

Pirolisis Biji Karet Sebagai Energi Alternatif Berdasarkan Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit

Uswatun Khasanah¹, Triska Ladini², Irawan Rusnadi³, Isnandar Yunanto⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya

e-mail: uswatunkhasanah1232@gmail.com

Abstrak

Indonesia, sebagai negara agraris, memiliki komoditas perkebunan yang berlimpah, dan perkebunan karet merupakan salah satu penyumbang utama sektor ini. Luas lahan karet secara agregat di Provinsi Sumatera Selatan tercatat 872,5 ribu hektar. Komposisi biji karet pada dasarnya terdiri dari dua unsur pokok, yaitu inti dan cangkang. Inti dari bahan tersebut memiliki kandungan minyak yang tinggi, sedangkan cangkangnya sebagian besar terdiri dari lignin dan selulosa, sehingga memberikan peluang untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar alternatif. Salah satu metode potensial yang dapat digunakan adalah metodologi pirolisis, yang bertujuan untuk memperoleh produk samping pirolisis (seperti bio-char, bio-oil, dan syngas) yang berpotensi menjadi pengganti sumber bahan bakar konvensional. Berdasarkan temuan penelitian, hasil bio-char maksimum diamati pada suhu 200°C, dengan penambahan katalis sebanyak 4%. Hal ini menghasilkan imbal hasil sebesar 55,75%. Percobaan bio-oil memberikan hasil yang sangat baik bila dilakukan pada suhu 400°C, bersamaan dengan penggunaan katalis 6%. Kombinasi ini menghasilkan rendemen sebesar 23,55%. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa produksi syngas tertinggi dapat dicapai dengan menerapkan parameter tertentu, yaitu suhu 400°C dan penggunaan katalis dengan konsentrasi 6%. Hasil syngas ditentukan sebesar 44,01% pada kondisi yang ditentukan.

Kata kunci: *Biji Karet; Biomassa; Katalis Zeolit Alam; Pirolisis*

Abstract

Indonesia as an agricultural country is rich in plantation products, one of the largest plantation products in Indonesia comes from rubber plantations. The total rubber land in South Sumatra province is 872.5 thousand hectares. Rubber seeds are composed of two main components: a kernel and a shell. The kernel is notably rich in oil, while the shell mostly contains lignin and cellulose, which has potential applications as alternate sources of fuel. One approach that can be employed is the pyrolysis technique, which seeks to acquire pyrolysis byproducts (bio-char, bio-oil, and syngas) that can serve as viable sources of alternative fuel energy. According to the results obtained from the investigation, it was seen that the production of bio-char reached its maximum level at a temperature of 200°C when a catalyst consisting of 4% was incorporated. This led to an overall yield of 55.75%. The maximum yield of bio-oil was attained at a temperature of 400°C, in conjunction with the use of a 6% catalyst, leading to a consequent yield of 23.55%. The findings of this study demonstrate that the highest syngas production may be attained under specific conditions, namely a temperature of 400°C and the utilisation of a 6% catalyst. The syngas yield was determined to be 44.01% under the specified conditions.

