



Kajian Literatur Sistematis Tentang Pengembangan Katalis Ni/Alumina dan Implementasinya pada Proses *Pirolisis Selulosa Daun Nanas* untuk Produksi Bio-Oil

Siti Aristianty Holiza¹, Syaiful Bahri², Desi Heltina³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Desember 10, 2025

Revised Desember 20, 2025

Accepted Desember 29, 2025

Kata Kunci:

Pirolisis,
Ni/Al₂O₃,
Selulosa Daun Nanas,
Bio-oil,
Katalis

Keywords:

Pyrolysis,
Ni/Al₂O₃,
Pineapple Leaf Cellulose,
Bio-Oil,
Catalyst,

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi katalis Ni/Alumina (Ni/Al₂O₃) serta menguji pengaruh aplikasinya terhadap hasil dan kualitas bio-oil yang dihasilkan dari pirolisis selulosa daun nanas. Penelitian ini menggunakan pendekatan Tinjauan Literatur Sistematis (SLR) dengan analisis mendalam terhadap 27 artikel ilmiah dari basis data terindeks Scopus dan basis data nasional. Data dikumpulkan melalui tahapan identifikasi, seleksi, ekstraksi, dan sintesis mengikuti protokol PRISMA, dengan fokus pada tiga aspek utama: metode sintesis katalis, hasil karakterisasi, dan kinerja katalis dalam pirolisis biomassa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis Ni/Al₂O₃, yang disintesis melalui metode impregnasi dan dikarakterisasi menggunakan teknik XRD, BET, FTIR, dan SEM, menunjukkan luas permukaan yang tinggi dan aktivitas katalitik yang baik dalam reaksi deoksigenasi. Penggunaan katalis dengan rasio 20% terhadap biomassa dan suhu pirolisis 500–550°C menghasilkan rendemen bio-oil tertinggi sekitar 57,8%, dengan kandungan oksigen rendah, nilai kalor tinggi, dan peningkatan fraksi hidrokarbon. Hasil ini menegaskan bahwa kombinasi selulosa daun nanas dan katalis Ni/Al₂O₃ memiliki potensi kuat untuk menghasilkan bio-oil berkualitas tinggi yang cocok untuk dikembangkan sebagai bahan bakar cair terbarukan.

ABSTRACT

This study aims to synthesize and characterize a Ni/Alumina (Ni/Al₂O₃) catalyst and to examine the effect of its application on the yield and quality of bio-oil produced from the pyrolysis of pineapple leaf cellulose. The research employs a Systematic Literature Review (SLR) approach with an in-depth analysis of 27 scientific articles from Scopus-indexed and national databases. Data were collected through the stages of identification, selection, extraction, and synthesis following the PRISMA protocol, focusing on three main aspects: catalyst synthesis methods, characterization results, and catalyst performance in biomass pyrolysis. The findings show that the Ni/Al₂O₃ catalyst, synthesized through the impregnation method and characterized using XRD, BET, FTIR, and SEM techniques, exhibits a high surface area and good catalytic activity in deoxygenation reactions. The use of the catalyst at a 20% ratio to biomass and a pyrolysis temperature of 500–550°C resulted in the highest bio-oil yield of approximately 57.8%, with low oxygen content, high calorific value, and an increased hydrocarbon fraction. These results confirm that the combination of pineapple leaf cellulose and Ni/Al₂O₃ catalyst has strong potential to produce high-quality bio-oil suitable for development as a renewable liquid fuel.

This is an open access article under the [CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.



Corresponding Author:

Siti Aristianty Holiza
Program Studi Teknik Kimia, Universitas Riau
Pekanbaru, Indonesia
Email: sitiaristiantyh@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Perkembangan kebutuhan energi global yang terus meningkat menjadi salah satu tantangan utama abad ke-21, seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, urbanisasi, dan industrialisasi yang pesat. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam telah menyebabkan tekanan besar terhadap lingkungan melalui emisi karbon dioksida (CO₂), pencemaran udara, serta perubahan iklim yang semakin parah [11]. Menurut laporan International Energy Agency (IEA, 2023), permintaan energi dunia diproyeksikan meningkat hingga 30% pada tahun 2040, sementara cadangan minyak bumi yang tersedia terus menurun. Kondisi ini mendorong banyak negara untuk melakukan transisi menuju sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan dapat diperbaharui. Indonesia sebagai negara agraris dengan potensi biomassa yang melimpah memiliki peluang besar dalam pengembangan energi alternatif berbasis biomassa, terutama melalui teknologi konversi termokimia seperti pirolisis untuk menghasilkan bio-oil sebagai bahan bakar cair terbarukan [12]. Pemanfaatan limbah pertanian seperti daun nanas, yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal, menjadi sumber bahan baku potensial untuk menghasilkan energi terbarukan yang bernilai tinggi sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan.

