

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil *Yield* Biodiesel yang Didapatkan

Adapun data *yield* yang didapatkan dalam penelitian Pembuatan Biodiesel dapat dilihat pada Tabel 4.1 dibawah ini :

Tabel 4.1 Data Hasil *Yield* Pembuatan Biodiesel Tanpa *Baffle* dengan perbandingan rasio katalis CaO:SiO₂ adalah 2:1

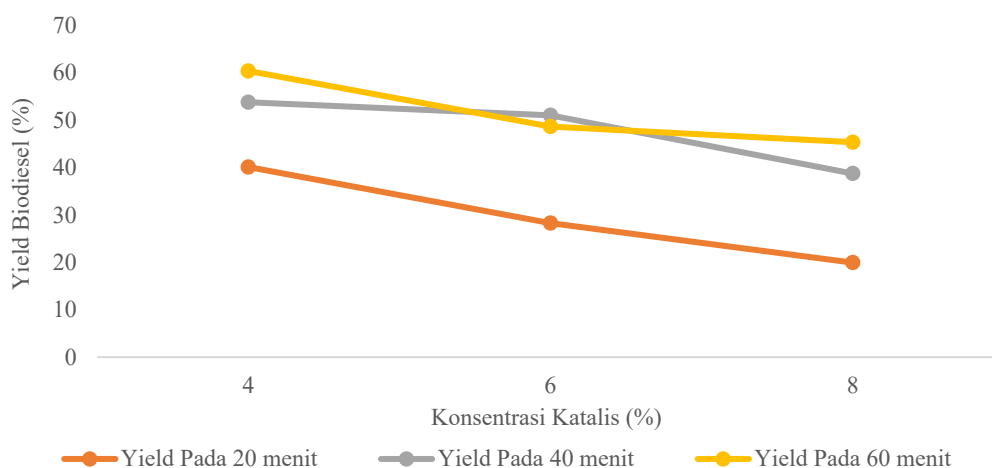
No	Katalis CaO:SiO ₂ (%)	Waktu	Temperatur	Kecepatan Pengadukan	<i>Yield</i> (%)
1	4 %	60 menit	60 °C	450 rpm	54,7336

Tabel 4.2 Data Hasil *Yield* Pembuatan Biodiesel Menggunakan *Baffle* dengan perbandingan rasio katalis CaO:SiO₂ adalah 2:1

No	Katalis CaO:SiO ₂ (%)	Waktu	Temp	Kecepatan Pengadukan	<i>Yield</i> (%)
1	4 %	20 menit	60 °C	450 rpm	40,1380
		40 menit			53,8214
		60 menit			60,4350
2	6 %	20 menit			28,2790
		40 menit			51,0847
		60 menit			48,6901
3	8 %	20 menit			19,9549
		40 menit			38,7696
		60 menit			45,3833

4.1.1 Pengaruh Konsentrasi Katalis Terhadap *Yield* Biodiesel

Berdasarkan data hasil eksperimen yang tertera pada Tabel 4.2, variasi konsentrasi katalis heterogen CaO/SiO₂ yang diuji pada kadar 4%, 6%, dan 8% memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap persentase *yield* biodiesel yang dihasilkan dari *Crude Palm Oil* (CPO). Perubahan data mengenai hubungan antara variasi konsentrasi katalis beserta waktu reaksi terhadap persentase *yield* tersebut disajikan secara visual dalam bentuk grafik pada Gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1 Pengaruh Konsentrasi Katalis CaO/SiO_2 Terhadap *Yield* Biodiesel

Jika dianalisis pada waktu pengadukan 20 menit, peningkatan konsentrasi katalis dari 4% menjadi 6% dan 8% menyebabkan penurunan *yield* biodiesel dari 40,1380% menjadi 28,2790% dan 19,9549%. Hal ini menunjukkan bahwa pada waktu reaksi yang singkat, penambahan katalis yang berlebihan menyebabkan keterbatasan perpindahan massa (*mass transfer limitation*). Jumlah katalis yang terlalu banyak meningkatkan kekentalan campuran sehingga menghambat difusi trigliserida menuju sifat aktif katalis CaO/SiO_2 .

