

Kajian Jumlah Katalis Bonggol Jagung yang Dikalsinasi dan Variasi Waktu Reaksi terhadap Karakteristik Biodiesel dari Minyak Goreng

Roni Leonardo Simbolon^{*)}, Mohammad Prasanto Bimantio, Reza Widyasaputra

Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian,
INSTIPER Yogyakarta

^{*)}Email Korespondensi: ronileonardosimbolon11@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jumlah katalis bonggol jagung yang dikalsinasi dan lama waktu reaksi terhadap rendemen serta karakteristik biodiesel yang dihasilkan dari minyak goreng. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya kebutuhan energi terbarukan dan perlunya pengembangan katalis heterogen yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, serta mudah dipisahkan dari produk akhir. Bonggol jagung dipilih sebagai bahan baku katalis karena mengandung senyawa basa aktif, seperti kalium oksida (K_2O) dan kalsium oksida (CaO), yang berpotensi mempercepat reaksi transesterifikasi. Penelitian ini menggunakan rancangan acak sempurna (RAS) dengan dua faktor, yaitu jumlah katalis yang terdiri atas tiga taraf (0,25%, 0,50%, dan 0,75%) serta lama waktu reaksi yang meliputi 15 menit, 30 menit, dan 45 menit dengan dua kali pengulangan. Katalis dibuat melalui proses kalsinasi pada suhu 800–1000 °C selama tiga jam, kemudian digunakan dalam proses transesterifikasi minyak goreng dengan metanol. Parameter yang diamati meliputi rendemen, kadar air, viskositas, angka asam, dan kadar asam lemak bebas (FFA). Data dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) dan dilanjutkan dengan uji Duncan pada taraf signifikansi 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi antara jumlah katalis dan lama waktu reaksi terhadap rendemen biodiesel. Perlakuan katalis sebesar 0,25% dan waktu reaksi 15 menit menghasilkan rendemen tertinggi sebesar 60,50%. Secara umum, peningkatan jumlah katalis dan lama waktu reaksi menyebabkan penurunan rendemen akibat meningkatnya viskositas campuran dan kemungkinan terjadinya reaksi saponifikasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa katalis heterogen berbasis bonggol jagung berpotensi digunakan sebagai alternatif katalis yang efektif, ekonomis, dan berkelanjutan dalam produksi biodiesel.

Kata Kunci: Biodiesel, Bonggol jagung, Kalsinasi, Katalis heterogen, Transesterifikasi, Rendemen.

PENDAHULUAN

Energi merupakan fondasi utama bagi aktivitas ekonomi dan sosial masyarakat modern, sementara peningkatan penduduk dan industrialisasi terus mendorong kebutuhan energi global. Ketergantungan pada bahan bakar fosil menimbulkan persoalan berupa keterbatasan sumber daya dan peningkatan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023)(International Energy Agency, 2023). Indonesia menghadapi tantangan serupa karena meningkatnya kebutuhan energi dan kendaraan bermotor di tengah penurunan produksi minyak domestik. Kondisi tersebut

mendorong pengembangan energi terbarukan, salah satunya biodiesel melalui program pencampuran biodiesel seperti B30 dan B35 (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022).

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif berupa ester metil asam lemak (Fatty Acid Methyl Ester/FAME) yang dihasilkan melalui reaksi transesterifikasi minyak nabati atau lemak hewani dengan alkohol, umumnya metanol. Biodiesel memiliki keunggulan berupa sifat biodegradable, tidak beracun, kandungan sulfur rendah, dan titik nyala lebih tinggi dibandingkan solar konvensional (Knothe *et al.*, 2015). Minyak goreng baru memiliki karakteristik yang relatif stabil karena belum mengalami degradasi akibat penggorengan berulang, sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan baku biodiesel. Tingginya konsumsi minyak goreng di Indonesia juga menunjukkan adanya potensi ketersediaan bahan baku yang besar untuk mendukung diversifikasi energi dan peningkatan nilai tambah ekonomi.

Produksi biodiesel dari minyak goreng tetap menghadapi tantangan teknis, terutama terkait kandungan asam lemak bebas (FFA), suhu, rasio alkohol terhadap minyak, jumlah katalis, dan waktu reaksi. Penggunaan katalis homogen seperti NaOH dan KOH memang memiliki aktivitas tinggi, tetapi sulit dipisahkan dari produk, berpotensi menyebabkan korosi, dan menghasilkan limbah cair (Leung *et al.*, 2010). Oleh karena itu, katalis heterogen berbasis biomassa menjadi alternatif yang lebih menarik karena mudah dipisahkan, berpotensi digunakan kembali, dan dapat memanfaatkan limbah pertanian. Bonggol atau tongkol jagung merupakan salah satu bahan yang potensial karena melalui pembakaran dan kalsinasi dapat menghasilkan senyawa basa seperti K_2O dan CaO yang berpotensi berfungsi sebagai katalis (Ho *et al.*, 2014).

Proses kalsinasi dapat meningkatkan aktivitas katalitik bonggol jagung dengan mengubah senyawa karbonat menjadi oksida basa yang lebih reaktif. Penelitian Hattori (2001) menunjukkan bahwa biodiesel dari minyak jelantah dengan katalis heterogen berbasis biomassa dapat diproduksi dengan hasil yang cukup baik, tetapi kajian mengenai kondisi optimum reaksi untuk memperoleh rendemen dan kualitas biodiesel yang maksimal masih terbatas. Parameter seperti jumlah katalis, rasio molar metanol terhadap minyak, suhu, dan waktu reaksi sangat menentukan konversi trigliserida menjadi metil ester. Karena itu, studi lanjutan diperlukan untuk meningkatkan konsistensi rendemen, meminimalkan produk samping, dan memastikan karakteristik biodiesel memenuhi standar mutu.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini merupakan studi lanjutan mengenai produksi biodiesel dari minyak goreng menggunakan katalis heterogen bonggol jagung yang dikalsinasi. Penelitian difokuskan pada pengujian kondisi operasi, khususnya variasi jumlah katalis dan waktu reaksi, untuk memperoleh kondisi yang menghasilkan rendemen dan karakteristik biodiesel secara optimal. Selanjutnya, biodiesel pada kondisi optimum dievaluasi berdasarkan kesesuaiannya dengan standar mutu biodiesel sesuai SNI yang berlaku. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh variasi jumlah (massa) katalis bonggol jagung yang dikalsinasi terhadap rendemen dan karakteristik biodiesel; (2) menganalisis pengaruh variasi waktu reaksi terhadap rendemen dan karakteristik biodiesel; dan (3) mengevaluasi kesesuaian karakteristik biodiesel pada kondisi optimum dengan standar mutu biodiesel berdasarkan SNI yang berlaku.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Teknologi Pertanian, Instiper Yogyakarta, selama satu bulan. Penelitian menggunakan bonggol jagung sebagai bahan baku katalis heterogen, minyak goreng sebagai bahan baku biodiesel, KOH sebagai bahan aktivator, akuades, dan indikator fenolftalein (PP). Peralatan yang digunakan meliputi