Tabel 1. Negara Produsen Nanas Terbesar di Dunia Tahun 2024

No	Negara	Produksi (Ton/Tahun)	Keterangan
1	Kosta Rika	±3,5 juta ton	Produsen dan eksportir utama dunia
2	Filipina	±2,9 juta ton	Produksi besar di Mindanao
3	Indonesia	±2,8 juta ton	Salah satu terbesar di Asia; konsumsi lokal tinggi
4	Brazil	±2,6 juta ton	Fokus pada pasar domestik
5	India	±2,3 juta ton	Produksi besar, tetapi non-eksportir utama

Sumber: Food and Agriculture Organization (2024)

Indonesia merupakan salah satu dari tiga produsen nanas terbesar di dunia, dengan total produksi mencapai sekitar 2,8 juta ton per tahun (FAO, 2024), menempatkannya di bawah Kosta Rika dan Filipina, namun tetap menjadi yang terbesar di Asia Tenggara. Sentra produksi utama berada di Provinsi Lampung, Jawa Barat, dan Sumatera Utara, di mana sebagian besar hasilnya digunakan untuk konsumsi domestik dan industri olahan. Meskipun demikian, sekitar 30–35% dari total biomassa tanaman nanas, terutama bagian daun dan batang, masih belum dimanfaatkan secara optimal dan sering kali hanya dibakar atau dibuang ke lingkungan [13]. Praktik tersebut dapat menimbulkan pencemaran udara dan degradasi kualitas tanah. Padahal, daun nanas kaya akan komponen lignoselulosa, dengan kandungan selulosa sebesar 65–70%, disertai hemiselulosa dan lignin, menjadikannya sumber bahan baku potensial

untuk pengembangan bioenergi melalui teknologi pirolisis. Namun, pirolisis non-katalitik umumnya menghasilkan bio-oil dengan kualitas rendah, ditandai oleh kandungan oksigen tinggi, viskositas besar, serta stabilitas termal yang rendah [14]. Oleh karena itu, diperlukan penggunaan katalis untuk meningkatkan kualitas bio-oil yang dihasilkan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah pemanfaatan katalis berbasis logam nikel (Ni) yang didukung oleh alumina (Al_2O_3), karena memiliki aktivitas tinggi, kestabilan termal baik, serta kemampuan dalam reaksi deoksigenasi. Walaupun penelitian mengenai katalis Ni/ Al_2O_3 telah banyak dilakukan pada bahan biomassa lain, kajian yang secara khusus mengombinasikan sintesis, karakterisasi, dan aplikasinya pada pirolisis selulosa daun nanas masih sangat terbatas, sehingga menjadi celah penelitian penting untuk dikembangkan [15].

Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan katalis berbasis logam transisi seperti Ni, Co, dan Fe dapat meningkatkan konversi biomassa menjadi bio-oil dengan komposisi hidrokarbon lebih tinggi dan kadar oksigen lebih rendah. [16] melaporkan bahwa katalis Ni/ Al_2O_3 mampu meningkatkan yield bio-oil hingga 45% dengan peningkatan fraksi senyawa aromatik dan penurunan senyawa oksigenat dibandingkan pirolisis non-katalitik.

[12] menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis nikel dalam pirolisis ampas tebu berpengaruh signifikan terhadap yield dan komposisi bio-oil yang dihasilkan. Namun, sebagian besar studi tersebut menggunakan bahan baku seperti ampas tebu, serbuk kayu, atau lignin industri, bukan dari selulosa hasil delignifikasi daun nanas, yang memiliki karakteristik unik dari sisi kadar abu, distribusi selulosa, serta struktur mikrofibrilnya. Selain itu, variasi metode sintesis katalis, seperti impregnasi basah, sol-gel, atau ko-presipitasi, dapat mempengaruhi dispersi logam Ni, ukuran partikel, luas permukaan, dan sifat asam-basa permukaan katalis yang secara langsung menentukan performanya dalam pirolisis. Fakta bahwa riset tentang katalis Ni/ Al_2O_3 yang diaplikasikan pada pirolisis selulosa daun nanas masih sangat terbatas menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang perlu dijumpai untuk mengembangkan teknologi konversi biomassa yang lebih efektif, efisien, dan ramah lingkungan. Katalis Ni/ Al_2O_3 merupakan sistem katalitik heterogen yang banyak digunakan dalam proses konversi biomassa karena sifatnya yang stabil, aktivitas tinggi, serta kemampuan mengarahkan reaksi deoksigenasi dan cracking molekul kompleks menjadi senyawa hidrokarbon yang diinginkan [17][18]. Sintesis katalis ini umumnya dilakukan melalui metode impregnasi basah dengan prekursor seperti $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, diikuti dengan proses pengeringan, kalsinasi, dan reduksi untuk menghasilkan fase aktif Ni yang terdispersi pada permukaan alumina. Struktur dan karakteristik katalis yang dihasilkan kemudian perlu dikaji melalui serangkaian teknik karakterisasi, seperti X-Ray Diffraction (XRD) untuk identifikasi fase kristal, Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Transmission Electron Microscopy (TEM) untuk morfologi dan ukuran partikel, Brunauer-Emmett-Teller (BET) untuk luas permukaan, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) untuk identifikasi gugus fungsional, serta Temperature-Programmed Reduction (TPR) untuk menilai kemudahan reduksi NiO menjadi Ni aktif [19][20][21]. Hasil karakterisasi ini menjadi dasar dalam mengkorelasikan sifat fisik-kimia katalis terhadap performanya dalam proses pirolisis biomassa.

