Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan
Vol. 07 No. 1 (2023) pp. 13-21

Pemanfaatan Zeolit Alam Ende Sebagai Katalis dalam Pirolisis Polietilena dari Sampah Plastik

Gregorio Antonny Bani[*)]

Fakultas Sains dan Pertanian, Universitas Aryasatya Deo Muri, Kupang, Indonesia

[*)] Penulis korespondensi: greg.antonny@yahoo.com

DOI: https://doi.org/10.21776/ub.rbaet.2023.007.01.03

Article History

Submitted:
April 12, 2023
Accepted:
May 22, 2023
Published:
May 30, 2023

© 2023 Universitas Brawijaya

Abstract

Utilization of Ende Natural Zeolite as a Catalyst in Polyethylene Pyrolysis from Plastic Waste. *This study aims to characterizing zeolite Ende became a catalyst in the pyrolysis of polyethylene plastic waste; determine the influence of zeolite catalyst to the activation energy of the pyrolysis; determine the influence of temperature in the pyrolysis; determine the influence of a catalyst in the pyrolysis; determine the influence of the interaction between temperature and the catalyst. Based on the experimental results, it is known that the activation process can alter the chemical properties and physical properties of natural zeolite Ende include crystallinity, surface area, pore volume and pore, as well as its acidity to serve as a catalyst; zeolite catalyst on the pyrolysis process of polyethylene plastic waste can lower the activation energy of up to 4371.1 cal/mol; 0.10 is the best composition of the use of natural zeolite active Ende as a catalyst in the pyrolysis process of polyethylene plastic waste; the best interaction between temperature and active natural zeolite catalysts Ende is on the treatment temperature of 400°C and 0.10 catalyst composition.*

Keywords: *zeolites, pyrolysis, catalysts, polyethylene*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi zeolit Ende menjadi katalis pada pirolisis polietilena dari sampah plastik; mengetahui pengaruh katalis zeolit alam Ende terhadap energi aktivasi pirolisis; mengetahui pengaruh suhu dalam pirolisis; mengetahui pengaruh katalis dalam pirolisis; mengetahui pengaruh interaksi antara suhu dan katalis dalam pirolisis. Berdasarkan hasil percobaan, maka diketahui bahwa proses aktivasi dapat merubah sifat kimia dan sifat fisika zeolit Ende meliputi kristalinitas, luas permukaan, volume pori dan jejari pori, serta keasamannya untuk dijadikan sebagai katalis; katalis zeolit mampu menurunkan energi aktivasi hingga 4.371,1 cal/mol; komposisi 0,10 merupakan komposisi terbaik dari penggunaan zeolit alam aktif Ende sebagai katalis dalam proses pirolisis polietilena dari sampah plastik; interaksi terbaik antara suhu dan katalis zeolit alam aktif Ende adalah pada perlakuan suhu 400°C dan komposisi katalis 0,10.

Kata kunci: zeolit, pirolisis, katalis, polietilena

PENDAHULUAN

Dalam kehidupan manusia modern, penggunaan plastik sebagai material yang digunakan sehari-hari pun terus meningkat karena dianggap lebih awet, ringan, dan mudah untuk dibawa kemana saja. Dari hal tersebut, maka sampah yang dihasilkan pun semakin banyak seiring dengan peningkatan jumlah penduduk, sehingga berujung pada penumpukan sampah plastik di Tempat Pembuangan Akhir sampah (TPA). Terdapat berbagai macam metode dalam menangani masalah sampah plastik, namun yang paling umum digunakan adalah melalui pembakaran langsung di TPA [1]. Metode tersebut seharusnya tidak dilakukan untuk sampah plastik

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

karena menimbulkan polutan (CO, CO_2, NO_x dan SO_x) di udara, dan plastik tidak bisa diuraikan dalam tanah [2]. Pengembangan metode penanganan sampah plastik juga dianggap tidak terlalu efektif, karena hanya mampu memanfaatkan sdikit dari jumlah total sampah yang ada di TPA [3].

Pirolisis merupakan salah satu cara untuk meminimalisir sampah plastik, yaitu dengan cara mengubahnya menjadi hidrokarbon cair dan digunakan lagi sebagai salah satu sumber energi [4]. Keuntungan metode ini dapat mengurangi pencemaran udara akibat proses pembakaran sampah, dikarenakan asap hasil pembakaran sampah dikonversi menjadi asap cair (proses kondensasi) [5]. Permasalahan dalam pirolisis adalah (1) sulit mendistribusikan produknya, (2) butuh temperatur yang tinggi (500 – 900°C), (iii) waktu yang lama (1 – 7 jam) dan (iv) produk yang dihasilkan sedikit [6]; [7]. Karena itu, dibutuhkan katalis untuk mengatasi permasalahan tersebut [8].

Zeolit merupakan salah satu katalis dalam pirolisis [9]. Pulau Flores Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT), memiliki cadangan zeolit alam dengan yang cukup besar, dengan jumlah deposit zeolit terbanyak berada di kabupaten Ende, yaitu sekitar 6.115.000 ton [10] [11]. Namun, diketahui juga bahwa zeolit alam di Indonesia umumnya memiliki sifat fisika dan kimia yang variatif terutama apabila digunakan sebagai katalis, yang dimana hal tersebut bergantung pada lokasi pembentukan dari zeolit itu sendiri [12]. Oleh karena itu, zeolit alam perlu diaktivasi terlebih dahulu agar memiliki sifat seperti zeolit sintesis ZSM [13].