peralatan gelas, alat ukur dan analisis, peralatan pemanas, serta peralatan pendukung reaksi. Rancangan percobaan yang diterapkan adalah rancangan acak sempurna (RAS) dua faktor dengan dua kali pengulangan. Faktor pertama berupa konsentrasi katalis, yaitu 0,25%, 0,50%, dan 0,75% dari massa minyak, sedangkan faktor kedua berupa lama reaksi transesterifikasi, yaitu 15, 30, dan 45 menit. Dengan demikian, terdapat 18 satuan percobaan yang digunakan untuk menentukan kondisi optimum dalam produksi biodiesel. Tahapan penelitian meliputi preparasi bonggol jagung, proses pengeringan, penghalusan, pengayakan, dan kalsinasi pada suhu 800–1000 °C selama tiga jam untuk menghasilkan katalis aktif. Selanjutnya, biodiesel diproduksi melalui proses transesterifikasi dengan variasi jumlah katalis dan lama reaksi sesuai rancangan percobaan. Hasil reaksi kemudian dicuci menggunakan akuades panas dan dipanaskan kembali untuk menghilangkan sisa air dan metanol. Biodiesel yang dihasilkan dianalisis berdasarkan parameter rendemen, viskositas, angka asam, titik nyala, kadar metanol, dan parameter lain sesuai standar SNI 7182:2015. Data penelitian dianalisis menggunakan uji analisis varians (ANOVA) untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap karakteristik biodiesel dan menentukan perlakuan terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengkaji pengaruh berbagai konsentrasi katalis heterogen (yang dibuat dari tongkol jagung) dan waktu reaksi terhadap kualitas biodiesel melalui serangkaian pengujian, yang mencakup rendemen, kadar air, bilangan asam, kadar asam lemak bebas (FFA), dan viskositas.

Rendemen Biodiesel (*Yield*)

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi antara variasi jumlah katalis dengan lama reaksi transesterifikasi terhadap rendemen biodiesel. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap rendemen biodiesel disajikan pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap rendemen biodiesel

Jumlah Katalis (%)	Lama Waktu Reaksi Transesterifikasi (menit)			Rerata
	15	30	45	
0,25	60,50	58,50	57,00	58,66a
0,50	57,50	55,50	54,50	55,83b
0,75	55,50	52,50	50,50	52,83c
Rerata	57,83p	55,50q	54,00r	-

Keterangan: Jika nilai rata-rata perlakuan dalam baris atau kolom yang sama memiliki huruf yang sama, maka tidak terdapat perbedaan yang nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%.

(-) : Tidak ada interaksi nyata

Tabel 1 menunjukkan bahwa jumlah katalis memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap jumlah katalis. Penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi sebanyak 0,25% menghasilkan rendemen biodiesel tertinggi, sedangkan peningkatan jumlah katalis hingga 0,50% dan 0,75% justru menurunkan rendemen. Fenomena ini menunjukkan bahwa proses transesterifikasi tidak hanya dipengaruhi oleh banyaknya katalis, tetapi juga oleh tercapainya jumlah situs basa aktif yang optimum. Pada konsentrasi katalis yang sesuai, ion metoksida (CH_3O^-) yang terbentuk mampu mengonversi trigliserida menjadi metil ester secara efisien. Sebaliknya, penambahan katalis yang berlebihan dapat meningkatkan viskositas campuran

reaksi, menghambat perpindahan massa antara fase minyak dan metanol, serta meningkatkan peluang terjadinya reaksi saponifikasi yang mengurangi pembentukan biodiesel. Kondisi tersebut menyebabkan rendemen biodiesel tidak lagi meningkat meskipun jumlah katalis ditambah (Lam *et al.*, 2010).

Peran katalis heterogen berbasis bonggol jagung dalam penelitian ini diduga berasal dari terbentuknya oksida logam basa, terutama K_2O dan CaO , selama proses kalsinasi. Senyawa tersebut menyediakan situs aktif basa yang berfungsi mendeprotonasi metanol sehingga menghasilkan ion metoksida sebagai nukleofil utama dalam reaksi transesterifikasi. Ion metoksida kemudian menyerang gugus karbonil trigliserida dan menghasilkan metil ester serta gliserol. Ketika jumlah katalis berada pada kondisi optimum, pembentukan ion metoksida berlangsung lebih efisien sehingga konversi trigliserida meningkat. Namun, apabila jumlah katalis melebihi kondisi optimum, peningkatan jumlah situs aktif tidak lagi diikuti oleh peningkatan konversi karena terjadinya hambatan perpindahan massa dan pembentukan produk samping berupa sabun (Atabani *et al.*, 2012). Berdasarkan variasi waktu reaksi, penelitian ini menunjukkan bahwa waktu reaksi 15 menit menghasilkan rendemen biodiesel tertinggi, sedangkan perpanjangan waktu hingga 30 dan 45 menit menyebabkan penurunan rendemen. Hasil ini mengindikasikan bahwa reaksi transesterifikasi telah mencapai kondisi optimum dalam waktu relatif singkat. Setelah kesetimbangan reaksi tercapai, perpanjangan waktu tidak lagi meningkatkan konversi trigliserida secara signifikan, bahkan dapat memicu reaksi balik (reverse transesterification) antara metil ester dan gliserol maupun reaksi hidrolisis yang menghasilkan kembali asam lemak bebas. Selain itu, kontak reaksi yang lebih lama meningkatkan peluang terbentuknya sabun sehingga pemisahan biodiesel menjadi kurang efisien dan rendemen menurun (Ma & Hanna, 1999).