Keywords : *Rubber Seed; Biomass; atural Zeolite Catalyst; Pyrolysis*

PENDAHULUAN

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014, yang berkaitan dengan

Kebijakan Energi Nasional Republik Indonesia, tujuan Pasal 2 adalah untuk mencapai ketahanan energi dalam negeri sebagai sarana untuk mengatasi krisis energi yang ada. Oleh karena itu, keharusan terletak pada penggunaan sumber energi terbarukan yang memiliki kapasitas untuk pengisian ulang yang berkelanjutan dan tahan terhadap penipisan ketika dikendalikan secara efektif. Indonesia dicirikan sebagai negara dengan ekonomi agraris yang dominan, dengan hasil perkebunan yang melimpah. Menurut data yang disediakan oleh Kementerian Pertanian (Kementan), perkebunan karet di Indonesia diidentifikasi sebagai yang terbesar kedua setelah perkebunan kelapa sawit. Menurut Digni (2022), perkebunan karet di Sumatera Selatan, Indonesia, memegang predikat sebagai yang terluas di Indonesia, dengan luas areal mencapai 872,5 ribu hektare (ha) pada tahun 2021. Menurut Musyaffa (2020), diperkirakan bahwa sebanyak 400 pohon karet dapat dibudidayakan di atas lahan seluas satu hektar. Selain itu, studi yang sama menunjukkan bahwa area lahan ini berpotensi menghasilkan sekitar 5.050 kg biji karet per tahun. Biji karet diklasifikasikan sebagai limbah karena pemanfaatannya yang kurang optimal, hanya sebagian kecil yang digunakan untuk keperluan benih. Potensi limbah biji karet yang belum dimanfaatkan masih sangat potensial untuk dieksplorasi di masa depan, terutama dalam aplikasinya sebagai bahan baku yang layak untuk produksi sumber energi terbarukan. Pendekatan yang diusulkan ini merupakan solusi potensial untuk memenuhi tujuan yang diuraikan dalam Kebijakan Energi Nasional. Tujuan utama dari pasal 2 Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014, yang berkaitan dengan Kebijakan Energi Nasional Republik Indonesia, adalah untuk mencapai ketahanan energi dalam negeri sebagai cara untuk mengatasi krisis energi yang ada. Oleh karena itu, penggunaan sumber energi terbarukan menjadi sangat penting, karena sumber energi terbarukan memiliki kapasitas untuk diisi ulang dan dipertahankan tanpa batas waktu jika dikendalikan dengan baik. Indonesia dicirikan sebagai negara dengan sektor pertanian yang kuat, dengan kekayaan hasil perkebunan. Menurut data yang disediakan oleh Kementerian Pertanian (Kementan), perkebunan karet di Indonesia diidentifikasi sebagai yang terbesar kedua setelah perkebunan kelapa sawit. Menurut Digni (2022), perkebunan karet dengan hamparan terluas di Indonesia terletak di Sumatera Selatan, meliputi area seluas 872,5 ribu hektare (ha) pada tahun 2021. Menurut Musyaffa (2020), sebanyak 400 pohon karet dapat dibudidayakan pada satu hektar lahan. Selain itu, diproyeksikan bahwa lahan seluas satu hektar ini berpotensi menghasilkan sekitar 5.050 kg biji karet setiap tahunnya. Biji karet diklasifikasikan sebagai limbah karena penggunaannya yang kurang optimal, hanya sebagian kecil yang digunakan untuk keperluan benih. Potensi limbah biji karet yang belum dimanfaatkan ini memberikan peluang untuk dieksplorasi lebih lanjut, terutama dalam aplikasinya sebagai bahan baku yang layak untuk produksi sumber energi terbarukan. Pendekatan yang diusulkan ini merupakan solusi potensial untuk memenuhi tujuan yang diuraikan dalam Kebijakan Energi Nasional.

Kernel biji karet mengandung minyak yang cukup tinggi dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar, begitu juga dengan cangkangnya yang banyak mengandung lignin dan selulosa dapat dimanfaatkan sebagai alternatif bahan bakar dengan berbagai metode, salah satunya melalui metode pirolisis atau pemanasan tanpa udara yang akan menghasilkan 3 (tiga) produk utama yaitu *bio-char*, *bio-oil*, dan juga gas mampu bakar (*syngas*). Terdapat berbagai faktor yang dapat mempengaruhi hasil dari proses pembuatan produk melalui metode pirolisis, seperti temperatur yang digunakan pada proses produksi dan katalis yang dipakai. Perbedaan temperatur pada proses produksi dapat mempengaruhi waktu yang diperlukan dalam proses pirolisis. Sedangkan penggunaan katalis mempengaruhi kualitas produk pirolisis yang dihasilkan serta waktu produksinya.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian yang memerlukan pelaksanaan eksperimen dengan menggunakan pengumpulan data tertentu untuk mendapatkan bukti empiris yang mendukung hipotesis. Penelitian ini memasukkan berbagai faktor yaitu variabel terikat dan variabel bebas. Penelitian tersebut mencakup beberapa aspek dependen yaitu

jenis katalis, bahan baku, dan jumlah bahan baku. Dalam penelitian ini, variabel independen meliputi variasi suhu dan jumlah katalis.

Persiapan alat dan bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi butiran rami dan katalis yang berasal dari zeolit alam. Penyelidikan ini menggunakan berbagai peralatan termasuk peralatan pirolisis, pengukur pH, viskometer Brookfield, piknometer, neraca analitik, dan alat ukur gas MRU Nova Plus.



Gambar 1. Rangkaian Alat Pirolisis

Prosedur penelitian

1. Pre-Treatment bahan baku

Bahan mentah yang digunakan dalam proses persiapan. Kemudian membersihkan kotoran yang terdapat pada bahan baku. Mengecilkan ukuran bahan hingga berukuran ± 1 cm menggunakan *crusher*. Mengayak bahan baku menggunakan ayakan berukuran ± 1 cm. Menimbang bahan baku untuk sampel yang akan digunakan. Mengeringkan bahan baku didalam oven dengan temperatur 120°C selama 2 jam, kemudian dianalisa kadar airnya.

