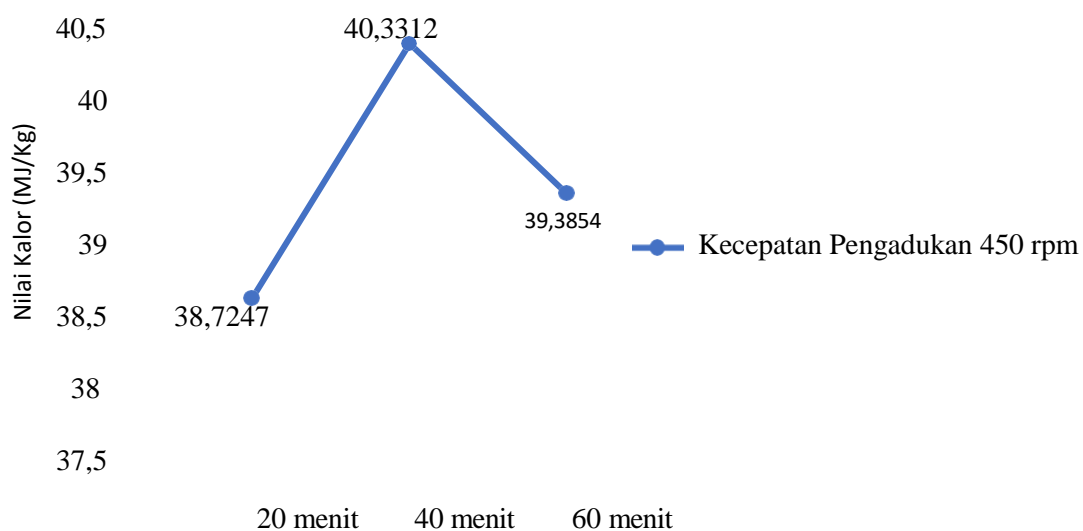
Gambar 5. Grafik Hubungan Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap *Cetane Number* yang dihasilkan

Dari gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan pengadukan berpengaruh positif terhadap nilai *cetane number* biodiesel. Pada kecepatan pengadukan 300 rpm, *cetane number* yang dihasilkan sebesar 53 dengan waktu reaksi 20 menit. Ketika kecepatan ditingkatkan menjadi 450 rpm, *cetane number* naik signifikan menjadi 65,4 dengan waktu reaksi 40 menit. Pada kecepatan 600 rpm, nilai *cetane number* sedikit menurun menjadi 56 meskipun waktu reaksi bertambah menjadi 60 menit. Dari hasil ini terlihat bahwa kecepatan pengadukan optimal terdapat pada 450 rpm, yang menghasilkan *cetane number* tertinggi. Seluruh sampel tetap memenuhi standar SNI 7182:2015 minimal 51, sehingga biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas pembakaran yang baik. Peningkatan *cetane number*

menunjukkan kualitas bahan bakar yang lebih baik karena mampu menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna, efisien, dan ramah lingkungan.

Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Nilai Kalor

Nilai kalor (*heating value*) merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kualitas biodiesel yang dihasilkan. Nilai kalor yang tinggi menandakan bahwa biodiesel memiliki kemampuan pembakaran yang baik dan efisien sebagai bahan bakar alternatif. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian nilai kalor biodiesel yang diproduksi dari minyak jelantah dengan menggunakan katalis campuran NaOH dan KOH, dengan variasi kecepatan pengadukan dan waktu reaksi.



Gambar 6. Grafik Hubungan Pengaruh Waktu dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Nilai Kalor yang dihasilkan

Dari gambar 6 diatas menunjukkan hubungan antara kecepatan pengadukan (300, 450, dan 600 rpm) serta waktu reaksi (20, 40, dan 60 menit) terhadap nilai kalor biodiesel. Berdasarkan grafik, terlihat adanya peningkatan nilai kalor seiring dengan peningkatan kecepatan pengadukan dan waktu reaksi. Pada kecepatan pengadukan 300 rpm dan waktu reaksi 20 menit, nilai kalor yang dihasilkan sebesar 38,7247 MJ/kg. Ketika kecepatan dinaikkan menjadi 450 rpm dan waktu reaksi ditingkatkan menjadi 40 menit, nilai kalor meningkat menjadi 40,3312 MJ/kg. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pengadukan yang lebih cepat mampu meningkatkan efisiensi pencampuran antara metanol dan minyak jelantah, serta mempercepat reaksi transesterifikasi. Nilai kalor tertinggi tercatat pada kecepatan pengadukan 600 rpm dan waktu reaksi 60 menit, yaitu 39,3854 MJ/kg. Walaupun nilai kalor