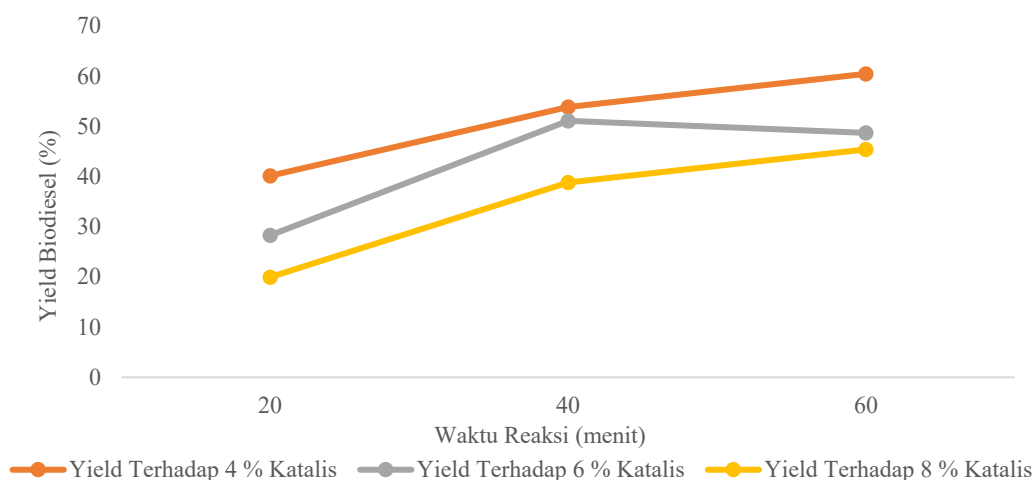
Pada waktu pengadukan 40 menit, terjadi penurunan konsentrasi katalis dari 4% menjadi 6% dan 8%, yaitu dari 53,8214% menjadi 51,0847% dan 38,7696%. Meskipun demikian, jika dibandingkan dengan waktu reaksi 20 menit, seluruh variasi konsentrasi katalis pada waktu 40 menit ini mengalami peningkatan *yield* yang cukup signifikan seiring dengan bertambahnya waktu kontak reaksi.

Pada waktu pengadukan 60 menit, *yield* tertinggi diperoleh pada konsentrasi katalis 4% sebesar 60,4350%, kemudian sedikit menurun menjadi 48,6901% pada konsentrasi 6% dan 45,3833% pada konsentrasi 8%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan katalis melebihi jumlah optimum tidak lagi meningkatkan konversi, bahkan dapat menyebabkan kejenuhan sistem dan kemungkinan terjadinya pelarutan (*leaching*) sisi aktif CaO . Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis heterogen CaO/SiO_2 harus disesuaikan dengan waktu pengadukan agar diperoleh *yield* biodiesel yang optimum tanpa menimbulkan hambatan perpindahan massa maupun reaksi samping.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa penggunaan katalis heterogen CaO/SiO_2 memberikan *yield* optimum pada konsentrasi katalis 4% sebesar 63,64%, sedangkan peningkatan jumlah katalis yang berlebihan justru menyebabkan penurunan *yield* akibat terjadinya reaksi samping dan berkurangnya efektivitas sifat aktif katalis (Cao et al., 2025). Selain itu, jurnal lain juga melaporkan bahwa peningkatan jumlah katalis melebihi kondisi optimum tidak selalu meningkatkan konversi biodiesel, bahkan dapat menurunkan kualitas produk akibat terbentuknya reaksi samping selama proses transesterifikasi (Hendriyana et al., 2025).

