

## PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN KATALIS ZEOLIT TERHADAP PROSES PIROLISIS PLASTIK *POLYSTYRENE* SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF

**Delvan Arielzena Tezkio Cavalera**

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: [delvan.22091@mhs.unesa.ac.id](mailto:delvan.22091@mhs.unesa.ac.id)

**Handini Novita Sari**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: [handinisari@unesa.ac.id](mailto:handinisari@unesa.ac.id)

### Abstrak

Peningkatan penggunaan plastik menyebabkan jumlah limbah plastik semakin meningkat dan menimbulkan pencemaran lingkungan, khususnya limbah *polystyrene* (PS) yang sulit terurai secara alami. Salah satu metode pengolahan limbah plastik yang dapat dilakukan adalah proses pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal tanpa oksigen untuk menghasilkan minyak cair, gas, dan *residue* padat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan katalis zeolit terhadap *yield* hasil pirolisis plastik *polystyrene* sebagai bahan bakar alternatif. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan variasi katalis zeolit teraktivasi asam sebesar 10%, 20%, dan 30% dari massa sampel 500 gram pada temperatur 420°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *yield* minyak tertinggi diperoleh pada variasi katalis 10% sebesar 79,89%, kemudian menurun menjadi 73,74% pada variasi 20% dan 68,65% pada variasi 30%. Sebaliknya, *yield residue* meningkat dari 8,73% menjadi 19,98%, sedangkan *yield* gas relatif stabil pada kisaran 10 hingga 11%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis cenderung meningkatkan pembentukan minyak dibandingkan *residue*. Berdasarkan analisis *Thermogravimetric Analysis* (TGA), temperatur operasi 420°C berada pada rentang degradasi termal optimum *polystyrene* sehingga mampu menghasilkan *yield* minyak yang tinggi. Variasi katalis zeolit 10% menunjukkan kondisi paling optimal dalam menghasilkan minyak pirolisis plastik *polystyrene*.

**Kata Kunci:** pirolisis, *polystyrene*, zeolit, *yield*, minyak pirolisis

### Abstract

The increasing use of plastics has led to a rise in plastic waste and caused environmental pollution, particularly from *polystyrene* (PS) waste, which is difficult to break down naturally. One method for processing plastic waste is pyrolysis, a thermal decomposition process conducted in the absence of oxygen to produce liquid oil, gas, and solid residue. This study aims to analyze the effect of varying the addition of zeolite catalyst on the yield of *polystyrene* plastic pyrolysis as an alternative fuel. The study employed an experimental method using acid-activated zeolite catalysts at concentrations of 10%, 20%, and 30% of the 500-gram sample mass at a temperature of 420°C. The results showed that the highest oil yield was obtained at a 10% catalyst concentration (79.89%), followed by a decrease to 73.74% at 20% and 68.65% at 30%. Conversely, the residue yield increased from 8.73% to 19.98%, while the gas yield remained relatively stable in the range of 10 to 11%. These results indicate that an increase in catalyst amount tends to enhance oil formation relative to residue formation. Based on *Thermogravimetric Analysis* (TGA), the operating temperature of 420°C falls within the optimal thermal degradation range of *polystyrene*, thereby enabling a high oil yield. The 10% zeolite catalyst variation demonstrated the most optimal conditions for producing oil from the pyrolysis of *polystyrene* plastic.

**Keywords:** pyrolysis, *polystyrene*, zeolite, *yield*, pyrolysis oil

## PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk menyebabkan penggunaan plastik terus meningkat sehingga menghasilkan limbah plastik dalam jumlah besar dan menimbulkan pencemaran lingkungan karena sifatnya yang sulit terurai secara alami (Kholidah *et al.*, 2018; Nofendri *et al.*, 2021). Berdasarkan data SIPSN Kementerian Lingkungan Hidup, sekitar 20% total sampah di Indonesia merupakan sampah plastik. Salah satu jenis plastik yang banyak digunakan adalah *polystyrene* (PS) atau *styrofoam* yang memiliki sifat ringan, murah, dan mudah dibentuk sehingga banyak dimanfaatkan sebagai

kemasan makanan dan minuman (Onwudili *et al.*, 2009). Namun, limbah *polystyrene* bersifat *non-biodegradable* dan berpotensi mencemari tanah, sungai, dan lautan dalam waktu yang sangat lama (Hidalgo-crespo *et al.*, 2022).

