



Identifikasi Senyawa Hasil Pirolisis Sampah Plastik Polietilen Tereftalat (PET) dan PET Berlapis Logam



Raidatul Fannyda^{*}, Euis Nursaadah, Aceng Ruyani

Pascasarjana Pendidikan IPA FKIP Universitas Bengkulu

^{*} Email: raidatulfannyda@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33369/pendipa.8.2.261-267>

ABSTRACT

[Identification of Pyrolysis Product Compounds from Polyethylene terephthalate (PET) Plastic Waste and Metallic PET foil] Indonesia is the second largest contributor of plastic waste in the world with an unmanageable capacity of 3.2 million tonnes each year and 1.29 million tonnes of plastic waste ending up in the ocean. Plastic waste accounted for 16% of the world's marine plastic pollution, which directly contributed greenhouse gas emissions and climate change. Pyrolysis was an effective solution to overcome the processing of plastic waste which produces energy conversion. Pyrolysis is the process of breaking down long chain polymer molecules into smaller molecules through thermal cracking in the absence of oxygen at temperatures above 400°C. Pyrolysis does not release pollutants in the form of particles and CO₂ into the atmosphere so it practically does not disturb the environment. This research method was a pyrolysis experiment on Polyethylene terephthalate (PET) plastic waste from mineral water packaging and metal-coated PET (metallized PET foil) from milk and snack packaging. The pyrolysis product was liquid oil with two different types of colors whose compounds were identified using gas chromatography – mass spectrometry (GC-MS). The number of compound components from PET plastic waste pyrolysis products was 58 components with the largest compound component areas being 5-methyl-1-heptene and 1-tridecanol. Meanwhile, the number of compound components from the pyrolysis product of metal-coated PET plastic waste (metallized PET foil) was 56 compound components with the largest compound component areas being 3-methyl-5-undecene and 1-tridecanol.

Keywords: Pyrolysis, Polyethylene (PET), Metallized PET foil.

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara penyumbang sampah plastik terbesar kedua di dunia dengan kapasitas mencapai 3,2 juta ton yang tidak dapat dikelola setiap tahunnya dan 1,29 juta ton sampah plastik berakhir di lautan. Sampah plastik menyumbang 16% dari polusi plastik laut di dunia, yang secara langsung berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca dan berkontribusi terhadap perubahan iklim. Pirolisis menjadi solusi efektif untuk mengatasi pengolahan sampah plastik yang menghasilkan konversi energi. Pirolisis merupakan proses pemecahan molekul polimer rantai panjang menjadi molekul yang lebih kecil melalui perengkahan termal tanpa adanya oksigen pada suhu di atas 400°C. Selama pirolisis, tidak ada polutan yang dilepaskan ke atmosfer dalam bentuk partikel atau CO₂, sehingga lingkungan hampir tidak tercemar. Metode penelitian ini adalah eksperimen pirolisis terhadap sampah plastik polietilen tereftalat (PET) dari kemasan air mineral dan PET berlapis logam (*metallized PET foil*) dari kemasan susu dan makanan ringan. Produk pirolisis berupa minyak cair dengan dua jenis warna berbeda yang senyawanya diidentifikasi menggunakan kromatografi gas – spektrometri massa (GC-MS). Jumlah komponen senyawa dari produk pirolisis sampah plastik PET sebanyak 58 komponen dengan area komponen senyawa terbanyak adalah 5-metil-1-heptena dan 1-tridekanol. Sedangkan jumlah komponen senyawa dari produk pirolisis sampah plastik PET berlapis logam (*metallized PET foil*) sebanyak 56 komponen senyawa dengan area komponen senyawa terbanyak adalah 3-metil-5-undekena dan 1-tridekanol.

Kata kunci: Pirolisis; polietilen (PET); PET berlapis logam.

