

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penggunaan bahan bakar fosil secara masif akibat globalisasi dan peningkatan populasi telah menyebabkan penurunan signifikan cadangan energi fosil serta lonjakan harga bahan bakar. Untuk mengatasi tantangan ini, bioenergi seperti biofuel dipandang sebagai alternatif energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan hemat biaya (Parida et al., 2022). Salah satu jenis biofuel yang paling menonjol adalah biodiesel, yakni bahan bakar cair alternatif pengganti solar yang dihasilkan melalui reaksi transesterifikasi antara trigliserida dan metanol dengan bantuan katalis, menghasilkan *fatty acid methyl ester* (FAME) sebagai produk utama. Biodiesel memiliki keunggulan ramah lingkungan karena menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Ambat et al., 2018; Enweremadu & Mbarawa, 2009).

Hingga saat ini, katalis homogen seperti asam (H_2SO_4 dan H_3PO_4) dan basa (NaOH dan KOH) masih umum digunakan dalam produksi biodiesel. Namun, penggunaan katalis homogen memiliki sejumlah kelemahan, termasuk pemisahan yang sulit dari produk, sifat korosif asam terhadap reaktor, dan pembentukan sabun oleh katalis basa yang dapat menurunkan rendemen biodiesel (Chua et al., 2020; Kumchompoo et al., 2017). Oleh karena itu, katalis heterogen (padat) mulai menjadi alternatif yang menjanjikan. Katalis heterogen menawarkan keunggulan seperti dapat digunakan ulang, lebih mudah dipisahkan dari produk, dan lebih ramah lingkungan dalam pengelolaannya (Amenaghawon et al., 2022; Basumatary et al., 2021; Parida et al., 2022).

Penelitian terkait katalis basa heterogen terus berkembang dengan memanfaatkan limbah biomassa dari sektor pertanian dan perkebunan sebagai prekursor. Berbagai jenis limbah telah dilaporkan, seperti batang pisang (Ao et al., 2024), batang kelapa (Bharadwaj et al., 2024), kulit durian (Leesing et al., 2021), cangkang telur (Johari et al., 2024), abu tongkol jagung (Siregar et al., 2021), abu sekam padi (Chen et al., 2013), abu kulit pinang (Vinu & Binitha, 2020), dan abu ampas tebu (Musalib et al., 2020). Pemanfaatan limbah biomassa tersebut tidak hanya

mendukung produksi biodiesel yang berkelanjutan, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan pencemaran lingkungan akibat akumulasi limbah pertanian dan perkebunan.

Berbagai limbah hasil pertanian dan perkebunan di Indonesia memiliki potensi untuk diteliti sebagai prekursor pembuatan katalis heterogen. Salah satu contohnya berasal dari perkebunan kelapa sawit. Luas perkebunan kelapa sawit (PKS) di Indonesia pada tahun 2022 mencapai 14,6 juta ha (BPS Indonesia, 2023). Peningkatan tersebut berimplikasi pada peningkatan jumlah limbah biomassa kebun seperti tandan kosong, serat buah dan cangkang kelapa sawit. Serat dan tandan kosong digunakan sebagai pupuk dengan dibiarkan membusuk pada perkebunan kelapa sawit. Cangkang sawit digunakan sebagai bahan bakar ketel uap (*boiler*). Abu hasil pembakaran cangkang kelapa sawit, yang sering kali hanya dibiarkan menumpuk, mengandung silika yang cukup tinggi sehingga berpotensi digunakan sebagai prekursor untuk sintesis katalis yang berupa senyawa silikat dalam reaksi transesterifikasi (Novita et al., 2020).

Bahan baku biodiesel seperti minyak nabati juga menjadi perhatian utama dalam berbagai penelitian. Berbagai studi mengenai pembuatan biodiesel menggunakan minyak nabati telah dilaporkan diantaranya *crude palm oil* (CPO) (Hayyan et al., 2022), minyak sawit (Siregar et al., 2021), minyak kanola (Hariprasath et al., 2019), minyak kelapa (Roschat et al., 2016), minyak bekatul (Fatimah et al., 2022), minyak kedelai (Silva et al., 2022), dan minyak zaitun (Islam et al., 2022; Khan et al., 2022). Dari berbagai jenis minyak nabati, minyak jelantah dinilai sebagai bahan baku yang lebih efektif untuk mengurangi biaya produksi biodiesel. Namun, kandungan asam lemak bebas yang tinggi ($\geq 2\%$) dan kadar air yang melebihi 0,5% dalam minyak tersebut dapat mengganggu reaksi transesterifikasi karena dapat memicu pembentukan sabun, yang pada akhirnya menurunkan rendemen biodiesel (Quah et al., 2020). Oleh karena itu, perlakuan awal terhadap minyak jelantah sebelum digunakan sebagai bahan baku biodiesel dianggap penting untuk menghasilkan rendemen dan kualitas biodiesel yang optimal.

Keberhasilan sintesis biodiesel tidak hanya ditentukan oleh jenis katalis dan minyak yang digunakan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional seperti konsentrasi katalis, rasio molar metanol terhadap minyak, suhu, dan waktu reaksi. Untuk mengidentifikasi kombinasi kondisi terbaik secara efisien, diperlukan pendekatan optimasi yang sistematis. *Response surface methodology* (RSM) merupakan metode statistik yang efektif untuk merancang eksperimen, menganalisis hubungan antar variabel, dan menentukan kondisi optimum guna memaksimalkan rendemen biodiesel.