Salah satu metode pengolahan limbah plastik yang dinilai ramah lingkungan adalah pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal tanpa oksigen untuk mengubah limbah plastik menjadi minyak cair, gas, dan residu padat (Dewangga *et al.*, 2019). Proses pirolisis mampu menghasilkan minyak cair hingga 80 wt.% tergantung pada kondisi reaksi dan jenis katalis yang digunakan (Maafa, 2021). Penggunaan katalis pada proses pirolisis berperan penting dalam meningkatkan efisiensi reaksi, menurunkan

energi aktivasi, serta memperbaiki kualitas minyak yang dihasilkan (Serrano *et al.*, 2007). Zeolit menjadi salah satu katalis yang banyak digunakan karena memiliki luas permukaan tinggi, struktur mikropori, dan sifat keasaman yang baik untuk mempercepat proses *cracking* hidrokarbon (Miandad *et al.*, 2016a; Rehan *et al.*, 2017).

Indonesia memiliki cadangan zeolit alami yang melimpah sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai katalis murah dalam proses pirolisis limbah plastik (Damajanti *et al.*, 2021). Meskipun demikian, penelitian mengenai pengaruh variasi penambahan katalis zeolit terhadap *yield* hasil produksi pirolisis *polystyrene* masih perlu dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan katalis zeolit terhadap *yield* limbah plastik jenis *polystyrene* sebagai bahan bakar alternatif.

**METODE**

**Jenis Penelitian**

Metode yang digunakan adalah metode uji eksperimen (*experimental research*). Metode eksperimen merupakan metode untuk mencari adanya hubungan sebab akibat dari beberapa faktor yang saling berkaitan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penambahan katalis zeolit terhadap *yield* minyak, *yield residue*, dan *yield gas* hasil pirolisis limbah plastik jenis *polystyrene* (PS) sebagai bahan bakar alternatif pada temperatur konstan 420°C. Variasi katalis zeolit teraktivasi asam yang digunakan terdiri dari 10%, 20%, dan 30% dari massa sampel limbah *styrofoam* bungkus makanan sebanyak 500 gram. Seluruh proses penelitian dilakukan menggunakan kondisi operasi dan peralatan pirolisis yang telah disesuaikan untuk memperoleh hasil pengujian yang optimal.

**Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan setelah Tugas akhir telah disidangkan dan disetujui untuk dilaksanakan sehingga segala data yang diperlukan terpenuhi. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Yandi Teknik, Desa Beran, Kec. Canden, Jetis, Kab. Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.

**Variabel Penelitian**

**Variabel Bebas**

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi penambahan katalis zeolit dalam pengujian proses pirolisis sebesar 10%, 20%, dan 30%

**Variabel Terikat**

Variabel terikat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *yield* minyak, *yield residue*, dan *yield gas*

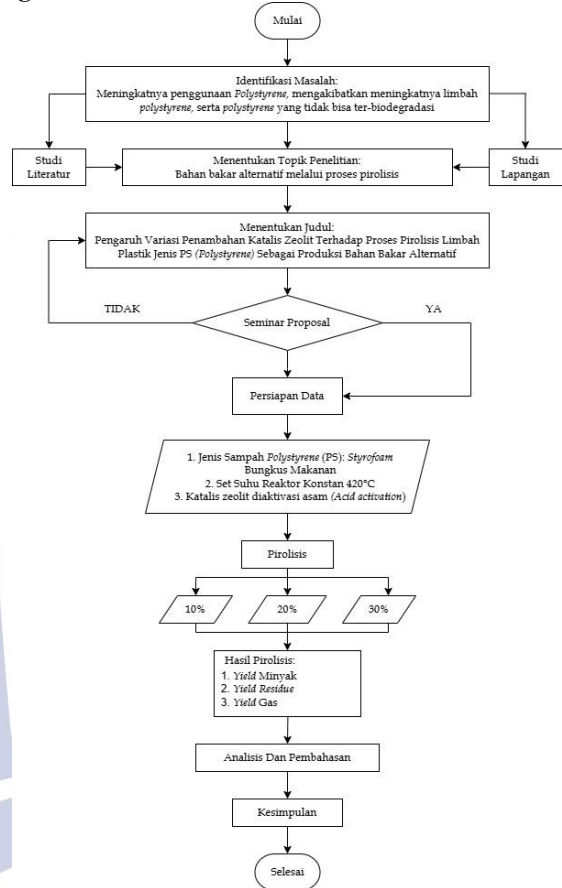
**Variabel Kontrol**

Variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut

- Plastik yang digunakan yaitu *styrofoam* bungkus makanan jenis PS (*Polystyrene*)