Hasil penelitian ini sejalan dengan Choe & Min (2007) yang menyatakan bahwa rendemen biodiesel sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, seperti jumlah katalis dan waktu reaksi, di mana setiap sistem memiliki kondisi optimum yang berbeda. Demikian pula, Lam *et al.* (2010) menjelaskan bahwa penggunaan katalis heterogen dalam jumlah yang berlebihan tidak selalu meningkatkan konversi biodiesel karena dapat menimbulkan hambatan perpindahan massa dan meningkatkan pembentukan produk samping. Oleh karena itu, penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi sebanyak 0,25% dengan waktu reaksi 15 menit pada penelitian ini menunjukkan bahwa katalis heterogen berbasis biomassa mampu menghasilkan rendemen biodiesel optimum dengan penggunaan katalis yang relatif rendah dan waktu reaksi yang singkat.

Kadar Air

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi antara variasi jumlah katalis dengan lama reaksi transesterifikasi terhadap kadar air biodiesel. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap kadar air biodiesel disajikan pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap kadar air biodiesel

Jumlah Katalis (%)	Lama Waktu Reaksi Transesterifikasi (menit)			Rerata
	15	30	45	
0,25	0,52	0,52	0,50	0,51a
0,50	0,51	0,50	0,49	0,49b
0,75	0,49	0,48	0,47	0,48c
Rerata	0,51p	0,49q	0,48r	-

Keterangan: Jika nilai rata-rata perlakuan dalam baris atau kolom yang sama memiliki huruf yang sama, maka tidak terdapat perbedaan yang nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%.

(-) : Tidak ada interaksi nyata

Tabel 2 menunjukkan bahwa jumlah katalis memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap kadar air biodiesel. Penggunaan jumlah katalis 0,25% menghasilkan rerata kadar air tertinggi, yaitu sebesar 0,51%, sedangkan penggunaan katalis 0,75% menghasilkan rerata kadar air terendah, yaitu sebesar 0,48%. Lama waktu reaksi transesterifikasi juga memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap kadar air biodiesel. Lama reaksi 15 menit menghasilkan rerata kadar air tertinggi sebesar 0,51%, sedangkan lama reaksi 45 menit menghasilkan rerata kadar air terendah sebesar 0,48%. Tidak terdapat interaksi nyata antara jumlah katalis dan lama waktu reaksi transesterifikasi terhadap kadar air biodiesel.

Peningkatan jumlah katalis menyebabkan kadar air biodiesel cenderung menurun. Pada penelitian ini, penggunaan katalis sebanyak 0,75% menghasilkan kadar air terendah sebesar 0,48%. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah katalis yang lebih tinggi mampu meningkatkan efektivitas proses transesterifikasi sehingga pembentukan metil ester berlangsung lebih sempurna. Reaksi yang berlangsung lebih optimal mempermudah pemisahan biodiesel dari gliserol, metanol, dan sisa air sehingga kadar air yang tertinggal dalam produk biodiesel menjadi lebih rendah.

Berdasarkan variasi waktu reaksi, lama reaksi juga memberikan pengaruh nyata terhadap kadar air biodiesel. Lama reaksi 15 menit menghasilkan kadar air tertinggi dengan nilai rata-rata 0,51%, kemudian menurun menjadi 0,49% pada waktu reaksi 30 menit, dan mencapai nilai terendah sebesar 0,48% pada waktu reaksi 45 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu reaksi transesterifikasi, kadar air biodiesel cenderung semakin rendah.

Waktu reaksi yang lebih lama memberikan kesempatan yang lebih besar bagi trigliserida dan metanol untuk bereaksi secara sempurna sehingga konversi menjadi metil ester meningkat. Selain itu, proses pemisahan antara biodiesel, gliserol, metanol sisa, dan air berlangsung lebih efektif sehingga kandungan air yang masih terikut dalam biodiesel dapat berkurang. Penurunan kadar air merupakan salah satu indikator meningkatnya kualitas biodiesel karena kandungan air yang rendah dapat meningkatkan stabilitas penyimpanan serta mengurangi risiko korosi pada sistem bahan bakar.

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi dan variasi lama waktu reaksi berpengaruh nyata terhadap kadar air biodiesel, tetapi tidak menunjukkan adanya interaksi nyata antara kedua faktor tersebut. Kondisi terbaik diperoleh pada penggunaan katalis 0,75% dengan lama reaksi 45 menit yang menghasilkan kadar air sebesar 0,47%, yaitu nilai terendah di antara seluruh kombinasi perlakuan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis dan waktu reaksi hingga kondisi optimum mampu menghasilkan biodiesel dengan kadar air yang lebih rendah sehingga mutu biodiesel menjadi lebih baik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis bonggol jagung terkalsinasi menyebabkan kadar air biodiesel cenderung menurun. Penggunaan katalis sebanyak 0,75% menghasilkan kadar air terendah dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah katalis yang lebih tinggi mampu meningkatkan efektivitas reaksi transesterifikasi melalui penyediaan lebih banyak situs basa aktif yang mempercepat pembentukan ion metoksida. Konversi trigliserida menjadi metil ester yang lebih sempurna mengurangi keberadaan senyawa pengotor, seperti metanol, gliserol, dan air, sehingga proses pemisahan biodiesel berlangsung lebih efektif. Endalew *et al.* (2011) menjelaskan

bahwa peningkatan aktivitas katalis heterogen akan meningkatkan efisiensi reaksi hingga mencapai kondisi optimum, sehingga produk biodiesel yang dihasilkan memiliki kemurnian lebih tinggi dan kandungan pengotor lebih rendah.

