



## Recycle Limbah Polyethylene Terephthalate Melalui Proses Pirolisis Dengan Katalis Silika-Alumina

### Recycling of Polyethylene Terephthalate Waste Through Pyrolysis Process with Silica-Alumina Catalyst

Siti Salamah\*, Maryudi

Prodi Teknik Kimia, Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta  
Jl. Prof. Dr. Soepomo, SH. No. 2, Umbulharjo, Warungboto, Yogyakarta, 55164, Indonesia.  
\*E-mail: sitisalamah@che.uad.ac.id

Terima draft: 29 September 2018; Terima draft revisi: 14 Januari 2019; Disetujui: 30 Juni 2019

#### Abstrak

Sampah plastik di dunia semakin meningkat setiap tahunnya, bahkan hingga menyentuh angka yang sangat mengkhawatirkan. Salah satu jenis sampah plastik yang paling banyak ditemukan adalah *polyethylene terephthalate*. Salah satu pengolahan sampah plastik yang mulai banyak dilakukan adalah proses pirolisis untuk mengkonversi menjadi sumber energi. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pirolisis sampah *polyethylene terephthalate* berupa botol bekas dengan katalis  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  berbentuk butiran. Penelitian dilakukan dengan reaktor fixed bed berbahan stainless steel yang dilengkapi dengan *condensor*. Penelitian dilakukan dengan pengecilan ukuran plastik *polyethylene terephthalate* (1-2 cm) dan proses pirolisis dilakukan pada suhu 450 °C pada waktu 2 jam dengan variabel berat katalis tetap yaitu 4,8,12 dan 16 gram. Produk pirolisis dianalisis dengan *Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy* dan *Gas Chromatography Mass Spectrometer*. Proses pirolisis menghasilkan produk pirolisis berwujud gas dan cairan yang dalam yang temperatur ruangan berwujud padatan berwarna kuning, dengan titik lebur 90°C. Pirolisis optimal terjadi pada suhu 450 °C dengan katalis 1 % berat, dengan umpan 400 gr diperoleh yield 14%. Hasil analisis *Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy* menunjukkan dalam produk mengandung gugus benzena, gugus karbonil, gugus ester, gugus hidroksil. Kandungan senyawa yang paling dominan pada hasil analisis *Gas Chromatography Mass Spectra* adalah asam benzoat 71%, yang merupakan monomer dari *polyethylene terephthalat* dan senyawa turunan asam benzoat (toluena dan isomernya) 15%, *biphenil* 4% dan *triphenil* 7%. Produk pirolisis juga mengandung gas  $\text{H}_2$  0,145% dan gas CO 6,09%

Kata kunci: *polyethylene terephthalat*, pirolisis, katalis  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , yield

#### Abstract

Plastic waste in the world increases continuously, even reaching a very alarming number. One of the most common types of plastic waste is polyethylene terephthalate. One of the many types of plastic waste processing that is currently done is the pyrolysis process to convert into an energy source. This study was conducted to study the pyrolysis of polyethylene terephthalate waste of used bottles with catalysts of granular  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . The study was conducted with a fixed bed reactor made from stainless steel which was equipped with a condenser. The study was carried out by reducing the size of polyethylene terephthalate plastic (1-2 cm), followed by pyrolysis. The pyrolysis process was carried out at a temperature of 450 °C at 2 hours with a fixed variable weight of catalysts which were 4,8.12 and 16 grams. Pyrolysis products were analyzed by Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy and Gas Chromatography Mass Spectrometer. The pyrolysis process results in deep gas and liquid pyrolysis products in which the room temperature is solid yellow, with a melting point of 90 °C. Optimal pyrolysis occurs at a temperature of 450 °C with a catalyst of 1% by weight and with a feed of 400 gr polyethylene terephthalate, obtained 14% yield. The results of Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy analysis show that the product contains a benzene group, carbonyl group, ester group, hydroxyl group. The most dominant compounds content in the Gas Chromatography-Mass Pec analysis is 71% benzoic acid, which is a monomer of polyethylene terephthalate and benzoic acid derivative compounds (toluene and its isomer) 15%, biphenil 4% and triphenil 7%. Pyrolysis gas product contain  $\text{H}_2$  0.145% and CO 6.09%

Key word: polyethylene terephthalate, pyrolysis, catalyst,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , yield

## 1. Pendahuluan

Sampah plastik di dunia semakin meningkat setiap tahunnya, bahkan menyentuh angka yang sangat mengkhawatirkan. Data yang ada mengatakan bahwa setiap 100 toko memproduksi sampah plastik sebesar 10,95 juta ton sampah pertahun (Wahyuni, 2016). Jenis sampah plastik yang mengalami penumpukan saat ini sangat bervariasi, salah satu yang terbanyak adalah jenis *polyethylene terephthalate (PET)*.

