

## PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN KATALIS ZEOLIT TERHADAP KARAKTERISTIK BIO-OIL DARI PIROLISIS LIMBAH LDPE, BAN, BAMBU

Yupi Eka Indriana<sup>1</sup>, Farid Majedi<sup>2</sup>, Indah Puspitasari<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Rekayasa Otomotif, Politeknik Negeri Madiun

Jl. Ring Road Barat, Kec Manguharjo Kota Madiun, Jawa Timur 63162

[farid@pnm.ac.id](mailto:farid@pnm.ac.id)<sup>1</sup>

### Abstrak

Adanya permasalahan bahan bakar fosil yang semakin menipis, sampah di TPA Winongo, Madiun yang kapasitas berlebih. Dibutuhkan suatu energi alternatif (renewable), yang dapat dihasilkan adalah sampah sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil salah satunya pirolisis. Proses pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia bahan organik melalui pemanasan tanpa atau sedikit oksigen menghasilkan produk gas, cair (tar), dan arang. Zeolit alam digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis untuk mengubah rantai hidrokarbon pendek menjadi rantai hidrokarbon yang lebih panjang. Proses pirolisis menggunakan alat pirolisis dengan model rotary kiln dengan pemanas heater listrik. Proses penelitian ini menggunakan bahan baku total seberat 500 gram meliputi sampah plastik LDPE 50%, ban bekas 25%, dan bambu bekas 25% dengan variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi temperatur 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C dan penambahan 2 sekat katalis zeolit alam dengan berat 83,3 gram di setiap sekat, dengan proses selama 3 jam. Pengambilan data volume bio-oil diambil setiap 3 menit sekali, massa jenis dan nilai kalor diteliti saat proses pirolisis sudah selesai. Hasil pengujian menunjukkan volume tertinggi bio-oil (tar) pada temperatur 400°C sebanyak 261 ml, massa jenis terendah pada temperatur 600°C sebesar 0,798 g/ml, dan nilai kalor tertinggi pada temperatur 500°C sebesar 54.233 Cal/gr.

**Kata kunci :** pirolisis, katalis zeolit, bio-oil (tar), karakteristik bio-oil (tar).

### Abstract

*The problem of dwindling fossil fuels, waste in Winongo landfill, Madiun which is excess capacity. An alternative energy (renewable) is needed, which can be produced from waste as an alternative fuel to replace fossil fuels, one of which is pyrolysis. Pyrolysis is the process of thermochemical decomposition of organic materials through heating without or little oxygen to produce gaseous, liquid (tar), and charcoal products. Natural zeolite is used as a catalyst in the pyrolysis process to convert short hydrocarbon chains into longer hydrocarbon chains. The pyrolysis process uses a pyrolysis device with a rotary kiln model with electric heater heating. This research process uses a total raw material weighing 500 grams including 50% LDPE plastic waste, 25% used tires, and 25% used bamboo with the variables used in this study are temperature variations of 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, and 600°C and the addition of 2 natural zeolite catalyst baffles weighing 83.3 grams in each baffle, with a process of 3 hours. Bio-oil volume data was taken every 3 minutes, density and calorific value were studied when the pyrolysis process was complete. The test results showed the highest volume of bio-oil (tar) at 400°C was 261 ml, the lowest density at 600°C was 0.798 g/ml, and the highest calorific value at 500°C was 54,233 Cal/gr.*

**Key words :** pyrolysis, zeolite catalyst, bio-oil (tar), bio-oil (tar) characteristics.

### PENDAHULUAN

Data statistik Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) cadangan minyak

Indonesia terus menurun dari 5,9 miliar barel di tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel di tahun 2015. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mengatakan minyak bumi di Indonesia akan habis dalam sembilan tahun kedepan bila tidak ditemukan cadangan bahan bakar yang baru.