PENDAHULUAN

Indonesia dalam konteks global merupakan negara penyumbang sampah plastik terbesar kedua setelah China. Produksi sampah plastik Indonesia mencapai 3,2 juta ton yang tidak dapat dikelola setiap tahunnya, dan 1,29 juta ton sampah plastik berakhir di lautan. Sampah plastik menyumbang 16% dari polusi plastik laut di dunia, yang secara langsung berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca dan berkontribusi terhadap perubahan iklim. (Garcia, 2019). Sementara dampak lain dari plastik dapat menyebabkan perubahan pada spesies dan habitat utama di lingkungan pesisir dan laut (Lincoln, 2022). Sebagai contoh, pada tahun 2015, emisi gas rumah kaca dari produksi, penggunaan, dan pembuangan plastik berbasis bahan bakar fosil setara dengan 1,7 gigaton CO₂. Praktek pengelolaan sampah saat ini (pengumpulan sampah yang tidak memadai, pembuangan yang tidak terkendali, dan pembakaran sampah) juga berkontribusi 5% dari emisi gas rumah kaca global. Polusi plastik di lautan juga memperburuk pemanasan global. Saat terkena sinar matahari dan panas, sampah plastik mengeluarkan metana dan etilen yang dapat meningkatkan laju perubahan iklim (Julius, 2022).

Pirolisis bisa menjadi salah satu solusi efektif untuk mengatasi pembuangan sampah plastik yang menghasilkan konversi energi (Nalluri, 2020). Pirolisis merupakan proses pemecahan molekul polimer rantai panjang menjadi molekul yang lebih kecil dan kurang kompleks melalui panas dan reaksi kimia. Di dalam pirolisis terjadi proses perengkahan termal tanpa adanya oksigen pada suhu di atas 400°C (Wang, 2021). Pirolisis adalah teknik yang dapat digunakan untuk pemulihan bahan bakar atau monomer, terutama saat menangani pengelolaan sampah plastik. Proses pirolisis menghasilkan minyak cair yang berupa bensin dan solar (Papari, 2021). Selama pirolisis, tidak ada polutan yang dilepaskan ke atmosfer dalam bentuk partikel atau CO₂, sehingga lingkungan hampir tidak tercemar.

Plastik jenis polietilen tereftalat (PET) dibuat dari asam tereftalat (asam dikarboksilat) dan etilen glikol (dialkohol). Kedua zat tersebut bereaksi bersama membentuk rantai polimer panjang, dengan air sebagai produk

sampingannya (Welle, 2018). Jenis plastik ini biasa digunakan sebagai kemasan gelas atau botol air mineral. Selain itu juga terdapat polietilen yang dilapisi lembaran logam tipis (metallized PET foil). Jenis plastik ini digunakan sebagai kemasan snack atau makanan ringan.

Pada proses pengolahan plastik, plastik jenis polietilen tereftalat adalah yang paling mudah didaur ulang (Real, 2023) dan sering dipirolisis oleh masyarakat (BPOM, 2019). Hal ini dikarenakan plastik jenis polietilen tereftalat mudah meleleh, menghasilkan bahan bakar minyak cair serta tidak meninggalkan residu berupa arang. Maka dari itu, plastik jenis polietilen sering dikumpulkan masyarakat untuk dijual ke pengepul barang bekas supaya bisa diolah daur ulang menjadi plastik Kembali atau pun menghasilkan minyak cair sebagai bahan bakar alternatif.

Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan, peneliti melakukan proses pirolisis terhadap dua jenis plastik polietilen tereftalat dengan tujuan mengidentifikasi senyawa hidrokarbon dari proses pirolisis sampah plastik polietilen tereftalat (PET) biasa dengan PET berlapis logam.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

Waktu penelitian berlangsung dari bulan Juli 2022 hingga Maret 2024 di SBIH Ruyani (Sumber Belajar Ilmu Hayati), kemudian mengirim sampel hasil pirolisis ke Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia Daerah Istimewa Yogyakarta.

Alat dan Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan yaitu sampah plastik di lingkungan MAN Insan Cendekia Bengkulu Tengah. Alat yang digunakan pada penelitian yaitu neraca digital, dua set alat pirolisis, tabung gas dan botol sampel serta alat identifikasi senyawa hasil pirolisis menggunakan kromatografi gas-spektroskopi massa (Gas Chromatography – Mass Spectrometry; GC-MS).

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data menggunakan eksperimen dengan data primer berupa minyak cair dan data sekunder berupa kromatogram serta

spektra hasil identifikasi senyawa menggunakan instrument GC-MS.

