

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

Gregorio Antonny Bani^{1*}

¹Universitas Aryasatya Deo Muri, Kota Kupang, Indonesia

Corresponding Author:
Gregorio Antonny Bani
greg.antonny@yahoo.com

Received: July 2023
Accepted: September 2023
Published: September 2023

©Gregorio Antonny Bani et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract

Pyrolysis is one way to minimise plastic waste. This process requires a catalyst such as zeolite. Natural zeolite needs to be activated to increase its catalytic activity. Therefore, this research was carried out by activating Ende's natural zeolite using 1% hydrofluoric acid (HF), 6M hydrochloric acid (HCl), and 1M ammonium chloride (NH₄Cl) to be used as catalysts in the pyrolysis of polyethylene from plastic waste. Pyrolysis was carried out at operating temperatures of 300 °C, 350 °C, 400 °C, and 450 °C, and treated with a catalyst composition of 0%, 5%, 10%, and 15% from 1000 grams of polyethylene. Based on the results of the study, it was concluded that activation of Ende's natural zeolite could change the chemical and physical properties of Ende's natural zeolite, including crystallinity, surface area, pore volume, and pore radius, and acidity to serve as a catalyst. Treatment of 10% catalyst from 1000 mg of plastic at an operating temperature of 400°C reduced the activation energy to 4.371.1 cal/mol and produced 80% more paraffin fraction in polyethylene pyrolysis oil from plastic waste.

Keywords: *zeolites, pyrolysis, catalysts, polyethylene.*

Pendahuluan

Penggunaan plastik dalam kehidupan sehari-hari manusia modern terus meningkat, karena plastik merupakan material yang ringan, kuat dan murah. 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 (TPA) sampah. 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 karena menimbulkan polutan (CO, CO₂, 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 sedikit dari jumlah total sampah yang ada di TPA^[3].

Pirolisis merupakan salah satu cara untuk yang dapat meminimalisir sampah plastik, yaitu dengan mengubah plastik menjadi hidrokarbon cair yang dapat diubah menjadi fraksi minyak tanah, bensin dan bahan kimia lain sebagai sumber energi^[4]. Keuntungan metode ini dapat mengurangi pencemaran udara akibat proses pembakaran sampah, dikarenakan asap hasil pembakaran sampah dikonversi menjadi bahan bakar^[5]. Permasalahan yang ditemukan dalam proses pirolisis biasanya meliputi: (1) sulit mendistribusikan produknya, (2) butuh temperatur yang tinggi (500 – 900°C), (3) waktu yang lama (1 – 7 jam), dan (4) produk yang dihasilkan sedikit^{[6],[7]}. Oleh karena itu, penggunaan katalis sangat dibutuhkan untuk mengefisiensi penggunaan energi dalam

pirolisis. Adanya katalis mempengaruhi faktor-faktor kinetik suatu reaksi seperti laju reaksi, energi aktivasi, sifat dasar keadaan transisi dan lain-lain^[8].

Salah satu katalis yang paling baik dalam pirolisis adalah zeolit^[9]. Pulau Flores Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT), memiliki cadangan zeolit alam yang cukup besar, dengan jumlah deposit zeolit terbanyak berada di Kabupaten Ende, yaitu sekitar 6.115.000 ton^[10],^[11]. Zeolit alam di Indonesia umumnya memiliki kadar rasio Si/Al, ukuran pori dan luas permukaan yang sangat tidak seragam, aktivitas katalitiknya rendah, mengandung banyak pengotor, serta derajat kristalinitas yang rendah karena sangat bergantung pada lokasi pembentukannya, sehingga zeolit alam perlu diaktivasi terlebih dahulu agar memiliki sifat seperti zeolit sintesis Zeolite Socony Mobile (ZSM)^[12].

Pirolisis minyak kelapa sawit dengan menggunakan katalis zeolit menunjukkan bahwa zeolit yang diaktivasi dengan menggunakan larutan asam (HCl) memiliki ukuran pori yang lebih besar, sehingga menghasilkan minyak nabati dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan zeolit yang diaktivasi dengan menggunakan larutan basa (NaOH)^[13]. Dalam pirolisis, diketahui juga bahwa zeolit mampu mengkonversi hingga 80% polistirena dari ban bekas menjadi hidrokarbon jenis premium^[14]. Uji yang sama pada reaksi pirolisis propilena dengan menggunakan zeolit alam Aceh menghasilkan konversi hidrokarbon bensin sebesar 96.71%^[15]. Zeolit alam Sukabumi menghasilkan konversi hidrokarbon bensin sebesar 66.71% pada pirolisis polietilena^[16]. Oleh karena itu, dapat dikatakan juga bahwa aktivitas zeolit alam sebagai katalis juga sangat bergantung pada karakteristiknya dan jenis bahan yang dikatalisis.