Menurut L. Parinduri dan N. Parinduri [1], alasan kelangkaan ini adalah tingkat konsumsi bahan bakar yang sangat tinggi dan terus meningkat setiap tahunnya. Kondisi ini memperlihatkan urgensi dalam mencari solusi energi alternatif dan berinvestasi dalam sumber energi yang dapat diperbarui (*renewable*).

Permasalahan sampah menjadi sebuah topik yang signifikan untuk dibahas. Tempat Pembuangan Akhir (TPA) di Desa Winongo, Kecamatan Manguharjo, Kota Madiun merupakan salah satu tempat pembuangan akhir sampah yang mengalami masalah over kapasitas. Kota Madiun memproduksi lebih dari 100 ton sampah setiap harinya. TPA dengan luas 6,4 hektar tersebut sudah over kapasitas [2]. Oleh karena itu, pengelolaan sampah yang tepat sangat diperlukan untuk mengatasi permasalahan sampah yang terjadi di TPA Winongo, Madiun.

Untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, upaya berkelanjutan dilakukan untuk menemukan bahan bakar alternatif terbarukan (*renewable*) dan ramah lingkungan. Penggunaan bahan bakar alternatif menjadi sangat penting dan tidak dapat dihindari jika terjadi krisis energi. Salah satu energi alternatif yang dapat dihasilkan adalah sampah sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil melalui pirolisis [3].

Proses pirolisis dapat memecah hidrokarbon rantai karbon panjang menjadi rantai hidrokarbon berantai pendek. Untuk mempercepat pemecahan rantai hidrokarbon diperlukan suatu katalis. Katalis adalah zat yang mempercepat laju reaksi kimia tanpa ikut bereaksi. Katalis yang digunakan adalah katalis zeolit. Katalis zeolit adalah bahan yang memiliki struktur kristal silikat dan alumina dengan pori-pori yang teratur, yang mempengaruhi sifat katalitiknya. Zeolit mempunyai cukup banyak pori yaitu sekitar 30% lebih dari volumenya dan banyak bercampur dengan materi pengotor [4].

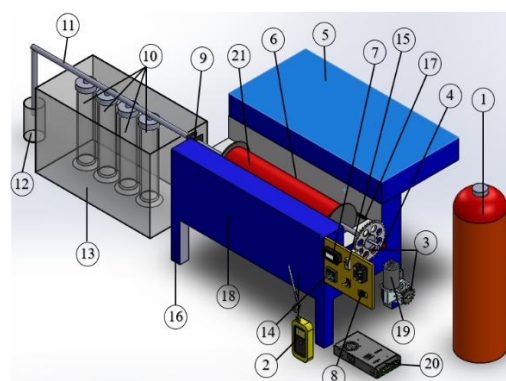
Dari permasalahan diatas dan penelitian sebelumnya dapat disimpulkan bahwa dengan menipisnya cadangan minyak yang ada di Indonesia maka perlu dilakukan penelitian mengenai bahan bakar alternatif (*renewable*), dan sampah-sampah yang ada di TPA Winongo yang semakin over kapasitas. Untuk mengatasi limbah plastik LDPE, ban, dan bambu yang ada di TPA Winongo dilakukan penelitian tentang pengaruh variasi temperatur terhadap volume dan massa jenis bio-oil (*tar*) dengan penambahan katalis zeolit alam sebagai pemecah rantai hidrokarbon yang lebih panjang. Dalam penelitian ini menggunakan 5 variasi temperatur sebesar 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C. Penelitian ini

bertujuan untuk memperoleh hasil volume, massa jenis, dan nilai kalor *bio-oil (tar)* dari proses pirolisis disetiap variasi temperatur yang telah ditentukan. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah bahwa penambahan katalis zeolit alam akan meningkatkan volume, massa jenis, dan nilai kalor *bio-oil* sekaligus menurunkan kadar airnya [5].

