



Terakreditasi Sinta Peringkat 4 (S4)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Pengolahan Fraksi Solar Hasil Pirolisis Sampah Plastik Menggunakan Adsorben Zeolit Teraktivasi Asam Sulfat

Nur Rikswan Syah¹, Nelly Wahyuni^{1*}, Endah Sayekti¹

¹Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura

*E-mail: nellywahyuni@chemistry.untan.ac.id

Submitted : 2-6-2025 Revised : 21-11-2025 Accepted : 05-01-2026

Abstract

Processing plastic waste, especially Low-Density Polyethylene (LDPE), is an environmental problem because it is difficult to decompose. One method of processing plastic waste is pyrolysis, which converts plastic into liquid fuels such as diesel. However, pyrolyzed diesel still contains impurities, such as sulfur, chlorine, and hydrocarbon compounds, which affect fuel quality, including acid number and viscosity. This study aims to determine the adsorbent characteristics of natural zeolite (ZA), chemically-physical activation zeolite (ZKF), and physico-chemical activation zeolite (ZFK), and to assess their effectiveness in improving the quality of diesel fuel from the pyrolysis of plastic waste. The test of zeolite as an adsorbent was conducted by measuring water and ash content and by characterizing it using Fourier Transform Infrared (FTIR), X-Ray Fluorescence (XRF), and a Gas Sorption Analyzer (GSA). FTIR results showed spectral changes indicative of the loss of OH groups and revealed the main functional groups of the activated zeolites. XRF results show that ZKF and ZFK have increased silica (SiO_2) content from 81.85% to 82.19% and 82.26%, and decreased iron oxide (Fe_2O_3) content from 0.94% to 0.63% and 0.62%. GSA analysis showed increases in the surface areas of ZKF and ZFK from 11.49 m^2/g to 34.06 m^2/g and 19.78 m^2/g , respectively. Processing of pyrolyzed diesel using ZKF and ZFK showed a decrease in acid number from 1.03 mg NaOH/g to 0.25 mg NaOH/g and 0.20 mg NaOH/g, a reduction in viscosity from 5.45 cSt to 5.19 cSt and 5.13 cSt. The most effective adsorbent for reducing acid number and viscosity is ZFK, with a surface area of 19.78 m^2/g , an average pore diameter of 5.99 nm, and optimal adsorption conditions at a stirring time of 4 minutes with an adsorbent mass of 1.5 grams in 50 mL of pyrolyzed diesel.

Keywords: Adsorption, H_2SO_4 , Pyrolysis, Plastic, Diesel, Zeolite

Abstrak

Pengolahan limbah plastik, khususnya Low-Density Polyethylene (LDPE) menjadi permasalahan lingkungan karena sulit terurai. Salah satu metode pengolahan limbah plastik adalah pirolisis, yang mengubah plastik menjadi bahan bakar cair seperti solar. Namun, solar hasil pirolisis masih mengandung pengotor seperti sulfur, klorin, dan senyawa hidrokarbon yang mempengaruhi kualitas bahan bakar seperti bilangan asam dan viskositas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik adsorben zeolit alam (ZA), zeolit aktivasi kimia-fisika (ZKF), dan zeolit aktivasi fisika-kimia (ZFK) serta efektivitasnya dalam meningkatkan kualitas solar hasil pirolisis sampah plastik. Uji zeolit sebagai adsorben dilakukan dengan pengujian kadar air, kadar abu serta karakterisasi menggunakan Fourier Transform Infra Red (FTIR), X-Ray Fluorescence (XRF), dan Gas Sorption Analyzer (GSA). Hasil FTIR menunjukkan perubahan spektra yang mengindikasikan hilangnya gugus OH serta menunjukkan gugus fungsi penyusun utama dari zeolit teraktivasi. Hasil XRF menunjukkan ZKF dan ZFK mengalami peningkatan kandungan silika (SiO_2) dari 81,85% menjadi 82,19% dan 82,26% serta penurunan kandungan besi oksida (Fe_2O_3) dari 0,94% menjadi 0,63% dan 0,62%. Analisis GSA menunjukkan peningkatan luas permukaan ZKF dan ZFK dari 11,49 m^2/g menjadi 34,06 m^2/g dan 19,78 m^2/g . Pengolahan solar hasil pirolisis menggunakan ZKF dan ZFK menunjukkan penurunan bilangan asam dari 1,03 mg NaOH/g menjadi 0,25 mg NaOH/g dan 0,20 mg NaOH/g, penurunan viskositas dari 5,45 cSt menjadi 5,19 cSt dan 5,13 cSt. Adsorben yang efektif dalam menurunkan bilangan asam dan viskositas yaitu ZFK dengan luas permukaan 19,78 m^2/g , rata-rata diameter pori 5,99 nm, serta kondisi optimal adsorpsi pada waktu pengadukan selama 4 menit dengan massa adsorben 1,5 gram dalam 50 mL solar hasil pirolisis.

Kata kunci: Adsorpsi, H_2SO_4 , Pirolisis, Plastik, Solar, Zeolit

PENDAHULUAN

Secara global, produksi dan konsumsi plastic terutama untuk kemasan sekali pakai masih menjadi kontributor dominan timbulan sampah, sementara kapasitas pengumpulan dan daur ulang belum mampu mengejar laju pertumbuhan tersebut (Pilapitiya & Ratnayake, 2024).

Pada fraksi poliolefin seperti LDPE, ketahanan polimer terhadap degradasi biologis menyebabkan residu yang persisten serta mendorong fragmentasi menjadi mikroplastik yang dapat berpindah lintas media lingkungan (Mendoza & others, 2025). Karena keterbatasan daur ulang mekanik untuk plastik tercampur/terkontaminasi, rute pemulihan kimia melalui pirolisis semakin diposisikan sebagai strategi untuk mengembalikan plastik menjadi feedstock hidrokarbon dalam kerangka ekonomi sirkular (X. Zhang, 2023).

Permasalahan limbah plastik, khususnya jenis Low-Density Polyethylene (LDPE), semakin meningkat dan menimbulkan dampak signifikan terhadap lingkungan. LDPE seperti kantong plastik, pembungkus makanan, dan botol plastik, merupakan polimer termoplastik dengan rumus kimia $(C_2H_4)_n$ yang memiliki struktur bercabang tidak teratur, bersifat fleksibel karena molekulnya tidak tersusun rapat, dan sulit terurai secara alami (Guan et al., 2009). Akumulasi limbah LDPE dalam jumlah besar tidak hanya mencemari lingkungan, tetapi juga berisiko terhadap kesehatan manusia karena potensi pembentukan senyawa berbahaya seperti karbon monoksida (CO), asam klorida (HCl), benzena (C_6H_6), klorin (Cl_2), klorobenzena (C_6H_5Cl), serta senyawa-senyawa radikal (Marongiu et al., 2003). Oleh karena itu, pengolahan limbah LDPE menjadi aspek penting dalam upaya mitigasi pencemaran dan pemanfaatan ulang limbah.

Pirolisis merupakan salah satu metode yang efektif dalam pengolahan limbah plastik yang sulit didaur ulang. Proses ini dilakukan melalui pemanasan pada suhu tinggi dalam kondisi anaerob, sehingga menghasilkan tiga fraksi utama, yaitu arang, gas, dan minyak (Ramli & Mustam, 2022). Minyak hasil pirolisis berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar seperti solar (Cahyono et al., 2021). Namun demikian, fraksi minyak tersebut masih mengandung berbagai senyawa pengotor seperti HCl, C_6H_6 , Cl_2 , C_6H_5Cl , dan senyawa radikal (Marongiu et al., 2003; Novarini et al., 2021) yang mempengaruhi kualitas bahan bakar, khususnya viskositas dan bilangan asam. Oleh sebab itu, diperlukan tahapan lanjutan untuk memurnikan minyak hasil pirolisis agar memenuhi standar bahan bakar yang berlaku. Salah satu metode pemurnian yang umum digunakan adalah proses adsorpsi, yang melibatkan pemanfaatan material berpori sebagai media penjerap senyawa pengotor.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa pirolisis plastik terutama poliolefin mampu menghasilkan fraksi cair kaya hidrokarbon, dengan rentang komposisi yang sangat dipengaruhi oleh suhu operasi, laju pemanasan, waktu tinggal, serta konfigurasi reaktor (Kumagai et al., 2025).