4.1.2 Pengaruh Waktu Reaksi Terhadap *Yield* Biodiesel

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 4.2, waktu reaksi atau durasi pengadukan memegang peranan yang sangat penting dalam pencapaian kesetimbangan reaksi transesterifikasi dari menit ke-20 hingga menit ke-60. Pengaruh variasi waktu reaksi terhadap % *yield* yang dihasilkan tersebut disajikan secara visual dalam bentuk grafik pada Gambar 4.2 berikut :



Gambar 4.2 Pengaruh Waktu Reaksi Terhadap *Yield* Biodiesel

Jika dianalisis berdasarkan variasi waktu pada setiap konsentrasi katalis, peningkatan waktu pengadukan umumnya meningkatkan *yield* biodiesel, kecuali pada kondisi tertentu yang telah mencapai titik optimum. Pada konsentrasi katalis 4%, *yield* meningkat secara bertahap dari 40,1380% pada 20 menit menjadi 53,8214% pada 40 menit, dan mencapai nilai tertinggi 60,4350% pada 60 menit. Hal ini menunjukkan bahwa waktu kontak yang lebih lama memberikan

kesempatan bagi trigliserida dan metanol untuk bereaksi secara lebih sempurna pada permukaan katalis CaO/SiO_2 sehingga konversi menjadi metil ester berlangsung lebih optimal.

Pada konsentrasi katalis 6%, *yield* awal sebesar 28,2790% meningkat menjadi 51,0847% pada 40 menit, namun sedikit menurun menjadi 48,6901% pada 60 menit. Penurunan ini menunjukkan bahwa reaksi transesterifikasi yang bersifat reversibel telah mencapai kesetimbangan pada menit ke-40, sehingga perpanjangan waktu reaksi memungkinkan terjadinya reaksi balik yang menyebabkan sebagian metil ester kembali membentuk monogliserida atau digliserida.

Sementara itu, pada konsentrasi katalis 8%, *yield* meningkat dari 19,9549% pada 20 menit menjadi 38,7696% pada 40 menit, kemudian meningkat menjadi 45,3833% pada 60 menit. Rendahnya *yield* pada awal reaksi disebabkan oleh hambatan difusi akibat tingginya konsentrasi padatan katalis. Waktu pengadukan yang lebih lama diperlukan untuk mengurangi pengumpulan partikel katalis sehingga kontak antara metanol, trigliserida, dan sifat aktif katalis dapat berlangsung lebih efektif.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pengadukan merupakan faktor penting dalam proses transesterifikasi karena mempengaruhi lamanya kontak antara reaktan dan katalis. Kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi katalis 4% dengan waktu pengadukan 60 menit yang menghasilkan *yield* biodiesel tertinggi sebesar 60,4350%, sehingga kombinasi kedua parameter tersebut memberikan efisiensi konversi yang paling baik.

Hasil analisa ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa peningkatan waktu reaksi mampu meningkatkan *yield* biodiesel, dengan perolehan tertinggi sebesar 87,50% pada waktu reaksi 60 menit (Tampubolon et al., 2025). Meskipun *yield* maksimum yang diperoleh dalam penelitian ini lebih rendah, yaitu sebesar 60,4350%, perbedaan tersebut diduga disebabkan oleh penggunaan katalis heterogen CaO/SiO_2 yang memiliki aktivitas lebih rendah dibandingkan katalis homogen NaOH-KOH . Selain itu, bahan baku berupa CPO masih mengandung kadar air, pengotor, dan asam lemak bebas yang dapat menghambat reaksi serta memicu reaksi samping, sehingga konversi trigliserida menjadi metil ester tidak

berlangsung secara maksimal dan menghasilkan *yield* yang lebih rendah dibandingkan penelitian terdahulu.