## METODE PENELITIAN

### 1. Alat

Alat yang digunakan untuk pirolisis adalah alat pirolisis dengan model *rotary kiln* dengan pemanas heater listrik. *Rotary kiln* merupakan model alat pirolisis yang menggunakan tabung diputar agar panas yang diberikan heater listrik dapat merata pada seluruh bagian tabung pirolisis, untuk alat pirolisis yang digunakan ini merupakan tugas akhir dari Dery Anton Daniswari dari Prodi Mesin Otomotif tahun 2021[6]. Pringgo Dista Fery Arianto, dkk dari Prodi Mesin Otomotif tahun 2022 [7] menambahkan flow meter untuk mengukur aliran gas yang lewat, menambahkan gas analyzer dan memperpanjang pipa output dari tabung pirolisis agar suhu yang terkandung dalam gas pada saat baru keluar dari tabung pirolisis tidak terlalu tinggi. Dalam penelitian ini, kami menambahkan sekat katalis (*catalyst bed*) di dalam tabung reaktor. Sekat katalis ini dimaksudkan untuk membatasi bercampurnya antara katalis dengan bahan baku dan mencegah penumpukan katalis zeolit alam di satu tempat. Penjelasan alat pirolisis ini bisa dilihat pada gambar 1 dan dibawah ini:



Gambar 1 Alat pirolisis dengan model rotary kiln

## Keterangan:

- |                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1. Tabung nitrogen            | 12. Gelas Ukur Akhir             |
| 2. Thermocouple               | 13. Akuarium                     |
| 3. Gear Ratio                 | 14. Electricity meter            |
| 4. Bearing penyangga          | 15. MCB                          |
| 5. Tutup Cover                | 16. Meja Tabung                  |
| 6. Tabung Pirolisis           | 17. Heater                       |
| 7. PID Controller             | 18. Bata Ringan                  |
| 8. Dimmer                     | 19. Motor wiper                  |
| 9. Pemutus Putaran            | 20. Power supply unit (PSU)      |
| 10. Gelas Ukur 1, 2, 3, dan 4 | 21. Catalyst bed (sekat katalis) |
| 11. Selang                    |                                  |

## 2. Bahan

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah sampah plastik LDPE, ban bekas, dan bambu bekas yang diperoleh dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang berada di Desa Winongo, Kecamatan Manguharjo, Kota Madiun.

## 3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian pirolisis meliputi persiapan sebelum melakukan proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek yaitu:

1. Pengumpulan bahan baku  
Sampah plastik LDPE, ban bekas, dan besek bekas ikan yang digunakan diperoleh dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang berada di Desa Winongo, Kecamatan Manguharjo, Kota Madiun.
2. Pembersihan sampah  
Langkah ini dilakukan untuk membersihkan limbah plastik LDPE, ban, dan besek untuk menghilangkan kotoran, debu, dan kontaminan lainnya yang dapat mempengaruhi kualitas produk pirolisis. Penggunaan bahan baku yang bersih dan bebas dari kontaminan juga dapat meningkatkan efisiensi proses pirolisis dan menghasilkan produk pirolisis yang lebih berkualitas.
3. Pengeringan sampah  
Sampah plastik LDPE, ban bekas, dan besek bekas ikan yang sudah dibersihkan dan dipisahkan kemudian dilakukan pengeringan di bawah terik matahari. Panaskan besek bekas di oven pada suhu 110°C selama 30 menit, hingga tidak ada lagi embun yang muncul pada kaca oven. Proses pengeringan ini bertujuan untuk mengurangi kandungan air dalam bahan baku sebelum dilakukan proses pirolisis. Pengeringan bahan baku dapat membantu mempersiapkan bahan baku yang lebih baik untuk proses pirolisis, sehingga mengurangi kandungan air terhadap *bio-oil* hasil pirolisis.
4. Penimbangan sampah  
Setelah limbah plastik LDPE, ban, dan besek dijemur dan benar benar kering, lalu campur semua bahan baku dengan komposisi sampah plastik LDPE 50%, ban bekas 25%, dan besek 25% timbang dan bungkus bahan baku dengan ukuran setiap bahan 500 gr untuk setiap proses.