Pada jalur katalitik, pemanfaatan zeolit berpori dilaporkan dapat menggeser distribusi produk menuju fraksi yang lebih ringan sekaligus memodulasi kualitas minyak melalui mekanisme cracking yang sensitif terhadap keasaman dan tekstur pori katalis (Sudalaimuthu et al., 2025).

Evaluasi performa minyak pirolisis sebagai bahan bakar juga menekankan bahwa parameter mutu seperti viskositas, densitas, dan stabilitas termal menjadi penentu utama kelayakan substitusi terhadap bahan bakar konvensional pada aplikasi mesin (Susanto et al., 2024). Literatur lima tahun terakhir juga menegaskan bahwa hambatan utama pemanfaatan minyak pirolisis sebagai bahan bakar adalah keberadaan kontaminan dan senyawa reaktif yang dapat meningkatkan korosivitas, menurunkan stabilitas penyimpanan, serta memperburuk kompatibilitas dengan sistem pembakaran (Belbessai et al., 2022).

Isu klorin pada rantai daur ulang kimia umumnya terkait fraksi PVC dan aditif berklorin pada umpan campuran, sehingga strategi deklorinasi menjadi krusial untuk menekan pembentukan HCl serta senyawa organoklorin pada produk (Tian & others, 2024). Berbagai

pendekatan upgrading termasuk pemrosesan katalitik menggunakan zeolit struktur tertentu telah dilaporkan mampu menurunkan spesies berklorin sekaligus memperbaiki sebaran hidrokarbon pada minyak pirolisis (Pinto & others, 2026).

Selain itu, jalur adsorpsi menggunakan zeolit sintetis (misalnya tipe 4A, 13X, dan Y) pada minyak pirolisis sampah plastik nyata dilaporkan efektif menurunkan kadar klorin, menegaskan pentingnya pemilihan adsorben dan kondisi kontak pada tahap pemurnian pascapirolisis (Romero & others, 2024).

Implementasi metode pirolisis telah dilakukan di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) EDELWISS, Kota Pontianak, yang mengolah limbah plastik seperti kantong kresek menjadi bahan bakar cair. Pemanfaatan pirolisis tidak hanya mengurangi volume sampah plastik, tetapi juga menghasilkan bahan bakar, serta menjadi metode pengolahan limbah yang berbasis teknologi dekomposisi termal di perkotaan.

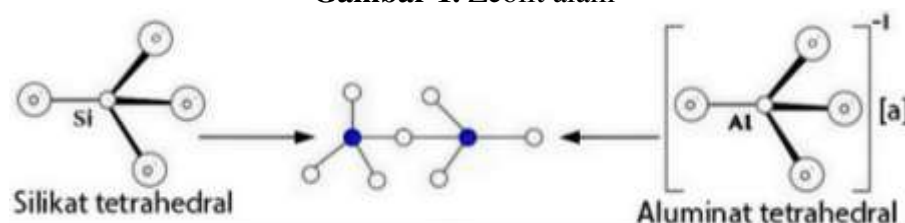
Dalam konteks implementasi di Indonesia, studi pada fasilitas TPST di Kabupaten Sragen menunjukkan bahwa konversi sampah plastik menjadi minyak melalui pirolisis dapat dipertimbangkan sebagai opsi pemulihan energi skala kawasan sepanjang aspek teknis-operasional dan mutu produk dikelola secara konsisten (Sari et al., 2023).

Kajian pada TPST Edelweiss Kota Pontianak juga memperlihatkan peran TPST sebagai simpul inovasi pengurangan timbulan sampah perkotaan, sehingga pengembangan teknologi termokimia (termasuk pirolisis) relevan untuk diposisikan sebagai bagian dari sistem pengolahan terpadu, bukan teknologi yang berdiri sendiri (Ramadhanty & others, 2024).

Zeolit alam merupakan adsorben yang memiliki pori, kemampuan tukar ion yang tinggi, serta daya adsorpsi yang tinggi. Akan tetapi, zeolit alam masih mengandung pengotor yang dapat menghambat efisiensi adsorpsi, sehingga diperlukan proses aktivasi untuk meningkatkan performanya. Aktivasi dapat dilakukan secara kimia dan fisika. Aktivasi kimia menggunakan asam maupun basa bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan, memperbesar pori-pori, serta memperbaiki kemampuan tukar ion zeolit (Alshameri et al., 2014), sedangkan aktivasi fisika dilakukan melalui pengeringan dan pemanasan untuk menghilangkan air dan senyawa pengotor dalam pori-pori zeolit (Al Muttaqii et al., 2019).



Gambar 1. Zeolit alam



Gambar 2. Struktur kimia penyusun zeolit

Penelitian ini akan dilakukan aktivasi zeolit alam menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) karena memiliki keunggulan dibandingkan aktivasi dengan asam klorida (HCl), yaitu zeolit aktivasi bersifat lebih hidrofobik dan memiliki rasio Si/Al lebih tinggi, yaitu 5,56%

dibandingkan 4,63% pada aktivasi HCl (Wirawan et al., 2015). Zeolit alam teraktivasi H_2SO_4 mampu mengadsorpsi senyawa pengotor dalam fraksi solar hasil pirolisis yang sesuai standar.

Kajian terkini tentang daur ulang kimia poliolefin menekankan bahwa tahap dekontaminasi dan upgrading pascapirolisis masih menjadi bottleneck yang menentukan kompatibilitas produk terhadap standar mutu bahan bakar, terutama ketika umpan berasal dari aliran sampah nyata yang heterogen (Rieger & others, 2024).

Di sisi konteks lokal, penelitian pirolisis LDPE/PP dengan zeolit alam pada jurnal terindeks nasional menunjukkan adanya variasi sifat minyak hasil pirolisis yang membuka kebutuhan pemurnian dan kontrol proses yang lebih terarah untuk mengejar mutu bahan bakar yang konsisten (Mayora & others, 2023).

Oleh karena itu, perbandingan urutan aktivasi zeolit alam (kimia–fisika versus fisika–kimia) yang dihubungkan langsung dengan perubahan komposisi/pori (FTIR–XRF–GSA) dan kinerja pemurnian fraksi solar (bilangan asam, viskositas, warna) menjadi celah penting untuk diisi, karena hubungan rasio Si/Al dan karakter pori terhadap perilaku adsorpsi terbukti sangat menentukan performa penjerapan pada material zeolit (Nie & others, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik zeolit hasil aktivasi kimia–fisika (ZKF) dan aktivasi fisika–kimia (ZFK), meliputi pengujian kadar air dan kadar abu, serta karakterisasi struktur dan komposisi kimia menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *X-Ray Fluorescence* (XRF), dan *Gas Sorption Analyzer* (GSA). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui efektivitas kedua jenis adsorben dalam proses pemurnian fraksi solar hasil pirolisis plastik. Meliputi parameter bilangan asam, viskositas, dan warna, dengan variasi massa adsorben dan waktu pengadukan selama proses adsorpsi.

Studi terkini pada zeolit alam menunjukkan bahwa perlakuan asam dapat memodifikasi rasio Si/Al, mengubah populasi situs asam, serta memengaruhi sifat tekstural (misalnya aksesibilitas pori), yang pada akhirnya menentukan kapasitas dan selektivitas adsorpsi (Belousov & others, 2025).

Namun, beberapa laporan juga menegaskan bahwa kondisi perlakuan asam yang agresif berpotensi memicu perubahan struktur/penyumbatan pori, sehingga optimasi konsentrasi asam, suhu, dan prosedur pencucian menjadi determinan agar peningkatan luas permukaan dan akses pori benar-benar tercapai (Tanirbergenova & others, 2025).

Ulasan tentang modifikasi zeolit alam untuk pembangkitan dan pemurnian bahan bakar menempatkan kombinasi aktivasi kimia–fisika sebagai rute yang menjanjikan karena memungkinkan penyesuaian tekstur pori dan keasaman secara simultan, sehingga relevan untuk target pemurnian fraksi diesel-range dari minyak pirolisis (Wirawan et al., 2015).

