

BUKU AJAR TEKNOLOGI TEPAT GUNA



MENGOLAH SAMPAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK



Abdullah
Utami Irawati
Nurul Qomariah
Nor Ain

BUKU AJAR TEKNOLOGI TEPAT GUNA MENGOLAH SAMPAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK

**Abdullah
Utami Irawati
Nurul Qomariah
Nor Ain**



BUKU AJAR TEKNOLOGI TEPAT GUNA MENGOLAH SAMPAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK

**Abdullah
Utami Irawati
Nurul Qomariah
Nor Ain**

Editor: Azidi Irwan

Diterbitkan oleh: **Lambung Mangkurat University Press, 2020**

d/a Pusat Pengelolaan Jurnal dan Penerbitan ULM

Lantai 2 Gedung Perpustakaan Pusat ULM

Jl. Hasan Basri, Kayutangi, Banjarmasin, 70123

Telp/Faks. 0511-3305195

ANGGOTA APPTI (004.035.1.03.2018)

Hak cipta dilindungi oleh Undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit, kecuali untuk kutipan singkat demi penelitian ilmiah atau resensi.

i-xvi + 133 hlm, 15,5 x 23 cm
Cetakan pertama, Agustus 2020

ISBN: 978-623-7533-24-5

PRAKATA

Dengan mengucapkan Alhamdulillah, Buku ajar yang berjudul **MENGOLAH SAMPAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK** ini dapat terselesaikan dengan baik dan lancar.

Dalam kehidupan kita sehari-hari, sering plastik dijumpai sebagai sampah yang mencemari lingkungan. Oleh karena itu mengolah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak merupakan upaya yang tepat, selain mengatasi masalah krisis bahan bakar juga merupakan upaya dalam mengatasi pencemaran lingkungan.

Pada bagian bab awal (bab 1), buku ajar ini memuat perihal mengenai pengenalan dunia plastik, pengelompokan plastik berdasarkan sifatnya, jenis dan karakteristik plastik berdasarkan monomer penyusunnya, serta sifat-sifat dari plastik tersebut. Pada bab 2 dibahas tentang pencemaran dan penanganan sampah plastik, penggolongan jenis plastik berdasarkan pada penggunaannya, timbunan sampah plastik di muka bumi yang berakibat pada terjadinya pencemaran di tanah, laut dan udara. Pada bab 3 dibahas tentang beberapa metode yang kini dikembangkan dalam menangani sampah plastik di seluruh dunia seperti mendaur ulang sampah plastik untuk kerajinan, mengubah sampah plastik menjadi pelet, mengurangi penggunaan plastik, memanfaatkan sampah plastik sebagai campuran batako, membuat aspal dari sampah plastik, melakukan daur ulang plastik secara kimia dan mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak.

Pada bab 4 dan seterusnya (bab 5, 6 dan 7) dibahas secara khusus mengenai pengolahan sampah plastik menjadi bahan

bakar melalui proses pirolisis. Pada bab 4 dibahas mengenai beberapa penelitian mengenai mengubah plastik menjadi bahan bakar yang terdapat dalam jurnal terbaru, baik dari peneliti luar negeri maupun dalam negeri. Pada bab 5 dibahas mengenai apa yang dimaksudkan dengan pirolisis, bagaimana pirolisis terhadap sampah plastik dilakukan, dan parameter apa saja yang berpengaruh pada proses pirolisis. Pada bab 6 diulas mengenai langkah-langkah melakukan karakterisasi pada produk hasil pirolisis berdasarkan pada berat jenis (densitas), viskositas kinematik, bilangan asam dan analisis pirolisat dengan GC-MS. Parameter-parameter ini merupakan parameter kunci dalam produk pirolisis. Pada bab 7 diulas mengenai proses pirolisis limbah plastik yang biasa banyak tersebar di lingkungan kampus, seperti gelas plastik, kantong plastik dan sedotan.

Dengan demikian pembahasan mengenai penanganan limbah plastik yang saat ini menjadi masalah bagi kita semua telah dituliskan pada buku ini seperti mendaur ulang sampah plastik menjadi kerajinan, sampah plastik menjadi pelet, sampah plastik menjadi campuran batako, sampah plastik sebagai campuran aspal, dan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak. Buku ini lebih menekankan pada pengolahan limbah plastik menjadi bahan bakar melalui proses pirolisis, oleh karena itu buku ini diberi judul **MENGOLAH SAMPAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK.**

Semoga buku ajar ini dapat bermanfaat bagi kemajuan nusa dan bangsa, khususnya bagi para mahasiswa Kimia FMIPA ULM dalam mengikuti perkuliahan Teknologi Tepat Guna.

Banjarbaru, Agustus 2020

**Abdullah
Utami Irawati
Nurul Qomariah
Nor Ain**

KATA PENGANTAR EDITOR

Sampah plastik menjadi permasalahan lingkungan yang hangat dibicarakan dalam era globalisasi. Hampir semua kalangan masyarakat mulai menyadari akan bahaya yang ditimbulkan oleh kerusakan lingkungan. Salah satu penyebab kerusakan lingkungan tersebut dikarenakan pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh menumpuknya sampah yang berasal dari kegiatan manusia dalam kehidupan sehari-hari. Menumpuknya sampah ini dikarenakan banyaknya penggunaan plastik untuk berbagai keperluan sehingga produksi plastik semakin meningkat, yang mana distribusi limbah plastik dikaitkan dengan populasi manusia.

Penumpukan sampah plastik ini merupakan masalah serius yang harus segera ditangani. Pengetahuan mengenai pengolahan sampah plastik menjadi sesuatu yang berguna amatlah penting untuk diketahui oleh generasi muda seperti para mahasiswa. Oleh karena ini pengetahuan mengenai pengolahan sampah plastik ini wajib diketahui dan disampaikan melalui perkuliahan mahasiswa strata 1.

Buku berjudul Mengolah Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak ini memberikan gambaran secara jelas mengenai apa yang dimaksud dengan dunia plastik, pencemaran dan penanganan sampah plastik, mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak, cara pembuatannya dan pengujiannya.

Mengolah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak dimaksudkan untuk dapat memanfaatkan sampah plastik yang melimpah di muka bumi dengan menjadikannya sebagai sumber energi alternatif. Pemanfaatan sampah plastik ini dapat mengurangi pencemaran lingkungan dan dapat memulihkan

sumber energi. Selain itu, juga dapat meminimalisir tumpukan sampah plastik yang dapat menimbulkan polusi dan berdampak pada makhluk hidup. Dengan adanya buku ini diharapkan pengetahuan mahasiswa peserta kuliah Teknologi Tepat Guna menjadi lebih luas, secara khusus pada pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak.

Buku yang secara khusus membahas mengenai sampah plastik dan konversinya menjadi bahan bakar minyak masih sangat jarang ditemukan, apalagi ditulis secara lengkap dan detail seperti pada buku ini. Dalam buku ini dibahas mengenai kimia polimer plastik, pengolongan plastik berdasarkan sifatnya, jenis dan karakteristik plastik berdasarkan monomer penyusunnya, serta sifat-sifat dari plastik tersebut, penggolongan jenis plastik berdasarkan pada penggunaannya, beberapa metode yang kini dikembangkan dalam menangani sampah plastik di seluruh dunia, beberapa penelitian yang terdapat dalam jurnal terbaru, baik dari peneliti luar negeri maupun dalam negeri. Pirolisis, bagaimana pirolisis terhadap sampah plastik dilakukan, dan parameter apa saja yang berpengaruh pada proses pirolisis. Langkah-langkah melakukan karakterisasi pada produk hasil pirolisis berdasarkan pada berat jenis (densitas), viskositas kinematik, bilangan asam dan analisis pirolisis dengan GC-MS. Pada bagian akhir dibahas mengenai pirolisis Limbah Plastik Dari Lingkungan Kampus FMIPA ULM dan Karakterisasinya Sebagai Bahan Bakar Minyak.

Pada tiap-tiap bab dari buku ini dituliskan mengenai bahan acuan yang digunakan, latihan soal dan capaian pembelajaran yang diharapkan. Dengan demikian buku ini sangat tepat bila digunakan sebagai salah satu buku pegangan dalam perkuliahan Teknologi Tepat Guna. Buku ini juga dilengkapi dengan glosarium dan indeks, sehingga memberikan kemudahan bagi para pembaca dalam menggunakannya.

Selamat kepada Tim yang telah menyelesaikan penulisan buku ini dengan baik. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat seluas-luasnya bagi para mahasiswa/pembaca. Semoga dapat menjadi amal jariah untuk kita semua.

Banjarbaru, Agustus 2020
Editor

Azidi Irwan

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| PRAKATA..... | iii |
| KATA PENGANTAR EDITOR..... | v |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR TABEL..... | xii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xiv |
| | 1 |
| CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB I..... | 1 |
| BAB I : MENGENAL DUNIA PLASTIK..... | 3 |
| BAHAN ACUAN..... | 11 |
| LATIHAN SOAL..... | 13 |
| | 15 |
| CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB II..... | 15 |
| BAB II : PLASTIK MENCEMARI BUMI..... | 17 |
| 2.1. Beberapa Jenis Plastik dan Penggunaannya..... | 17 |
| 2.2. Timbunan Sampah Plastik di Muka Bumi | 19 |
| 2.2.1. Pencemaran Tanah..... | 20 |
| 2.2.2. Pencemaran Laut..... | 22 |
| 2.2.3. Pencemaran Udara..... | 25 |
| BAHAN ACUAN..... | 26 |
| LATIHAN SOAL..... | 28 |
| CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB III..... | 29 |
| BAB III : PENANGANAN SAMPAH PLASTIK..... | 31 |

