



Efektivitas Katalis Zeolit Alam Ende pada Pirolisis Polietilena dari Sampah Plastik

Effectiveness of Ende Natural Zeolite Catalyst on the Pyrolysis of Polyethylene from Plastic Waste

Gregorio Antonny Bani

Universitas Aryasatya Deo Muri, Jl. Perintis Kemerdekaan 1, No.09. Kupang, 85111, Inodonesia

Email: support@aryasatya.ac.id; greg.antonny@yahoo.com

Article history:

Diterima : 11 April 2023
Direvisi : 29 Juni 2023
Disetujui : 22 Juli 2023
Mulai online : 28 September 2023

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Gregorio Antonny Bani. (2023). Efektivitas Katalis Zeolit Alam Ende pada Pirolisis Polietilena dari Sampah Plastik. Jurnal Teknik Kimia USU, 12(2), 70-77.

ABSTRAK

Tingginya jumlah sampah plastik di tempat pembuangan sampah akan mencemari lingkungan. Pembakaran langsung menghasilkan polutan ke udara dan daur ulang hanya dapat dilakukan pada jumlah sedikit. Salah satu metode untuk mengatasi masalah tersebut adalah pirolisis, namun pirolisis membutuhkan katalis seperti zeolit untuk mempercepat laju reaksi, menurunkan energi aktivasi, dan memperbaiki sifat dasar cairan hasil pirolisis. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi zeolit alam Ende yang diaktivasi dan mengetahui pengaruh katalis dari zeolit alam aktif Ende terhadap energi aktivasi serta kualitas cairan hasil pirolisis tersebut. Berdasarkan hasil penelitian, proses aktivasi dapat mengubah derajat kristalinitas menjadi 36,63%, luas permukaan menjadi 74,57 m²/g, jejari rata-rata menjadi 20,21 Å, volume pori menjadi 72,34 cm³/g, dan jumlah situs asam menjadi 4,342 NH₃/g zeolit. Katalis zeolit alam aktif Ende pada proses pirolisis polietilena dari sampah plastik mampu menurunkan energi aktivasi hingga 4.371,1 kal/mol pada perlakuan komposisi katalis 0,10% dari 1 kg plastik. Peningkatan suhu dan katalis menjadikan kualitas minyak pirolisis semakin baik, namun komposisi perbandingan katalis adalah 0,10% dari 1 kg plastik.

Kata kunci: zeolit, pirolisis, katalis, plastik, polietilena

ABSTRACT

The high amount of plastic waste in landfills will pollute the environment. Direct combustion releases pollutants into the air, and recycling is only possible in small quantities. One method to overcome this problem is pyrolysis. However, pyrolysis requires a catalyst such as zeolite to accelerate the reaction rate, lower the activation energy, and improve the basic properties of the pyrolysis liquid. This study aims to characterize the activated natural zeolite Ende and determine the effect of the catalyst from the activated natural Ende zeolite on the activation energy, as well as the quality of the liquid resulting from the pyrolysis. Based on the research results, the activation process could change the degree of crystallinity became 36.63%, the surface area became 74.57 m²/g, the average radius became 20.21 Å, the pore volume became 72.34 cm³/g, and the number of acid sites became 4.342 NH₃/g zeolite. Ende's active natural zeolite catalyst in the polyethylene pyrolysis process from plastic waste reduced the activation energy to 4,371.1 cal/mol in treating 0.10% catalyst composition from 1 kg of plastic. Increasing the temperature and catalyst improves the quality of pyrolysis oil, but the composition of the catalyst ratio is 0.10% of 1 kg of plastic.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v12i2.11822>

Keywords: zeolites, pyrolysis, catalysts, plastic, polyethylene

1. Pendahuluan

Dalam perkembangan aktivitas kehidupan manusia modern, plastik merupakan salah satu material murah dan tahan lama yang paling banyak digunakan sebagai wadah, kemasan, dan berbagai macam peralatan lainnya [1]. Tingginya kuantitas penggunaan plastik tersebut akan menjadikan jumlah sampah plastik yang dihasilkan pun meningkat dan akhirnya menumpuk di Tempat Pembuangan Sampah (TPS) [2]. Hal tersebut terjadi karena sampah plastik merupakan material yang sangat sulit diuraikan di dalam tanah dan akan mencemari lingkungan [3]. Metode penanganan sampah plastik yang paling umum adalah dengan cara pembakaran langsung [4]. Pembakaran langsung merupakan metode tercepat untuk menurunkan kuantitas sampah plastik di TPS, tetapi metode tersebut menghasilkan polutan yang mengandung karbon monoksida, karbon dioksida, nitrogen oksida, dan sulfur oksida ke udara [6, 7]. Pengembangan metode selanjutnya adalah dengan melakukan daur ulang, tetapi juga hanya mampu diterapkan pada sampah dengan kualitas tertentu dengan jumlah yang masih tergolong sedikit [7].