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data menggunakan alat Kromatografi Gas – Spektrometri Massa (GC-MS). Data identifikasi senyawa hidrokarbon diperoleh dari keluaran GC-MS yang masing-masing berupa kromatogram dengan waktu retensi pada sumbu X dan spektrum dengan rasio massa terhadap muatan pada sumbu Y. Sedangkan sumbu Y menunjukkan jumlah intensitas, yaitu ukuran kuantitas komponen yang ada (Dimitrov, 2013).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pirolisis dapat terlihat pada gambar 1, plastik jenis polietilen tereftalat (PET) biasa menghasilkan minyak cair dengan tekstur encer (fraksi 1) dan dua warna berbeda yaitu kuning pudar dan bening. Dari 400 gram sampah plastik PET biasa, dihasilkan 100 mL minyak berwarna kuning pudar dan 10 mL minyak bening. Sedangkan pirolisis sampah plastik PET berlapis logam (*metallized PET foil*) 720 gram menghasilkan tekstur minyak yang lebih kental (fraksi 2) dengan kandungan 17 mL minyak cair berwarna kuning lebih pekat daripada fraksi 1 dan 1 mL minyak cair bening.

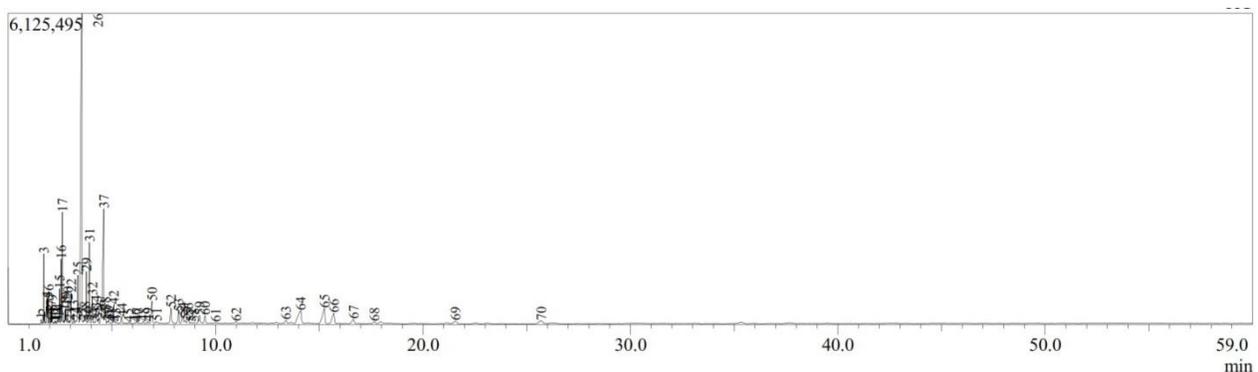
Fraksi minyak cair yang dihasilkan dari pirolisis dapat memiliki variasi warna yang tergantung pada komposisi dan kondisi pirolisisnya. Seperti yang terlihat pada gambar 1, terdapat tiga variasi warna minyak cair yaitu kuning pekat, kuning pudar, dan bening. Warna kuning pekat menunjukkan adanya senyawa-

senyawa aromatik kompleks atau senyawa dengan ikatan ganda yang lebih banyak. Fraksi minyak cair yang berwarna kuning pudar kemungkinan mengandung senyawa-senyawa ringan seperti hidrokarbon alifatik dan senyawa aromatik dengan struktur sederhana. Fraksi minyak bening atau tidak berwarna biasanya mengandung senyawa hidrokarbon alifatik ringan yang telah dihilangkan Sebagian besar gugus fungsionalnya selama proses pirolisis.



Gambar 1. Fraksi (1) minyak cair hasil pirolisis sampah plastik polietilen tereftalat (PET), (2) minyak cair hasil pirolisis sampah plastik PET berlapis logam (*metallized PET foil*)

