

Pirolisis Tatal Kayu Karet sebagai Potensi Bahan Bakar Berdasarkan Analisis Temperatur dan Katalis Zeolit

Arini Susanti¹, Irawan Rusnadi², Agus Manggala³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Energi, Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang

e-mail: arinisusanti23@gmail.com

Abstrak

Potensi biomassa di Indonesia mencapai 43,3 GW, sementara kapasitas terpasangnya baru 1,9 GW. Jumlah produksi karet sepanjang tahun 2022 mencapai 3.135,3 ton. Limbah kulit kayu karet berupa tatal merupakan hasil samping dari pengambilan getah. Tatal kayu karet dapat diolah sebagai bahan baku proses pirolisis sehingga dapat menambah nilai ekonomi dan meminimalkan limbah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur dan jumlah katalis terhadap produk pirolisis. Berdasarkan analisis produk pirolisis diperoleh temperatur dan katalis mempengaruhi karakteristik produk yang dihasilkan. Pada *biochar*, semakin tinggi temperatur dan penambahan katalis zeolit, semakin baik karakteristik produk *biochar* yang dihasilkan. *Bio-oil* dan *syngas* yang dihasilkan meningkat ketika temperatur dan jumlah katalis zeolit meningkat. Rendemen tertinggi diperoleh pada temperatur 190°C dengan katalis 4% yaitu 60,33%. Pada *bio-oil* dan *syngas* rendemen tertinggi dihasilkan pada temperatur 390°C dengan katalis 6% masing-masing yaitu 18,35% dan 36,33%. Kualitas produk yang optimal diperoleh pada temperatur 390°C dengan katalis 6%.

Kata kunci: Energi Terbarukan; Katalis Zeolit; Pirolisis; Tatal Kayu Karet

Abstract

The biomass potential in Indonesia reaches 43,3 GW, while the installed capacity is only 1,9 GW. The amount of rubber production throughout 2022 reached 3.135,3 tons. Rubber bark waste in the form of scales is a by-product of sap collection. Rubber wood scat can be processed as raw material for the pyrolysis process so that it can add economic value and minimize waste. The purpose of this study was to determine the effect of temperature variation and the amount of catalyst on the pyrolysis products. Based on the analysis of the pyrolysis products obtained, it shows that temperature and catalyst affect the characteristics of the products produced. In biochar, the higher the temperature and the addition of catalyst, the better the characteristics of biochar products produced. Bio-oil and syngas produced increased when the temperature and the amount of zeolite catalyst increased. The highest yield was obtained at 190°C with 4% catalyst, which was 60,33%. In bio-oil and syngas, the highest yield was produced at 390°C with 6% catalyst 18,35% and 36,33%, respectively. Optimal product quality was obtained at 390°C with 6% catalyst.

Keywords : Renewable Energy; Zeolite Catalyst; Pyrolysis; Rubber Wood

PENDAHULUAN

Meningkatnya populasi manusia dan laju industrialisasi di berbagai negara khususnya Indonesia menyebabkan tingginya pemakaian kebutuhan energi terutama bahan bakar fosil. Pencarian energi alternatif merupakan salah satu cara untuk mengurangi jumlah kebutuhan energi masyarakat dalam menggunakan bahan bakar fosil. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mengungkapkan bahwa, Indonesia memiliki potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) yaitu berkisar 3.000 GW. Cadangan bahan bakar fosil yang semakin menipis dan

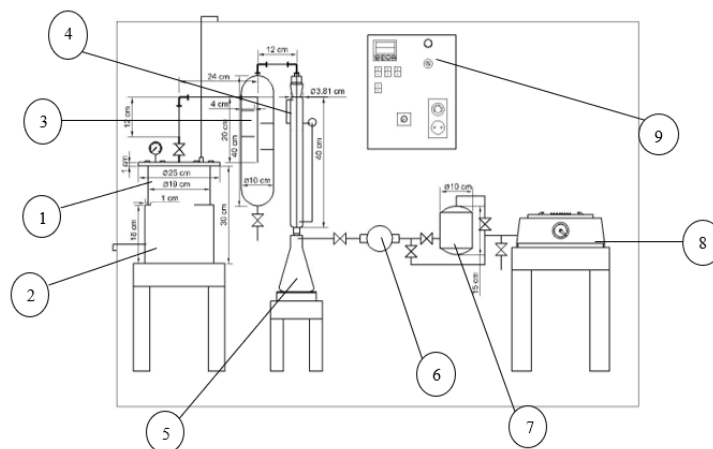
pemanfaatan sumber energi baru dan terbarukan yang belum optimal, mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui salah satunya yaitu pemanfaatan limbah biomassa. Energi biomassa dapat dijadikan sumber energi alternatif pengganti bahan bakar minyak bumi karena sifatnya dapat diperbaharui (Rumiyanti et al, 2018). Berbagai macam jenis biomassa dapat diperoleh salah satunya yaitu dari limbah pertanian.