4.1.3 Manfaat Penambahan *Baffle* pada Alat Proses terhadap Hasil Proses

Penerapan desain *Baffled Stirred Tank Reactor* (BSTR) dengan menggunakan 4 bilah sekat (*baffle*) pada dinding reaktor memberikan kontribusi mekanis dan kimiawi yang sangat besar terhadap efisiensi konversi CPO menjadi biodiesel. Reaksi transesterifikasi menggunakan katalis heterogen CaO/SiO_2 merupakan sistem multipasa yang melibatkan fase minyak (cair non-polar), fase methanol (cair polar), dan fase katalis padat. Bukti nyata dari kontribusi komponen internal ini terlihat pada pengujian dengan kondisi operasi yang sama, yaitu pada konsentrasi katalis 4% dan waktu reaksi 60 menit. Tanpa penggunaan *baffle*, *yield* biodiesel yang dihasilkan hanya sebesar 54,7336%. Namun, setelah reaktor dilengkapi dengan *baffle*, perolehan *yield* meningkat menjadi 60,4350%. Kenaikan sebesar kurang lebih 5,7% ini membuktikan bahwa keberadaan *baffle* berhasil mengatasi keterbatasan-keterbatasan fisik reaktor konvensional.

Manfaat utama dari penambahan *baffle* ini adalah kemampuannya dalam mengeliminasi pembentukan *vortex* atau pusaran aliran di dalam tangki reaktor. Pada reaktor tanpa sekat, putaran pengaduk pada kecepatan tinggi (450 rpm) memicu aliran fluida melingkar secara tangensial, yang lama-kelamaan menciptakan pusaran air yang menarik udara luar serta membuat seluruh massa fluida berputar searah bersama pengaduk tanpa adanya pencampuran yang nyata. Keberadaan 4 bilah *baffle* efektif memecah aliran sirkular tersebut dan mengalihkannya menjadi pola aliran aksial (vertikal ke atas-bawah) dan radial (ke arah pusat-dinding) yang jauh lebih turbulen. Turbulensi tinggi inilah yang memberikan gaya geser kuat untuk memecah gumpalan cairan besar minyak sawit menjadi ukuran mikroskopis, sehingga memperluas area kontak antarmuka (*interfacial area*) antara CPO dan metanol serta meminimalkan hambatan aliran zat di permukaan antarfasa cairan.

Selain memaksimalkan pencampuran fasa cair, aliran vertikal kuat yang dihasilkan oleh konfigurasi *baffle* juga menjaga agar katalis padat CaO/SiO_2 tetap tersuspensi secara sempurna. Karena memiliki massa jenis yang lebih berat, padatan katalis sangat rawan mengendap di dasar reaktor (*dead zone*) jika

pengadukan tidak merata. Dengan adanya *baffle*, pengendapan tersebut dapat dicegah sehingga partikel katalis terdistribusi seragam ke seluruh volume reaktor. Secara keseluruhan, seluruh manfaat mekanis ini berfokus pada optimalisasi kontak reaktan pada sifat aktif katalis. Hilangnya zona stagnan, meningkatnya luas kontak cairan, serta terjaganya suspensi katalis secara homogen membuat frekuensi tumbukan efektif antara gugus trigliserida-metanol dengan sifat aktif basa katalis berlangsung maksimal di setiap detik reaksi. Hal inilah yang secara nyata mendasari peningkatan *yield* biodiesel hingga mencapai titik tertinggi sebesar 60,4350% dibandingkan reaktor tak bersekat.

Peningkatan *yield* dari 54,7336% menjadi 60,4350% setelah penambahan *baffle* menunjukkan bahwa peningkatan turbulensi dan perpindahan massa memberikan kontribusi penting terhadap keberhasilan reaksi transesterifikasi. Hasil ini sesuai dengan teori pengadukan pada *stirred tank reactor* yang menyatakan bahwa keberadaan *baffle* mampu mengurangi pembentukan *vortex*, meningkatkan homogenitas sistem, serta memperbesar kontak antarfasa sehingga efisiensi reaksi menjadi lebih tinggi (Haoxing & System, n.d.).