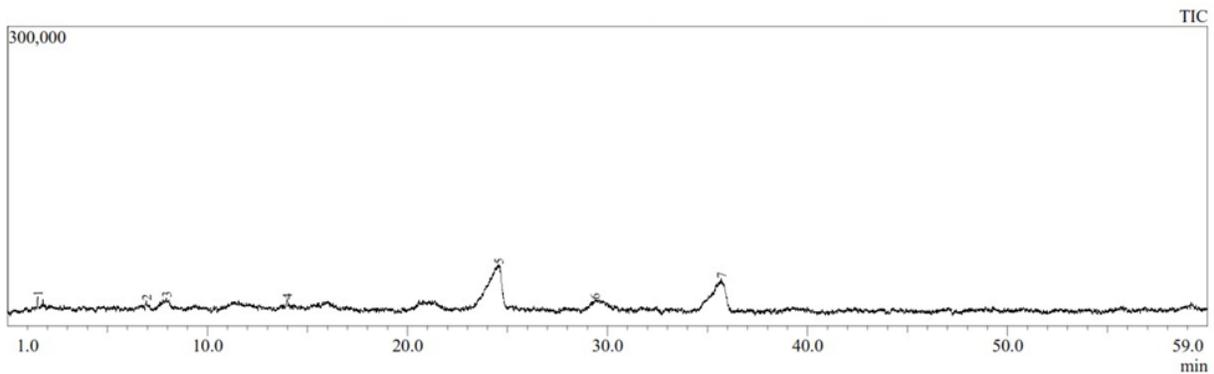
Minyak cair ini kemudian diidentifikasi kandungan senyawanya menggunakan instrumen kromatografi gas – spektrometri massa (*Gas Chromatography – Mass Spectroscopy*; GC-MS). Metode GC-MS menggabungkan dua sistem yang memiliki prinsip dasar berbeda namun dapat saling melengkapi. Ini memberikan informasi kualitatif dan kuantitatif tentang susunan dan massa atom molekul zat organik. Meskipun kromatografi gas berfungsi sebagai alat untuk memisahkan berbagai komponen campuran dalam sampel, spektrometri massa digunakan untuk mendeteksi setiap komponen molekul yang dipisahkan oleh sistem kromatografi gas.



Gambar 2. Kromatogram fraksi 1A minyak cair kuning pudar (hasil pirolisis PET biasa)

Hasil analisis GC-MS diperoleh dua jenis data, yakni kromatogram dan spektra. Kromatogram memberikan informasi mengenai jumlah komponen kimia yang terdapat dalam campuran yang dianalisis. Pada kromatogram Fraksi 1A, minyak cair yang berwarna kuning pudar (gambar 2) mengandung 70 senyawa dengan dua senyawa yang memiliki area di atas 10%. Warna kuning pudar ini bisa disebabkan oleh adanya kromofor (grup penghasil warna)

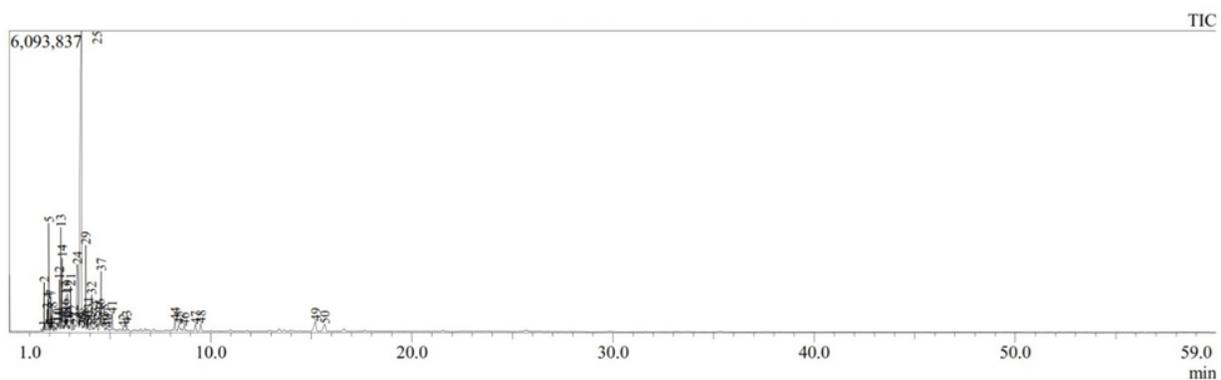
yang hadir dalam molekul-molekul ini, misalnya senyawa-senyawa dengan gugus karbonil atau gugus aromatik kecil. Sedangkan minyak cair bening (gambar 3) mengandung 7 senyawa dengan dua senyawa yang memiliki area di atas 30%. Fraksi bening atau tidak berwarna ini biasanya mengandung senyawa-senyawa non-kromofor atau senyawa yang tidak memiliki gugus penghasil warna.