Kualitas katalis zeolit alam dapat ditingkatkan melalui aktivasi, dimana aktivasi dengan perlakuan asam memiliki karakteristik dan menghasilkan minyak nabati yang lebih baik dibandingkan dengan zeolit yang diaktivasi dengan menggunakan larutan basa [14]. Pirolisis polistirena dari ban bekas menunjukkan bahwa zeolit mampu mengkonversi hingga 80% polistirena dari ban bekas menjadi hidrokarbon jenis premium [15]. Uji aktifitas katalitik dari Zeolit alam Ende menunjukkan bahwa zeolit alam yang dikativasi asam mampu mengkonversi fruktosa menjadi HMF dengan rendemen hingga 74.84% [16].

Penelitian mengenai penggunaan zeolit alam Ende sebagai katalis reaksi pirolisis belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji kemampuan aktifitas zeolit alam Ende apabila dimanfaatkan sebagai katalis dalam pirolisis polietilena dari sampah plastik. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah (1) mengkarakterisasi zeolit alam Ende menjadi katalis pada pirolisis polietilena dari sampah plastik; (2) mengetahui pengaruh katalis zeolit alam Ende terhadap energi aktivasi pirolisis polietilena dari sampah plastik; (3) mengetahui pengaruh suhu dalam pirolisis polietilena dari sampah plastik; (4) mengetahui pengaruh katalis dalam pirolisis polietilena dari sampah plastik; (5) mengetahui pengaruh interaksi antara suhu dan katalis dalam pirolisis polietilena dari sampah plastik.

METODOLOGI

Sampel zeolit alam Ende digiling menjadi ukuran 100 mesh dan dibersihkan dengan akuades, lalu kemudian dikeringkan dalam oven dengan suhu 200°C selama 2 jam. Sampel kemudian dikarakterisasi meliputi kristalinitas, morfologi, luas permukaan, ukuran pori, jari-jari pori dan keasamannya.

Kristalinitas zeolit alam Ende ditentukan dengan menggunakan analisis X-Ray Diffraction. Data *peak* yang diperoleh akan dibandingkan dengan database ICDF (*International Center for Diffractogram Data*) Zeolit, kemudian kristalinitasnya diukur dengan software Origin. Morfologi zeolit diamati dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) yang menggunakan pembesaran 10.000 kali lipat.

Luas permukaan ditentukan berdasarkan jumlah gas N_2 yang teradsorpsi dalam permukaan zeolit, dimana sampel zeolit dipanaskan dan divakum terlebih dahulu, lalu kemudian dialirkan gas N_2 pada temperatur 77 °C di atas permukaan zeolit.

Jumlah situs asam ditentukan berdasarkan jumlah gas NH_3 yang teradsorpsi pada permukaan zeolite, dimana zeolit dipanaskan selama 2 jam pada suhu 120°C, dan didinginkan, lalu kembali dialirkan gas NH_3 ke permukaan sampel zeolit pada suhu 60°C. Penentuan luas permukaan dan jumlah situs asam dilakukan dengan metode Gravimetri.

Proses selanjutnya adalah melakukan aktivasi terhadap zeolit alam Ende dengan cara merendam zeolit ke dalam larutan HF 1 % dengan rasio 1: 2 (v/v) selama 10 menit, kemudian dicuci lagi dengan akuades dan direndam lagi ke dalam larutan HCl 6 N dan direfluks selama 30 menit pada suhu 90°C. Setelah direfluks, rendaman didinginkan dan dibiarkan semalaman, kemudian dicuci lagi dengan akuades. Berikutnya zeolit dikeringkan dalam oven pada suhu 130°C selama 1 jam untuk menghilangkan sisa air dan dilanjutkan dengan perendaman dalam larutan NH_4Cl 0,1 M dengan rasio 1: 2 (v/v) pada suhu 90°C selama 3 jam per hari, selama satu minggu. Lalu serbuk zeolit kembali dikeringkan

dalam oven pada suhu 500°C selama 4 jam dan didinginkan. Setelah itu, sampel zeolit kembali dipanaskan pada suhu 500°C sambal mengalirkan gas N_2 selama 4 jam. Serbuk zeolit aktif dikarakterisasi lagi meliputi kristalinitas, morfologi, luas permukaan, ukuran pori, jari-jari pori dan keasamannya.

Proses lain yang dilakukan adalah mempersiapkan sampel plastik untuk percobaan. Plastik dipilih berdasarkan lambang yang bertuliskan PE (Polietilena) pada bagian bawah plastik tersebut, kemudian dipotong menjadi ukuran ±1 cm^2.

Plastik polietilena yang sudah disipakan, dimasukkan ke dalam reactor sebanyak 1000 gram, lalu proses pirolisis dijalankan pada temperatur 300°C sambil menyalakan *stopwatch*. Waktu yang dicatat sebagai waktu awal proses perengkahan ketika minyak pertama kali diteteskan dan 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 di atas kembali diulang pada suhu 350°C, 400°C dan 450°C. Minyak hasil pirolisis dianalisis meliputi viskositas, densitas dan komponen senyawa penyusunnya. Semua prosedur di atas diulangi lagi dengan menggunakan katalis dengan perbandingan komposisi katalis dan umpan 0,10 : 1 dan 0,15 : 1. Minyak hasil pirolisis dengan katalis dianalisis lagi meliputi viskositas, densitas dan komponen senyawa penyusunnya.