Proses penyadapan kayu karet dapat menghasilkan limbah kayu karet. Badan Pusat Statistik melaporkan bahwa berdasarkan data dari Kementerian Pertanian (Direktorat Jenderal Perkebunan), jumlah produksi karet sepanjang tahun 2022 mencapai 3.135,3 ton (Badan Pusat Statistik, 2023). Tatal merupakan serpih-serpih kayu yang ditarah (diketam) atau sampah yang tipis-tipis (KBBI, 2016). Tatal kayu karet merupakan lapisan luar kayu yang terbuang saat proses pengambilan karet. Limbah produksi karet ini biasanya tidak dimanfaatkan dan akan menumpuk karena tidak dapat didaur ulang. Tatal kayu karet dapat diolah sebagai bahan baku proses pirolisis sehingga dapat menambah nilai ekonomi dan meminimalkan limbah. Pirolisis merupakan salah satu metode konversi yang dapat digunakan untuk memanfaatkan tatal kayu karet.

Proses pirolisis dapat mengubah biomassa menjadi produk cair, padat, dan gas tanpa kehadiran oksigen dalam sebuah reaktor. Pemanfaatan limbah kulit kayu karet berupa tatal dengan menggunakan metode *thermal cracking* merupakan bentuk modifikasi pemanfaatan sumber biomassa sebagai sumber daya alternatif pengganti bahan bakar fosil. Dalam kajian proses pirolisis terhadap biomassa ada beberapa parameter yang mempengaruhi diantaranya yaitu komposisi dan *pre-treatment* biomassa, temperatur, waktu tinggal, jenis pirolisis (Novita et al, 2021), dan katalis (Yanti et al, 2015). Penelitian telah banyak dilakukan untuk mengukur beberapa pengaruh tersebut, namun penelitian yang melakukan dengan bahan baku berupa tatal kayu karet masih sedikit. Oleh karena itu, untuk memperkuat dan membuktikan adanya pengaruh dari beberapa faktor tersebut dilakukan penelitian pengaruh dari beberapa faktor tersebut yaitu pengaruh temperatur dan jumlah katalis terhadap kualitas dan kuantitas produk dari proses pirolisis dengan bahan baku tatal kayu karet. Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk menentukan temperatur dan jumlah katalis yang paling cocok untuk diproses menjadi produk berupa produk cair (*bio-oil*), padat (*biochar*), dan gas (*syngas*) berdasarkan temperatur dan jumlah katalis.

METODE

Penelitian dilakukan pada bulan April hingga Juli 2023 di Laboratorium Teknik Energi Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang. Bahan baku pada penelitian ini yaitu tatal kayu karet dan katalis zeolit alam. Peralatan yang digunakan terdiri dari seperangkat alat pirolisis, pH meter, viscometer brookfield, piknometer, neraca analitik gas analyzer MRU Nova Plus.



Gambar 1 Alat Pirolisis

Keterangan:

1. Reaktor Pirolisis
2. *Band Heater*
3. Separator
4. Kondensor
5. Tempat Penampungan kondensat
6. Pompa Vakum
7. Tempat penampungan *uncondensable gas*
8. Kompor Biomassa
9. Kontrol Panel

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah variabel terikat dan variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini yaitu jenis katalis, bahan baku, dan jumlah bahan baku. Sedangkan variabel bebas yaitu temperatur dan jumlah katalis. Perlakuan terhadap temperatur dan jumlah katalis dilakukan dengan masing-masing lima tingkat percobaan dengan rentang temperatur 190°C - 390°C dan jumlah katalis 4% dan 6%.

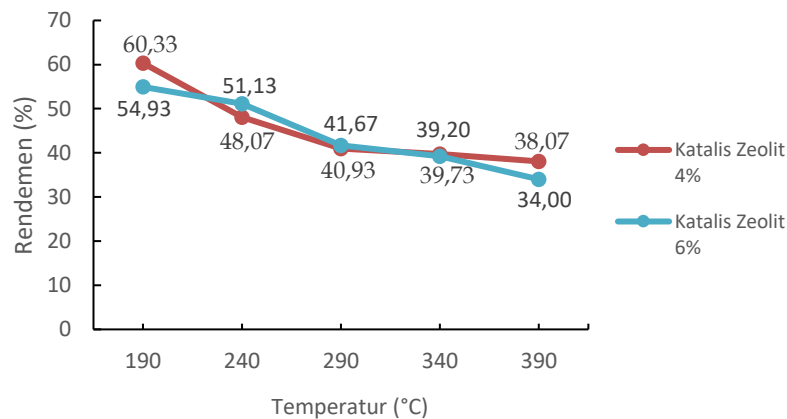
Pertama-tama menyiapkan bahan baku yang digunakan. Selanjutnya membersihkan kotoran yang terdapat pada bahan baku. Kemudian mengecilkan ukuran bahan hingga berukuran ± 1 cm menggunakan crusher. Lalu mengayak bahan baku menggunakan ayakan berukuran ± 1 cm. Selanjutnya menimbang bahan untuk sampel yang akan digunakan. Lalu mengeringkan bahan baku di dalam oven dengan temperatur 120°C selama 2 jam. Kemudian dianalisis kadar airnya.

