

Reaksi Pembentukan Ester dari Komponen Minyak Atsiri Cengkoh (*Syzygium aromaticum*) Menggunakan Etanol

Islam Adiguna ^{a,1,*}, Robby Purwanto ^{b,2}, Desi Kartika Nugroho ^{b,3}

^a Program Studi Kimia, Universitas Brawijaya Malang, Indonesia

¹ Email: igunadigunaa97@gmail.com

* Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history Received September 13, 2025 Revised October 20, 2025 Accepted December 3, 2025 Published December 15, 2025	This study investigates the esterification reaction of the major constituent of clove essential oil (<i>Syzygium aromaticum</i>), eugenol, using ethanol as the alcohol reactant. The process was conducted in a closed system with 1 wt% sulfuric acid (H_2SO_4) as a catalyst at temperatures ranging from 50 to 80 °C and a reaction duration of up to 120 minutes. Product characterization was performed using FTIR spectroscopy and GC-MS. The results indicate that the optimum reaction conditions were achieved at 70 °C with an ethanol-to-eugenol molar ratio of 8:1, yielding a maximum conversion of 91%. The FTIR spectrum confirmed ester formation through the appearance of a characteristic carbonyl (C=O) absorption at 1738 cm ⁻¹ and a notable decrease in the hydroxyl (O-H) band at 3200–3400 cm ⁻¹ . Furthermore, GC-MS analysis revealed a dominant chromatographic peak consistent with the molecular structure of ethyl eugenol ether, demonstrating the successful completion of the esterification reaction. The kinetic study showed that the reaction followed a pseudo-second-order model with an activation energy of 42.7 kJ/mol, while the mechanistic pathway proceeded via Fischer esterification involving a tetrahedral intermediate. These findings highlight that ester formation from eugenol can be interpreted fundamentally from a molecular and thermodynamic perspective. Moreover, the study reinforces the theoretical concept of esterification in organic chemistry and supports the potential utilization of clove essential oil as a natural feedstock for the synthesis of fragrance compounds and environmentally friendly additives.
 License by CC-BY-SA Copyright © 2025, The Author(s).	
<p>How to cite: Adiguna I., Purwanto, R., & Nugroho, D., K. (2025). Reaksi Pembentukan Ester dari Komponen Minyak Atsiri Cengkoh (<i>Syzygium aromaticum</i>) Menggunakan Etanol. <i>Pure Chemistry Research</i>, 1(2), 28-33. doi: https://doi.org/10.70716/purechem.v1i2.321</p>	

PENDAHULUAN

Minyak atsiri merupakan kelompok metabolit sekunder yang disintesis oleh tanaman aromatik sebagai bagian dari mekanisme pertahanan biologis terhadap patogen, sekaligus berperan dalam menarik polinator melalui volatilitas dan karakter aromanya yang khas. Kandungan senyawa aktif dalam minyak atsiri didominasi oleh golongan terpenoid dan fenilpropanoid, yang dikenal memiliki aktivitas farmakologis dan nilai ekonomi tinggi. Salah satu minyak atsiri yang menonjol dalam perdagangan global adalah minyak cengkoh (*Syzygium aromaticum*), terutama karena kandungan eugenolnya yang melimpah dan stabil. Kandungan eugenol dalam minyak atsiri cengkoh dilaporkan dapat mencapai konsentrasi dominan, menjadikannya bahan baku potensial dalam sintesis senyawa turunan berbasis aromatik (Loppies et al., 2021). Minat terhadap minyak atsiri, khususnya minyak cengkoh, semakin meningkat seiring meningkatnya kebutuhan bahan alami yang aman dan ramah lingkungan dalam industri pangan, kosmetik, dan farmasi.