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengatasi penumpukan sampah plastik dalam jumlah besar tanpa menghasilkan polutan ke udara adalah dengan menggunakan pirolisis karena asap hasil pirolisis dari plastik langsung terkondensasi dan berubah menjadi hidrokarbon cair [7, 8]. Namun, proses pirolisis membutuhkan energi yang cukup besar untuk menghasilkan panas yang tinggi di dalam reaktor dan kuantitas cairan yang dihasilkan masih sedikit dengan kualitas rendah [9, 10]. Oleh karena itu, katalis merupakan solusi yang dapat digunakan untuk mengatasi persoalan tersebut karena dapat mempercepat laju reaksi, menurunkan energi aktivasi, dan memperbaiki sifat dasar cairan hasil pirolisis [12]. Penggunaan katalis yang paling umum adalah zeolit [13]. Namun, zeolit yang paling sering digunakan adalah jenis sintesis dengan harga masih tergolong mahal [14]. Zeolit alam dapat dijadikan alternatif untuk menggantikan katalis sintesis walaupun zeolit di alam umumnya memiliki kualitas rendah dengan karakteristik fisika dan kimia yang variatif, sehingga zeolit alam perlu diaktivasi terlebih dahulu agar dapat digunakan sebagai katalis [14, 15].

Zeolit alam dapat ditemukan di berbagai daerah di Indonesia dan salah satu daerah yang memiliki potensi cadangan mineral zeolit alam adalah Pulau Flores, Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT), dengan jumlah deposit zeolit terbanyak berada di Kabupaten Ende [16, 17]. Penelitian tentang aktivitas katalitik zeolit alam yang diaktivasi oleh larutan asam dan basa dari berbagai daerah telah banyak dilakukan sebelumnya, tetapi hanya terkonsentrasi pada jenis zeolit alam yang sudah dikenal sebelumnya untuk dijadikan katalis, adsorben, pupuk, dan bahan pembenah tanah [18, 19]. Penelitian mengenai zeolit alam Ende juga telah dilakukan sebelumnya, namun lebih difokuskan pada kemampuannya dalam menyerap dan menyaring molekul tertentu [21, 22]. Diketahui juga bahwa penelitian mengenai potensi zeolit alam Ende sebagai katalis dalam reaksi transformasi senyawa gula menjadi 5-hidroksimetilfulfural telah dilakukan sebelumnya [23]. Aktivitas katalitik zeolit alam juga sangat bergantung pada sifat dasar bahan yang direaksikan [23, 24]. Oleh karena itu, penelitian tentang penggunaan zeolit alam Ende sebagai katalis dalam pirolisis sampah plastik perlu dilakukan juga. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkarakterisasi zeolit alam Ende yang diaktivasi dan mengetahui pengaruh katalis dari zeolit alam aktif Ende terhadap energi aktivasi pirolisis polietilena serta kualitas cairan hasil pirolisis tersebut.

2. Metode

Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah zeolit alam Ende, *aquadest*, asam fluorida (HF), asam klorida (HCl) 6 N, amonium klorida (NH₄Cl) 0,1 M, gas nitrogen (N₂), amonia (NH₃), piridin (C₅H₅N), dan polietilena dari sampah plastik. Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah peralatan gelas, oven, ayakan 100 mesh, pH meter, neraca analitik, reaktor pirolisis, *stopwatch*, *thermocouple*, viskometer, piknometer, *X-Ray Diffractometer* (XRD) Shimadzu-6000, *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy* (GC-MS) Shimadzu QP-2010s, *Scanning Electron Microscope* (SEM) JEOL JSM-6360 LA, dan *Gas Sorption Analyzer* NOVA 1200e.

Prosedur Kerja

Preparasi Zeolit Alam Ende

Sampel zeolit alam Ende digiling dan diayak dengan pengayak ukuran 100 mesh, lalu hasil ayakan zeolit alam Ende tersebut dibersihkan dengan menggunakan *aquadest* dan dikeringkan dalam oven pada suhu 200 °C selama 2 jam. Sampel kemudian dikarakterisasi meliputi kristalinitas, morfologi, luas permukaan, ukuran pori, jari-jari pori, dan keasamannya.

Aktivasi Zeolit Alam Ende

Zeolit alam Ende (sampel) direndam dengan larutan asam fluorida (HF) 1% dengan rasio 1:2 (b/v) selama 10 menit, lalu kembali dibersihkan dengan *aquadest*. Setelah itu, sampel direndam dengan larutan asam klorida (HCl) 6 N sambil dipanaskan dengan suhu 90 °C selama 30 menit, lalu kemudian didiamkan selama 12 jam. Sampel dibersihkan lagi dengan *aquadest*, lalu kembali dikeringkan dalam oven pada suhu 130 °C selama 1 jam. Sampel direndam lagi dengan larutan amonium klorida (NH₄Cl) 0,1 M dengan rasio 1:2 (b/v) pada suhu 90 °C selama 3 jam per hari selama satu minggu, lalu dikeringkan lagi dalam oven dengan suhu 500 °C selama 4 jam, kemudian dikalsinasi pada suhu 500 °C selama 4 jam sambil dialiri gas nitrogen (N₂). Sampel kembali dikarakterisasi meliputi kristalinitas, morfologi, luas permukaan, ukuran pori, jari-jari pori, dan keasamannya.

