

Tinjauan Pengaruh Suhu dan Massa Katalis Terhadap Yield Bio-Oil Hasil Pirolisis Ampas Tebu (*Sugarcane Bagasse*)

Oktaviani, Syaiful Bahri*, Sunarno

Program Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Received : 30-06-2025

Accepted : 10-09-2025

Published : 15-11-2025

KEYWORDS

bio-oil, energy, pyrolysis, sugarcane bagasse

*Correspondence author:

Email: syaifulbahri@eng.unri.ac.id



ABSTRACT

Sugarcane bagasse, as lignocellulosic biomass waste, has great potential for producing bio-oil through pyrolysis, which is the process of converting biomass into bio-oil, biochar, and gas. However, the main challenge in bio-oil production is reducing oxygen content and improving its quality. Therefore, this study evaluates the effect of temperature and catalyst use on bio-oil yield from sugarcane bagasse pyrolysis. The method used was a literature review, collecting quantitative data from various relevant studies on sugarcane bagasse pyrolysis and its operational conditions. The results showed that a temperature of 500°C yielded the optimal bio-oil yield of 60.4%, with higher temperatures increasing calorific value but reducing oxygen content. Additionally, the use of a catalyst can reduce oxygen content and improve bio-oil quality. In conclusion, temperature and the selection of the appropriate catalyst play a key role in improving the quality and efficiency of bio-oil production from sugarcane bagasse, which can support efforts toward transitioning to more sustainable energy sources.

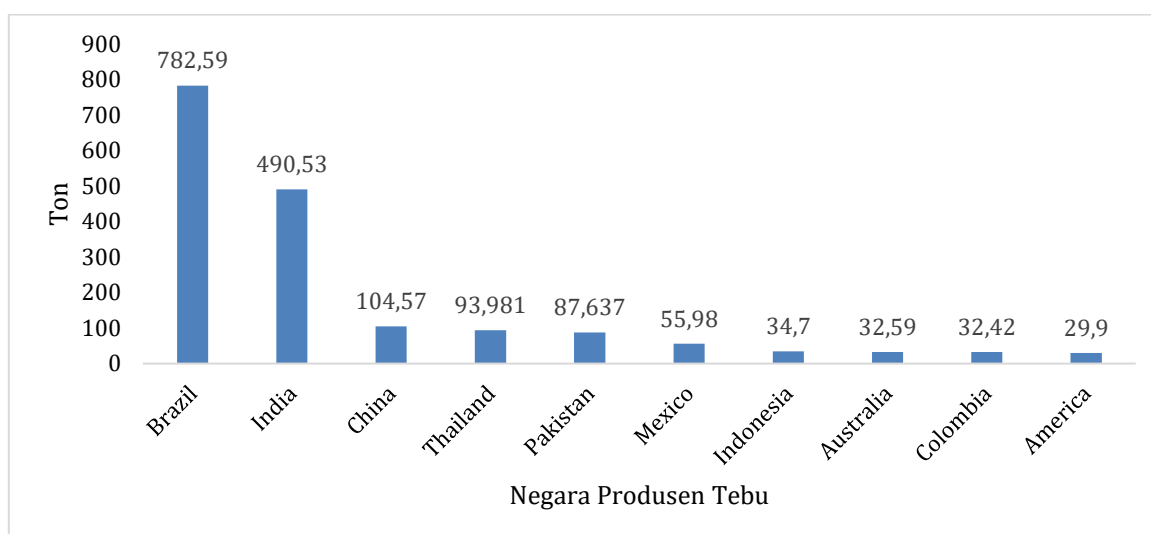
1. PENDAHULUAN

Seiring dengan pertumbuhan ekonomi suatu bangsa, maka kebutuhan energi terus menerus mengalami peningkatan. Kenaikan konsumsi energi didorong oleh semakin meningkatnya kebutuhan energi di sektor industri, transportasi, rumah tangga, dan sektor lainnya. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (KESDM) kebutuhan energi memiliki kenaikan rata-rata 4,7% per tahun (3,4% per tahun tanpa biomassa). Konsumsi energi final Indonesia pada tahun 2022 sebesar 1,185 juta Setara Barel Minyak (SBM). Bahan bakar minyak masih mendominasi konsumsi energi final Indonesia hingga tahun 2022 dengan kontribusi sebesar 22,3% dan sisanya disumbang oleh batu bara, LPG dan produk BBM lainnya. Dominasi penggunaan energi dari fosil sebagai sumber tak terbarukan ini selain menimbulkan peningkatan dalam emisi CO₂ juga menunjukkan masih tingginya ketergantungan kita terhadap energi fosil.