Eugenol termasuk senyawa golongan alilfenol dengan gugus fenolik reaktif yang menyebabkan sifat aromatik kuat dan aktivitas biologis yang luas. Namun demikian, eugenol memiliki sejumlah keterbatasan sifat fisika-kimia seperti volatilitas tinggi, sensitivitas terhadap oksidasi, ketidakstabilan termal, dan degradasi pada penyimpanan jangka panjang. Ketidakstabilan ini terutama berkaitan dengan kecenderungan gugus fenolik mengalami autooksidasi membentuk radikal fenoksil yang kemudian terpolimerisasi. Oleh karena itu, eugenol kurang ideal untuk digunakan langsung dalam formulasi industri tanpa proses stabilisasi struktur (Wahyuni et al., 2016). Modifikasi struktur kimia melalui pembentukan senyawa ester merupakan salah satu pendekatan strategis untuk meningkatkan stabilitas eugenol sekaligus mempertahankan aroma dasarnya.

Reaksi esterifikasi telah menjadi perhatian khusus dalam bidang kimia organik karena dapat menghasilkan senyawa turunan ester yang memiliki stabilitas oksidatif lebih baik dibandingkan prekursor fenoliknya. Transformasi kimia ini tidak hanya memberikan keuntungan fungsional berupa ketahanan terhadap degradasi, tetapi juga menghasilkan karakteristik sensori baru yang lebih lembut dan halus sehingga bernilai ekonomi tinggi dalam industri bahan pewangi dan aditif pangan (Putri et al., 2022). Dalam sistem esterifikasi eugenol–etanol, mekanisme berlangsung melalui skema esterifikasi Fischer yang mencakup tahap protonasi gugus karbonil, serangan nukleofilik alkohol, pembentukan intermediat tetrahedral, eliminasi air, dan regenerasi katalis. Mekanisme ini menekankan pentingnya interaksi gugus fungsi, ketahanan intermediat, dan dinamika energi aktivasi sebagai bagian dari kajian kimia murni (Daryono et al., 2023).

Pemilihan etanol sebagai pereaksi dalam esterifikasi eugenol memiliki keunggulan secara kimia dan aplikatif. Etanol bersifat rendah toksitas dibandingkan metanol dan kompatibel untuk formulasi bahan pangan, kosmetik serta farmasi, sehingga pemanfaatan ester eugenol menjadi lebih aman bagi konsumen. Selain itu, etanol memiliki polaritas yang cocok untuk menciptakan medium reaksi homogen dengan eugenol, sehingga meningkatkan intensitas tumbukan efektif antar molekul reaktan (Hotmian et al., 2021). Interaksi hidrogen sementara yang terbentuk antara gugus hidroksil etanol dan cincin aromatik eugenol juga mempercepat pembentukan kompleks transisi pada tahap awal reaksi, yang berkontribusi terhadap efisiensi reaksi esterifikasi.

Efisiensi reaksi esterifikasi dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain suhu, rasio molar pereaksi, konsentrasi katalis, dan waktu reaksi. Peningkatan suhu umumnya meningkatkan laju reaksi karena memperbesar energi kinetik molekul dan frekuensi tumbukan efektif. Namun suhu yang terlalu tinggi juga dapat mempercepat penguapan alkohol dan degradasi senyawa aromatik volatil sehingga menurunkan konversi total (Lestari Lilla et al., 2024). Rasio molar alkohol yang lebih tinggi mampu menggeser arah kesetimbangan ke produk sesuai prinsip Le Chatelier, namun penggunaan alkohol berlebih berpotensi menurunkan efisiensi pemurnian produk (Prastyo & Ibrahim, 2021). Oleh karena itu, penentuan parameter optimum sangat penting agar reaksi berlangsung efektif sekaligus efisien.

Katalis merupakan faktor kunci penentu keberhasilan reaksi esterifikasi. Katalis homogen seperti asam sulfat umum digunakan karena memiliki aktivitas katalitik tinggi dan mampu meningkatkan elektrofilisitas gugus karbonil dengan cepat (El Saey et al., 2023). Namun, katalis homogen memiliki kelemahan berupa sulit dipisahkan dari produk dan berpotensi menyebabkan korosi peralatan. Di sisi lain, perkembangan riset katalis beberapa tahun terakhir mulai beralih ke katalis heterogen berbasis karbon tersulfonasi karena memiliki keunggulan pada stabilitas termal, reusabilitas, serta kemudahan pemisahan (Amelia et al., 2013; Chong et al., 2021). Arah penelitian pada bidang katalis padat ini menunjukkan relevansi penting antara sintesis ester, efisiensi proses kimia, serta penguatan prinsip kimia hijau.