Preparasi Sampel Plastik

Plastik merupakan plastik yang memiliki lambang kode PE (Polietilena), kemudian dipotong menjadi ukuran ±1 cm² sebanyak 1 kg untuk setiap perlakuan.

Pirolisis Polietilena

Setiap perlakuan menggunakan 2 faktor. Faktor pertama adalah suhu (T) yang terdiri dari 4 taraf, yaitu T₁ (300 °C), T₂ (350 °C), T₃ (400 °C), dan T₄ (450 °C). Faktor kedua adalah perbandingan katalis dan plastik (K) dengan 4 taraf, yaitu K₀ (tanpa katalis), K₁ (0,05:1), K₂ (0,10:1), dan K₃ (0,15:1). Plastik polietilena yang sudah disipakan, dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 1 kg, lalu proses pirolisis dijalankan pada temperatur 300 °C (T₁) tanpa katalis (K₀) sambil menyalakan *stopwatch*. Waktu yang dicatat sebagai waktu awal proses perengkahan ketika minyak diteteskan pertama kali. Penampung minyak diganti pada setiap interval waktu per 10 menit dan volume minyaknya diukur. Proses pirolisis dihentikan saat minyak tidak lagi menetes, lalu waktunya dicatat sebagai akhir proses perengkahan. Proses yang sama kembali diulangi dengan perlakuan suhu T₂, T₃, dan T₄. Minyak hasil pirolisis dianalisis meliputi viskositas, densitas, dan komponen senyawa penyusunnya. Semua prosedur perlakuan suhu kembali diulangi lagi dengan menggunakan katalis zeolit alam aktif Ende dengan perbandingan komposisi katalis dan umpan K₁, K₂, dan K₃. Minyak hasil pirolisis dengan katalis dianalisis lagi meliputi viskositas, densitas, dan komponen senyawa penyusunnya.

Analisis Data

Karakterisasi Zeolit

Karakterisasi zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi akan dikarakterisasi dengan meliputi kristalinitas, morfologi, luas permukaan, dan keasaman zeolit. Analisis kristalinitas menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) pada gelombang 1,5 Å dengan menggunakan radiasi dari tabung target Cu pada tegangan 30 kV dan arus 30 mA pada daerah pengamatan antara 2θ 10⁰ – 90⁰. Data *peak* yang diperoleh akan dibandingkan dengan *database International Center for Diffraction Data* (ICDF) Zeolit. Derajat kristalinitas zeolit diukur dengan menggunakan *software origin*. Morfologi zeolit diamati dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang menggunakan pembesaran 10.000 kali lipat. Luas permukaan, volume pori, dan jejari rata-rata ditentukan dengan *Gas Sorption Analyzer* yang menggunakan gas nitrogen (N₂). Keasaman total ditentukan dengan menghitung selisih massa zeolit sebelum dan sesudah dialirkan gas amonia (NH₃) dengan menggunakan metode gravimetri.

Energi Aktivasi

Untuk mengetahui besaran energi aktivasi dari setiap perbandingan komposisi katalis dan plastik, uji regresi digunakan untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap volume cairan yang dihasilkan dari setiap perlakuan suhu dan perbandingan jumlah katalis. Nilai koefisien regresi dari persamaan regresi ini dimasukkan ke dalam persamaan Arrhenius yang dibuat grafik hubungan antara ln (k) dengan 1/T *solid* dalam sebuah persamaan regresi. Persamaan untuk menentukan besaran energi aktivasi dari masing-masing percobaan, yaitu:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

Keterangan:

k : konstanta laju reaksi;

k₀ : konstanta (tidak tergantung pada suhu);

E : energi aktivasi

T : suhu mutlak (K) reaktor

R : konstanta gas, 1,986 kal/mol

Kemudian dengan mengubah persamaan (1) menjadi:

$$\ln(k) = \ln(k_0) - \left[\frac{E}{R} \right] \frac{1}{T} \quad (2)$$

Sehingga $Y = a + bX$ berubah menjadi:

$$Y = \ln(k_0) - \left[\frac{E}{R} \right] \frac{1}{T} \quad (3)$$

Keterangan:

$$Y = \ln(k)$$

$$bX = -\left[\frac{E}{R} \right] \frac{1}{T}$$

$$a = \ln(k_0)$$

$$X = 1/T$$

Sehingga:

