



# INVENTARISASI FAKTOR KEBERLANJUTAN REDUKSI SAMPAH PLASTIK MELALUI PROSES PIROLISIS

Rijal Hakiki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, President University, Cikarang, 17550, Indonesia

\*Penulis koresponden: [rijalhakiki@president.ac.id](mailto:rijalhakiki@president.ac.id)

## ABSTRAK

Cemaran plastik sebagai mikroplastik di perairan menjadi masalah global. Plastik adalah salah satu produk turunan minyak bumi yang komponen penyusunannya berupa senyawaan karbon yang masih memiliki nilai kalor. Pirolisis merupakan salah satu metode pengolahan termal yang dapat meminimalisir emisi dari hasil pembakaran sejalan dengan reduksi timbulan sampah plastik di lingkungan. Telah banyak dikembangkan reaktor pirolisis komersial yang mayoritasnya masih dibuat dalam kapasitas besar dan menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energi reaktornya. Hal tersebut menjadi pertanyaan besar sehubungan dengan fenomena “trade offs” jejak karbon dan isu netralitas karbon pada proses pirolisis berbasis bahan bakar fosil. Artikel ini mencoba membahas inventarisasi faktor-faktor keberlanjutan proses pirolisis plastik mengacu pada berbagai literatur terkini yang kajiannya dilakukan secara sistematis terhadap berbagai rekomendasi strategi khususnya pada aspek teknis. Secara teknis proses pirolisis dapat mereduksi hingga sekitar 60% massa sampah plastik walaupun pada prosesnya dilepaskan sejumlah emisi karbon dari proses pembangkitan panas pada reaktornya. Hal ini dapat diatasi dengan mengkombinasikan penggunaan sumber energi terbarukan sebagai upaya pembangkitan panas yang diperlukan pada proses pirolisis. Optimasi rancangan reaktor pirolisis merupakan strategi lain yang dapat dilakukan sehubungan dengan isu keberlanjutan reduksi sampah plastik melalui proses pirolisis. Strategi lain sehubungan dengan peningkatan efisiensi reaktor pirolisis juga turut dibahas secara sistematis pada artikel ini.

## ABSTRACT

*Plastic pollution as microplastics in water is a global problem. Plastic is one of the petroleum derivative products whose components are carbon compounds that still have a calorific value. Pyrolysis is one of the thermal processing*

## SEJARAH ARTIKEL

Diterima  
22 Oktober 2021  
Revisi  
22 November 2021  
Disetujui  
10 Desember 2021  
Terbit online  
31 Januari 2022

## KATA KUNCI

- plastik,
- mikroplastik,
- pirolisis,
- jejak karbon,
- netralitas karbon

*methods that can minimize emissions from combustion products in line with reducing the generation of plastic waste in the environment. Many commercial pyrolysis reactors have been developed, the majority of which are still made in large capacities and use fossil fuels as a source of reactor energy. This is a big question regarding the phenomenon of "trade offs" of carbon footprints and the issue of carbon neutrality in fossil fuel-based pyrolysis processes. This article tries to discuss the inventory of the sustainability factors of the plastic pyrolysis process referring to the latest literature whose studies are carried out systematically on various strategic recommendations, especially on the technical aspects. This article tries to discuss the inventory of the sustainability factors of the plastic pyrolysis process referring to the latest literature whose studies are carried out systematically on various strategic recommendations, especially on the technical aspects. Technically, the pyrolysis process can reduce up to about 60% of the mass of plastic waste, although in the process a number of carbon emissions are released from the heat generation process in the reactor. This can be overcome by combining the use of renewable energy sources as an effort to generate heat needed in the pyrolysis process. Optimizing the design of the pyrolysis reactor is another strategy that can be carried out in relation to the issue of sustainability in reducing plastic waste through the pyrolysis process. Other strategies related to increasing the efficiency of the pyrolysis reactor are also systematically discussed in this article.*