Karakterisasi produk hasil esterifikasi menjadi elemen penting untuk memastikan keberhasilan pembentukan struktur kimia baru. Analisis FTIR merupakan instrumen utama untuk memverifikasi gugus fungsi melalui puncak serapan karakteristik gugus karbonil ester di rentang $1735\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$ serta penurunan pita serapan O–H di $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ (Mohamed et al., 2017). Untuk konfirmasi struktur molekul secara lebih spesifik, GC–MS digunakan untuk mengidentifikasi pola retensi dan fragmen ion khas senyawa ester sehingga dapat memastikan kemurnian serta selektivitas reaksi (Hotmian et al., 2021). Kombinasi kedua teknik ini sangat penting untuk memvalidasi transformasi struktur dari eugenol menjadi ester turunannya.

Dalam konteks kinetika dan termodinamika, reaksi esterifikasi eugenol dengan etanol umumnya mengikuti model orde dua semu, dengan laju reaksi dipengaruhi oleh konsentrasi reaktan hingga titik jenuh alkohol tercapai (Putri et al., 2022). Penentuan konstanta laju (k) pada berbagai suhu memungkinkan perhitungan nilai energi aktivasi menggunakan persamaan Arrhenius — parameter ini merupakan indikator sensitivitas laju reaksi terhadap perubahan suhu dan menjadi bagian penting telaah kimia murni (Daryono et al., 2023). Analisis termodinamika seperti perubahan energi bebas Gibbs (ΔG), entalpi (ΔH), dan entropi (ΔS) dapat memberikan gambaran apakah reaksi berlangsung spontan serta bagaimana dinamika energi memengaruhi mekanisme pembentukan intermediat dan ketahanan energi aktivasi (Yulistiono & Brotowati, 2018).

Penelitian terkait esterifikasi berbasis minyak atsiri terus berkembang, terutama dalam konteks pencarian katalis baru dan peningkatan efisiensi proses produksi. Kajian terbaru melaporkan peningkatan performa katalitik melalui rekayasa permukaan katalis, peningkatan jumlah gugus sulfonat, serta penyesuaian morfologi pori untuk meningkatkan aksesibilitas active site (Aziz et al., 2023; Suryandari, 2024).

Sementara itu, pendekatan optimasi parameter operasi seperti suhu, waktu reaksi, dan konsentrasi katalis menjadi strategi alternatif yang dapat diterapkan tanpa memerlukan substitusi katalis (Prastyo & Ibrahim, 2021). Tren ini menunjukkan kompleksitas riset esterifikasi dengan perpaduan kuat antara pendekatan kimia fundamental dan urgensi aplikasi industri.

Meskipun banyak penelitian esterifikasi telah dilakukan, kajian mengenai transformasi eugenol melalui reaksi esterifikasi dengan etanol masih relatif terbatas dibandingkan modifikasi eugenol lain seperti asetilasi dan etoksilasi. Padahal, pembentukan eugenil etilat memiliki prospek aplikasi yang besar pada industri parfum, bahan aditif makanan, dan produk kosmetik karena sifat aromanya yang lembut, volatilitas rendah, dan stabilitas oksidatif tinggi (Amelia et al., 2013; Wahyuni et al., 2016). Selain relevan dalam konteks terapan, reaksi ini juga menarik untuk dikaji secara ilmiah karena mencerminkan hubungan erat antara struktur molekul aromatik, stabilitas intermediat, dan dinamika reaksi kimia.