Penelitian mengenai katalis dari zeolit alam Ende sejauh ini masih terbatas untuk menguji uji aktivitas katalitiknya dalam mengkonversi fruktosa menjadi HMF^[17]. Oleh karena itu, perlu juga dilakukan pengujian mengenai aktivitas katalis zeolit alam Ende dalam pirolisis polietilena dari sampah plastik.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mengkarakterisasi zeolit alam Ende menjadi katalis pada pirolisis polietilena dari sampah plastik; mengetahui pengaruh katalis zeolit alam Ende terhadap energi aktivasi pirolisis polietilena dari sampah plastik; mengetahui pengaruh katalis pada kualitas cairan hasil pirolisis polietilena dari sampah plastik.

Metodologi Penelitian

Bahan kimia

Zeolit alam Ende, aquades, asam fluorida (HF) 1%, asam klorida (HCl) 6 M, amonium klorida (NH₄Cl) 1 M, gas nitrogen (N₂), gas amonia (NH₃), polietilena dari Sampah Plastik.

Peralatan

Peralatan gelas, ayakan ukuran 100 mesh, kertas saring, oven, cawan porselen, pH meter, magnetic stirrer, tanur, reaktor pirolisis kapasitas 1000 gram, stopwatch, desikator, termokopel, viskometer, pignometer, X-Ray Diffractometer (XRD) Shimadzu 6000, Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS) Shimadzu QP-2010s, Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL JSM-6360 LA, Gas Sorption Analyzer (GSA) NOVA 1200e.

Prosedur penelitian

Preparasi Zeolit Alam Ende

Sampel zeolit alam Ende digerus dengan menggunakan cawan porselen, lalu kemudian diayak dengan ayakan ukuran 100 mesh. Bubuk zeolit alam Ende yang diperoleh kemudian dicuci dengan aquades dan dipisahkan lagi dengan menggunakan kertas saring, lalu 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.

Bubuk zeolit alam Ende direndam ke dalam larutan asam fluoride (HF) 1% dengan rasio 1: 2 selama 10 menit, dan dipisahkan lagi dengan kertas saring dan dicuci lagi dengan aquades. Setelah itu, sampel direndam lagi ke dalam larutan asam klorida (HCl) 6 M dan direfluks selama 30 menit pada suhu 90 °C. Setelah

direfluks, rendaman dibiarkan semalam dan dipisahkan lagi dengan kertas saring, lalu dicuci lagi dengan akuades. Berikutnya sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 130 °C selama 1 jam untuk menghilangkan air yang masih tersisa, dan dilanjutkan lagi dengan perendaman dalam larutan ammonium klorida (NH₄Cl) 1 M dengan rasio 1: 2 pada suhu 90 °C selama 3 jam per hari sampai satu minggu dan mendapatkan zeolit alam aktif Ende. Serbuk zeolit alam aktif Ende dipisahkan lagi dengan kertas saring, lalu dikalsinasi selama 4 jam pada suhu 500 °C dengan gas nitrogen (N₂) di dalam tanur [18];[19];[20]. Zeolit Alam Aktif Ende dikarakterisasi lagi meliputi kristalinitas, morfologi, luas permukaan, ukuran pori, jari-jari pori dan keasamannya.

Preparasi Plastik

Plastik dipilih berdasarkan lambang yang bertuliskan PE (Polietilena) pada bagian bawah plastik tersebut, kemudian dipotong menjadi ukuran ±1 cm² sebanyak 1000 gram untuk setiap perlakuan pirolisis.

Pirolisis Plastik Polietilena

Plastik polietilena yang sudah disiapkan, dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 1000 gram, lalu proses pirolisis dijalankan pada temperatur 300 °C sambil menyalakan stopwatch. Waktu awal perengkahan dicatat ketika minyak pertama kali diteteskan, dan penampung minyak diganti pada setiap interval waktu 10 menit, serta volume minyaknya diukur. Pirolisis dihentikan saat minyak tidak lagi menetes, lalu waktunya dicatat sebagai akhir perengkahan. Proses kembali diulang pada suhu 350 °C, 400 °C dan 450 °C. Minyak hasil pirolisis dianalisis meliputi viskositas, densitas dan komponen senyawa penyusunnya. Semua prosedur tanpa katalis diulangi lagi dengan menggunakan katalis dengan perbandingan komposisi 5%, 10%, dan 15% dari 1000 gram plastik polietilena. Minyak hasil pirolisis dengan katalis dianalisis lagi meliputi viskositas, densitas dan komponen senyawa penyusunnya^[21].