Selain dipengaruhi oleh aktivitas katalis, kadar air biodiesel juga berkaitan dengan efisiensi proses pemurnian setelah reaksi transesterifikasi. Air yang masih tertinggal dalam biodiesel umumnya berasal dari sisa pencucian, kelembapan bahan baku, maupun air yang terbentuk selama reaksi samping. Semakin sempurna konversi trigliserida menjadi metil ester, semakin mudah biodiesel dipisahkan dari gliserol dan fase cair lainnya sehingga kandungan air dalam produk akhir menjadi lebih rendah. Menurut Boro *et al.* (2012), biodiesel dengan kadar air rendah memiliki stabilitas penyimpanan yang lebih baik karena mampu mengurangi terjadinya hidrolisis metil ester menjadi asam lemak bebas selama penyimpanan.

Pengaruh lama waktu reaksi pada penelitian ini menunjukkan bahwa kadar air biodiesel menurun seiring bertambahnya waktu reaksi, dengan nilai terendah diperoleh pada 45 menit. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa waktu reaksi yang lebih lama memberikan kesempatan bagi molekul metanol dan trigliserida untuk bereaksi secara lebih sempurna sehingga konversi metil ester meningkat. Selain itu, proses pemisahan antara biodiesel, gliserol, metanol sisa, dan air menjadi lebih efektif karena sistem telah mencapai kondisi reaksi yang lebih stabil. Lee & Wilson (2015) menyatakan bahwa waktu reaksi merupakan salah satu faktor utama yang menentukan tingkat konversi trigliserida menjadi metil ester, di mana waktu reaksi yang cukup akan meningkatkan efisiensi pembentukan biodiesel selama belum melewati kondisi kesetimbangan reaksi.

Kadar air merupakan salah satu parameter mutu biodiesel yang sangat penting karena berpengaruh terhadap stabilitas penyimpanan, korosi pada sistem bahan bakar, serta pertumbuhan mikroorganisme selama penyimpanan. Biodiesel dengan kadar air tinggi lebih mudah mengalami hidrolisis sehingga menghasilkan asam lemak bebas yang dapat meningkatkan angka asam dan mempercepat degradasi kualitas bahan bakar. Oleh karena itu, standar mutu biodiesel membatasi kadar air pada nilai tertentu agar biodiesel tetap aman digunakan pada mesin diesel. Liu *et al.* (2015) menjelaskan bahwa pengendalian kadar air merupakan salah satu tahapan penting dalam produksi biodiesel karena berkaitan langsung dengan umur simpan, performa pembakaran, dan keandalan sistem injeksi bahan bakar.

Kesimpulannya, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi sebanyak 0,75% dengan lama reaksi 45 menit merupakan kombinasi perlakuan terbaik dalam menghasilkan biodiesel dengan kadar air terendah. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah katalis dan waktu reaksi mampu meningkatkan efektivitas proses transesterifikasi serta mempermudah pemisahan produk sehingga mutu biodiesel menjadi lebih baik. Hasil penelitian ini sejalan dengan Lam *et al.* (2010) yang menyatakan bahwa optimasi jumlah katalis dan waktu reaksi merupakan faktor penting untuk memperoleh biodiesel dengan kualitas tinggi, khususnya dalam menurunkan kandungan pengotor seperti air dan gliserol.

Angka Asam

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi antara variasi jumlah katalis dengan lama reaksi transesterifikasi terhadap angka asam biodiesel. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap angka asam biodiesel disajikan pada Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap angka asam biodiesel

Jumlah Katalis (%)	Lama Waktu Reaksi Transesterifikasi (menit)			Rerata
	15	30	45	
0,25	0,35	0,38	0,34	0,35
0,50	0,37	0,36	0,35	0,36
0,75	0,37	0,36	0,36	0,36
Rerata	0,36pq	0,37p	0,35q	-

Keterangan: Jika nilai rata-rata perlakuan dalam baris atau kolom yang sama memiliki huruf yang sama, maka tidak terdapat perbedaan yang nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%.

(-) : Tidak ada interaksi nyata

Tabel 3 menunjukkan bahwa jumlah katalis tidak memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap angka asam biodiesel. Sebaliknya, lama waktu reaksi transesterifikasi memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap angka asam biodiesel. Lama reaksi 30 menit menghasilkan rerata angka asam tertinggi sebesar 0,37, sedangkan lama reaksi 45 menit menghasilkan rerata angka asam terendah sebesar 0,35. Tidak terdapat interaksi nyata antara jumlah katalis dan lama waktu reaksi transesterifikasi terhadap angka asam biodiesel.

Variasi jumlah katalis tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap angka asam biodiesel. Meskipun penggunaan katalis 0,25% menghasilkan rerata angka asam paling rendah, yaitu sebesar 0,35, nilainya tidak berbeda nyata dengan penggunaan katalis 0,50% maupun 0,75%. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh taraf jumlah katalis yang digunakan telah mampu mengkatalisis reaksi transesterifikasi secara efektif sehingga tidak memberikan perbedaan yang berarti terhadap kandungan asam lemak bebas pada biodiesel yang dihasilkan.

Berdasarkan variasi waktu reaksi, lama reaksi memberikan pengaruh nyata terhadap angka asam biodiesel. Lama reaksi 30 menit menghasilkan angka asam tertinggi dengan nilai rata-rata 0,37, sedangkan lama reaksi 45 menit menghasilkan angka asam terendah sebesar 0,35. Hasil ini menunjukkan bahwa perpanjangan waktu reaksi hingga 45 menit mampu menurunkan angka asam biodiesel dibandingkan waktu reaksi yang lebih singkat. Angka asam merupakan indikator kandungan asam lemak bebas yang masih terdapat dalam biodiesel. Semakin rendah angka asam, semakin baik mutu biodiesel yang dihasilkan karena menunjukkan bahwa konversi trigliserida menjadi metil ester berlangsung lebih sempurna dan kandungan asam lemak bebas semakin sedikit. Waktu reaksi yang cukup memungkinkan proses transesterifikasi berlangsung lebih optimal sehingga sisa asam lemak bebas dalam produk akhir dapat diminimalkan. Sebaliknya, waktu reaksi yang belum optimum dapat menyebabkan sebagian asam lemak bebas masih tertinggal sehingga angka asam biodiesel menjadi lebih tinggi.