5. Modifikasi dan persiapan alat pirolisis  
Pada penelitian ini dilakukan modifikasi alat dengan ditambahkan 2 sekat katalis (*catalyst bed*) yang digunakan sebagai tempat katalis dan pemisah katalis dengan bahan baku. Melakukan perbaikan pada tungku pirolisis dengan menambal bata ringan yang retak. Mengganti dinamo *wiper* dengan tipe yang sama dikarenakan dinamo wiper yang lama gear nya sudah aus dan mengganti beberapa kabel pada instalasi listrik untuk keamanan. Untuk menyiapkan seluruh perlengkapan alat pirolisis, dapat dilakukan dengan merangkai seluruh rangkaian alat pirolisis. Pastikan *heater* tidak terputus agar panas *heater* dapat maksimal, pastikan dalam tabung kondisi bersih sebelum dilakukannya proses pirolisis dan pastikan rangkaian pipa tidak tersumbat.
6. Pengecekan rangkaian pirolisis  
Setelah alat disiapkan lalu cek apakah ada sambungan kelistrikan yang putus dan cek setiap bagian alat agar tidak terjadi kebocoran.
7. Aktivasi katalis zeolit alam  
Aktivasi secara fisika katalis zeolit alam dilakukan dengan cara membuat ukuran batu zeolit memiliki ukuran yang sama, setelah itu dikalsinasi (pemanasan) pada suhu 300°C selama 2 jam menggunakan alat pirolisis.
8. Prosedur proses pirolisis
  - a. Setelah alat siap digunakan, kemudian siapkan batu zeolit masukkan ke dalam tabung pirolisis untuk selanjutnya dilakukan kalsinasi pada temperatur 300°C selama 2 jam.
  - b. Siapkan bahan baku dengan berat 500 gr untuk satu kali proses pirolisis.
  - c. Apabila bahan baku sudah siap dan sesuai dengan berat yang ditentukan lalu masukkan bahan kedalam tabung pirolisis.
  - d. Masukkan katalis zeolit alam ke dalam tabung reaktor dengan berat 83,3 gram pada setiap lapisannya. Gunakan dua lapis katalis zeolit alam pada setiap satu kali proses pirolisis.
  - e. Setelah bahan dimasukkan, pasang tabung ke tungku dan pasang pipa-pipa penghubung. Selanjutnya kran tabung  $N_2$  dibuka untuk memasukkan gas  $N_2$  ke dalam alat pirolisis sampai keluar bau  $N_2$  yang tercium pada pipa akhir. Proses ini sangat penting dilakukan karena untuk mendorong keluar  $O_2$  yang ada dalam alat agar pirolisis dalam bekerja dengan maksimal dan berhasil.
  - f. Atur temperatur, untuk variasi pertama dilakukan pada temperatur 250°C ulangi langkah diatas sampai pada variasi temperatur 600°C. Jika sudah diatur lalu nyalakan alatnya.
  - g. Proses pirolisis dilakukan maksimal selama 3 jam ataupun sampai tidak keluar lagi asapnya pada pipa akhir, pada proses ini data diambil setiap 3 menit sekali.
  - h. Ulangi prosedur pirolisis dengan variasi temperatur pemanasan pirolisis selanjutnya, yaitu pada temperatur 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C dan pada setiap suhu pirolisis, pengambilan sampel dilakukan sebanyak 2 kali

untuk memastikan validitas data yang dihasilkan.