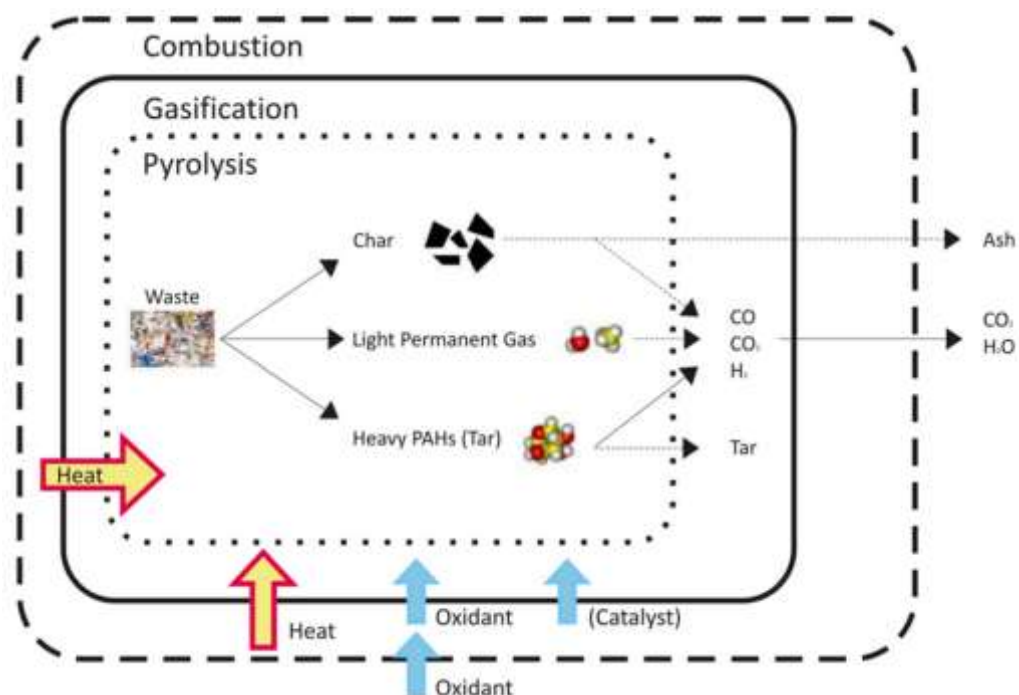
## 1. PENDAHULUAN

Timbulan sampah plastik menjadi perhatian di seluruh dunia sehubungan dengan pelepasan mikroplastik ke perairan. Plastik merupakan material turunan minyak bumi yang secara luas digunakan dalam kehidupan manusia. Pada prinsipnya kandungan senyawaan karbon dalam plastik dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi. Dengan teknologi pengolahan yang tepat, sampah plastik dapat direduksi jumlah timbulannya dan dapat menjadi salah satu alternatif sumber energi (Kunwar, Cheng, Chandrashekar, & Sharma, 2016; Rangkuti, Sukarnoto, & Rijani, 2019). Walaupun demikian, pada proses ekstraksi energi dari sampah plastik tersebut akan diperlukan sejumlah energi untuk dapat merubah struktur senyawa karbon yang terkandung didalamnya. Hingga saat ini beberapa penelitian terdahulu mengenai reduksi plastik dengan metode pengolahan termal masih terbatas pada penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber pembangkit panas (Dewi, 2014). Hal tersebut tentunya berkaitan erat dengan dengan isu netralitas karbon dan “trade offs” jejak karbon (Wiloso, Heijungs, Huppel, & Fang, 2016). Mempertimbangkan hal tersebut menjadi hal yang penting untuk dapat

mengkombinasikan pengolahan plastik metode termal dengan sumber energi terbarukan untuk menghasilkan sejumlah panas yang dibutuhkan agar proses konversi termal yang diharapkan dapat tercapai. Artikel ini akan berfokus pada kajian aspek teknis sehubungan dengan inventarisasi keberlanjutan proses reduksi timbulan sampah plastik dengan metode pengolahan termal pirolisis.