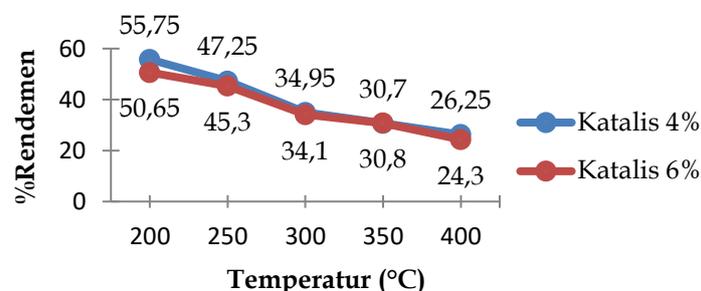
2. Proses Pirolisis

Biji karet yang telah dilakukan proses *pre-treatment* dan katalis yang telah dikecilkan ukurannya sebesar 60 mesh dimasukkan ke dalam reaktor lalu ditutup rapat. Selanjutnya menghidupkan kondensor dan pompa vakum. Kemudian mengatur temperatur pada kontrol panel dengan variasi pertama yaitu 200°C lalu menyalakan reaktor. Selanjutnya menunggu variasi temperatur yang diinginkan tercapai. Apabila temperatur telah tercapai, menghidupkan stopwatch selama 60 menit. Reaktor dihentikan apabila telah mencapai waktu selama 60 menit. Kemudian mengambil produk pirolisis yang telah dihasilkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian proses pirolisis biji karet, diperoleh hasil analisa produk pirolisis sebagai berikut.

Rendemen Produk *Bio-char*



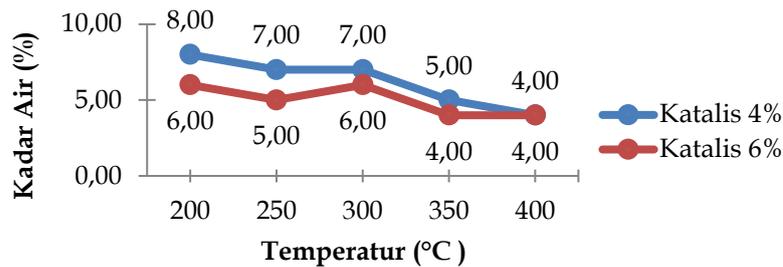
Gambar 2. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap %Rendemen *Bio-char*

Produk *bio-char* tertinggi dihasilkan pada temperatur 200°C pada penambahan katalis 4% dengan rendemen sebanyak 55,75% sedangkan rendemen terendah dihasilkan pada temperatur 400°C pada penambahan katalis 6% yaitu sebesar 24,30%. Penurunan

hasil bio-char disebabkan oleh kenaikan suhu, sebagai akibat dari penguraian berbagai senyawa yang ada dalam bahan mentah, yang menyebabkan konversi menjadi bentuk gas. Proses pirolisis dapat dibagi menjadi empat fase berbeda. Tahap pertama melibatkan penguapan air. Setelah itu, hemiselulosa mengalami pirolisis pada suhu berkisar antara 180 °C hingga 300 °C, sedangkan selulosa mengalami pirolisis pada suhu antara 260 °C dan 350 °C. Terakhir, lignin mengalami pirolisis pada suhu sama dengan atau lebih dari 300 °C (Lingbeck et al., 2014). Selain itu, penggunaan berbagai katalis zeolit selama prosedur pirolisis dapat memfasilitasi penyebaran suhu yang cepat dan konsisten dalam biomassa, karena adanya alumina dalam zeolit.