Karakterisasi Zeolit Alam Ende

Karakterisasi meliputi kristalinitas dan morfologi mineral, luas permukaan dan keasaman permukaan. Kristalinitas diukur dengan menggunakan XRD dengan panjang gelombang 1.5000 Å dari radiasi tabung target Cu dengan tegangan 30 kV dan arus 30 mA pada daerah pengamatan antara 10 – 90°. Analisis secara kualitatif dilakukan dengan membandingkan nilai d (Å) dari difraktogram sampel dengan nilai d (Å) difraktogram standar dari International Centre for Diffraction Data (ICDD) Zeolit. Analisis kuantitatif diperoleh dengan membandingkan daerah difraktogram setiap sampel dengan data difraktogram zeolit standar, sehingga diperoleh nilai I/II [22];[23]. Morfologi diamati dengan SEM. Luas permukaan, jejari dan volume pori dengan menggunakan GSA, dan keasaman katalis ditentukan dengan metode Gravimetri.

Karakterisasi Minyak Pirolisis

Karakterisasi cairan hasil pirolisis sangat penting untuk dilakukan agar dapat mengetahui kemampuan dan pengaruh katalis terhadap kualitas cairan yang dihasilkan. Karakterisasi meliputi uji viskositas dengan menggunakan viskometer, densitas dengan menggunakan pignometer dan identifikasi senyawa dalam cairan hasil pirolisis dengan menggunakan GC-MS.

Analisis Data

Penelitian ini disusun dengan menggunakan 2 faktor, yaitu faktor pertama (T) = suhu pirolisis dengan 4 taraf T₁, T₂, T₃, T₄; faktor kedua (K) perbandingan katalis dan plastik dengan 4 taraf K₀, K₁, K₂, K₃. Kombinasi Perlakuan Penelitian adalah T₁K₀, T₂K₀, T₃K₀, T₄K₀, T₁K₁, T₂K₁, T₃K₁, T₄K₁, T₁K₂, T₂K₂, T₃K₂, T₄K₂, T₁K₃, T₂K₃, T₃K₃, T₄K₃.

Keterangan: T₁: Suhu 300 °C; T₂: Suhu 350 °C; T₃: Suhu 400 °C; T₄: Suhu 450 °C; K₀: Tanpa Katalis; K₁: 5% katalis dari 1000 gram plastik; K₂: 10% katalis dari 1000 gram plastik; K₃: 15% katalis dari 1000 gram plastik.

Data pengamatan waktu perengkahan dan volume cairan yang dihasilkan untuk masing-masing perlakuan diolah dengan menggunakan analisis regresi, lalu diterapkan ke dalam persamaan Arrhenius dengan cara membuat grafik hubungan antara $\ln(k)$ dengan $1/T$ solid untuk mengetahui besaran energi aktivasi dari setiap perlakuan katalis dan suhu operasi pirolisis, yaitu:

$$k = k_0 \cdot \exp^{-E/RT}$$

dimana, k: konstanta laju reaksi; k_0 : konstanta (tidak tergantung pada suhu); E: energi aktivasi; T: suhu mutlak (K) reactor; R: konstanta gas, 1.986 kal/mol

Diubah menjadi $\ln k = \ln k_0 - \left[\frac{E}{RT}\right] \frac{1}{T}$, sehingga $Y = a + bX$ berubah menjadi $Y = \ln k_0 - \left[\frac{E}{RT}\right] \frac{1}{T}$

Dimana: $Y = \ln k$; $bX = -\left[\frac{E}{RT}\right] \frac{1}{T}$; $a = \ln k_0$; $x = 1/T$

Sehingga: $b = (E/R)$; $E = b \cdot R$; $A = \exp(b)$ [24]