Indonesia telah menetapkan target untuk mencapai *Net Zero Emissions* (NZE) pada tahun 2060 atau lebih cepat. Namun, pemodelan dari *Institute for Essential Services Reform* (IESR) menunjukkan bahwa berdasarkan tren saat ini, emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor energi diperkirakan akan meningkat dari 743 MtCO₂e pada tahun 2022 menjadi 963 MtCO₂e pada tahun 2030, tanpa tanda-tanda akan mencapai puncaknya. Kebijakan sektor energi saat ini masih jauh dari cukup untuk menekan peningkatan emisi, karena diproyeksikan hanya mampu mengurangi 20% dari proyeksi emisi pada tahun 2030 dan akan terus meningkat hingga tahun 2060. Transisi menuju sistem energi nir emisi berpusat pada empat pilar *fundamental*: pemanfaatan energi terbarukan, elektrifikasi berbagai sektor, permintaan, pengurangan penggunaan bahan bakar fosil, dan peralihan ke bahan bakar alternatif rendah karbon. Tren dan kondisi keempat pilar ini mencerminkan langkah-langkah Indonesia dalam mitigasi perubahan iklim dan upaya mencapai praktik-praktik energi yang berkelanjutan (Shutterstock, 2024)

Salah satu sumber energi baru terbarukan yang masih melimpah di Indonesia yang mendukung transisi menuju nir energi adalah biomassa. Biomassa merupakan sumber energi alternatif terbarukan yang ramah lingkungan dengan potensi produksi yang tinggi (Sari dkk, 2023). Biomassa diproyeksikan akan memainkan peran signifikan dalam waktu dekat karena keunggulannya, seperti kandungan sulfur dan nitrogen yang rendah, biaya yang ekonomis, ketersediaan yang melimpah, serta netralitas terhadap emisi CO₂ (Prabhakara dkk, 2022). Biomassa terdiri dari 38-50% selulosa, 23-32% hemiselulosa, 15-25% lignin, serta komponen lainnya (yaitu, senyawa anorganik dan ekstraktif) dengan persentase total 5-13%. Struktur kimia dan komposisi biomassa sangat bergantung pada asal dan jenis bahan biomassa (Hameed dkk, 2019). Secara khusus, biomassa dari lignoselulosa dianggap memiliki potensi besar untuk menggantikan sebagian sumber fosil sebagai bahan bakar produksi bahan bakar nabati cair untuk sektor penerbangan, kapal laut, dan sektor industri dalam jangka menengah. Contoh bahan baku biomassa lignoselulosa mencakup Jerami, gandum, ampas tebu, residu kayu, dan lainnya (Prabhakara dkk, 2022).

Potensi energi biomassa di Indonesia sebesar 43,3 GW, saat ini kapasitas terpasang baru mencapai 1,9 GW, atau sekitar 4,39% dari potensi yang tersedia. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan sumber daya energi yang ada masih sangat terbatas (Ikrom, 2023). Jika dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya, konversi energi dari biomassa lebih ekonomis dalam hal biaya produksi. Tebu (*Saccharum officinarum*) merupakan salah satu sumber biomassa yang memiliki potensi besar, baik di tingkat global maupun nasional. Tebu, sebagai tanaman dari *famili Poaceae*, tumbuh subur di wilayah tropis dan umumnya dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam produksi gula. Ampas tebu merupakan limbah berserat yang dihasilkan oleh proses penggilingan tebu untuk pengekstrakan sarinya. Gambar 1 menunjukkan potensi produksi tebu di sepuluh negara penghasil tebu terbesar pada tahun 2023. Brasil adalah produsen tebu terbesar di dunia dengan total produksi mencapai 782,59 juta ton, disusul oleh India dengan 490,53 juta ton, China dengan 104,57 juta ton, Thailand dengan 93,981 juta ton dan Pakistan dengan 87,637 juta ton. Indonesia berada di posisi ketujuh dalam produksi tebu global, dengan total produksi sebesar 55,98 juta ton pada tahun 2023.



Gambar 1. Negara penghasil tebu terbesar di dunia (FAOSTAT, 2025)

Selain itu, ampas tebu memiliki sifat fisikokimia yang menarik. Pertama, ampas tebu mengandung selulosa dan kandungan zat volatil yang tinggi, yang menunjukkan potensi tinggi untuk menghasilkan bahan bakar cair. Kedua, ampas tebu memiliki kandungan abu dan sulfur yang rendah, kualitas yang menonjol dari banyak bahan bakar lainnya dan merupakan hal yang ingin dikurangi oleh dunia, terutama pada bahan bakar fosil. Hal ini juga merupakan hal positif tentang ampas tebu karena abu dan sulfur merupakan unsur yang tidak diinginkan karena masing-masing menyebabkan masalah proses dan lingkungan.