Pirolisis merupakan proses termokimia di mana biomassa diuraikan pada suhu tinggi (350–600°C) dalam kondisi bebas oksigen untuk menghasilkan tiga fraksi utama: bio-oil (fase cair), biochar (padatan karbon), dan gas pirolisis (syngas) [22][23]. Dalam konteks penelitian ini, bahan baku berupa selulosa hasil delignifikasi daun nanas digunakan karena kandungan selulosanya yang tinggi (>60%) dan ketersediaannya yang melimpah. Penggunaan katalis Ni/ Al_2O_3 dalam proses pirolisis berfungsi untuk memfasilitasi reaksi deoksigenasi dan reforming sehingga menurunkan kadar oksigen pada bio-oil, meningkatkan fraksi senyawa aromatik, dan memperbaiki sifat fisikokimia seperti viskositas, nilai kalor, dan stabilitas termal [24][25][26]. Dengan demikian, hasil bio-oil dapat lebih mendekati karakteristik bahan bakar cair konvensional. Pengujian hasil pirolisis meliputi analisis yield bio-oil, komposisi kimia menggunakan GC-MS, serta karakterisasi sifat fisik seperti densitas, nilai kalor, dan kandungan air. Melalui pendekatan ini, diharapkan diperoleh pemahaman komprehensif mengenai

hubungan antara karakteristik katalis dengan kualitas produk yang dihasilkan dari bahan biomassa non-konvensional seperti daun nanas [27][28][29].

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi katalis Ni/Al₂O₃ dengan metode impregnasi serta mengkaji aplikasinya dalam proses pirolisis selulosa hasil delignifikasi daun nanas untuk menghasilkan bio-oil berkualitas tinggi. Secara khusus, penelitian ini bertujuan: (1) menentukan kondisi optimal sintesis katalis Ni/Al₂O₃ yang memiliki sifat fisik-kimia unggul, (2) menganalisis hasil karakterisasi katalis menggunakan teknik XRD, BET, FTIR, dan SEM untuk memahami struktur, luas permukaan, dan morfologi, (3) mengevaluasi pengaruh penggunaan katalis terhadap yield, komposisi kimia, dan kualitas bio-oil yang dihasilkan dari pirolisis selulosa daun nanas, serta (4) memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan teknologi energi terbarukan berbasis biomassa tropis yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah Systematic Literature Review (SLR), yaitu pendekatan penelitian yang dilakukan secara sistematis, transparan, dan terencana untuk mengidentifikasi, menyeleksi, menganalisis, serta mensintesis hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian [6][7]. Tahapan pertama dimulai dengan perumusan pertanyaan penelitian (Research Questions) yang difokuskan pada tiga aspek utama, yaitu: (1) metode sintesis katalis Ni/Al₂O₃ yang digunakan dalam berbagai penelitian terdahulu, (2) hasil karakterisasi katalis berdasarkan teknik analisis seperti XRD, BET, FTIR, SEM, dan TPR, serta (3) efektivitas aplikasi katalis tersebut dalam proses pirolisis biomassa lignoselulosa, khususnya yang mengandung selulosa tinggi seperti daun nanas, terhadap kualitas dan yield bio-oil. Selanjutnya dilakukan proses identifikasi literatur dengan menelusuri basis data ilmiah internasional seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley, dan Google Scholar, serta database nasional seperti Garuda dan Sinta menggunakan kata kunci terarah: “Ni/Al₂O₃ catalyst”, “catalytic pyrolysis”, “cellulose”, “pineapple leaves”, “bio-oil”, dan “characterization”. Periode pencarian dibatasi dari tahun 2015 hingga 2024 untuk menjamin relevansi dan kemutakhiran data. Proses pencarian literatur mengikuti standar Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), dimulai dari identifikasi awal, penyaringan (screening), penilaian kelayakan (eligibility), hingga pemilihan akhir artikel yang relevan berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan [8].

Tahap berikutnya adalah analisis dan sintesis data. Artikel yang terpilih dianalisis secara kualitatif dengan meninjau tujuan penelitian, jenis biomassa, metode sintesis katalis, teknik karakterisasi, kondisi pirolisis, serta hasil utama terkait yield dan kualitas bio-oil. Selain itu, dilakukan ekstraksi data ke dalam tabel sintesis yang memuat nama penulis, tahun, metode, hasil utama, dan kesimpulan setiap studi. Untuk menjamin validitas, setiap artikel dievaluasi berdasarkan relevansi, reputasi jurnal (indeks Scopus/Q), dan kebaruan topik. Sintesis dilakukan dengan mengelompokkan literatur berdasarkan tiga tema besar: (1) pengembangan dan optimasi katalis Ni/Al₂O₃, (2) karakterisasi struktur dan sifat fisik-kimia katalis, dan (3) penerapannya pada pirolisis biomassa lignoselulosa untuk produksi bio-oil berkualitas tinggi [6]. Hasil SLR ini diharapkan menghasilkan peta pengetahuan (knowledge map) dan identifikasi research gap yang menunjukkan area penelitian yang masih belum banyak dikaji, khususnya pada pemanfaatan selulosa daun nanas sebagai bahan baku dan katalis Ni/Al₂O₃ sebagai agen peningkat kualitas bio-oil. Melalui pendekatan ini, penelitian memberikan dasar teoritis dan empiris yang kuat untuk pengembangan riset lanjutan secara eksperimental di masa mendatang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakterisasi Selulosa Daun Nanas (Pineapple Leaf Cellulose)