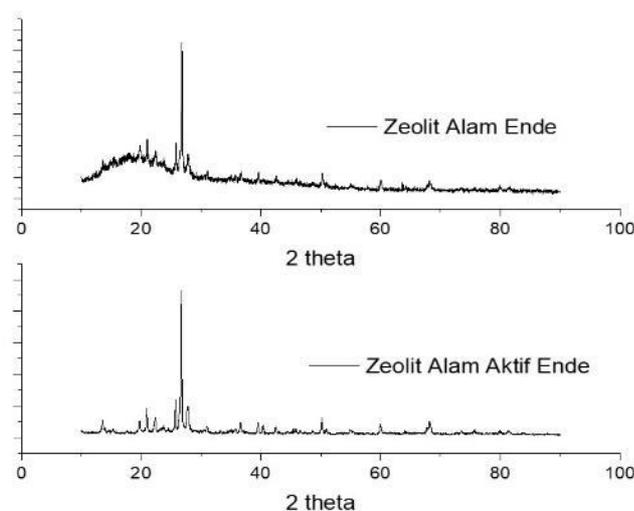
Hasil dan Diskusi

Karakteristik Zeolit Alam Ende Sebelum dan Sesudah Aktivasi

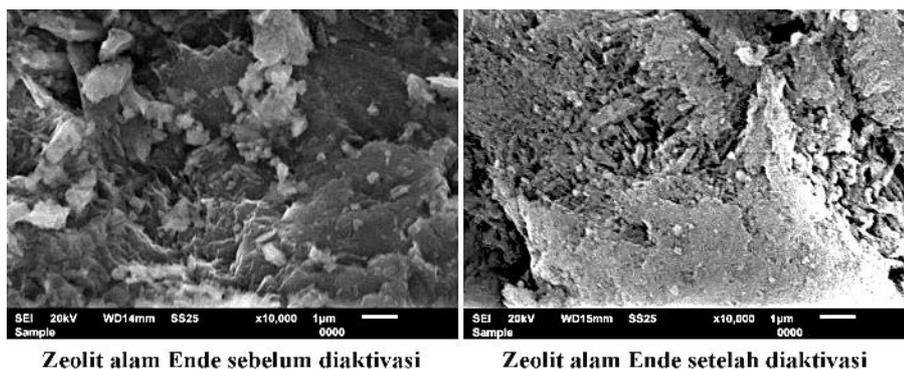
Difraktogram zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi ditunjukkan pada Gambar 1.

Berdasarkan hasil analisis kualitatif dan kuantitatif, maka diketahui bahwa zeolit alam Ende memiliki 38 puncak khas penyusun mineral, yaitu kuarsa α 49.30% (d (Å): 3.443; 2.446; 2.231; 2.121; 1.971; 1.813; 1.788; 1.667; 1.539; 1.460; 1.381; 1.373; 1.367; 1.199), mordenite 13.24% (d (Å): 4.885; 3.755; 3.282; 3.273; 3.240; 3.203), klinoptilolit 17.74% (d (Å): 3.959; 3.834; 3.374; 3.730; 3.441), skolecit 9.57% (d (Å): 4.472; 4.409; 4.218), laumontit 3.94% (d (Å): 6.469; 4.821; 3.799), erionit 2.53% (d (Å): 5.737; 4.985), natrolit 2.53% (d (Å): 4.099; 2.876), dan heulandit 1.13% (d (Å): 5.954). Diketahui juga zeolit alam Ende 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 katilistik zeolit [25].

Amorf terbentuk karena proses pendinginan yang terlalu cepat dalam proses pembentukan sebuah kristal yang menjadikan atom-atom belum menempati lokasi kisinya dengan tepat dalam struktur Kristal [26]. Oleh karena itu, impuritas amorf sebagai pengotor dalam kerangka zeolit perlu dibersihkan dengan cara menata kembali susunan atomnya melalui proses aktivasi, sehingga dapat meningkatkan kristalinitas zeolit tersebut.



Gambar 1. Difraktogram zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi.



Zeolit alam Ende sebelum diaktivasi

Zeolit alam Ende setelah diaktivasi

Gambar 2. Hasil Analisis SEM zeolit alam Ende sebelum dan sesudah diaktivasi.

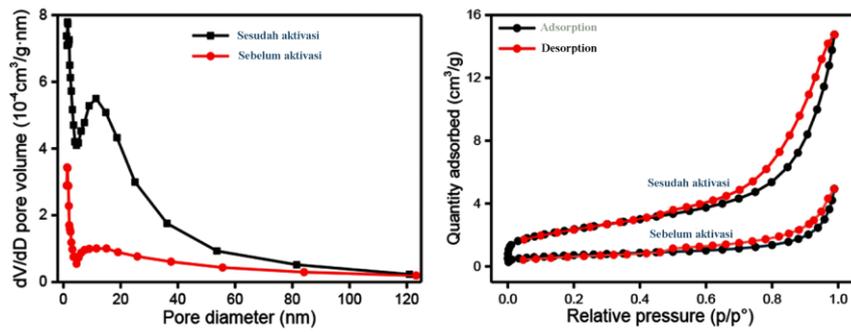
Proses aktivasi dilakukan dengan larutan asam fluoride (HF) untuk melarutkan silika (Si) pada kerangka bagian luar dan dilanjutkan dengan larutan asam klorida (HCl) untuk menarik keluar sebagian besar alumina (Al) dan ion alkali/alkali tanah (Na^+ , K^+ , dll) yang menjadi pengotor dari kerangka bagian dalam zeolit, serta menata kembali letak atom di dalam kerangka zeolit. Kemudian dilanjutkan penggunaan amonium klorida (NH_4Cl) untuk mengisi kembali kekurangan kation di dalam rongga zeolit akibat perlakuan dengan asam klorida (HCl)^{[27];[28]}. Lalu dilanjutkan lagi dengan proses kalsinasi pada suhu 500°C untuk menguapkan ion amonium dalam bentuk amoniak (NH_3), sehingga hanya tertinggal ion hidrogen (H^+) dalam rongga zeolit untuk meningkatkan jumlah situs asam kerangka zeolit, agar zeolit dapat menjadi lebih reaktif sebagai katalis^{[28];[29]}.