PET pada dasarnya berupa film yang lunak, transparan, dan fleksibel serta memiliki kekuatan benturan dan kekuatan sobek yang baik (Sacharow dan Griffin, 1980). Para ahli mengatakan bahwa, sampah plastik jenis PET sebaiknya diuraikan menjadi bahan bakar jenis solar atau bensin melalui proses pemutusan rantai karbon dengan bantuan panas, proses ini dikenal dengan proses pirolisis (Havelcová dkk., 2016).

Teknologi pirolisis telah banyak digunakan dalam hal konversi bahan padat menjadi bahan bakar fasa gas dan cairan. Proses konversi ini secara umum dilakukan dengan cara termal, yaitu pemutusan ikatan rantai dengan bantuan panas.

Dalam rangka memanfaatkan plastik bekas seperti PET sebagai bahan baku pirolisis, sampah plastik jenis PET secara tidak langsung juga terkonversi sebagai energi terbarukan yang dikenal dengan konsep *waste to energy (WtE)*. Konsep tersebut telah dilakukan oleh banyak peneliti. Salah satu peneliti yang telah melakukan kajian tentang proses pirolisis menggunakan sampah plastik jenis PET adalah Silvarrey dkk. (2018), dalam penelitiannya ingin mengetahui pengaruh kondisi operasi pirolisis PET seperti suhu, rasio katalis dan bahan baku, serta waktu operasi terhadap *yield* yang dihasilkan sekaligus jumlah pengurangan asam benzoat sebagai hasil samping dengan bantuan katalis zirconia sulfat. Hasil penelitiannya menunjukkan terjadi pengurangan jumlah asam benzoat sebanyak 27-32% berat pada suhu operasi 450-600°C selama 20 menit dan terbentuk fraksi gas C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub>.

Plastik PET memiliki nilai kalor yang tinggi, sehingga proses konversi energi dengan bahan baku jenis PET menggunakan proses pirolisis ini sangatlah efektif untuk dilakukan (Lee dkk., 2017). Proses pirolisis sangat efektif dalam memecah molekul-molekul polimer menjadi senyawa yang lebih sederhana, yaitu dengan bantuan panas

tanpa melibatkan oksigen maupun *steam* (Amrullah dkk., 2017).

Minyak cair (*oil*) hasil pirolisis dapat digunakan sebagai bahan bakar *furnace, boiler, turbin*, dan bahan bakar *diesel* tanpa melalui proses perbaikan bahan baku terlebih dahulu (Kreith, 1998). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi proses pirolisis dalam hal peningkatan produksi minyak bakarnya, yaitu suhu proses, jenis reaktor, waktu tinggal, tekanan, jenis katalis, dan tipe aliran gas. Sebagai contoh, pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, kualitas dan *yield* produk meningkat dengan adanya penambahan katalis (Persson dan Yang, 2019).

Pirolisis sampah plastik jenis PET tanpa adanya katalis menghasilkan produk samping berupa asam benzoat (Al-Salem dkk., 2017). Asam benzoat ini sangat mengganggu pipa dan *heat exchanger*, sebab dapat mengakibatkan terjadinya proses *scaling* atau sumbatan terhadap saluran pipa. Hal tersebut mengakibatkan perlunya dilakukan mengembangkan penelitian tentang pirolisis dengan bahan baku plastik jenis PET dengan penambahan katalis tertentu. Lebih dari itu, adanya penambahan katalis dapat menghasilkan produk berupa minyak setingkat solar (C<sub>14</sub>-C<sub>15</sub>) dan bensin (C<sub>8</sub>-C<sub>14</sub>) serta sebagian kecil gas tanpa adanya produk samping berupa asam benzoat tersebut.

Katalis Silika-Alumina adalah sebuah katalis asam amorf yang mengandung asam Bronsted dengan kandungan ion atom hidrogen pada salah satu sisinya. Selain itu juga terdapat asam Lewis pada salah satu sisinya dan berfungsi sebagai bagian dari penerimaan elektron. Konsentrasi asam pada katalis silika-alumina ditentukan oleh rasio antara SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Semakin besar rasio antara SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menyebabkan sifat keasaman semakin besar. Misalkan SA-1 (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4,99) memiliki sifat keasaman lebih besar daripada SA-2 (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,27). Kedua jenis katalis tersebut dijual secara komersial (Sakata dkk., 1997).

Pada penelitian ini akan dilakukan pirolisis terhadap sampah plastik jenis PET dengan bantuan katalis tipe SA-1 agar dapat menghasilkan produk minyak cair lebih besar, sebab pada penelitian sebelumnya mengatakan bahwa semakin banyak jumlah SiO<sub>2</sub> menyebabkan produksi cairan semakin banyak (Sharuddin dkk., 2016). Salamah dan Maryudi (2015) pada penelitiannya juga melihat pengaruh katalis Ni/Silika terhadap proses pirolisis ini dan menunjukkan hasil

yang sama dengan Sharuddin dkk. (2016), bahwa dengan adanya katalis Ni/Si maka terjadi peningkatan *yield* produk pirolisis.