METODE PENELITIAN

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah alat-alat gelas yang umum digunakan di laboratorium kimia, ayakan mesh 80, kertas saring, pH universal, dan viskometer cannon-fenske. Kemudian bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah akuades (H_2O), asam sulfat (H_2SO_4), etanol 96% ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), indikator fenolftalein ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$), solar hasil pirolisis, natrium hidroksida (NaOH), dan zeolit alam dibeli di Toko Borneo Aquatic Pontianak.

Preparasi Zeolit Alam

Proses preparasi adsorben merujuk pada penelitian (Kunarti et al., 2015). Zeolit alam sebanyak 1 kg dihaluskan dengan menggunakan palu hingga menjadi serbuk. Serbuk zeolit kemudian direndam dalam akuades (H_2O) selama 24 jam pada suhu kamar. Setelah perendaman, residu disaring dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 120°C selama kurang lebih 3 jam. Zeolit yang telah kering selanjutnya diayak menggunakan ayakan berukuran mesh 80.

Preparasi Solar Hasil Pirolisis Sampah Plastik

Preparasi sampah plastik sebagai bahan baku pirolisis mengacu pada penelitian (Salsabila et al., 2023). Tahapan awal dilakukan dengan mengumpulkan dan memilah sampah plastik LDPE, kemudian dibersihkan menggunakan air atau campuran air dan sabun guna menghilangkan kotoran, minyak, dan lemak. Sampah plastik yang telah bersih dikeringanginkan di bawah sinar matahari. Proses pirolisis dilakukan dengan memasukkan plastik ke dalam reaktor yang ada di TPST Edelwiss Kota Pontianak (Gambar 3), kemudian dipanaskan perlahan hingga suhu 300–500°C, sehingga menghasilkan uap minyak. Uap tersebut dikondensasikan melalui kondensor untuk menghasilkan fraksi minyak pirolisis, salah satunya solar. Solar hasil pirolisis kemudian dikumpulkan dalam wadah tertutup serta pengujian bilangan asam, viskositas, dan warna.



Gambar 3. Reaktor pirolisis di TPST 3R EDELWISS Kota Pontianak
Sumber : Dokumentasi Lapangan, 2025

Proses Aktivasi Zeolit Alam

Aktivasi zeolit alam dilakukan menggunakan larutan asam sulfat (H_2SO_4) berdasarkan metode yang dikembangkan oleh (Anggara et al., 2013). Aktivasi dilakukan melalui dua perlakuan berbeda, yaitu aktivasi kimia-fisika dan fisika-kimia. Pada aktivasi kimia-fisika (ZKF), sebanyak 100 gram zeolit direndam dalam larutan H_2SO_4 1 M sebanyak 11 mL yang telah diencerkan dalam 200 mL akuades selama 2 jam. Setelah proses perendaman, zeolit dicuci dan disaring menggunakan akuades hingga mencapai pH netral, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 120°C selama 3 jam. Sedangkan pada aktivasi fisika-kimia (ZFK), zeolit terlebih dahulu dipanaskan dalam oven pada suhu 120°C selama 3 jam, lalu direndam dalam larutan H_2SO_4 1 M dengan volume dan durasi yang sama. Setelah proses pencucian hingga netral, zeolit dikeringkan kembali pada suhu 105°C selama 2 jam.

Karakterisasi Zeolit Aktivasi

Karakterisasi meliputi pengujian kadar air dan kadar abu secara gravimetri serta identifikasi gugus fungsi menggunakan *fourier transform infra red Bruker Alpha II*, komposisi unsur menggunakan *x-ray fluorescences S2 Puma Carousel Series 2*, dan analisis ukuran pori serta luas permukaan spesifik menggunakan *gas sorption analyzer Quantachrome TouchWin v1.22*.

a. Kadar Air dan Kadar Abu

Pengujian kadar air dan kadar abu merujuk pada penelitian (Fadhillah et al., 2017). Pengujian kadar air dilakukan dengan menimbang adsorben sebanyak 1 gram dan pemanasan pada suhu 105°C selama 1 jam. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam desikator hingga mencapai suhu ruang dan ditimbang kembali. Pengujian kadar abu dilakukan dengan menimbang adsorben sebanyak 1 gram. Sebanyak 1 gram sampel zeolit dimasukkan ke dalam tanur dan dipanaskan pada suhu 750°C selama 2 jam. Setelah itu, didinginkan dalam desikator

dan ditimbang. Kadar air dihitung menggunakan rumus (1), sedangkan kadar abu dengan rumus (2).

$$\text{Kadar air \%} = \left(\frac{\text{massa sampel awal (g)} - \text{massa sampel akhir (g)}}{\text{massa sampel awal (g)}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Kadar abu \%} = \left(\frac{\text{massa sampel awal (g)} - \text{massa sampel akhir (g)}}{\text{massa sampel awal (g)}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Adsorpsi Solar Hasil Pirolisis dengan Zeolit Aktivasi

Adsorpsi solar hasil pirolisis sampah plastik menggunakan adsorben zeolit teraktivasi asam akan dilakukan variasi waktu pengadukan dan massa adsorben untuk menentukan hasil optimum pengujian serta pengujian kualitas solar hasil pirolisis sampah plastik dengan pengujian bilangan asam, viskositas, serta identifikasi warna menggunakan *spektrofotometer CFEZ HunterLab*.

Pengujian solar hasil pirolisis diawali dengan metode adsorpsi yang merujuk pada penelitian (Pratama et al., 2018). Sebanyak 50 mL solar hasil pirolisis dimasukkan ke dalam 15 gelas beaker. Masing-masing beaker ditambahkan zeolit teraktivasi sebanyak 0,5; 1, dan 1,5 gram. Sampel kemudian diaduk selama 30, 60, 120, 180, dan 240 detik, kemudian disaring menggunakan kertas saring. Filtrat didiamkan selama 24 jam kemudian dianalisis. Solar hasil adsorpsi akan dilakukan pengujian parameter.

a. Bilangan Asam

Pengujian bilangan asam dilakukan menggunakan metode titrasi. Sebanyak 5 mL sampel dipipet dan ditambahkan 5 mL etanol 96% ke dalam erlenmeyer, serta 5 tetes indikator fenolftalein. Sampel dititrasi dengan larutan NaOH 0,1 N hingga larutan berubah menjadi merah muda (Deisberanda et al., 2019). Bilangan asam dihitung dengan rumus:

$$\text{Bilangan Asam} = \left(\frac{V \text{ NaOH (mL)} \times N \text{ NaOH} \times Mr \text{ NaOH (g/mol)}}{V \text{ solar pirolisis (mL)}} \right) \quad (3)$$

b. Viskositas

Viskometer cannon fenske bekerja dengan kecepatan alir suatu larutan dalam suatu pipa tabung. Semakin kecil kecepatan alir larutan, maka semakin besar nilai viskositas (Saputra et al., 2018). Rumus yang digunakan untuk menghitung viskositas sebagai berikut :

$$v = C \times t \quad (4)$$

v = viskositas kinetik (cSt), C = tetapan (0,0319 mm²/s), t = detik (s).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses preparasi diawali dengan menghaluskan zeolit alam menggunakan palu untuk memperluas luas permukaan, kemudian direndam dalam akuades selama 24 jam guna menghilangkan pengotor. Proses pengeringan dilakukan pada suhu 120 °C selama 3 jam untuk mengurangi kadar air, diikuti dengan pengayakan menggunakan ayakan berukuran 80 mesh untuk menyeragamkan ukuran partikel (Aidha, 2013; Ashari, 2018). Zeolit alam tidak digunakan langsung karena masih mengandung air dan pengotor yang menurunkan kapasitas adsorpsi. Oleh karena itu, diperlukan proses aktivasi untuk meningkatkan luas permukaan, sifat hidrofobik, dan daya serap zeolit (Al Muttaqii et al., 2019; Asmorowati et al., 2023).