Analisis Karakteristik *Bio-char*

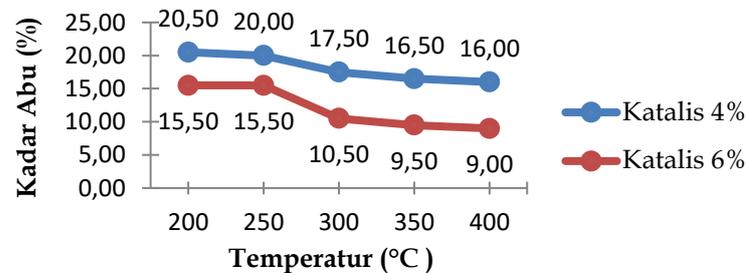
1. Kadar Air *Bio-char*



Gambar 3. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap %Kadar Air *Bio-char*

Analisis Gambar 3 menunjukkan bahwa kadar air biochar biji karet sangat dipengaruhi oleh suhu pirolisis. Dengan meningkatnya suhu, diperkirakan akan semakin banyak kandungan air yang mengalami penguapan pada proses pirolisis, sehingga mengakibatkan berkurangnya kandungan air di dalam bio-char. Selain itu, penggunaan katalis juga berpotensi menurunkan kuantitas biochar yang dihasilkan. Kadar air yang diamati menunjukkan peningkatan di beberapa lokasi pengambilan sampel. Hal ini dapat disebabkan oleh pendinginan bio-char di lokasi terbuka, sehingga memungkinkannya menyerap kelembapan dari udara sekitar atau lingkungan sekitarnya.

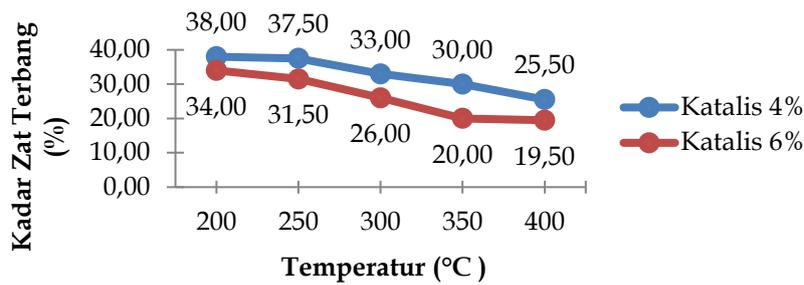
2. Kadar Abu



Gambar 4. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap %Kadar Abu *Bio-char*

Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar abu yang dihasilkan dipengaruhi oleh suhu pirolisis. Biasanya, terdapat hubungan langsung antara nilai kadar abu dan durasi serta suhu pirolisis. Kehadiran sejumlah besar abu dalam bio-char mungkin berdampak buruk pada kualitas keseluruhannya. Hal ini sebagian besar disebabkan oleh kandungan mineral abu yang cenderung menyumbat pori-pori dalam struktur bio-char. Akibatnya, luas permukaan bio-char berkurang sehingga mengurangi efektivitasnya (Herlambang dkk., 2021). Penggabungan katalis zeolit berpotensi mengurangi kandungan abu dalam bio-char, karena abu yang dihasilkan selama proses pirolisis berinteraksi dengan zeolit dan terkandung di dalam struktur pori zeolit.

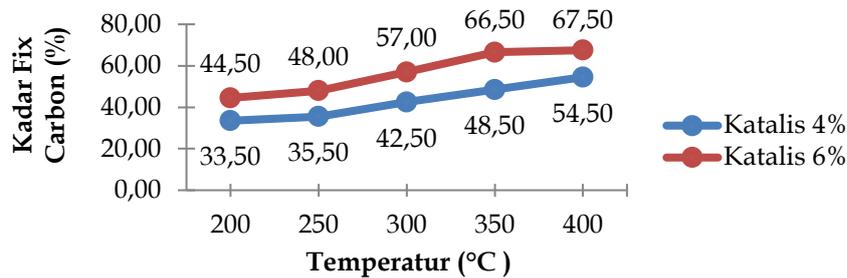
3. Kadar Zat Terbang (*volatile matter*)



Gambar 5. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap %Kadar Zat Terbang *Bio-char*

Kadar bahan mudah menguap bio-char yang muncul dari pirolisis dipengaruhi oleh suhu operasi pada proses pirolisis. Kandungan bahan mudah menguap mencapai nilai maksimumnya yaitu 34% pada suhu 200°C dan konsentrasi katalis 4%. Sebaliknya, kandungan bahan mudah menguap minimum sebesar 19,5% diamati ketika suhu ditingkatkan hingga 400°C dan konsentrasi katalis dinaikkan menjadi 6%. Penurunan kadar bahan mudah menguap disebabkan oleh dekomposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin secara berurutan selama proses pirolisis biomassa. Selulosa mula-mula terurai pada kisaran suhu 200°C - 400°C, kemudian hemiselulosa pada kisaran suhu 300°C - 450°C, dan terakhir lignin pada suhu 450°C (Rosyadi dkk., 2018). Menurut Wijayanti (2021), distribusi panas pada biomassa menjadi lebih beragam seiring dengan meningkatnya proporsi zeolit yang disuplai, hal ini disebabkan oleh adanya alumina pada zeolit.