$$b = -\frac{E}{R} \quad (4)$$

$$E = b.R \quad (5)$$

$$A = \exp(b) \quad (6)$$

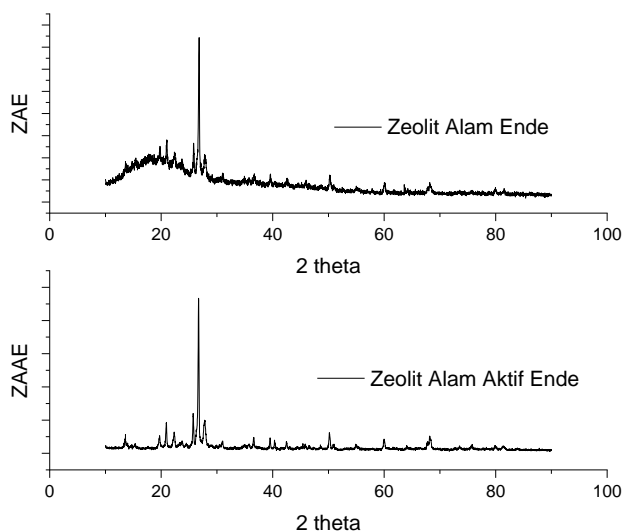
Kualitas Cairan Pirolisis

Analisis mengenai kualitas cairan hasil pirolisis meliputi viskositas, densitas, dan komponen senyawa penyusun. Analisis dilakukan dengan menggunakan viskometer untuk analisis viskositas, piknometer untuk analisis densitas, dan *Gas Chromatography Mass Spectroscopy* (GC-MS) untuk analisis komponen senyawa penyusun cairan pirolisis.

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Zeolit Alam Ende

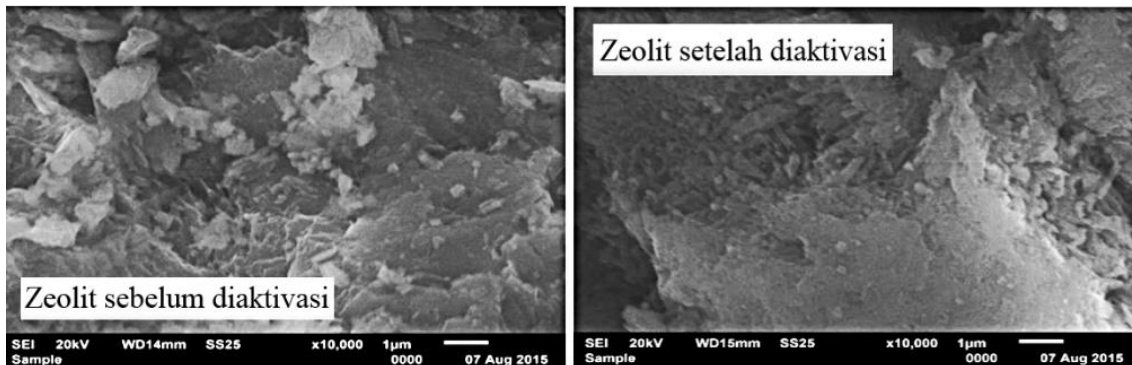
Hasil analisis kualitatif dan kuantitatif menunjukkan bahwa zeolit alam Ende merupakan jenis mordenit ($2\theta = 27,72$) dengan derajat kristalinitas sebesar 28,40%. Mordenit merupakan jenis mineral zeolit yang paling banyak ditemukan di Indonesia dengan banyak kanal saluran pori dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap suhu panas [26]. Karakteristik kristal mordenit dapat digunakan sebagai katalis dalam kondisi termal pada proses pirolisis dan keberadaan pori mordenit dapat membantu untuk meningkatkan lebih banyak terbentuk fasa ringan (bensin) ketika terjadi pemutusan rantai panjang hidrokarbon dari polimer plastik [27]. Namun, hasil analisis juga menunjukkan zeolit alam Ende masih memiliki banyak fasa amorf yang ditandai dari *base line* yang membentuk bukit, sehingga dapat mengurangi daya katalitik dari zeolit [28]. Diketahui juga pola difraktogram zeolit alam Ende setelah diaktivasi menunjukkan pengurangan *base line* amorf yang cukup signifikan, sehingga disimpulkan bahwa telah terjadi perbaikan kristalinitas zeolit alam Ende setelah diaktivasi menjadi 36,63%. Secara singkat, hasil analisis difraktogram zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil analisis XRD zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi

Luas permukaan zeolit merupakan total dari luas permukaan pori dan saluran kanal penyusunnya. Zeolit alam Ende ditemukan dalam bentuk batuan laut, sehingga diperkirakan terdapat pengotor organik dan anorganik yang berasal dari daerah pesisir. Hal tersebut dapat dilihat pada permukaan zeolit alam yang terdapat gumpalan-gumpalan yang mengakibatkan tidak adanya penampakan pori-pori zeolit alam Ende. Penggunaan asam dalam proses aktivasi bertujuan untuk melarutkan pengotor alkali yang menutupi permukaan zeolit dan meningkatkan jumlah situs asam yang terkandung di dalam zeolit. Pemanasan juga bertujuan untuk menguapkan pengotor organik yang terkandung di dalam pori zeolit. Kerangka struktur zeolit sangat rentan terhadap asam, sehingga perlu direfluks untuk mengembalikan posisi logam penyusun kerangka zeolit. Kalsinasi bertujuan untuk menjadikan kerangka zeolit menjadi lebih stabil dan tahan pada perlakuan temperatur tinggi dalam pirolisis. Naiknya fasa kristal menjadikan kerangka mineral zeolit memiliki stabilitas termal yang lebih kuat. Peningkatan derajat kristalinitas juga menunjukkan bahwa kemurnian zeolit telah berhasil diperbaiki [29].