Gambar 3. Kromatogram fraksi 1B minyak cair bening (hasil pirolisis PET biasa)

Pola pemecahan atau fragmentasi molekul yang terbentuk untuk setiap komponen kimia sangat spesifik sehingga dijadikan sebagai patokan untuk menentukan struktur molekul suatu komponen kimia yang diperoleh. Identifikasi tiap puncak dalam kromatogram dilakukan dengan mencocokkan spektrum MS

tiap puncak dengan data *base Wiley* untuk menentukan jenis senyawanya. Spektrum massa merupakan gambaran mengenai jenis dan jumlah fragmen molekul yang terbentuk dari masing-masing puncak pada kromatogram (Tri Putri, 2021).



Gambar 4. Kromatogram fraksi 2A minyak cair kuning yang lebih pekat hasil pirolisis PET berlapis logam (*metallized PET foil*)

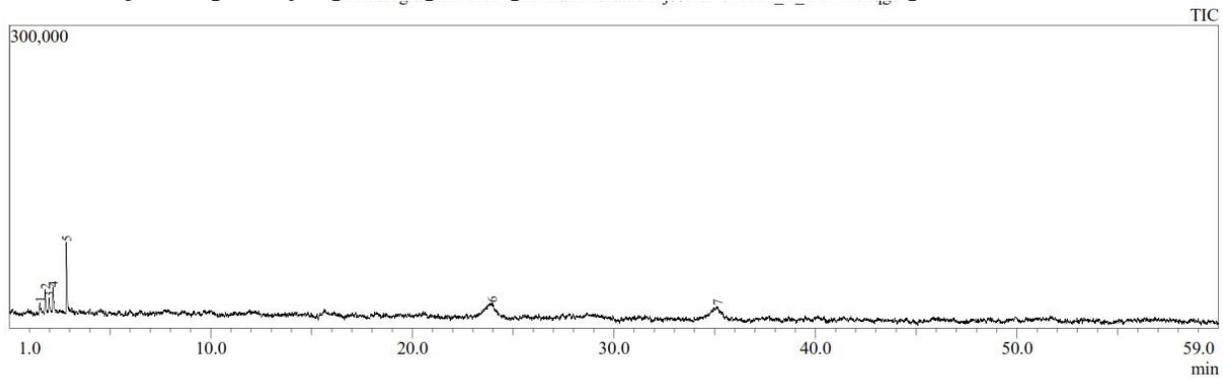
Pada gambar 4 terdapat kromatogram fraksi 2A minyak cair kuning pekat hasil pirolisis sampah plastik PET berlapis logam. Fraksi ini

mengandung 50 komponen senyawa dengan satu senyawa yang komposisinya di atas 40%. Senyawa-senyawa ini cenderung memiliki

absorbansi yang lebih tinggi terhadap Cahaya tampak, sehingga menghasilkan warna yang lebih dalam.

Kemudian pada gambar 5 terdapat kromatogram fraksi 2B minyak cair bening hasil kromatografi gas hasil pirolisis PET berlapis logam yang mengandung 7

komponen senyawa dengan 3 senyawa memiliki komposisi terbanyak yaitu di atas 15%. Fraksi bening ini secara kasat mata memiliki kesamaan tampilan fisik dengan fraksi 1B yang juga tidak berwarna yang artinya senyawanya mencakup hidrokarbon alifatik ringan.



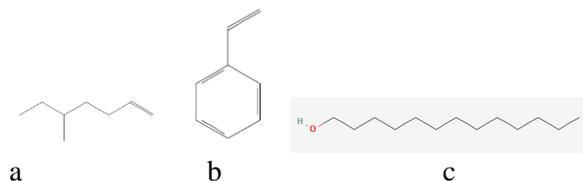
Gambar 5. Kromatogram fraksi 2B minyak cair bening hasil pirolisis PET berlapis logam (*metallized PET foil*)

Tabel 1. Identifikasi Senyawa Hasil Pirolisis Sampah Plastik

Kode / Bahan Plastik / Warna Fraksi	Waktu Retensi (s)	Area Komponen terbanyak (%)	Jumlah Atom C	Nama Komponen
1A / PET biasa / kuning pudar	3,546	32,75	C ₈ H ₁₆	5-methyl-1-heptene
	4,599	11,20	C ₈ H ₈	Styrene
1B / PET biasa / bening	24,551	56,78	C ₁₃ H ₂₈ O	1-Tridecanol
	35,693	38,69	C ₁₃ H ₂₈ O	1-Tridecanol
2A / PET berlapis logam / kuning pekat	3,573	43,62	C ₁₂ H ₂₄	5-Undecene, 3-methyl-, (E)-
2B / PET berlapis logam / bening	2,836	18,91	C ₅ H ₈ O	Cyclopentanone
	23,956	30,82	C ₁₃ H ₂₈ O	1-Tridecanol
	35,133	24,59	C ₁₃ H ₂₈ O	1-Tridecanol