| | | |
|--------|--|-----------|
| 3.1. | Beberapa Metode yang Kini Dikembangkan dalam Menangani Sampah Plastik di Seluruh Dunia | 31 |
| 3.1.1. | Mendaur Ulang Sampah Plastik untuk Kerajinan | 31 |
| 3.1.2. | Sampah Plastik menjadi Pelet..... | 32 |
| 3.1.3. | Mengurangi Penggunaan Plastik..... | 33 |
| 3.1.4. | Sampah Plastik sebagai Campuran Batako | 34 |
| 3.1.5. | Sampah plastik sebagai Aspal | 35 |
| 3.1.6. | Daur Ulang Kimia | 37 |
| 3.1.7. | Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak ... | 41 |
| | BAHAN ACUAN | 43 |
| | LATIHAN SOAL..... | 45 |
| | | 47 |
| | CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB IV | 47 |
| | BAB IV : PENELITIAN TERKINI DALAM MENGUBAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR | 49 |
| | BAHAN ACUAN | 59 |
| | LATIHAN SOAL | 61 |
| | | 63 |
| | CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB V | 63 |
| | BAB V : MENGUBAH PLASTIK JADI BAHAN BAKAR MINYAK DENGAN CARA PIROLISIS..... | 65 |
| 5.1. | Pirolisis | 65 |
| 5.1.1. | <i>Thermal pyrolysis</i> | 65 |
| 5.1.2. | Pirolisis katalitik | 66 |
| 5.2. | Pirolisis Sampah Plastik | 69 |
| 5.3. | Parameter yang Mempengaruhi Pirolisis..... | 70 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3.1. Temperatur | 70 |
| 5.3.2. Jenis Reaktor | 71 |
| 5.3.3. Tekanan dan Waktu Tinggal | 72 |
| 5.3.4. Jenis dan laju gas fluidisasi | 72 |
| 5.3.5. Katalis | 73 |
| BAHAN ACUAN | 76 |
| LATIHAN SOAL | 78 |
| | 79 |
| CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB VI | 79 |
| BAB VI : KARAKTERISASI PRODUK HASIL PIROLISIS | 81 |
| 6.1. Penentuan Berat Jenis (Densitas) | 81 |
| 6.2. Pengukuran Viskositas Kinematik..... | 81 |
| 6.3. Penentuan Bilangan Asam..... | 82 |
| 6.3.1. Standarisasi Larutan KOH 0,1 N | 82 |
| 6.3.2. Penentuan Bilangan Asam (SNI 01-3555-1998) . | 82 |
| 6.4. Analisis Pirolisat dengan GC-MS..... | 83 |
| BAHAN ACUAN | 85 |
| LATIHAN SOAL | 86 |
| | 87 |
| CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB VII | 87 |
| BAB VII : PIROLISIS LIMBAH PLASTIK DARI LINGKUNGAN KAMPUS FMIPA ULM DAN KARAKTERISASINYA SEBAGAI BAHAN BAKAR MINYAK | 89 |
| 7.1. Preparasi Bahan Baku dalam Proses Pirolisis..... | 89 |
| 7.2. Persen Hasil Pirolisis Sampah Plastik (Kresek, Plastik Es, Gelas Plastik, dan Sedotan) | 90 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 7.3. | Karakterisasi Hasil Pirolisis..... | 91 |
| 7.3.1. | Berat Jenis | 91 |
| 7.3.2. | Viskositas Kinematik | 93 |
| 7.3.3. | Bilangan Asam | 95 |
| 7.4. | Analisis Pirolisat dengan GC-MS | 96 |
| 7.5. | Senyawa Hidrokarbon Pirolisat Plastik | 105 |
| 7.6. | Potensi Sampah Plastik terhadap Bahan Bakar Minyak | 108 |
| | BAHAN ACUAN | 111 |
| | LATIHAN SOAL | 116 |
| | | 117 |
| | LAMPIRAN: Silabi Teknologi Tepat Guna | 117 |
| | GLOSARIUM | 121 |
| | INDEKS | 127 |
| | TENTANG PENULIS | 129 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabel 1.1. | Jenis dan karakteristik berbagai plastik | 5 |
| Tabel 2.1. | Jenis plastik, kode, dan penggunaannya | 17 |
| Tabel 4.1. | Produk dari kolom <i>distillation bubble cap</i> . Efek dari proses suhu | 50 |
| Tabel 4.2. | Sifat komparatif minyak bakar | 51 |
| Tabel 4.3. | Sifat fisik HDPE dan PP minyak pirolitik | 52 |
| Tabel 4.4. | Skema eksperimental | 53 |
| Tabel 4.5. | Hasil eksperimen dari proses dengan dan tanpa katalis | 57 |
| Tabel 4.6. | Sifat bahan bakar minyak diperoleh dari plastik | 58 |
| Tabel 7.1. | Hasil pirolisis total 300 gram per sampel | 91 |
| Tabel 7.2. | Berat jenis hasil pirolisis sampah plastik dan standar berat jenis bahan bakar minyak | 92 |
| Tabel 7.3. | Viskositas kinematik hasil pirolisis sampah plastik dan standar viskositas kinematik bahan bakar minyak | 93 |
| Tabel 7.4. | Bilangan asam hasil pirolisis sampah plastik dan standar bilangan asam bahan bakar minyak | 95 |
| Tabel 7.5. | Data senyawa kimia yang terkandung dalam sampel pirolisat kresek dari hasil analisis GC-MS ... | 97 |
| Tabel 7.6. | Data senyawa kimia yang terkandung dalam sampel pirolisat plastik es dari hasil analisis GC-MS | 99 |
| Tabel 7.7. | Data senyawa kimia yang terkandung dalam sampel pirolisat gelas plastik dari hasil analisis GC-MS | 101 |
| Tabel 7.8. | Data senyawa kimia yang terkandung dalam | 104 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | sampel pirolisat sedotan dari hasil analisis GC-MS | |
| | Data senyawa kimia utama dengan persentase | |
| Tabel 7.9. | terbesar yang terkandung dalam sampel pirolisat plastik dari hasil analisis GC-MS | 106 |
| | Persentase area sampel pirolisat plastik dari hasil | |
| Tabel 7.10. | analisis GC-MS terhadap fraksi bahan bakar minyak | 107 |
| | Perkiraan potensi minimum minyak hasil pirolisis | |
| Tabel 7.11. | sampah plastik..... | 109 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 1.1. | Struktur polimer | 3 |
| Gambar 1.2. | Proses pembentukan <i>polyethylene</i> | 3 |
| Gambar 1.3. | Nomor kode plastik | 5 |
| Gambar 2.1. | Data produksi dan polusi | 19 |
| Gambar 2.2. | Pencemaran sampah plastik | 21 |
| Gambar 2.3. | Sampah plastik di perairan | 23 |
| Gambar 2.4. | Perut bangkai paus dipenuhi sampah plastik ... | 24 |
| Gambar 2.5. | Hewan laut terjatut jaring | 25 |
| Gambar 3.1. | Boneka penguin dari limbah botol plastik | 32 |
| Gambar 3.2. | Pelet plastik dari daur ulang | 33 |
| Gambar 3.3. | Bata beton dengan campuran HDPE: (1) 20%; (2) 10% | 34 |
| Gambar 3.4. | Bata beton komersial..... | 34 |
| Gambar 3.5. | Proses pembuatan aspal plastik dan pengaplikasiannya | 36 |
| Gambar 3.6. | Menunjukkan depolimerisasi kimia dari PET | 40 |
| Gambar 3.7. | Skema teknik daur ulang kimia PET | 40 |
| Gambar 4.1. | Skema pirolisis <i>thermal cracking</i> terintegrasi dengan kolom <i>distillation bubble cap</i> | 50 |
| Gambar 4.2. | Alat pirolisis | 51 |
| Gambar 4.3. | Reaktor pirolisis skala pilot kecil | 53 |
| Gambar 4.4. | Pengaruh TA-NZ dan AA-NZ pada hasil produk pirolisis | 54 |
| Gambar 4.5. | Selektivitas hasil cair dari <i>hydrocracking</i> limbah | 55 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | plastik LDPE | |
| Gambar 4.6. | Pengaturan eksperimen | 56 |
| Gambar 4.7. | Laporan GC-FID (TPH) untuk bensin, solar dan minyak motor | 57 |
| Gambar 5.1. | Rancangan alat pirolisis | 70 |
| Gambar 6.1. | Bagan GC-MS | 84 |
| Gambar 7.1. | Sampah plastik sebelum dipreparasi | 90 |
| Gambar 7.2. | Sampah plastik sesudah dipreparasi..... | 90 |
| Gambar 7.3. | Produk hasil pirolisis: (1) Kresek; (2) Plastik es; (3) Gelas plastik; (4) Sedotan | 90 |
| Gambar 7.3. | Kromatogram pirolisat sampah plastik kresek .. | 96 |
| Gambar 7.4. | Kromatogram pirolisat sampah plastik es | 98 |
| Gambar 7.5. | Kromatogram pirolisat sampah gelas plastik | 101 |
| Gambar 7.6. | Kromatogram pirolisat sampah plastik sedotan | 103 |

CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB I (Mengenal Dunia Plastik)

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki capaian pembelajaran sebagai berikut:

Capaian Pembelajaran Sikap (CPS):

-

Capaian Pembelajaran Pengetahuan (CPP):

Mahasiswa mampu menjelaskan macam-macam polimer penyusun plastik dan karakteristiknya

Capaian Pembelajaran Keterampilan Umum (CPKU):

Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya

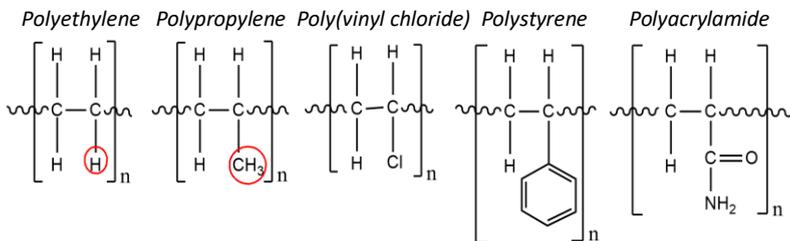
Capaian Pembelajaran Keterampilan Khusus (CPKK):

-

BAB I

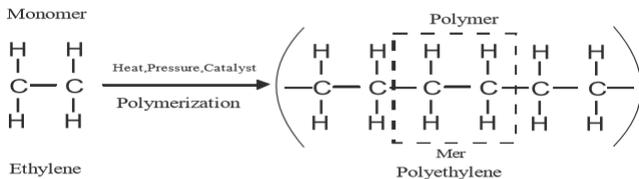
MENGENAL DUNIA PLASTIK

Plastik adalah bahan dengan berat molekul tinggi yang ditemukan oleh Alexander Parkes pada tahun 1862 (Karad & Havalammanavar, 2017). Plastik adalah senyawa polimer yang terbentuk dari polimerisasi (monomer) hidrokarbon yang membentuk rantai yang panjang dengan struktur yang kaku. Plastik juga disebut dengan senyawa sintesis dari minyak bumi yang dibuat dengan reaksi polimerisasi (monomer) yang sama, sehingga membentuk rantai panjang dan kaku yang akan menjadi padat setelah temperatur pembentukannya (Arwizet, 2017). Polimer merupakan molekul yang dibuat oleh pengulangan unit sederhana, sebagai contoh struktur *polystyrene* dapat ditulis dalam bentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1 (Karad & Havalammanavar, 2017).



Gambar 1.1. Struktur polimer
(Maddah, 2016; Karad & Havalammanavar, 2017).

Reaksi pembentukan *polyethylene* dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 1.2. Proses pembentukan *polyethylene* (Aridito, 2017).

Berdasarkan pada sifat termal plastik, plastik dapat terbagi menjadi dua kelompok, yakni:

1. *Thermoplastic* adalah bahan plastik yang jika dipanaskan sampai temperatur tertentu akan mencair, dapat dibentuk kembali menjadi bentuk yang diinginkan (UNEP, 2009; Surono & Ismanto, 2016), dan merupakan polimer yang tidak dapat berubah dalam komposisi kimianya ketika dipanaskan. Oleh karena itu, dapat mengalami pencetakan berulang kali. Polimer ini adalah jenis yang berbeda seperti *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS), dan *Polyvinyl Chloride* (PVC). Plastik-plastik ini dikenal sebagai plastik umum, berkisar antara 20.000 hingga 500.000 AMU dalam berat molekul dan memiliki jumlah unit pengulangan yang berbeda yang berasal dari unit monomer sederhana (Alshehrei, 2017).
2. *Thermosetting* adalah plastik yang jika telah dibuat dalam bentuk padat, tidak dapat dicairkan kembali dengan cara dipanaskan (UNEP, 2009; Surono & Ismanto, 2016). Polimer termoset tetap padat dan tidak dapat meleleh dan dimodifikasi. Perubahan kimia di sini tidak dapat dipulihkan, dan karenanya plastik ini tidak dapat didaur ulang karena memiliki struktur ikatan silang, sedangkan termoplastik linear. Contohnya termasuk *phenol-formaldehyde*, *polyurethanes*, dan lain-lain (Alshehrei, 2017).

Berdasarkan sifat kedua kelompok plastik tersebut, *thermoplastic* adalah jenis yang memungkinkan untuk didaur ulang. Jenis plastik yang dapat didaur ulang diberi kode berupa nomor seperti terlihat pada Gambar 1.3 (Landi & Arijanto, 2017). Untuk jenis dan karakteristik berbagai plastik dapat dilihat pada Tabel 1.1.



Gambar 1.3. Nomor kode plastik (Landi & Arijanto, 2017).

Tabel 1.1. Jenis dan karakteristik berbagai plastik

| Jenis | Simbol | Titik Leleh (°C) | Monomer Penyusun |
|---|--------|------------------|--|
| PET (<i>Polyethylene Terephthalate</i>) | | 250 | <i>Ethylene glycol</i> (EG) dan <i>terephthalic acid</i> (TPA) atau <i>dimethyl ester</i> atau asam terephthalat (DMT) |
| HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>) | | 200-280 | - |
| PVC (<i>Polyvinyl Chloride</i>) | | 160-180 | Monomer vinil klorida |
| LDPE (<i>Low Density Polyethylene</i>) | | 160-240 | - |
| PP (<i>Polypropylene</i> atau <i>Polypropene</i>) | | 200-300 | Polimerisasi gas propilena |
| PS (<i>Polystyrene</i>) | | 180-260 | Monomer-monomer stirena hasil dehidrogenase etil benzena |
| PC (<i>Polycarbonat</i>) | | 280-310 | Kondensasi bisphenol A dengan fosgen dalam media alkali |
| ABS (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>) | | 180-240 | <i>Acrylonitrile</i> , <i>butadiene</i> , <i>styrene</i> |
| PA (<i>Polyamide</i>) atau nilon | | 260-290 | - |
| PA (<i>Polyacetal</i>) | | 185-225 | Homopolimer (asetal homopolimer) dan kopolimer |

Sumber: Sari, 2017.