Tatal kayu karet yang sudah dilakukan proses *pre-treatment* dan katalis yang telah dikecilkan ukuran dengan cara diayak hingga berukuran 60 mesh dimasukkan ke dalam reaktor lalu reaktor ditutup. Selanjutnya menghidupkan kondensor dan pompa vakum. Kemudian mengatur temperatur pada kontrol panel dengan variasi pertama yaitu 190°C. Lalu menyalakan reaktor. Selanjutnya menunggu variasi temperatur yang diinginkan tercapai. Apabila temperatur telah tercapai, menghidupkan stopwatch selama 30 menit. Reaktor dihentikan apabila telah mencapai waktu 30 menit. Kemudian mengambil produk pirolisis. Proses pirolisis dilakukan berulang dengan variasi temperatur dan katalis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit Terhadap Rendemen *Biochar*

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolit terhadap rendemen *biochar* dapat dilihat pada gambar 2.

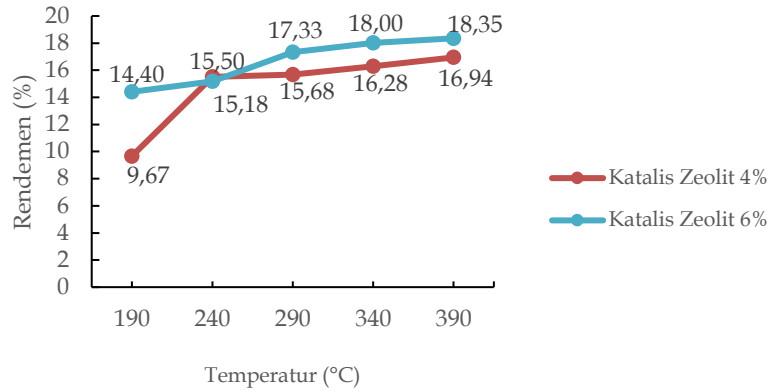


Gambar 2 Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Terhadap Rendemen *Biochar*

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pirolisis maka semakin rendah persentase *biochar* yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan pada temperatur 190°C bahan baku berupa tatal kayu karet belum terdekomposisi secara sempurna sehingga menyebabkan tingginya produk *biochar*. Berdasarkan hasil studi hubungan antara temperatur dan jumlah katalis terhadap *biochar* yang telah diteliti, semakin tinggi temperatur pirolisis maka *biochar* semakin sedikit. Selain itu, penggunaan katalis dapat mengurangi jumlah *biochar* (Jamilatun et al, 2020).

Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit Terhadap Rendemen *Bio-oil*

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolit terhadap rendemen *bio-oil* dapat dilihat pada gambar 3.

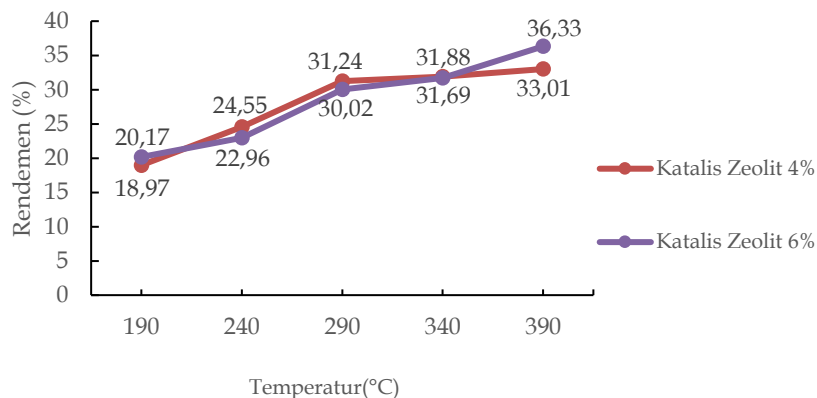


Gambar 3 Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit Terhadap Rendemen Bio-oil

Pada gambar 3 diketahui bahwa semakin tinggi temperatur dan semakin banyak jumlah katalis maka rendemen *bio-oil* yang dihasilkan akan semakin meningkat. Sesuai dengan persamaan Arrhenius, semakin tinggi temperatur maka nilai konstanta dekomposisi termal semakin besar akibatnya laju pirolisis bertambah dan konversi akan meningkat (Arita et al, 2015). Begitupula dengan penambahan jumlah katalis zeolit pada proses pirolisis menyebabkan produk *bio-oil* yang dihasilkan meningkat. Banyaknya produk yang dihasilkan dari perengkahan katalitik dipengaruhi oleh keaktifan dari katalis yang digunakan. Semakin banyak katalis yang digunakan, maka semakin banyak situs aktif yang tersedia untuk reaksi perengkahan (Aziz et al, 2019).

Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit Terhadap Rendemen Syngas

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolite terhadap rendemen syngas dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4 Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit Terhadap Rendemen Syngas

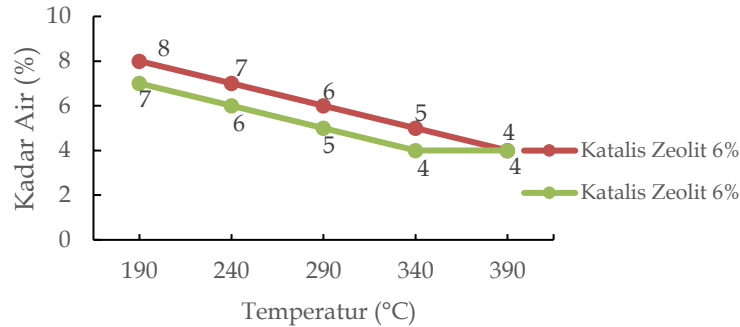
Gambar 4 menunjukkan bahwa rendemen syngas akan meningkat seiring meningkatnya temperatur dan jumlah katalis. Semakin tinggi temperatur pada proses pirolisis maka hasil dari produk cairan akan semakin rendah dan disertai dengan tingginya hasil produk gas, hal tersebut adanya proses *secondary cracking* yang memecah rantai panjang senyawa organik dan hidrokarbon menjadi rantai yang lebih pendek sehingga tidak dapat

dikondensasikan kembali. Dengan menambahkan campuran katalis zeolit alam maka hasil produk gas mengalami peningkatan yang cukup signifikan.

Analisis Karakteristik *Biochar*

Kadar Air

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolit terhadap kadar air *biochar* dapat dilihat pada gambar 5.

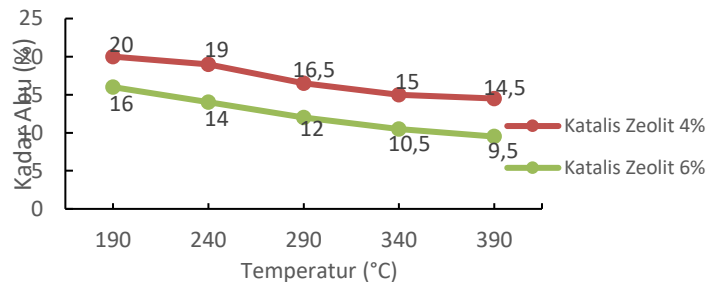


Gambar 5 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Kadar *Biochar*

Pada gambar 5 *biochar* dengan temperatur rendah memiliki kadar air yang tinggi sedangkan *biochar* dengan temperatur tinggi memiliki kadar air yang kecil. Nilai kadar air suatu bahan biasanya berbanding terbalik nilai kalornya, sehingga nilai kalor biasanya akan meningkat seiring dengan penurunan kadar air bahan. Kadar air *biochar* juga dipengaruhi jenis biomassa, Hal ini dikarenakan pada setiap jenis biomassa memiliki kadar selulosa dan hemiselulosa yang berbeda yang nantinya akan terdekomposisi menjadi uap setelah melalui proses pirolisis. Meningkatnya total luas permukaan dan volume pori-pori pada struktur *biochar* tatal kayu karet disebabkan oleh semakin lamanya waktu pirolisis dilakukan.

Kadar Abu

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolit terhadap kadar abu *biochar* dapat dilihat pada gambar 6.