Untuk mengetahui besaran energi aktivasi dari setiap perbandingan komposisi katalis dan plastik dilakukan dengan menggunakan uji Regresi 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, sehingga dapat diketahui besaran energi aktivasi dari masing-masing percobaan berdasarkan persamaan **1**

$$k = k_0 e^{-E/RT} \qquad \textbf{1}$$

dimana,

k : konstanta laju reaksi;
k_0: konstanta (tidak tergantung pada suhu);
E : energi aktivasi
T : suhu mutlak (K) reaktor
R : konstanta gas, 1,986 kal/mol

Kemudian dengan melinierkan persamaan **1** di menjadi persamaan **2** [**17**]

$$\ln k = \ln k_0 - \left(\frac{E}{R}\right)\frac{1}{T} \qquad \textbf{2}$$

Dengan menyamakan persamaan **2** dengan persamaan linier diperoleh nilai sebagai berikut

$E = -\frac{E}{R} R$

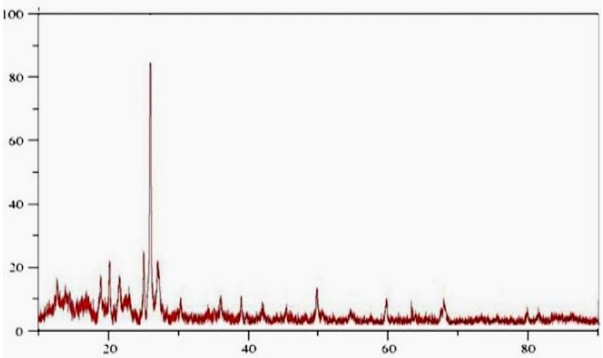
$A = \exp\left(-\frac{E}{R}\right)$

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Zeolit Alam Ende

Kristalinitas Zeolit

Zeolit alam Ende (sampel) diidentifikasi kristalinitasnya dengan menggunakan difraksi sinar X dengan panjang gelombang 1,50000 Å dan menggunakan radiasi dari tabung target Cu dengan tegangan 30 kV dan arus 30 mA pada daerah pengamatan antara 2Θ 10 – 90°. Hasil analisis zeolit alam Ende menunjukkan 38 puncak penyusun mineral zeolit alam Ende dengan kandungan Kuarsa α 49,30%, Mordenite 13,24%, Klinoptilolit 17,74 %, Skolecit 9,57 %, Laumontit 3,94 %, Erionit 2,53%, Natrolit 2,53% dan Heulandit 1,13 %. Secara singkat hasil analisis difraktogram zeolit alam Ende ditunjukkan pada **Gambar 1**. Interpretasi sprektrum XRD Zeolit Alam Ende dapat dilihat di supplementary information.

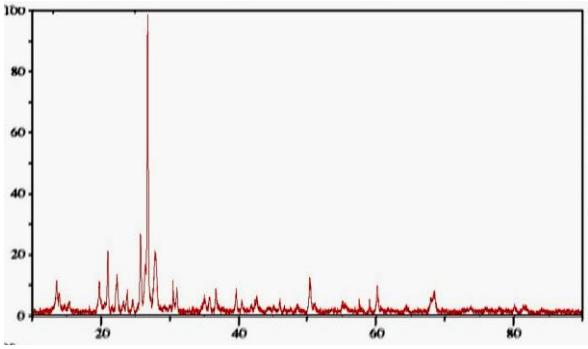


Gambar 1. Difraktogram zeolit alam Ende

Zeolit alam yang didominasi oleh jenis mordenit dan klinoptilolit. Hasil analisis juga menunjukkan sampel zeolit alam Ende ini memiliki banyak fasa amorf yang ditandai dari *base line* yang membentuk bukit, sehingga dapat mengurangi daya katalitik dari zeolit ini.

Kristalinitas zeolit alam aktif Ende ditunjukkan pada **Gambar 2**. Difraktogram zeolit alam aktif pada **Gambar 2**, menunjukkan pola yang sedikit berbeda dengan difraktogram zeolit alam Ende sebelumnya, yakni terdapat pengurangan jumlah puncak

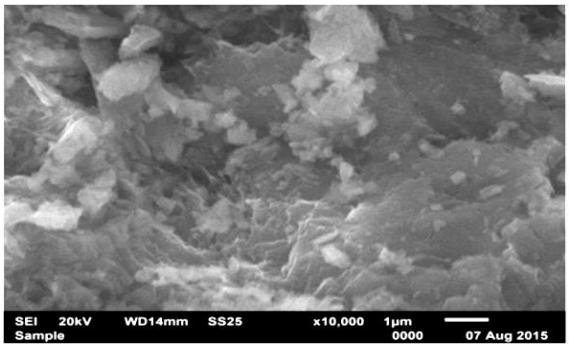
difaktogram dari 38 menjadi 34 puncak dengan perubahan komposisi senyawa penyusunnya menjadi menjadi Kuarsa α 25,85%, Mordenite 41,76%, Klinoptilolit 17,90%, Skolecit 2,55 %, Laumontit 4,83%, Erionit 2,27% dan Natrolit 1,98%, serta tidak terlihat lagi *base line* yang menunjukkan impuritas amorf. Proses aktivasi berhasil memperbaiki fasa kristalinitas zeolit yang ditandai juga dengan semakin tajamnya puncak difrraktogram zeolit setelah diaktivasi. Aktivasi zeolit dengan perlakuan asam diketahui mampu membersihkan pengotor di dalam struktur kristalinnya dan membersihkan fasa amorf di dalam kristal zeolit alam [18].