## 2. METODE TERMAL DALAM PENGOLAHAN SAMPAH PLASTIK

Insinerasi, gasifikasi dan pirolisis merupakan beberapa jenis teknologi pengolahan termal yang secara umum dapat diaplikasikan untuk mengolah biomassa atau material yang mengandung karbon (Arena, 2012). Ketiga jenis metode pengolahan termal tersebut memiliki beberapa persamaan dan perbedaan dalam implementasinya. Penggunaan sejumlah panas untuk merubah struktur senyawaan karbon pada material yang diolah menjadi persamaan dari ketiga jenis metode pengolahan termal tersebut. Sedangkan temperatur operasi, suplay oksigen dan jenis “produk” yang dihasilkan berbeda antara satu dengan yang lain. Insinerasi juga dikenal dengan metode pembakaran langsung pada suatu sistem yang terbuka dengan kisaran temperatur operasi yang cukup tinggi. Pada metode ini jumlah suplay oksigen dibuat berlebih agar dapat tercapai proses pembakaran sempurna. Secara teoritis, pada kondisi pembakaran sempurna senyawa karbon “kompleks” akan dikonversi menjadi hasil reaksi oksidasi berupa senyawa karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Pada kondisi ini hasil reaksi pembakaran akan secara langsung diemisikan ke atmosfer. Pada kondisi aktual tidak dimungkinkan untuk mencapai efisiensi 100% pada reaksi pembakaran sempurna. Kandungan impuritas pada senyawaan karbon (plastik) yang diolah dengan proses termal menjadi salah satu faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi proses insinerasi. Kandungan air (kelembaban), kemurnian bahan bakar dan efisiensi termal tungku pembakaran juga dapat mempengaruhi efisiensi proses insinerasi. Skematik perbandingan proses insinerasi (*combustion*), gasifikasi dan pirolisis disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Skematik perbandingan proses insinerasi (combustion), gasifikasi dan pirolisis (sumber: Arena, 2012)

Sedikit berbeda dengan insinerasi, pada proses gasifikasi suplay oksigen dibuat terbatas sehingga teknik ini juga dikenal dengan istilah oksidasi parsial. Secara teoritis senyawaan karbon “kompleks” akan dikonversi menjadi gas sintesa (*syngas*) (pada kisaran temperatur operasi 550 - 950 °C) yang komposisinya terdiri dari karbonmonoksida (CO), karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan hydrogen (H<sub>2</sub>) (Kwon, Westby, & Castaldi, 2009, 2010). Fraksi komposisi masing-masing komponen tersebut dipengaruhi oleh jumlah kandungan uap air yang turut disuplay kedalam reaktor. Metode termal pirolisis juga dapat digolongkan sebagai proses oksidasi parsial dengan temperatur operasi yang lebih rendah dibandingkan dengan gasifikasi, yaitu pada kisaran temperatur operasi 350 – 650 °C (Kabir, Chowdhury, & Rasul, 2015; Kim, 2001; McNamara, Koch, Liu, & Zitomer, 2016). Pada temperatur yang lebih rendah, oksidasi parsial akan mengkonversi senyawaan karbon “kompleks” menjadi senyawaan karbon yang lebih “sederhana” dalam bentuk *pyrolysis oil*. Py-oil (pyrolysis oil) merupakan jenis *volatile organic carbon* (VOCs) yang terkondensasi pada proses pirolisis akibat adanya perpindahan panas pada unit condenser sehingga VOCs berubah fase dari gas menjadi minyak cair (Maulana, Fajri, & Mahardika, 2020). Proses oksidasi parsial dilakukan pada sistem tertutup yang memungkinkan penangkapan produk hasil oksidasi parsial untuk digunakan lebih lanjut. Sistem tertutup dirancang sedemikian rupa agar dapat diperoleh *yield* dengan spesifikasi tertentu sesuai dengan yang diharapkan. Hal ini lah juga

yang membedakan proses oksidasi/pembakaran sempurna dengan proses oksidasi parsial. Produk samping yang dihasilkan juga relatif berbeda, walaupun sama-sama dalam fase padat. Pada oksidasi sempurna semua kandungan karbon akan dikonversikan menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dan menyisakan residu mineral berupa abu. Sedangkan pada oksidasi parsial akan dihasilkan produk samping berupa residu padat dengan kandungan *fix carbon* dan mineral didalamnya.

### 3. FAKTOR KEBERLANJUTAN PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK

Kapasitas reaktor, konfigurasi reaktor pirolisis, jenis bahan bakar / sumber energi yang digunakan, jenis plastik yang diolah dan produk hasil reaksi yang dihasilkan merupakan beberapa hal yang menjadi perhatian pada artikel ini, sehubungan dengan isu keberlanjutan pirolisis sampah plastik.