Kebaruan dalam penelitian ini terletak pada pemanfaatan silika yang diekstraksi dari abu cangkang sawit untuk sintesis senyawa silikat sebagai katalis heterogen dalam produksi biodiesel berbasis minyak jelantah. Hingga saat ini, belum ditemukan literatur yang secara khusus mengeksplorasi penggunaan silika dari abu cangkang sawit sebagai prekursor katalis silikat dalam proses transesterifikasi minyak jelantah. Minyak jelantah yang digunakan dalam penelitian ini terlebih dahulu mengalami proses *pretreatment* menggunakan abu cangkang sawit, mengacu pada penelitian sebelumnya, untuk menurunkan kadar asam lemak bebas (*free fatty acid*/FFA) dan kandungan airnya sehingga memenuhi syarat untuk reaksi transesterifikasi.

Selain pengembangan katalis berbasis limbah, kebaruan lain dari penelitian ini terletak pada penerapan RSM sebagai pendekatan optimasi proses yang berbasis statistik. RSM digunakan untuk menentukan kondisi operasi optimum dari beberapa variabel proses, yaitu konsentrasi katalis, rasio molar metanol terhadap minyak, suhu, dan waktu reaksi, dengan rendemen biodiesel sebagai respons yang diamati. Keunggulan utama RSM terletak pada kemampuannya memberikan analisis statistik yang mendalam melalui *Analysis of variance* (ANOVA), yang mengevaluasi signifikansi pengaruh setiap variabel input. Parameter seperti *p-value*, *F-value*, dan R^2 digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh, sehingga proses optimasi dapat dilakukan secara terukur, ilmiah, dan dapat diandalkan.

1.2. Rumusan Masalah

Pemanfaatan silika dari abu cangkang sawit untuk sintesis katalis heterogen berbasis silikat dalam produksi biodiesel berbahan baku minyak jelantah, yang disertai dengan proses optimasi menggunakan metode *Response surface methodology* (RSM), mengarahkan pada perumusan masalah sebagai berikut:

1. Apakah senyawa silikat yang disintesis dari silika abu cangkang sawit memiliki potensi untuk digunakan sebagai katalis dalam reaksi transesterifikasi minyak jelantah untuk menghasilkan biodiesel?
2. Bagaimana karakteristik senyawa silikat hasil sintesis, meliputi struktur ikatan, struktur kristalin, morfologi, dan sifat fisik permukaan, sebelum dan sesudah digunakan sebagai katalis untuk pembuatan biodiesel?
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi katalis, rasio molar metanol terhadap minyak, suhu dan waktu reaksi terhadap rendemen biodiesel berdasarkan proses optimasi menggunakan metode RSM?
4. Bagaimana performa katalis silikat hasil sintesis dalam menghasilkan biodiesel melalui penggunaan berulang (*reusability*)?
5. Bagaimana model kinetika, termodinamika, dan mekanisme reaksi transesterifikasi menggunakan katalis silikat hasil sintesis?
6. Bagaimana karakteristik biodiesel yang dihasilkan pada kondisi optimum jika dibandingkan dengan standar mutu SNI?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis potensi senyawa silikat yang disintesis dari silika abu cangkang sawit sebagai katalis dalam reaksi transesterifikasi minyak jelantah untuk menghasilkan biodiesel.
2. Mengkaji karakteristik senyawa silikat hasil sintesis, meliputi struktur ikatan, struktur kristalin, morfologi, dan sifat fisik permukaan, sebelum dan sesudah digunakan sebagai katalis dalam pembuatan biodiesel.

3. Menganalisis pengaruh variabel proses berupa konsentrasi katalis, rasio molar metanol terhadap minyak, suhu, dan waktu reaksi terhadap rendemen biodiesel, serta menentukan kondisi optimum menggunakan metode RSM.
4. Mengevaluasi performa katalis silikat hasil sintesis dalam menghasilkan biodiesel melalui uji penggunaan berulang (*reusability*).
5. Menganalisis model kinetika, parameter termodinamika, dan mekanisme reaksi transesterifikasi yang terjadi pada penggunaan katalis silikat hasil sintesis.
6. Mengevaluasi karakteristik biodiesel yang dihasilkan pada kondisi optimum dan membandingkannya dengan standar mutu biodiesel menurut SNI.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memiliki manfaat antara lain :

1. Mendorong pemanfaatan limbah minyak jelantah dan abu cangkang sawit sebagai bahan baku dalam produksi biodiesel, sehingga mendukung pengembangan energi terbarukan yang berbiaya rendah dan ramah lingkungan.
2. Menghasilkan katalis silikat berbasis limbah yang efektif dan dapat digunakan berulang dalam proses transesterifikasi, serta menyediakan data karakterisasi dan performa katalis yang mendukung pengembangan katalis heterogen.
3. Mengembangkan model optimasi proses transesterifikasi menggunakan metode RSM, serta menyediakan evaluasi mutu biodiesel terhadap standar SNI sebagai dasar penerapan praktis.

1.5. Kebaruan Penelitian

Penelitian ini merupakan studi pertama yang mengkombinasikan penggunaan katalis berbasis silikat yang disintesis dari abu cangkang sawit dengan pendekatan optimasi proses melalui metode *Response surface methodology* (RSM) dalam produksi biodiesel. Pendekatan terpadu ini belum pernah dilaporkan sebelumnya, sehingga memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan dalam pengembangan katalis heterogen berbasis limbah dan perancangan strategi optimasi reaksi transesterifikasi yang lebih efisien.