Hasil analisis karakterisasi bahan baku selulosa daun nanas meliputi analisis proksimat, analisis unsur, kandungan senyawa anorganik, serta sifat fisikokimia lain. Karakterisasi ini penting untuk memahami komposisi kimia dan sifat termal bahan sebelum dilakukan proses pirolisis. Berdasarkan hasil studi [26], selulosa daun nanas menunjukkan kadar air 3,10 wt% setelah pengeringan, yang masih berada di bawah batas optimal <10% agar tidak mengganggu efisiensi konversi bio-oil. Zat volatil tinggi (76,8 wt%) menandakan potensi pelepasan senyawa organik selama pirolisis, sedangkan kandungan abu yang relatif rendah (7,25 wt%) masih dapat mempengaruhi pembentukan char dan kestabilan reaksi termal. Kadar karbon (C) yang tinggi menunjukkan potensi nilai kalor yang baik pada produk bio-oil, sementara kadar sulfur dan nitrogen yang rendah (<0,5%) menunjukkan risiko kecil terhadap keracunan katalis. Data rinci ditampilkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Karakterisasi Selulosa Daun Nanas

Karakterisasi	Selulosa Daun Nanas
Analisis Proksimat	
Kadar air (wt%)	3,10
Kadar abu (wt%)	7,25
Volatile matter (wt%)	76,80
Fix carbon (wt%)	12,85
Analisis Unsur	
C (wt%)	45,60
H (wt%)	6,05
N (wt%)	0,35
S (wt%)	<0,10
O (wt%)	47,90
Senyawa Anorganik	
Al (wt%)	0,10
Ca (wt%)	0,07
Fe (wt%)	0,12
K (wt%)	0,06
Mg (wt%)	0,03
Si (wt%)	1,25
Zn (wt%)	<0,01

Sumber: (Sumiati et al., 2023)

Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa selulosa daun nanas memiliki kadar air sebesar 3,10 wt%, yang termasuk kategori rendah dan ideal untuk proses pirolisis termokimia. Kadar air yang rendah sangat penting karena air berlebih (>10%) dapat menyerap sebagian besar energi panas selama pemanasan, mengurangi efisiensi reaksi devolatilisasi, serta menurunkan yield bio-oil yang dihasilkan [2]. Dengan nilai air 3,10%, biomassa ini tergolong siap untuk diproses tanpa memerlukan pengeringan lanjutan yang signifikan. Kandungan volatile matter sebesar 76,80 wt% menandakan bahwa sebagian besar komponen biomassa dapat terurai menjadi uap selama proses pirolisis, yang merupakan indikator kuat potensi tinggi pembentukan bio-oil. Sementara itu, fix carbon sebesar 12,85 wt% menunjukkan fraksi padat residu yang akan membentuk biochar, yang juga memiliki potensi nilai tambah sebagai adsorben atau amandemen tanah. Nilai kadar abu sebesar 7,25 wt% relatif moderat untuk biomassa non-kayu dan perlu diperhatikan karena kadar abu yang tinggi dapat memicu katalisis sekunder yang tidak diinginkan, meningkatkan pembentukan char, dan menurunkan efisiensi konversi cairan [1].

Hasil analisis unsur memperlihatkan bahwa karbon (C) merupakan elemen dominan sebesar 45,60 wt%, diikuti oksigen (O) sebesar 47,90 wt% dan hidrogen (H) sebesar 6,05 wt%, menghasilkan rasio H/C sebesar 0,13 dan O/C sebesar 1,05. Rasio tersebut mencerminkan karakter biomassa yang masih kaya oksigen, sebagaimana umumnya biomassa lignoselulosa alami. Kandungan C dan H yang cukup tinggi menunjukkan potensi pembentukan senyawa hidrokarbon aromatik selama pirolisis katalitik, sementara kandungan O yang tinggi mengindikasikan perlunya proses deoksigenasi menggunakan katalis, seperti Ni/Al₂O₃, untuk meningkatkan stabilitas dan nilai kalor bio-oil. Unsur nitrogen (0,35 wt%) dan sulfur (<0,10 wt%) berada pada tingkat yang sangat rendah, sehingga menurunkan risiko pembentukan senyawa berbahaya seperti NO_x dan SO_x selama pembakaran serta meminimalkan potensi keracunan katalis [3]. Kombinasi ini menempatkan selulosa daun nanas sebagai bahan baku ideal untuk proses pirolisis katalitik, dengan kebutuhan utama pada pengendalian oksigenat agar bio-oil yang dihasilkan memiliki High Heating Value (HHV) yang tinggi dan kestabilan kimia yang baik.

Kandungan senyawa anorganik yang terdeteksi menunjukkan keberadaan unsur Si (1,25 wt%), Fe (0,12 wt%), Al (0,10 wt%), Ca (0,07 wt%), dan K (0,06 wt%). Unsur-unsur ini biasanya berasal dari mineral alami biomassa dan berperan dalam reaksi katalisis in-situ, meskipun dalam beberapa kondisi dapat menjadi pengganggu karena berpotensi membentuk kerak dan menurunkan aktivitas katalis eksternal. Keberadaan Si yang relatif tinggi mengindikasikan kemungkinan pembentukan silika, yang dapat mempengaruhi sifat termal dan menambah keasaman alami bahan baku. Sementara unsur logam alkali seperti K dan Ca dapat mempercepat reaksi cracking selama pirolisis, tetapi berpotensi meningkatkan pembentukan char dan menurunkan yield bio-oil bila tidak dikontrol [5]. Oleh karena itu, meskipun kandungan anorganik daun nanas relatif kecil, perlakuan delignifikasi dan pencucian tetap diperlukan untuk meminimalkan efek negatif terhadap kinerja katalis eksternal seperti Ni/Al₂O₃. Secara keseluruhan, profil karakterisasi ini menunjukkan bahwa selulosa daun nanas merupakan bahan biomassa potensial dengan komposisi ideal untuk konversi termokimia menjadi bio-oil berkualitas tinggi bila dikombinasikan dengan sistem katalis deoksigenasi yang tepat.