Pirolisis adalah salah satu teknologi yang sangat menjanjikan untuk mengkonversi biomassa menjadi *bio-oil*, *biochar*, dan gas (Bridgwater, 2012). Pirolisis secara luas diakui sebagai metode yang sangat efektif untuk memproduksi *bio-oil* melalui depolimerisasi lignin. Proses ini menghasilkan berbagai senyawa oksigenasi termasuk aldehid, furan, keton, dan senyawa fenolik (Mentzel & Holm, 2011; Hameed dkk, 2019). Suhu merupakan parameter utama dalam pirolisis karena mempengaruhi laju dekomposisi biomassa, distribusi produk, dan nilai kalor *bio-oil*. Beberapa Penelitian menunjukkan bahwa suhu optimum sekitar 500 °C dapat menghasilkan *yield bio-oil* tertinggi, sedangkan suhu yang lebih tinggi meningkatkan nilai kalor namun menurunkan kadar oksigen Sohaib dkk (2017) ;Gonçalves dkk (2017). Oleh itu, pengendalian suhu sangat menentukan kualitas dan kuantitas produk yang dihasilkan. Selain itu, massa katalis berperan besar dalam memperbaiki kualitas *bio-oil*. Penggunaan katalis mampu menurunkan kandungan oksigen, meningkatkan stabilitas kimia, serta memperbaiki nilai kalor (Rabiu dkk, 2018). Namun, variasi massa katalis dapat memberikan efek yang berbeda: jumlah yang terlalu sedikit kurang efektif, sementara jumlah berlebih dapat menurunkan *yield* akibat pembentukan gas berlebih (Tanjung dkk, 2024). Hal ini membuktikan bahwa pemilihan dan pengaturan massa katalis yang tepat sangat krusial untuk memaksimalkan hasil pirolisis. *Bio-oil* dapat *upgrade* selama pirolisis menggunakan katalis yang unggul dengan aktivitas tinggi. Katalis ini dapat dicampur dengan biomassa dan dipanaskan secara bersamaan, yang dikenal sebagai pirolisis in-situ, atau unggun katalis dapat ditempatkan di bagian hilir biomassa, di mana uap pirolitik dilewatkan melalui unggun katalitik, yang dikenal sebagai pirolisis *ex-situ* (Kumar R dkk, 2019). Kedua metode pirolisis katalitik ini telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam kualitas *bio-oil* dan saat ini merupakan metode yang paling diterima dan banyak didemonstrasikan untuk peningkatan minyak nabati (Kumar dkk, 2023) Meski demikian, masih terdapat variasi hasil antar penelitian karena perbedaan karakteristik biomassa, jenis dan massa katalis, serta kondisi operasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa perlu adanya tinjauan literatur komprehensif yang membandingkan dan mensintesis hasil-hasil tersebut secara sistematis.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk meninjau secara kritis pengaruh suhu dan massa katalis terhadap *yield bio-oil* hasil pirolisis ampas tebu dari berbagai literatur yang tersedia. Penelitian ini tidak hanya menyajikan komparasi kuantitatif data *yield*, tetapi juga menelaah mekanisme reaksi yang mendasarinya, serta kondisi optimum yang dilaporkan oleh berbagai peneliti. Kebaruan dari kajian ini terletak sejauh ini belum banyak *review* yang fokus spesifik pada parameter suhu dan rasio katalis terhadap *bio-oil* dari ampas tebu. Diharapkan, hasil tinjauan ini dapat menjadi dasar bagi penelitian eksperimental selanjutnya dalam rangka mengembangkan teknologi pirolisis yang lebih efisien, khususnya dalam konteks pemanfaatan limbah agroindustri secara berkelanjutan di Indonesia.

2. METODE

Artikel ini merupakan studi literatur yang disusun dengan metode tinjauan sistematis terhadap jurnal-jurnal ilmiah yang relevan dengan topik pirolisis ampas tebu dan penggunaan katalis. Literatur diperoleh dari basis data seperti ScienceDirect, Scopus, dan Google Scholar dengan rentang waktu publikasi 10 tahun terakhir (2014–2024). Kata kunci yang digunakan dalam pencarian mencakup: *pyrolysis of sugarcane bagasse*, *catalytic pyrolysis*, *bio-oil yield*, *pyrolysis temperature*, dan *catalyst dosage*. Seleksi dilakukan terhadap artikel yang mengandung data kuantitatif *yield bio-oil* dan kondisi operasi seperti suhu dan massa katalis. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk mengevaluasi pengaruh dua parameter utama yaitu suhu dan massa katalis terhadap *yield bio-oil* yang dihasilkan dari proses pirolisis ampas tebu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi Ampas Tebu (*Sugarcane Bagasse*)