Berdasarkan hasil penelitian, variasi lama waktu reaksi berpengaruh nyata terhadap angka asam biodiesel, sedangkan variasi jumlah katalis tidak memberikan pengaruh nyata dan tidak terdapat interaksi antara kedua faktor perlakuan. Kombinasi perlakuan yang menghasilkan angka asam terendah diperoleh pada penggunaan katalis 0,25% dengan lama reaksi 45 menit, yaitu sebesar 0,34. Nilai tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kandungan asam lemak bebas yang rendah sehingga kualitasnya semakin baik dan memenuhi karakteristik biodiesel yang diharapkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah katalis bonggol jagung terkalsinasi tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap angka asam biodiesel. Hal ini mengindikasikan bahwa seluruh taraf katalis yang digunakan (0,25%, 0,50%, dan 0,75%) telah mampu mengkatalisis reaksi transesterifikasi secara efektif sehingga tidak menyebabkan perbedaan yang signifikan terhadap kandungan asam lemak bebas yang masih tersisa dalam biodiesel. Menurut Santoso & Kurniawan (2023), apabila jumlah katalis telah memenuhi kebutuhan reaksi, penambahan katalis tidak selalu meningkatkan konversi metil ester maupun memperbaiki sifat kimia biodiesel karena sistem reaksi telah mencapai kondisi yang relatif optimum. Oleh karena itu, peningkatan jumlah katalis di atas batas tertentu tidak memberikan perubahan yang berarti terhadap nilai angka asam biodiesel.

Untuk mengukur kualitas biodiesel, seseorang perlu memperhatikan angka asamnya, yaitu jumlah kalium hidroksida (KOH) yang diperlukan untuk menetralkan asam lemak bebas dalam satu gram biodiesel. Nilai angka asam yang rendah menunjukkan bahwa kandungan asam lemak bebas di dalam biodiesel juga rendah, sehingga biodiesel memiliki stabilitas kimia yang lebih baik serta risiko korosi yang lebih kecil pada sistem bahan bakar. Sebaliknya, angka asam yang tinggi mengindikasikan masih adanya asam lemak bebas akibat proses transesterifikasi yang belum berlangsung secara sempurna atau akibat terjadinya hidrolisis metil ester selama proses produksi maupun penyimpanan (Knothe & Van Gerpen, 2015).

Berbeda dengan jumlah katalis, lama waktu reaksi memberikan pengaruh nyata terhadap angka asam biodiesel. Penelitian ini menunjukkan bahwa waktu reaksi 45 menit menghasilkan angka asam terendah, sedangkan waktu reaksi 30 menit menghasilkan angka asam tertinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perpanjangan waktu reaksi hingga kondisi optimum memberikan kesempatan yang lebih besar bagi trigliserida dan asam lemak bebas untuk bereaksi dengan metanol sehingga pembentukan metil ester berlangsung lebih sempurna. Waktu reaksi merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat konversi minyak menjadi biodiesel, karena semakin lama reaksi berlangsung hingga mencapai kondisi optimum, semakin banyak trigliserida yang berhasil dikonversi menjadi metil ester sehingga kandungan asam lemak bebas dalam produk akhir dapat berkurang.

Penurunan angka asam pada waktu reaksi 45 menit juga menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung lebih efektif sehingga sisa asam lemak bebas dalam biodiesel semakin sedikit. Asam lemak bebas yang tidak bereaksi dapat meningkatkan keasaman biodiesel, mempercepat proses oksidasi selama penyimpanan, dan menyebabkan korosi pada komponen logam sistem bahan bakar. Oleh karena itu, biodiesel dengan angka asam yang rendah umumnya memiliki kualitas penyimpanan dan performa penggunaan yang lebih baik dibandingkan biodiesel dengan angka asam tinggi (Knothe & Van Gerpen, 2015). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin optimum waktu reaksi yang digunakan, semakin baik pula karakteristik kimia biodiesel yang dihasilkan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lama waktu reaksi lebih berperan dalam menurunkan angka asam biodiesel dibandingkan jumlah katalis. Kombinasi penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi sebanyak 0,25% dengan waktu reaksi 45 menit menghasilkan angka asam terendah sebesar 0,34 mg KOH g⁻¹. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan SNI 7182:2025, yang menetapkan batas maksimum angka asam biodiesel sebesar 0,50 mg KOH g⁻¹. Hasil ini menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kandungan asam lemak bebas yang rendah sehingga lebih stabil selama penyimpanan dan aman digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel (Badan Standardisasi Nasional, 2025).

Free Fatty Acid (FFA)

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi antara variasi jumlah katalis dengan lama reaksi transesterifikasi terhadap FFA biodiesel. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap FFA biodiesel disajikan pada Tabel 4 berikut ini:

Tabel 4. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap FFA biodiesel

Jumlah Katalis (%)	Lama Waktu Reaksi Transesterifikasi (menit)			Rerata
	15	30	45	
0,25	0,17	0,19	0,17	0,17
0,50	0,18	0,18	0,17	0,18
0,75	0,18	0,18	0,18	0,18
Rerata	0,18pq	0,19p	0,17q	-

Keterangan: Jika nilai rata-rata perlakuan dalam baris atau kolom yang sama memiliki huruf yang sama, maka tidak terdapat perbedaan yang nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%.

(-) : Tidak ada interaksi nyata

Tabel 4 menunjukkan bahwa jumlah katalis tidak memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap kadar *Free Fatty Acid* (FFA) biodiesel. Hal ini ditunjukkan oleh rerata ketiga taraf jumlah katalis yang diikuti huruf yang sama (a), yaitu sebesar 0,17; 0,18; dan 0,18. Sebaliknya, lama waktu reaksi transesterifikasi memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap kadar FFA biodiesel. Lama reaksi 30 menit menghasilkan rerata FFA tertinggi sebesar 0,19, sedangkan lama reaksi 45 menit menghasilkan rerata FFA terendah sebesar 0,17. Tidak terdapat interaksi nyata antara jumlah katalis dan lama waktu reaksi transesterifikasi terhadap kadar FFA biodiesel.