Pada studi ini, proses pirolisis akan dilakukan terhadap plastik jenis PET dengan bantuan katalis silika-alumina ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Hasil yang diharapkan pada penelitian ini adalah agar proses pirolisis dapat menghasilkan produk yang sebagian besar berupa oil setingkat solar ( $\text{C}_{14}\text{-C}_{15}$ ) dan bensin ( $\text{C}_8\text{-C}_{14}$ ) serta sebagian kecil gas.

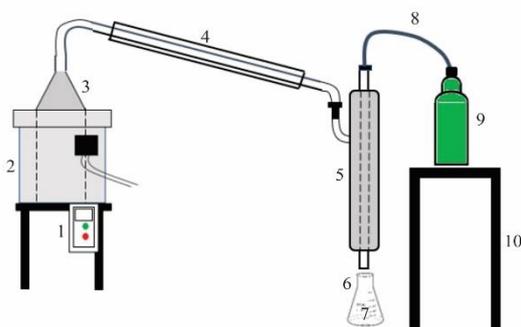
## 2. Metodologi

### 2.1. Bahan

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini berupa plastik jenis PET dari botol bekas (sampah) kemasan air minum. Bahan baku botol bekas dipotong-potong dengan ukuran 1-2 cm, dan dicuci bersih untuk menghilangkan kotoran yang menempel. Potongan PET tersebut dikeringkan dengan dijemur. Katalis yang digunakan adalah  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  berbentuk serbuk, produk Sigma Aldrich.

### 2.2. Alat

Alat yang digunakan berupa reaktor pirolisis berbahan baja karbon steel yang di buat oleh Politeknik Negeri Semarang dengan diameter dalam 20 cm dan tingginya 30 cm. Reaktor yang digunakan berupa reaktor *fixed bed* yang dilengkapi dengan beberapa alat distilasi. Reaktor yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 1.



**Gambar 1.** Rangkaian alat penelitian pirolisis jenis PET (reaktor *Fixed Bed*).

Berdasarkan Gambar 1 dapat dilihat bagian-bagian reaktor, yaitu: 1. Alat pengontrol suhu operasi, 2. Reaktor *fixed bed*, 3. Tutup reaktor yang berupa kerucut, 4. Pipa pendingin, 5. Separator, 6. Gelas erlenmeyer kaca sebagai penampung cairan hasil pirolisis, 7. Produk pirolisis, 8. Pipa penghubung antara separator dan tabung

penampung produk *syngas*, 9. Penampung *syngas*, 10. Penyangga penampung gas.

### 2.3. Proses Pirolisis

Proses pirolisis diawali dengan memastikan bahan baku (potongan PET) dalam kondisi kering. Bahan baku PET sebanyak 400 gram, dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis yang terlebih dahulu diisi dengan katalis  $\text{SiO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  sesuai perbandingan yang diinginkan. Massa plastik jenis PET yang digunakan tetap sebesar 400 gram, sedangkan katalis yang digunakan bervariasi. Variasi berat katalis silika alumina adalah 0, 4, 8, 12, dan 16 gram. Tutup unit pirolisis dipasang dengan rapat untuk menghindari kebocoran hasil pirolisis. Proses pirolisis dimulai dengan menghidupkan pemanas pada reaktor yang sudah diatur pada suhu  $450^\circ\text{C}$ . Bersamaan dengan itu, pendingin pada *condensor* dialirkan. Kondisi reaktor dijaga tetap pada suhu  $450^\circ\text{C}$  selama 2 jam. Produk yang berupa uap dialirkan menuju *condensor*. Sebagian senyawa diembunkan, dan yang sebagian yang lain tidak terembunkan dan tetap dalam fase gas. Arus campuran gas dan cairan yang keluar dari *condensor* dimasukkan ke dalam pemisah untuk dipisahkan antara gas dan cairan produk pirolisis. Gas ditampung dalam penampung khusus *syngas* untuk dianalisis di laboratorium. Hasil pirolisis diambil dan ditimbang untuk dianalisis. Pengujian sampel dilakukan untuk mengetahui kandungan senyawa kimianya.

### 2.4. Analisis Hasil Gas

Analisis hasil gas dilakukan di Laboratorium Analisis Instrumen, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada (UGM) dengan GC. Hasil cair pirolisis yang menjadi padatan hasil pirolisis dilakukan dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *Gas Chromatography Mass Pac* (GC-MS) di Laboratorium Kimia Organik, Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gajah Mada. Instrumen yang digunakan FTIR type Shimadzu Prestige 21 dan *Gas Chromatography Mass Pac* type Shimadzu QP2010ms.