#### 3.1 Jenis Dan Kapasitas Reaktor Pirolisis

Penentuan kapasitas reaktor pirolisis plastik didasarkan pada ketersediaan jumlah timbulan serta jenis sampah plastik yang akan diolah. Ditinjau dari sisi operasional, secara umum terdapat dua jenis reaktor pirolisis yaitu reaktor yang beroperasi secara kontinyu dan reaktor yang beroperasi secara *batch*. Pada reaktor kontinyu material plastik yang akan diolah diumpankan pada laju alir tertentu secara berkelanjutan pada kondisi yang telah dioptimasi sesuai dengan laju alir umpan sampah plastik. Sedangkan pada reaktor *batch*, pemasukan umpan sampah plastik dilakukan pada setiap *cycle* proses pirolisis secara terpisah antara *cycle* yang satu dengan *cycle* lainnya. Dalam hal ini efisiensi proses pirolisis pada reaktor kontinyu cenderung lebih sensitif terhadap perubahan kondisi proses dalam reaktor. Sedangkan pada proses *batch* relatif lebih konsisten dan cenderung tidak terpengaruh oleh perubahan kondisi proses karena sifatnya yang tidak kontinyu. Untuk mengatasi sensitifitas reaktor kontinyu dapat diantisipasi dengan memastikan komposisi umpan sampah plastik yang masuk kedalam reaktor dibuat sehomogen mungkin dari sisi jenis, konsentrasi impuritis, kandungan air dan kelembaban.

Untuk memastikan homogenitas umpan sampah plastik perlu upaya *pre-treatment* terhadap timbulan sampah plastik antara lain pemilahan jenis, pencacahan, pencucian dan pengeringan sebelum akhirnya diumpankan kedalam reaktor pirolisis. Hal tersebut menjadi penting untuk dilakukan mempertimbangkan fakta bahwa setiap jenis plastik dapat memiliki karakteristik termal yang berbeda antara satu dengan yang lain. Kehadiran sejumlah impuritis dan kelembaban dalam jumlah yang cukup tinggi juga akan memengaruhi jumlah kalor yang diterima oleh umpan sampah plastik yang akan diolah. Karena secara teoritis setiap jenis material memiliki nilai kapasitas panasnya masing-masing.

Kehadiran impuritis dan kelembaban juga dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar akibat meningkatnya kebutuhan kalor untuk memecah ikatan karbon pada sampah plastik.

### 3.2 Konfigurasi Reaktor Pirolisis

Konfigurasi reaktor pirolisis mengacu pada konfigurasi reaktor pemrosesan termal secara umum dengan berbagai penyesuaian didalamnya. Reaktor unggun tetap (*fix bed*), reaktor unggun terfluidisasi (*fluidized bed*), *entrained flow reactor*, *rotary kiln reactor*, *moving grate reactor* dan reaktor plasma merupakan beberapa jenis reaktor pemrosesan termal yang telah banyak dikembangkan dan diaplikasikan sehubungan dengan pemrosesan termal (Arena, 2012). Lebih lanjut, terdapat dua jenis *fix bed reactor* dengan tipe aliran *downdraft* dan *updraft*. *Bubbling fluidized bed* (BFB), *circulating fluidized bed* (CFB) dan *internally circulating fluidized bed* (ICFB) merupakan beberapa jenis variasi konfigurasi pada jenis reaktor unggun terfluidisasi. Masing-masing konfigurasi reaktor tersebut memiliki karakteristik yang berbeda, serta memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing dan tentu saja akan dapat mempengaruhi kondisi operasi dan efisiensi proses pirolisis. Dari sekian banyak pilihan jenis reaktor tidak semua jenis reaktor tersebut akan dapat sesuai diaplikasikan pada proses pirolisis sampah plastik. Tentunya disesuaikan kembali dengan karakteristik reaktor dan juga karakteristik umpan sampah plastik yang akan diproses. Uemichi, dkk., 1999 melakukan kajian konversi polyethylene menjadi bahan bakar dengan menggunakan reaktor jenis unggun tetap tipe tubular (Uemichi et al., 1999). Jenis reaktor yang sama juga digunakan dalam penelitian yang dilakukan oleh Zhang, dkk., 2019 yang melakukan kajian mengenai produksi bahan bakar jet melalui pirolisis katalitik dengan karbon teraktivasi (Zhang, Duan, Lei, Villota, & Ruan, 2019). Yang perlu menjadi perhatian adalah pada proses pirolisis tidak ada suplay oksidan yang langsung kontak dengan umpan sampah plastik, sehingga dalam hal ini reaktor tipe unggun terfluidisasi tidak cocok digunakan. Hal ini dikarenakan pada reaktor unggun terfluidisasi diperlukan aliran oksidan untuk memfluidisasi unggun umpan, dan tentunya hal ini sangatlah dihindari pada proses pirolisis. Walaupun demikian, jenis reaktor unggun terfluidisasi masih memungkinkan untuk diaplikasikan pada proses pirolisis sampah plastik apabila digunakan gas inert nitrogen sebagai suplay unggun terfluidisasinya (Lin, Wei, Yang, & Lee, 2013).