Variasi jumlah katalis tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap kadar FFA biodiesel. Meskipun penggunaan katalis 0,25% menghasilkan rerata FFA paling rendah, yaitu sebesar 0,17, nilainya tidak berbeda nyata dengan penggunaan katalis 0,50% maupun 0,75%. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh taraf jumlah katalis yang digunakan telah mampu mengkatalisis proses transesterifikasi secara efektif sehingga kandungan asam lemak bebas yang tersisa dalam biodiesel relatif sama pada setiap perlakuan.

Berdasarkan variasi waktu reaksi, lama reaksi memberikan pengaruh nyata terhadap kadar FFA biodiesel. Lama reaksi 30 menit menghasilkan kadar FFA tertinggi dengan nilai rata-rata 0,19, sedangkan lama reaksi 45 menit menghasilkan kadar FFA terendah sebesar 0,17. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin lama waktu reaksi hingga mencapai 45 menit, kadar FFA biodiesel cenderung semakin rendah.

Secara teoretis, kadar FFA merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan mutu biodiesel karena mencerminkan kandungan asam lemak bebas yang masih terdapat dalam produk akhir. Nilai FFA yang rendah menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi berlangsung lebih sempurna sehingga sebagian besar asam lemak telah berhasil dikonversi menjadi metil ester. Waktu reaksi yang cukup memberikan kesempatan bagi reaksi berlangsung secara optimal, sehingga kandungan FFA dapat ditekan. Sebaliknya, waktu reaksi yang belum optimum dapat menyebabkan konversi belum berlangsung sempurna sehingga kadar FFA yang dihasilkan masih relatif lebih tinggi.

Berdasarkan hasil penelitian, variasi lama waktu reaksi berpengaruh nyata terhadap kadar FFA biodiesel, sedangkan variasi jumlah katalis tidak memberikan pengaruh nyata dan tidak terdapat interaksi antara kedua faktor perlakuan. Kombinasi perlakuan yang

menghasilkan kadar FFA terendah diperoleh pada penggunaan katalis **0,25% dengan lama reaksi 15 menit dan 45 menit**, masing-masing sebesar **0,17**, serta pada penggunaan katalis **0,50% dengan lama reaksi 45 menit**, juga sebesar **0,17**. Nilai FFA yang rendah tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik karena kandungan asam lemak bebasnya rendah, sehingga lebih stabil selama penyimpanan dan memenuhi karakteristik mutu biodiesel yang diharapkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah katalis bonggol jagung terkalsinasi tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap kadar *Free Fatty Acid* (FFA) biodiesel. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis pada taraf 0,25%, 0,50%, dan 0,75% telah mampu mengkatalisis reaksi transesterifikasi secara efektif sehingga kandungan asam lemak bebas yang tersisa pada biodiesel relatif sama. Menurut Leung *et al.* (2010), apabila jumlah katalis telah mencukupi untuk mempercepat pembentukan ion metoksida dan konversi trigliserida berlangsung optimal, penambahan katalis tidak selalu menghasilkan penurunan kadar FFA yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh tercapainya keseimbangan reaksi sehingga peningkatan jumlah katalis tidak lagi memberikan tambahan konversi yang berarti.

Kadar *Free Fatty Acid* (FFA) merupakan salah satu indikator penting dalam mengevaluasi mutu biodiesel karena menggambarkan jumlah asam lemak bebas yang masih terdapat dalam produk akhir. Kandungan FFA yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar asam lemak telah berhasil dikonversi menjadi metil ester selama proses transesterifikasi. Sebaliknya, kadar FFA yang tinggi dapat memicu pembentukan sabun (*saponification*), menurunkan rendemen biodiesel, serta mempercepat proses oksidasi dan degradasi selama penyimpanan. Oleh karena itu, pengendalian kadar FFA merupakan salah satu aspek penting dalam menghasilkan biodiesel yang memenuhi standar mutu (Knothe *et al.*, 2015).

Berbeda dengan jumlah katalis, lama waktu reaksi memberikan pengaruh nyata terhadap kadar FFA biodiesel. Penelitian ini menunjukkan bahwa waktu reaksi 45 menit menghasilkan kadar FFA terendah, sedangkan waktu reaksi 30 menit menghasilkan kadar FFA tertinggi. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa perpanjangan waktu reaksi hingga kondisi optimum memberikan kesempatan yang lebih besar bagi trigliserida dan asam lemak bebas untuk bereaksi dengan metanol membentuk metil ester. Menurut Ma dan Hanna (1999), waktu reaksi yang memadai memungkinkan konversi minyak menjadi biodiesel berlangsung lebih sempurna sehingga kandungan asam lemak bebas yang masih tersisa dalam produk akhir dapat diminimalkan.

Penurunan kadar FFA pada waktu reaksi 45 menit juga menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung lebih efisien sehingga reaksi samping yang menghasilkan asam lemak bebas dapat ditekan. Biodiesel dengan kadar FFA yang rendah memiliki stabilitas oksidatif yang lebih baik, mengurangi potensi korosi pada komponen mesin, serta menghasilkan performa pembakaran yang lebih optimal. Selain itu, kadar FFA yang rendah dapat memperpanjang umur simpan biodiesel karena menurunkan risiko hidrolisis metil ester selama penyimpanan (Knothe *et al.*, 2015). Dengan demikian, pengaturan waktu reaksi menjadi faktor penting dalam menghasilkan biodiesel berkualitas tinggi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa lama waktu reaksi memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap kadar FFA dibandingkan jumlah katalis. Kombinasi penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi sebanyak 0,25% dengan waktu reaksi 15 menit dan 45 menit, serta penggunaan katalis 0,50% dengan waktu reaksi 45 menit, menghasilkan kadar FFA terendah sebesar 0,17%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki kandungan asam lemak bebas yang rendah sehingga lebih stabil selama penyimpanan dan memiliki mutu yang baik. Temuan ini sejalan dengan

pendapat Leung *et al.* (2010) bahwa optimasi kondisi transesterifikasi, terutama waktu reaksi, merupakan salah satu faktor utama dalam menghasilkan biodiesel dengan kandungan FFA yang rendah.