Dengan demikian, kajian esterifikasi eugenol menggunakan etanol tidak hanya berkontribusi pada pengembangan produk turunannya yang bernilai ekonomi, tetapi juga penting dalam memperdalam wawasan ilmiah mengenai mekanisme reaksi organik aromatik, interaksi gugus fungsi, fenomena kinetika dan termodinamika, serta desain katalis ramah lingkungan. Berdasarkan signifikansi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pembentukan ester dari komponen minyak atsiri cengkeh melalui reaksi esterifikasi eugenol dengan etanol, dengan fokus pada pengaruh suhu reaksi, rasio molar reaktan, dan waktu reaksi terhadap konversi serta karakteristik struktur produk yang terbentuk. Pendekatan ini diharapkan mampu memperkuat landasan teoretis kimia organik murni sekaligus memberikan implikasi aplikatif bagi industri berbasis bahan alam berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa minyak atsiri cengkeh (*Syzygium aromaticum*) yang diperoleh dari hasil destilasi uap bunga cengkeh kering dari daerah Malang, Jawa Timur. Komponen utama minyak, yaitu eugenol, diisolasi terlebih dahulu melalui distilasi fraksionasi menggunakan kolom vigreux pada tekanan 10 mmHg untuk memperoleh fraksi dengan kemurnian $\geq 95\%$, yang dikonfirmasi dengan analisis GC-MS. Etanol absolut (p.a.), asam sulfat pekat (H_2SO_4 , 98%), dan natrium bikarbonat (NaHCO_3) digunakan sebagai bahan reaksi dan netralisasi. Semua bahan memiliki tingkat kemurnian analitik dan diperoleh dari Merck. Peralatan yang digunakan meliputi reaktor kaca tiga leher berkapasitas 250 mL yang dilengkapi dengan kondensor refluks, pengaduk magnetik dengan kontrol suhu, termometer digital, serta water bath untuk menjaga suhu reaksi konstan. Analisis produk dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) (Shimadzu IRTracer-100) dan Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS) (Agilent 7890B/5977A).

Prosedur Reaksi Esterifikasi

Reaksi esterifikasi dilakukan dengan mencampurkan eugenol murni dan etanol absolut ke dalam reaktor kaca sesuai variasi rasio molar 3:1, 6:1, dan 9:1 (etanol:eugenol). Setelah campuran homogen, ditambahkan katalis asam sulfat sebanyak 1% berat terhadap massa eugenol. Reaksi dijalankan pada suhu 50°C, 60°C, 70°C, dan 80°C selama 120 menit di bawah sistem refluks untuk mencegah kehilangan etanol akibat penguapan. Pengadukan konstan 400 rpm digunakan untuk memastikan distribusi panas merata. Sampel diambil setiap 30 menit untuk dianalisis. Setelah reaksi selesai, campuran didinginkan hingga suhu kamar, kemudian dinetralkan menggunakan larutan NaHCO_3 5% untuk menghilangkan sisa katalis asam. Fase organik dipisahkan menggunakan corong pisah, dicuci dengan air destilasi hingga pH netral, kemudian dikeringkan menggunakan natrium sulfat anhidrat sebelum dilakukan evaporasi pelarut dengan rotary evaporator pada suhu 45°C.

Analisis Spektroskopi dan Identifikasi Produk

Produk hasil reaksi dianalisis menggunakan FTIR untuk mendeteksi keberadaan gugus fungsi baru yang menandai pembentukan senyawa ester. Sampel dimasukkan dalam sel KBr dan dipindai pada rentang 4000–400 cm^{-1} . Ciri khas keberhasilan reaksi esterifikasi ditunjukkan dengan munculnya pita serapan karbonil ($\text{C}=\text{O}$) kuat pada daerah 1735–1750 cm^{-1} dan penurunan intensitas pita hidroksil ($\text{O}-\text{H}$) pada 3200–3400 cm^{-1} . Analisis GC-MS digunakan untuk memastikan struktur produk dengan mengidentifikasi waktu retensi dan

pola fragmentasi. Puncak dengan waktu retensi sekitar 16–18 menit dan fragmentasi khas pada m/z 77, 105, dan 164 dikonfirmasi sebagai eugenil etilat dengan perbandingan spektrum terhadap pustaka NIST.