### 3.3 Jenis Bahan Bakar / Sumber Energi Pirolisis

Pada umumnya mayoritas proses pirolisis konvensional menggunakan bahan bakar fosil seperti solar, minyak bakar, batu bara dan gas alam sebagai sumber bahan bakar untuk menghasilkan panas

yang dibutuhkan untuk memecah ikatan karbon pada sampah plastik. Setiap jenis bahan bakar yang digunakan tentunya memiliki karakteristik yang berbeda antara satu dengan yang lain, khususnya nilai kalori yang dihasilkan dari proses pembakarannya karena hal ini berkaitan langsung dengan kebutuhan kalor yang harus disuplai ke dalam reaktor pirolisis. Hal lain yang juga perlu dipertimbangkan dalam pemilihan bahan bakar sebagai sumber pembangkit panas adalah emisi gas buang yang dilepaskan dari proses pembakaran. Rekayasa penyediaan dan suplai kalor juga dimungkinkan untuk dilakukan, penggunaan *electric heater* dan plasma merupakan dua jenis alternatif yang mungkin dapat diaplikasikan pada proses pirolisis sampah plastik.

### 3.4 Jenis Plastik Yang Diolah Dengan Metode Pirolisis

Berbagai jenis plastik telah digunakan dalam kehidupan manusia dari mulai penggunaannya sebagai kemasan pembungkus makanan, wadah penampungan air, isolator elektronik, hingga penggunaannya pada bidang otomotif. Polyethylene Terephthalate (PET) high density polyethylene (HDPE), low density polyethylene (LDPE), polyvinyl chloride (PVC), polystyrene (PS) dan polypropylene (PP) merupakan beberapa jenis plastik yang telah umum digunakan dan memiliki karakteristik yang berbeda antara satu dengan yang lain. Perbedaan karakteristik plastik khususnya densitas, struktur rantai karbon, dan karakteristik fisik lainnya dapat mempengaruhi tingkat ketahanan plastik terhadap paparan termal. Hal tersebut berkaitan erat dengan tinggi rendahnya temperatur operasi pada proses pirolisis. Perbandingan temperatur operasi pirolisis berbagai jenis plastik disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Perbandingan temperatur operasi pirolisis berbagai jenis plastik

No.	Jenis Plastik	Temperatur Operasi Pirolisis (°C)
1	Polyethylene Terephthalate (PET)	500
2	High Density Polyethylene (HDPE)	440
3	Low Density Polyethylene (LDPE)	425
4	Polyvinyl Chloride (PVC)	650
5	Polystyrene (PS)	581
6	PP	520

Sumber: Williams2007; sharma2014; Uemichi1999; Buekens1998; miskolczi2009; kim2001

Beberapa peneliti telah melakukan kajian pada berbagai jenis sampah plastik yang diolah dengan metode termal pirolisis (Buekens & Huang, 1998; Kim, 2001; Miskolczi, Angyal, Bartha, & Valkai, 2009; Sharma, Moser, Vermillion, Doll, & Rajagopalan, 2014; Uemichi et al., 1999; Williams & Slaney, 2007). Pada jenis umpan sampah plastik campuran dapat diamati bahwa temperatur pirolisis meningkat secara signifikan. Seperti yang dilaporkan oleh Alston, dkk., 2011 yang melakukan kajian dampak

lingkungan terhadap proses pirolisis sampah plastik campuran yang berasal dari peralatan elektronik. Pada kondisi campuran dengan kandungan *acrylonitrile-butadiene-styrene*, *high impact polystyrene*, *polyvinylchloride*, *polycarbonate*, *polyphenylene oxide* dan *polymethyl methacrylate* temperatur operasi proses pirolisis mencapai 800 °C dengan *yield* py-oil mencapai 70% dari massa awal umpan plastik campuran (Alston, Clark, Arnold, & Stein, 2011).