Viskositas

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi antara variasi jumlah katalis dengan lama reaksi transesterifikasi terhadap viskositas biodiesel. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap viskositas biodiesel disajikan pada Tabel 5 berikut ini:

Tabel 5. Pengaruh variasi jumlah katalis dan lama reaksi transesterifikasi terhadap viskositas biodiesel

Jumlah Katalis (%)	Lama Waktu Reaksi Transesterifikasi (menit)			Rerata
	15	30	45	
0,25	4,00	3,93	3,86	3,93a
0,50	3,92	3,87	3,81	3,86b
0,75	3,84	3,78	3,71	3,77c
Rerata	3,92p	3,86q	3,79r	-

Keterangan: Jika nilai rata-rata perlakuan dalam baris atau kolom yang sama memiliki huruf yang sama, maka tidak terdapat perbedaan yang nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%.

(-) : Tidak ada interaksi nyata

Tabel 5 menunjukkan bahwa jumlah katalis memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap viskositas biodiesel. Penggunaan jumlah katalis 0,25% menghasilkan rerata viskositas tertinggi, yaitu sebesar **3,93 mm²/s**, sedangkan penggunaan katalis 0,75% menghasilkan rerata viskositas terendah, yaitu sebesar **3,77 mm²/s**. Lama waktu reaksi transesterifikasi juga memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap viskositas biodiesel. Lama reaksi 15 menit menghasilkan rerata viskositas tertinggi sebesar **3,92 mm²/s**, sedangkan lama reaksi 45 menit menghasilkan rerata viskositas terendah sebesar **3,79 mm²/s**. Tidak terdapat interaksi nyata antara jumlah katalis dan lama waktu reaksi transesterifikasi terhadap viskositas biodiesel.

Peningkatan jumlah katalis menyebabkan viskositas biodiesel cenderung menurun. Pada penelitian ini, penggunaan katalis sebanyak 0,75% menghasilkan viskositas terendah sebesar 3,77 mm²/s. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah katalis yang lebih tinggi mampu meningkatkan efektivitas reaksi transesterifikasi sehingga konversi trigliserida menjadi metil ester berlangsung lebih sempurna. Semakin tinggi tingkat konversi, semakin sedikit trigliserida atau senyawa antara yang masih tersisa dalam biodiesel, sehingga viskositas produk menjadi lebih rendah.

Berdasarkan variasi waktu reaksi, lama reaksi juga memberikan pengaruh nyata terhadap viskositas biodiesel. Lama reaksi **15 menit** menghasilkan viskositas tertinggi dengan nilai rata-rata **3,92 mm²/s**, kemudian menurun menjadi **3,86 mm²/s** pada waktu reaksi **30 menit**, dan mencapai nilai terendah sebesar **3,79 mm²/s** pada waktu reaksi **45 menit**. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu reaksi transesterifikasi, viskositas biodiesel cenderung semakin rendah.

Viskositas biodiesel dipengaruhi oleh tingkat konversi trigliserida menjadi metil ester. Reaksi transesterifikasi yang berlangsung lebih sempurna akan mengurangi kandungan trigliserida, digliserida, maupun monogliserida yang memiliki viskositas lebih tinggi dibandingkan metil ester. Oleh karena itu, penggunaan jumlah katalis yang memadai dan

waktu reaksi yang cukup akan menghasilkan biodiesel dengan viskositas yang lebih rendah. Nilai viskositas yang sesuai sangat penting karena berpengaruh terhadap proses atomisasi bahan bakar pada sistem injeksi, efisiensi pembakaran, serta kinerja mesin diesel.

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi dan variasi lama waktu reaksi berpengaruh nyata terhadap viskositas biodiesel, tetapi tidak menunjukkan adanya interaksi nyata antara kedua faktor tersebut. Kondisi terbaik diperoleh pada penggunaan katalis 0,75% dengan lama reaksi 45 menit, yang menghasilkan viskositas sebesar 3,71 mm²/s, yaitu nilai terendah di antara seluruh kombinasi perlakuan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa biodiesel yang dihasilkan memiliki sifat alir yang baik dan telah memenuhi kisaran viskositas biodiesel sesuai standar mutu, sehingga berpotensi memberikan performa pembakaran yang lebih optimal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis bonggol jagung terkalsinasi memberikan pengaruh nyata terhadap penurunan viskositas biodiesel. Penggunaan katalis sebanyak 0,75% menghasilkan viskositas terendah dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis hingga taraf tersebut mampu meningkatkan jumlah situs basa aktif yang berperan dalam mempercepat reaksi transesterifikasi. Semakin efektif proses transesterifikasi berlangsung, semakin banyak trigliserida yang dikonversi menjadi metil ester sehingga kandungan trigliserida, digliserida, dan monogliserida yang masih tersisa dalam biodiesel menjadi lebih sedikit. Penurunan senyawa-senyawa tersebut secara langsung menyebabkan viskositas biodiesel menjadi lebih rendah (Lam *et al.*, 2010). Dengan demikian, penggunaan katalis dalam jumlah yang optimum berperan penting dalam menghasilkan biodiesel dengan sifat alir yang lebih baik.

Viskositas merupakan salah satu sifat fisik utama biodiesel yang menentukan kemudahan bahan bakar mengalir melalui sistem injeksi dan proses atomisasi di ruang bakar. Biodiesel dengan viskositas yang terlalu tinggi akan menghasilkan ukuran droplet bahan bakar yang lebih besar sehingga proses pengabutan menjadi kurang sempurna. Kondisi tersebut dapat menurunkan efisiensi pembakaran, meningkatkan pembentukan deposit karbon pada nosel injektor, serta memperbesar emisi gas buang. Sebaliknya, biodiesel dengan viskositas yang sesuai akan menghasilkan proses atomisasi yang lebih baik sehingga pembakaran berlangsung lebih sempurna dan kinerja mesin diesel menjadi lebih optimal.