ini sedikit lebih rendah dibandingkan pada kecepatan 450 rpm, hal ini dapat disebabkan oleh kemungkinan terjadinya reaksi balik atau penguapan metanol yang berlebihan pada kecepatan tinggi dan waktu reaksi yang terlalu lama, sehingga menurunkan efisiensi pembentukan ester. Dari ketiga sampel di atas dapat disimpulkan bahwa kualitas biodiesel sudah baik karena sudah termasuk dalam standar SNI 7182:2015 berkisar 37 – 41 MJ/kg.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengoptimalkan kinerja alat transesterifikasi dalam proses pembuatan biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis campuran natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH) dengan perbandingan 1:1 pada konsentrasi 0,5 N. Variasi waktu reaksi dan kecepatan pengadukan terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas biodiesel yang dihasilkan. Peningkatan kedua variabel tersebut mampu memperbaiki proses pencampuran antara metanol dan minyak jelantah, mempercepat reaksi transesterifikasi, serta meningkatkan konversi trigliserida menjadi metil ester secara lebih sempurna.

Berdasarkan hasil penelitian, kondisi optimum dicapai pada waktu reaksi 60 menit, suhu 60°C, dan kecepatan pengadukan 600 rpm. Pada kondisi tersebut, diperoleh yield biodiesel tertinggi yaitu sebesar 87,50%. Hasil ini menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi berlangsung secara optimal pada parameter tersebut. Selain itu, karakteristik biodiesel yang dihasilkan dalam penelitian ini telah memenuhi standar SNI 7182:2015. Densitas biodiesel berada dalam rentang 871 hingga 879 kg/m³, viskositas kinematik berkisar antara 3,80 hingga 5,95 cSt, titik nyala melebihi 100°C, angka setana (*cetane number*) tertinggi mencapai 65,4, dan nilai kalor berada pada kisaran 38,7 hingga 40,3 MJ/kg. Semua parameter tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik, aman digunakan, dan layak sebagai bahan bakar alternatif.

Penggunaan katalis campuran NaOH dan KOH 1:1 dalam penelitian ini terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi proses transesterifikasi. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pengaturan parameter proses, terutama waktu reaksi dan kecepatan pengadukan, sangat berperan dalam menentukan kualitas dan kuantitas biodiesel yang dihasilkan. Dengan demikian, metode yang diterapkan dalam penelitian ini dapat menjadi salah satu alternatif untuk meningkatkan kualitas biodiesel berbasis minyak jelantah.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, maka disampaikan beberapa saran sebagai berikut: Peningkatan kapasitas alat dapat menjadi fokus pengembangan selanjutnya agar dapat diaplikasikan dalam skala industri kecil hingga menengah, serta dilengkapi sistem kontrol otomatis yang lebih terintegrasi. Sebaiknya penelitian selanjutnya mengeksplorasi variasi parameter lain, seperti rasio molar metanol terhadap minyak, suhu reaksi, atau penggunaan jenis katalis lain agar diketahui pengaruhnya terhadap efisiensi produksi dan kualitas biodiesel.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkareem, A. N., & Nasir, N. F. (2022). Biodiesel Production from Canola Oil Using TiO_2CaO as a Heterogenous Catalyst. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 93(2), 125–137. <https://doi.org/10.37934/arfmts.93.2.125137>
- Africana, S. (2024). *PROCESS EVALUATION FOR PRODUCTION OF BIODIESEL USING COOKING OIL 1 Usiayo, 1 V.A. and 2 Oriji, O.G.* 23(5), 191–200.
- Alsaiani, R. A., Musa, E. M., & Rizk, M. A. (2024). Biodiesel Synthesis from Date Seed Oil Using Camel Dung as a Novel Green Catalyst: An Experimental Investigation. *Catalysts*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/catal14090643>
- Alsultan, A. G., Asikin-Mijan, N., Ibrahim, Z., Yunus, R., Razali, S. Z., Mansir, N., Islam, A., Seenivasagam, S., & Taufiq-Yap, Y. H. (2021). A short review on catalyst, feedstock, modernised process, current state and challenges on biodiesel production. *Catalysts*, 11(11), 1–36. <https://doi.org/10.3390/catal11111261>
- Demirbas, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, 50(1), 14–34. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>
- Dimawarnita, F., Arfiana, A. N., Mursidah, S., Maghfiroh, S. R., & Suryadarma, P. (2021). Produksi Biodiesel Berbasis Minyak Nabati Menggunakan Aspen Hysys. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(1), 98–109. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.1.98>
- Dubey, A., Prasad, R. S., & Singh, J. K. (2020). An Analytical and Economical Assessment of the Waste Cooking Oil based Biodiesel using Optimized Conditions on the Process Variables. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 00(00), 1–16. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1839600>