*Yield syngas* yang didapatkan dari proses pirolisis dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1).

$$Y_g = \frac{W_{syngas}}{W_{feedstock}} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

$Y_g$  (%) : *yield Syngas*

$W_{syngas}$  (gram) : massa *syngas*

$W_{feedstock}$  (gram): berat bahan baku PET

Perhitungan *yield* produk dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2).

$$Y_i = \frac{W_{oil}}{W_{feedstock}} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

$Y_i$  (%) : *yield* hasil

$W_{hasil}$  (gram) : massa produk

$W_{hasil}$  (massa produk ) dapat dihitung dari massa padatan yang dihasilkan.

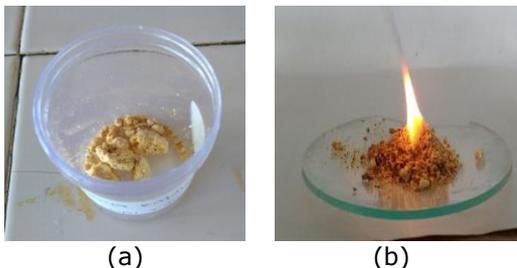
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Produk Pirolisis

Produk pirolisis terdiri dari dua jenis yaitu cairan yang telah memadat pada suhu kamar dan gas yang tidak terembunkan. Produk hasil pirolisis 400 gram plastik jenis PET dengan berbagai berat katalis silika alumina, waktu operasi 2 jam, dan suhu 450°C dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil visualisasi dari produk pirolisisnya dapat dilihat pada Gambar 2.

**Tabel 1.** Hasil pirolisis plastik jenis PET

| No | Berat katalis (gram) | Berat hasil (gram) | Berat gas (gram) | <i>Yield</i> (%) |
|----|----------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 1  | 0                    | 20,64              | 282,92           | 5                |
| 2  | 4                    | 54,55              | 245,97           | 14               |
| 3  | 8                    | 50,33              | 229,35           | 13               |
| 4  | 12                   | 45,23              | 224,44           | 11               |
| 5  | 16                   | 38,09              | 246,86           | 10               |



**Gambar 2.** Produk padatan berupa asam benzoat dan uji bakarnya.

Berdasarkan Tabel 1 nampak bahwa pirolisis dengan menggunakan katalis terjadi

kenaikan *yield*, dengan *yield* optimal diperoleh pada berat katalis 4 gram atau 1% dari berat sampel plastik. Semakin bertambah jumlah katalis yang digunakan, maka *yield* semakin berkurang. Hal ini kemungkinan disebabkan karena katalis silika kurang berfungsi secara maksimal karena keasaman katalisnya relatif lemah, disamping itu terjadi bulk katalis di dalam reaktor sehingga proses dekomposisi senyawa PET kurang maksimal. Selain itu, penurunan terjadi pada setiap penambahan jumlah katalis setelah *yield* optimum kemungkinan disebabkan karena senyawa pada PET semakin berkurang, sehingga konversi ke produk utama semakin kecil.