Lama waktu reaksi transesterifikasi juga memberikan pengaruh nyata terhadap viskositas biodiesel. Pada penelitian ini, viskositas biodiesel menurun seiring bertambahnya waktu reaksi, dengan nilai terendah diperoleh pada 45 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu reaksi yang lebih lama memberikan kesempatan bagi trigliserida untuk bereaksi lebih sempurna dengan metanol sehingga pembentukan metil ester meningkat. Menurut Xie & Huang (2006), peningkatan konversi trigliserida menjadi metil ester merupakan faktor utama yang menyebabkan viskositas biodiesel menurun, karena metil ester memiliki viskositas yang lebih rendah dibandingkan trigliserida maupun gliserida parsial yang masih tersisa setelah reaksi berlangsung.

Penurunan viskositas pada waktu reaksi 45 menit juga menunjukkan bahwa proses transesterifikasi telah berlangsung lebih efisien sehingga jumlah senyawa antara, seperti mono, di, dan trigliserida, semakin berkurang. Lam *et al.* (2010) menjelaskan bahwa konversi minyak menjadi metil ester yang lebih tinggi umumnya diikuti oleh penurunan viskositas biodiesel karena struktur molekul metil ester lebih sederhana dan memiliki gaya tarik antarmolekul yang lebih rendah dibandingkan trigliserida. Oleh karena itu, optimasi waktu reaksi merupakan salah satu faktor penting dalam menghasilkan biodiesel dengan karakteristik fisik yang sesuai untuk digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah katalis dan lama waktu reaksi sama-sama berperan dalam menurunkan viskositas biodiesel, meskipun tidak terdapat interaksi yang nyata antara kedua faktor tersebut. Kombinasi penggunaan katalis bonggol jagung terkalsinasi sebanyak 0,75% dengan waktu reaksi 45 menit menghasilkan viskositas terendah sebesar 3,71 mm²/s. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan SNI 7182:2025, yaitu berada pada kisaran 2,3–6,0 mm²/s, sehingga biodiesel yang dihasilkan memiliki sifat alir yang baik, mendukung proses atomisasi bahan bakar yang optimal, serta berpotensi meningkatkan efisiensi pembakaran dan performa mesin diesel (Badan Standardisasi Nasional, 2025).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi jumlah katalis bonggol jagung yang dikalsinasi berpengaruh nyata terhadap rendemen, kadar air, dan viskositas biodiesel, tetapi tidak berpengaruh nyata terhadap angka asam dan kadar free fatty acid (FFA), dengan rendemen tertinggi diperoleh pada katalis 0,25%, sedangkan kadar air dan viskositas terendah pada katalis 0,75%. Lama waktu reaksi juga berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter, dengan rendemen tertinggi pada waktu 15 menit, sementara karakteristik biodiesel terbaik berdasarkan kadar air, angka asam, FFA, dan viskositas diperoleh pada waktu 45 menit. Tidak terdapat interaksi antara jumlah katalis dan lama waktu reaksi terhadap seluruh parameter pengamatan. Kondisi optimum untuk rendemen tertinggi adalah katalis 0,25% dan waktu reaksi 15 menit, sedangkan kualitas biodiesel terbaik diperoleh pada katalis 0,75% dan waktu reaksi 45 menit. Seluruh biodiesel yang dihasilkan memenuhi standar mutu SNI 7182:2025 untuk parameter kadar air, angka asam, dan viskositas, sehingga katalis heterogen berbasis bonggol jagung berpotensi sebagai alternatif katalis yang lebih ramah lingkungan. Penelitian selanjutnya disarankan menguji faktor proses lainnya, melakukan karakterisasi dan evaluasi penggunaan ulang katalis, serta menambahkan parameter mutu biodiesel agar diperoleh hasil yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., Badruddin, I. A., & Fayaz, H. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070–2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
- Badan Standardisasi Nasional. (2025). *SNI 7182:2025 Biodiesel*.
- Boro, J., Thakur, A. J., & Deka, D. (2012). A review on solid oxide derived from waste shells as catalyst for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 904–910. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.013>
- Choe, E., & Min, D. B. (2007). Chemistry of deep-fat frying oils. *Journal of Food Science*, 72(5), R77–R86. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>
- Endalew, A. K., Kiros, Y., & Zanzi, R. (2011). Inorganic heterogeneous catalysts for biodiesel production from non-edible oils. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3787–3809. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.011>
- Hattori, H. (2001). Solid base catalysts: Generation of basic sites and application to organic synthesis. *Applied Catalysis A: General*, 222(1–2), 247–259. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(01\)00839-0](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00839-0)
- Ho, W. W. S., Ng, H. K., Gan, S., & Tan, S. H. (2014). Evaluation of palm oil mill fly ash as a heterogeneous catalyst for biodiesel production from crude palm oil. *Energy Conversion and Management*, 88, 1167–1178. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.069>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*.
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*.

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). *Handbook of energy & economic statistics of Indonesia 2022*.
- Knothe, G., & Van Gerpen, J. (2015). Biodiesel production. In G. Knothe, J. Van Gerpen, & J. Krahl (Eds.), *The biodiesel handbook* (2nd ed.). AOCS Press.
- Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krahl, J. (2015). *The biodiesel handbook* (2nd ed.). AOCS Press.
- 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>
- Lee, A. F., & Wilson, K. (2015). Recent advances in heterogeneous catalysis for biorefining. *Green Chemistry*, 17(2), 703–728. <https://doi.org/10.1039/C4GC01123A>
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Liu, K., Wang, R., & Yu, M. (2015). Reusability of waste cooking oil derived biochar as a catalyst for biodiesel production. *Fuel*, 157, 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.051>
- Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)
- Santoso, B., & Kurniawan, H. (2023). Pengaruh reaksi saponifikasi pada kualitas methyl ester. *Reaktor: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 23(1), 14–22.
- Xie, W., & Huang, X. (2006). Synthesis of biodiesel from soybean oil using heterogeneous KF/ZnO catalyst. *Catalysis Letters*, 107, 53–59. <https://doi.org/10.1007/s10562-005-9747-7>