Aktivasi zeolit alam Ende menyebabkan terjadinya perubahan komposisi mineral zeolit yang ditandai dengan pengurangan jumlah puncak khas dari pola difraktogram zeolit alam aktif menjadi 34 puncak. Hal tersebut menandakan bahwa telah terjadi perubahan komposisi senyawa penyusun zeolit alam Ende menjadi kuarsa α 25.85% (d (Å): 2.446; 2.227; 2.133; 2.119; 1.973; 1.812; 1.807; 1.602; 1.564; 1.538; 1.380; 1.372), mordenite 41.76% (d (Å): 3.991; 3.605; 3.392; 3.263; 3.244; 3.230; 2.927; 2.557; 2.507; 2.271), klinoptilolit 17.90% (d (Å): 3.966; 3.730; 3.367; 3.196; 3.181), skolecit 2.55% (d (Å): 4.215), laumontit 4.83% (d (Å): 6.476; 4.472), erionit 2.27% (d (Å): 6.310; 5.723), dan

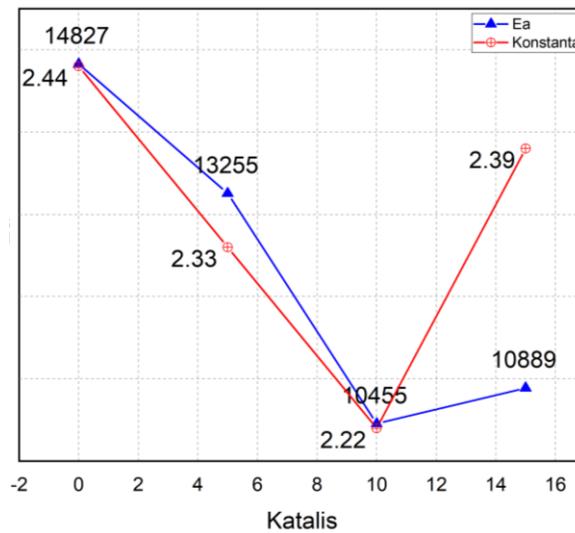
natrolit 1.98% (d (Å): 2.878), serta tidak terlihat lagi base line yang menunjukkan impuritas amorf.

Perubahan komposisi kimia zeolit alam Ende terjadi karena mineral Mordenit akan runtuh saat penggunaan HCl pada saat proses dealuminasi. Ketika atom Al terlepas dari kerangka zeolit, sebagian unsur Al akan keluar dalam bentuk AlCl_3 dan sebagian unsur Al yang tersisa akan dalam bentuk senyawa aluminium hidroksilat ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dan tektosilikat ($\text{Si}(\text{OH})_4$) yang kemudian pada keadaan hidrotermal tertentu akan membentuk fasa kristalin baru^{[25];[30]}. Aktivasi zeolit dengan asam klorida (HCl) menyebabkan zeolit mengalami dealuminasi dan dekationisasi, sehingga terjadi peningkatan luas permukaan zeolit karena berkurangnya pengotor yang menutupi pori-pori zeolit^{[16];[28]}. Hal tersebut dapat diamati melalui hasil SEM pada Gambar 2 di atas.

Mikrograf permukaan zeolit alam Ende sebelum diaktivasi menunjukkan morfologi permukaan zeolit alam dengan karakter rapuh dan amorf, serta permukaan dan porinya masih tertutup oleh pengotor berupa gumpalan-gumpalan kecil. Setelah proses aktivasi zeolit dilakukan, maka morfologi zeolit alam aktif menunjukkan kenampakan permukaan zeolit yang padat dan penampakan permukaan yang lebih jelas. Penampakan permukaan yang terdispersi cahaya menunjukkan ion Hidrogen (H^+) yang berasal dari proses dekationisasi oleh amonium (NH_4)^[25].



Gambar 3. Hasil analisis BET dan pori zeolit sebelum dan sesudah aktivasi



Gambar 4. Grafik hubungan energi aktivasi dan konstanta laju reaksi dengan rasio katalis

Hasil analisis juga menunjukkan bentuk morfologi permukaan yang tidak seragam. Hal tersebut dikarenakan zeolit alam 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 [31]. Penyebaran dispersi ion H⁺ yang tidak merata, diperkirakan karena penerapan waktu refluks dan konsentrasi larutan prekursor (NH₄Cl) yang belum sesuai dengan karakteristik zeolit alam Ende [25].