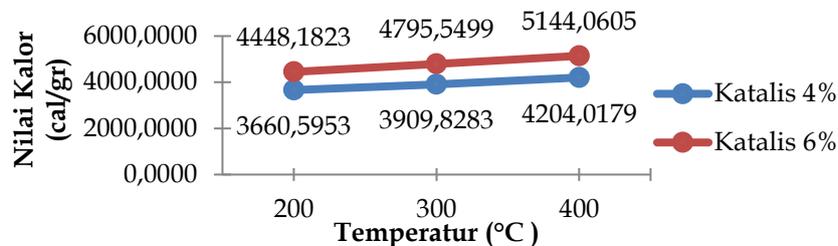
4. Karbon Terikat (*Fix Carbon*)



Gambar 6. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap %Kadar *Fix Carbon Bio-char*

Temuan penyelidikan menunjukkan bahwa suhu pirolisis mempunyai dampak signifikan terhadap jumlah karbon terikat yang dihasilkan. Peningkatan suhu pirolisis menghasilkan tingkat penyerapan karbon yang lebih besar. Percepatan proses pembentukan bio-char dan optimalisasi proses degradasi dari bahan mentah menjadi bio-char disebabkan oleh peningkatan suhu dan keberadaan katalis.

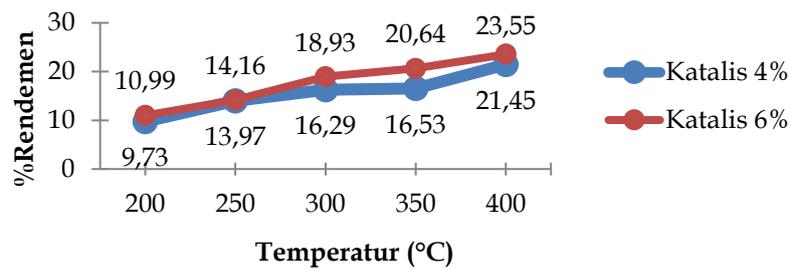
5. Nilai Kalor



Gambar 7. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap Nilai Kalor *Bio-char*

Berdasarkan data yang disajikan pada Gambar 7, nilai kalor maksimum dicapai ketika menggunakan katalis 6% pada suhu 400°C, yaitu sebesar 5144.0605 cal/gr. Sebaliknya, nilai kalor minimum diamati pada suhu 200 derajat Celcius bila menggunakan konsentrasi katalis 4%, yaitu sebesar 3660,5953 kalori per gram. Nilai kalor yang dihasilkan dalam penelitian ini menunjukkan korelasi positif dengan peningkatan suhu dan penggunaan katalis zeolit. Menurut Asmunandar dkk. (2022), terdapat hubungan searah antara nilai kalor arang dengan suhu proses pirolisis. Semakin tinggi suhu maka nilai kalor arang juga semakin meningkat. Namun, penting untuk dicatat bahwa peningkatan suhu selama pirolisis menyebabkan penguapan senyawa yang mudah menguap, penurunan kadar air, dan akhirnya pembentukan karbon. Perubahan ini berkontribusi pada peningkatan nilai kalori arang secara keseluruhan.

6. Rendemen Produk *Bio-oil*

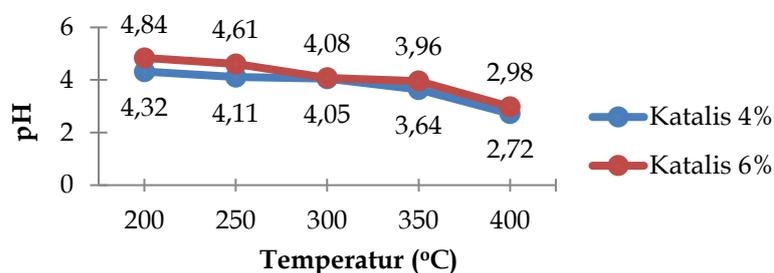


Gambar 8. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap %Rendemen *Bio-oil*