- Fadhilah, R., Kurniasih, E., & Rifary, M. A. (2018). Performance of prototype portable bio-adsorber for waste cooking oil purification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 420(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012024>
- Farouk, S. M., Tayeb, A. M., Abdel-Hamid, S. M. S., & Osman, R. M. (2024). Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 12722–12747. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32027-4>
- Jain, S., Kumar, N., Singh, V. P., Mishra, S., Sharma, N. K., Bajaj, M., & Khan, T. M. Y. (2023). Transesterification of Algae Oil and Little Amount of Waste Cooking Oil Blend at Low Temperature in the Presence of NaOH. *Energies*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/en16031293>
- Kayode, B., & Hart, A. (2019). An overview of transesterification methods for producing biodiesel from waste vegetable oils. *Biofuels*, 10(3), 419–437. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1306683>
- Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances*, 28(4), 500–518. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.03.002>
- Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y., & Wang, C. H. (2016). Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. *Energy Conversion and Management*, 123, 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.071>
- Megawati, E., Ardiansyah, A., Mukminin, A., Ariyani, D., Yuniarti, Y., & Lutfi, M. (2022). Analisis Sifat Fisika dan Nilai Keekonomian Minyak Goreng Bekas Menjadi Biodiesel Dengan Metode Transesterifikasi. *Al-Kimiya*, 9(1), 48–54. <https://doi.org/10.15575/ak.v9i1.17962>
- Monika, Banga, S., & Pathak, V. V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Energy Nexus*, 10(May), 100209. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100209>
- Padil, P., Wahyuningsih, S., & Awaluddin, A. (2012). Pembuatan Biodiesel dari Minyak Kelapa melalui Reaksi Metanolisis Menggunakan Katalis CaCO₃ yang dipijarkan. *Jurnal Natur Indonesia*, 13(1), 27. <https://doi.org/10.31258/jnat.13.1.27-32>

- Pasaribu, A. T., Sigit Lestari, R. A., & Firyanto, R. (2023). Pembuatan Biodiesel Dengan Cara Adsorpsi Kulit Pisang Kepok Dan Transesterifikasi Dari Minyak Goreng Bekas. *CHEMTAG Journal of Chemical Engineering*, 3(2), 40. <https://doi.org/10.56444/cjce.v3i2.3151>
- Prasetya, B. (2016). Badan standardisasi nasional tahun 2015. *Laporan Tahunan BSN 2015*, 1, 133.
- Pratiwi, A. K., Styana, U. I. F., & Kurniawan, A. (2023). Proses Produksi Biofuel Minyak Jelantah Production Process of Cooking Oil Biofuel Using Koh and Naoh Catalyst Variations At Ngentak Kutowinangun Lor. *Prosiding Webinar ITY Green Tchnology*, 45–54.
- Ramadhani, D., Muh, P., & Mardhiyah, I. (2024). *MINYAK JELANTAH*. 7(2). Ramírez, J., Buestán, L., López-Maldonado, E. A., & Pinos-Vélez, V. (2023). Preparation and Physicochemical Characterization of Biodiesel from Recycled Vegetable Oil in Cuenca, Ecuador by Transesterification Catalyzed by KOH and NaOH. *Eng*, 4(1), 954–963. <https://doi.org/10.3390/eng4010056>
- Rusdianasari, Syarif, A., Yerizam, M., Yusi, M. S., Kalsum, L., & Bow, Y. (2020). Effect of Catalysts on the Quality of Biodiesel from Waste Cooking Oil by Induction Heating. *Journal of Physics: Conference Series*, 1500(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012052>
- Saini, R. D. (2017). *Conversion of Waste Cooking Oil to Biodiesel*. 11(1), 9–21. Saputra, A. T., Wicaksono, M. A., & Irsan, I. (2018). Pemanfaatan Minyak Goreng Bekas untuk Pembuatan Biodiesel Menggunakan Katalis Zeolit Alat Teraktivasi. *Jurnal Chemurgy*, 1(2), 1. <https://doi.org/10.30872/cmg.v1i2.1138>
- Setiadji, S., B, N. T., Sudiartati, T., Prabowo, E., & N, B. W. (2017). Alternatif Pembuatan Biodiesel Melalui Transesterifikasi Minyak Castor (*Ricinus communis*) Menggunakan Katalis Campuran Cangkang Telur Ayam dan Kaolin. *Jurnal Kimia VALENSI*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.15408/jkv.v3i1.4778>
- Shahab, A., & Husnah, H. (2022). Produksi Biodiesel Dari Minyak Biji Karet Dengan Teknologi Transesterifikasi Menggunakan Katalis Koh. *Jurnal Redoks*, 7(2), 33–38. <https://doi.org/10.31851/redoks.v7i2.9532>
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., Sharma, P. K., & Jhalani, A. (2021). A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its

- use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock. *Journal of Cleaner Production*, 307(May 2020), 127299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127299>
- Suryanto, S., Abadi, S., Amanah, B., & Wahyudin, W. (2021). Rancang Bangun Mesin Produksi Biodiesel Sistem Kontinyu Kapasitas 400 Liter/Jam. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 18(2), 213–223. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v18i2.2645>
- Tjiwidjaja, H., & Salima, R. (2023). *Dampak Energi Fosil Terhadap Perubahan Iklim Dan Solusi Berbasis Energi Hijau*. 2(2), 166–172.
- Ulukardesler, A. H. (2023). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Different Types of Catalysts. *Processes*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/pr11072035>