Metode pengamatan, pengukuran, dan pengujian proses pirolisis pada penelitian ini adalah pengamatan dan pengukuran volume bio-oil (tar) dilakukan setiap 3 menit dengan 5 variasi temperatur selama 3 jam, menguji hasil pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek dengan variasi temperatur terhadap nilai kalor dengan menggunakan alat *Oxygen Bomb Calorimeter* LBC-C21, sesuai standar Internasional ASTM D5865-13 “Metode Uji Panas Batubara”, ASTM D240-17 “Metode Uji Nilai Kalor Minyak Bumi”, dan ASTM D4809-13 “*Oxygen Bomb Calorimeter*”. Mengukur massa jenis bio-oil (tar) pada berbagai suhu dilakukan dengan timbangan digital yang memiliki ketelitian 0,01 gram, menggunakan 5 ml bio-oil (tar) per sampel. Penghitungan menggunakan persamaan di mana  $\rho$  (rho) adalah massa jenis *bio-oil* (tar) ( $\text{kg/m}^3$ ),  $m$  adalah massa *bio-oil* (tar) (kg), dan  $V$  adalah volume *bio-oil* (tar) ( $\text{m}^3$ ).

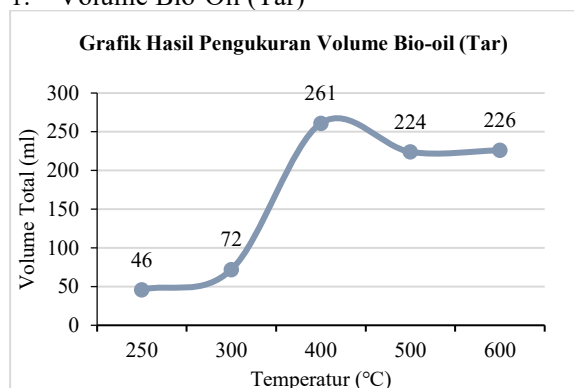
$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(1)$$

Setelah mendapatkan data volume *bio-oil* (tar), akan dilakukan pengujian massa jenis, dan nilai kalor di Laboratorium Bahan Bakar Kampus 2 Politeknik Negeri Madiun dan selanjutnya data akan diolah dan dilakukan analisis data yang dikumpulkan untuk menarik kesimpulan dan menjawab pertanyaan penelitian.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil penelitian ini meliputi pengukuran volume bio-oil (tar), pengukuran nilai kalor bio-oil (tar) dan massa jenis bio-oil (tar) dari proses pirolisis pada berbagai temperatur. Berikut hasil penelitian bio-oil (tar) pirolisis yang telah dilakukan:

1. Volume Bio-Oil (Tar)

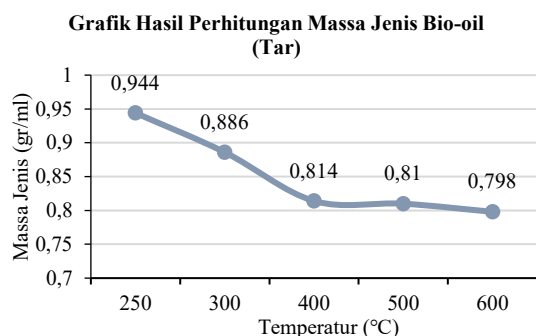


Gambar 2. Grafik Volume Bio-oil (Tar)

Gambar 2. menunjukkan hasil proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek terlihat jelas bahwa temperatur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap volume bio-oil (tar). Hasil bio-oil (tar) tertinggi pada temperatur 400°C sebanyak 261 ml. Pada saat proses pirolisis gas yang keluar lebih sedikit daripada tidak menggunakan katalis. Hal ini juga dipengaruhi oleh penggunaan katalis dimana katalis termasuk membantu mempercepat reaksi, memperpendek waktu reaksi, katalis mampu memutus rantai polimer lebih cepat [4]. Hasil bio-oil (tar) terendah pada temperatur 250°C sebanyak 46 ml. Hal ini disebabkan karena temperatur yang lebih rendah tidak cukup untuk memecah molekul-molekul besar dalam limbah plastik LDPE, ban, dan besek secara efektif, sehingga proses pirolisis tidak berlangsung secara optimal dan menghasilkan volume bio-oil yang lebih sedikit. Menurut Munarwan [8] pada temperatur 250°C menghasilkan volume bio-oil (tar) paling sedikit karena hanya energi ikatan terkecil (C-C) yang terputus sehingga gas dan tar yang terbentuk sedikit. Pada temperatur 500°C dan 600°C mengalami penurunan perolehan bio-oil (tar) dikarenakan temperatur tinggi juga mempengaruhi berkurangnya produk cair dan lebih banyak keluar produk gas. Rantai panjang molekul organik dan hidrokarbon mengalami perengkahan sekunder, yang memecahnya menjadi rantai yang lebih pendek sehingga tidak dapat terkondensasi [9]. Penelitian yang dilakukan Sabithah dkk [10] produk bio-oil (tar) yang dihasilkan setelah didiamkan 24 jam plastik HDPE 3 kg dan campuran plastik HDPE 2 kg dengan PET 1 kg membentuk lilin. *Bio-oil* (tar) yang dihasilkan pada temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C pada penelitian ini juga membentuk lilin.