Berikut beberapa jenis plastik yang umum digunakan dalam beberapa keperluan:

1. *Polyethylene terephthalate* (PET)

PET memiliki sifat yang berbeda. PET merupakan polimer semi kristal dan secara kimiawi dan termal stabil. Polimer ini memiliki berat molekul berkisar antara 30.000 hingga 80.000 gmol^{-1} (Alshehrei, 2017). PET juga memiliki sifat yang intrinsik, sifat-sifat yang sangat cocok untuk kapasitas besar, ringan, wadah tahan tekanan (Sharuddin *et al.*, 2016), jenis plastik yang halus, transparan dan relatif tipis (Alabi *et al.*, 2019). PET adalah poliester dengan gugus ester fungsional yang dapat dipecah oleh beberapa reagen, seperti air (hidrolisis), alkohol (alkoholisis), asam (asidolisis), glikol (glikolisis), dan amina (aminolisis). Dengan demikian, proses daur ulang kimia untuk PET dibagi menjadi hidrolisis, glikolisis, metanolisis dan proses lainnya (Achilias *et al.*, 2012).

2. *High-density polyethylene* (HDPE)

Di seluruh dunia, plastik yang paling banyak digunakan adalah polietilen. Polietilen densitas tinggi adalah plastik tahan panas yang diproduksi dari minyak bumi (Alabi *et al.*, 2019). HDPE memiliki ciri rantai polimer linier panjang dengan tingkat kristalinitas yang tinggi dan percabangan rendah yang mengarah ke tinggi sifat kekuatan. Limbah HDPE memiliki potensi besar untuk digunakan dalam proses pirolisis, dapat menghasilkan cairan yang tinggi tergantung pada parameter pengaturan (Sharuddin *et al.*, 2016).

3. *Polyvinyl chloride* (PVC)

PVC merupakan plastik kuat yang tahan terhadap berbagai faktor seperti abrasi dan bahan kimia, dan memiliki penyerapan air yang rendah (Alshehrei, 2017). Berbeda dengan termoplastik lainnya seperti *polyethylene* (PE),

polystyrene (PS) dan *polypropylene* (PP) yang dapat dilunakkan oleh pemanasan dan semata-mata berasal dari minyak, PVC luar biasa karena dibuat dari campuran 57% klorin (berasal dari garam kelas industri) dan 43% karbon (berasal dari hidrokarbon bahan baku seperti etilen dari minyak atau gas alam). Sifat klorin membuat PVC tahan api yang sangat baik, jadi sangat cocok untuk isolasi listrik. PVC kompatibilitas harus dicampur dengan banyak zat tambahan membuatnya menjadi plastik serbaguna. Penelitian yang dilakukan pada pirolisis PVC ditemukan dalam literatur sangat kurang karena zat berbahaya itu cenderung terlepas ketika dipanaskan pada suhu tinggi (Sharuddin *et al.*, 2016). PVC dianggap sangat beracun karena adanya konstituen kimia seperti logam berat, dioksin, BPA, dan ftalat. Tergantung pada non-plastisasi, PVC fleksibel karena kehadiran ftalat. Ftalat berbahaya bagi manusia. Seluruh siklus hidup PVC yang mencakup produksi, penggunaan dan pembuangan mampu menyebabkan risiko kesehatan lingkungan dan masyarakat yang parah, karenanya penggunaannya telah sangat berkurang. Namun, karena efektivitas biaya dan fleksibilitas, PVC tetap sangat populer dalam produksi barang-barang konsumen. PVC telah dilaporkan menyebabkan bronkitis kronis, cacat lahir, perubahan genetik, kanker, penyakit kulit, tuli, kegagalan penglihatan, borok, disfungsi hati dan gangguan pencernaan (Alabi *et al.*, 2019).

4. *Low-density polyethylene* (LDPE)

Poliethilen densitas rendah tahan panas, rapuh, fleksibel dan kaku. Plastik ini tidak memiliki komponen yang berbahaya bagi tubuh manusia, penggunaannya disebut aman untuk wadah minuman dan makanan (Alabi *et al.*, 2019). Berbeda dengan HDPE, LDPE memiliki lebih banyak percabangan yang menghasilkan kekuatan antarmolekul yang lebih lemah,

sehingga menurunkan kekuatan dan kekerasan. Namun, LDPE memiliki keuletan yang lebih baik daripada HDPE yang mana dengan adanya percabangan menyebabkan struktur menjadi kurang kristal dan mudah dibentuk. Ini memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap air. Salah satu cara untuk memulihkan energi dan mengurangi limbah LDPE, pirolisis LDPE untuk produk minyak telah mendapat banyak perhatian oleh para peneliti sekarang (Sharuddin *et al.*, 2016).

5. *Polypropylene* (PP)

Polypropylene adalah jenis plastik yang kuat dan semi-transparan. *Polypropylene* lebih berat dan lebih kuat dari *polyethylene*. Plastik yang terbuat dari *polypropylene* ini tidak memiliki zat berbahaya dan seperti *polyethylene*, wadah *polypropylene* dianggap aman bagi manusia sebagai paket untuk makanan dan minuman (Alabi *et al.*, 2019). PP merupakan polimer jenuh dengan rantai hidrokarbon linear itu memiliki ketahanan kimia dan panas yang baik. PP memiliki kepadatan yang lebih rendah daripada HDPE tetapi memiliki kekerasan dan kekakuan yang lebih tinggi yang membuatnya lebih disukai di industri plastik. Tingginya permintaan PP dalam kehidupan sehari-hari menyebabkan jumlah limbah PP meningkat setiap tahun dan karenanya, pirolisis PP adalah salah satunya metode yang dapat digunakan untuk pemulihan energi (Sharuddin *et al.*, 2016).

6. *Polystyrene* (PS)

Polystyrene adalah polimer hidrofobik sintetis dengan berat molekul tinggi (Alshehrei, 2017). PS terbuat dari monomer stirena yang diperoleh dari petrokimia cair. Struktur terdiri dari rantai hidrokarbon yang panjang dengan gugus fenil yang terikat pada setiap atom karbon lainnya. PS secara alami tidak berwarna tetapi bisa diwarnai oleh pewarna. Plastik ini

memiliki ketahanan panas dan menawarkan daya tahan, kekuatan, dan ringan (Sharuddin *et al.*, 2016). PS dapat didaur ulang, tetapi tidak dapat terurai secara hayati; dan meskipun telah dilaporkan bahwa film PS terdegradasi oleh *strain Actinomycetes*, tingkat biodegradasi ini sangat rendah (Alshehrei, 2017). Limbah PS seperti kemasan makanan busa biasanya orang tidak membuang ke dalam plastik daur ulang dan mereka sering pergi ke tempat sampah umum. Dengan demikian, PS umumnya tidak terpisah dan tidak ekonomis mengumpulkan untuk didaur ulang karena kepadatan busa *polystyrene* rendah. Karena itu, satu-satunya cara limbah PS dapat digunakan sepenuhnya adalah melalui proses pirolisis dimana dapat diubah menjadi produk minyak lebih berharga daripada berakhir di tempat pembuangan sampah selamalamanya (Sharuddin *et al.*, 2016).

7. *Polycarbonate* (PC)

Plastik *polycarbonate* ($C_{16}H_{14}O_3$) adalah poliester yang dikenal karena sifat mekaniknya yang sangat baik. Menampilkan resistensi dampak tinggi, tahan UV, dan tahan api serta ketahanan listrik yang sangat baik, *polycarbonate* digunakan dalam berbagai bahan. *Polycarbonate* tidak memiliki kode identifikasi daur ulang sendiri dan oleh karena itu termasuk dalam klasifikasi "lain" #7 (Achilias *et al.*, 2012).

8. PA (*Polyamide*) atau Nylon

Nylon adalah salah satu polimer awal yang dikembangkan oleh Wallace Carothers pada tahun 1935, di fasilitas penelitian DuPont's. Saat ini, *nylon* adalah salah satu polimer yang paling umum digunakan. *Nylon*, juga dikenal sebagai *polyamide*, dapat diproduksi dengan reaksi *diamine* dengan *dicarboxylic acid*, kondensasi *amino acid* yang sesuai, pembukaan cincin *lactam*, reaksi *diamine* dengan *diacid chloride*, dan reaksi

diisocyanate dengan *dicarboxylic acid*. *Nylon* adalah polimer kristalin dengan modulus tinggi, kekuatan, sifat benturan, koefisien gesek yang rendah, dan ketahanan terhadap abrasi. Berbagai *nylon* komersial tersedia termasuk *nylon 6*, *nylon 11*, *nylon 12*, *nylon 6,6*, *nylon 6,10*, dan *nylon 6,12*. *Nylon* yang paling banyak digunakan adalah *nylon 6,6* dan *nylon 6*. *Polyamide* paling sering digunakan dalam bentuk serat, terutama *nylon 6,6* dan *nylon 6*, meskipun aplikasi teknik juga penting. *Nylon 6,6* dibuat dari polimerisasi *adipic acid* dan *hexamethylenediamine*, sementara *nylon 6* dibuat dari *caprolactam* (Achilias et al., 2012).

BAHAN ACUAN

- Achilias, D.S., P. Siafaka, N. Nianias, & I.S. Tsagkalias. 2012. Recent Advances in the Chemical Recycling of Polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). *Material Recycling–Trends and Perspectives*.
- Alabi, O.A., K.I. Ologbonjaye, O. Awosolu, & O.E. Alalade. 2019. Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review. *Journal of Toxicology and Risk Assessment*. **5(1)**: 1-13.
- Alshehrei, F. 2017. Biodegradation of Synthetic and Natural Plastic by Microorganisms. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*. **5(1)**: 8-19.
- Aridito, M.N. 2017. The Influence of Particle Size and Fuel Consumption Rate on Oil Characteristics from Pyrolysis of Aluminum Foil Coated Polyethylene (Al-PE) Waste. *Conserve: Journal of Energy and Environmental Studies (CJEES)*. **1(1)**: 20-33.
- Arwizet. 2017. Mesin Destilasi Pengolahan Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak Menggunakan Kondensor Bertingkat dan Pendingin Kompresi Uap. *Jurnal Inovasi, Vokasional dan Teknologi*. **17(2)**: 75-88.
- Karad, R.T., & S. Havalammanavar. 2017. Waste Plastic to Fuel-Petrol, Diesel, Kerosene. *International Journal of Engineering Development and Research*. **5(3)**: 641-645.
- Landi, U. & Arijanto. 2017. Perancangan dan Uji Alat Pengolah Sampah Plastik Jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) menjadi Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Teknik Mesin*. **5(1)**: 1-8.
- Maddah, H.A. 2016. Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*. **6(1)**: 1-11.

- Sari, G.L. 2017. Kajian Potensi Pemanfaatan Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Cair. *Jurnal Teknik Lingkungan*. **3(1)**: 6-13.
- Sharuddin, S.D.A., F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, & M.K. Aroua. 2016. A Review on Pyrolysis of Plastic Wastes. *Energy Conversion and Management*. **115**: 308–326.
- Surono, U.B. & Ismanto. 2016. Pengolahan Sampah Plastik Jenis PP, PET dan PE menjadi Bahan Bakar Minyak dan Karakteristiknya. *J. Mek. Sist. Termal*. **1(1)**: 32-37.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2009. *Converting Waste Plastics into a Resource*. Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre, Osaka/Shiga.

LATIHAN SOAL

1. Apa yang dimaksud dengan plastik?
2. Apa perbedaan sifat termal *thermoplastic* dan *thermosetting*?
3. Apa yang dimaksud dengan polimer?
4. Sifat termal plastik manakah yang memungkinkan untuk didaur ulang?
5. Apa saja jenis plastik yang umum digunakan?
6. Apa perbedaan *High-density polyethylene* (HDPE) dan *Low-density polyethylene* (LDPE)?
7. Apa yang membuat PVC berbeda dengan termoplastik lainnya seperti *polyethylene* (PE), *polystyrene* (PS) dan *polypropylene* (PP)?

CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB II

(Plastik Mencemari Bumi)

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki capaian pembelajaran sebagai berikut:

Capaian Pembelajaran Sikap (CPS):

Mahasiswa menjadi lebih peduli terhadap masalah plastik yang mencemari lingkungan

Capaian Pembelajaran Pengetahuan (CPP):

Mahasiswa mampu menjelaskan kegunaan macam-macam polimer dalam kehidupan dan dampaknya pada lingkungan

Capaian Pembelajaran Keterampilan Umum (CPKU):

Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya

Capaian Pembelajaran Keterampilan Khusus (CPKK):

-

BAB II

PLASTIK MENCEMARI BUMI

2.1 Beberapa Jenis Plastik dan Penggunaannya

Ada beberapa jenis plastik dan penggunaannya, dimana plastik yang digunakan untuk membuat suatu produk misal botol air mineral berbeda dengan plastik yang digunakan untuk membuat produk lainnya seperti sedotan, mangkuk, pipa, dan kursi. Untuk mengetahui jenis plastik yang digunakan sebagai bahan dasar untuk pembuatan suatu produk dapat dilihat pada simbol yang dicetak pada plastik. Simbol tersebut berupa angka (dari 1-7) dalam rangkaian tanda panah yang membentuk segitiga, biasanya dicetak pada bagian bawah produk plastik. Setiap simbol menandakan jenis plastik yang berbeda dan membentuk pengelompokan dalam melakukan proses daur ulang (Putra & Yuriandala, 2010). Untuk informasi selengkapnya disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Jenis plastik, kode, dan penggunaannya

| No. Kode | Jenis Plastik | Penggunaan |
|----------|--|--|
| 1 | PET (<i>Polyethylene Terephthalate</i>) | Botol kemasan air mineral, botol minyak goreng, jus, botol sambal, botol obat dan botol kosmetik |
| 2 | HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>) | Botol obat, botol susu cair, jerigen pelumas, botol kosmetik, botol deterjen, wadah minyak, dan mainan |

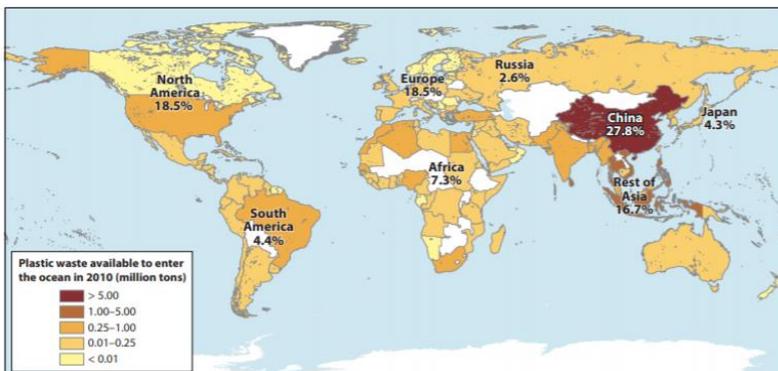
Tabel 2.1. Lanjutan...

| No. Kode | Jenis Plastik | Penggunaan |
|----------|--|--|
| 3 | PVC (<i>Polyvinyl Chloride</i>) | Pipa selang air, pipa bangunan, mainan, taplak meja dari plastik, botol shampo, botol sambal, isolasi kawat dan kabel, bingkai jendela, sepatu bot, foil makanan, peralatan medis, kantung darah, interior otomotif, pengemasan, kartu kredit, kulit sintetis, dll |
| 4 | LDPE (<i>Low Density Polyethylene</i>) | Kantong kresek, tutup plastik, plastik pembungkus daging beku, kantong plastik, pembungkus foil untuk kemasan, kantong sampah dan berbagai macam plastik tipis lainnya |
| 5 | PP (<i>Polypropylene</i>) | Cup plastik, tutup botol dari plastik, mainan anak, margarin, pot bunga, folder kantor, bumper mobil, ember, karpet, furnitur, dan kotak penyimpanan |
| 6 | PS (<i>Polystyrene</i>) | Kotak CD, sendok dan garpu plastik, gelas plastik, tempat makanan dari styrofoam, tempat makan plastik, kemasan makanan, elektronik, konstruksi, medis, peralatan dan mainan |
| 7 | <i>Other (O)</i> , jenis plastik lainnya selain dari no.1 hingga 6 | Botol susu bayi, plastik kemasan, galon air minum, suku cadang mobil, alat-alat rumah tangga, komputer, alat-alat elektronik, sikat gigi, dan mainan lego |

Sumber: Sharuddin *et al.*, 2016; Landi & Arijanto, 2017.

2.2 Timbunan Sampah Plastik di Muka Bumi

Sampah plastik menjadi permasalahan lingkungan yang hangat dibicarakan dalam era globalisasi. Hampir semua kalangan masyarakat mulai menyadari akan bahaya yang ditimbulkan oleh kerusakan lingkungan. Salah satu penyebab kerusakan lingkungan tersebut dikarenakan pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh menumpuknya sampah yang berasal dari kegiatan manusia dalam kehidupan sehari-hari (Wati *et al.*, 2018). Menumpuknya sampah ini dikarenakan banyaknya penggunaan plastik untuk berbagai keperluan sehingga produksi plastik semakin meningkat, yang mana distribusi limbah plastik dikaitkan dengan populasi manusia. Peningkatan populasi manusia telah menyebabkan meningkatnya permintaan akan plastik dan produk plastik (Alabi *et al.*, 2019). Berdasarkan *Plastics Europe* (2009) pada tahun 2008, produksi plastik tahunan diperkirakan 245 juta ton secara global. Berdasarkan *Plastics Europe* (2016) saat ini, kemasan sekali pakai adalah sektor terbesar, terhitung hampir 40% dari keseluruhan penggunaan plastik di Eropa. Diperkirakan pada tahun 2015, tingkat produksi tertinggi adalah di Asia (dengan 49% dari total *output* global, dengan China sebagai produsen dunia terbesar (28%), diikuti oleh Amerika Utara dan Eropa masing-masing sebesar 19% (Gambar 2.1) (Worm *et al.*, 2017).



Gambar 2.1. Data produksi dan polusi (Worm *et al.*, 2017).

Sampah dapat berasal baik dari industri maupun rumah tangga (Wati *et al.*, 2018). Salah satu sifat plastik yang paling diinginkan seperti daya tahan dan ketahanannya terhadap penguraian, juga merupakan sumber salah satu kewajiban terbesarnya dalam hal pembuangan plastik (Koushal *et al.*, 2014). Plastik yang sudah menjadi sampah tidak dapat terurai dengan cepat (Surono & Ismanto, 2016). Plastik dapat terdegradasi dengan berbagai mekanisme seperti kimia, termal, *photooxidation*, dan biodegradasi, yang mana membutuhkan waktu sangat lama tergantung pada berat molekul polimer, bisa memakan waktu hingga 1000 tahun untuk beberapa jenis plastik yang mengalami degradasi (Alshehrei, 2017; Pramila & Ramesh, 2011). Umumnya, biodegradasi plastik oleh mikroorganisme adalah proses yang sangat lambat, dan beberapa mikroorganisme tidak dapat mendegradasi plastik tertentu (Alshehrei, 2017; Singh & Gupta, 2014). Sejumlah kecil total produksi plastik (kurang dari 10%) didaur ulang secara efektif; plastik yang tersisa dikirim ke tempat pembuangan sampah, di mana ia ditakdirkan untuk tetap terkubur selama ratusan ribu tahun, atau ke insinerator, dimana senyawa beracunnya dimuntahkan ke seluruh atmosfer untuk diakumulasikan dalam bentuk biotik di seluruh ekosistem sekitarnya (Koushal *et al.*, 2014).

2.2.1 Pencemaran Tanah

Dalam lingkungan kerja dan perumahan manusia, produk plastik hadir dalam volume besar. Produk plastik yang telah menjadi sampah dapat merusak dan mencemari lingkungan darat, dan selanjutnya dapat ditransfer ke lingkungan akuatik. Pembuangan plastik di darat atau penimbunan plastik menyebabkan degradasi abiotik dan biotik plastik, di mana aditif plastik (misalnya zat penstabil, zat pewarna berbahaya, bahan pembuat plastik dan logam berat) dapat larut dan akhirnya meresap ke dalam berbagai aspek lingkungan, sehingga

menyebabkan tanah dan air terkontaminasi. Plastik terklorinasi mampu membuang bahan kimia beracun ke dalam tanah dan kemudian meresap ke dalam air bawah tanah atau sistem akuatik di sekitarnya sehingga mencemari ekosistem. Metana, gas rumah kaca yang berbahaya, yang berkontribusi signifikan terhadap pemanasan global dilepaskan selama biodegradasi mikroba plastik (Alabi *et al.*, 2019).

Sering kita jumpai sampah plastik yang sulit terurai seperti kantong plastik, kemasan detergen, dan berbagai macam jenis lainnya berserakan dimana-mana, baik jalan umum, tempat umum, tempat wisata dan lainnya membuat lingkungan tercemar dan kotor, membuat keindahan alam jauh dari kesegaran, dan kesuburan tanah menjadi semakin rendah (Gambar 2.2.). Semua ini akan membuat kerusakan lingkungan secara perlahan-lahan (Wati *et al.*, 2018).



Gambar 2.2. Pencemaran sampah plastik
(www.harianmerdeka.id).

2.2.2 Pencemaran Laut

Sebagian besar plastik sekarang memasuki lautan dari sumber daratan, seringkali melalui sungai, aliran air limbah, dan transportasi oleh angin atau pasang surut. Total pelepasan sampah plastik ke perairan laut secara global diperkirakan berkisar antara 4,8–12,7 juta ton pada tahun 2010 (Jambeck *et al.*, 2015; Worm *et al.*, 2017) dan sekitar 165 juta ton limbah plastik diperkirakan ada di lautan dunia pada 2012, sementara rata-rata 8 juta ton plastik setiap tahun dilepaskan ke laut, dengan sekitar 5 triliun potongan plastik mengambang di laut. Biasanya, plastik di lautan dapat terdegradasi dalam waktu satu tahun tetapi tidak sepenuhnya. Selama proses degradasi plastik ini, bahan kimia beracun seperti *polystyrene* dan BPA dapat dilepaskan ke dalam air yang menyebabkan polusi air. Limbah yang ditemukan di lautan terdiri dari sekitar 80% plastik (Alabi *et al.*, 2019).

Sampah plastik bervariasi antara negara diduga didorong oleh perbedaan kepadatan populasi pantai, konsumsi plastik, dan praktik pengelolaan sampah (Gambar 2.1.). India dan Amerika merupakan negara-negara yang memiliki populasi pantai yang sama, dengan masing-masing 188 dan 113 juta orang. Namun, warga AS menghasilkan lebih banyak sampah per orang per hari (2,58 kg; 13% di antaranya adalah plastik) daripada warga India (0,34 kg; plastik 3%, yang mungkin merupakan perkiraan konservatif mengingat pertumbuhan baru-baru ini). Sebaliknya, hanya 2% dari aliran limbah yang salah kelola di Amerika Serikat, sedangkan 88% lainnya salah kelola di India. Setelah menggabungkan angka-angka ini, India menempati peringkat lebih tinggi (ke-12) daripada negara Amerika (ke-20) dalam hal total kontribusi terhadap polusi plastik laut di seluruh dunia (Jambeck *et al.*, 2015; Worm *et al.*, 2017). Cina, Indonesia, dan Filipina adalah tiga negara pencemar teratas dalam daftar itu, karena mereka sangat memegang populasi pesisir yang besar, secara cepat meningkatkan konsumsi plastik, dan cenderung kurang

dalam praktik pengelolaan limbah. Bersama-sama ketiga negara ini diperkirakan mencapai 44% dari total polusi plastik laut (Worm *et al.*, 2017). Gambar 2.3 menunjukkan sampah plastik yang tergenang di permukaan air.