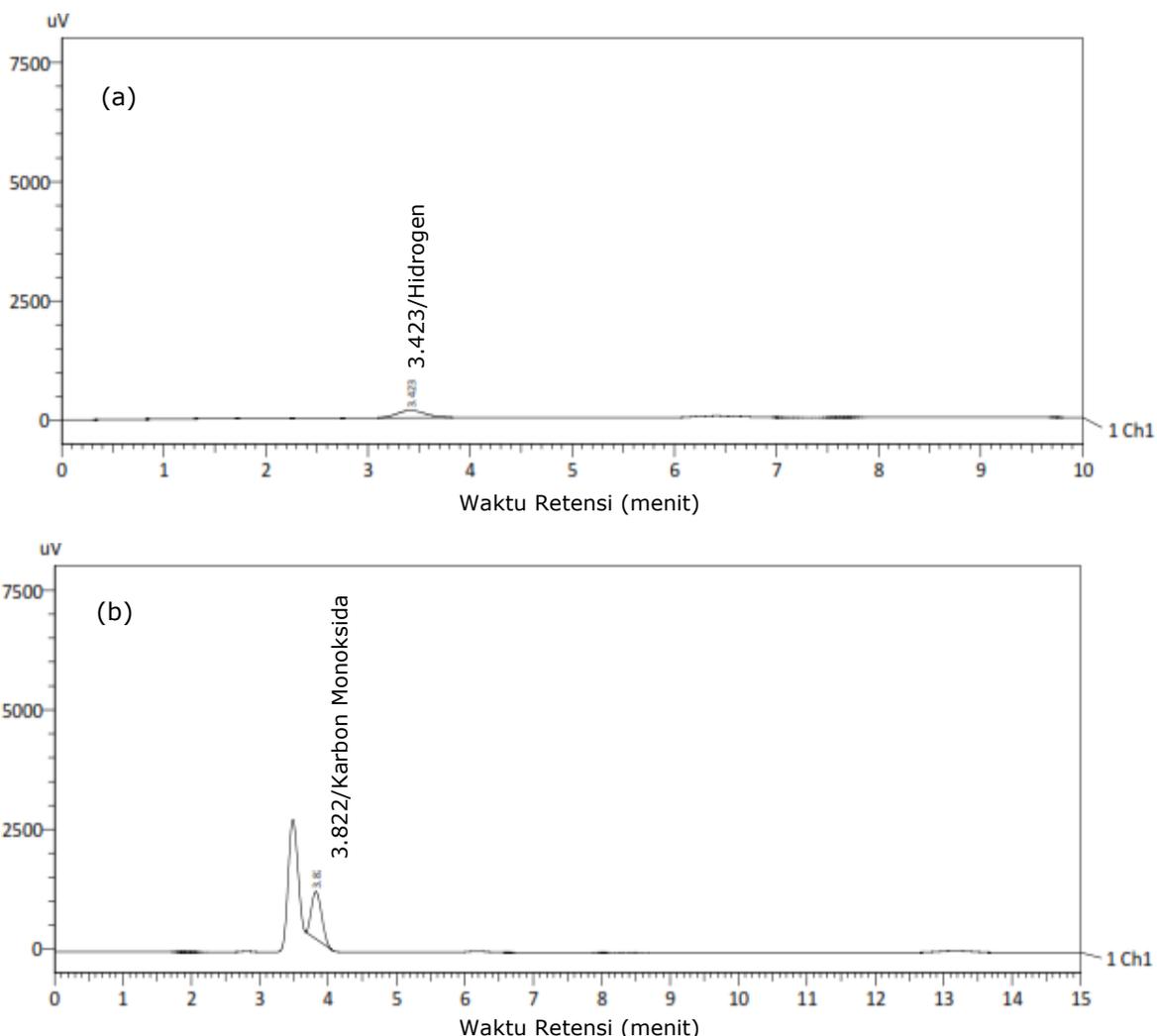
Hasil yang serupa juga dilaporkan oleh Adnan dkk. (2015), bahwa peningkatan jumlah katalis menyebabkan terjadinya penambahan situs reaksi yang disebabkan karena adanya penambahan jumlah katalis asam sehingga mempengaruhi mekanisme reaksi yang mengarah pada peningkatan produksi fase gas sehingga mengurangi fasa cairan.

Dengan fenomena seperti ini secara otomatis menyebabkan terjadinya pengurangan *yield* cairan dari produk pirolisis. Seperti yang dilaporkan oleh Silvarrey dkk. (2018) ketika melakukan proses pengurangan asam benzoat sebagai produk samping proses pirolisis dengan menggunakan katalis, hasil penelitiannya menunjukkan bahwa, dengan menambahkan jumlah katalis dapat menurunkan jumlah asam benzoat yang secara otomatis meningkatkan pembentukan senyawa hidrokarbon  $C_1-C_3$ .

Berdasarkan Tabel 1, produk yang terbentuk cairan yang dalam suhu ruangan berwujud padat dengan titik lebur 90°C. Hal ini sejalan dengan penemuan Surono dan Ismanto (2016), bahwa pirolisis plastik jenis PET tidak menghasilkan minyak sama sekali, yaitu material yang keluar dari *condensor* berupa semacam serbuk berwarna kekuning-kuningan, bahkan serbuk ini menempel di sepanjang saluran pipa.

#### 3.2. Komposisi Gas Hasil Pirolisis

Kandungan produk gas yang dihasilkan ditampilkan pada Gambar 3a dan 3b. Gas yang terkandung dalam produk hasil pirolisis adalah  $H_2$  dan CO. Kadar gas  $H_2$  sebesar 0,145% dan kadar CO 6,090%.



**Gambar 3.** Kromatogram hasil pirolisis gas H<sub>2</sub> (a), dan hasil pirolisis gas CO (b)

Hasil pirolisis plastik berupa gas CO dan CO<sub>2</sub> juga dilaporkan pada penelitian sebelumnya dengan kadar yang rendah (Naimah dkk., 2012; Rachmawati dan Herumurti, 2015; Savira dan Hendriyanto, 2017). Naimah dan Aidha (2017) juga mendapatkan gas hasil pirolisis berupa CO dengan kadar sekitar 10%, namun gas CO bisa turun terkonversi menjadi gas CO<sub>2</sub> dengan penggunaan katalis *residual catalytic cracking* (RCC). Hal ini juga sesuai dengan hasil penelitian Silvarrey dkk. (2018) tentang pirolisis PET dengan katalis zirconia sulfat menghasilkan produk dengan *yield* CO 11,5-11,6% dan H<sub>2</sub> sangat kecil yaitu 0,09%.