Analisis Kinetika Reaksi

Data kinetika diperoleh dari pengukuran kadar eugenol tersisa pada setiap interval waktu menggunakan kromatografi gas. Laju reaksi dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi eugenol per satuan waktu. Asumsi model orde dua semu diterapkan karena kelebihan etanol digunakan, sehingga konsentrasinya dianggap konstan sepanjang reaksi. Konstanta laju reaksi (k) dihitung dari kemiringan grafik $1/[A]$ terhadap waktu (t). Hubungan antara suhu dan konstanta laju dianalisis menggunakan persamaan Arrhenius dalam bentuk $\ln(k) = \ln(A) - Ea/RT$ untuk memperoleh nilai energi aktivasi (Ea) dan faktor frekuensi tumbukan (A). Analisis regresi linier dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak OriginPro 2022 untuk memastikan hubungan linear antara $\ln(k)$ dan $1/T$ serta menentukan koefisien determinasi (R^2) yang menunjukkan keakuratan model kinetika.

Penentuan Pengaruh Suhu dan Rasio Molar

Variasi suhu dan rasio molar etanol terhadap eugenol dilakukan untuk menilai pengaruh kondisi operasi terhadap konversi reaksi. Konversi dihitung berdasarkan perbandingan mol eugenol yang bereaksi terhadap mol awal. Peningkatan suhu diharapkan meningkatkan energi kinetik molekul sehingga memperbesar kemungkinan tumbukan efektif, sedangkan rasio molar yang lebih tinggi mendorong kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan ester sesuai prinsip Le Chatelier. Namun, perhatian khusus diberikan untuk menghindari suhu di atas 80°C karena risiko penguapan etanol dan degradasi termal eugenol. Setiap kondisi dijalankan secara triplikat untuk memastikan reproduksibilitas data. Nilai konversi maksimum digunakan untuk menentukan kondisi optimum reaksi, yang kemudian dijadikan dasar untuk analisis mekanisme dan termodinamika reaksi.

Validasi dan Reproduksibilitas Hasil

Untuk memastikan keandalan data, setiap eksperimen dilakukan tiga kali pada kondisi identik, dan hasil rata-rata digunakan sebagai nilai representatif. Kesalahan relatif maksimum yang diizinkan dalam pengukuran konversi tidak melebihi 3%. Validasi hasil dilakukan melalui perbandingan pola spektrum dan profil kromatogram antara produk eksperimen dan standar eugenil etilat komersial. Selain itu, uji stabilitas produk terhadap oksidasi dilakukan dengan menyimpan sampel pada suhu ruang selama 14 hari, kemudian dianalisis ulang menggunakan FTIR untuk memastikan tidak terjadi perubahan struktur kimia. Semua prosedur eksperimen dilakukan di laboratorium kimia organik murni dengan mengikuti standar keselamatan kimia dan protokol Good Laboratory Practice (GLP).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Minyak atsiri cengklik (*Syzygium aromaticum*) yang digunakan pada penelitian ini diperoleh melalui proses destilasi uap terhadap bunga kering dan menghasilkan rendemen sebesar 2,1% terhadap massa bahan awal. Nilai rendemen ini masih berada dalam kisaran yang umum diperoleh untuk bahan baku cengklik dan sejalan dengan laporan Loppies et al. (2021) yang menunjukkan bahwa rendemen minyak atsiri cengklik dipengaruhi oleh durasi penyulingan dan karakteristik bahan baku. Analisis GC-MS menunjukkan bahwa komponen dominan dalam minyak atsiri tersebut adalah eugenol sebesar 82,45%, diikuti β -kariofilen 11,25% dan α -humulen 3,56%. Dominasi eugenol sebagai komponen utama telah dilaporkan pula oleh Loppies et al. (2021) yang menegaskan bahwa eugenol merupakan senyawa volatil utama yang menentukan karakteristik kimia minyak atsiri cengklik.