Gambar 2.3. Sampah plastik di perairan (tirto.id).

Sampah plastik yang mencemari lautan dan sungai ini mengganggu kelangsungan hidup hewan air. Hewan terpapar limbah plastik terutama melalui proses menelan dan keterjeratan. Namun, konsumsi lebih sering terjadi daripada keterjeratan. Sebagian besar hewan di lautan mengira bahwa sampah plastik dibuang ke laut untuk dimakan, sehingga memakannya. Terlebih lagi, keterikatan dalam produk plastik seperti jaring dapat menyebabkan kerusakan dan bahkan kematian pada hewan laut. Laporan telah menunjukkan bahwa lebih dari 260 spesies hewan vertebrata dan invertebrata yang berbeda menelan plastik atau terjatoh oleh plastik atau produk plastik, dengan lebih dari 400.000 kematian mamalia laut (Daniel, 2004; Alabi *et al.*, 2019). Penelanan limbah plastik mampu menyebabkan gangguan dan kerusakan fisik pada sistem pencernaan burung, mengurangi kemampuan pencernaan sistem yang mengarah pada kelaparan, kekurangan gizi dan akhirnya kematian (Alabi *et al.*, 2019).

Gambar 2.4 menunjukkan perut bangkai paus dipenuhi sampah plastik.



Gambar 2.4. Perut bangkai paus dipenuhi sampah plastik (<https://jabar.tribunnews.com>).

Banyak burung, kura-kura, ikan, anjing laut dan binatang laut lainnya mati karena tenggelam atau mati lemas akibat terjat dalam puing-puing plastik. Keterjeratan telah diamati menyebabkan risiko kesehatan pada sekitar 243 spesies kehidupan laut, yang seringkali berakhir dengan kematian. Keterikatan hewan oleh puing-puing plastik juga berkontribusi terhadap kematian dari predator, karena hewan tidak dapat melepaskan diri dan melarikan diri (Hammer *et al.*, 2012; Alabi *et al.*, 2019). Terumbu karang telah rusak dengan menyeret jaring dan produk plastik lainnya di sepanjang dasar laut (Gregory, 2009; Alabi *et al.*, 2019). Sering kali, jala ikan yang dibuang juga disebut "jaring hantu" menjebak hewan laut, yang menyebabkan kelaparan dan kematian (Alabi *et al.*, 2019). Gambar 2.5 menunjukkan hewan laut terjat jaring.



Gambar 2.5. Hewan laut terjerat jaring (www.ayobandung.com).

2.2.3 Pencemaran Udara

Karbon dioksida dan metana dilepaskan ke udara ketika limbah plastik yang ditimbun akhirnya terurai. Selama dekomposisi limbah padat di tempat pembuangan sampah pada tahun 2008, diperkirakan volume setara CO₂ (eqCO₂) yang dilepaskan ke atmosfer adalah 20 juta ton. CO₂ juga dilepaskan ke atmosfer selama pembakaran plastik dan produk plastik berupa CO₂ ini mampu menjebak panas radiasi dan mencegahnya keluar dari bumi yang menyebabkan pemanasan global. Polusi udara adalah salah satu ancaman lingkungan utama terhadap kesehatan masyarakat, dan bertanggung jawab atas lebih dari 6 juta kematian yang terkait dengan pencemaran lingkungan. Pembakaran plastik secara terbuka menyebabkan produk plastik melepaskan polutan seperti logam berat, dioksin, PCB, dan furan yang bila terhirup dapat menyebabkan risiko kesehatan terutama gangguan pernapasan. Peran plastik dalam polusi udara di negara-negara berkembang di dunia tidak dapat terlalu ditekankan, dan dampaknya pada generasi masa depan mungkin sangat besar (Alabi *et al.*, 2019).

BAHAN ACUAN

- Alabi, O.A., K.I. Ologbonjaye, O. Awosolu & O.E. Alalade. 2019. Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review. *Journal of Toxicology and Risk Assessment*. **5(1)**: 1-13.
- Alshehrei, F. 2017. Biodegradation of Synthetic and Natural Plastic by Microorganisms. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*. **5(1)**: 8-19.
- Daniel, D.C. 2004. Creating a Sustainable Future. Jones and Bartlett Learning. *Environ Sci*. **8**: 517-518.
- Gregory, M.R. 2009. Environmental Implications of Plastic Debris in Marine Settings--Entanglement, Ingestion, Smothering, Hangers-on, Hitch-Hiking and Alien Invasions. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. **364**: 2013-2025.
- Hammer, J., M.H.S. Kraak, & J.R. Parsons. 2012. Plastics in the Marine Environment: The Dark Side of a Modern Gift. *Rev Environ Contam Toxicol*. **220**: 1-44.
- Jambeck, J.R., R. Geyer, C. Wilcox, T.R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, & K.L. Law. 2015. Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean. *Science*. **347**: 768–71.
- Koushal, V., R. Sharma, M. Sharma, R. Sharma, & V. Sharma. 2014. Plastics: Issues Challenges and Remediation. *International Journal of Waste Resources*. **4(1)**: 1-6.
- Landi, U. & Arijanto. 2017. Perancangan dan Uji Alat Pengolah Sampah Plastik Jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) menjadi Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Teknik Mesin*. **5(1)**: 1-8.
- Plastics Europe. 2009. The compelling facts about plastics. An analysis of European Plastics Production, Demand and Recovery for 2008. Plastics Europe, European Plastics

Converters, European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations and European Plastics Recyclers.

Plastics Europe. 2016. Plastics-the Facts. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data. Brussels, Belg: Plast Eur.

Pramila, R. & K.V. Ramesh. 2011. Biodegradation of Low Density Polyethylene (LDPE) by Fungi Isolated from Marine Water– a SEM Analysis. *African Journal of Microbiology Research*. **5(28)**: 5013-5018.

Putra, H.P. Y. Yuriandala. 2010. Studi Pemanfaatan Sampah Plastik Menjadi Produk dan Jasa Kreatif. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. **2(1)**: 21-31.

Sharuddin, S.D.A., F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, & M.K.Aroua. 2016. A Review on Pyrolysis of Plastic Wastes. *Energy Conversion and Management*. **115**: 308–326.

Singh, J. & K. Gupta. 2014. Screening and Identification of Low density Polyethylene (LDPE) Degrading Soil Fungi Isolated from Polythene Polluted Sites around Gwalior City (MP) Int. *Curr Microbiol Appl Sci*. **3**: 443-448.

Wati, F., F. Noer, & Novita. 2018. Usaha Kerajinan Limbah Plastik di Desa Nusa. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pendidikan Kesejahteraan Keluarga*. **3(2)**: 10-26.

Worm, B., H.K. Lotze, I. Jubinville, C. Wilcox, & J. Jambeck. 2017. Plastic as a Persistent Marine Pollutant. *Annu. Rev. Environ. Resour*. **42**: 1-26.

LATIHAN SOAL

1. Bagaimana cara mengetahui jenis plastik yang digunakan sebagai bahan dasar dari suatu produk?
2. Apa faktor penyebab timbunan sampah plastik terjadi di muka bumi?
3. Apa yang menyebabkan sampah plastik sulit terurai?
4. Bagaimana proses plastik dapat mencemari tanah?
5. Apa dampak sampah plastik masuk ke perairan?
6. Apa dampak CO₂ dari limbah plastik ketika dilepaskan ke atmosfer?
7. Apa sajakah polutan yang dilepaskan pada saat pembakaran plastik secara terbuka?

CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB III (Penanganan Sampah Plastik)

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki capaian pembelajaran sebagai berikut:

Capaian Pembelajaran Sikap (CPS):

Mahasiswa menjadi lebih peduli terhadap masalah plastik yang mencemari lingkungan

Capaian Pembelajaran Pengetahuan (CPP):

Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan beberapa metode dalam menangani limbah plastik

Capaian Pembelajaran Keterampilan Umum (CPKU):

Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya

Capaian Pembelajaran Keterampilan Khusus (CPKK):

Mahasiswa mampu menangani limbah plastik dengan baik

BAB III

PENANGANAN SAMPAH PLASTIK

3.1 Beberapa Metode yang Kini Dikembangkan dalam Menangani Sampah Plastik di Seluruh Dunia

Secara umum, penanganan sampah plastik dapat dilakukan dengan cara mendaur ulang kembali menjadi sesuatu yang dapat memberikan manfaat yakni dengan mengubah sampah plastik menjadi barang dengan fungsi yang sama seperti semula atau juga dapat dibuat dengan fungsi yang berbeda. Daur ulang dengan fungsi yang sama seperti semula, misalnya ember bekas dapat didaur ulang menjadi ember kembali. Daur ulang dengan fungsi yang berbeda, sebagai contoh ember dapat didaur ulang menjadi barang lain seperti tempat sampah (Budiono, 2017). Beberapa penanganan sampah plastik lainnya dapat dilihat sebagai berikut:

3.1.1 Mendaur Ulang Sampah Plastik untuk Kerajinan

Daur ulang adalah salah satu cara yang paling mudah dan termudah. Ada berbagai cara untuk berpartisipasi melalui program pemerintah atau program yang dijalankan oleh lingkungan organisasi. Sebagai konsumen, daur ulang hanya membutuhkan satu langkah mudah menempatkan sampah plastik di tempat sampah yang tepat untuk dibuang (Koushal *et al.*, 2014). Dengan demikian, sampah plastik dapat dikembangkan dengan mengubahnya menjadi barang yang memiliki nilai ekonomis dan tentunya dapat mengurangi penyebab pencemaran lingkungan. Salah satu contoh, dalam penelitian Budiono (2017) melakukan pemanfaatan daur ulang limbah plastik, yakni mengubah limbah botol plastik menjadi suatu kreatifitas berupa boneka penguin dengan melalui beberapa cara seperti pemotongan, pemasangan,

pengeleman, menggambar, melukis, mengecat, dan menghias sehingga memberikan hasil seperti yang terlihat pada Gambar 3.1. Proses mendaur ulang sampah plastik menjadi suatu kerajinan dapat dibuat sesuai dengan kreatifitas yang diinginkan.



Gambar 3.1. Boneka penguin dari limbah botol plastik (Budiono, 2017).

3.1.2 Sampah Plastik menjadi Pelet

Penanganan sampah plastik dalam penelitian Chandara *et al.*, (2015) dilakukan secara mekanik, yang mana sampah plastik dikonversi menjadi pelet plastik sebagai bahan untuk produk plastik di bidang lingkungan. Daur ulang mekanik dianggap sebagai teknologi terbaik untuk daur ulang bahan limbah plastik konvensional menjadi bahan baku baru tanpa mengubah struktur dasar. Pembuatan pelet plastik dilakukan dengan cara bahan limbah plastik yang telah dikumpulkan, disortir, dan bersih dimasukkan ke dalam *shredder* atau *chipper* untuk digiling menjadi potongan yang lebih kecil yang disebut serpihan. Serpihan kemudian diumpankan ke mesin *extruder* melalui *hopper*. *Extruder* digabung dengan sekrup tunggal atau ganda yang berputar dalam tabung pemanas. Serpihan yang meleleh keluar sebagai helai panas dan melewati air untuk mendingin, yang kemudian dipotong menjadi pelet atau butiran oleh

pemotong (Gambar 3.2). Produk jadi (butiran daur ulang) dimasukkan ke dalam tas untuk calon pembeli atau perusahaan manufaktur plastik.



Gambar 3.2. Pelet plastik dari daur ulang (Chandara *et al.*, 2015).

3.1.3 Mengurangi Penggunaan Plastik

Polusi plastik dapat dikurangi dengan menggunakan lebih sedikit produk plastik dan beralih ke alternatif. Setiap tahun, diperkirakan 500 miliar hingga 1 triliun kantong plastik dikonsumsi di seluruh dunia. Itu berakhir satu juta per menit. Miliaran berakhir sebagai sampah setiap tahun atau di tempat pembuangan sampah. Sekarang fokus pada bagian penting lain dari kehidupan ramah lingkungan: kurangi penggunaan plastik. Pengurangan sumber (pengurangan dan penggunaan kembali) dapat terjadi dengan mengubah desain, pembuatan, atau penggunaan produk plastik dan bahan. Misalnya, berat botol minuman ringan plastik 2 liter telah dikurangi dari 68 gram menjadi 51 gram sejak 1977, menghasilkan penurunan 250 juta ton plastik per tahun dalam aliran limbah (Koushal *et al.*, 2014).