Gambar 2. Difraktogram ZAA Ende

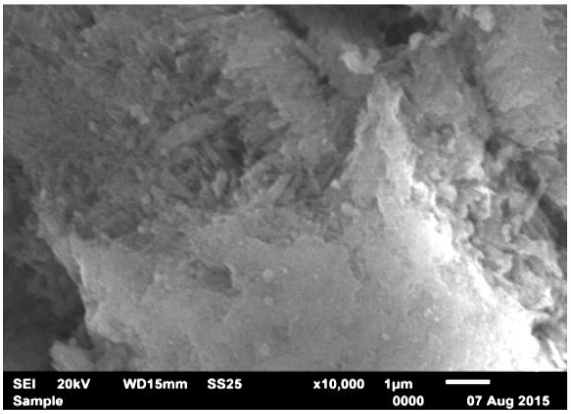
Morfologi Zeolit Alam Ende

Berdasarkan hasil *scanning*, maka diperoleh Gambaran mengenai morfologi dari zeolit alam Ende dengan pembesaran 10.000 kali yang ditunjukkan oleh **Gambar 3**.



Gambar 3. Mikrograf zeolit alam Ende

Mikrograf permukaan zeolit alam Ende menunjukkan morfologi permukaan zeolit alam yang tidak seragam dengan karakter rapuh dan amorf, serta permukaan porinya masih tertutup oleh pengotor berupa gumpalan-gumpalan kecil berwarna kelabu. Tidak tampaknya pori pada permukaan zeolit juga dapat mengindikasikan bahwa jenis zeolit tersebut masih ditutupi oleh pengotor sebagaimana pada hasil analisis XRD sebelumnya. Setelah proses aktivasi zeolit dilakukan, maka dilakukan lagi *scanning* dengan menggunakan SEM. Morfologi zeolit alam Ende setelah diaktivasi dengan pembesaran 10.000 kali ditunjukkan pada **Gambar 4.**



Gambar 4. Mikrograf ZAA Ende

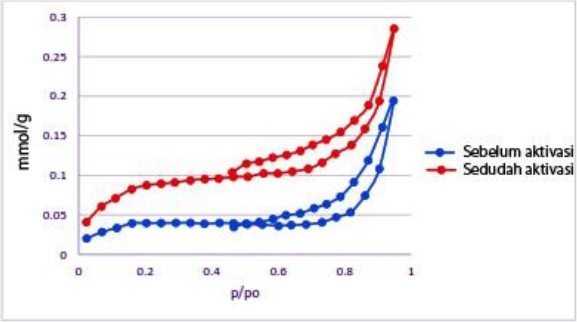
Morfologi zeolit alam aktif menunjukkan penampakan pori yang telah terbuka. Penampakan morologi yang lebih kasar ini, juga dapat menandakan secara kualitatif bahwa aktivasi memodifikasi ukuran pori zeolit alam Ende.

Penampakan permukaan yang terdispersi cahaya berwarna putih menunjukkan ion Hidrogen (H^+) yang berasal dari proses dekationisasi oleh Amonium (NH_4^+) [19]. Namun demikian, penampakan morfologi permukaan tidak seragam dengan penyebaran pori yang tidak merata dan penyebaran ion H^+ yang bertitik pada daerah tertentu saja. Pola permukaan zeolit yang tidak seragam dapat dipahami karena zeolit alam Ende merupakan mineral poli kristal yang mempunyai orientasi yang acak dengan kemungkinan munculnya bidang yang sama pada satu arah kristal tertentu, sehingga lapisan kristal menjadi saling tumpang tindih secara acak. Penyebaran dispersi ion H^+ yang tidak merata diperkirakan karena penerapan waktu refluks dan konsentrasi larutan prekursor (NH_4Cl) yang belum sesuai dengan karakteristik zeolit alam Ende. Berdasarkan hal ini, maka dikhawatirkan akan berakibat pada aktivitas katalitik zeolit dalam mendistribusikan produk tidak optimal.

Luas Permukaan, Volume Pori dan Jejari Pori Zeolit Alam Ende

Data hasil analisis BET zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan **Gambar 5** di atas, maka diketahui pengecilan ukuran zeolit alam Ende mencapai ± 100 mesh menghasilkan luas permukaan sebesar 53,17 m^3/g, jejari rata-rata 19,96Å dan volume pori 52 cm^3/g. Untuk zeolit alam aktif Ende menunjukkan bahwa luas permukaan berubah

menjadi 74,57 m^2/g, jejari rata-rata 20,21Å dan volume pori 72,34 cc/g. Berdasarkan hasil analisis BET, juga diketahui secara kuantitatif aktivasi berhasil merubah zeolit menjadi zeolit mesopori (ukuran pori 2 – 50 nm) [20].