Berdasarkan data pada tabel 1 kandungan senyawa produk pirolisis PET biasa yang berasal dari sampah gelas dan botol air mineral berupa 32,75% *5-methyl-1-heptene* dan 11,20% *Styrene*

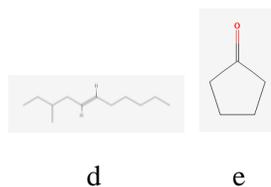
pada fraksi 1A, dan total 94,47% *1-tridecanol* pada fraksi 1B. Senyawa alkena jenis 5-metil-1-heptena seperti yang ditunjukkan pada gambar 6 struktur (a), merupakan cairan tak berwarna (pada suhu kamar) yang memiliki titik didih antara 135-140°C. Sedangkan stirena merupakan senyawa aromatik yang terdiri dari cincin benzena dengan satu gugus vinil (-CH=CH₂) yang melekat padanya seperti yang ditunjukkan pada gambar 6 struktur (b). Stirena juga tidak berwarna pada suhu kamar, memiliki titik didih sekitar 145°C, dan memiliki bau yang khas serupa dengan bau bensin. Kedua jenis senyawa ini pada umumnya merupakan bahan baku penting dalam industri polimer terutama pada pembuatan plastik kemasan makanan dan minuman. Bahan bakar cair yang dihasilkan mungkin mengandung kontaminan lain seperti amina, alkohol, hidrokarbon lilin, dan beberapa zat anorganik sehingga menghasilkan warna cairan kuning pudar (Mufidah, 2022).



Gambar 6. Struktur senyawa (a) *5-Methyl-1-heptene*, (b) *Styrene*, (c) *1-Tridecanol*

Sedangkan hasil pirolisis sampah plastik PET berlapis logam dari kemasan makanan berupa 43,62% senyawa *5-Undecene,3-methyl-(E)* pada fraksi 2A, 18,91% *Cyclopentanone* pada fraksi 2B, dan total 54,41% *1-Tridecanol* juga pada fraksi 2B. Senyawa 3-metil-5-undekena merupakan cairan tidak berwarna dengan titik didih sekitar 172°C. Namun pada hasil penelitian fraksi 2A berwarna kuning pekat yang kemungkinan berasal dari 56,38% senyawa campuran lainnya.

Pada fraksi 2B terdapat senyawa siklopentanon dan 1-tridekanol yang keduanya berupa cairan bening pada suhu kamar. Senyawa siklopentanon merupakan senyawa keton yang memiliki struktur siklik berbentuk cincin seperti pada gambar 7 (e) dengan satu gugus karbonil (C=O) yang terletak di dalam cincin tersebut dengan titik didih sekitar 130°C. Sedangkan senyawa 1-tridekanol juga terdapat pada fraksi 1B dengan struktur yang ditunjukkan pada gambar 6 (c) merupakan senyawa alkohol dengan titik didih sekitar 288°C. Alkohol 1-tridekanol seringkali digunakan sebagai bahan baku untuk sintesis berbagai senyawa kimia lainnya karena reaktivitas dan strukturnya yang fleksibel.



Gambar 7. Struktur senyawa (d) *5-Undecene, 3-methyl-, (E)-* dan (e) *Cyclopentanone*

Pengguna bahan bakar cair memerlukan bahan pengganti minyak bumi seperti bensin, solar, dan jenis minyak cair lainnya. Dalam bahan bakar ini, berbagai aditif sering dicampur dengan hidrokarbon cair untuk meningkatkan

kinerja burner atau mesin. Sifat bahan bakar seperti viskositas dan kadar abu harus sesuai dengan spesifikasi pembakar atau mesin pengguna bahan bakar. Berdasarkan hasil analisis setiap fraksi, ternyata minyak hasil pirolisis sampah plastik mengandung senyawa-senyawa hidrokarbon yang kompleks. Sehingga minyak tersebut masih perlu diproses lebih lanjut menggunakan proses destilasi fraksinasi yang lebih mampu memisahkan setiap fraksinya secara sempurna.