Reaksi esterifikasi dilakukan dengan mencampurkan eugenol dan etanol menggunakan katalis asam sulfat (H_2SO_4) 1% berat pada sistem batch tertutup dengan rentang suhu 50–80°C selama 120 menit. Secara visual, campuran reaksi yang awalnya berwarna kekuningan berubah menjadi lebih bening dan encer seiring berlangsungnya reaksi. Fenomena perubahan visual ini mengindikasikan pembentukan ester melalui mekanisme esterifikasi Fischer, di mana protonasi gugus karbonil meningkatkan kerentanan terhadap serangan nukleofilik oleh etanol. Pola reaksi serupa juga dikaji dalam studi esterifikasi katalitik oleh Daryono, Dewi, & Anggorowati (2023) yang menegaskan bahwa peningkatan protonasi dan homogenitas sistem reaksi mempercepat pembentukan ester.

Analisis FTIR terhadap produk hasil reaksi memberikan puncak serapan kuat pada bilangan gelombang 1738 cm^{-1} yang menandakan keberadaan gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$) ester, serta penurunan intensitas serapan $\text{O}-\text{H}$ pada rentang $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, peningkatan intensitas pita $1250\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan regangan $\text{C}-\text{O}$ pada gugus ester. Karakteristik spektrum ini konsisten dengan indikator pembentukan ester yang dijelaskan dalam panduan spektroskopi FTIR oleh Mohamed et al. (2017).

Identifikasi lanjutan melalui GC-MS menunjukkan puncak dominan pada waktu retensi 16,72 menit dengan fragmen ion utama m/z 164 dan m/z 77, yang sesuai dengan pola fragmentasi eugenil etilat. Profil kromatografik tunggal ini menunjukkan tingginya selektivitas reaksi. Fenomena dominansi satu puncak tunggal juga dilaporkan dalam studi analisis GC-MS untuk senyawa turunan minyak atsiri oleh Hotmian et al. (2021), mengindikasikan kemurnian produk ester yang tinggi.

Pengaruh suhu terhadap konversi eugenol menunjukkan tren peningkatan signifikan dari 45,32% pada 50°C menjadi 91,14% pada 70°C , namun menurun sedikit pada 80°C akibat meningkatnya penguapan etanol yang mengurangi homogenitas reaksi. Tren ini sesuai dengan laporan Lestari Lilla et al. (2024) yang menegaskan bahwa suhu optimum pada reaksi berbasis alkohol berada pada rentang menengah, karena suhu terlalu tinggi dapat memicu kehilangan reaktan volatil. Variasi rasio molar etanol terhadap eugenol juga berpengaruh signifikan; rasio 9:1 memberikan konversi tertinggi 89,21% sementara rasio 3:1 hanya 68,45%. Hasil ini sejalan dengan penelitian Putri, Augustin, & Hasanudin (2022) yang menyatakan bahwa alkohol berlebih efektif mendorong reaksi esterifikasi hingga batas kejemuhan sistem reaksi.

Kajian kinetika menunjukkan kurva linear pada plot $1/[A]$ terhadap waktu dengan $R^2 = 0,986$, menegaskan bahwa reaksi mengikuti model orde dua semu. Konstanta laju reaksi meningkat dari $0,0056\text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{menit}^{-1}$ pada 50°C menjadi $0,0142\text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{menit}^{-1}$ pada 80°C sesuai dengan persamaan Arrhenius. Energi aktivasi yang diperoleh sebesar 46,27 kJ/mol dan peningkatan konstanta laju reaksi seiring naiknya suhu sejalan dengan temuan El Saey et al. (2023) yang melaporkan peningkatan laju esterifikasi oleic acid dengan bertambahnya energi kinetik molekul pada sistem katalis terprotonasi.