Hasil analisis yang dilakukan oleh (Schmitt dkk, 2020) meliputi Analisa proksimat dan unsur, senyawa anorganik dan sifat fisikokimia lainnya disajikan pada tabel 1. Ampas tebu menunjukkan kadar air sebesar 2,80 wt% setelah pengeringan. Kadar air merupakan salah satu parameter utama biomassa. Jika kadar air > 10% pada saat pirolisis ampas tebu maka akan mempengaruhi efisiensi *yield bio-oil* yang diperoleh. Zat volatil yang diamati 80,32% merupakan indikasi kemampuan yang akan didevolatilisasi pada proses pirolisis. Ampas tebu memiliki kadar abu sebesar 6,75%. Dibandingkan dengan biomassa berkayu, biomassa umumnya memiliki kandungan kadar abu yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan *yield bio-oil* lebih rendah, pembentukan air dan gas yang tinggi pada proses pirolisis. Selain itu kandungan abu yang tinggi dan *fix carbon* yang tinggi menghasilkan char yang tinggi.

Tabel 1. Hasil karakterisasi ampas tebu (*Sugarcane bagasse*)

Karakterisasi	Ampas tebu (<i>Sugarcane bagasse</i>)
Analisa proksimat	
Kadar air (wt%)	2,80
Kadar abu (wt%)	6,75
<i>Volatile matter</i> (wt%)	80,32
<i>Fix carbon</i> (wt%)	10,14
Analisa unsur	
C (wt%)	47,40
H (wt%)	6,14
N (wt%)	0,28
S (wt%)	<0,1
O (wt%)	46,18
Senyawa anorganik	
Al (wt%)	0,11
Ca (wt%)	0,05
Fe (wt%)	0,19
K (wt%)	0,08
Mg (wt%)	0,04
Mn (wt%)	<0,01

Karakterisasi	Ampas tebu (<i>Sugarcane bagasse</i>)
Si (wt%)	1,79
Ti (wt%)	0,04
Zn (wt%)	<0,01

Sumber: (Schmitt dkk, 2020)

Pada analisa kandungan unsur dapat dilihat bahwa kandungan utama ampas tebu adalah hidrogen dan oksigen, sedangkan sulfur dan nitrogen didapatkan lebih rendah dibandingkan dengan penelitian lainnya. Misalnya penelitian (Rabiu dkk, 2018) menghasilkan konsentrasi sulfur dan nitrogen sebesar 0,80 wt% dan 1,60 wt%, sementara (Saif dkk, 2021) mengamati sulfur dan nitrogen dengan konsentrasi masing-masing 0,13 wt% dan 0,34 wt%. Seperti yang disajikan oleh (Islam dkk, 2010) konsentrasi senyawa ini dapat berbeda secara signifikan di antara sampel tebu. Sulfur dikenal sebagai *toxic* terhadap katalis (Bartholomew, 2001).

3.2 Pengaruh suhu terhadap *yield*

Suhu merupakan salah satu parameter terpenting dalam proses pirolisis karena secara langsung mempengaruhi tingkat dekomposisi biomassa, distribusi produk, dan nilai kalor. Oleh karena itu, eksperimen dalam alat pirolisis skala kecil atau peralatan TGA dan DSC dapat mengamati efek suhu. Saat suhu pirolisis meningkat, konstituen biomassa terurai menjadi molekul yang semakin kecil. Kemudian, hasil *biochar* cenderung menurun saat suhu meningkat, yang berarti bahwa suhu rendah (sekitar 400 °C) bermanfaat untuk hasil *biochar* yang lebih tinggi (Sohaib dkk, 2017). Bahkan dalam kisaran suhu ini, proses ko-pirolisis memiliki hasil *biochar* terendah (Dewangan dkk, 2016; Garcia-Pérez dkk, 2002) (Tabel 2), yang mungkin terkait dengan laju pemanasan tinggi dalam kasus ini. Namun demikian, seiring peningkatan suhu, nilai kalor *biochar* sedikit meningkat, kandungan karbon dapat meningkat, dan kandungan oksigen *biochar* menurun (Gonçalves dkk, 2017b). Untuk *bio-oil*, suhu antara (500°C) menghasilkan *yield* yang lebih tinggi, sedangkan suhu yang lebih tinggi diperlukan untuk mendapatkan nilai kalor yang lebih tinggi.