Berdasarkan hasil analisis BET zeolit alam Ende sebelum dan sesudah aktivasi, maka diketahui bahwa luas permukaan sebesar 53.17 m²/g naik menjadi 74.57 m²/g, jejari rata-rata 19.96 Å naik menjadi 20.21 Å dan volume pori 52 cm³/g naik menjadi 72.34 cc/g. Diketahui juga bahwa

jumlah situs asam total yang berada dalam mineral zeolit alam Ende naik dari 1.456 NH₃/g zeolit menjadi 4.342 NH₃/g zeolit. Peningkatan luas permukaan, jejari rata-rata dan voume pori pada zeolit alam aktif menunjukkan bahwa bahan pengotor yang semula menutup pori-pori dan permukaan zeolit telah dibersihkan dalam proses aktivasi [28]. Peningkatan keasaman permukaan zeolit terjadi karena penggunaan asam klorida (NH₄Cl) setelah proses dealuminasi dan menjadi ion hidrogen (H⁺) saat dikalsinasi.

Energi Aktivasi

Untuk menentukan kinerja anode komposit Hasil besaran energi aktivasi dan konstanta laju pirolisis polietilena dari sampah plastik pada setiap perlakuan komposisi katalis ditunjukkan pada Gambar 4.

Reaksi pirolisis tanpa katalis dimulai pada waktu 2.44 menit pada setiap perlakuan suhu, perlakuan 5% katalis dari 1000 gram plastik dapat menurunkan 1571.52 cal/mol energi aktivasi dan mempercepat waktu reaksi sebesar 0.11 menit, perlakuan 10% katalis dari 1000 gram plastik dapat menurunkan 4371.1 cal/mol energi aktivasi dan mempercepat waktu reaksi sebesar 0.22 menit, serta perlakuan 15% katalis dari 1000 gram plastik hanya dapat menurunkan 3197.74 cal/mol energi aktivasi dan mempercepat waktu reaksi sebesar 0.05 menit. Berdasarkan hal tersebut, maka perlakuan 15% katalis dari 1000 gram plastik sudah menunjukkan gejala sebagai inhibitor atau menurunkan laju reaksi perengkahan, apabila dibandingkan dengan analisis pada 5% dan 10% katalis dari 1000 gram plastik. Perlakuan 10% katalis dari 1000 gram plastik merupakan perlakuan komposisi terbaik untuk menurunkan kebutuhan energi tertinggi dalam memperoleh kecepatan maksimum reaksi pirolisis [32].

Kualitas Cairan Pirolisis

Hasil analisis uji viskositas dari cairan hasil pirolisis ditunjukkan pada grafik yang berada di Gambar 5.

Penggunaan katalis zeolit alam Ende mampu menurunkan viskositas 2.3316 – 1.2212 cP menjadi 1.0345 – 0.6321 cP di perlakuan 5% katalis dari 1000 gram plastik, 0.9678 – 0.4721cP di perlakuan 10% katalis dari 1000 gram plastik, 0.8126 – 0.4622cP di perlakuan 15% katalis dari 1000 gram plastik. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa angka viskositas cairan pirolisis polietilena semakin baik seiring dengan peningkatan jumlah katalis dan kenaikan suhu.

Nilai densitas merupakan indikator banyaknya zat-zat pengotor yang tidak terkonversi dalam proses perengkahan plastik. Hasil pengamatan analisis uji densitas untuk cairan pirolisis dari masing-masing perlakuan ditunjukkan pada grafik di Gambar 6.



Gambar 5. Grafik hasil analisis viskositas minyak pirolisis



Gambar 6. Grafik hasil analisis densitas minyak pirolisis

Tabel 1. 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

Nilai densitas berbanding lurus dengan nilai viskositas, yang di mana nilai densitas juga akan menurun apabila nilai viskositas menurun. Penggunaan katalis zeolit alam Ende menurunkan nilai densitas dari 0.79267 – 0.75201 g/ml menjadi 0.79083 – 0.70201 g/ml di perlakuan 5% katalis dari 1000 gram plastik, 0.78660 – 0.60601g/ml di perlakuan 10% katalis dari 1000 gram plastik, 0.78201 – 0.60404g/ml di perlakuan 15% katalis dari 1000 gram plastik. Oleh karena itu, disimpulkan juga bahwa densitas cairan pirolisis polietilena semakin baik seiring dengan peningkatan jumlah katalis dan kenaikan suhu.

Identifikasi kandungan senyawa dalam minyak pirolisis dari masing-masing perlakuan pirolisis disajikan pada Tabel 1.