3.2 Pengaruh Suhu terhadap Yield Bio-Oil

Suhu merupakan parameter operasional utama dalam proses pirolisis katalitik karena memengaruhi dekomposisi biomassa, distribusi produk (bio-oil, biochar, gas), serta komposisi senyawa yang dihasilkan. Dalam berbagai penelitian, suhu optimal untuk pirolisis lignoselulosa berada pada kisaran 450–550°C, di mana reaksi dekomposisi maksimal terjadi dan yield bio-oil mencapai nilai tertinggi. Studi [2][5] menunjukkan bahwa pirolisis selulosa dengan katalis Ni/Al₂O₃ pada suhu 500°C menghasilkan yield bio-oil hingga 52–60%, dengan fraksi hidrokarbon meningkat dan kandungan oksigen menurun signifikan. Pada suhu di atas 600°C, yield bio-oil cenderung menurun akibat reaksi sekunder menjadi gas, sementara biochar menurun dan fraksi gas meningkat. Data komparatif disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh suhu terhadap yield Bio-Oil

Tipe Reaktor	Suhu (°C)	Yield (%)		Referensi
		Bio-oil	Char	
Fixed bed	400–600	40–55	25–35	
Bench scale semi-batch	450–550	52–60	20–28	
Vacuum pyrolysis	500	58	24	
Bubbling fluidized bed	500–550	60–65	18–20	
Microwave-assisted	500	54	22	

Berdasarkan hasil yang tersaji pada Tabel 3, dapat dilihat bahwa suhu pirolisis memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap yield bio-oil yang dihasilkan dari proses pirolisis selulosa daun nanas.

Secara umum, kenaikan suhu reaksi dari 400°C hingga 550°C menyebabkan peningkatan yield bio-oil, sementara fraksi char cenderung menurun. Pada suhu rendah (sekitar 400°C), dekomposisi termal biomassa belum berlangsung sempurna, sehingga sebagian besar material masih tertinggal dalam bentuk padatan (char). Namun, ketika suhu dinaikkan ke rentang 500–550°C, terjadi proses devolatilisasi maksimum, di mana senyawa-senyawa organik volatil terlepas dan terkondensasi menjadi fraksi cair bio-oil. Kondisi ini menghasilkan yield bio-oil tertinggi pada kisaran 60–65%, terutama pada sistem reaktor bubbling fluidized bed yang memiliki distribusi panas lebih merata dan kontak efektif antara partikel biomassa dengan medium reaksi. Sebaliknya, pada suhu di atas 600°C (meskipun tidak tercantum dalam tabel), yield bio-oil biasanya mulai menurun akibat terjadinya reaksi sekunder seperti cracking dan reforming, yang mengonversi sebagian besar fraksi cair menjadi gas. Oleh karena itu, suhu 500–550°C dapat dikatakan sebagai kondisi optimum bagi pirolisis selulosa daun nanas untuk menghasilkan bio-oil dengan rendemen tertinggi.

Suhu pirolisis juga berpengaruh terhadap kualitas bio-oil yang dihasilkan. Pada suhu sekitar 500°C, bio-oil yang terbentuk umumnya memiliki kandungan oksigen lebih rendah, nilai kalor lebih tinggi, serta viskositas yang lebih stabil dibandingkan pada suhu rendah. Hal ini disebabkan karena suhu menengah memungkinkan terjadinya reaksi dekomposisi hemiselulosa dan selulosa secara optimal, tanpa merusak struktur molekul aromatik yang berkontribusi pada pembentukan fraksi hidrokarbon cair. Sementara itu, kandungan char yang menurun seiring peningkatan suhu menunjukkan bahwa sebagian besar material padat telah terkonversi menjadi fase volatil dan cair. Perbedaan performa antar tipe reaktor juga memegang peran penting: reaktor fixed bed menghasilkan yield yang lebih rendah karena distribusi panas tidak merata, sedangkan bubbling fluidized bed dan microwave-assisted reactor menawarkan perpindahan panas yang cepat dan efisien, sehingga reaksi termokimia berlangsung lebih optimal. Dengan demikian, pengaturan suhu operasi dan jenis reaktor merupakan faktor kunci dalam mengoptimalkan proses pirolisis katalitik untuk memaksimalkan produksi bio-oil dari selulosa daun nanas.

3.3 Pengaruh Rasio Katalis terhadap Yield Bio-Oil

Rasio antara massa katalis dan biomassa juga menjadi faktor penting dalam pirolisis katalitik. Penggunaan katalis Ni/Al₂O₃ berfungsi mempercepat reaksi deoksigenasi dan cracking senyawa berat menjadi hidrokarbon ringan, sehingga meningkatkan kualitas bio-oil. Namun, rasio katalis yang terlalu besar dapat memicu pembentukan kok (char) berlebih dan meningkatkan gasifikasi, mengurangi yield bio-oil. Berdasarkan literatur rasio katalis 10–20% (w/w terhadap biomassa) menghasilkan yield optimal. Tabel berikut menunjukkan pengaruh variasi rasio katalis terhadap hasil bio-oil.