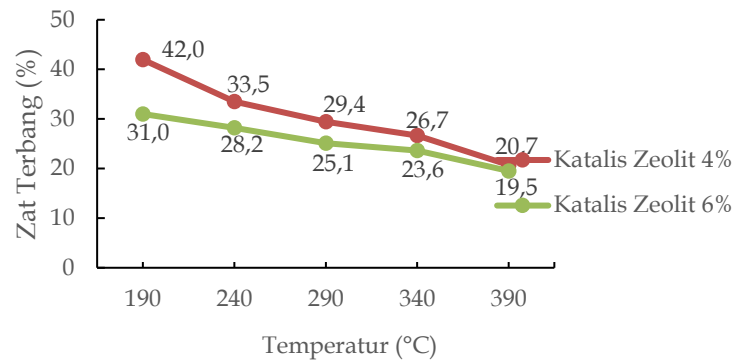


Gambar 6 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Kadar Abu *Biochar*

Pada gambar 6 kadar abu akan meningkat seiring dengan naiknya temperatur maka kadar abu *biochar* mengalami kenaikan. Seiring bertambahnya temperatur dan waktu pirolisis maka terjadi pengurangan kandungan unsur lain selama pirolisis. Unsur C, H, N, O, dan S teruapkan selama pemanasan sementara garam anorganik (mineral) tidak sepenuhnya diuapkan, sehingga konsentrasi residu mineral dan bahan organik meningkat. Oleh karena itu, maka kadar abu akan semakin meningkat seiring menurunnya unsur yang hilang (N. Claoston et al, 2014). Kadar abu yang tinggi dapat menurunkan nilai kalori *biochar*. Penggunaan katalis zeolit pada penelitian ini menunjukkan bahwa kadar abu pada katalis 6% lebih sedikit dibandingkan dengan katalis 4%. Hal ini dikarenakan katalis zeolit efektif dapat mengurangi kandungan abu dalam *biochar* karena abu yang terbentuk selama proses pirolisis berinteraksi dengan zeolit dan terperangkap di dalam struktur pori zeolit.

Kadar Zat Terbang

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolit terhadap zat terbang *biochar* dapat dilihat pada gambar 7.

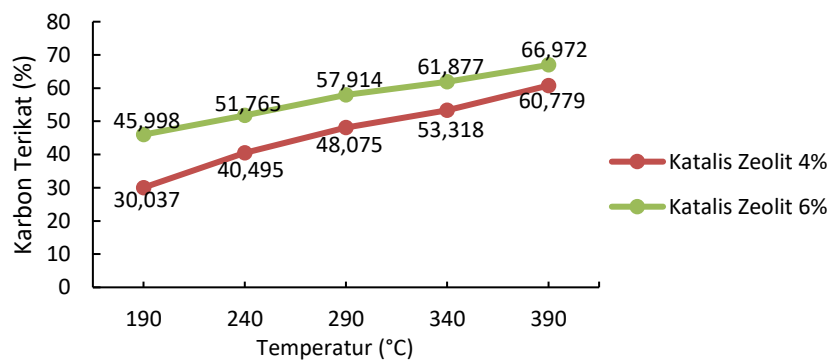


Gambar 7 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Zat Terbang Biochar

Pada gambar 7 menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur maka kadar zat terbang akan semakin menurun. Semakin besar temperatur dan waktu pirolisis maka semakin banyak zat menguap yang terbang, sehingga pada saat pengujian akan didapat kadar zat terbang yang rendah. Kadar zeolit alam dapat mempengaruhi jumlah zat terbang yang dihasilkan dari proses pirolisis *biochar*. Penggunaan katalis ini dapat membantu mengurangi zat terbang sehingga meningkatkan stabilitas dan kualitas *biochar* yang dihasilkan. Selain itu, katalis zeolit juga dapat berperan dalam meningkatkan efisiensi proses pirolisis secara keseluruhan. Semakin banyak persentase penambahan zeolit yang digunakan, maka pemerataan panas menuju biomassa semakin merata. Akibatnya, semakin banyak biomassa yang akan terdekomposisi menjadi gas yang menyebabkan berkurangnya volume biomassa (Wijayanti, 2021).

Karbon Terikat

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolit terhadap karbon terikat *biochar* dapat dilihat pada gambar 8.

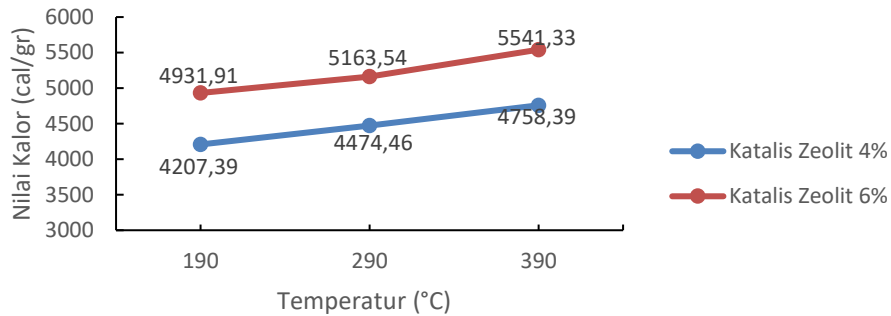


Gambar 8 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Karbon Terikat Biochar