Yield tertinggi ditemukan melalui ko-pirolisis (Garcia-Pérez dkk, 2002) dan pirolisis cepat dengan unggun terfluidisasi (Montoya dkk, 2015), keduanya dalam kisaran 500°C. Sohaib dkk, (2017) (Tabel 2) juga mempelajari pengaruh suhu (400–800 °C) pada pirolisis cepat ampas tebu. Hasil *bio-oil* tertinggi (60,4%) dicapai pada suhu 500°C, sedangkan nilai kalor tertinggi (24,7 MJ/kg) dicapai pada suhu 600°C, hampir 20% pada suhu 500°C. Baik *biochar* maupun gas menghasilkan C, seperti yang diharapkan. Asadullah dkk (2007) (Tabel 2) memproduksi *bio-oil* dari pirolisis ampas tebu, dan seperti, suhu optimal untuk produksi cairan adalah 500 C, mencapai hasil *bio-oil* 66% setelah 1 jam waktu retensi.

Waktu retensi tinggi untuk produksi *bio-oil* yang tinggi, tetapi ini dimungkinkan karena laju pemanasan yang tinggi dan aliran gas yang tinggi meskipun merupakan unggun tetap. Gonçalves dkk (2017b) melakukan studi DSC untuk menentukan kisaran suhu optimum guna meningkatkan produksi *bio-oil* melalui pirolisis. Pada suhu 600 °C, penelitian ini menghasilkan rendemen *bio-oil* sebesar 53,8%. Penulis memilih nilai suhu ini karena sebagian lignin tidak terurai pada suhu yang lebih rendah. Mengenai nilai kalor produk, suhu yang tinggi meningkatkan nilai kalor produk padat, cair, dan gas. Lebih jauh lagi, suhu yang lebih tinggi

dapat meningkatkan deoksigenasi *bio-oil*, yang memang diharapkan. Akhirnya, gas diproduksi pada suhu yang lebih tinggi (di atas 600 °C) karena tingkat tersebut mengintensifkan reaksi gasifikasi (Gonçalves dkk, 2017b). Namun, rendemen gas yang tinggi juga dapat dicapai melalui pirolisis katalitik menggunakan reaktor gelombang mikro pada suhu sekitar 500 °C yang menghasilkan H₂ dan CH₄ yang lebih tinggi (Tabel 2). Suhu yang lebih tinggi menghasilkan komposisi fase gas yang lebih baik, sedangkan suhu yang lebih rendah menghasilkan CO₂ dan CO yang lebih tinggi. HHV syngas juga meningkat seiring dengan peningkatan suhu (Gonçalves dkk, 2017b).