Secara umum, hasil penelitian ini sejalan dengan studi terdahulu, yaitu konsentrasi katalis dan waktu reaksi adalah parameter kunci dalam transesterifikasi. Perbedaan *yield* dari penelitian sebelumnya utamanya disebabkan oleh variasi bahan baku, jenis katalis, kondisi operasi, serta penggunaan *Baffled Stirred Tank Reactor* (BSTR).

4.2 Karakteristik Biodiesel yang Didapatkan

Adapun data karakteristik biodiesel yang didapatkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.3 dibawah ini :

Tabel 4.3 Data Karakteristik Biodiesel (Kualitas Produk)

No	Konsentrasi Katalis (%)	Waktu (menit)	Densitas (g/ml)	Viskositas (cSt)	Titik Nyala (°C)	Angka Setana	Angka Asam (mg-KOH/g)	Sesuai SNI/Tidak
1	4 %	60	0,8633	4,4645	157	69	0,4374	Sesuai
2	6 %	40	0,8747	4,8017	168	66,3	0,4444	Sesuai
3	8 %	60	0,8906	5,0527	173,2	57,6	0,5175	Tidak

4.2.1 Pengujian Densitas Sampel Biodiesel Terhadap Standar SNI 7182:2015

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik biodiesel yang meliputi densitas, diperoleh perbedaan nilai pada setiap variasi konsentrasi katalis dan waktu reaksi yang digunakan. Seluruh produk biodiesel yang dihasilkan masih berada dalam rentang standar SNI 7182:2015, yaitu antara 0,85 gr/ml s.d. 0,89 gr/ml. Nilai densitas mengalami peningkatan seiring bertambahnya konsentrasi katalis, yaitu dari 0,8633 g/ml pada katalis 4% (60 menit), menjadi 0,8747 g/ml pada katalis 6%, dan mencapai puncaknya di angka 0,8906 g/ml pada katalis 8%.

Peningkatan densitas ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah katalis yang digunakan, semakin besar pula kemungkinan masih terdapat komponen berat yang belum terkonversi secara sempurna, seperti trigliserida, digliserida, monogliserida, gliserol, maupun sisa katalis yang terbawa pada produk biodiesel. Pada konsentrasi katalis yang terlalu tinggi (8%), jumlah partikel katalis yang berlebih dapat menyebabkan aglomerasi (penggumpalan) dan meningkatkan peluang terjadinya reaksi samping berupa saponifikasi (penyabunan). Akibatnya, proses pemisahan biodiesel dari gliserol menjadi kurang sempurna sehingga densitas biodiesel meningkat mendekati batas maksimum SNI.

Sebaliknya, pada penggunaan katalis 4% dengan waktu reaksi 60 menit, nilai densitas sebesar 0,8633 g/ml berada tepat di tengah rentang regulasi SNI. Hal ini mengindikasikan bahwa proses transesterifikasi di dalam *Baffled Stirred Tank Reactor* berlangsung lebih optimal, di mana turbulensi aliran yang dihasilkan sekat (*baffle*) mampu mempercepat perpindahan massa antarfasa tanpa terjadi penggumpalan katalis. Akibatnya, sebagian besar trigliserida berhasil dikonversi secara tuntas menjadi metil ester (FAME) dengan kandungan pengotor yang relatif lebih sedikit, sehingga menghasilkan karakteristik biodiesel yang lebih murni dan aman bagi sistem injeksi mesin diesel.

4.2.2 Pengujian Viskositas Sampel Biodiesel Terhadap Standar SNI 7182:2015

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik biodiesel yang meliputi viskositas, diperoleh perbedaan nilai pada setiap variasi konsentrasi katalis dan waktu reaksi yang digunakan. Seluruh sampel biodiesel memenuhi persyaratan viskositas menurut SNI 7182:2015, yaitu berada pada rentang 2,3–6,0 cSt. Nilai viskositas biodiesel menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya

konsentrasi katalis, yaitu dari 4,46 cSt pada penggunaan katalis 4%, meningkat menjadi 4,80 cSt pada katalis 6%, dan mencapai 5,05 cSt pada katalis 8%.