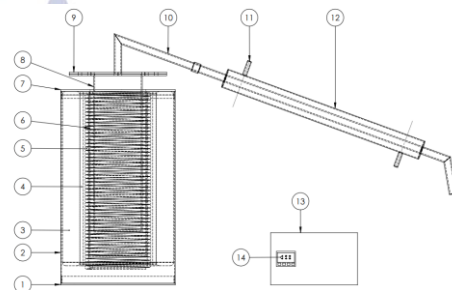
- Pemanasan reaktor menggunakan tungku listrik dengan pengontrol suhu
- Suhu reaktor 420°C
- Volume plastik *polystyrene* sebesar 500 gram
- Katalis zeolit yang teraktivasi asam NH<sub>4</sub>Cl (*acid activation*)

**Diagram Alir Penelitian**



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

**Instrumen Penelitian**



Gambar 2. Komponen Alat Pirolisis

**Keterangan Alat:**

- |                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
| 1. Tutup Bawah     | 9. Tabung Bahan Uji             |
| 2. Cover Stainless | 10. Tutup Tabung                |
| 3. Glasswool       | 11. Pipa Pembuangan             |
| 4. Isolator Asbes  | 12. Saluran Air Pendingin       |
| 5. Elemen Pemanas  | 13. Pipa Pendingin Gas          |
| 6. Tabung Pemanas  | 14. Box Temperatur Kontrol      |
| 7. Tutup Atas      | 15. Digital Monitor Temperature |

### Teknik Pengumpulan Data

Data hasil penelitian yang diperoleh meliputi massa minyak, massa *residue*, serta *yield* produk hasil pirolisis. *Yield* minyak dihitung menggunakan persamaan (1), (2) dan (3), seperti berikut:

$$Yield_{oil} = \frac{\text{mass of oil}}{\text{mass of feedstock}} \times 100\% \quad (1)$$

$$Yield_{char} = \frac{\text{mass of char}}{\text{mass of feedstock}} \times 100\% \quad (2)$$

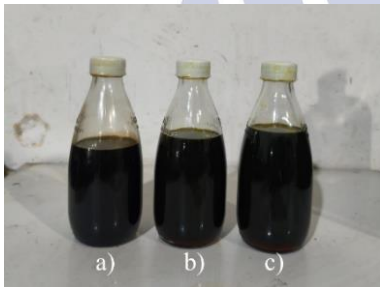
$$Yield_{gas} = 100\% - (oil + char) \quad (3)$$

### Teknik Analisa Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan katalis zeolit terhadap *yield* hasil pirolisis guna mengetahui potensi dan kesesuaian minyak pirolisis sebagai bahan bakar alternatif.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Minyak Pirolisis



Gambar 3. Hasil Minyak Pirolisis Dengan Penambahan Variasi Katalis Zeolit a) 10%, b) 20%, c) 30%

Berdasarkan gambar 3. menunjukkan minyak pirolisis dengan variasi katalis sebesar 10%, 20%, dan 30%. Ketiga sampel menunjukkan warna hitam pekat, menandakan dominasi senyawa hidrokarbon tinggi. Ketiga hasil minyak pirolisis menunjukkan bentuk permukaan cairan yang halus, tidak menunjukkan penggumpalan, serta tidak memiliki endapan. Hasil pirolisis plastik PS (*Polystyrene*) dengan penambahan variasi katalis zeolit pada suhu pirolisis 420°C, ditunjukkan pada tabel 2. seperti berikut.