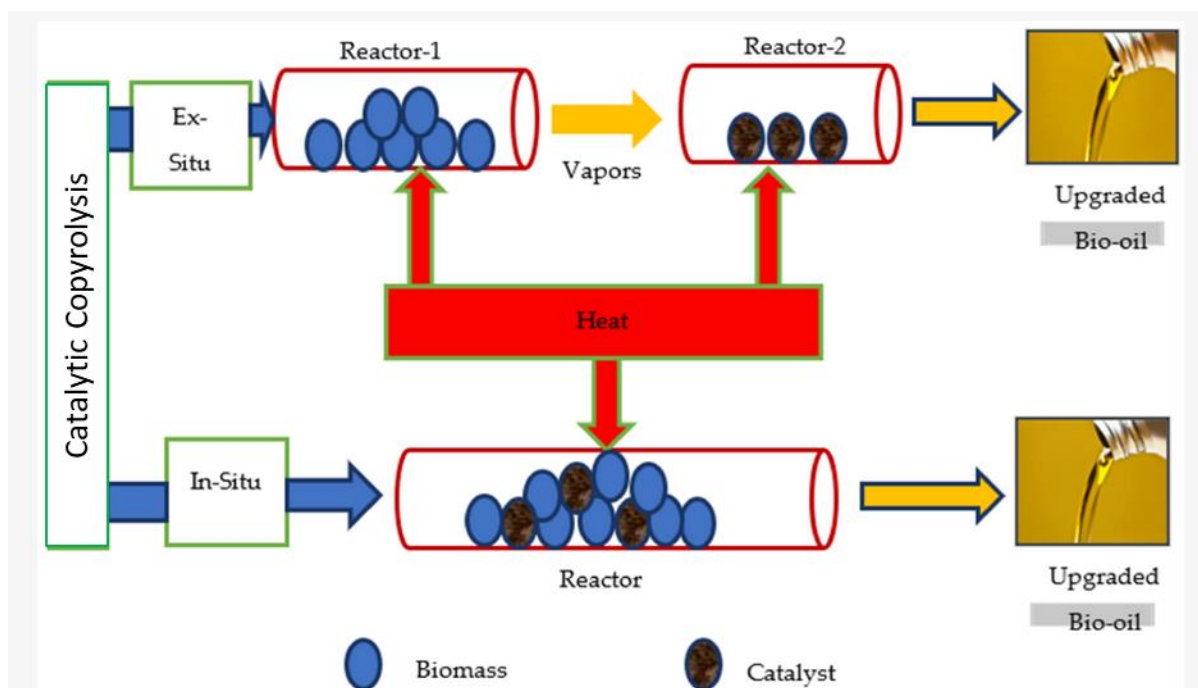
Tabel 2. Pengaruh suhu terhadap *yield*

Tipe Reaktor	Suhu (°C)	Yield			Referensi
		Bio-oil	Char	Gas	
<i>Fix bed</i>	400 - 700	35 - 54	23 - 38	18 - 26	Gonçalves dkk (2017b)
<i>Bench scale semi batch</i>	400 - 800	25 - 60	35 - 47	10 - 58	Sohaib dkk (2017)
<i>Semi batch</i>	350 - 600	38 - 50	10 - 35	30 - 40	Dewangan dkk (2016)
<i>Vacuum</i>	500	42 - 85	10 - 30	3 - 18	Garcia-Pérez dkk (2002)
<i>Fix bed</i>	300 - 500	3 - 59	23 - 77	4 - 18	Asadullah dkk (2007)
<i>Bubbling fluidized bed</i>	500 - 550	64 - 72	18 - 22	4 - 18	Montoya dkk (2015)

3.3 Pengaruh rasio katalis terhadap *yield bio-oil*

Penggunaan katalis dalam pirolisis ampas tebu memiliki peran penting dalam meningkatkan *yield bio-oil* yang dihasilkan (Tabel 3). Tanpa katalis, proses pirolisis akan menghasilkan *bio-oil* dengan kandungan oksigen yang tinggi, yang menyebabkan ketidakstabilan kimia, viskositas yang tinggi, dan nilai asam yang lebih besar, yang berpotensi menurunkan kualitas *bio-oil* tersebut sebagai bahan bakar. Untuk mengatasi masalah ini, pirolisis katalitik dapat digunakan untuk mengurangi kandungan oksigen dalam *bio-oil*, meningkatkan stabilitas kimia dan viskositas, serta meningkatkan nilai kalornya.

Berdasarkan metode kontak uap pirolisis dengan katalis, pirolisis katalitik dapat dibagi menjadi mode *in-situ* dan *ex-situ*. Pirolisis katalitik *in situ* atau *ex situ* dapat dikategorikan berdasarkan lokasi katalis di dalam reaktor. Konversi termokimia biomassa dilakukan melalui proses katalitik *in situ* (primer) dan *ex situ* (sekunder), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dengan memilih katalis dan kondisi operasi yang tepat, kedua proses ini diperlukan untuk mengubah zat beroksigen dan berat menjadi produk molekuler yang stabil secara kimia.



Gambar 2. Mekanisme proses katalitik *in situ* dan *ex situ* pada konversi termokimia

In situ

Dalam proses pirolisis katalitik *in situ*, katalis dan partikel biomassa dicampur selama proses pirolisis untuk meningkatkan reaksi. Katalis tidak hanya berpartisipasi dalam reaksi tetapi juga berfungsi sebagai medium pemanas. Setelah dilepaskan dari partikel biomassa, uap pirolisis bereaksi langsung dengan katalis terdekat dalam fase *in situ*. Kedekatan antara biomassa dan katalis mempercepat konversi molekul yang lebih besar. Untuk memberikan deoksigenasi yang efektif pada uap, diperlukan rasio katalis ke biomassa yang besar. Kekurangan proses ini adalah biomassa dan katalis harus beroperasi dalam kondisi pirolisis yang sama. Memisahkan *biochar* dari katalis setelah pirolisis juga sulit. Hasil dan kualitas *bio-oil* terpengaruh negatif oleh pembentukan kok yang abnormal tinggi pada permukaan katalis, menurut penelitian.

Ex situ

Katalis ditempatkan di reaktor yang sama atau reaktor lain dalam proses pirolisis katalitik *ex situ*, di hilir dari biomassa. Dengan konfigurasi katalis yang beragam, proses ini dapat dibangun dalam satu lapisan, dua fase, atau lebih secara berurutan. Metode ini memberikan stabilitas dan kendali yang lebih baik untuk berbagai kondisi reaksi (kombinasi katalis, suhu yang berbeda, dan variasi kondisi gas), yang dapat berbeda dari reaktor biomassa utama. Selain itu, proses *ex situ* memungkinkan pemulihan dan daur ulang katalis tanpa isolasi katalis yang sulit seperti pada proses *in situ*. Sebagai konsekuensinya, baik produk akhir maupun produk antara dapat dilacak dan disesuaikan secara akurat sesuai dengan tuntutan penelitian dan industri setelah setiap prosedur. Pirolisis *ex situ* dibatasi oleh kendala finansial karena kebutuhan akan reaktor katalis tambahan. Konsentrasi oksigen yang lebih rendah dalam *bio-oil* ditemukan dalam penelitian sebelumnya yang menggunakan pirolisis *ex situ*, meskipun aktivitas deoksigenasi tidak terlihat selama proses *in situ*.