Peningkatan viskositas ini berkaitan erat dengan kenaikan densitas biodiesel yang dihasilkan. Semakin tinggi densitas suatu fluida, maka gaya tarik antarmolekul dan gesekan internal antarpartikel juga semakin besar, sehingga hambatan aliran fluida meningkat dan menyebabkan nilai viskositas menjadi lebih tinggi. Selain itu, keberadaan senyawa berat seperti trigliserida yang belum bereaksi sempurna, digliserida, monogliserida, gliserol, maupun residu sabun hasil reaksi samping turut berkontribusi terhadap meningkatnya kekentalan biodiesel.

Pada penggunaan katalis 4%, viskositas biodiesel sebesar 4,46 cSt menunjukkan bahwa proses transesterifikasi berlangsung cukup baik sehingga sebagian besar trigliserida telah terkonversi menjadi metil ester (FAME). Kandungan komponen berat yang relatif lebih rendah menyebabkan biodiesel memiliki sifat alir yang lebih baik, sehingga proses atomisasi bahan bakar di dalam ruang bakar mesin diesel dapat berlangsung lebih optimal.

Sementara itu, pada penggunaan katalis 8%, viskositas biodiesel meningkat hingga mencapai 5,05 cSt. Meskipun nilai tersebut masih berada dalam batas standar SNI 7182:2015, peningkatan viskositas menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi katalis yang terlalu tinggi tidak selalu menghasilkan kualitas biodiesel yang lebih baik. Jumlah katalis yang berlebih dapat memicu terjadinya penggumpalan partikel katalis serta reaksi samping berupa saponifikasi, yang menyebabkan proses pemisahan gliserol menjadi kurang sempurna. Akibatnya, sebagian komponen berat masih tertinggal dalam biodiesel sehingga meningkatkan kekentalan produk yang dihasilkan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi katalis CaO/SiO_2 dari 4% hingga 8% menyebabkan viskositas biodiesel mengalami kenaikan dari 4,46 cSt menjadi 5,05 cSt. Walaupun seluruh sampel masih memenuhi standar mutu biodiesel SNI 7182:2015, penggunaan katalis 4% menghasilkan viskositas yang lebih rendah sehingga biodiesel yang diperoleh memiliki karakteristik aliran yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan katalis yang lebih tinggi.

4.2.3 Pengujian Karakteristik Mutu Biodiesel Berbasis *Crude Palm Oil* (CPO) terhadap Standar SNI 7182:2015

Pengujian parameter fisik dan kimia di laboratorium sangat penting untuk mengevaluasi efektivitas reaksi transesterifikasi serta memastikan kelayakan biodiesel sebelum digunakan pada mesin diesel. Berdasarkan hasil sintesis biodiesel dari CPO menggunakan katalis heterogen CaO/SiO_2 di dalam *Baffled Stirred Tank Reactor*, diperoleh mutu produk yang sangat baik. Seluruh parameter pengujian seperti densitas, viskositas kinematik, titik nyala (*flash point*), angka setana (*cetane number*), dan angka asam berhasil memenuhi spesifikasi Standar Nasional Indonesia (SNI 7182:2015).

Parameter fisik yang paling dipengaruhi kondisi operasi reaktor adalah densitas dan viskositas kinematik. Pada kondisi optimal (katalis 4%), diperoleh densitas 0,8633 g/ml dan viskositas 4,46 cSt yang masih berada dalam rentang SNI 7182:2015. Peningkatan katalis menjadi 8% menyebabkan densitas naik menjadi 0,8906 g/ml dan viskositas menjadi 5,05 cSt akibat reaksi saponifikasi yang membentuk emulsi sabun. Kondisi ini menghambat pemisahan biodiesel dan gliserol sehingga sisa trigliserida, digliserida, dan gliserol bebas ikut terbawa ke dalam biodiesel, yang meningkatkan kekentalan dan kerapatan produk.