Tabel 2. Hasil Produk Pirolisis Dengan Katalis Zeolit

Katalis Zeolit	Berat Bahan (gr)	Berat Katalis (gr)	Minyak		Residue		Gas Yield (%)
			Berat Minyak (gr)	Yield (%)	Berat Residue (gr)	Yield (%)	
10%	500	50	439	79,89	48	8,73	11,38
20%	500	100	443	73,73	93	15,62	10,64
30%	500	150	446	68,65	129	19,98	11,37

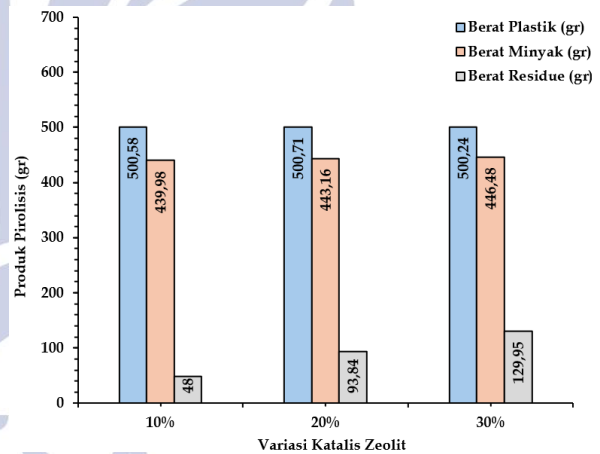
Tabel 2. menunjukkan pengaruh variasi penambahan katalis zeolit sebesar 10%, 20%, dan 30% terhadap hasil produk pirolisis plastik jenis *polystyrene* yang meliputi minyak, *residue*, dan gas. Pada penggunaan katalis 10% dengan berat bahan 500,58 gram dan berat katalis 50,09 gram, dihasilkan minyak sebanyak 439,98 gram dengan *yield* 79,89%, *residue* sebesar 48,12 gram dengan *yield*

8,73%, serta gas dengan *yield* 11,38%. Ketika jumlah katalis ditingkatkan menjadi 20% dengan berat katalis 100,25 gram dan berat bahan 500,71 gram, diperoleh minyak sebesar 443,16 gram dengan *yield* 73,73%, *residue* meningkat menjadi 93,84 gram dengan *yield* 15,62%, dan gas sebesar 10,64%. Pada variasi 30% katalis dengan berat katalis 150,13 gram dan berat bahan 500,24 gram, minyak yang dihasilkan sebesar 446,48 gram dengan *yield* 68,65%, *residue* sebesar 129,95 gram dengan *yield* 19,98%, serta gas sebesar 11,37%.

*Yield* minyak mengalami penurunan seiring bertambahnya jumlah katalis zeolit, yaitu dari 79,89% pada variasi katalis 10% menjadi 73,73% pada katalis 20% dan 68,65% pada katalis 30%. Sebaliknya, *yield residue* meningkat dari 8,73% menjadi 15,62% dan mencapai 19,98%, sedangkan *yield gas* relatif stabil pada kisaran 10–11%. Peningkatan *residue* terjadi akibat terbentuknya padatan hasil pirolisis yang tidak terdegradasi sempurna serta akumulasi katalis zeolit yang tidak bereaksi dan ikut tertinggal sebagai *residue* padat. Semakin besar jumlah katalis yang ditambahkan, maka semakin besar pula massa *residue* yang dihasilkan.

## ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### Analisis Dan Pembahasan *Yield* Hasil Pirolisis



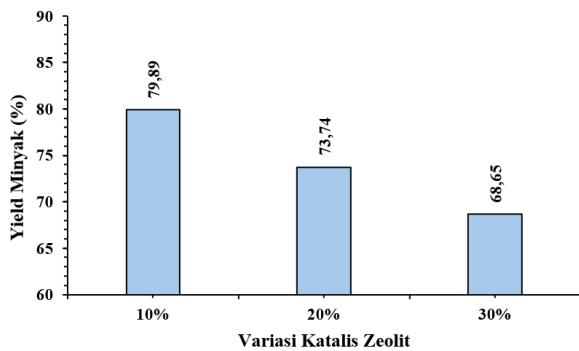
Gambar 4. Hasil Produk Pirolisis *Polystyrene* Dengan Penambahan Variasi Katalis Zeolit

Variasi penambahan katalis zeolit sebesar 10%, 20%, dan 30% memberikan pengaruh terhadap hasil proses pirolisis plastik PS (*polystyrene*) berupa minyak dan *residue*. Pada variasi katalis 10% diperoleh massa minyak sebesar 439,98 gram dan *residue* 48 gram, sedangkan pada variasi 20% massa minyak meningkat menjadi 443,16 gram dengan *residue* 93,84 gram. Pada variasi 30%, massa minyak meningkat menjadi 446,48 gram disertai peningkatan *residue* hingga 129,85 gram. Peningkatan massa minyak menunjukkan bahwa penambahan katalis zeolit mampu meningkatkan proses *catalytic cracking* sehingga konversi plastik menjadi produk cair semakin optimal (Amir *et al.*, 2024).