Aktivasi zeolit mengurangi pengotor yang menutupi permukaan dan pori zeolit yang ditandai dengan penampakan pori dan permukaan yang kasar dan bersih [30]. Namun, terlihat juga permukaan zeolit alam aktif Ende yang menunjukkan pola yang tidak seragam. Hal tersebut terjadi karena zeolit alam merupakan mineral polikristal yang mempunyai orientasi yang acak, sehingga lapisan kristal menjadi saling tumpang tindih secara acak [21]. Mikrograf permukaan zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Mikrograf zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi

Perlakuan kimia akan melarutkan logam-logam alkali yang menutupi permukaan dan menyumbat saluran pori zeolit, sehingga meningkatkan tingkat keasaman permukaan agar zeolit dapat menjadi lebih reaktif [26]. Pada penelitian ini, proses aktivasi zeolit alam Ende meningkatkan luas permukaan dari 53,17 m²/g menjadi 74,57 m²/g, jejari rata-rata dari 19,96 Å menjadi 20,21 Å, dan volume pori dari 52 cm³/g menjadi 72,34 cm³/g. Peningkatan luas permukaan menjadikan jumlah zat yang bereaksi dengan permukaan katalis semakin banyak, serta peningkatan jejari rata-rata dan volume pori juga akan meningkatkan jumlah zat yang teradsorpsi ke dalam permukaan katalis, sehingga akan meningkatkan jumlah cairan hasil pirolisis. Aktivasi zeolit alam Ende juga berhasil meningkatkan jumlah situs asam dari 1,456 NH₃/g zeolit menjadi 4,342 NH₃/g zeolit. Keasaman total zeolit berhubungan langsung dengan jumlah situs asam Bronsted dan Lewis yang terkandung di dalamnya, sehingga penambahan keasaman total mengindikasikan bahwa zeolit telah menjadi lebih reaktif setelah diaktivasi [31].

Energi Aktivasi

Hubungan ln(k) dan 1/T untuk pirolisis plastik disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, maka reaksi pirolisis tanpa katalis dimulai pada waktu 2,44 menit pada setiap perlakuan suhu. Perlakuan pada perbandingan 0,05:1 dapat menurunkan 1.571,52 kal/mol energi aktivasi dan mempercepat waktu reaksi sebesar 0,11 menit, perlakuan perbandingan 0,10:1 dapat menurunkan 4.371,1 kal/mol energi aktivasi dan mempercepat waktu reaksi sebesar 0,22 menit, serta perlakuan perbandingan 0,15:1 hanya dapat menurunkan 3.197,74 kal/mol energi aktivasi dan mempercepat waktu reaksi sebesar 0,05 menit. Berdasarkan hal tersebut, maka perlakuan perbandingan 0,15:1 sudah menunjukkan gejala sebagai inhibitor atau menurunkan laju reaksi perengkahan apabila dibandingkan dengan analisis pada perbandingan 0,05:1 dan 0,10:1. Energi aktivasi digunakan untuk menentukan kebutuhan energi dalam mencapai kecepatan maksimum reaksi, sehingga peningkatan suhu akan mempercepat reaksi dan menurunkan energi aktivasi. Diketahui juga dalam proses pirolisis polietilena, dibutuhkan suhu di atas 500 °C dan penggunaan zeolit alam Ende yang diaktivasi asam berhasil meminimalisir hal tersebut [32].

Tabel 1. Hubungan $\ln(k)$ dan $1/T$ untuk setiap perlakuan katalis

Perbandingan Katalis:Plastik (kg)	Energi Aktivasi ($Y = \ln(k_0) - \left[\frac{E}{R}\right] \frac{1}{T}$)	Konstanta (k)
0:1	14.827,08 kal/mol	2,44 menit
0,05:1	13.255,56 kal/mol	2,33 menit
0,10:1	10.455,98 kal/mol	2,22 menit
0,15:1	10.889,34 kal/mol	2,39 menit

Kualitas Cairan Pirolisis

Viskositas Cairan Pirolisis

Hasil uji terhadap nilai viskositas dari cairan hasil pirolisis disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan data viskositas pada Tabel 1, diketahui bahwa angka viskositas cairan pirolisis polietilena semakin baik seiring dengan peningkatan jumlah katalis dan kenaikan suhu. Peningkatan luas permukaan dan keasaman zeolit alam Ende setelah diaktivasi menjadikan semakin banyak zat yang teradsorpsi ke dalam permukaan katalis, sehingga terjadi selektivitas dan pemutusan rantai panjang molekul plastik untuk menjadi rantai ikatan yang lebih pendek pada rongga pori zeolit [19]. Berdasarkan hasil penelitian, maka diketahui bahwa penggunaan katalis zeolit alam yang diaktivasi asam dengan perbandingan 0,10:1 mampu menghasilkan cairan pirolisis dengan nilai viskositas setara bensin [33].