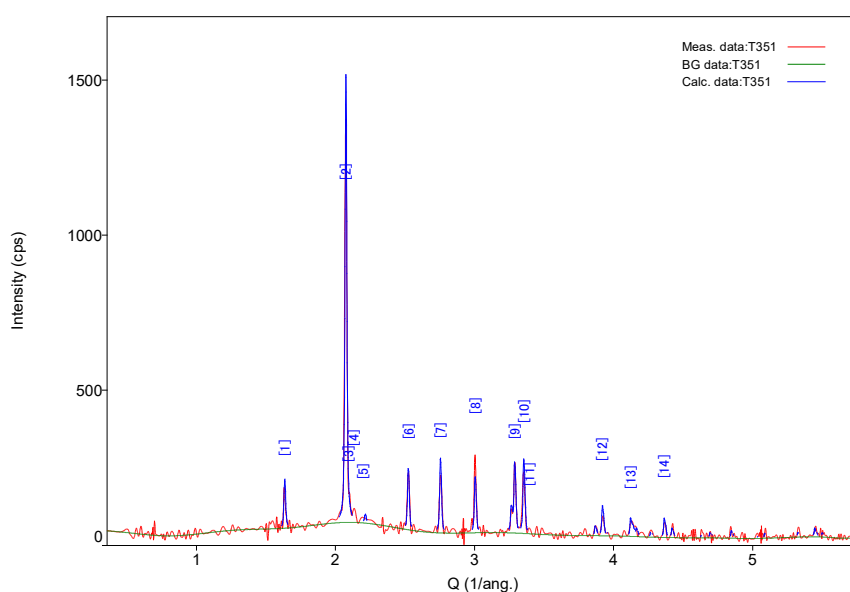
Karakteristik fisik tersebut memengaruhi sifat termal dan pembakaran biodiesel. Titik nyala berada pada rentang 157–174 °C, jauh di atas batas minimum SNI (100 °C), yang menunjukkan rendahnya kandungan metanol sisa. Viskositas yang lebih tinggi pada katalis 8% menyebabkan titik nyala meningkat karena membutuhkan energi penguapan yang lebih besar. Biodiesel juga memiliki angka setana 57–69, melebihi standar minimum 51. Pada katalis 4%, viskositas 4,46 cSt menghasilkan pengabutan bahan bakar yang lebih halus dan homogen, sehingga mempercepat pencampuran dengan oksigen, memperpendek waktu tunda penyalan, dan meningkatkan angka setana.

Evaluasi kimiawi menunjukkan angka asam biodiesel berada pada rentang 0,43–0,51 mg KOH/g. Sampel dengan katalis 4% dan 6% memenuhi persyaratan SNI 7182:2015 (maksimum 0,5 mg KOH/g), sedangkan katalis 8% menghasilkan angka asam 0,51 mg KOH/g sehingga tidak memenuhi standar. Peningkatan angka asam pada katalis 8% disebabkan oleh reaksi saponifikasi akibat kelebihan sifat basa katalis CaO/SiO_2 yang membentuk emulsi, menghambat pemisahan gliserol,

dan menyisakan FFA dalam biodiesel. Keberadaan FFA tersebut turut meningkatkan viskositas dan densitas produk, sehingga konsentrasi katalis perlu dijaga di bawah 8% agar biodiesel tetap non-korosif dan aman bagi sistem injeksi mesin.

Hasil ini menunjukkan bahwa parameter mutu biodiesel saling berkaitan. Kondisi terbaik diperoleh pada katalis 4% dan waktu reaksi 60 menit dalam *Baffled Stirred Tank Reactor*. Keberadaan *baffle* menghasilkan turbulensi yang merata sehingga perpindahan massa berlangsung optimal tanpa menyebabkan penggumpalan katalis. Kondisi ini mampu menekan reaksi penyabunan dan meminimalkan sisa asam lemak bebas, sehingga menghasilkan biodiesel yang lebih murni serta memenuhi standar komersial di Indonesia.