Peningkatan produk minyak terjadi karena katalis zeolit berperan dalam mempercepat proses depolimerisasi dan pemutusan ikatan C-C pada rantai polimer menjadi hidrokarbon yang lebih ringan dan mudah terkondensasi

menjadi minyak pirolisis (An *et al.*, 2024). Selain itu, zeolit juga membantu pembentukan senyawa aromatik khas *polystyrene* seperti *benzene*, *toluene*, dan *xilene* (Dong *et al.*, 2023). Namun, peningkatan jumlah katalis juga menyebabkan residue meningkat akibat akumulasi katalis zeolit yang bersifat stabil secara termal serta terbentuknya char selama proses pirolisis (Khazaal & Abdulaaima, 2023).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pirolisis yang digunakan cukup efektif dalam menghasilkan produk cair. Penelitian Lopez *et al.*, (2018). melaporkan *yield* minyak pirolisis *polystyrene* sekitar 70 wt% menggunakan katalis zeolit, sedangkan Sukkasem *et al.*, (2026) memperoleh *yield* sebesar 77,73 wt% menggunakan zeolit sintetis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis zeolit mampu meningkatkan pembentukan minyak pirolisis secara optimal.



Gambar 5. Hasil *Yield* Minyak Pirolisis

$$Yield_{oil} = \frac{\text{mass of oil}}{\text{mass of feedstock}} \times 100\% \quad (\text{Odejobi et al., 2020})$$

Hasil:

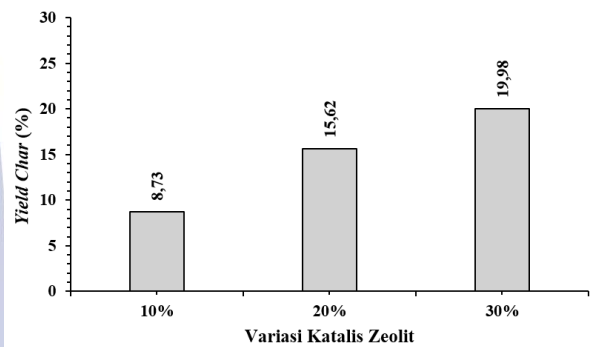
$$\text{Katalis Zeolit 10\%} = \frac{439,98 \text{ gram}}{550,58 \text{ gram}} \times 100\% = 79,89\%$$

$$\text{Katalis Zeolit 20\%} = \frac{443,16 \text{ gram}}{600,71 \text{ gram}} \times 100\% = 73,74\%$$

$$\text{Katalis Zeolit 30\%} = \frac{446,48 \text{ gram}}{650,24 \text{ gram}} \times 100\% = 68,65\%$$

Variasi penambahan katalis zeolit menunjukkan pengaruh terhadap jumlah minyak yang dihasilkan, *yield* minyak tertinggi diperoleh pada variasi katalis zeolit 10% sebesar 79,89% kemudian menurun menjadi 73,74% pada variasi katalis 20%, dan kembali menurun menjadi 68,65% pada variasi katalis 30%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis zeolit menyebabkan *yield* minyak cenderung menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah katalis cenderung memperbesar pembentukan produk padat berupa *residue* dibandingkan produk cair (Chen *et al.*, 2020). Peningkatan residu tersebut secara teknis disebabkan oleh sifat zeolit sebagai material anorganik yang tidak terdekomposisi selama proses pirolisis sehingga secara langsung menambah fraksi padatan akhir seiring peningkatan *loading* katalis (Miandad *et al.*, 2016a).