### 3.3. Komposisi Padatan Hasil Pirolisis

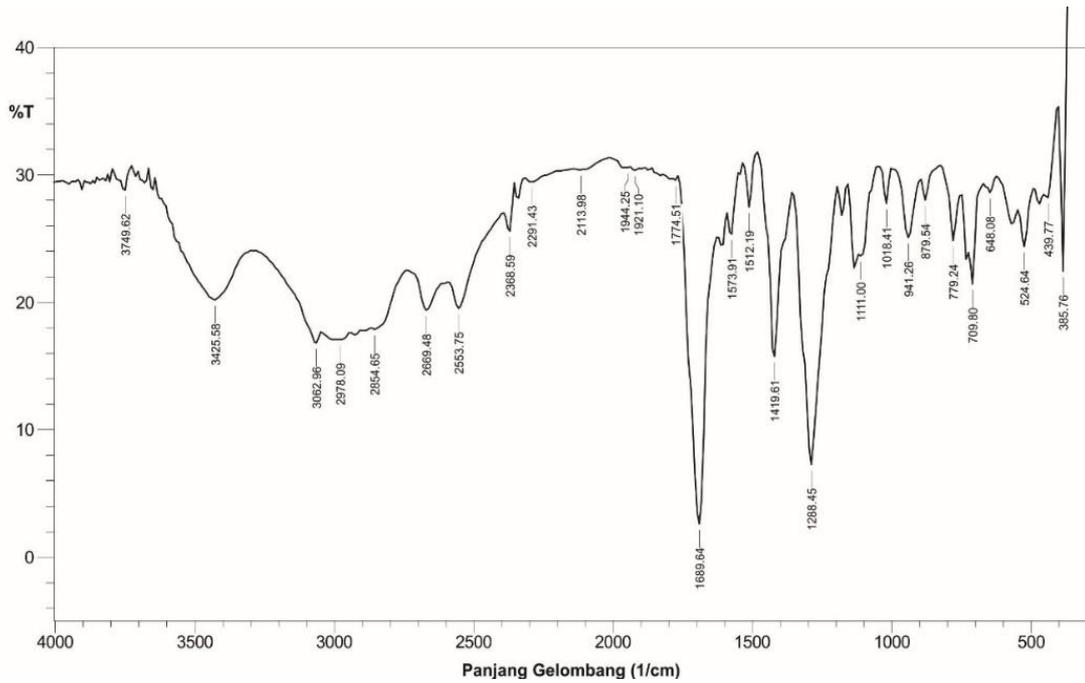
Analisis padatan hasil pirolisis (hasil cair yang telah memadat pada suhu ambien) dilakukan dengan FTIR, dan hasilnya disajikan pada Gambar 4. Dari gambar spektra FTIR menunjukkan adanya serapan intensitas

pada bilangan gelombang 1288,45 cm<sup>-1</sup>, yang menunjukkan adanya gugus karbonil. Kemudian serapan pada bilangan gelombang 1689,64 cm<sup>-1</sup>, 1774,51 cm<sup>-1</sup>, dan 3425,58 cm<sup>-1</sup> masing-masing menunjukkan adanya gugus benzena, ester, OH. Berdasarkan gugus fungsional yang muncul dalam analisis FTIR, maka produk pirolisis tersebut adalah asam benzoat yang berwujud padat pada temperatur ruangan dan mempunyai titik lebur 90°C.