2. Hasil Pengujian Bio-oil (Tar) Terhadap Massa Jenis

Gambar grafik hasil massa jenis bio-oil (tar) menggunakan limbah plastik LDPE, ban, dan besek dengan alat pirolisis rotary kiln pada suhu 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C, dengan penambahan 2 sekat katalis zeolit alam sebanyak 83,3 gram pada setiap sekat selama 3 jam dapat dilihat pada gambar 4.3 berikut:



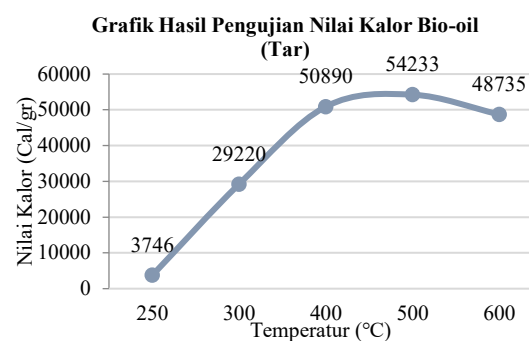
Gambar 3. Grafik Massa Jenis Bio-oil (Tar)

Gambar 3. menunjukkan hasil proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek terlihat jelas bahwa temperatur memiliki pengaruh terhadap massa jenis bio-oil (tar). Massa jenis tertinggi pada temperatur 250°C sebesar 0,944 gr/ml. Sedangkan massa jenis terendah pada temperatur 600°C sebesar 0,798 gr/ml.

Semakin rendah nilai massa jenis maka bio-oil (tar) memiliki kandungan minyak lebih banyak daripada air, sebaliknya jika semakin tinggi nilai massa jenis maka bio-oil (tar) memiliki kandungan air yang lebih banyak. Karena massa jenis minyak lebih rendah daripada massa jenis air. Massa jenis bio-oil (tar) rendah ini dipengaruhi oleh penggunaan katalis dimana katalis menyerap dan menyaring gas dan air sesuai jumlah pori-pori dari zeolit yang terbentuk jika zeolit dipanaskan [4]. Penelitian yang dilakukan Ibadurrohim [11] proses pirolisis tanpa menggunakan katalis memperoleh massa jenis lebih tinggi yaitu pada temperatur 300°C sebesar 1 gr/ml, sedangkan pada temperatur 600°C sebesar 0,91 gr/ml. Menurut [12] nilai densitas dari bahan bakar solar adalah 0,82-0,87 gr/ml, pada penelitian ini *bio-oil (tar)* pada temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C sudah memenuhi standar densitas solar.

### 3. Hasil Pengujian Bio-oil (Tar) Terhadap Nilai Kalor

Gambar grafik nilai kalor bio-oil (tar) menggunakan limbah plastik LDPE, ban, dan besek dengan alat pirolisis rotary kiln pada suhu 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C, dengan penambahan 2 sekat katalis zeolit alam sebanyak 83,3 gram pada setiap sekat selama 3 jam dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut:



Gambar 4. Grafik Nilai Kalor Bio-oil (Tar)