Hasil penelitian ini masih menunjukkan *yield* minyak yang relatif lebih tinggi dibandingkan penelitian Rehan *et al.*, (2017) yang memperoleh *yield* sebesar 54% menggunakan *natural zeolite* dan 50% menggunakan *synthetic zeolite* pada suhu 450°C. Perbedaan hasil tersebut dipengaruhi oleh rasio katalis yang digunakan, luas permukaan katalis, proses aktivasi asam, serta kondisi operasi seperti suhu reaksi dan waktu tinggal selama proses pirolisis (Cai *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2025). Aktivasi asam pada zeolit dalam penelitian ini meningkatkan keasaman katalis sehingga proses *cracking* hidrokarbon berlangsung lebih efektif dan menghasilkan pembentukan minyak yang lebih tinggi.



Gambar 6. Hasil *Yield Char* Pirolisis

$$Yield_{char} = \frac{\text{mass of char}}{\text{mass of feedstock}} \times 100\% \quad (\text{Xu et al., 2025})$$

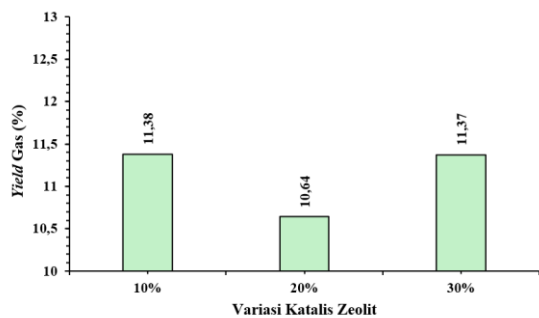
Hasil:

$$\text{Katalis Zeolit 10\%} = \frac{48,12 \text{ gram}}{550,58 \text{ gram}} \times 100\% = 8,73\%$$

$$\text{Katalis Zeolit 20\%} = \frac{93,84 \text{ gram}}{600,71 \text{ gram}} \times 100\% = 15,62\%$$

$$\text{Katalis Zeolit 30\%} = \frac{129,95 \text{ gram}}{650,24 \text{ gram}} \times 100\% = 19,98\%$$

Variasi penambahan katalis zeolit menunjukkan peningkatan *yield residue* seiring bertambahnya jumlah katalis. *Yield residue* pada variasi katalis zeolit 10% sebesar 8,73%, kemudian meningkat menjadi 15,62% pada variasi katalis 20%, dan kembali meningkat hingga 19,98% pada variasi katalis 30%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar jumlah katalis zeolit yang digunakan, maka semakin besar pula *residue* yang dihasilkan selama proses pirolisis. Peningkatan *yield residue* terjadi karena zeolit merupakan material anorganik yang memiliki stabilitas termal tinggi sehingga tidak mengalami dekomposisi selama proses pirolisis dan ikut terakumulasi sebagai padatan akhir (Rehan *et al.*, 2017). Selain itu, peningkatan jumlah katalis juga memperbesar kemungkinan terbentuknya deposit karbon akibat reaksi kondensasi hidrokarbon berat pada permukaan katalis (Miandad *et al.*, 2017). Penelitian ini menunjukkan *yield residue* yang relatif lebih rendah dibandingkan penelitian Rehan *et al.*, (2017) yang memperoleh *yield residue* sebesar 32,8% menggunakan *natural zeolite* dan *yield residue* 27,4% menggunakan *synthetic zeolite* pada suhu 450°C.



Gambar 7. Hasil Yield Gas Pirolisis

$$Yield_{Gas} = 100\% - (oil + char) \quad (\text{Aisien et al., 2021})$$

Hasil:

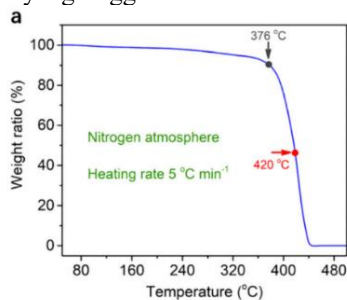
$$\text{Katalis Zeolit 10\%} = 100\% - (79,89 + 8,73) = 11,38\%$$