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^[6]. Penggunaan zeolit alam Ende yang diaktivasi dengan asam sudah mampu menghasilkan fraksi bensin, namun fraksi terbesar yang terbentuk adalah fraksi paraffin. Komponen senyawa penyusun cairan pirolisis sangat bergantung pada bahan baku yang digunakan. Pada penelitian yang menggunakan bahan baku polstirena 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 60 °C^[7].

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, maka disimpulkan bahwa aktivasi zeolite alam Ende dengan perlakuan asam fluoride (HF) 1%, asam klorida (HCl) 6 M dan ammonium klorida (NH₄Cl) 1 M dapat mengubah sifat kimia dan sifat fisika zeolit alam Ende meliputi kristalinitas, luas permukaan, volume pori dan jejari pori, serta keasamannya untuk dijadikan sebagai katalis. Perlakuan komposisi katalis 10% dari 1000 mg plastik pada suhu operasi 400°C mampu menurunkan energi aktivasi hingga 4371.1 cal/mol dan menghasilkan lebih dari 80% fraksi paraffin dalam minyak hasil pirolisis polietilena dari sampah plastik.

Daftar Pustaka

1. Dan, Z., Che, Y., Wang, X., Zhou, P., Han, Z., Bu, D., Lu, X., *et al.*, Environmental, economic, and energy analysis of municipal solid waste incineration under anoxic environment in Tibet Plateau. *Environ. Res.*, **216**: (2023).
2. Johnke, B., Hoppaus, R., Lee, E., Irving, B., Martinsen, T. & Mareckova, K., Emissions from Waste Incineration: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. *IPCC - Intergov. Panel Clim. Chang.*, 455–468 (2001).
3. Rajaeifar, M. A., Ghanavati, H., Dashti, B. B., Heijungs, R., Aghbashlo, M. & Tabatabaei, M., Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste

- management technologies: A comparative review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **79**: 414–439 (2017).
4. Syamsiro, M., Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk. *Teknik*, **5(1)**: 1–85 (2015).
 5. Nasrun, N., Kurniawan, E. & Sari, I., Studi Awal Produksi Bahan Bakar Dari Proses Pirolisis Kantong Plastik Bekas. *J. Teknol. Kim. Unimal*, **5(1)**: 30 (2017).
 6. Naimah, S., Nuraeni, C., Rumondang, I., Jati, B. N., Rahyani, D., Balai, E., Kimia, B., *et al.*, Dekomposisi Limbah Plastik Polypropylene Dengan Metode Pirolisis. *J. Sains Mater. Indones. Indones. J. Mater. Sci.*, **13(3)**: 226–229 (2012).
 7. Nugroho, A. S., Pengolahan Limbah Plastik Ldpe Dan Pp Untuk Bahan Bakar Dengan Cara Pirolisis. *J. Litbang Sukowati Media Penelit. dan Pengemb.*, **4(1)**: 10 (2020).
 8. Harlivia, R., Tahdid, T. & A., S. E., Pengaruh Persen Katalis Zeolit Alam Terhadap Yield Bahan Bakar Cair Proses Pirolisis dari Limbah Plastik Polypropylene. *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, **2(11)**: 453–459 (2022).
 9. Rio Nazif., Erlangga Wicaksana. & 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*, **5(3)**: 49–55 (2016).
 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*, **2(May)**: 374–387 (2014).
 11. Wolo, D., Ngapa Yulius Dala, . Carvallo Ludovicus., Potensi Zeolit Alam Ende Sebagai Bahan Aditif Semen Untuk Meningkatkan Kuat Tekan Beton. *Opt. J. Pendidik. Fis.*, **3(Vol. 3 No. 1 (2019): Jurnal Dinamika Sains)**: 34–41 (2019).
 12. Kurniawan, T. & Adha Firdaus, M., Zeolite for Agriculture Intensification and Catalyst in Agroindustry ARTICLE HISTORY ABSTRACT. *World Chem. Eng. J.*, **3(1)**: 14–23 (2019).
 13. Abdullah., Apriyanti, M., Sunardi., Santoso, U. T., Junaidi, A. B., Aditiya, D. & Irawati, U., Pyrolysis of palm oil using zeolite catalyst and characterization of the boil-oil. *Green Process. Synth.*, **8(1)**: 649–658 (2019).
 14. Arita, S., Assalami, A. & Naibaho, D. I., Proses Pembuatan Bahan Bakar Cair Dengan Menggunakan Katalis Zeolit. *Tek. Kim.*, **21(2)**: 8–14 (2015).
 15. Husin, H., Mahidin, M., Marwan, M. & Nasution, F., Conversion of polypropylene-derived crude pyrolytic oils using hydrothermal autoclave reactor and Ni / aceh natural zeolite as catalysts. *Heliyon*, **9(4)**: e14880 (2023).
 16. Ariyanti, D., Optimasi Temperatur pada Proses Perengkahan Katalitik Polietilen menjadi Gasolin menggunakan Katalis Mo-Ni/ZA. *Indones. J. Chem. Sci.*, **4(252)**: (2015).
 17. Faradika, M., Sugiarti, S. & Sugita, P., Potensi Zeolit Alam Ende-NTT sebagai Katalis Transformasi Senyawa Gula Menjadi 5-Hidroksimetilfurfural (HMF). *J. Kim. Val.*, **5(1)**: 15–22 (2019).
 18. Nurizq Mauli Septiani, Supartono, K. S., Sintesis Senyawa Antimikroba Dihidropirimidinon melalui Reaksi Siklokondensasi Biginelli menggunakan Katalis Zeolit Alam. *Indones. J. Chem. Sci.*, **7(1)**: 83–90 (2019).
 19. Fajriani, I. Y., Syaiful, A. Z. & Ariani, F., Pemanfaatan Zeolit Yang Teraktivasi Asam Klorida (HCl) Sebagai Adsorben Logam Berat Timbal (Pb). *Saintis*, **3(1)**: 58–69 (2022).
 20. Agus Saputro, S., Merizki br Ginting, E. & Sudharto Tembalang, J. S., Uji Karakteristik pada Preparasi Katalis Zn/Zeolit. in *Prosiding SNST ke-6*, 32–35 (2015).
 21. Adoe, D. G. H., Bunganaen, W., Krisnawi, I. F. & Soekwanto, F. A., Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer. *LONTAR J. Tek. Mesin Undana*, **3(1)**: 17–26 (2016).