Pemilihan ukuran partikel yang seragam (misalnya 80 mesh) relevan untuk menjaga reproduktibilitas kinerja adsorpsi karena ukuran partikel memengaruhi luas permukaan eksternal dan hambatan difusi intrapartikel yang menentukan laju tercapainya kesetimbangan adsorpsi (Tanirbergenova & others, 2025).

Selain itu, tahap perendaman–pembilasan–pengeringan sebelum aktivasi membantu mengurangi pengotor larut dan air terikat yang berpotensi menutup pori/menempati situs aktif, sehingga efek aktivasi terhadap perubahan performa adsorben dapat teramati lebih jelas (Bostan et al., 2024).

Selanjutnya zeolit yang telah dipreparasi akan diaktivasi yang bertujuan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi melalui peningkatan luas permukaan dan porositas. Proses aktivasi dilakukan dengan dua variasi perlakuan yaitu zeolit aktivasi fisika-kimia (ZFK) dan zeolit aktivasi kimia-fisika (ZKF). Aktivasi zeolit kimia-fisika (ZKF) dilakukan dengan perendaman zeolit dengan asam sulfat (H_2SO_4) 1 M selama 2 jam. Aktivasi dengan asam sulfat bertujuan untuk menghilangkan pengotor-pengotor pada pori-pori zeolit berupa oksida-oksida bebas seperti kalium oksida (K_2O), kalsium oksida (CaO), titanium dioksida (TiO_2), dan besi (II) oksida (Fe_2O_3) (Putri & Side, 2020). Proses aktivasi zeolit dengan penambahan asam sulfat (H_2SO_4) bertujuan untuk menghilangkan kation penyeimbang yang dipertukarkan dengan ion H^+ membentuk zeolit-H (Norvia et al., 2016).

Perbedaan urutan perlakuan pada ZFK dan ZKF dapat dipahami sebagai perbedaan “pra-kondisi” permukaan/pori: pemanasan awal pada ZFK berperan sebagai dehidrasi untuk membuka akses pori sebelum kontak asam, sedangkan perlakuan kimia lebih awal pada ZKF berpotensi mempercepat pelindian pengotor dan modifikasi kimia sebelum tahap termal memantapkan struktur permukaan aktif (P. Belousov et al., 2025).

Perubahan komposisi dan tekstur akibat aktivasi asam umumnya terkonfirmasi melalui kombinasi XRF/FTIR serta adsorpsi N_2 (BET), karena indikator seperti rasio Si/Al, kandungan oksida minor, luas permukaan, dan volume pori berkaitan langsung dengan selektivitas sorpsi adsorben terhadap spesies target (Kuldeyev et al., 2023).

Namun, intensitas aktivasi asam yang terlalu kuat dapat memicu hidrolisis rangka aluminosilikat dan menurunkan keteraturan pori, sehingga optimasi konsentrasi serta waktu aktivasi tetap krusial untuk menjaga keseimbangan antara pembukaan pori dan stabilitas kerangka (H. Zhang et al., 2023).

Oleh sebab itu, pencucian hingga pH netral setelah aktivasi dipandang sebagai kontrol mutu penting untuk meminimalkan residu ion/garam yang berpotensi mengganggu sorpsi maupun interpretasi hasil uji kinerja adsorben (Yansaneh et al., 2022).

Zeolit alam kemudian dicuci dan disaring hingga pH netral menggunakan akuades (H_2O) untuk menghilangkan kelebihan ion SO_4^{2-} yang masih terperangkap dalam pori zeolit. Ion SO_4^{2-} akan berikatan dengan kation-kation yang berada pada struktur zeolit seperti Fe^{3+} yang menjadi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dan Ca^{2+} yang menjadi CaSO_4 (Oktaviani et al., 2019). Selain itu pembilasan bertujuan pada permukaan zeolit agar tidak mengganggu proses adsorpsi. Zeolit dikeringkan dalam oven pada suhu 120°C selama 3 jam. Zeolit alam yang diaktivasi fisika dilakukan dengan pemanasan pada suhu tinggi yang bertujuan untuk mengeringkan atau menghilangkan kandungan air setelah proses perendaman (Alshameri et al., 2014; Fitriana & Rusmini, 2019).

Aktivasi zeolit fisika-kimia (ZFK) dilakukan pemanasan sebanyak 200 gram dicawan petri pada suhu 120°C selama 3 jam. Adsorben ZFK ditimbang 100 gram dalam gelas beaker 100 mL dengan asam sulfat (H_2SO_4) 1 M hingga terendam selama 2 jam. Kemudian zeolit alam dicuci dan disaring hingga pH netral menggunakan akuades (H_2O). Setelah itu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam yang bertujuan mengurangi kadar air setelah perendaman.

Karakterisasi Zeolit Aktivasi

Zeolit alam (ZA), zeolit aktivasi fisika-kimia (ZFK) dan zeolit aktivasi kimia-fisika (ZKF) dikarakterisasi zeolit alam dilakukan sebelum dan setelah aktivasi untuk mengetahui perubahan pada struktur dan komposisi kimia zeolit.

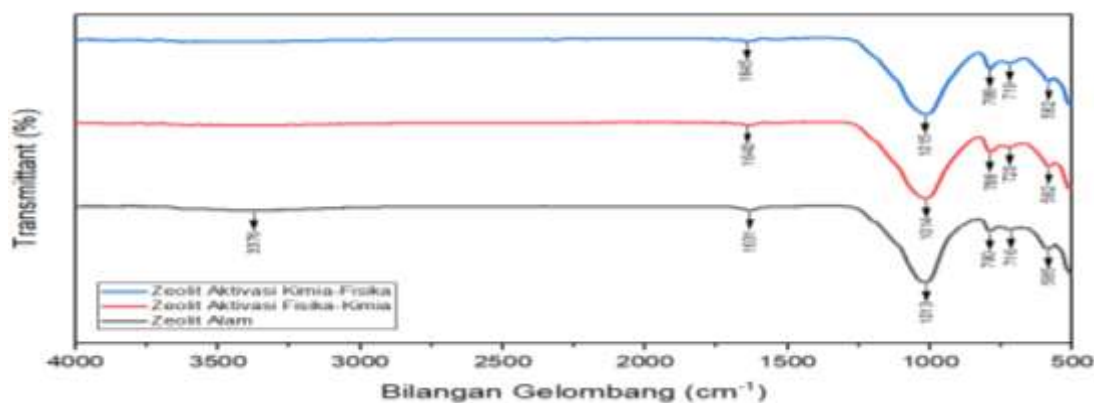
Tabel 1. Uji Kadar Air dan Kadar Abu ZA, ZKF, dan ZFK

Adsorben	Kadar Air (%)	Kadar abu (%)
ZA	6,96	9,79
ZKF	4,51	8,04
ZFK	3,78	7,74

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Kadar air pada Tabel 1 pada unsur zeolit alam (ZA) adalah 6,96%, lebih tinggi dibandingkan zeolit yang telah diaktivasi, yaitu ZKF (4,51%) dan ZFK (3,78%). Penurunan kadar air ini menunjukkan bahwa proses aktivasi efektif mengurangi kandungan air, yang dapat meningkatkan luas permukaan dan kemampuan adsorpsi adsorben (Haspiadi et al., 2021). Berdasarkan SNI 13-3496-1994, kadar air zeolit yang maksimal 10% menunjukkan mutu yang baik.

Selanjutnya adsorben dilakukan pengujian kadar abu bertujuan untuk mengukur sisa material anorganik setelah pemanasan adsorben pada suhu tinggi. Hasil pengujian pada Tabel 1 menunjukkan kadar abu ZA sebesar 9,79%, lebih tinggi dibandingkan dengan ZKF (8,04%) dan ZFK (7,74%). Penurunan kadar abu ini menunjukkan bahwa proses aktivasi, terutama dengan asam sulfat, efektif dalam menghilangkan pengotor anorganik, yang berkontribusi pada peningkatan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi (Haspiadi et al., 2021). Aktivasi kimia juga membantu membuka pori-pori zeolit, yang meningkatkan kemampuan adsorpsi. Setelah diaktivasi, ZA, ZKF, dan ZFK dikarakterisasi menggunakan *fourier transform infra red* untuk menentukan gugus fungsi zeolit, *x-ray fluorescences* untuk menentukan komposisi zeolit, dan *gas sorption analyzer* untuk mengukur luas permukaan zeolit.