$$\text{Katalis Zeolit 20\%} = 100\% - (73,74 + 15,62) = 10,64\%$$

$$\text{Katalis Zeolit 30\%} = 100\% - (68,65 + 19,98) = 11,37\%$$

Yield gas hasil pirolisis plastik *polystyrene* (PS), variasi penambahan katalis zeolit menunjukkan bahwa yield gas relatif stabil pada seluruh variasi katalis. Yield gas pada variasi katalis 10% sebesar 11,38%, kemudian sedikit menurun menjadi 10,64% pada variasi katalis 20%, dan kembali meningkat menjadi 11,37% pada variasi katalis 30%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah katalis zeolit tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap pembentukan produk gas selama proses pirolisis. Stabilitasnya yield gas menunjukkan bahwa sebagian besar produk hasil degradasi termal *polystyrene* masih terkonversi menjadi fraksi cair dibandingkan gas. Kondisi ini dipengaruhi oleh temperatur operasi 420°C yang masih berada pada rentang optimum pembentukan minyak cair (Maafa, 2021). Hasil penelitian ini menunjukkan yield gas yang jauh lebih rendah dibandingkan penelitian Rehan *et al.*, (2017) yang melaporkan yield gas sebesar 13,2% menggunakan *natural zeolite* dan 22,6% menggunakan *synthetic zeolite* pada suhu 450°C.

Distribusi produk pirolisis dipengaruhi oleh karakteristik degradasi termal *polystyrene* berdasarkan Thermogravimetric Analysis (TGA). Lu *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa *polystyrene* mulai terdegradasi pada suhu 376°C dan mencapai degradasi maksimum pada 420°C, sehingga temperatur operasi penelitian sebesar 420°C berada pada kondisi optimum untuk menghasilkan yield minyak yang tinggi.



Gambar 6. Analisis Thermogravimetric (TGA) Analysis  
Sumber: (Lu *et al.*, 2021)

Thermogravimetric Analysis (TGA) dalam jurnal Lu *et al.*, (2021), degradasi termal plastik *polystyrene* (PS) menunjukkan pola degradasi satu tahap yang tajam. *Polystyrene* telah dilakukan laju pemanasan bertahap sebesar 5°C min<sup>-1</sup> didalam atmosfer nitrogen, hasil dari TGA mengindikasikan bahwa *polystyrene* mulai terdegradasi termal pada temperatur 376°C dan kemudian mencapai laju degradasi termal tertinggi pada temperatur 420°C. Hasil dari TGA ini membuktikan bahwa temperatur 420°C merupakan rentang temperatur yang efektif untuk proses pirolisis *polystyrene*. Pola degradasi satu tahap pada *polystyrene* mempercepat pembentukan senyawa styrene yang mudah terkondensasi menjadi minyak cair (Al-salem *et al.*, 2017).

## Kesimpulan

Variasi penambahan katalis zeolit berpengaruh terhadap yield hasil pirolisis plastik *polystyrene* (PS) pada temperatur 420°C. Yield minyak tertinggi diperoleh pada variasi katalis 10% sebesar 79,89% dan menurun hingga 68,65% pada variasi 30%, sedangkan yield residue meningkat dari 8,73% menjadi 19,98% dan yield gas relatif stabil pada kisaran 10 hingga 11%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis cenderung meningkatkan pembentukan minyak dibandingkan residue. Berdasarkan analisis Thermogravimetric Analysis (TGA), temperatur operasi 420°C berada pada rentang degradasi termal optimum *polystyrene* sehingga mampu menghasilkan yield minyak yang tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aisien, E. T., Christopher, I., & Aibuedefe, F. (2021). *Environmental Technology & Innovation Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst*. 22.
- Al-salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). *A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste*. 197(1408).
- Amir, S., Seyed, H., Hossein, A., & Dehaghani, S. (2024). *Catalytic pyrolysis of plastic waste to gasoline, jet fuel and diesel with nano MOF derived-loaded Y zeolite: Evaluation of temperature, zeolite crystallization and catalyst loading effects*. 299(August 2023).
- An, L., Kou, Z., & Li, R. (2024). *Research Progress in Fuel Oil Production by Catalytic Pyrolysis*.
- Cai, R., Pei, X., Wan, K., Chen, H., Zhang, Z., & Zhang, Y. (2020). *Biomass Catalytic Pyrolysis over Zeolite Catalysts with Emphasis on Porosity and Acidity: A State-of-the-art Review*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02147>
- Chen, Z., Zhang, X., Yang, F., Huanghu, P., & Zhang, X. (2020). *Deactivation of a Y-zeolite based catalyst with coke evolution during the catalytic pyrolysis of polyethylene for fuel oil*. July. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117873><For Cover>