Nilai karbon terikat (Fixed Carbon) dipengaruhi oleh kadar air, kadar abu, dan zat terbang. Data hasil analisis menunjukkan bahwa nilai karbon terikat semakin naik, dimana dengan menggunakan jumlah katalis 6% memiliki karbon terikat yang lebih tinggi dibandingkan katalis 4%. Namun, nilai karbon terikat dari kedua *biochar* termasuk tinggi. Penggunaan jumlah katalis zeolit yang sesuai dapat meningkatkan kualitas *biochar* dengan meningkatkan pembentukan karbonisasi dan mengurangi pembentukan produk samping yang mengandung oksigen. Nilai karbon terikat yang tinggi menunjukkan kualitas *biochar*. Semakin tinggi karbon terikat maka *biochar* semakin baik.

Nilai Kalor

Pengaruh temperatur dan jumlah katalis zeolit terhadap nilai kalor *biochar* dapat dilihat pada gambar 9.

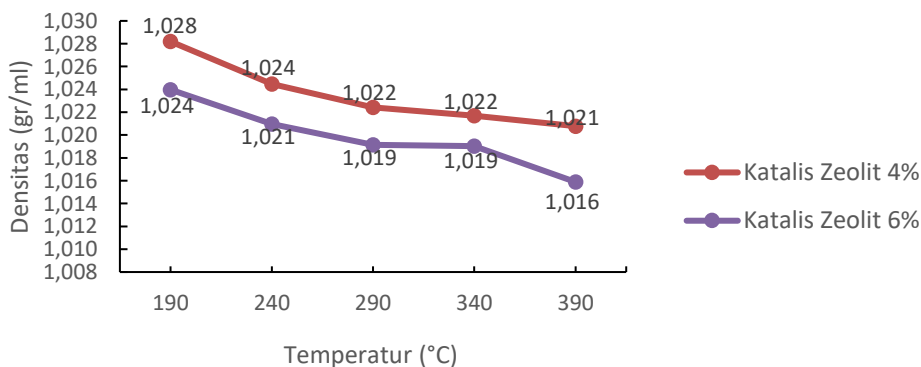


Gambar 9 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Nilai Kalor *Biochar*

Nilai kalor dipengaruhi oleh kadar air dan kadar abu. Semakin rendah kadar air dan kadar abu maka semakin tinggi nilai kalor. Nilai kalor yang dihasilkan pada penelitian ini akan semakin meningkat seiring penambahan temperatur dan katalis zeolit. Hal ini dikarenakan semakin tinggi pemanasan, maka semakin banyak *biochar* yang terbentuk. Semakin banyak jumlah katalis yang digunakan dalam proses pirolisis maka dapat meningkatkan reaksi dekomposisi atau pemutusan ikatan kimia pada biomassa yang mengakibatkan semakin banyak hidrokarbon rantai panjang yang terpecah menjadi hidrokarbon rantai pendek sehingga semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Nilai kalor yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dikelompokkan pada kelas batubara subbituminous yaitu berada pada rentang 4.169,455 – 5.559,273 cal/gr (Speight, 2005).

Analisis Karakteristik *Bio-oil*

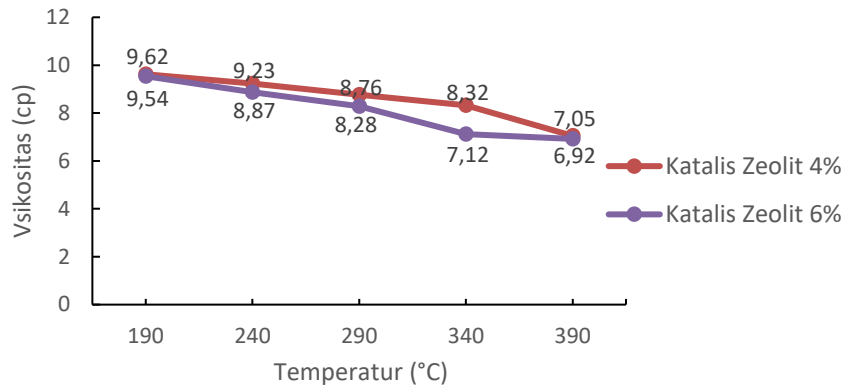
Beberapa analisis yang dilakukan berupa uji rendemen *bio-oil* seperti analisis densitas, penentuan pH, dan viskositas. Hasil analisis karakteristik *bio-oil* berupa analisis densitas, pH, dan viskositas dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 10 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Densitas *Bio-oil*