Gambar 5. Hasil BET Zeolit alam sebelum dan sesudah aktivasi

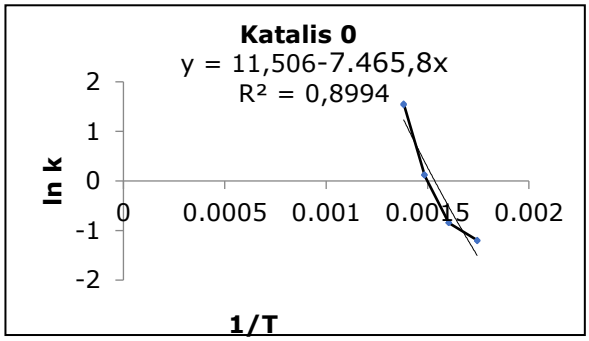
Keasaman Total

Hasil analisis keasaman zeolit alam Ende, diketahui jumlah situs asam total yang berada dalam mineral zeolit alam Ende berkisar ± 1,456 NH_3/g zeolit. Hasil analisis keasaman zeolit alam aktif Ende menunjukkan bahwa jumlah situs asam total yang berada dalam zeolit adalah ±4,342 NH_3/g zeolit. Peningkatan keasaman zeolit ini diharapkan dapat menambah kereaktifitan dari zeolit.

2. Energi Aktivasi

Tanpa Katalis Pirolisis Polietilena dari Sampah Plastik

Berdasarkan data pengamatan, maka hasil analisis korelasi dan regresi waktu dan volume cairan dari setiap perlakuan suhu, maka didapatkan grafik hubungan ln k dan 1/T untuk pirolisis plastik seperti ditunjukkan pada **Gambar 6**.

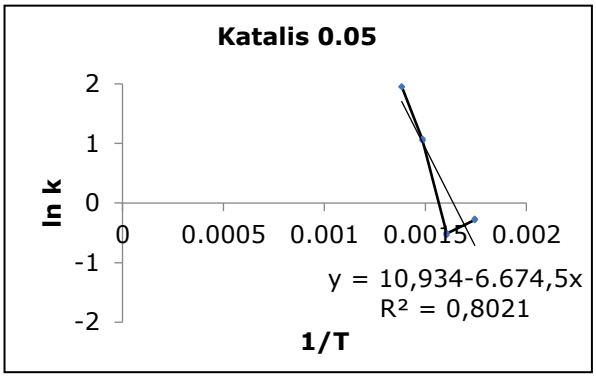


Gambar 6. Grafik hubungan ln k *vs* 1/T tanpa katalis

Besar energi aktivasi (Ea) pirolisis polietilena dari sampah plastik sebesar 14.827,08 cal/mol. Konstanta laju reaksi pirolisis tanpa katalis dimulai pada waktu 2,44 menit pada setiap perlakuan suhu. Data percobaan ini dijadikan kontrol untuk mengetahui pengaruh katalis terhadap energi aktivasi pirolisis polietilena dari sampah plastik.

Energi Aktivasi Dengan Katalis 0,05

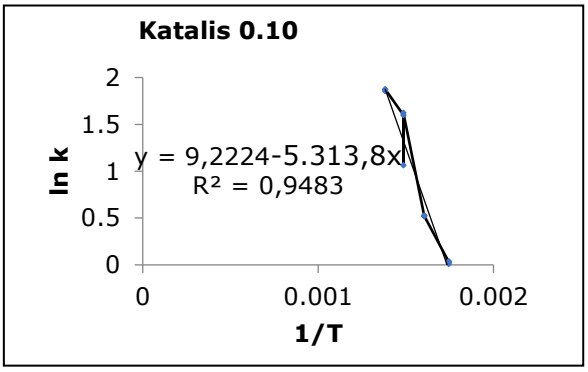
Berdasarkan hasil korelasi dan regresi waktu dan volume untuk pirolisis dengan perlakuan komposisi katalis dan plastik 0,05 : 1, maka didapatkan grafik hubungan ln k dan 1/T untuk pirolisis plastik seperti ditunjukkan pada **Gambar 7.**



Gambar 7. Grafik hubungan ln k *vs* 1/T dengan katalis 0,05

Besar energi aktivasi (Ea) pirolisis polietilena pada perbandingan 0,5 : 1 katalis dan plastik sebesar 13.255,56 cal/mol. Sehingga penggunaan katalis pada perbandingan 0,5 : 1 dapat menurunkan 1.571,52 cal/mol energi aktivasi pada pirolisis polietilena dari sampah plastik. Konstanta laju reaksi pirolisis katalitik pada perbandingan 0,05 dimulai pada waktu 2,33 menit pada setiap perlakuan suhu, maka diketahui pula bahwa perbandingan katalis 0,05 mempercepat waktu reaksi sebesar 0,11 menit.

Energi Aktivasi dengan Katalis 0,10)



Gambar 8. Grafik hubungan ln k *vs* 1/T untuk katalis 0,10

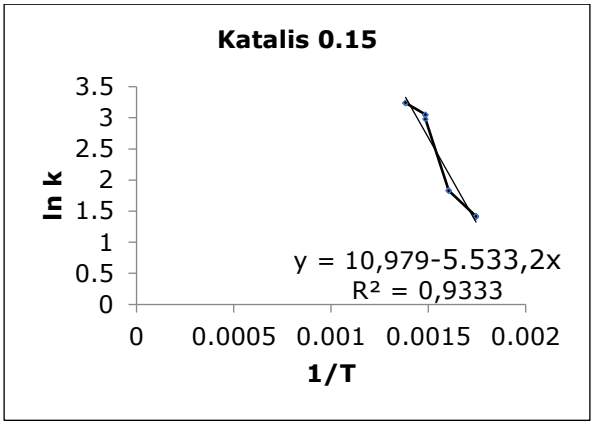
Berdasarkan hasil korelasi dan regresi waktu dan volume cairan untuk perlakuan komposisi katalis dan plastik 0,10 : 1, maka didapatkan grafik hubungan ln

k dan 1/T untuk pirolisis plastik seperti ditunjukkan pada **Gambar 8**.