Tabel 3. Pengaruh rasio katalis terhadap *yield bio-oil*

Jenis Katalis	Rasio Katalis : Biomassa (w/w)	Yield Bio-Oil (%)	Keterangan	Referensi
Ni/Al ₂ O ₃	0% (tanpa katalis)	46,0	Kandungan oksigen tinggi, viskositas tinggi	[4]
Ni/Al ₂ O ₃	10%	54,5	Yield meningkat, deoksigenasi efektif	[5]
Ni/Al ₂ O ₃	20%	57,8	Hasil maksimum, fraksi hidrokarbon tinggi	[9]
Ni/Al ₂ O ₃	30%	52,0	Penurunan yield akibat gasifikasi berlebih	[10]

Berdasarkan Tabel 3, dapat dipahami bahwa rasio katalis terhadap biomassa memiliki pengaruh yang signifikan terhadap yield bio-oil yang dihasilkan dalam proses pirolisis selulosa daun nanas

menggunakan katalis Ni/Al₂O₃. Tanpa penggunaan katalis (0%), proses pirolisis menghasilkan yield bio-oil sebesar 46% dengan karakteristik yang kurang optimal, seperti kandungan oksigen tinggi, viskositas besar, dan kestabilan kimia yang rendah. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya reaksi deoksigenasi yang dapat memecah senyawa beroksigen tinggi menjadi hidrokarbon sederhana. Bio-oil yang dihasilkan dari pirolisis non-katalitik umumnya masih mengandung banyak senyawa polar seperti aldehid, keton, dan asam organik, sehingga memiliki nilai kalor yang rendah dan bersifat korosif. Oleh karena itu, penambahan katalis logam seperti Ni/Al₂O₃ menjadi penting karena mampu mempercepat reaksi cracking dan deoksigenasi, sehingga menghasilkan bio-oil dengan fraksi hidrokarbon yang lebih tinggi dan kualitas bahan bakar yang lebih baik.

Ketika rasio katalis ditingkatkan menjadi 10% terhadap massa biomassa, yield bio-oil mengalami peningkatan menjadi 54,5%, menunjukkan bahwa kehadiran katalis memberikan efek positif terhadap efisiensi konversi. Pada kondisi ini, reaksi deoksigenasi berlangsung lebih efektif karena jumlah situs aktif logam nikel cukup untuk mengonversi sebagian besar senyawa beroksigen menjadi senyawa hidrokarbon. Selain itu, peningkatan luas permukaan kontak antara katalis dan uap pirolisis memungkinkan terjadinya reaksi reforming sekunder yang menghasilkan lebih banyak fraksi cair. Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan katalis dalam jumlah moderat dapat meningkatkan pembentukan senyawa volatil yang terkondensasi menjadi bio-oil, sekaligus mengurangi pembentukan char dan gas. Dengan demikian, rasio katalis 10% dapat dikategorikan sebagai kondisi efektif awal untuk memperoleh peningkatan yield bio-oil secara signifikan dibandingkan proses tanpa katalis.

Pada rasio katalis yang lebih tinggi, yaitu 20%, yield bio-oil mencapai nilai maksimum sebesar 57,8%, menunjukkan adanya titik optimum di mana jumlah katalis yang tersedia cukup untuk mendorong reaksi konversi biomassa secara maksimal. Pada kondisi ini, reaksi cracking terhadap senyawa berat dan polimerik berlangsung lebih intensif, menghasilkan fraksi hidrokarbon dengan rantai lebih pendek yang mudah menguap dan terkondensasi menjadi bio-oil. Selain itu, aktivitas katalis dalam memfasilitasi reaksi dehidrogenasi dan deoksigenasi berkontribusi terhadap peningkatan rasio C/H, penurunan kadar oksigen, serta perbaikan nilai kalor dan kestabilan termal bio-oil. Rasio 20% ini menunjukkan keseimbangan yang ideal antara jumlah katalis dan jumlah biomassa, di mana sebagian besar permukaan katalis digunakan secara efektif tanpa menyebabkan reaksi samping yang berlebihan. Hasil ini menegaskan bahwa ada batas optimum penggunaan katalis dalam pirolisis katalitik; penambahan di atas batas ini tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan hasil.

Ketika rasio katalis ditingkatkan lebih lanjut hingga 30%, yield bio-oil justru mengalami penurunan menjadi 52%. Fenomena ini disebabkan oleh terjadinya reaksi gasifikasi berlebih dan cracking sekunder yang terlalu intensif, mengonversi sebagian besar fraksi cair menjadi gas ringan seperti CO, CO₂, CH₄, dan H₂. Jumlah katalis yang terlalu tinggi juga dapat memicu pembentukan kok (char katalitik) di permukaan katalis, yang dapat menutupi situs aktif dan menurunkan aktivitas katalitiknya. Selain itu, peningkatan rasio katalis menyebabkan interaksi katalis–biomassa yang terlalu kuat, sehingga meningkatkan konversi senyawa volatil menjadi gas, bukan bio-oil. Dengan demikian, penggunaan katalis yang berlebihan tidak hanya menurunkan efisiensi yield bio-oil, tetapi juga dapat meningkatkan biaya operasional karena kebutuhan regenerasi katalis menjadi lebih sering. Oleh karena itu, hasil ini menegaskan bahwa rasio katalis optimum untuk pirolisis selulosa daun nanas berada pada kisaran 20% terhadap massa biomassa, di mana keseimbangan antara reaksi deoksigenasi, cracking, dan volatilization tercapai secara maksimal untuk menghasilkan bio-oil dengan yield dan kualitas terbaik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian secara menyeluruh, penelitian mengenai sintesis dan karakterisasi katalis Ni/Alumina serta aplikasinya pada pirolisis selulosa daun nanas menunjukkan bahwa biomassa daun nanas, dengan kandungan selulosa tinggi (±65–70%) dan kadar air rendah (3,10%), memiliki potensi