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

Jenis katalis	Rasio katalis	Hasil	Referensi
Natural zeolite	(5%, 10%, 15%, 20%, 30% and 40% w/w) dari biomassa	Efek rasio katalis terhadap biomassa zaitun (5%, 10%, 15%, 20%, 30% dan 40%) terhadap <i>yield</i> pirolisis diteliti dan dibandingkan dengan <i>yield</i> produk pirolisis tanpa katalis. <i>Yield</i> produk minyak hayati dari proses pirolisis ditemukan meningkat seiring dengan peningkatan rasio katalis. <i>Yield bio-oil</i> dari bungkil minyak zaitun, yaitu 36,1% tanpa katalis, mencapai nilai maksimum 39,3% dengan menggunakan katalis aktif sebesar 10% berat. Hasil produk gas ditemukan meningkat dengan menggunakan katalis dibandingkan dengan pirolisis tanpa katalis.	Hani & Hailat, (2016)
ZSM-5 zeolit	Rasio katalis/biomassa divariasikan (0,05, 0,10, 0,15, 0,20 dan 0,25) pada laju pemanasan konstan 50 °C/menit dan suhu 600 °C.	Pirolisis non-katalitik memberikan <i>yield bio-oil</i> maksimum (45,67 wt%) pada suhu pirolisis 600 °C, laju pemanasan 50 °C/menit, sedangkan rasio katalis/biomassa 0,05 pada pirolisis katalitik <i>yield bio-oil</i> sebesar (40,83 wt%) pada kondisi yang sama.	Rabiu dkk (2018)
NiFe/NZA	Variasi katalis 1%, 1,5% dan 2% pada suhu 400 °C	Pada suhu 400°C, dari berat katalis 0% menjadi berat katalis 1%, <i>yield bio-oil</i> yang dihasilkan meningkat, namun <i>yield</i> menurun pada berat katalis 1,5% dan kembali meningkat pada berat katalis 2%. Penurunan <i>yield</i> ini terjadi karena adanya produk biogas atau hidrokarbon rantai pendek yang tidak terkondensasi selama proses pirolisis.	Tanjung dkk (2024)