- Damajanti, N., Ma'ruf, A., & Nugraha, H. K. (2021). Aplikasi Zeolit Alam Aktif Wonosari Sebagai Adsorben Zat Warna Remazol Yellow Fg. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 1, 80–87. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v1i.138>
- Dewangga, P. B., Rochmadi, & Purnomo, C. W. (2019). Pyrolysis of polystyrene plastic waste using bentonite catalyst. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 399(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/399/1/012110>
- Dong, S., Li, H., Bloede, I. K., Al, A. J., Huber, G. W., Hermans, I., & Lebr, E. A. (2023). *Applied Catalysis B: Environmental Catalytic conversion of model compounds of plastic pyrolysis oil over*. 324(September 2022).
- Gonzalez-Aguilar, A. M., Pérez-García, V., & Riesco-Ávila, J. M. (2023). A Thermo-Catalytic Pyrolysis of Polystyrene Waste Review: A Systematic, Statistical, and Bibliometric Approach. *Polymers*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/polym15061582>
- Hidalgo-crespo, J., Moreira, C. M., Jervis, F. X., Soto, M., Amaya, J. L., & Banguera, L. (2022). *ScienceDirect Circular economy of expanded polystyrene container production: Environmental benefits of household waste recycling considering renewable energies*. 8, 306–311.
- Khazaal, R. M., & Abdulaaima, D. A. (2023). *Energy Conversion and Management: X Valuable oil recovery from plastic wastes via pressurized thermal and catalytic pyrolysis*. 20(May).
- Kholidah, N., Faizal, M., & Said, M. (2018). Polystyrene Plastic Waste Conversion into Liquid Fuel with Catalytic Cracking Process Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as Catalyst. *Science and Technology Indonesia*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.26554/sti.2018.3.1.1-6>
- Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. (2018). Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(July 2017), 576–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>
- Lu, C., Xiao, H., & Chen, X. (2021). Simple pyrolysis of polystyrene into valuable chemicals. *E-Polymers*, 21(1), 428–432. <https://doi.org/10.1515/epoly-2021-0037>
- Maafa, I. M. (2021). Pyrolysis of polystyrene waste: A review. *Polymers*, 13(2), 1–30. <https://doi.org/10.3390/polym13020225>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Nisar, J., Ali, G., Shah, A., Iqbal, M., Ali, R., Anwar, F., Ullah, R., & Salim, M. (2019). *Fuel production from waste polystyrene via pyrolysis: Kinetics and products distribution*. 88, 236–247.
- Nofendri, Yos. Haryanto, A. (2021). Jurnal Kajian Teknik Mesin. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 06(01), 1–11. <http://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/jktm/index>
- Odejobi, O. J., Oladunni, A. A., Sonibare, J. A., & Abegunrin, I. O. (2020). Oil yield optimization from co-pyrolysis of low-density polyethylene (LDPE), polystyrene (PS) and polyethylene terephthalate (PET) using simplex lattice mixture design. *Fuel Communications*, 2–5, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2020.100006>
- Onwudili, J. A., Insura, N., & Williams, P. T. (2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.07.008>
- Rehan, M., Miandad, R., Barakat, M. A., Ismail, I. M. I., Almelbi, T., Gardy, J., Hassanpour, A., Khan, M. Z., Demirbas, A., & Nizami, A. S. (2017). Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.015>
- Serrano, D. P., Aguado, J., Rodríguez, J. M., & Peral, A. (2007). Catalytic cracking of polyethylene over nanocrystalline HZSM-5: Catalyst deactivation and regeneration study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79(1-2 SPEC. ISS.), 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.11.013>
- Sukkasem, T., Yoojaroen, N., Truadnog, Y., & Prayutte, P. (2026). *Converting polystyrene waste into valuable oils: high performance of SUZ-4 zeolite for selective oil component conversion in catalytic pyrolysis*. 405(August 2025).
- Xu, Q., Chen, Z., Xian, S., Li, H., & Wu, Y. (2025). *In-situ sulfur fixation mechanism during microwave fluidized-bed co-pyrolysis of waste tires and biomass*. 494(December 2024).
- Zhang, M., Huang, J., Meng, F., & Zhang, C. (2025). *Coke-induced deactivation in zeolite catalysts*: 17383–17399. <https://doi.org/10.1039/d5dt01936b>