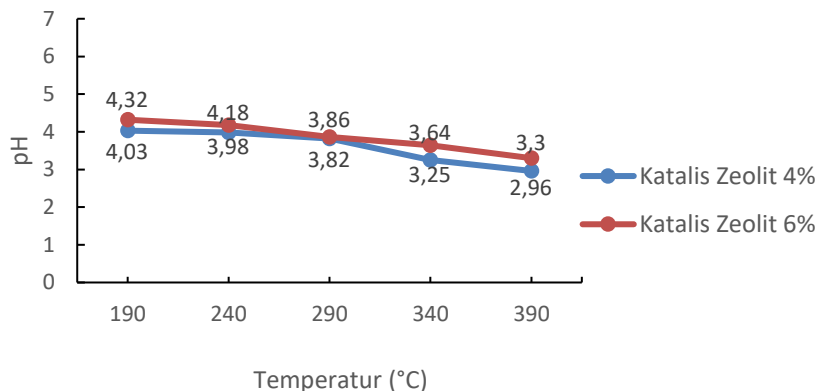
Pada gambar 10 dapat diketahui bahwa densitas terendah berada pada jumlah katalis 6% dengan temperatur 390°C. Peningkatan temperatur dan jumlah katalis menyebabkan densitas menurun. Semakin kecil densitas *bio-oil* maka semakin baik digunakan sebagai bahan bakar karena semakin ringan dan mendekati *range* diesel oil yaitu 0,81 – 0,89 gr/ml. Densitas yang tinggi dapat menyebabkan *bio-oil* akan memiliki bobot jenis yang lebih besar dibandingkan *fuel oil* pada volume yang sama. Semakin tinggi temperatur yang digunakan maka hidrokarbon ringan yang dihasilkan akan semakin banyak dan akan menyebabkan

semakin banyak senyawa-senyawa yang terembunkan menjadi *bio-oil* dan mempengaruhi densitasnya. Selain itu, dengan penambahan katalis senyawa dengan berat molekul yang tinggi dapat terpecah menjadi menjadi senyawa dengan berat molekul yang rendah. Oleh karena itu, densitas yang dihasilkan menurun meski tidak signifikan (Wibowo et al, 2017).



Gambar 11 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Viskositas *Bio-oil*

Gambar 11 menunjukkan pengaruh temperatur dan katalis terhadap viskositas *bio-oil*. Pengukuran viskositas *bio-oil* bertujuan untuk mengetahui nilai dari kekentalan suatu zat cair, semakin tinggi nilai viskositas zat cair, maka aliran akan semakin lambat. Nilai viskositas berbanding lurus dengan densitas. Semakin tinggi nilai densitas, maka nilai viskositasnya semakin besar. Tingginya nilai viskositas *bio-oil* dapat menyebabkan bahan bakar sulit mengalir pada proses pendistribusiannya. Kekentalan *bio-oil* disebabkan oleh struktur kimia yang dihasilkan dari penyusun biomassa tatal kayu karet pada proses pirolisis, Semakin panjang ikatan dari struktur kimia penyusunnya maka viskositas akan semakin besar pula. Pada penambahan katalis terjadi penurunan viskositas, hal ini diakibatkan katalis memecah kembali senyawa dengan berat molekul tinggi menjadi senyawa hidrokarbon alkena yang mempunyai berat molekul rendah (Wibowo et al, 2017).



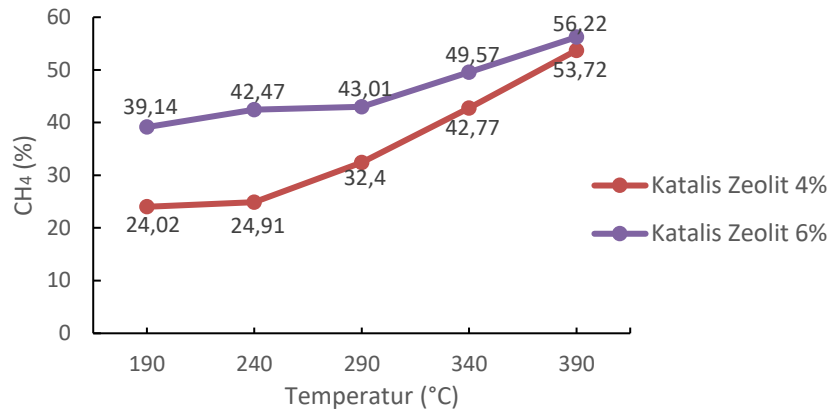
Gambar 12 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap pH *Bio-oil*