Keluaran bio-oil menunjukkan korelasi positif dengan peningkatan suhu. Rendemen tertinggi diperoleh pada suhu 400°C dengan konsentrasi katalis 6%, secara spesifik menghasilkan rendemen sebesar 23,55%. Sebaliknya, suhu 200°C dan konsentrasi katalis 4% menghasilkan rendemen terendah yaitu sebesar 9,73%. Menurut Wibowo dkk. (2017), jumlah lignin yang ada dalam bahan baku berdampak langsung terhadap hasil produksi bio-oil. Secara khusus, konsentrasi lignin yang lebih tinggi dikaitkan dengan keluaran bio-oil yang lebih baik. Kuantitas produk yang dihasilkan melalui proses perengkahan katalitik bergantung pada tingkat aktivitas yang ditunjukkan oleh katalis yang digunakan. Laju proses perengkahan meningkat berbanding lurus dengan jumlah katalis yang digunakan. Menurut Aziz dkk. (2019), katalis memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi komponen hidrokarbon rantai panjang yang ada dalam bahan baku, sehingga menyebabkan proses perengkahan selanjutnya yang pada akhirnya menghasilkan produk yang diinginkan.

Analisis Karakteristik pada *Bio-oil*

1. pH

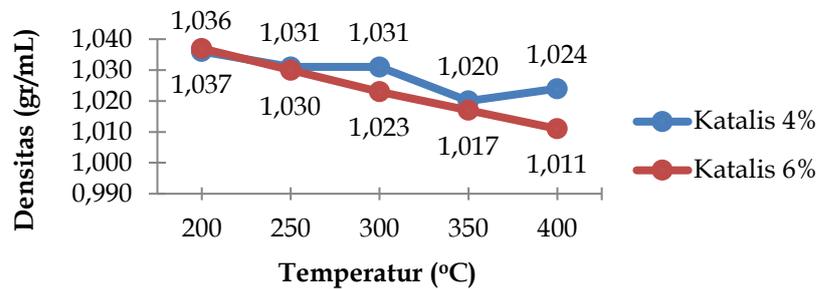


Gambar 9. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap pH *Bio-oil*

Berdasarkan gambar diatas terlihat temperatur serta katalis berpengaruh terhadap pH yang diperoleh. Peningkatan temperatur dalam proses pirolisis akan menyebabkan biomassa terdekomposisi lebih optimal, menghasilkan lebih banyak senyawa asam yang dapat menyebabkan lingkungan *bio-oil* menjadi lebih asam dan pH-nya menurun. Namun, seiring dengan penambahan katalis zeolit, kemampuannya untuk mengikat asam dalam *bio-oil* dapat meningkatkan pH. Kehadiran asam asetat dan asam lain yang dihasilkan

selama proses pirolisis dapat menyebabkan peningkatan tingkat keasaman, yang pada gilirannya mendorong degradasi selulosa dan bahan kimia ekstraktif yang bersifat asam (Wibowo et al., 2017).

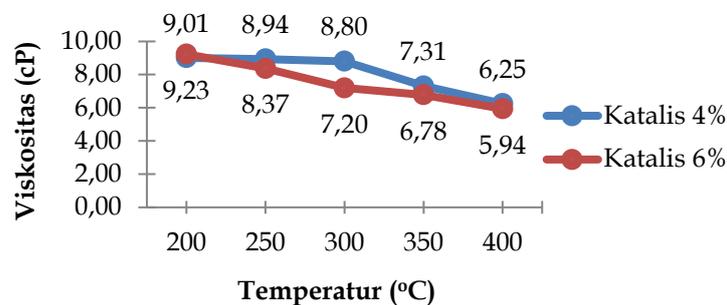
2. Densitas



Gambar 10. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap Densitas *Bio-oil*

Dari gambar diatas diperoleh densitas tertinggi yaitu 1,037 gr/mL terdapat pada temperatur 200 °C dengan penambahan katalis 4% dan untuk densitas terkecil terdapat di temperatur 400 °C dengan katalis 6% yaitu sebesar 1,011gr/mL. Hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan temperatur dan penambahan katalis mengakibatkan penurunan densitas. Hubungan antara suhu dan karakteristik produk yang dihasilkan sedemikian rupa sehingga peningkatan suhu menyebabkan penurunan berat produk, sehingga menghasilkan proporsi hidrokarbon ringan yang lebih tinggi. Akibatnya, peningkatan suhu ini juga menyebabkan kondensasi senyawa menjadi lebih besar, sehingga berdampak pada kepadatan produk secara keseluruhan (Hasmar, 2020). Menurut Wibowo dkk. (2017), pengenalan katalis memungkinkan konversi molekul dengan berat molekul tinggi menjadi molekul dengan berat molekul rendah.