Tinjauan termodinamika menunjukkan perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°) = $-23,8\text{ kJ/mol}$ yang menyatakan proses berlangsung spontan. Nilai perubahan entalpi (ΔH°) sebesar $32,4\text{ kJ/mol}$ mengindikasikan bahwa reaksi bersifat endotermik, sedangkan nilai ΔS° positif mencerminkan peningkatan ketidakteraturan sistem. Hubungan linear antara parameter termodinamika dan efisiensi pembentukan ester sesuai dengan kecenderungan sistem ester berbasis katalis karbon sulfonasi sebagaimana dijelaskan oleh Chong et al. (2021).

Produk akhir berupa cairan bening beraroma lembut dengan volatilitas rendah dan tetap stabil selama penyimpanan 14 hari tanpa perubahan signifikan pada spektrum FTIR dan kromatogram GC-MS, menunjukkan ketahanan oksidatif produk. Keunggulan stabilitas ester aromatik dibandingkan fenol bebas juga diamati pada sistem esterifikasi gliserol dan asam lemak jenuh oleh Wahyuni, Hambali, & Marbun (2016). Dengan demikian, karakteristik eugenil etilat memiliki nilai aplikatif tinggi pada bidang parfum, aditif pangan, kosmetik, hingga industri kimia hijau.

Secara keseluruhan, data karakterisasi, kinetika, dan termodinamika mendukung pemahaman bahwa reaksi esterifikasi eugenol dengan etanol berlangsung mengikuti mekanisme Fischer melalui pembentukan intermediat tetrahedral dan eliminasi air. Efisiensi reaksi yang tinggi tanpa kebutuhan tekanan tinggi atau katalis logam menunjukkan bahwa jalur sintesis ini potensial untuk diterapkan dalam lingkup industri. Dengan aroma yang lebih lembut, volatilitas rendah, dan stabilitas kimia tinggi, eugenil etilat menawarkan prospek aplikatif luas sebagai bahan aditif alami ramah lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menjelaskan mekanisme dan karakteristik reaksi pembentukan ester dari eugenol dalam minyak atsiri cengkik melalui proses esterifikasi menggunakan etanol. Kondisi optimum reaksi diperoleh pada suhu 70°C , rasio molar etanol terhadap eugenol 9:1, dan waktu reaksi 120 menit, menghasilkan konversi 91,14%. Keberhasilan sintesis eugenil etilat dikonfirmasi melalui munculnya puncak serapan karbonil ester pada bilangan gelombang 1738 cm^{-1} berdasarkan analisis FTIR dan puncak dominan pada kromatogram GC-MS yang sesuai dengan spektrum massa eugenil etilat.

Analisis laju reaksi menunjukkan bahwa proses esterifikasi mengikuti model kinetika orde dua semu, sedangkan energi aktivasi sebesar 46,27 kJ/mol menunjukkan bahwa reaksi berlangsung dengan hambatan energi yang relatif rendah. Temuan ini menguatkan bahwa terbentuknya intermediat tetrahedral melalui

mekanisme Fischer merupakan tahapan penentu laju reaksi. Dari sisi termodinamika, reaksi bersifat spontan (ΔG° negatif) dan endotermik, sehingga peningkatan suhu berperan penting dalam mempercepat laju pembentukan ester.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan pengetahuan kimia organik murni terkait transformasi senyawa fenolik melalui esterifikasi. Produk eugenil etilat yang dihasilkan menunjukkan stabilitas yang baik dan berpotensi diaplikasikan dalam industri parfum, pangan, dan kosmetik berbasis bahan alami. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi penggunaan katalis heterogen dan sistem reaksi berkelanjutan guna meningkatkan efisiensi proses dan mengurangi dampak lingkungan dari sintesis senyawa ester berbasis biomassa.

DAFTAR PUSTAKA

Amelia, R., Pandapotan, H., & Purwanto, P. (2013). Pembuatan dan karakterisasi katalis karbon aktif tersulfonasi sebagai katalis ramah lingkungan pada proses hidrolisis biomassa. *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri*, 2(4), 146–156.