Gambar 2. Spektra *Fourier Transform Infra Red* ZA, ZKF, dan ZFK

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Tabel 2. Hasil Karakterisasi *Fourier Transform Infra Red* ZA, ZKF, dan ZFK

ZA	ZKF	ZFK	Bilangan Gelombang	Vibrasi	Referensi
Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)			(cm ⁻¹)		
3376	-	-	3437	Ulur T-OH dari H ₂ O	(Yanti et al., 2021)
1631	1640	1645	1641	Tekuk -OH dari T-OH	(Fitriana & Rusmini, 2019)
1013	1014	1015	1047	Ulur Asimetris T-O-T	(Yanti et al., 2021)
790	788	788	794	Ulur Simetris T-O-T	(Safitri & Jahro, 2021)
585	582	582	563	Eksternal dari Cincin Ganda D6R	(Safitri & Jahro, 2021)

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Keterangan : T = Si/Al

Bilangan gelombang 3376 cm⁻¹ pada zeolit alam (ZA) menunjukkan vibrasi ulur gugus O-H dari molekul air (H₂O) yang teradsorpsi secara fisik di permukaan dan pori zeolit yang terdapat pada gambar 2. Setelah proses aktivasi, serapan ini tidak terdeteksi pada ZKF dan ZFK, yang menunjukkan hilangnya air terikat secara fisik akibat pemanasan dan reaksi kimia selama

aktivasi. Serapan pada 1631-1645 cm^{-1} menunjukkan vibrasi tekuk T-OH dari gugus hidroksil struktural dari kerangka zeolit (Fitriana & Rusmini, 2019).

Serapan bilangan gelombang pada 1013-1015 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur asimetris T-O-T yang merupakan ciri khas dari struktur kerangka aluminosilikat zeolit. Sedangkan serapan bilangan gelombang 788–790 cm^{-1} berasal dari ulur simetris T-O-T yang menunjukkan kestabilan struktur zeolit (Yanti et al., 2021). Serapan pada 582–585 cm^{-1} merupakan vibrasi eksternal dari cincin D6R yang merupakan unit struktural khas dalam zeolit, dengan sedikit pergeseran akibat aktivasi (Safitri & Jahro, 2021). Pergeseran serapan bilangan gelombang yang kecil pada ZKF dan ZFK menunjukkan adanya sedikit perubahan dalam penyusun struktural aluminosilikat zeolit, tetapi tidak menyebabkan kerusakan pada kerangka utama.

Tabel 3. Karakterisasi *X-Ray Fluorescences* ZA, ZKF, dan ZFK

Senyawa	ZA (%)	ZKF (%)	ZFK (%)
SiO ₂	81,85	82,19	82,26
Al ₂ O ₃	12,69	12,52	12,46
K ₂ O	2,61	2,74	2,69
CaO	1,60	1,61	1,66
Fe ₂ O ₃	0,94	0,63	0,62
TiO ₂	0,19	0,16	0,16
Rasio Si/Al	6,45	6,56	6,60

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Hasil analisis XRF pada Tabel 3 menunjukkan bahwa SiO₂ merupakan komponen utama zeolit, dengan kandungan 81,85% pada ZA dan sedikit meningkat pada ZKF (82,19%) dan ZFK (82,26%). Kandungan Al₂O₃ stabil pada 12,69% (ZA) dan sedikit menurun pada ZKF dan ZFK. Penurunan kandungan Fe₂O₃ setelah aktivasi menunjukkan bahwa proses ini menghilangkan pengotor logam yang terperangkap dalam pori zeolit, meningkatkan kestabilan struktur dan kapasitas adsorpsi zeolit (Wirawan et al., 2015). Hal ini menunjukkan terjadinya proses *leaching* atau pelindian terhadap Fe₂O₃. Asam sulfat, sebagai asam kuat, mampu melarutkan komponen logam tertentu dalam struktur zeolit, terutama oksida besi (Fe₂O₃), yang biasanya berada dalam bentuk terdispersi atau terikat lemah pada permukaan dan pori-pori zeolit (Kadirbekov et al., 2017).

Tabel 4. Karakterisasi *Gas Sorption Analyzer* ZA, ZKF, dan ZFK

Adsorben	Luas permukaan (m ² /g)	Volume pori (cm ³ /g)	Rata-rata diameter pori (nm)
ZA	11,49	6,00e ⁻²	10,45
ZKF	34,06	6,79e ⁻²	3,98
ZFK	19,78	5,93e ⁻²	5,99

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Hasil analisis GSA pada Tabel 4 menunjukkan bahwa luas permukaan zeolit alam (ZA) adalah 11,49 m²/g, sedangkan pada ZKF dan ZFK meningkat menjadi 34,06 m²/g dan 19,78 m²/g. Volume pori ZKF dan ZFK juga meningkat, yang menunjukkan bahwa aktivasi berhasil memperbesar ukuran pori dan meningkatkan kapasitas adsorpsi. Penurunan diameter pori pada ZKF dan ZFK menandakan terjadinya pembentukan ukuran pori yang lebih kecil sehingga meningkatkan selektivitas zeolit dalam proses adsorpsi (Hastuti et al., 2019; Maleiva et al., 2015).

Zeolit alam aktivasi mengalami peningkatan luas permukaan akibat pemanasan yang menguapkan air dalam pori-pori zeolit. Perendaman dengan H₂SO₄ menyebabkan ion H⁺ menggantikan kation penyeimbang seperti Ca²⁺, K⁺, dan Fe³⁺ dalam struktur aluminosilikat, membentuk zeolit-H. Kation-kation ini awalnya berfungsi menetralkan muatan negatif dari gugus AlO₄⁻. Pengurangan kation penyeimbang menjadikan zeolit aktivasi lebih hidrofobik,

bersifat nonpolar, dan memiliki stabilitas termal yang lebih baik (Asmorowati et al., 2023; Fitriana & Rusmini, 2019; Norvia et al., 2016).

Volume pori yang besar memungkinkan lebih banyak molekul adsorbat masuk dan berinteraksi dengan permukaan dalam adsorben. Selain itu, efektivitas adsorpsi juga dipengaruhi oleh kesesuaian ukuran pori dengan ukuran molekul adsorbat. Karena pori yang terlalu kecil dapat menghambat difusi molekul, sedangkan pori yang terlalu besar dapat menurunkan efisiensi permukaan kontak. Oleh karena itu, keseimbangan antara volume pori dan distribusi ukuran pori merupakan faktor penting dalam menentukan kinerja adsorpsi (Rouquerol et al., 2014).

Adsorpsi Solar Hasil Pirolisis dengan Zeolit Aktivasi

Proses adsorpsi berlangsung melalui interaksi antara senyawa pengotor dalam solar hasil pirolisis dan permukaan aktif zeolite (Ningsih et al., 2015). Aktivasi zeolit meningkatkan luas permukaan, volume pori, serta sifat hidrofobik yang mendukung penjerapan senyawa nonpolar dan aromatik. Efektivitas adsorpsi ditingkatkan dengan variasi massa adsorben dan waktu pengadukan. Pengujian solar hasil pirolisis sampah plastik bertujuan untuk mengetahui kualitas bahan bakar setelah adsorpsi. Beberapa parameter yang diuji pada solar hasil pirolisis yaitu bilangan asam, viskositas, dan warna dengan SNI 04-1782-2006.