22. Sumari, S., Permatasari, S. I., Ilmiyah, L., Fajaroh, F., Yahmin, Y. & Suryadharna, I. B., Pengaruh Komposisi SiO₂/Al₂O₃ dalam Sintesis ZSM-5 (Zeolite Socony Mobile-5) Bersumber Silika Pasir Pantai Lokal. *JC-T (Journal Cis-Trans) J. Kim. dan Ter.*, **6573(Vol 4, No 2 (2020))**: 27–32 (2020).
23. Hakiki, M., Makiyi, M., Nuryoto., Rahmayetty., Kustiningsih, I. & Kurniawan, T., The Effect of Mine Locations of Bayah Natural Zeolites on Ammonium Adsorption: A Kinetic and Equilibrium Study. *J. Teknol. Lingkung.*, **22(1)**: 18–28 (2021).
24. Himawanto, D. A., Penentuan Energi Aktivasi Pembakaran Briket Char Sampah Kota Dengan Menggunakan Metoda Thermogravimetry Dan Isothermal Furnace. *Rotasi*, **15(3)**: 35 (2013).
25. Reka Oktaviani, Noor Hindryawati, A. S. P., Modifikasi dan Karakterisasi Zeolit Alam Tasikmalaya dengan Fe₂O₃ Modification and Characterization of Tasikmalaya Natural Zeolites. *J. At.*, **04(1)**: 30–35 (2019).
26. Sufriadin, Fuad Bawazir, Sri Widodo, M. H., Utilization of Solid Waste PT Semen Bosowa as Zeolite for Industrial Waste Water in South Sulawesi Utilization of Solid Waste PT Semen Bosowa as Zeolite for Industrial Waste Water in South Sulawesi. *J. Geomine*, **10(3)**: 270–279 (2022).
27. Ruiz-bastidas, R. C., Turnes, G., Palacio, E. & Cadavid-, L. S., Natural Ecuadorian zeolite: An effective ammonia adsorbent to enhance methane production from swine waste. *Chemosphere*, **336(January)**: 139098 (2023).
28. Védrine, J. C., Acid-Base Characterization of Heterogeneous Catalysts. *Res. Chem. Intermed.*, **(October)**: (2017). doi:10.1007/s11164-015-1982-9
29. Velarde, L., Sadegh, M., Escalera, E., Antti, M. & Akhtar, F., Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. *Chemosphere*, **328(February)**: 138508 (2023).
30. Sapriil Berlian, Aldi Try Kusuma, Arizal Aswan, Ahmad Zikri, I. H., Pyrolysis of Plastic to Liquid Fuel using Activated. *Publ. Penelit. Terap. DAN Kebijakan.*, **5(1)**: 9–18 (2022).
31. Ngapa, Y. D., Study of The Acid-Base Effect on Zeolite Activation and Its Characterization as Adsorbent of Methylene Blue Dye. *JKPK (Jurnal Kim. dan Pendidik. Kim.)*, **2(2)**: 90 (2017).
32. Hermaw, D., Hardianto, A., Suwandon, P. & Rahmadianto, F., Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Energi Aktivasi Pada Tar Limbah Plastik. *Pros. SENIATI*, **5(4)**: 354–360 (2019).