KESIMPULAN

Senyawa hidrokarbon dari hasil pirolisis sampah plastik telah diidentifikasi menggunakan instrumen kromatografi gas – spektrometri massa dengan perolehan sebanyak 78 komponen senyawa (area komponen senyawa terbanyak adalah 5-metil-1-heptena dan 1-tridekanol) dari sampah gelas dan botol plastik air mineral jenis plastik PET biasa dan 56 komponen senyawa (area komponen senyawa terbanyak adalah 3-metil-5-undekena dan 1-tridekanol) dari sampah plastik PET berlapis logam (*metallized PET foil*).

Hasil penelitian pirolisis sampah plastik menunjukkan berbagai potensi tindak lanjut yang dapat dilakukan untuk mengelola dan memanfaatkan limbah plastik secara lebih efisien dan berkelanjutan. Teknologi pirolisis yang lebih maju dapat membantu mengurangi dampak lingkungan dari proses ini. Hasil pirolisis lebih lanjut dapat difokuskan pada optimasi komposisi dan kualitas produk-produk yang lebih sesuai mengikuti kebutuhan bahan baku industry kimia atau energi alternatif. Selain itu pengembangan teknologi pemurnian yang efektif dapat menjadi tindak lanjut penting dari penelitian ini. Hal terpenting dari penelitian ini adalah dapat menyumbangkan informasi penting untuk meningkatkan pemahaman masyarakat tentang manfaat teknologi pirolisis dalam mengatasi masalah sampah plastik dan dampak lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- BPOM, D. B. P. P. O. (2019). *Pedoman dan Kriteria Plastik Berbahan Polyethylene Terephthalate (PET) Daur Ulang Yang Aman Untuk Kemasan Pangan*.
- Dimitrov, N., Kratofil Krehula, L., Ptiček Siročić, A., & Hrnjak-Murđić, Z. (2013). Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography. *Polymer Degradation and Stability*, 98(5), 972–979. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.02.013>
- Garcia, B., Fang, M. M., & Lin, J. (2019). Marine Plastic Pollution in Asia: All Hands on Deck! *Chinese Journal of Environmental Law*, 3(1), 11–46. <https://doi.org/10.1163/24686042-12340034>
- Julius, B., & Trajano, C. (2022). *Plastic Pollution in Southeast Asia: Wasted Opportunity? 011*.
- Lincoln, S., Andrews, B., Birchenough, S. N. R., Chowdhury, P., Engelhard, G. H., Harrod, O., Pinnegar, J. K., & Townhill, B. L. (2022). Marine litter and climate change: Inextricably connected threats to the world's oceans. *Science of The Total Environment*, 837(May), 155709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155709>
- Mufidah, A. D. I. (2022). Uji Karakteristik Minyak Pirolisis Berbahan Baku Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate. *Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya*, 10(03), 143–150.
- Nalluri, P., Prem Kumar, P., & Ch Sastry, M. R. (2020). Experimental study on catalytic pyrolysis of plastic waste using low cost catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7216–7221. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.478>
- Papari, S., Bamdad, H., & Berruti, F. (2021). Pyrolytic conversion of plastic waste to value-added products and fuels: A review. *Materials*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/ma14102586>
- Real, L. E. P. (2023). Weathering of Polymers and Plastic Materials. In *Weathering of Polymers and Plastic Materials*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-33285-2>
- Tri Putri, G., Utami, N., & Bakri, S. (2021). Karakteristik GC-MS dalam Kandungan Senyawa Ekstrak Umbi Cyperus rotundus L. Karakteristik GC-MS dalam Kandungan Senyawa Ekstrak Umbi Cyperus rotundus L. yang Berasal dari Provinsi Lampung dengan Dua Pelarut yang Berbeda. *JK Unila*, 6, 3–4.
- Wang, S., Kim, H., Lee, D., Lee, Y. R., Won, Y., Hwang, B. W., Nam, H., Ryu, H. J., & Lee, K. H. (2021). Drop-in fuel production with plastic waste pyrolysis oil over catalytic separation. *Fuel*, 305(June), 121440. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121440>
- Welle, F. (2018). The facts about PET. *Medical Device Technology*, 8(8), 18–20. https://www.petcore-europe.org/images/news/pdf/factsheet_the_facts_about_pet_dr_frank_welle_2018.pdf