Energi aktivasi pirolisis polietilena pada perbandingan 0,10 : 1 katalis dan plastik sebesar 10.455,98 cal/mol. Sehingga penggunaan katalis pada perbandingan 0,10 : 1 dapat menurunkan 4.371,1 cal/mol energi aktivasi pirolisis polietilena dari sampah plastik. Konstanta laju reaksi pirolisis katalitik pada perbandingan 0,10 dimulai pada waktu 2,22 menit pada setiap perlakuan suhu, maka diketahui pula bahwa perbandingan katalis 0,10 mempercepat waktu reaksi sebesar 0,22 menit.

Energi Aktivasi dengan Katalis 0,15

Berdasarkan hasil korelasi dan regresi waktu dan volume cairan untuk perlakuan komposisi katalis dan plastik 0,15 : 1, maka didapatkan grafik hubungan ln k dan 1/T untuk pirolisis plastik seperti ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Grafik hubungan ln k *vs* 1/T untuk katalis 0,15

Melalui persaman regresi ln k dan 1/T di atas, maka energi aktivasi (Ea) pirolisis polietilena pada perbandingan 0,15 : 1 katalis dan plastik sebesar 10.889,34 cal/mol. Sehingga pengunaan katalis pada perbandingan 0,15 : 1 dapat menurunkan 3.197,74 cal/mol energi aktivasi pada pirolisis polietilena dari sampah plastik. Konstanta laju reaksi pirolisis katalitik pada perbandingan 0,15 dimulai pada waktu 2,39 menit pada setiap perlakuan suhu, maka diketahui pula bahwa perbandingan katalis 0,15 mempercepat waktu reaksi sebesar 0,05 menit.

Berdasarkan hasil perhitungan energi aktivasi pada perbadingan katalis 0,15, diketahui bahwa katalis pada perbandingan 0,15 sudah menunjukkan gejala sebagai inhibitor atau menurunkan laju reaksi perengkahan, apabila dibandingkan dengan analisis pada perbandingan 0,05 dan 0,10.

3. Kualitas Cairan Pirolisis

Viskositas Cairan Pirolisis

Hasil uji terhadap nilai viskositas dari cairan hasil pirolisis disajikan pada **Tabel 1** di bawah ini:

Tabel 1. Hasil Analisis Uji Viskositas Minyak Pirolisis

Sampel	Viskositas (cP)	Sampel	Viskositas (cP)
T_1K_0	2,3316	T_1K_2	0,9678
T_2K_0	2,0112	T_2K_2	0,8222
T_3K_0	1,8232	T_3K_2	0,6111
T_4K_0	1,2112	T_4K_2	0,4721
T_1K_1	1,0345	T_1K_3	0,8126
T_2K_1	0,9222	T_2K_3	0,8142
T_3K_1	0,7214	T_3K_3	0,6821
T_4K_1	0,6321	T_4K_3	0,4622

Berdasarkan data viskositas pada **Tabel 1** di atas, diketahui bahwa penggunaan katalis zeolit alam Ende mampu menurunkan viskositas 2,3316 – 1,2212cP menjadi 1,0345 – 0,6321cP di perbandingan 0,5 : 1, 0,9678 – 0,4721cP di perbandingan 0,10 : 1, 0,8126 – 0,4622cP di perbandingan 0,15 : 1 katalis dan plastik pada perlakuan suhu 300° – 450°C. Sehingga disimpulkan bahwa angka viskositas cairan pirolisis polietilena semakin baik seiring dengan peningkatan jumlah katalis dan kenaikan suhu.

Densitas Cairan Pirolisis

Nilai densitas merupakan indikator banyaknya zat-zat pengotor seperti sabun dan gliserol hasil reaksi penyabunan, air dan asam lemak yang tidak terkonversi dalam proses perengkahan plastik. Hasil pengamatan densitas untuk cairan dari masing-masing perlakuan sampel disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Analisis Uji Densitas Minyak Pirolisis

Sampel	Densitas (g/ml)	Sampel	Densitas (g/ml)
T_1K_0	0,79267	T_1K_2	0,78660
T_2K_0	0,77061	T_2K_2	0,76211
T_3K_0	0,75621	T_3K_2	0,70001
T_4K_0	0,75201	T_4K_2	0,60601
T_1K_1	0,79083	T_1K_3	0,78201
T_2K_1	0,76607	T_2K_3	0,75801
T_3K_1	0,73201	T_3K_3	0,67531
T_4K_1	0,70201	T_4K_3	0,60404

Nilai densitas berbanding lurus dengan nilai viskositas, yang di mana nilai densitas juga akan

menurun apabila nilai viskositas menurun [21]. Penggunaan katalis zeolit alam Ende menurunkan nilai densitas dari 0,79267 – 0,75201g/ml menjadi 0,79083 – 0,70201g/ml di perbandingan 0,5 : 1, 0,78660 – 0,60601g/ml di perbandingan 0,10 : 1, 0,78201 – 0,60404g/ml di perbandingan 0,15 : 1 katalis dan plastik pada perlakuan suhu 300° – 450°C.