4.3 Analisis Karakterisasi Katalis CaO/SiO₂ Menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD)



Gambar 4.3 Pola Difraksi XRD Katalis CaO/SiO₂ Berdasarkan Hasil Optimasi WPPF

Karakterisasi katalis CaO/SiO₂ dilakukan menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fase kristalin yang terbentuk serta mengidentifikasi senyawa yang terdapat pada katalis. Pola difraksi yang diperoleh menunjukkan adanya beberapa puncak dengan intensitas yang berbeda-beda, yang merepresentasikan struktur kristal dari material penyusun katalis (Haryono, 2023).

Berdasarkan hasil identifikasi, fase kristalin yang dominan pada sampel adalah kalsit (CaCO_3). Puncak difraksi utama terdeteksi pada sudut 2θ sebesar $29,46^\circ$ dengan intensitas relatif 100%, serta didukung oleh beberapa puncak lainnya pada $23,12^\circ$, $31,25^\circ$, $36,08^\circ$, $39,48^\circ$, $43,25^\circ$, $47,56^\circ$, $48,58^\circ$, $57,42^\circ$, $60,76^\circ$, dan $64,65^\circ$. Kesesuaian posisi puncak-puncak tersebut dengan data standar menunjukkan bahwa fase CaCO_3 merupakan fase yang paling dominan dalam sampel katalis. Tidak terdeteksinya puncak khas CaO secara jelas mengindikasikan bahwa sebagian besar CaO telah mengalami karbonasi menjadi CaCO_3 akibat reaksi dengan karbon dioksida (CO_2) yang terdapat di udara.

CaO merupakan material yang bersifat higroskopis dan sangat reaktif terhadap CO_2 maupun uap air, sehingga selama proses pendinginan, penyimpanan, atau kontak dengan lingkungan, CaO dapat dengan mudah berubah menjadi CaCO_3 . Fenomena ini sering terjadi pada katalis berbasis CaO dan menyebabkan berkurangnya jumlah sifat basa aktif yang berperan dalam reaksi transesterifikasi. Selain itu, terdapat beberapa puncak difraksi yang tidak teridentifikasi secara pasti, yaitu pada sudut 2θ sekitar $29,73^\circ$, $30,28^\circ$, dan $49,16^\circ$. Puncak-puncak tersebut diduga berasal dari fase SiO_2 yang bersifat amorf atau dari senyawa pengotor yang jumlahnya relatif sedikit sehingga tidak dapat teridentifikasi secara jelas oleh perangkat lunak analisis. Rendahnya intensitas puncak tersebut menunjukkan bahwa keberadaannya tidak mendominasi struktur kristalin sampel.

Dominasi fase CaCO_3 pada katalis CaO/SiO_2 menunjukkan bahwa material hasil sintesis memiliki tingkat kristalinitas yang cukup baik, namun sebagian besar komponen aktif CaO telah mengalami transformasi menjadi CaCO_3 . Kondisi ini menyebabkan jumlah sifat basa aktif yang tersedia menjadi berkurang, sehingga aktivitas katalitik yang dihasilkan berpotensi menurun dibandingkan dengan katalis yang masih didominasi oleh fase CaO . Oleh karena itu, proses kalsinasi serta penyimpanan katalis perlu dilakukan secara optimal untuk meminimalkan kontak dengan udara sehingga pembentukan CaCO_3 dapat ditekan (Basumatary et al., 2023).

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa katalis CaO/SiO_2 didominasi oleh fase kalsit (CaCO_3), yang menandakan sebagian besar CaO telah mengalami karbonasi. Namun, keberadaan CaCO_3 menunjukkan bahwa kalsium berhasil

terdispersi pada pendukung SiO_2 , sehingga katalis masih berpotensi digunakan dalam reaksi transesterifikasi meskipun aktivitasnya kemungkinan menurun dibandingkan CaO murni (Haryono, 2023).