Seperti yang telah dituliskan sebelumnya pada bagian pendahuluan, bahwa terdapat perbedaan jumlah suplay oksigen pembakaran pada proses insinerasi, gasifikasi dan pirolisis. Perbedaan jumlah oksigen yang disuplay kedalam reaktor mempengaruhi temperatur operasi dalam reaktor. Semakin banyak oksigen yang disuplay, maka semakin tinggi pula temperatur operasi yang dihasilkan, begitupun sebaliknya.

#### 4. FAKTOR KEBERLANJUTAN PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK

Terdapat dua strategi yang menjadi rekomendasi dari hasil kajian yaitu melakukan resirkulasi py-oil sebagai bahan bakar reaktor, serta penggunaan pemanas elektrik yang dilengkapi dengan panel surya sebagai sumber energi. Mempertimbangkan berbagai kajian terdahulu, yang telah coba ditelaah pada bagian-bagian paragraf sebelumnya dapat diamati bahwa pada proses pembakaran langsung, dimungkinkan dhasilkannya pembakaran sempurna dan tidak sempurna yang tentunya berpengaruh terhadap gas yang diemisikan ke atmosfer. Hal tersebut dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, khususnya sehubungan dengan peningkatan potensi dampak pemanasan global. Oleh karena itu, dengan adanya teknik reduksi timbulan sampah plastik dengan sistem tertutup, di satu sisi telah dapat mengatasi peningkatan potensi dampak pemanasan global. Apabila ditinjau dari sisi lain, penggunaan bahan bakar fosil pada proses pirolisis plastik juga turut berkontribusi terhadap jumlah CO<sub>2</sub> equivalen di atmosfer bumi. Walaupun secara jumlah mungkin lebih rendah dibandingkan dengan proses pembakaran langsung. Atau dengan kata lain telah terjadi “*trade offs*” potensi pencemaran air dan tanah beralih ke pencemaran udara (Anuar Sharuddin, Abnisa, Wan Daud, & Aroua, 2016).

Sebagai upaya perbaikan, akan lebih baik apabila py-oil yang dihasilkan dari proses pirolisis tersebut diresirkulasikan kembali ke reaktor pirolisis sebagai pengganti bahan bakar fosil yang digunakan. Dalam hal ini, bahan bakar fosil tetap digunakan sebagai starter awal proses pirolisis, untuk selanjutnya digantikan dengan py-oil. Hal ini dapat menjadi salah satu upaya untuk mencapai upaya netralitas karbon, karena tidak lagi menggunakan bahan bakar fosil, tetapi telah menggunakan bahan bakar yang dihasilkan dari proses tersebut. Pada proses resirkulasi py-oil sebagai bahan bakar reaktor, tujuan utama yang menjadi target hanyalah berupa upaya untuk mengurangi timbulan sampah plastik.



Penggunaan sumber pemanas elektrik yang dilengkapi dengan panel surya sebagai sumber energi bersih. Pada skenario ini dapat dikatakan bahwa manfaat yang diperoleh bukan hanya terjadi pada reduksi timbulan sampah, tetapi juga adanya perolehan py-oil yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif pengganti minyak bumi (Kunwar et al., 2016).