Tabel 5. Hasil Uji Bilangan Asam Solar Hasil Adsorpsi dengan ZA, ZKF, dan ZFK (Solar hasil pirolisis = 50 mL)

Adsorben (gram)	Waktu Pengadukan /Massa Adsorben (s/g)	Bilangan Asam Solar Hasil Pirolisis Sebelum Adsorpsi (mg NaOH/g)	Bilangan Asam Solar Hasil Pirolisis Setelah Adsorpsi (mg NaOH/g)
ZA	30/0,5	1,03	0,41
ZKF			0,37
ZFK			0,38

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Tabel 6. Hasil Uji Bilangan Asam dan Viskositas Solar Hasil Adsorpsi dengan ZA, ZKF, dan ZFK

MA (gram)	WP (menit)	VA (cSt)	BAA (mg NaOH/gram)	Adsorpsi Solar dengan ZKF		Adsorpsi Solar dengan ZFK	
				VSA (cSt)	BASA (mg NaOH/gram)	VSA (cSt)	BASA (mg NaOH/gram)
0,5	0	5,45	1,03	5,42	0,37	5,42	0,38
1				5,45	0,36	5,38	0,37
1,5				5,42	0,37	5,38	0,36
0,5	1	5,45	1,03	5,42	0,34	5,29	0,38
1				5,38	0,33	5,29	0,31
1,5				5,35	0,31	5,26	0,31
0,5	2	5,45	1,03	5,38	0,32	5,32	0,35
1				5,35	0,28	5,29	0,35
1,5				5,32	0,29	5,26	0,30
0,5	3	5,45	1,03	5,38	0,31	5,29	0,32
1				5,32	0,27	5,26	0,31
1,5				5,29	0,26	5,22	0,30
0,5	4	5,45	1,03	5,32	0,29	5,29	0,30
1				5,22	0,27	5,19	0,27
1,5				5,19	0,25	5,13	0,20

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Keterangan : MA = Massa Adsorben, WP = Waktu Pengadukan, VA = Viskositas Awal, BAA = Bilangan Asam Awal, VSA = Viskositas Setelah Adsorpsi, BASA = Bilangan Asam Setelah Adsorpsi.

Bilangan asam adalah jumlah asam bebas dalam minyak yang termasuk parameter penting dalam menentukan kualitas bahan bakar. Hasil uji menunjukkan solar sebelum adsorpsi memiliki bilangan asam sebesar 1,03 mg NaOH/g menunjukkan tingginya kontaminan senyawa asam. Hasil analisis pada (Tabel 5) menunjukkan bahwa setelah adsorpsi, terjadi penurunan signifikan terhadap bilangan asam. Adsorben ZA mampuurunkannya hingga 0,41 mg NaOH/g, sedangkan ZKF dan ZFK masing-masing menurunkan bilangan asam hingga 0,37 mg NaOH/g dan 0,38 mg NaOH/g. Pada tabel 6 penurunan yang lebih tinggi diperoleh dengan peningkatan waktu pengadukan dan massa adsorben. Pada kondisi optimum, yaitu 4 menit dan 1,5 gram adsorben, nilai bilangan asam turun menjadi 0,25 mg NaOH/g untuk ZKF dan 0,20 mg NaOH/g untuk ZFK. Nilai-nilai ini sudah berada dalam kisaran standar kualitas bahan bakar solar menurut SNI 04-7182-2006 (Kasim et al., 2011)

Selanjutnya pengujian viskositas menggunakan viskometer cannon-fenske. Viskositas merupakan ketahanan aliran suatu cairan yang berperan dalam menentukan kualitas bahan bakar dalam mesin. Viskositas solar hasil pirolisis sebelum adsorpsi sebesar 5,45 cSt, yang menunjukkan kekentalan relatif tinggi, namun masih belum sesuai dengan standar viskositas solar yang ideal, yakni 2–4,5 cSt. Setelah proses adsorpsi, viskositas solar mengalami sedikit penurunan. Penurunan ini tidak bersifat signifikan walaupun massa adsorben dan waktu pengadukan ditingkatkan. Pengujian viskositas pada tabel 6 memperoleh nilai terendah pada 4 menit dan 1,5 gram adsorben, dengan nilai masing-masing 5,19 cSt untuk ZKF dan 5,13 cSt untuk ZFK (Kasim et al., 2011).

Kecenderungan penurunan bilangan asam yang makin besar pada massa adsorben dan waktu pengadukan yang lebih tinggi sejalan dengan prinsip bahwa peningkatan dosis adsorben dan waktu kontak memperbesar peluang interaksi adsorbat–situs aktif hingga mendekati kondisi jenuh/kesetimbangan (Kim et al., 2025).

Untuk aspek reologi, kajian campuran bahan bakar distilat dengan minyak pirolisis menunjukkan bahwa viskositas sangat sensitif terhadap komposisi dan temperatur (umumnya dievaluasi pada temperatur rujukan seperti 20, 40, 100 °C), sehingga strategi perbaikan parameter viskositas sering menuntut kombinasi pemurnian (misalnya adsorpsi) dan/atau pengaturan komposisi melalui fraksinasi atau blending terkontrol agar karakteristik alir bergerak menuju batas normatif yang ditargetkan (Zhou et al., 2024)

Selain pengujian bilangan asam dan viskositas, parameter warna juga berperan penting untuk menentukan kualitas bahan bakar. Warna tidak hanya merepresentasikan tingkat kejernihan, tetapi dapat menjadi indikator keberadaan senyawa-senyawa pengotor dalam fraksi solar hasil pirolisis. Oleh karena itu, analisis perubahan warna pada fraksi solar hasil pirolisis, baik sebelum maupun setelah proses adsorpsi, menjadi aspek penting dalam menentukan efektivitas adsorben yang digunakan dalam proses pemurnian.

Tabel 7. Hasil Uji Warna pada Solar Hasil Adsorpsi dengan ZA, ZKF, dan ZFK

Sampel	Warna		
	L*	a*	b*
Fraksi Solar	61,77	1,86	56,86
Fraksi Solar + ZA	63,31	2,01	66,14
Fraksi Solar + ZKF	63,1	2,58	67,71
Fraksi Solar + ZFK	63,92	0,82	64,75

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Warna diuji menggunakan *spektrofotometer CFEZ HunterLab* dengan sistem koordinat L* a* b*, di mana L* menunjukkan kecerahan, a* merepresentasikan spektrum merah-hijau,

dan b^* merepresentasikan spektrum kuning-biru. Pengujian warna pada tabel 7, solar hasil pirolisis memiliki warna awal dengan nilai L^* sebesar 61,77, yang tergolong rendah dan mengindikasikan warna yang relatif gelap akibat keberadaan senyawa seperti HCl dan SiO_2 (Hani, 2024).

Dalam sistem CIELAB ($L^* a^* b^*$), L^* lazim diinterpretasikan sebagai derajat kecerahan, sehingga peningkatan L^* setelah adsorpsi dapat dipakai sebagai indikator kuantitatif tambahan untuk menilai berkurangnya komponen pembentuk warna gelap/kromofor secara komparatif antar-perlakuan (Chybowski et al., 2025).

Setelah proses adsorpsi, terjadi peningkatan nilai kecerahan. Adsorpsi dengan ZA menghasilkan nilai L^* sebesar 63,31, sedangkan penggunaan ZKF dan ZFK masing-masing meningkatkan kecerahan menjadi 63,10 dan 63,92. ZFK menunjukkan hasil paling optimal dalam meningkatkan nilai L^* dan menurunkan nilai a^* , menandakan pergeseran warna ke arah yang lebih netral. Peningkatan warna ini berkaitan dengan kemampuan zeolit dalam mengadsorpsi senyawa penyebab warna gelap. Mekanisme pengikatan kation oleh gugus fungsional zeolit serta sifat asam-basa permukaan zeolit aktivasi mendukung proses penjernihan warna. Adsorben ZFK memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan ZA, sehingga lebih efektif dalam meningkatkan kualitas visual solar hasil pirolisis (Dulger & Yilmaz, 2013).

KESIMPULAN

ZKF dan ZFK menghasilkan kadar air sebesar 4,51% dan 3,78% serta kadar abu sebesar 8,04% dan 7,74%. Karakterisasi FTIR menunjukkan hilangnya gugus fungsi OH. XRF menunjukkan kandungan SiO_2 pada ZKF dan ZFK serta Fe_2O_3 menurun. GSA menunjukkan luas permukaan ZKF dan ZFK meningkat serta rata-rata diameter pori zeolit aktivasi menurun.