Komponen Senyawa

Identifikasi kandungan senyawa dalam minyak pirolisis dilakukan dengan analisis GC-MS untuk mengetahui komponen utama penyusun senyawa dari masing-masing sampel percobaan. Kromatogram GC-MS mengenai jenis senyawa utama dari cairan pirolisis pada masing-masing perlakuan sampel dirangkum pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Analisis Kromatografi Minyak Pirolisis

Sampel	$C_5 – C$ (%)	$C_9 – C_1$ (%)	Sampel	$C_5 – C$ (%)	$C_9 – C_1$ (%)
T_1K_0	0,55	72,81	T_3K_0	1,88	81,96
T_1K_1	12,56	74,95	T_3K_1	13,70	81,50
T_1K_2	7,32	72,51	T_3K_2	9,45	80,06
T_1K_3	7,38	89,34	T_3K_3	9,08	81,64
T_2K_0	1,66	77,57	T_4K_0	3,57	74,09
T_2K_1	11,45	74,95	T_4K_1	6,68	84,47
T_2K_2	9,40	74,38	T_4K_2	6,65	89,42
T_2K_3	7,95	74,87	T_4K_3	6,34	89,61

Pirolisis pada suhu 300°C katalis zeolit alam Ende mampu mengubah 0,55% fraksi bensin dan 72,81% fraksi paraffin dari pirolisis tanpa katalis menjadi 12,56% fraksi bensin dan 74,95% fraksi paraffin di perbandingan 0,5 : 1; 7,32% fraksi bensin dan 72,51% fraksi paraffin di perbandingan 0,10 : 1; dan 7,38% fraksi bensin dan 89,34% di perbandingan 0,15 : 1 katalis dan plastik. Pada suhu 350°C katalis zeolit alam Ende mengubah 1,66% fraksi bensin dan 77,57% fraksi paraffin dari pirolisis tanpa katalis menjadi 11,45% fraksi bensin dan 74,95% fraksi paraffin di perbandingan 0,5 : 1; 9,40% fraksi bensin dan 74,28% fraksi paraffin di perbandingan 0,10: 1; dan 7,95% fraksi bensin dan 74,87% fraksi paraffin pada perbandingan 0,15 : 1 katalis dan plastik. Pada suhu 400°C katalis zeolit alam Ende mampu mengubah 1,88% fraksi bensin dan 81,96% fraksi paraffin dari pirolisis tanpa katalis menjadi 13,70% fraksi bensin dan 81,50% fraksi paraffin di perbandingan 0,5 : 1; 9,45% fraksi bensin dan 80,06% fraksi paraffin di perbandingan 0,10 : 1; dan 9,08% fraksi bensin dan 81,64% fraksi paraffin di perbandingan 0,15 : 1 katalis dan plastik. Pada suhu 450°C katalis zeolit alam Ende mampu mengubah 3,57% fraksi bensin dan 74,09% fraksi paraffin dari pirolisis tanpa katalis menjadi 6,68% fraksi bensin dan 84,47% fraksi paraffin di perbandingan 0,5 : 1, 6,65% fraksi bensin dan 89,42% fraksi paraffin di perbandingan 0,10: 1 dan 6,34% fraksi bensin dan 89,61% fraksi paraffin pada perbandingan 0,15 : 1 katalis dan plastik. Pirolisis tanpa katalis hanya menghasilkan sedikit senyawa hidrokarbon dan penggunaan katalis zeolit menjadikan reaksi pemotongan rantai molekul plastik terjadi secara acak, sehingga menghasilkan fraksi-fraksi molekul dengan aneka berat molekul (distribusi variasi molekul yang lebar) yang tidak tetap.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dipaparkan sebelumnya, maka terdapat beberapa pokok penting yang disimpulkan dari penelitian ini, antara lain: (1) Proses aktivasi dapat merubah sifat kimia dan sifat fisika zeolit alam Ende meliputi kristalinitas, luas permukaan, volume pori dan jejari pori, serta keasamannya untuk dijadikan sebagai katalis. (2) Katalis zeolit alam aktif Ende pada proses pirolisis polietilena dari sampah plastik mampu menurunkan energi aktivasi hingga 4.371,1 cal/mol pada perlakuan komposisi katalis 0,10. (3) Suhu operasi pirolisis di atas 400°C adalah perlakuan suhu terbaik yang sangat mempengaruhi waktu, volume dan kualitas cairan pirolisis polietilena dari sampah plastik. (4) Komposisi 0,10 merupakan komposisi terbaik dari penggunaan zeolit alam aktif Ende sebagai katalis dalam proses pirolisis polietilena dari sampah plastik. (5) Interaksi terbaik antara suhu dan katalis zeolit alam aktif Ende adalah pada perlakuan suhu 400°C dan komposisi katalis 0,10.

ACKNOWLEDGMENTS

DAFTAR PUSTAKA

[1] 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," *Environmental Research*, vol. 216, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2022.114681.

[2] 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 - Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 455–468, 2001.

[3] 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," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 414–439, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.04.109.