## 5. KESIMPULAN

Mengacu pada berbagai hasil kajian terdahulu serta referensi terkait dapat dinyatakan bahwa pemrosesan termal timbulan sampah plastik dapat menjadi keuntungan tersendiri ditinjau dari sisi lingkungan sehubungan dengan reduksi timbulannya. Selain itu, konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak berupa py-oil dapat menjadi alternatif sumber energi yang memenuhi aspek netralitas karbon apabila disandingkan dengan sumber energi terbarukan pada proses pirolisis termalnya. Aspek teknis meliputi pemilihan jenis dan kapasitas reaktor, konfigurasi reaktor, jenis bahan bakar/sumber energi pirolisis, jenis plastik yang diolah dan produk hasil reaksi pirolisis merupakan faktor-faktor yang dapat dijadikan indikator keberlanjutan reduksi timbulan plastik melalui proses pengolahan termal pirolisis.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- Alston, S. M., Clark, A. D., Arnold, J. C., & Stein, B. K. (2011). Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 1: Experimental pyrolysis data. *Environmental Science and Technology*, 45(21), 9380–9385. <https://doi.org/10.1021/es201664h>
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 32(4), 625–639. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
- Buekens, A. G., & Huang, H. (1998). Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 23(3), 163–181. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00025-1)
- Dewi, I. N. D. . (2014). *Karakteristik Minyak Hasil Pirolisis Batch Sampah Plastik Polyethylene dan Polystyrene pada Berbagai Suhu*. 7(1), 52–55.
- Kabir, M. J., Chowdhury, A. A., & Rasul, M. G. (2015). Pyrolysis of municipal green waste: A modelling, simulation and experimental analysis. *Energies*, 8(8), 7522–7541. <https://doi.org/10.3390/en8087522>
- Kim, S. (2001). Pyrolysis kinetics of waste PVC pipe. *Waste Management*, 21(7), 609–616. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00127-6](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00127-6)
- Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>
- Kwon, E., Westby, K. J., & Castaldi, M. J. (2009). An investigation into the syngas production from Municipal Solid Waste (MSW) gasification under various pressures and CO<sub>2</sub> concentration

- atmospheres. *Proceedings of the 17th Annual North American Waste to Energy Conference, NAWTEC17*, 237–242. <https://doi.org/10.1115/nawtec17-2351>
- Kwon, E., Westby, K. J., & Castaldi, M. J. (2010). Transforming municipal solid waste (MSW) into fuel via the gasification/pyrolysis process. *18th Annual North American Waste-to-Energy Conference, NAWTEC18*, 7, 53–60. <https://doi.org/10.1115/nawtec18-3559>
- Lin, Y.-H., Wei, T.-T., Yang, M.-H., & Lee, S.-L. (2013). Postconsumer Plastic Waste Over Post-Use Cracking Catalysts for Producing Hydrocarbon Fuels. *Journal of Energy Resources Technology*, 135(1). <https://doi.org/10.1115/1.4007661>
- Maulana, E., Fajri, B. N., & Mahardika, D. (2020). Perancangan Proses Pembuatan Reaktor Pirolisis Model Horizontal Kapasitas 75 Kg/Jam. *Prosiding Seminar Nasional ...*. Retrieved from <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit/article/view/7428>
- McNamara, P. J., Koch, J. D., Liu, Z., & Zitomer, D. H. (2016). Pyrolysis of Dried Wastewater Biosolids Can Be Energy Positive. *Water Environment Research*, 88(9), 804–810. <https://doi.org/10.2175/106143016x14609975747441>
- Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., & Valkai, I. (2009). Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 1032–1040. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.019>
- Rangkuti, C., Sukarnoto, T., & Rijani, M. (2019). Pembuatan minyak plastik dengan proses pirolisis. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.36289/jtmi.v14i1.97>
- Sharma, B. K., Moser, B. R., Vermillion, K. E., Doll, K. M., & Rajagopalan, N. (2014). Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags. *Fuel Processing Technology*, 122, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.01.019>
- Uemichi, Y., Nakamura, J., Itoh, T., Sugioka, M., Garforth, A. A., & Dwyer, J. (1999). Conversion of polyethylene into gasoline-range fuels by two-stage catalytic degradation using silica-alumina and HZSM-5 zeolite. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 38(2), 385–390. <https://doi.org/10.1021/ie980341+>
- Williams, P. T., & Slaney, E. (2007). Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 754–769. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.002>
- Wiloso, E. I., Heijungs, R., Huppes, G., & Fang, K. (2016). Effect of biogenic carbon inventory on the life cycle assessment of bioenergy: Challenges to the neutrality assumption. *Journal of Cleaner Production*, 125(July), 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.096>
- Zhang, Y., Duan, D., Lei, H., Villota, E., & Ruan, R. (2019). Jet fuel production from waste plastics via catalytic pyrolysis with activated carbons. *Applied Energy*, 251(May), 113337. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113337>