Tabel 2. Hasil analisis uji viskositas minyak pirolisis

Sampel	Viskositas (cP)	Sampel	Viskositas (cP)
T ₁ K ₀	2,3316	T ₁ K ₂	0,9678
T ₂ K ₀	2,0112	T ₂ K ₂	0,8222
T ₃ K ₀	1,8232	T ₃ K ₂	0,6111
T ₄ K ₀	1,2112	T ₄ K ₂	0,4721
T ₁ K ₁	1,0345	T ₁ K ₃	0,8126
T ₂ K ₁	0,9222	T ₂ K ₃	0,8142
T ₃ K ₁	0,7214	T ₃ K ₃	0,6821
T ₄ K ₁	0,6321	T ₄ K ₃	0,4622

Densitas Cairan Pirolisis

Hasil uji densitas untuk cairan dari masing-masing perlakuan sampel disajikan pada Tabel 3. Penggunaan katalis zeolit alam Ende yang diaktivasi asam diketahui juga mampu menurunkan nilai densitas seiring dengan peningkatan jumlah katalis dan suhu. Nilai densitas berbanding lurus dengan nilai viskositas, yang mana nilai densitas juga akan menurun apabila nilai viskositas menurun. Pemutusan ikatan rantai panjang hidrokarbon yang terjadi di dalam rongga zeolit alam Ende yang telah diaktivasi asam menjadi ikatan-ikatan kecil menghasilkan fasa yang ringan, sehingga terjadi penurunan nilai densitas cairan pirolisis [19]. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa penggunaan zeolit alam Ende yang diaktivasi asam dapat menghasilkan cairan pirolisis dengan densitas setara bensin [34].

Tabel 3. Hasil analisis uji densitas minyak pirolisis

Sampel	Densitas (g/ml)	Sampel	Densitas (g/ml)
T ₁ K ₀	0,79267	T ₁ K ₂	0,78660
T ₂ K ₀	0,77061	T ₂ K ₂	0,76211
T ₃ K ₀	0,75621	T ₃ K ₂	0,70001
T ₄ K ₀	0,75201	T ₄ K ₂	0,60601
T ₁ K ₁	0,79083	T ₁ K ₃	0,78201
T ₂ K ₁	0,76607	T ₂ K ₃	0,75801
T ₃ K ₁	0,73201	T ₃ K ₃	0,67531
T ₄ K ₁	0,70201	T ₄ K ₃	0,60404

Komponen Senyawa

Identifikasi kandungan senyawa pada minyak pirolisis dilakukan dengan analisis GC-MS untuk mengetahui komponen utama penyusun senyawa pada sampel percobaan. Hasil analisis kromatografi minyak pirolisis dapat dilihat pada Tabel 4. Pirolisis tanpa katalis hanya memperoleh sedikit senyawa hidrokarbon dan

penggunaan katalis zeolit menjadikan reaksi pemotongan rantai molekul plastik terjadi secara acak, sehingga memperoleh fraksi-fraksi molekul dengan aneka berat molekul (distribusi variasi molekul yang lebar) yang tidak tetap. Penggunaan zeolit alam Ende yang diaktivasi dengan asam sudah mampu menghasilkan fraksi bensin, namun fraksi terbesar yang terbentuk adalah fraksi parafin. Komponen senyawa penyusun cairan pirolisis sangat bergantung pada bahan baku yang digunakan. Pada penelitian yang menggunakan bahan baku polistirena tanpa katalis dengan suhu operasi 500 °C juga menunjukkan hasil yang serupa dengan penelitian ini, sedangkan dengan bahan baku yang sama membutuhkan suhu operasi di atas 600 °C [11, 35].

Tabel 4. Hasil analisis kromatografi minyak pirolisis

Sampel	C ₅ – C ₇ (%)	C ₉ – C ₁₄ (%)	Sampel	C ₅ – C ₇ (%)	C ₉ – C ₁₄ (%)
T ₁ K ₀	0,55	72,81	T ₃ K ₀	1,88	81,96
T ₁ K ₁	12,56	74,95	T ₃ K ₁	13,70	81,50
T ₁ K ₂	7,32	72,51	T ₃ K ₂	9,45	80,06
T ₁ K ₃	7,38	89,34	T ₃ K ₃	9,08	81,64
T ₂ K ₀	1,66	77,57	T ₄ K ₀	3,57	74,09
T ₂ K ₁	11,45	74,95	T ₄ K ₁	6,68	84,47
T ₂ K ₂	9,40	74,38	T ₄ K ₂	6,65	89,42
T ₂ K ₃	7,95	74,87	T ₄ K ₃	6,34	89,61