Gambar 12 menunjukkan pengaruh temperatur dan katalis terhadap pH *bio-oil*. Angka keasaman atau pH sangat mempengaruhi kualitas dari produk *bio-oil* yang dihasilkan, dimana semakin tinggi tingkat keasaman *bio-oil* maka akan semakin sulit dalam proses penyimpanannya karena dapat menyebabkan korosi tempat penyimpanan yang umumnya terbuat dari *stainless steel*. Oleh karena itu, semakin rendah angka keasaman maka kualitas dari *bio-oil* yang diperoleh semakin baik. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa pH semakin menurun atau semakin asam seiring kenaikan temperatur. Tingginya nilai pH pada *bio-oil* terjadi karena adanya unsur-unsur yang terkandung dalam tatal

kayu karet yang terurai akan membentuk senyawa-senyawa asam, Pada penambahan jumlah katalis terdapat kecenderungan menurunkan pH *bio-oil*. Keasaman yang tinggi disebabkan adanya asam asetat dan asam lainnya akibat proses pirolisis yang memecah selulosa dan zat ekstraktif yang bersifat asam (Wibowo et al, 2017).

Analisis Komposisi Syngas

Analisis karakteristik *syngas* dapat dilihat pada gambar 13 dibawah ini.



Gambar 13 Pengaruh Temperatur dan Katalis Terhadap Komposisi CH₄ Syngas

Gambar 13 menunjukkan bahwa persentase *syngas* CH₄ meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pirolisis serta penambahan katalis. Pelepasan *syngas* CH₄ disebabkan oleh terurainya komponen selulosa dan lignin. Sedangkan pada penguraian komponen hemiselulosa menghasilkan gas CO (Ginting et al, 2015). Penggunaan katalis zeolit lebih efektif dalam meningkatkan rasio *combustible gas*, hal ini dikarenakan zeolit mempunyai pori-pori yang besar dengan permukaan yang luas, sehingga mampu memisahkan molekul zat berdasarkan ukuran molekul dan kepolarannya.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, temperatur dan jumlah katalis zeolit berpengaruh pada produk pirolisis. Pada *biochar* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur dan penambahan katalis. Rendemen pada *bio-oil* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya temperatur dan penambahan katalis. Sedangkan, untuk *syngas* juga terjadi peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur dan penambahan katalis. Rendemen tertinggi diperoleh pada temperatur 190°C dengan katalis 4% yaitu 60,33%. Pada *bio-oil* dan *syngas* rendemen tertinggi dihasilkan pada temperatur 390°C dengan katalis 6% masing-masing yaitu 18,35% dan 36,33%. Kualitas produk yang optimal diperoleh pada temperatur 390°C dengan katalis 6% .

DAFTAR PUSTAKA

- Arita, Susila, Abrar Assalami, dan Dina Irawaty Naibaho. 2015. Proses Pembuatan Bahan Bakar Cair dengan Memnafaatkan Limbah Ban Bekas menggunakan Katalis Zeolit. *Jurnal Teknik Kimia* No. 2, Vol. 21. Prabumulih.
- 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.
- Badan Pustak Statistik, 2023. "Produksi Karet Indonesia". Bps.go.id. Diakses 28 Februari 2023, 20.11.

- 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.
- KBBI, 2016. Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI). kbbi.web.id. Diakses 22 Februari 2023, 14.44.
- Jamilatun, Siti., Mufandi, Ilham., Budiman, Arief., dan Suhendra. 2020. Biochar from Slow Catalytic Pyrolysis of *Spirulina platensis* Residue: Effects of Temperature and Silica-Alumina Catalyst on Yield and Characteristics. *Jurnal Teknik Kimia*. Vol.14 No.2:137-147.
- N. Claoston, A. W. Samsuri, M. H. Ahmad Husni, and M. S. Mohd Amran, "Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars," *Waste Manag. Res.*, vol. 32, no. 4, pp. 331–339, 2014.
- Novita, Sri Aulia, et al. (2021). *Membangun Sinergi antar Perguruan Tinggi Industri Pertanian dalam Rangka Implementasi Merdeka Belajar Kampus Merdeka*. Seminar Nasional dalam Rangka Dies Natalis ke-45 UNS Tahun 2021, 5(1): 365-376.
- Rumiyanti, L., Irnanda, A., & Hendronursito, Y. (2018). Analisis Proksimat Pada Briket Arang Limbah Pertanian. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 3(1), 15-22.
- Speight, J. G. (2005). *HANDBOOK OF COAL ANALYSIS* (J. D. Wine). John Wiley & Sons, Inc.
- 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.
- Wijayanti, W. (2021). Efek Zeolit untuk Produksi Tar dan Char pada Pirolisis Rotary Kiln. *Jurnal Rekayasa Mesin Universitas Brawijaya*, 12(1), 51–58.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.01.6>.
- Yanti, Sari Rahma, dkk. (2015). *Pirolisis Kayu Akasia (Acacia Mangium) menjadi Bio-oil Menggunakan Katalis Ni/NZA dengan Variasi Pengembangan Logam dan Rasio Katalis*. 2(1): 1-6.