ZFK lebih efektif dibanding ZKF. Adsorpsi pengotor solar hasil pirolisis menggunakan ZFK menghasilkan bilangan asam 0,20 mg NaOH/gram dan viskositas 5,13 cSt sedangkan ZKF menghasilkan bilangan asam 0,25 mg/NaOH gram viskositas 5,19 cSt dan. Pengujian warna menunjukkan bahwa ZFK menghasilkan perubahan yang lebih baik dibanding ZKF. ZKF dan ZFK menunjukkan massa dan waktu pengadukan optimum 1,5 gram dan 240 detik. Bilangan asam memenuhi SNI yaitu $< 0,6$ mg NaOH/gram, viskositas dan warna tidak memenuhi SNI yaitu $> 4,5$ cSt dan > 3 .

DAFTAR PUSTAKA

- Aidha, N. N. (2013). Aktivasi Zeolit Secara Fisika dan Kimia untuk Menurunkan Kadar Kesadahan ($\{\text{Ca}\}$ dan $\{\text{Mg}\}$) dalam Air Tanah. *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 35(1), 58–64. <https://doi.org/10.24817/jkk.v35i1.1874>
- Al Muttaqii, M., Birawidha, D. C., Isnugroho, K., Yamin, M., Hendronursito, Y., Istiqomah, A. D., & Dewangga, D. P. (2019). Pengaruh Aktivasi secara Kimia menggunakan Larutan Asam dan Basa terhadap Karakteristik Zeolit Alam. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 13(2), 266–271. <https://doi.org/10.26578/jrti.v13i2.5577>
- Alshameri, A., Yan, C., Al-Ani, Y., Dawood, S., Ibrahim, A., Zhou, C., & Wang, H. (2014). An Investigation Into the Adsorption Removal of Ammonium by Salt-Activated Chinese ($\{\text{Hulaodu}\}$) Natural Zeolite: Kinetics, Isotherms, and Thermodynamics. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 554–564. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.05.008>

- Anggara, P. A., Wahyuni, S., & Prasetya, A. T. (2013). Optimalisasi Zeolit Alam Wonosari dengan Proses Aktivasi Secara Fisis dan Kimia. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 2(2), 72–77. <https://doi.org/10.15294/ijcs.v2i2.2734>
- Ashari, S. H. (2018). *Pengaruh Konsentrasi TiO₂N, Rasio Fotokatalis, dan Lama Penyinaran terhadap Aktivitas Fotokatalis TiO₂N-Zeolit/Alginate dalam Mendegradasi Limbah Cair Industri Tempe Menggunakan Sinar UV*.
- Asmorowati, D. S., Kristanti, I. I., & Sumarti, S. S. (2023). Adsorpsi Logam Fe pada Limbah menggunakan Zeolit Alam Teraktivasi Asam Sulfat. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 12(1), 16–21. <https://doi.org/10.15294/ijcs.v12i1.62914>
- Belbessai, S., Azara, A., & Abatzoglou, N. (2022). Recent Advances in the Decontamination and Upgrading of Waste Plastic Pyrolysis Products: An Overview. *Processes*, 10(4), 733. <https://doi.org/10.3390/pr10040733>
- Belousov, A., & others. (2025). Zeolites in Industrial Separation and Catalysis: Structure, Surface Chemistry, and Activation Effects on Adsorption. *Minerals*, 15(5), 494. <https://doi.org/10.3390/min15050494>
- Belousov, P., Tyupina, E., Kozlov, P., Izosimova, Y., Tolpeshta, I., Koroleva, T., Pokidko, B., Krupskaya, V., & Rumyantseva, A. (2025). Radioiodide Sorption on Natural and Acid-Treated Zeolite. *Minerals*, 15(5), 494. <https://doi.org/10.3390/min15050494>
- Bostan, R., Glevitzky, M., Varvara, S., Dumitrel, G. A., Rusu, G. I., Popa, M., Glevitzky, I., & Vica, M. L. (2024). Utilization of Natural Adsorbents in the Purification of Used Sunflower and Palm Cooking Oils. *Applied Sciences*, 14(11), 4417. <https://doi.org/10.3390/app14114417>
- Cahyono, M. S., Haryono, S., & Mandala, W. W. (2021). Proses Pirolisis untuk Mengkonversi Limbah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak menggunakan Penyaringan Adsorben (Arang dan Zeolit). *Journal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 5(2), 74–81. <https://doi.org/10.30588/jo.v5i2.993>
- Chybowski, L., Gawron, M., & Mikielewicz, D. (2025). Rheological Properties of Diesel-Based Fuels with Tyre Pyrolysis Oil as an Admixture. *Energies*, 18(8), 1993. <https://doi.org/10.3390/en18081993>
- Deisberanda, F. S., Nurbaeti, S. N., & Kurniawan, H. (2019). Analisis Kadar Asam Lemak Bebas dan Penetapan Bilangan Asam Minyak Cincalok. *Jurnal Mahasiswa Farmasi Fakultas Kedokteran Universitas Tanjungpura*, 4(1), 1–8.
- Dulger, A., & Yilmaz, E. (2013). Effectiveness of Modified Zeolites as Adsorbent Materials for Frying Oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 115(6), 668–675. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201200312>
- Fadhillah, N. H. B., Aziz, M. T., & Hendrawati, H. (2017). Penggunaan H-Zeolit dan Tawas dalam Pemurnian Crude Glycerol dengan Proses Adsorpsi dan Koagulasi. *Jurnal Kimia Valensi*, 3(1), 35–43. <https://doi.org/10.15408/jkv.v3i1.4207>

- Fitriana, N., & Rusmini. (2019). Pembuatan Zeolit Alam Teraktivasi HCl dan Karakterisasinya. *UNESA Journal of Chemistry*, 8(1), 17–19. <https://doi.org/10.26740/ujc.v8n1.p%p>
- Guan, Y., Luo, S., Liu, S., Xiao, B., & Cai, L. (2009). Steam Catalytic Gasification of Municipal Solid Waste for Producing Tar-Free Fuel Gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 9341–9346. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.020>
- Hani, A. (2024). *Potensi Pemanfaatan Sampah Plastik di Kota Pontianak sebagai Bahan Bakar Alternatif* [Tesis Magister]. Universitas Tanjungpura.
- Haspiadi, H., Fitriani, F., & Budiarta, Y. (2021). Pengaruh Aktivasi Kimia terhadap Adsorben Fly Ash Batubara untuk Penyerap Polutan Emisi Gas Buang. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 15(1), 65–74. <https://doi.org/10.26578/jrti.v15i1.6880>
- Hastuti, V. D., Jumaeri, J., & Harjono, H. (2019). Adsorpsi Para-nitrophenol (PNP) menggunakan Zeolit Alam Termodifikasi Surfaktan HDTMA. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 8(1), 9–15. <https://doi.org/10.15294/ijcs.v8i1.23960>
- Kadirbekov, K., Zhambakin, D., Kadirbekov, A., & Imanbekov, K. (2017). Acid Activation of Natural Zeolite with High Content of Iron Oxides in Creation of Selective Sorbents and Catalysts. *MATEC Web of Conferences*, 96, 2. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179600002>
- Kasim, R., Setyaningsih, D., & Haerudin, H. (2011). Esterifikasi Crude Palm Oil (CPO) Menggunakan Katalis Zeolit Alam Teraktifasi Asam pada Proses Pembuatan Biodiesel melalui Metode Dua Tahap (Esterifikasi-Transesterifikasi). *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 5(1), 59–66.
- Kim, H. S., Kim, H.-J., Kim, J., Kim, J.-H., Kang, T.-J., Kang, S.-H., Lee, Y., Lee, S. C., Chang, C.-S., & Bae, J. W. (2025). Research on the Chlorine Removal and Upgrading of Waste Plastic Pyrolysis Oil Using Iron-Based Adsorbents. *Energies*, 18(13), 3434. <https://doi.org/10.3390/en18133434>
- Kuldeyev, E., Seitzhanova, M., Kazybayeva, S., & Belousov, P. (2023). Highly Effective Modified Natural Zeolites for Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions. *Water*, 15(12), 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>
- Kumagai, S., Fujiwara, K., Nishiyama, Y., Saito, Y., & Yoshioka, T. (2025). Chemical Feedstock Recovery Through Plastic Pyrolysis: Challenges and Perspectives toward a Circular Economy. *ChemSusChem*, 18, e202500210. <https://doi.org/10.1002/cssc.202500210>
- Kunarti, E. S., Sutarno, S., & Baralangi, S. (2015). Adsorpsi Polutan Ion Dikromat Menggunakan Zeolit Alam Termodifikasi Amina. *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 22(3), 298–304. <https://doi.org/10.22146/jml.18754>
- Maleiva, L. T. N., Sitorus, B., & Jati, D. R. (2015). Penurunan Konsentrasi Gas Karbon Monoksida dari Kendaraan Bermotor Menggunakan Adsorben Zeolit Alam. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 1(2), 35–42.