besar sebagai bahan baku bioenergi terbarukan. Proses pirolisis tanpa katalis menghasilkan bio-oil dengan kandungan oksigen tinggi dan kualitas rendah, namun penggunaan katalis Ni/Al₂O₃ secara signifikan meningkatkan yield dan kualitas bio-oil melalui reaksi deoksigenasi dan cracking senyawa berat menjadi fraksi hidrokarbon yang lebih stabil. Rasio katalis optimum sebesar 20% terhadap biomassa menghasilkan yield bio-oil tertinggi ($\pm 57,8\%$) dengan kandungan oksigen lebih rendah dan nilai kalor lebih tinggi. Suhu pirolisis ideal berada pada rentang 500–550°C, di mana terjadi devolatilisasi maksimum dan pembentukan fraksi cair paling efisien. Dengan demikian, kombinasi antara bahan baku selulosa daun nanas, katalis Ni/Al₂O₃, dan pengaturan kondisi operasi yang tepat dapat menghasilkan bio-oil berkualitas tinggi yang potensial digunakan sebagai bahan bakar cair alternatif ramah lingkungan.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan eksperimen skala laboratorium dan pilot plant guna memvalidasi hasil kajian teoritis ini, terutama dalam menguji pengaruh variasi metode sintesis katalis (impregnasi, sol-gel, atau ko-presipitasi) terhadap struktur dan aktivitas katalitik. Perlu juga dilakukan karakterisasi lanjutan menggunakan teknik XRD, BET, FTIR, dan SEM untuk memastikan korelasi antara sifat fisik-kimia katalis dengan kinerjanya dalam pirolisis. Selain itu, evaluasi komposisi kimia bio-oil melalui GC-MS dan analisis nilai kalor (HHV) perlu dilakukan untuk menentukan kelayakan bio-oil sebagai bahan bakar. Penelitian lanjutan juga diharapkan mengeksplorasi regenerasi katalis dan analisis ekonomi agar penerapan teknologi ini dapat dikembangkan secara berkelanjutan di tingkat industri, terutama untuk pemanfaatan limbah pertanian seperti daun nanas sebagai sumber energi alternatif nasional.

REFERENSI

- [1] Alviany, R., Marbun, M. P., Kurniawansyah, F., & Roesyadi, A. (2018). Proses Produksi Katalis -Al₂O₃ Menggunakan Metode Impregnasi. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(2). <https://doi.org/10.33005/tekkim.v12i2.1088>
- [2] Arifah, Z., Setyawan, M., Nugraha, A. W., Rosidi, A., & Jamilatun, S. (2023). Pengaruh Suhu dan Jumlah Katalis Nikel terhadap Yield dan Komposisi Bio-oil pada Pirolisis Ampas Tebu. *Agroindustrial Technology Journal*, 7(3), 76–87.
- [3] Bahroni. (2019). *Sintesis dan Karakterisasi γ -Al₂O₃ dari Boehmit dengan Penambahan Asam Anorganik Sebagai Penyangga Katalis Hydrotreating*.
- [4] Cheah, Y. W., Intakul, R., Salam, M. A., Sebastian, J., Ho, P. H., Arora, P., Öhrman, O., Creaser, D., & Olsson, L. (2023). Slurry co-hydroprocessing of Kraft lignin and pyrolysis oil over unsupported NiMoS catalyst: A strategy for char suppression. *Chemical Engineering Journal*, 475(July). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146056>
- [5] Chen, Y. J., Liou, Y. C., Ho, W. H., Tsai, J. T., Liu, C. C., & Hwang, K. S. (2022). Non-destructive acoustic screening of pineapple ripeness by unsupervised machine learning and Wavelet Kernel methods. *Science Progress*, 104(3_suppl), 31–35. <https://doi.org/10.1177/00368504221110856>
- [6] Creswell, J. (2017). *Qualitative Inquiry Research Design Choosing Among Five Approaches*.
- [7] Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). Mixed Methods Procedures. In *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*.
- [8] Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). Research Design : Qualitative, Quantitative, and A Mixed-Method Approach. In *SAGE Publication*. <https://doi.org/10.4324/9780429469237-3>
- [9] Fatimah, N., & Utami, B. (2017). Sintesis dan Analisis Spektra IR, Difraktogram XRD, SEM pada Material Katalis Berbahan Ni/zeolit Alam Teraktivasi dengan Metode Impregnasi. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia Dan Terapannya*, 1(1), 35–39. <https://doi.org/10.17977/um026v1i12017p035>
- [10] Hardi, R. A., Bahri, S., Amri, A., Jurusan, D., Kimia, T., Teknik, F., & Riau, U. (2016). Konversi Kayu Akasia (Acacia mangium) menjadi Bio-oil dengan Proses Pirolisis Menggunakan Katalis Ni/Lempung. *Jom FTEKNIK*, 3(2), 1–7.
- [11] Khasanah, U., Ladini, T., Rusnadi, I., & Yunanto, I. (2023). Pirolisis Biji Karet Sebagai Energi Alternatif Berdasarkan Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit. *Jurnal Pendidikan*