Gambar 4. menunjukkan hasil proses pirolisis limbah plastik LDPE, ban, dan besek terlihat jelas bahwa temperatur memiliki pengaruh terhadap nilai kalor bio-oil (tar). Nilai kalor terendah pada temperatur 250°C sebesar 3.746 Cal/gr. Sedangkan nilai kalor tertinggi pada temperatur 500°C sebesar 54.233 Cal/gr. Pada temperatur 600°C mengalami penurunan nilai kalor, sebesar 54.233 Cal/gr. Semakin tinggi nilai kalor bio-oil (tar) ini dipengaruhi oleh semakin sedikit kandungan air. Penelitian yang dilakukan Ibadurrohim [11] proses pirolisis tanpa menggunakan katalis memperoleh nilai kalor lebih rendah yaitu pada temperatur 300°C sebesar 11590.71369 Cal/gr, sedangkan pada temperatur 600°C sebesar 14211.330872 Cal/gr. Menurut Sani dkk [12] solar memiliki nilai kalor sebesar 8.426,5 J/gr, pada penelitian ini bio-oil (tar) pada temperatur 300°C, 400°C, 500°C, dan 600°C sudah lebih tinggi dari standar nilai kalor solar.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa semakin meningkatnya temperatur pada proses pirolisis serta penambahan katalis zeolit alam akan sangat berpengaruh terhadap hasil volume, massa jenis, dan nilai kalor bio-oil (tar) yang dihasilkan. Volume terendah bio-oil (tar) terdapat pada temperatur 250°C sebanyak 46 ml, sedangkan volume tertinggi bio-oil (tar) terdapat pada temperatur 400°C sebanyak 261 ml. Semakin bertambah temperatur perolehan volume bio-oil (tar) semakin meningkat. Tetapi, pada temperatur 500°C dan 600°C mengalami penurunan perolehan bio-oil (tar) karena temperatur tinggi juga mempengaruhi berkurangnya produk cair dan lebih banyak keluar produk gas. Pada proses pengujian massa jenis bio-oil (tar) tertinggi pada temperatur 250°C sebesar 0,944 gr/ml, sedangkan massa jenis terendah pada temperatur 600°C sebesar 0,798

gr/ml. Massa jenis bio-oil (tar) semakin tinggi temperatur semakin rendah nilai massa jenis, dikarenakan memiliki kandungan minyak lebih banyak dari pada air, sebaliknya jika semakin tinggi nilai massa jenis maka bio-oil (tar) memiliki kandungan air yang lebih banyak. Pada proses pengujian nilai kalor bio-oil (tar) terendah pada temperatur 250°C sebesar 3.746 Cal/gr, sedangkan nilai kalor tertinggi pada temperatur 500°C sebesar 54.233 Cal/gr. Pada nilai kalor semakin meningkat temperatur semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Semakin tinggi nilai kalor bio-oil (tar) ini dipengaruhi oleh semakin sedikit kandungan air. Hasil volume, massa jenis, dan nilai kalor bio-oil (tar) juga dipengaruhi oleh penggunaan katalis dimana katalis termasuk membantu mempercepat reaksi, memperpendek waktu reaksi, katalis mampu memutus rantai polimer lebih cepat. Katalis juga menyerap dan menyaring gas dan air sesuai jumlah pori-pori dari zeolit yang terbentuk jika zeolit dipanaskan. 453,56 MPa dan variasi arus 250 A sebesar 445,71 MPa sehingga kekuatan tarik melebihi nilai kekuatan tarik logam induk (*base metal*) terlemah *Grade A* sesuai *ASME Section IX*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Politeknik Negeri Madiun dan pihak-pihak terkait yang telah membantu kelancaran proses penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Parinduri and T. Parinduri, "Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan," *J. Electr. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 88–92, 2020, [Online]. Available: <https://www.dosenpendidikan.com/2021/10/21/tpa-winongo-kota-madiun-over-kapasitas-wali-kota-maidi-manfaatkan-residu-sampah>. Artikel ini telah tayang di Surya.co.id dengan judul TPA Winongo Kota Madiun Over Kapasitas, Wali Kota Maidi: Manfaatkan Residu Sampah, and P. S. A. C. S. | E. T. J. Permata, "TPA Winongo Kota Madiun Over Kapasitas, Wali Kota Maidi: Manfaatkan Residu Sampah Artikel ini telah tayang di Surya.co.id dengan judul TPA Winongo Kota Madiun Over Kapasitas, Wali Kota Maidi: Manfaatkan Residu Sampah,