- Marongiu, A., Faravelli, T., Bozzano, G., Dente, M., & Ranzi, E. (2003). Thermal Degradation of Poly(vinyl Chloride). *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 70(2), 519–553. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00024-X)
- Mayora, N., & others. (2023). Pirolisis Limbah Plastik {LDPE} dan {PP} Menggunakan Katalis Zeolit Alam dan Zeolit Teraktivasi: Distribusi Produk dan Sifat Minyak. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3), 773–779. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v11i3.69221>
- Mendoza, J. D., & others. (2025). Biodegradation of Low-Density Polyethylene by a Novel Community of Microorganisms Isolated from Plastic Residues. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1510817. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1510817>
- Nie, Y., & others. (2024). Research on the Adsorption Performance of Zeolites for Dimethyl Ether. *Minerals*, 14(11), 1141. <https://doi.org/10.3390/min14111141>
- Ningsih, A. W., Tamboesai, E. M., & Muchtar, A. (2015). Penggunaan Zeolit Alam Teraktivasi pada Perbaikan Kualitas Minyak Jelantah. *Photon: Journal of Natural Sciences and Technology*, 1(2), 97–101.
- Norvia, S., Suhartana, S., & Pardoyo, P. (2016). Dealuminasi Zeolit Alam menggunakan Asam (HCl dan H₂SO₄) untuk Katalis pada Proses Sintesis Biodiesel. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 19(2), 72–76.
- Novarini, K. S., Rusdianasari, & Bow, Y. (2021). *Bahan Bakar Minyak dari Limbah Kantong Plastik*. Penerbit Samudra Biru.
- Oktaviani, R., Hindryawati, N., & Panggabean, A. S. (2019). Modifikasi dan Karakterisasi Zeolit Alam Tasikmalaya dengan Fe₂O₃. *Journal Atomik*, 4(1), 30–35.
- Pilapitiya, P. G. C. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The World of Plastic Waste: A Review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- Pinto, F., & others. (2026). Dechlorination and Upgrading of Waste Plastics Pyrolysis Oil by Zeolites: Influence of Adsorbent Properties and Operating Conditions. *Catalysis Today*, 463, 115594. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2025.115594>
- Pratama, I., Destiarti, L., & Nurlina. (2018). Penurunan Kadar Timbal (II) menggunakan Zeolit-X Sintetis dari Batu Padas. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 7(2), 53–58.
- Putri, S. E., & Side, S. (2020). Analisis Kandungan Oksida Logam Zeolit Alam Sulawesi Selatan Teraktivasi Asam Klorida. *Journal Sainsmat*, 9(2), 159–163.
- Ramadhanty, T., & others. (2024). Kajian Potensi {Black Soldier Fly} dalam Pengolahan Sampah Organik di {TPST Edelweiss} Kota Pontianak. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(3), 606–615. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v12i3.78706>
- Ramli, I., & Mustam, M. (2022). *Produksi Arang Karbon dengan Metode Pirolisis Lambat*. Penerbit K-Media.
- Rieger, J., & others. (2024). Chemical Recycling of Mixed Polyolefin Post-Consumer Plastic Waste. *Polymers*, 16(18), 2567. <https://doi.org/10.3390/polym16182567>

- Romero, J., & others. (2024). Dechlorination of Real Plastic Waste Pyrolysis Oil Using Adsorption-Based Approaches: Performance and Trade-Offs. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 112638. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112638>
- Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., & Sing, K. (2014). *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications* (2nd ed.). Academic Press, Elsevier.
- Safitri, I. A., & Jahro, I. S. (2021). Synthesis and Characterization of Zeolite X from Boiler Ash and Aluminum Foil Waste. *Indonesian Journal of Chemical Science and Technology*, 4(1), 15–20.
- Salsabila, N., Yushardi, & Sudartik. (2023). Analisis Kelebihan Kekurangan Pengolahan Limbah Plastik menjadi Bahan Bakar melalui Proses Pirolisis. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 9(2), 105–113.
- Saputra, A. T., Wicaksono, M. A., & Irsan, I. (2018). Pemanfaatan Minyak Goreng Bekas untuk Pembuatan Biodiesel Menggunakan Katalis Zeolit Alam Teraktivasi. *Journal of Chemurgy*, 1(1), 1–6.
- Sari, M. M., Afifah, A. S., & Suryawan, I. W. K. (2023). Konversi Sampah Plastik Menjadi Minyak Menggunakan Metode Pirolisis di {TPST} Manding, Sragen. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 4(3), 246–256. <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.20092>
- Sudalaimuthu, P., Ali, U., & Sathyamurthy, R. (2025). Optimization of Process Parameters of Catalytic Pyrolysis Using Design of Experiments and Response Surface Methodology. *Scientific Reports*, 15(1), 6054. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78180-1>
- Susanto, H., Aji, B. S., Solikhah, M. D., Nugroho, B. A., Mawardi, R., Susilawati, H. L., Cahyono, T., Wahyuni, T., Sasongko, N. A., & Martini, T. (2024). Fuel Characteristics of Pyrolysis Oil from Plastic Waste: A Case Study of Banjarnegara Waste Bank. *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 11(3), 2404–2414. <https://doi.org/10.5109/7236883>
- Tanirbergenova, A., & others. (2025). Effect of Acid Treatment on the Structure of Natural Zeolite from the Shankhanai Deposit. *Processes*, 13(9), 2896. <https://doi.org/10.3390/pr13092896>
- Tian, H., & others. (2024). PVC Dechlorination Facilitating Plastic Chemical Recycling: A Review. *Sustainability*, 16(19), 8331. <https://doi.org/10.3390/su16198331>
- Wirawan, S. K., Sudibyo, H., Setiaji, M. F., Warmada, I. W., & Wahyuni, E. T. (2015). Development of Natural Zeolite Adsorbent: Chemical Analysis and Preliminary TPD Adsorption Study. *Journal of Engineering Science and Technology*, 10(1), 87–95.
- Yansaneh, I., Bini, G., Noori, A. W., Yao, Y., Liu, Z., Zhou, Y., Gao, N., & Zhang, S. (2022). Latest Advances in Waste Plastic Pyrolytic Catalysis. *Processes*, 10(4), 683. <https://doi.org/10.3390/pr10040683>
- Yanti, R. N., Hambali, E., Pari, G., & Suryani, A. (2021). Analisis Karakteristik Fungsi Zeolit Alam Aktif sebagai Katalis Setelah Diimpregnasi Logam Nikel. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 39(2), 138–147.

- Zhang, H., Gao, S., Cao, X., Lin, J., Feng, J., Wang, H., Pan, H., Yang, Q., Lou, Y., & Zhuge, Y. (2023). Cd Removal from Aqueous Solutions Using a New Modified Zeolite Adsorbent. *Minerals*, 13(2), 197. <https://doi.org/10.3390/min13020197>
- Zhang, X. (2023). A systematic literature review on individuals' waste separation behavior. *Resources, Environment and Sustainability*, 14(September), 100137. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100137>
- Zhou, P., Chen, X., Cai, D., Liu, W., Zhou, X., Feng, D., Zhang, M., & Mao, J. (2024). A Simple Laboratory-Scale Route for Refining Camellia Oil Using Nano-Adsorbents. *Foods*, 13(17), 2707. <https://doi.org/10.3390/foods13172707>