3.1.4 Sampah Plastik sebagai Campuran Batako

Saat ini, pengembangan bahan konstruksi difokuskan pada penggunaan limbah untuk menghasilkan sesuatu yang bermanfaat bagi manusia. Salah satunya adalah sampah plastik. Plastik digunakan sebagai bahan pengganti pasir untuk pembuatan bata beton (Nursyamsi *et al.*, 2017). Dalam penelitian Nursyamsi *et al.*, (2017), jenis plastik HDPE (*high density polyethylene*), yang telah dibersihkan dan dicincang sebagai pengganti agregat halus, digunakan dalam proses pembuatan batu bata. HDPE memiliki sifat yang lebih kuat, lebih keras, lebih halus dan lebih tahan terhadap suhu tinggi. Variasi berat 0%, 10%, dan 20% limbah plastik HDPE digunakan dari total berat pasir sebagai substitusi. Selanjutnya, kekuatan tarik dan tekan diuji pada hari ke 7. Gambar 3.3 menunjukkan hasil sampah plastik sebagai campuran batako. Untuk bata beton komersial dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3. Bata beton dengan campuran HDPE: (1) 20%; (2) 10%



Gambar 3.4. Bata beton komersial

Dalam penelitian Nursyamsi *et al.*, (2017), kuat tekan bata beton dengan 10% dan 20% HDPE memiliki kuat tekan rata-rata yang lebih kecil dibandingkan dengan kuat tekan normal bata beton. Ini terjadi karena bata beton dengan plastik memiliki lebih banyak rongga daripada bata beton normal. Sedangkan untuk kasus dengan kuat tekan bata beton, rata-rata kekuatan tarik briket dengan campuran limbah plastik juga lebih kecil dibandingkan dengan briket normal. Berdasarkan penelitian, kualitas spesimen yang dicapai dikategorikan dalam kualitas III menurut SNI 03-0349-1989.

3.1.5 Sampah plastik sebagai Aspal

Sampah plastik juga dapat digunakan untuk tujuan pembangunan jalan sebagai pengganti aspal. Plastik meningkatkan titik lebur bitumen dan membuat jalan mempertahankan fleksibilitasnya selama musim dingin yang menghasilkan umur panjang. Sampah plastik bertindak sebagai agen pengikat yang kuat untuk pembuatan aspal tahan lama. Plastik memiliki sejumlah sifat penting, yang pecah sendiri atau bersama-sama memberikan kontribusi yang signifikan dan meluas untuk kebutuhan konstruksi.

1. Tahan lama dan tahan korosi.
2. Isolasi yang baik untuk energi dingin, panas dan hemat suara dan mengurangi polusi suara.
3. Ekonomis dan memiliki umur yang lebih panjang.
4. Bebas perawatan.
5. Higienis dan masalah.
6. Kemudahan pemrosesan/instalasi.
7. Ringan.

(Ansari *et al.*, 2017).

Proses pembuatan aspal plastik dan pengaplikasiannya dapat dilihat sebagai berikut:



PENGHAMPARAN DAN PEMADATAN



Gambar 3.5. Proses pembuatan aspal plastik dan pengaplikasiannya (www.pusjatan.pu.go.id).

Ancaman pembuangan plastik tidak akan menyelesaikan sampai langkah-langkah praktis tidak dimulai di permukaan tanah. Jalan tar plastik yang dibangun dengan baik akan menghasilkan keuntungan sebagai berikut:

1. Peningkatan kekuatan jalan (peningkatan Nilai Stabilitas Marshall)
2. Ketahanan yang lebih baik terhadap air dan stagnasi air
3. Tanpa pengupasan dan tidak memiliki lubang.
4. Peningkatan pengikatan dan pengikatan campuran. memuat properti yang tahan lama
5. Konsumsi aspal yang berkurang

6. Mengurangi pori-pori secara agregat dan karenanya mengurangi rutting dan melonggarkan
7. Properti kesehatan yang lebih baik
8. Mengurangi biaya perawatan jalan
9. Meningkatnya masa pakai jalan
10. Penurunan pencucian plastik
11. Tidak ada efek radiasi (seperti UV)

(Ansari *et al.*, 2017).

Dalam penelitian Ansari *et al.*, (2017), menunjukkan bahwa:

1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan bertambahnya sampah plastik dalam bitumen akan meningkatkan sifat agregat dan bitumen.
2. Penggunaan plastik bekas di perkerasan lentur menunjukkan hasil yang baik bila dibandingkan dengan perkerasan lentur konvensional.
3. Penggunaan optimal dari plastik dapat 3% hingga 4% dari bitumen berdasarkan uji Stabilitas Marshal.
4. Ini telah menambah nilai lebih dalam meminimalkan pembuangan limbah plastik adalah teknik ramah lingkungan
5. Plastik akan meningkatkan titik leleh aspal.
6. Teknologi inovatif ini tidak hanya memperkuat konstruksi jalan tetapi juga meningkatkan umur jalan.

3.1.6 Daur Ulang Kimia

Daur ulang kimia didefinisikan sebagai proses di mana polimer diubah secara kimia menjadi monomer atau sebagian didepolimerisasi menjadi oligomer melalui reaksi kimia (terjadi perubahan pada struktur kimia polimer). Monomer yang dihasilkan dapat digunakan untuk polimerisasi baru untuk mereproduksi produk polimer asli atau yang terkait. Metode ini mampu mengubah bahan plastik menjadi molekul yang lebih kecil,

cocok untuk digunakan sebagai bahan baku mulai dengan monomer, oligomer, atau campuran senyawa hidrokarbon lainnya (Grigore, 2017).

Reaksi kimia yang digunakan untuk dekomposisi polimer menjadi monomer adalah:

a. Hidrogenasi

Hidrogenasi plastik adalah alternatif potensial untuk memecah rantai polimer. Dibandingkan dengan perawatan tanpa adanya hidrogen, hidrogenasi mengarah pada pembentukan produk yang sangat jenuh, menghindari keberadaan olefin dalam fraksi cair. Terlebih lagi, hidrogenasi mendorong penghilangan atom hetero, seperti klorin (Cl), nitrogen (N) dan belerang (S), dalam bentuk senyawa yang mudah menguap. Namun, hidrogenasi mengalami beberapa kelemahan, terutama karena biaya hidrogen dan kebutuhan untuk beroperasi di bawah tekanan tinggi (Beyene, 2014).

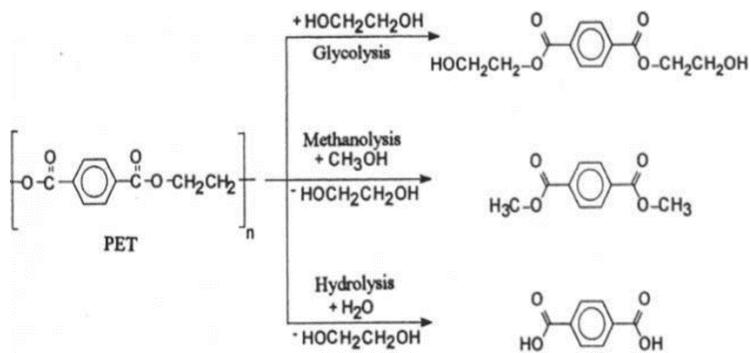
b. Glikolisis, Metanolisis, Hidrolisis dan Lainnya

Depolimerisasi kimia atau kemolisis melibatkan reaksi polimer yang digunakan dengan reagen kimia untuk produksi monomer awalnya. Berbagai proses telah dikembangkan yang dikategorikan tergantung pada agen kimia yang digunakan, yang paling umum adalah glikolisis, metanolisis, hidrolisis dan amonolisis (Beyene, 2014). Sebagai contoh pada plastik jenis PET dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.

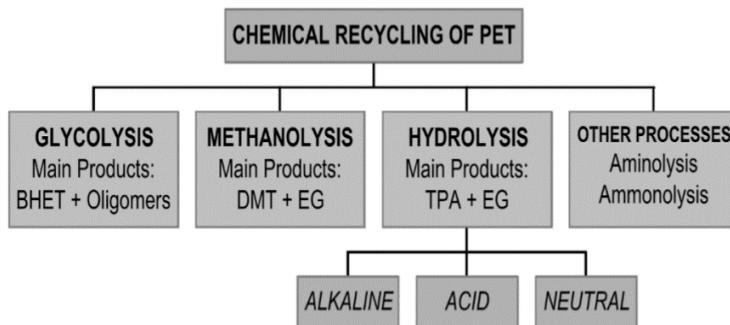
- Daur ulang kimia PET oleh glikolisis melibatkan penyisipan etilen glikol ke dalam rantai PET untuk memberikan bis(hidroksietil) tereftalat (BHET), yang merupakan substrat untuk sintesis PET dan oligomer lainnya (Grigore, 2017).
- Daur ulang kimia PET oleh metanolisis melibatkan degradasi PET oleh metanol pada suhu antara 180 dan 280°C dan tekanan dari 2 hingga 4 MPa dengan produk

utamanya adalah dimetil tereftalat (DMT) dan etilen glikol (EG) (Grigore, 2017). Yang *et al.*, (2002) melaporkan bahwa kondisi depolimerisasi yang optimal mengacu pada suhu antara 260 dan 270°C, tekanan 9,0-11,0 MPa dan rasio berat (metanol ke PET) dari 6 hingga 8. Setelah produk utama diperoleh, DMT dimurnikan dengan distilasi untuk menghilangkan semua kontaminan fisik dan kemudian dapat digunakan kembali untuk menghasilkan PET (Karayannidis & Achilias, 2007; Achilias & Karayannidis, 2004). Juga, Kurokawa *et al.*, (2003) telah melaporkan bahwa laju metanolisis sangat tergantung pada kelarutan PET.

- Hidrolisis adalah metode daur ulang yang melibatkan reaksi PET dengan air dalam lingkungan asam, basa atau netral, yang mengarah ke depolimerisasi total ke dalam monomernya. Kerugian dari metode hidrolisis, yakni suhu tinggi (antara 200 dan 250°C), tekanan (antara 1,4 dan 2 MPa) dan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan depolimerisasi. Metode ini tidak banyak digunakan, karena biayanya yang tinggi (Grigore, 2017).
- Degradasi PS dalam berbagai pelarut superkritis (benzena, toluena, etilbenzena) pada temperatur 310-370°C dan tekanan 6,0 MPa. Dilaporkan bahwa PS telah berhasil didepolimerisasi; toluena lebih efektif daripada pelarut lain untuk pemulihan *styrene* dari PS. Juga, hasil tertinggi dari *styrene* diperoleh dari PS dalam toluena pada temperatur 360°C selama 20 menit (Ke *et al.*, 2005; Grigore, 2017).



Gambar 3.6. Menunjukkan depolimerisasi kimia dari PET (Beyene, 2014).



Gambar 3.7. Skema teknik daur ulang kimia PET (Achilias *et al.*, 2012).

c. Gasifikasi

Gasifikasi melibatkan oksidasi parsial bahan organik pada suhu tinggi (biasanya antara 1200-1500°C) dalam kondisi pengoksidasi ringan (biasanya uap, karbon dioksida atau oksigen sub-stoikiometrik) untuk produksi gas sintesis (*syngas*). Gas ini, terutama terdiri dari karbon monoksida dan hidrogen, memiliki aplikasi dalam sintesis bahan kimia seperti metanol dan amonia, dan dapat digunakan untuk menghasilkan diesel sintetis atau dapat dibakar langsung sebagai bahan bakar (Beyene, 2014).

d. Pirolisis

Daur ulang kimia menggunakan proses kimia seperti pirolisis yang mengacu pada degradasi bahan polimer dengan memanaskan tanpa adanya oksigen. Dalam sebuah penelitian, ditunjukkan bahwa fraksi minyak dan gas yang diperoleh dengan pirolisis PP memberikan komposisi alifatik dengan potensi besar untuk didaur ulang kembali ke industri petrokimia sebagai bahan baku untuk produksi plastik baru (Achilias *et al.*, 2007; Grigore, 2017).

e. Konversi katalitik

Konversi katalitik limbah plastik menyiratkan beberapa keunggulan dibandingkan metode pirolitik konvensional. Yang paling jelas berkaitan dengan suhu degradasi yang lebih rendah di mana reaksi degradasi berlangsung, yang menghasilkan konsumsi energi yang lebih rendah dan tingkat konversi yang lebih tinggi (Beyene, 2014).