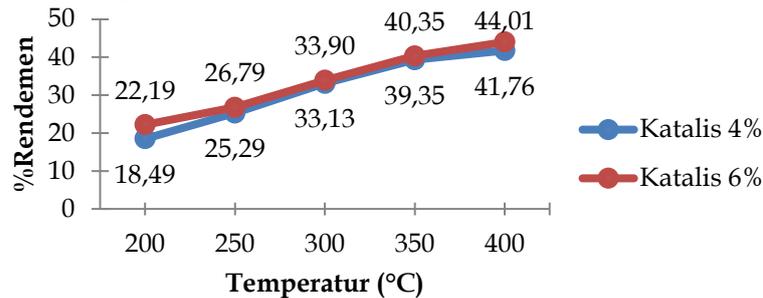
3. Viskositas



Gambar 11. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap Viskositas *Bio-oil*

Semakin meningkatnya temperatur dan penambahan katalis membuat viskositas yang dihasilkan semakin rendah. Semakin meningkatnya temperatur menyebabkan perengkahan biomassa berjalan dengan optimal dan hidrokarbon ringan yang dihasilkan akan semakin banyak. Selain itu, pengenalan katalis menyebabkan penurunan viskositas. Terjadinya fenomena ini dapat disebabkan oleh kemampuan katalis dalam mempercepat degradasi molekul dengan berat molekul tinggi menjadi senyawa hidrokarbon alkena dengan berat molekul berkurang (Wibowo et al., 2017).

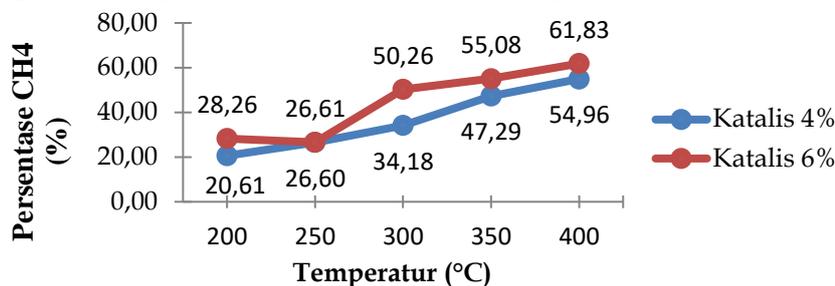
4. Rendemen Produk Syngas



Gambar 12. Pengaruh Temperatur dan katalis terhadap %Rendemen Syngas

Produksi syngas menunjukkan korelasi positif dengan peningkatan suhu. Peningkatan suhu pirolisis menyebabkan dekomposisi yang lebih besar pada komposisi biji karet, yang menyebabkan konversi bahan menjadi bentuk gas. Gas ini selanjutnya mengalami proses evaporasi dan kondensasi sehingga menghasilkan bio-oil dan gas-gas yang tidak dapat terkondensasi, antara lain metana (CH₄), hidrogen (H₂), karbon dioksida (CO₂), dan karbon monoksida (CO). Gas yang dihasilkan dapat segera dimanfaatkan untuk keperluan pembakaran. Menurut Ridhuan dkk. (2019), material tersebut dapat dimanfaatkan untuk pemulihan energi atau diubah menjadi syngas melalui cara langsung. Peningkatan suhu memfasilitasi penyediaan energi tambahan yang diperlukan untuk penguraian komposisi rumit biomassa menjadi zat gas yang lebih ringan, seperti hidrogen, karbon monoksida, gas metana, dan lain-lain. Dalam konteks pirolisis, penggabungan katalis zeolit berfungsi untuk secara efektif menurunkan energi aktivasi yang diperlukan untuk memulai reaksi.

Analisis Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Kadar CH₄



Gambar 13. Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Kadar CH₄

Berdasarkan hasil analisa persentase gas CH₄ meningkat seiring dengan peningkatan temperatur pirolisis serta penambahan katalis. Pelepasan gas CH₄ disebabkan oleh terurainya komponen selulosa dan lignin (Ginting dkk, 2015). Katalis zeolit terbukti sangat efisien dalam meningkatkan rasio gas yang mudah terbakar karena karakteristik strukturalnya yang khas. Zeolit memiliki lubang yang cukup besar dan luas permukaan yang luas, memungkinkannya memisahkan molekul secara efektif berdasarkan ukuran molekul dan polaritasnya.