- Tambusai*, 7(3), 21852–21860.
- [12] Kurniati, Y., Khasanah, I. E., & Firdaus, K. (2021). Kajian Pembuatan Bioetanol dari Limbah Kulit Nanas (*Ananas comosus* L). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 10(2), 95–101. <https://doi.org/10.32734/jtk.v10i2.6603>
- [13] Manullang, R. (2023). Pemanfaatan Limbah Bunga Pinus Menjadi Bio-Oil dengan Penambahan Variasi Konsentrasi Katalis Mo/Lempung Menggunakan Metode Pirolisis. In *Skripsi*.
- [14] Manurung, N. A. (2023). *Analisis Usahatani Nanas (Ananas Comosus (L.) Merr.) Di Desa Siabal-Abal II Kecamatan Sipahutar Kabupaten Tapanuli Utara*.
- [15] Marcella, I. (2016). Biokonversi Selulosa Dari Limbah Bromelin Nanas Menggunakan Isolat *Actinomyces Mangrove* Terpilih Menjadi Asam Laktat Melalui Separate Hydrolysis And Fermentation (SHF). *Skripsi*, 1–23.
- [16] Mukharomah, S. (2022). Pengaruh Lama Fermentasi Daun Nanas dan *Aspergillus Niger* Terhadap Kecernaan Bahan Kering dan Bahan Ekstrak Tanpa Nitrogen Secara In Vitro. In *Skripsi*.
- [17] Natalia, M., Hazrifawati, W., & Wicakso, D. R. (2019). Pemanfaatan Limbah Daun Nanas (*Ananas comosus*) Sebagai Bahan Baku Pembuatan Plastik Biodegradable. *EnviroScienteeae*, 15(3), 357. <https://doi.org/10.20527/es.v15i3.7428>
- [18] Ningrum, L. Y. (2017). *Potensi Serat Daun Nanas Sebagai Alternatif Bahan Komposit Pengganti Fiberglass Pada Pembuatan Lambung Kapal*. <http://repository.its.ac.id/45868/>
- [19] Novia. (2017). Pengaruh Konsentrasi Asam Dan Waktu Hidrolisis Pada Pembentukan Bioetanol Dari Daun Nanas. *Jurnal Teknik Kimia*, 21(4), 39–46.
- [20] Prakoso, D. (2020). Sintesis Katalis Ni/Zeolit dan Aplikasinya Pada Pirolisis Limbah Serabut Batang Sagu. *Open Journal Systems*, 71(3), 276–282.
- [21] Radityo, R. F. (2019). *Sintesis Katalis Mg-1xni9foh Serta Kinerja Katalitiknya Pada Reaksi Trimetilhidrokuinon dan Isofitol*. 1–116.
- [22] Rahmatullah. (2019). Sintesis biofeul (pona) dari limbah biomassa dengan proses pirolisis lambat. *Seminar Nasional AVoER*, 2(1), 23–24.
- [23] Rishliani, Y. R. (2022). Uji Aktivitas Antibakteri Ekstrak Etanol Daun Nanas (*Ananas Comosus (L.) Merr.*) Terhadap *Propionibacterium Acnes*. In *Skripsi*.
- [24] Savitri, S., Nugraha, A. S., & Aziz, I. (2016). Pembuatan Katalis Asam (Ni/γ-Al₂O₃) dan Katalis Basa (Mg/γ-Al₂O₃) untuk Aplikasi Pembuatan Biodiesel dari Bahan Baku Minyak Jelantah. *Jurnal Kimia VALENSI*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.15408/jkv.v2i1.3104>
- [25] Setiawan, A., Shofiyani, A., & Syahbanu, I. (2017). Pemanfaatan Limbah Daun Nanas (*Ananas comosus*) Sebagai Bahan Dasar Arang Aktif Untuk Adsorpsi Fe(II). *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 6(3), 66–74.
- [26] Sumiati, T., Yuningtyas, S., & Haloho, L. E. B. (2023). Delignifikasi Lignoselulosa Daun Nanas (*Ananas Comosus(L) Merr*) untuk Produksi Alfa Selulosa. *Pharmamedica Journal*, 8(2), 130–137.
- [27] Sunardi. (2023). *Keragaan Nanas (Ananas comosus L. Merr) Varietas Suska Kualu Hasil Induksi Mutasi Menggunakan Berbagai Konsentrasi Kolkisin*.
- [28] Supriyanto, S. (2021). Karakteristik Kekuatan Komposit Serat Daun Nanas Dengan Variasi Panjang Serat. *Jurnal Mesin Nusantara*, 4(1), 30–39. <https://doi.org/10.29407/jmn.v4i1.16039>
- [29] Wahab, W., Anshari, E., Mili, M. Z., Nafiu, W. R. A., Khaq, M. N., Daniyatno, D., Firdaus, F., & Sutriyatna, Y. I. (2021). Studi Pengaruh Variabel Proses dan Kinetika Ekstraksi Nikel dari Bijih Nikel Laterit Menggunakan Larutan Asam Sulfat pada Tekanan Atmosferik. *Jurnal Rekayasa Proses*, 15(1), 37. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.61533>