<https://surabaya.tribunnews.com/2021/10/21/tpa-winongo-kota-madiun-over-kapasitas-wali-kota-maidi-manfaatkan-residu-sampah>.  
Surya.co.id, Kota Madiun, p. 1, 2021. [Online]. Available:  
<https://surabaya.tribunnews.com/2021/10/21/tpa-winongo-kota-madiun-over-kapasitas-wali-kota-maidi-manfaatkan-residu-sampah>.

- [3] F. Majedi, A. C. Arifin, B. Asngali, and H. Wahyu Barkhawa, "Tar Kinetic Parameters of Pyrolysis Processes of Brem, Plastic, and Durian Skin Waste with Temperature Variations on A Rotary Kiln," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1845, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012001.
- [4] Yudi Kenang Pamungkas, "Pengaruh Katalis Zeolit Alam Terhadap Perolehan," Universitas Jember, 2020.
- [5] Z. Magyarová, M. Králik, and T. Soták, "Utilization of zeolite catalysts in biomass exploitation: a minireview," *Monatshefte für Chemie - Chem. Mon.*, vol. 154, no. 8, pp. 815–835, 2023, doi: 10.1007/s00706-023-03099-8.
- [6] D. A. DANISWARI, "RANCANG BANGUN PENGEMBANGAN ALAT PROSES PIROLISIS DENGAN MODEL ROTARY KILN MENGGUNAKAN HEATER LISTRIK," Politeknik Negeri Madiun, 2021.
- [7] P. D. F. ARIANTO, "PENGARUH VARIASI HEATING RATE PIROLISIS TERHADAP NILAI KALOR DAN VOLUME BIO-OIL (TAR) HASIL PIROLISIS LIMBAH BREM DENGAN MODEL ROTARY KILN MENGGUNAKAN HEATER LISTRIK," Politeknik Negeri Madiun, 2022.
- [8] E. Munarwan and F. Majedi, "Karakteristik Bio-Oil Hasil Pirolisis Limbah Brem Dengan Variasi Temperatur," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 7, no. 1, pp. 23–28, 2019, doi: 10.32487/jtt.v7i1.552.
- [9] S. Jamilatun, Y. Elisthatiana, S. N. Aini, I. Mufandi, and A. Budiman, "Effect of Temperature on Yield Product and Characteristics of Bio-oil From Pyrolysis of *Spirulina platensis* Residue," *Elkawanie*, vol. 6, no. 1, p. 96, 2020, doi: 10.22373/ekw.v6i1.6323.
- [10] A. Sabitah, I. N. Ardiyat, Misbachudin, I. U. Wusko, Rahma, and P. Ningsih, "Waste: the Effect of Temperature and Reaction Time in,"

vol. 9, no. 1, pp. 98–106, 2024, doi:  
10.20527/sjmekinematika.v9i1.318.

Dengan Model Rotary Kiln Menggunakan  
Heater Listrik,” madiun state polytechnic, 2021.

[11] M. Ibadurrochim and politeknik negeri Madiun,  
“Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap  
Volume, Massa Jenis Dan Nilai Kalor Bio-Oil  
(Tar) Hasil Pirolisis Limbah Sampah Plastik

[12] A. Anwar Sani, M. Ade Ariasya, and P. Negeri  
Sriwijaya Jln Sriwijaya Negara Bukit Besar  
Palembang, “Proses Pengolahan Limbah B3  
(Oli Bekas) Menjadi,” *J. Austenit*, vol. 12, no.  
2, pp. 48–53, 2020.