SIMPULAN

Produk bio-char mencapai hasil maksimum sebesar 55,75% ketika digunakan suhu 200°C, bersamaan dengan penambahan katalis 4%. Dalam kasus bio-oil, hasil optimal diamati pada suhu 400 °C, disertai dengan penambahan katalis 6%, sehingga menghasilkan hasil yang signifikan sebesar 23,55%. Dalam percobaan, diamati bahwa hasil syngas tertinggi dicapai ketika suhu diatur pada 400 °C dan konsentrasi katalis 6% dimasukkan. Secara spesifik, rendemen syngas mencapai 44,01%. Produk bio-char dengan kualitas

unggul dapat diperoleh dengan menggunakan proses pirolisis, yang melibatkan pemaparan biomassa pada suhu 400 °C dan memasukkan katalis pada konsentrasi 6%. Bio-char yang dihasilkan memiliki karakteristik yang diinginkan, antara lain kadar air 4%, kadar abu 9%, kandungan bahan mudah menguap 19,5%, kadar karbon tetap 67,5%, dan nilai kalor 5144.0605 kal/gr. Produk bio-oil dengan kualitas unggul dicapai melalui proses pirolisis, menggunakan suhu 400 °C dan konsentrasi katalis 6%. Produk-produk ini menunjukkan nilai pH 4,32, kepadatan 1,011 gr/mL, dan viskositas 5,94 cP. Namun, langkah pemrosesan tambahan diperlukan untuk lebih meningkatkan sifat-sifatnya. Teknik pemurnian dan distilasi mempunyai potensi untuk menghilangkan unsur asam yang tidak diinginkan dan meningkatkan karakteristik kualitas bahan bakar bio-oil. Produk syngas dengan kualitas optimal diperoleh pada proses pirolisis dengan temperatur 400 °C dengan penambahan katalis 6% menghasilkan kandungan CH₄ tertinggi yaitu sebesar 61,83%.

DAFTAR PUSTAKA

- Asmunandar, A., Goembira, F., Raharjo, S., & Yuliarningsih, R. (2022). *Evaluasi Pengaruh Temperatur dan Waktu Pirolisis Biochar Bambu Betung*. 8 (1), 4760–4771.
- Aziz, I., Tafdila, M. A., Nurbayti, S., Adhani, L., dan Permata, W. 2019. Upgrading Crude Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas menggunakan Katalis H-Zeolit. *Jurnal Kimia Valensi*. 5(1): 79-86
- Dihni, V. A. (2022). Sumatera Selatan Miliki Perkebunan Karet Terluas pada 2021. *Databoks*. [diakses pada 1 Juli 2023].
- Ginting, A. S., Tambunan, A. H., & Setiawan, R. P. A. (2015). Karakteristik Gas-Gas Hasil Pirolisis Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 25(2), 158–163.
- Hasmar, M. T. (2020). Pengaruh Temperatur Dan Waktu Pirolisis, Serta Tinggi Pelet Terhadap Pembuatan Bio-Oil Berbahan Baku Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Skripsi*. Universitas Sumatera Utara (USU). Medan
- Lingbeck, J. M., P. Cordero, C. A. O'Bryan, M. G. Johnson, S. C. Ricke, and P. G Crandall. 2014. *Functionality of liquid smoke as an all-natural antimicrobial in food preservation*. *Meat Science*. 97(2):197–206.
- Musyaffa, I. (2020). Pemanfaatan karet untuk bahan bakar bisa atasi kelebihan produksi. *Aa.Com*.
- Ridhuan, K., Irawan, D., & Inthifawzi, R. (2019). Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang dihasilkan. 8 (1), 69–78.
- Rosyadi, I., Wahyudi, H., Satria, D., Yusvardi, Y., (2018). Analisis Hasil Pyrolisis Pada Limbah Biomassa Tongkol Jagung Dengan Kayu Akasia. *Prosiding* 229–234.
- S. Herlambang, D. Yudhiantoro, M. Gomareuzzaman, and I. Lestari, BIOCHAR: Amandemen Tanah dan Mitigasi Lingkungan. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat UPN Veteran Yogyakarta, 2021.
- Wijayanti, W. (2021). Efek Zeolit untuk Produksi Tar dan Char pada Pirolisis Rotary Kiln. *Jurnal Rekayasa Mesin Universitas Brawijaya*, 12(1), 51–58.
- Wibowo, S., Efiyanti, L., & Pari, G. (2017). Karakterisasi Bio-Oil Tandan Kosong Kelapa Sawit Dengan Penambahan Katalis Ni/Nza Menggunakan Metode Free Fall Pyrolysis. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 35(2), 83–100.