3.1.7 Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak

Generasi plastik di seluruh dunia berkembang selama bertahun-tahun karena keragamannya aplikasi plastik di berbagai sektor yang menyebabkan akumulasi limbah plastik di TPA. Meningkatnya permintaan plastik jelas mempengaruhi ketersediaan sumber daya minyak bumi bahan bakar fosil tidak terbarukan karena plastik adalah bahan berbasis minyak bumi (Sharuddin *et al.*, 2017). Beberapa negara berkembang seperti India harus mengimpor minyak untuk transportasi dan sektor industri kimia. Harga minyak bumi meningkat karena kenaikan harga di Indonesia pasar internasional. Konversi limbah plastik menjadi bahan bakar adalah bagian lengkap dari tujuan dalam Strategi Energi Nasional adalah:

1. Untuk mengurangi impor minyak bumi
 2. Untuk mengurangi pertumbuhan tahunan total permintaan energi menjadi 2 persen dari 4 hingga 6% pada konservasi energi.
 3. Mengembangkan sumber energi alternatif.
- (Khot & Basavarajappa, 2017).

Mengingat plastik adalah bagian dari minyak bumi, minyak yang dihasilkan melalui proses pirolisis adalah dikatakan memiliki nilai kalori tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif (Sharuddin *et al.*, 2017). *Thermal Cracking* atau pirolisis, melibatkan degradasi bahan polimer dengan memanaskan tanpa adanya oksigen. Proses ini biasanya dilakukan pada suhu antara 500-800°C dan menghasilkan pembentukan arang terkarbonisasi dan fraksi yang mudah menguap yang dapat dipisahkan menjadi minyak hidrokarbon terkondensasi dan gas dengan nilai kalor tinggi yang tidak terkondensasi. Proporsi setiap fraksi dan komposisinya yang tepat tergantung terutama pada sifat limbah plastik tetapi juga pada kondisi proses (Beyene, 2014).

BAHAN ACUAN

- Achilias, D.S., C. Roupakias, P. Megalokonomos, A.A. Lappas, & E.V. Antonakou. 2007. Chemical Recycling of Plastic Wastes made from Polyethylene (LDPE and HDPE) and Polypropylene (PP). *J.Hazard. Mater.* **149**: 536–542.
- Achilias, D.S. & G.P. Karayannidis. 2004. The Chemical Recycling of PET in the Framework of Sustainable Development. *Water Air Soil Pollut. Focus.* **4**: 385–396.
- Achilias, D.S., P. Siafaka, N. Nianias, & I.s. Tsagkalias. 2012. Recent Advances in the Chemical Recycling of Polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). *Material Recycling–Trends and Perspectives.*
- Ansari, Y., M. Husain, F.I Chavan, & V. Shaikh. 2017. Replace Of Asphalt with Waste Polythene in Bitumen Road. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology.* **3(3)**: 602- 608.
- Beyene, H.D. 2014. Recycling of Plastic Waste into Fuels, a Review. *International Journal of Science, Technology and Society.* **2(6)**: 190-195.
- Chandara, H., Sunjoto, & Sarto. 2015. Plastic Recycling in Indonesia by Converting Plastic Wastes (PET, HDPE, LDPE, and PP) into Plastic Pellets. *ASEAN Journal of Systems Engineering.* **3(2)**: 65-72.
- Grigore, M.E. 2017. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling.* **2(24)**: 1-11.
- Karayannidis, G.P. & D.S. Achilias. 2007. Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate). *Macromol. Mater. Eng.* **292**: 128–146.

- Ke, H., T. Li-Hua, Z. Zi-Bin, & Z. Cheng-fang. 2005. Reaction Mechanism of Styrene Monomer Recovery from Waste Polystyrene by Supercritical Solvents. *Polym. Degrad. Stab.* **89**: 312–316.
- Khot, M.B. & S. Basavarajappa. 2017. Plastic Waste Into Fuel Using Pyrolysis Process. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. **4(9)**: 339-342.
- Koushal, V., R. Sharma, M. Sharma, R. Sharma & V. Sharma. 2014. Plastics: Issues Challenges and Remediation. *International Journal of Waste Resources*. **4(1)**: 1-6.
- Nursyamsi, N., I. Indrawan, & V. Theresa. 2017. Effect of HDPE plastic waste towards batako properties. *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **309**: 1-7.
- Sharuddin, S.D.A., F. Abnisa, W.M.A.W. Daud & M.K. Aroua. 2017. Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **334**: 1-8.
- Yang, Y., Y. Lu, H. Xiang, Y. Xu, & Y. Li. 2002. Study on Methanolytic Depolymerization of PET with Supercritical Methanol for Chemical Recycling. *Polym. Degrad. Stab.* **75**: 185–191.

LATIHAN SOAL

1. Bagaimana cara penanganan sampah plastik secara umum?
2. Apa produk yang dapat dihasilkan dari daur ulang sampah plastik secara mekanik?
3. Apa fungsi plastik di dalam pembuatan batako?
4. Apa keuntungan jalan tar plastik yang dibangun dengan baik?
5. Bagaimanakah pengaruh penambahan sampah plastik terhadap pembuatan aspal pada penelitian yang telah dilakukan oleh Ansari *et al.*, (2017)?
6. Apa yang dimaksud dengan daur ulang kimia?
7. Apa sajakah reaksi kimia yang digunakan untuk dekomposisi polimer menjadi monomer?

CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB IV
(Penelitian Terkini dalam Mengubah Plastik
menjadi Bahan Bakar)

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki capaian pembelajaran sebagai berikut:

Capaian Pembelajaran Sikap (CPS):

Mahasiswa menjadi lebih peduli terhadap masalah plastik yang mencemari lingkungan

Capaian Pembelajaran Pengetahuan (CPP):

Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan beberapa metode terkini mengenai pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar

Capaian Pembelajaran Keterampilan Umum (CPKU):

Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya

Capaian Pembelajaran Keterampilan Khusus (CPKK):

Mahasiswa mampu menangani limbah plastik dengan berbagai metode dalam rangka mendapatkan bahan bakar

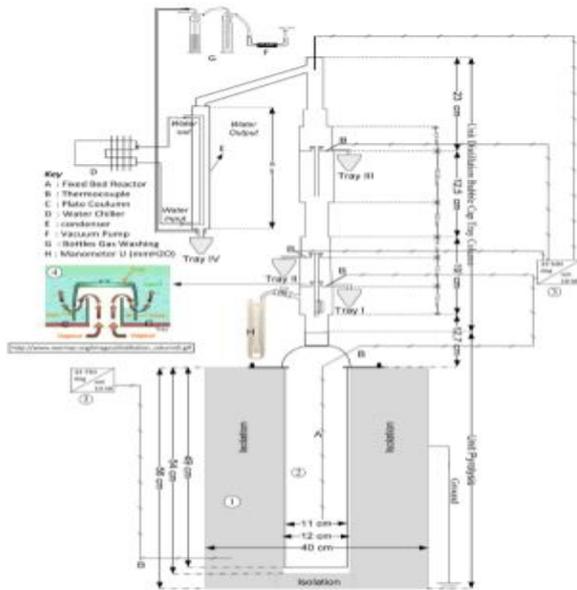
BAB IV

PENELITIAN TERKINI DALAM MENGUBAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR

Penelitian mengenai pengolahan mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak merupakan suatu hal yang menarik untuk diteliti. Beberapa peneliti telah melakukan penelitian mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak seperti pada berikut ini:

1. Thahir *et al.*, (2019)

Produksi bahan bakar cair dari limbah plastik menggunakan metode pirolisis terintegrasi dengan kolom *refinery distillation bubble cap plate* (Gambar 4.1). Dalam penelitian ini, mengoptimalkan produk pirolisis cair sebanyak 500 gram limbah plastik *polypropylene* (PP), menggunakan reaktor tipe *fixed bed* dalam kondisi vakum ($-3 \text{ mm H}_2\text{O}$), dengan proses pemanasan reaktor mencapai suhu maksimum 750°C . Produk pada temperatur 580°C menghasilkan minyak cair optimal sebesar 88%, terdiri dari minyak tanah dalam baki I dengan volume 350 mL, bensin dalam baki II dan III dengan volume 228 mL, dan baki IV tidak memiliki kondensat (Tabel 4.1), hasil gas sebesar 5% dan sisanya adalah *char*. Karakteristik bahan bakar yang diperoleh dari plastik seperti densitas, viskositas, angka oktan-cetane, kadar abu dan nilai kalor memiliki sifat yang mirip dengan bahan bakar fosil.



Gambar 4.1. Skema pirolisis *thermal cracking* terintegrasi dengan kolom *distillation bubble cap*

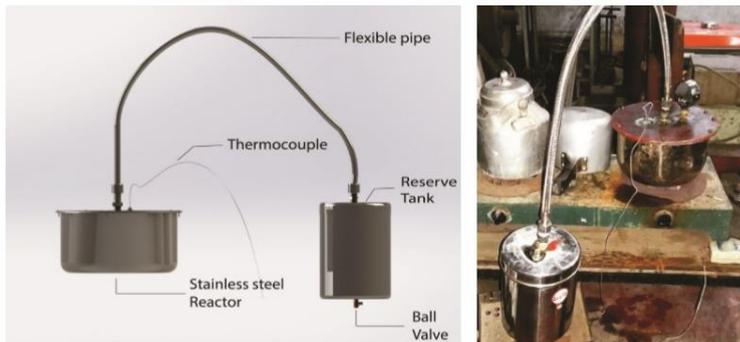
Tabel 4.1. Produk dari kolom *distillation bubble cap*. Efek dari proses suhu.

| Pyrolysis temperature (°C) | Product of distillation (ml Fuel/g PP) | | | | Total product |
|----------------------------|--|---------|----------|---------|---------------|
| | Tray I | Tray II | Tray III | Tray IV | |
| 500 | 0.080 | - | - | - | 0.080 |
| 520 | 0.120 | - | - | - | 0.120 |
| 540 | 0.544 | 0.066 | - | - | 0.611 |
| 560 | 0.348 | 0.136 | 0.072 | - | 0.556 |
| 580 | 0.700 | 0.376 | 0.080 | - | 1.156 |
| 600 | 0.574 | 0.438 | 0.058 | 0.022 | 1.092 |
| 620 | 0.846 | 0.074 | 0.018 | 0.024 | 0.962 |
| 650 | 0.150 | 0.244 | 0.126 | 0.308 | 0.828 |

2. Jannat *et al.*, (2019)

Dalam penelitian ini berfokus pada degradasi termal limbah plastik *polypropylene* melalui proses pirolisis tanpa katalis untuk menghasilkan bahan bakar minyak. Pengaturan tipe batch skala kecil dibuat untuk melakukan degradasi termal

plastik. Limbah plastik *polypropylene* dipirolisis dari temperatur 300-400°C selama 60 menit (Gambar 4.2). Produk-produk yang dihasilkan adalah minyak bahan bakar cair, gas, dan residu plastik padat hitam. Efisiensi konversi minyak yang dicapai oleh *set up* sebesar 78%. *Output* energi yang setara dihitung dari nilai kalor yang diukur dari minyak pirolitik yang diperoleh dari pirolisis 60 menit adalah 12,8MJ/kg. Sifat-sifat bahan bakar minyak yang diproduksi seperti nilai kalor, viskositas, densitas, titik nyala dan kadar air diukur dan semua sifat ini ditemukan sangat dekat dengan diesel dan oktan (Tabel 4.2).