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dipaparkan sebelumnya, maka terdapat beberapa pokok penting yang disimpulkan dari penelitian ini, antara lain aktivasi dapat mengubah sifat kimia dan sifat fisika zeolit alam Ende meliputi derajat kristalinitas 28,40% mordenit berubah menjadi 36,63%, luas permukaan 53,17 m²/g berubah menjadi 74,57 m²/g, jejari rata-rata 19,96 Å berubah menjadi 20,21 Å, volume pori 52 cm³/g berubah menjadi 72,34 cm³/g, dan jumlah situs asam sebanyak 1,456 NH₃/g zeolit berubah menjadi 4,342 NH₃/g zeolit, sehingga dapat digunakan sebagai katalis. Katalis zeolit alam aktif Ende pada proses pirolisis polietilena dari sampah plastik mampu menurunkan energi aktivasi hingga 4.371,1 kal/mol pada perlakuan komposisi katalis 0,10% dari 1 kg plastik. Peningkatan suhu dan katalis menjadikan kualitas minyak pirolisis semakin baik, namun komposisi perbandingan katalis adalah 0,10% dari 1 kg massa plastik.

5. Konflik kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] D. Santhi, *Plastik Sebagai Kemasan Makanan dan Minuman*, 1st ed. Denpasar: PSPD FK UNUD, 2016.
- [2] S. Sayuti, "Permasalahan sampah dan solusinya," Banten, 2022.
- [3] S. E. Farin, "Penumpukan sampah plastik yang sulit terurai berpengaruh pada lingkungan hidup yang akan datang," *OSF Prepr.*, pp. 1–10, 2021.
- [4] Z. Dan, Y. Che, X. Wang, P. Zhou, Z. Han, D. Bu, X. Lu, W. Ma, and G. Chen, "Environmental, economic, and energy analysis of municipal solid waste incineration under anoxic environment in Tibet Plateau," *Environ. Res.*, vol. 216, 2023.
- [5] A. G. Simandjuntak, "Pencemaran udara," *Bul. Limbah*, vol. 11, no. 1, p. 242103, 2007.
- [6] B. Johnke, R. Hoppaus, E. Lee, B. Irving, T. Martinsen, and K. Mareckova, "Emissions from waste incineration: Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories," *IPCC - Intergov. Panel Clim. Chang.*, pp. 455–468, 2001.
- [7] M. A. Rajaeifar, H. Ghanavati, B. B. Dashti, R. Heijungs, M. Aghbashlo, and M. Tabatabaei, "Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 414–439, Nov. 2017.
- [8] M. Syamsiro, "Kajian pengaruh penggunaan katalis terhadap kualitas produk," *Teknik*, vol. 5, no. 1, pp. 1–85, 2015.
- [9] N. Nasrun, E. Kurniawan, and I. Sari, "Studi awal produksi bahan bakar dari proses pirolisis kantong plastik bekas," *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 5, no. 1, p. 30, 2017.
- [10] S. Naimah, C. Nuraeni, I. Rumondang, B. N. Jati, dan R. Ermawati, "Dekomposisi limbah plastik polypropylene dengan metode pirolisis," *J. Sains Mater. Indones. Indones. J. Mater. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 226–229, 2012.
- [11] A. S. Nugroho, "Pengolahan limbah plastik LDPE dan PP untuk bahan bakar dengan cara pirolisis," *J.*