[4] M. Syamsiro, "Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk," *Teknik*, vol. 5, no. 1, pp. 1–85, 2015.

[5] N. Nasrun, E. Kurniawan, and I. Sari, "Studi Awal Produksi Bahan Bakar Dari Proses Pirolisis Kantong Plastik Bekas," *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, vol. 5, no. 1, p. 30, 2017, doi: 10.29103/jtku.v5i1.77.

[6] S. Naimah *et al.*, "Dekomposisi Limbah Plastik Polypropylene Dengan Metode Pirolisis," *Jurnal Sains Materi Indonesia Indonesian Journal of Materials Science*, vol. 13, no. 3, pp. 226–229, 2012.

[7] A. S. Nugroho, "Pengolahan Limbah Plastik Ldpe Dan Pp Untuk Bahan Bakar Dengan Cara Pirolisis," *Jurnal Litbang Sukowati : Media Penelitian dan Pengembangan*, vol. 4, no. 1, p. 10, 2020, doi: 10.32630/sukowati.v4i1.166.

[8] R. Harlivia, T. Tahdid, and S. E. A., "Pengaruh Persen Katalis Zeolit Alam Terhadap Yield Bahan Bakar Cair Proses Pirolisis dari Limbah Plastik Polypropylene," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 2, no. 11, pp. 453–459, 2022, doi: 10.52436/1.jpti.241.

[9] Rio Nazif, Erlangga Wicaksana, and Halimatuddahliana, "Pengaruh Suhu Pirolisis Dan Jumlah Katalis Karbon Aktif Terhadap Yield Dan Kualitas Bahan Bakar Cair Dari Limbah Plastik Jenis Polipropilena," *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 5, no. 3, pp. 49–55, 2016, doi: 10.32734/jtk.v5i3.1545.

[10] Sukaesih, "Analisis Fasies dan Lingkungan Pengendapan Seminar Nasional Fakultas Teknik Geologi , Bandung 24 Mei 201," in *Seminar Nasional Fakultas Teknik Geologi , Bandung 24 Mei 2014*, Bandung, 2014, pp. 374–387.

[11] Carvallo Ludovicus Wolo, D., Ngapa Yuliuis Dala, "Potensi Zeolit Alam Ende Sebagai Bahan Aditif Semen Untuk Meningkatkan Kuat Tekan Beton," *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, vol. 3, no. Vol. 3 No. 1 (2019): Jurnal Dinamika Sains, pp. 34–41, 2019.

[12] 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," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 22, no. 1, pp. 18–28, 2021.

[13] T. Kurniawan and M. Adha Firdaus, "Zeolite for Agriculture Intensification and Catalyst in Agroindustry ARTICLE HISTORY ABSTRACT," *World Chemical Engineering Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 14–23, 2019.

[14] Abdullah *et al.*, "Pyrolysis of palm oil using zeolite catalyst and characterization of the boil-oil," *Green Processing and Synthesis*, vol. 8, no. 1, pp. 649–658, 2019, doi: 10.1515/gps-2019-0035.

[15] S. Arita, A. Assalami, and D. I. Naibaho, "Proses Pembuatan Bahan Bakar Cair Dengan Menggunakan Katalis Zeolit," *Teknik Kimia*, vol. 21, no. 2, pp. 8–14, 2015.

[16] M. Faradika, S. Sugiarti, and P. Sugita, "Potensi Zeolit Alam Ende-NTT sebagai Katalis Transformasi Senyawa Gula Menjadi 5-Hidroksimetilfurfural (HMF)," *Jurnal Kimia Valensi*, vol. 5, no. 1, pp. 15–22, 2019, doi: 10.15408/jkv.v1i1.8174.

[17] D. Hermaw, A. Hardianto, P. Suwandon, and F. Rahmadianto, "Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Energi Aktivasi Pada Tar Limbah Plastik," *Prosiding SENIATI*, vol. 5, no. 4, pp. 354–360, 2019.

[18] P. E. Suryani, "Aplikasi Metode Aktivasi Secara Kimia Pada Zeolit Alam Sebagai Penjerap Logam dalam Proses Pemurnian Air," *Simetris*, vol. 13, no. 2, pp. 43–46, 2021.

[19] L. M. Estiaty, "Sintesis dan Karakterisasi Zeolit-TiO2 dari Zeolit Alam Termodifikasi," *Teknologi Mineral dan Batubara Volume*, vol. 11, no. 3, pp. 181–190, 2015.

[20] F. L. Rahayu, R. N. A*, and Linda Suyatia, "Pengaruh Diameter Kanal Pelet Katalis Zeolit Aktif dan Ni-Zeolit," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 16, no. 1, pp. 33–37, 2013.

[21] I. Permanadewi, A. C. Kumoro, D. H. Wardhani, and N. Aryanti, "Analysis of Temperature Regulation, Concentration, and Stirring Time at Atmospheric Pressure to Increase Density Precision of Alginate Solution," *Teknik*, vol. 42, no. 1, pp. 29–34, 2021, doi: 10.14710/teknik.v42i1.35994.

AUTHOR'S DECLARATION

Authors' contributions and responsibilities

All authors contribute equally.

Funding

No funding.

Availability of data and materials

All data are available from the authors.

Competing interests

The authors declare no competing interest.

Additional information

Supplementary information about XRD Interpretation of Natural Ende Zeolite can be downloaded from the journal website.