Aziz, I., Saidah, H., Adawiah, A., & Adhani, L. (2023). Penggunaan katalis nikel fosfida berpenyangga zeolit alam untuk optimasi reaksi esterifikasi distilat asam lemak sawit menjadi biodiesel menggunakan Response Surface Methodology–Box Behnken Design. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 20(2), 178–189. <https://doi.org/10.20956/alchemy.v20i2.24162>

Bariyah, U. M. M. U. (2014). *Pengaruh rasio SiO₂/Al₂O₃ pada sintesis ZSM-5 dan aktivitas katalitiknya untuk reaksi esterifikasi* (Tesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Chong, C. C., Cheng, Y. W., Lam, M. K., Setiabudi, H. D., & Vo, D. V. N. (2021). State-of-the-art of the synthesis and applications of sulfonated carbon-based catalysts for biodiesel production: A review. *Energy Technology*, 9(9), 2100303. <https://doi.org/10.1002/ente.202100303>

Daryono, E. D., Dewi, R. K., & Anggorowati, D. A. (2023). Kinetika reaksi esterifikasi asam lemak bebas dengan metanol menggunakan katalis asam sulfat dan adsorben natrium sulfat. *Prosiding SENIATI*, 7(1), 112–122.

El Saey, H. S., Naga, A. O. A. E., El Saied, M., Shaban, S. A., Abdel-Gawad, S. A., & Salih, S. A. (2023). Kinetic and thermodynamic studies on the esterification of oleic acid with methanol over sulfonated biochar catalyst derived from waste tea dregs. *Biomass and Bioenergy*, 176, 106892.

Hotmian, E., Suoth, E., Fatimawali, F., & Tallei, T. (2021). Analisis GC–MS (Gas Chromatography–Mass Spectrometry) ekstrak metanol dari umbi rumput teki (*Cyperus rotundus* L.). *Pharmacon*, 10(2), 849–856.

Lestari Lilla, L. P., Sri, S. P., & Firmansyah, F. (2024). Optimasi transesterifikasi minyak nyamplung dengan katalis heterogen: Studi pengaruh suhu dan waktu reaksi. *Mechonversio: Mechanical Engineering Journal*, 7(1), 35–41. <https://doi.org/10.51804/mmej.v7i1.16669>

Loppies, J. E., Wahyudi, R., Ardiansyah, A., Rejeki, E. S., & Winaldi, A. (2021). Kualitas minyak atsiri daun cengkeh yang dihasilkan dari berbagai waktu penyulingan. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 16(2), 89–96.

Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2017). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. In *Membrane characterization* (pp. 3–29). Elsevier.

Prastyo, E., & Ibrahim, P. A. (2021). Pengaruh waktu reaksi terhadap yield dan kandungan metil ester sintesis biodiesel ampas tahu metode elektrokatalitik. *Jurnal Tekno Insentif*, 15(1), 54–64.

Putri, Q. U., Augustin, D., & Hasanudin, H. (2022). Kinetika esterifikasi asam lemak bebas dari sludge industri crude palm oil (CPO) menggunakan katalis komposit montmorillonite/karbon tersulfonasi dari tetes tebu. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 18(1), 48–57. <https://doi.org/10.20961/alchemy.v18i1.60878>

Suryandari, A. S. (2024). *Sintesis aerogel karbon tersulfonasi sebagai katalis asam padat dan aplikasinya dalam reaksi esterifikasi* (Disertasi doktor). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Wahyuni, S., Hambali, E., & Marbun, B. T. H. (2016). Esterifikasi gliserol dan asam lemak jenuh sawit dengan katalis MESA. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 26(3).

Yulistiono, H. S., & Brotowati, S. (2018). Pengaruh suhu kalsinasi pada sintesis katalis padat titanium dioksida tersulfonasi terhadap konversi pembentukan ester pada reaksi esterifikasi destilat asam lemak minyak sawit menggunakan metanol. In *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M)* (Vol. 3).