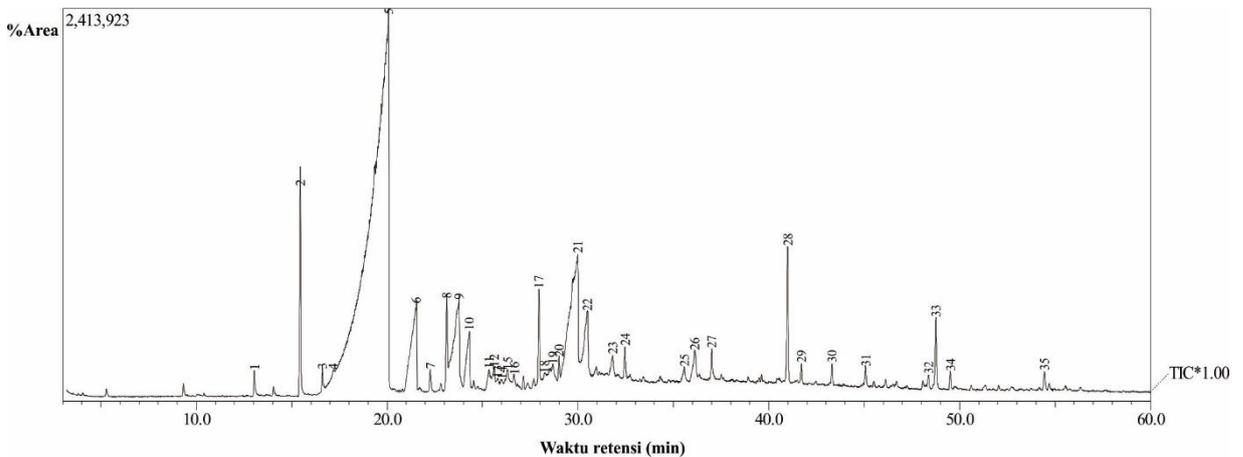
Kandungan senyawa dalam produk pirolisis dilakukan analisis dengan GC-MS. Hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa hasil padat pirolisis mengandung 35 jenis senyawa, dimana presentasi kandungan komponen senyawa dapat dilihat pada Gambar 5. Dari kromatogram nampak bahwa senyawa penyusun yang memiliki kadar paling besar adalah asam benzoat 71%, turunan asam benzoat 15%, juga senyawa aldehid, keton, senyawa *biphenyl*, serta

senyawa *triphenyl*. Berdasarkan hasil analisis ini kandungan senyawa dalam produk padat pirolisis dikelompokkan dalam 7 kelompok senyawa seperti yang terdapat dalam Gambar 6. Komponen yang paling banyak terbentuk adalah asam benzoat dan turunannya. Hal ini menunjukkan bahwa pada proses pirolisis dengan katalis silika - alumina, plastik PET belum terdekomposisi secara maksimal. PET baru terdekomposisi menjadi asam benzoat yang merupakan monomer dari *polyethylene terephthalate* dan turunan asam benzoat sendiri. Ikatan kimia pada proses ini terputus pada cincin benzena,

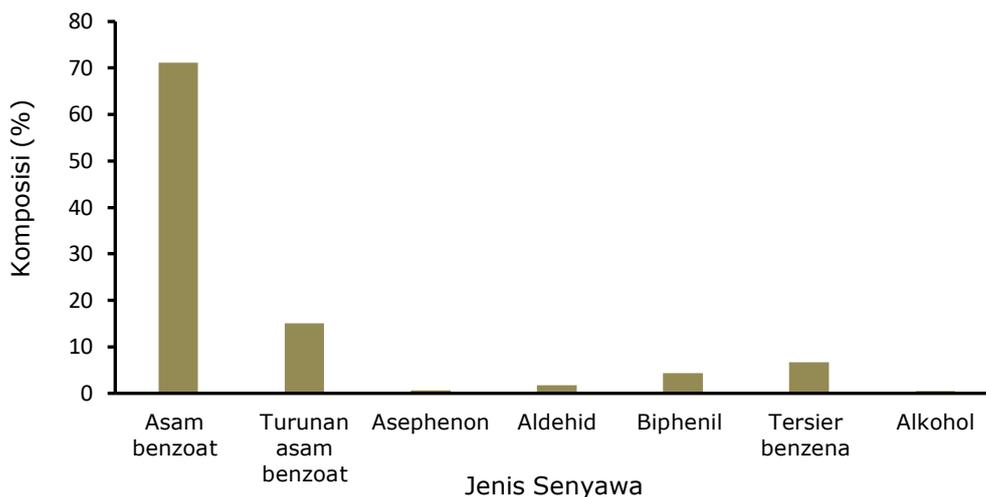
gugus karbonil, dan juga pada gugus metil. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian Xu dkk.(2019) tentang pirolisis PET dengan katalis  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  menghasilkan produk yang beragam. Produk yang dihasilkannya antara lain terdiri dari kokas, gas, nitril, senyawa aromatik, amida, dan senyawa oksigen. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Rachmawati dan Herumurti (2015) pirolisis terhadap PET menghasilkan produk gas tertinggi sebesar 45,40% dibandingkan dengan HDPE dan PS.



Gambar 4. Spektra FTIR produk pirolisis PET



Gambar 5. Kromatogram hasil fraksi destilat (FD)



**Gambar 6.** Diagram persentase komponen penyusun produk pirolisis

Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa plastik tipe PET tidak memiliki potensi untuk diolah sebagai bahan bakar minyak, namun hanya dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar berbentuk gas pengganti bahan bakar gas yang berasal dari fosil. Gas yang dihasilkan berupa gas CO dan H<sub>2</sub> yang biasa disebut dengan gas sintetik.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa, hasil pirolisis yang optimal didapatkan pada kondisi suhu 450°C dengan katalis sebesar 1% terhadap berat umpan (400 gram) yaitu dengan *yield* 14%. Produk pirolisis pada suhu kamar berwujud gas yang mengandung H<sub>2</sub> 0,145% dan CO 6,09% serta padatan berwarna kuning, dengan titik lebur 90°C. Kandungan senyawa yang paling dominan pada hasil analisis GC-MS adalah asam benzoat sebesar 71% dan turunannya 15%, selain itu terdapat beberapa senyawa lain seperti aldehid, penon, senyawa *biphenyl*, serta senyawa *triphenil*.

#### Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Universitas Ahmad Dahlan atas dukungan dana pada penelitian ini melalui skema Penelitian Hibah Bersaing Tahun 2018.

#### Daftar Pustaka

Annan, Shah, J., Jan, M.R. (2015) Effect of polyethylene terephthalate on the catalytic pyrolysis of polystyrene:

Investigation of the liquid product, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineering*, 51, 96-102.

Al-Salem, S.M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., Dutta, A. (2017) A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW), *Journal Environmental Management*, 197, 177-198.

Amrullah, S., Perdana, I., Budiman, A. (2017) Study of performance and environmental impact of sugarcane-bagasse gasification, *Proceeding of 2<sup>nd</sup> International Conference on Science and Technology*, Mataram, 23-24 Agustus, 121-127.

Havelcová, M., Bičáková, O., Sýkorová, I., Weishauptová, Z., Melegy, A. (2016) Characterization of products from pyrolysis of coal with the addition of polyethylene terephthalate, *Fuel Processing Technology*, 154, 123-131.

Kreith, F. (1998) *The CRC handbook of mechanical engineering*, 2nd ed, CRC Press.

Lee, J., Lee, T., Tsang, Y.F., Oh, J.I., Kwon, E.E. (2017) Enhanced energy recovery from polyethylene terephthalate via pyrolysis in CO<sub>2</sub> atmosphere while suppressing acidic chemical species, *Energy Conversion and Management*, 148, 456-460.

Naimah, N., Nuraeni, C., Rumondang, I., Jati, B.N., dan Ermawati, R., 2012,

- Dekomposisi Limbah Plastik Polypropylene dengan Metode Pirolisis, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, Vol. 3, No. 3, hal. 226-229.
- Naimah, S. dan Aidha, N.N, 2017, Karakteristik Gas Hasil Proses Pirolisis Limbah Plastik Polietilena (Pe) Dengan Menggunakan Katalis Residue Catalytic Cracking (RCC), *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 39(1), 31-38.
- Parsson, H. dan Yang, W. (2019) Catalytic pyrolysis of demine realized lingo cellulosic biomass, *Fuel*, 252, 200-209.
- Rachmawati, Q., dan Herumurti, W. (2015) Pengolahan sampah scara pirolisis dengan variasi rasio komposisi sampah dan jenis plastik, *Jurnal Teknik ITS*, ISSN 2337-3539.
- Sacharow, S., dan Griffin, R.C. (1980) *Principle of food packaging*, The AVI Publishing, Co. Inc. Westport, Connecticut.
- Sakata, Y., Uddin, M.A., Muto, A., Kanada, Y., Koizumi, K., Murata, K. (1997) Catalytic degradation of polyethylene into fuel oil over mesoporous silica (KFS-16) catalyst, *Journal of Analitical and Applied Pyroilisi*,s 43, 15-25.
- Salamah, S., Maryudi (2015) Optimalisasi proses pirolisis sampah styrofoam secara katalistik, *Laporan Penelitian PUPS*, Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta.
- Savira, F.L. dan Hendriyanto, O., 2017, Pirolisis Sampah Plastik Sebagai Bahan Bakar Alternatif dengan Penambahan Sampah Ranting, *Jurnal Envirotek*, Vol. 9, No. 2., 1-6.
- Sharuddin,S.D.A.,Abnisa, F., Daud, W.M.A.W, Aroua, M.K. (2016) A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326.
- Silvarrey, L.S.D., McMahon, A., dan Phan, A.N. (2018) Benzoic acid recovery via waste poly (ethylene terephthalate) (PET) catalytic pyrolysis using sulphated zirconia catalyst, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, 621-631.
- Surono, U.B., dan Ismanto (2016) Pengolahan sampah plastik jenis PP, PET dan PE menjadi bahan bakar minyak dan karakteristiknya, *Jurnal mekanika dan sistem termal (JMST)*, 1, 32-37.
- Wahyuni, T. (2016) Indonesia penyumbang sampah plastik terbesar ke-dua dunia, <http://cnnindonesia.com>, diakses tanggal 1 November 2017.
- Xu, L., Zhang, L., Song, H., Dong, Q., Kong, X., dan Fang, Z. (2019) Catalytic fas pyrolysis of polyethylene terephthalate plastic for the selective production of terephthalonitrile under ammonia atmosphere, *Waste Management*, 92, 97-106.