- Litbang Sukowati Media Penelit. dan Pengemb.*, vol. 4, no. 1, p. 10, 2020.
- [12] R. Harlivia, T. Tahdid, and S. E. A., “Pengaruh persen katalis zeolit alam terhadap yield bahan bakar cair proses pirolisis dari limbah plastik polypropylene,” *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 2, no. 11, pp. 453–459, 2022.
- [13] R. Nazif, E. Wicaksana, and Halimatuddahlia, “Pengaruh suhu pirolisis dan jumlah katalis karbon aktif terhadap yield dan kualitas bahan bakar cair dari limbah plastik jenis polipropilena,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 5, no. 3, pp. 49–55, 2016.
- [14] S. Sumari, S. I. Permatasari, L. Ilmiyah, F. Fajaroh, Y. Yahmin, and I. B. Suryadharma, “Pengaruh komposisi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam sintesis ZSM-5 (zeolite socony mobile-5) bersumber silika pasir pantai lokal,” *JC-T (Journal Cis-Trans) J. Kim. dan Ter.*, vol. 6573, no. vol 4, no 2 (2020), pp. 27–32, 2020.
- [15] Sumarni, N. Hindryawati, and Alimuddin, “Aktivasi dan karakterisasi zeolit alam menggunakan NaOH,” *J. At.*, vol. 3, no. 2, pp. 106–110, 2018.
- [16] T. Kurniawan and M. A. Firdaus, “Zeolite for agriculture intensification and catalyst in agroindustry,” *World Chem. Eng. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 14–23, 2019.
- [17] Sukaesih, “Analisis fasies dan lingkungan pengendapan,” in *Seminar Nasional Fakultas Teknik Geologi*, 2014, pp. 374–387.
- [18] D. Wolo, Y. D. Ngapa, and L. Carvallo, “Potensi zeolit alam ende sebagai bahan aditif semen untuk meningkatkan kuat tekan beton,” *Opt. J. Pendidik. Fis.*, vol. 3, no. 1, pp. 34–41, 2019.
- [19] Abdullah, M. Apriyanti, Sunardi, U. T. Santoso, A. B. Junaidi, D. Aditiya, and U. Irawati, “Pyrolysis of palm oil using zeolite catalyst and characterization of the boil-oil,” *Green Process. Synth.*, vol. 8, no. 1, pp. 649–658, 2019.
- [20] S. Arita, A. Assalami, and D. I. Naibaho, “Proses pembuatan bahan bakar cair dengan menggunakan katalis zeolit,” *Tek. Kim.*, vol. 21, no. 2, pp. 8–14, 2015.
- [21] Y. D. Ngapa and J. Gago, “Efektivitas zeolit alam Ende-NTT sebagai adsorben dalam pemurnian bioetanol berbahan baku moka : Minuman tradisional Flores,” *J. Tek. Kim. dan Lingkung.*, vol. 4, no. April, pp. 121–127, 2020.
- [22] K. B. V and Y. Rumbino, “Analisis penurunan kesadahan pada air sadah sintesis (CaCl_2) oleh zeolit alam Ende,” *J. Teknol.*, vol. 17, no. 1, 2023.
- [23] M. Faradika, S. Sugiarti, and P. Sugita, “Potensi zeolit alam Ende-NTT sebagai katalis transformasi senyawa gula menjadi 5-hidroksimetilfurfural (HMF),” *J. Kim. Val.*, vol. 5, no. 1, pp. 15–22, 2019.
- [24] D. Y. Lestari, “Kajian modifikasi dan karakterisasi zeolit alam dari berbagai negara,” in *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia*, 2010.
- [25] M. Hakiki, M. Makiyi, Nuryoto, Rahmayetty, I. Kustiningsih, and T. Kurniawan, “The effect of mine locations of Bayah natural zeolites on ammonium adsorption: A kinetic and equilibrium study,” *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 22, no. 1, pp. 18–28, 2021.
- [26] W. S. Atikah, “The potentiality of activated natural zeolite from Gunung Kidul,” *Arena Tekst.*, vol. 32, no. 1, pp. 17–24, 2017.
- [27] R. Pratiwi and W. Dahani, “Pengaruh penggunaan katalis zeolit alam dalam pirolisis limbah plastik jenis HDPE menjadi bahan bakar cair setara bensin,” in *Semin. Nas. Sains dan Teknol. Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Jakarta*, 2015.
- [28] E. Handoko, B. Soegijono, and F. R. Tama, *Teknik Difraksi Sinar-X Dalam Analisis Struktur Kristal*. 2023.
- [29] L. M. Estiaty, “Sintesis dan karakterisasi Zeolit- TiO_2 dari zeolit alam termodifikasi,” *Teknol. Miner. dan Batubara Vol.*, vol. 11, no. 3, pp. 181–190, 2015.
- [30] Nuryoto, H. Sulistyono, and I. P. Sediawan, Wahyudi Budi, “Modifikasi zeolit alam mordenit sebagai katalisator ketalisasi dan esterifikasi,” *Reaktor*, vol. 16, no. 2, pp. 72–80, 2016.
- [31] O. Cloudia, H. Arjek, and I. Fatimah, “Modifikasi zeolit dengan tembaga (Cu) dan uji sifat katalitiknya pada reaksi esterifikasi,” *Indones. J. Chem. Res.*, vol. 3, no. 1, 2017.
- [32] D. Hermaw, A. Hardianto, P. Suwandon, and F. Rahmadianto, “Pengaruh temperatur pirolisis terhadap energi aktivasi pada tar limbah plastik,” in *Pros. Seniati*, 2019, vol. 5, no. 4.
- [33] D. G. H. Adoe, W. Bunganaen, I. F. Krisnawi, and F. A. Soekwanto, “Pirolisis sampah plastik PP (polypropylene) menjadi minyak pirolisis sebagai bahan bakar primer,” *Lontar: J. Tek. Mesin Undana*, vol. 3, no. 1, pp. 17–26, 2016.
- [34] E. Masfitra, “Pengujian bahan bakar minyak (BBM) alternatif dari pirolisis limbah plastik jenis PP (polypropylene),” *Enotek: J. Energi dan Inov. Teknol.*, vol. 1, no. 01, pp. 6–10, 2021.
- [35] I. N. D. K. Dewi, “Karakteristik minyak hasil pirolisis batch sampah plastik polyethylene dan polystyrene pada berbagai suhu,” *J. Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 52–55, 2014.