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu dan penggunaan katalis berperan penting dalam meningkatkan *yield* dan kualitas *bio-oil* hasil pirolisis ampas tebu. Suhu 500°C menghasilkan *yield bio-oil* optimal sebesar 60,4%, sementara suhu lebih tinggi, seperti 600°C, meningkatkan nilai kalor dan mengurangi kandungan oksigen. Penggunaan katalis seperti NiFe/NZA dan zeolit juga meningkatkan kualitas *bio-oil* dengan mengurangi kandungan oksigen, viskositas, dan nilai asam. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pengaturan suhu dan pemilihan katalis yang tepat untuk menghasilkan *bio-oil* yang lebih efisien dan berkualitas tinggi. Penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi katalis lain dan kondisi operasi untuk memaksimalkan potensi ampas tebu sebagai sumber *bio-oil* yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asadullah, M., Rahman, M. A., Ali, M. M., Rahman, M. S., Motin, M. A., Sultan, M. B., & Alam, M. R. (2007). Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel*, 86(16), 2514–2520. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.007>
- Bartholomew, C. H. (2001). Mechanisms of catalyst deactivation. *Applied Catalysis A: General*, 212(1–2), 17–60. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(00\)00843-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00843-7)
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Dewangan, A., Pradhan, D., & Singh, R. K. (2016). Co-pyrolysis of sugarcane bagasse and low-density polyethylene: Influence of plastic on pyrolysis product yield. *Fuel*, 185, 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.011>
- García-Pérez, M., Chaala, A., & Roy, C. (2002). Co-pyrolysis of sugarcane bagasse with petroleum residue. Part II. Product yields and properties. *Fuel*, 81(7), 893–907. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00215-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00215-0)
- Gonçalves, E. V., Seixas, F. L., de Souza Scandiuzzi Santana, L. R., Scaliante, M. H. N. O., & Gimenes, M. L. (2017a). Economic trends for temperature of sugarcane bagasse pyrolysis. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(7), 1269–1279. <https://doi.org/10.1002/cjce.22796>
- Gonçalves, E. V., Seixas, F. L., de Souza Scandiuzzi Santana, L. R., Scaliante, M. H. N. O., & Gimenes, M. L. (2017b). Economic trends for temperature of sugarcane bagasse pyrolysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(7), 1269–1279. <https://doi.org/10.1002/cjce.22796>
- Hameed, S., Sharma, A., Pareek, V., Wu, H., & Yu, Y. (2019). A review on biomass pyrolysis models: Kinetic, network and mechanistic models. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 123, pp. 104–122). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.008>
- Hani, F. F. B., & Hailat, M. M. (2016). Production of Bio-Oil from Pyrolysis of Olive Biomass with/without Catalyst. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 06(04), 488–499. <https://doi.org/10.4236/aces.2016.64043>
- Ikrom. (2023, December 21). Potensi Energi Terbarukan Indonesia Baru Tergarap 0,3% sampai 2021. <https://www.esdm.go.id/Id/Media-Center/Arsip-Berita/Potensi-Energi-Baru-Terbarukan-Ebt-Indonesia>.
- Islam, M. R., Parveen, M., & Haniu, H. (2010). Properties of sugarcane waste-derived bio-oils obtained by fixed-bed fire-tube heating pyrolysis. *Bioresource Technology*, 101(11), 4162–4168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.137>
- Kumar R, Strezav V, Kan T, Weldekidan H, & He J. (2019). Investigating the effect of Cu/zeolite deoxygenation of bio-oil from pyrolysis of pine wood. *Energy Procedia*, 160, 186–193.
- Kumar, R., Strezov, V., Weldekidan, H., He, J., Singh, S., Kan, T., & Dastjerdi, B. (2023). Lignocellulose Biomass Pyrolysis for Bio-Oil Production: Biomass Pre-treatment Methods for Production of Drop-In Fuels. In *Biowaste and Biomass in Biofuel Applications*. <https://doi.org/10.1201/9781003265597-8>
- Mentzel, U. V., & Holm, M. S. (2011). Utilization of biomass: Conversion of model compounds to hydrocarbons over zeolite H-ZSM-5. *Applied Catalysis A: General*, 396(1–2), 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.01.040>
- Montoya, J. I., Valdés, C., Chejne, F., Gómez, C. A., Blanco, A., Marrugo, G., Osorio, J., Castillo, E., Aristóbulo, J., & Acero, J. (2015). Bio-oil production from Colombian bagasse by fast pyrolysis in a fluidized bed: An experimental study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.11.007>

- Prabhakara, H. M., Bramer, E. A., & Brem, G. (2022). Hydrotalcite as a deoxygenation catalyst in fast pyrolysis of biomass for the production of high quality bio-oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105431>
- Rabiu, S. D., Auta, M., & Kovo, A. S. (2018). An upgraded bio-oil produced from sugarcane bagasse via the use of HZSM-5 zeolite catalyst. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 589–594. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.09.001>
- Saif, A. G. H., Wahid, S. S., & Ali, M. R. O. (2021). Characterization of Pyrolytic Oil and Char Obtained from Sugarcane Bagasse Pyrolysis. *Advanced Engineering Forum*, 39, 75–84. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.39.75>
- Sari, W., Sumarno, A., & Lestari, D. (2023). *Potensi Produksi Bio-Oil dengan Metode Pirolisis Katalitik Menggunakan Katalis Zeolit dari Ampas Tebu: Studi Literatur. VIII(2)*.
- Schmitt, C. C., Moreira, R., Neves, R. C., Richter, D., Funke, A., Raffelt, K., Grunwaldt, J. D., & Dahmen, N. (2020). From agriculture residue to upgraded product: The thermochemical conversion of sugarcane bagasse for fuel and chemical products. *Fuel Processing Technology*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106199>
- Shutterstock. (2024). *Indonesia Energy Transition Outlook 2024 IESR Institute for Essential Services Reform*. www.iesr.or.id
- Sohaib, Q., Muhammad, A., & Younas, M. (2017). Fast pyrolysis of sugarcane bagasse: Effect of pyrolysis conditions on final product distribution and properties. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 39(2), 184–190. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1212292>
- Tanjung, M. H., Larasaty, A., Habibie, R. F. N., Ilmi, A. A., Sufi, S. B., Bahri, S., & Nugraha, M. I. (2024). Sustainable bio energy: the potential of Ni-Fe/NZA as a catalyst for pyrolysis of sugarcane bagasse waste (*Saccharum officinarum L.*) for bio-oil production. *Konversi*, 13(2). <https://doi.org/10.20527/k.v13i2.19988>