Gambar 4.2 Alat pirolisis

Tabel 4.2. Sifat komparatif minyak bakar

| Properties | Pyrolysed Oil | Octane | Diesel |
|------------------------------|---------------|--------|--------|
| Caloriefic Value HHV (MJ/kg) | 41.9 | 45 | 45.8 |
| Viscosity(sec) | 34 | >30 | 33 |
| Density(gm/ml) | 0.763 | 0.703 | .82 |
| Flash Point (°C) | 32 | - 43 | 52 |
| Water Content | Nil | Nil | Nil |

3. Miteva *et al.*, (2016)

Dalam penelitian ini, sampel yang digunakan adalah campuran sampah *polyethylene* dan *polypropylene* sebagai bahan baku. Campuran plastik (75% PE dan 25% PP) dengan menggunakan campuran Al_2O_3 dan SiO_2 sebagai katalis. Proses pirolisis dilakukan pada kisaran suhu 400-550°C dan produk yang diperoleh adalah bahan bakar cair, gas dan residu padat kecil. Di bawah kondisi reaksi yang dioptimalkan, fraksi cair terkondensasi jauh lebih besar daripada fraksi gas. Menurut hasil yang diperoleh, waktu retensi dan persen SiO_2 dalam campuran katalis memiliki efek dominan pada jumlah produk cair. Penurunan jumlah SiO_2 dalam campuran katalis meningkatkan hasil produk cair. Sifat fisik produk cair yang diperoleh dikarakterisasi dan sesuai dengan nilai yang diukur, bahan bakar cair termasuk dalam fraksi ringan bahan bakar diesel (Tabel 4.3).

Tabel 4.3. Sifat fisik HDPE dan PP minyak pirolitik

| Sample, No | viscosity at 40°C, [mm ² /s] | density at 20°C [g/cm ³] | aniline point, [°C] | index of refraction |
|------------|---|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 1.0734 | 0.7762 | 63.5 | 1.4408 |
| 2 | 0.8335 | 0.7694 | 63 | 1.4407 |
| 3 | 1.2099 | 0.7800 | 65 | 1.4451 |
| 4-I | 0.8418 | 0.7661 | 63 | 1.4349 |
| 4-II | 0.9402 | 0.7775 | 61 | 1.4436 |

4. Miandad *et al.*, (2019)

Dalam penelitian ini, pirolisis katalitik dari berbagai jenis limbah plastik (PS, PE, PP, dan PET) sebagai tunggal atau dicampur dalam rasio yang berbeda (Tabel 4.4) di hadapan katalis zeolit alam (NZ) yang dimodifikasi dalam reaktor pirolisis skala pilot kecil (Gambar 4.3). NZ dimodifikasi oleh aktivasi termal (TA-NZ) pada 550°C dan aktivasi asam (AA-NZ) dengan HNO_3 untuk meningkatkan sifat katalitiknya. Pirolisis

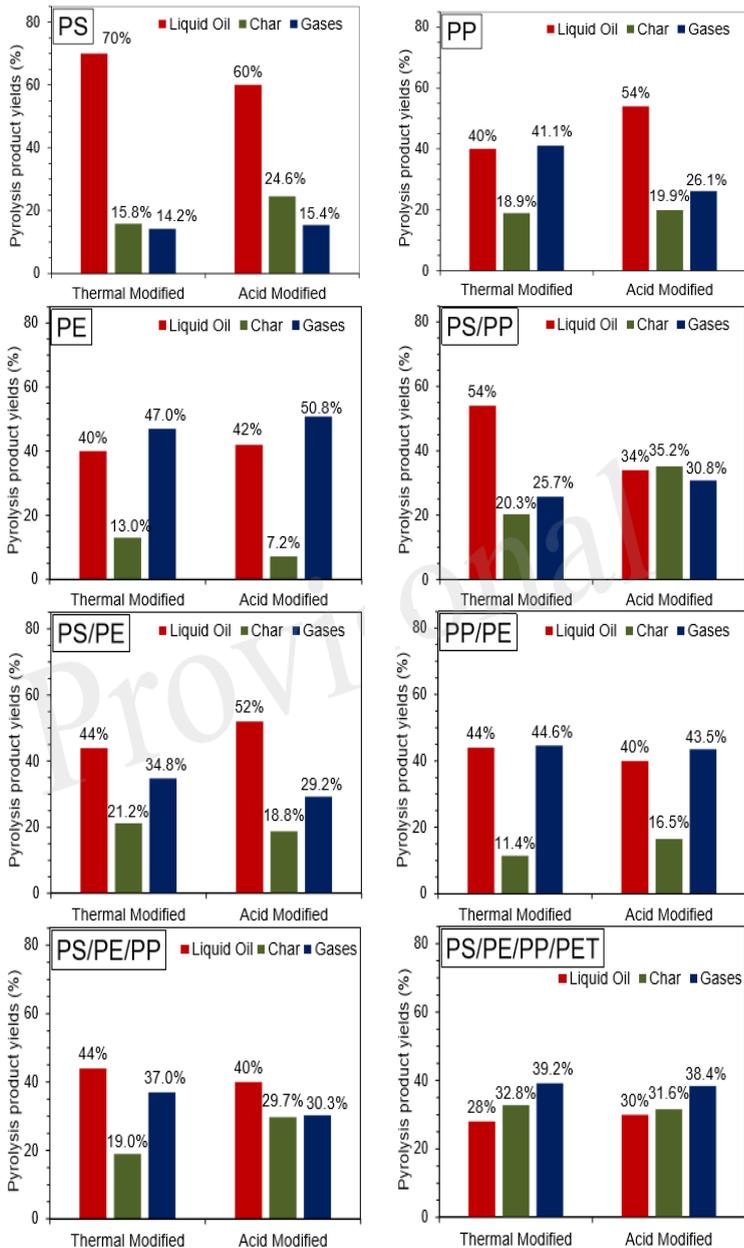
katalitik dari PS menghasilkan minyak cair tertinggi (70 dan 60%) dibandingkan PP (40 dan 54%) dan PE (40 dan 42%), masing-masing menggunakan katalis TA-NZ dan AA-NZ (Gambar 4.4). Komposisi kimiawi minyak pirolisis dianalisis menggunakan GC-MS, dan ditemukan bahwa sebagian besar minyak cair menghasilkan kandungan aromatik yang tinggi dengan beberapa senyawa hidrokarbon alifatik dan lainnya. Minyak cair memiliki kisaran nilai kalor lebih tinggi (HHV) 41,7-44,2 MJ/kg seperti diesel konvensional. Oleh karena itu, ia memiliki potensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi energi dan transportasi setelah perawatan dan pemurnian lebih lanjut.



Gambar 4.3. Reaktor pirolisis skala pilot kecil (Miandad *et al.*, 2016).

Tabel 4.4. Skema Eksperimental

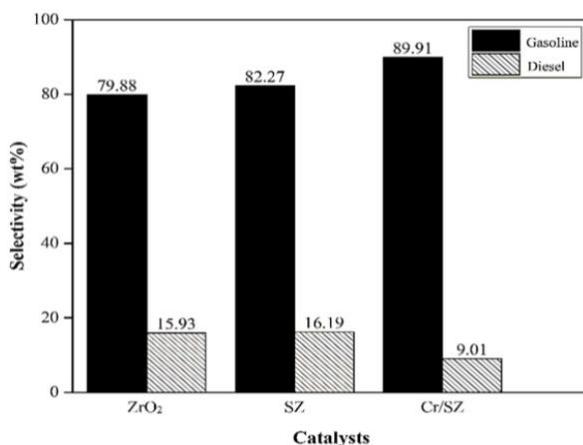
| Feedstock Types | Feedstock Quantity (g) | Catalyst quantity (g) | Feedstock Ratio (%) | Retention time (min) | Reaction Temp (°C) | Heating rate (°C/min) |
|-----------------|------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| PS | 1,000 | 100 | 100 | 75 | 450 | 10 |
| PE | 1,000 | 100 | 100 | 75 | 450 | 10 |
| PP | 1,000 | 100 | 100 | 75 | 450 | 10 |
| PS/PE | 1,000 | 100 | 50/50 | 75 | 450 | 10 |
| PS/PP | 1,000 | 100 | 50/50 | 75 | 450 | 10 |
| PP/PE | 1,000 | 100 | 50/50 | 75 | 450 | 10 |
| PS/PE/PP | 1,000 | 100 | 50/25/25 | 75 | 450 | 10 |
| PS/PP/PE/PET | 1,000 | 100 | 40/20/20/20 | 75 | 450 | 10 |



Gambar 4.4. Pengaruh TA-NZ dan AA-NZ pada produk pirolisis

5. Hauli *et al.*, (2019)

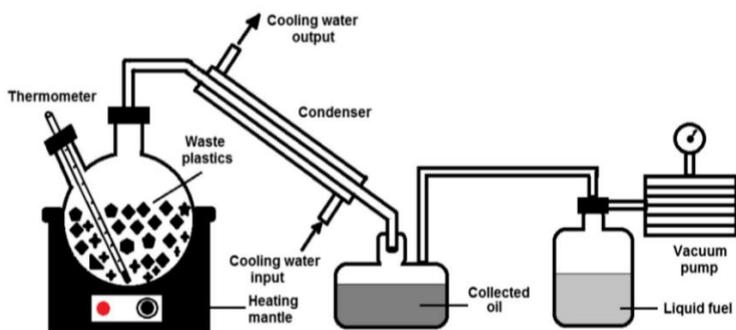
Bahan baku plastik yang dilakukan dalam penelitian ini adalah LDPE. Plastik dipanaskan pada 300-400°C selama 4 jam dalam reaktor pirolisis. Cairan yang dihasilkan dari pirolisis dihidrolisa pada temperatur 300°C selama 1 jam di bawah aliran gas H₂ dengan laju aliran 10 mL/menit. Proses *hydrocracking* dilakukan dalam mikroreaktor *hydrocracking* menggunakan katalis dengan rasio umpan/katalis 100. *Hydrocracking* sampah plastik LPDE menghasilkan produk cair tertinggi yang dilakukan dengan menggunakan katalis Cr/SZ sekitar 40,15% dan dapat mengurangi residu dan hasil gas. Berdasarkan selektivitas, proses pirolisis masih menghasilkan fraksi diesel yang tinggi dalam hasil cair dan fraksi bensin meningkat setelah proses *hydrocracking* dari menggunakan semua Katalis. Fraksi bensin tertinggi dihasilkan oleh katalis Cr/SZ sekitar 89,91% (Gambar 4.5).



Gambar 4.5. Selektivitas hasil cair dari *hydrocracking* limbah plastik LDPE

6. Kumar *et al.*, (2017)

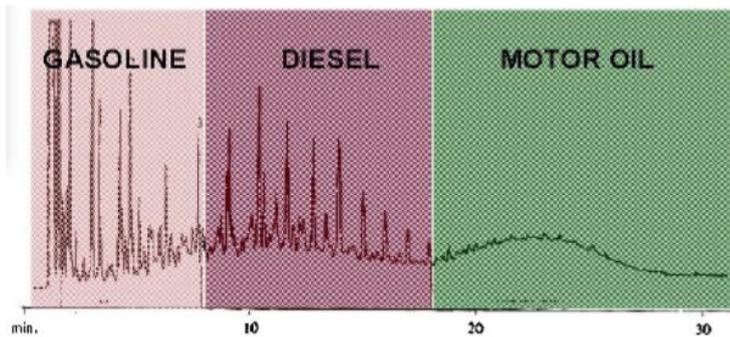
Dalam penelitian ini, dilakukan dua proses yaitu vakum dan perengkahan katalitik (karbon aktif, karbon aktif dengan arang pasir dan karbon aktif dengan kalsium oksida). Pengaturan reaktor dalam penelitian ini adalah reaktor batch. Varian yang umum antara operasi batch dan semi-batch adalah vakum, yang menyebabkan pengurangan suhu reaksi terjadi di dalam lapisan dasar Borosil (Gambar 4.6). Bahan baku sampah plastik yang digunakan yakni *polyethylene*, *polypropylene*, *polystyrene*, dan *polyethylene terephthalat*. Pirolisis sampah plastik dilakukan dalam dua jenis pola yang digunakan, yaitu masing-masing jenis plastik dan jenis plastik campuran dalam reaktor batch skala laboratorium baru pada temperatur 70-240°C. Pengurangan suhu proses berlangsung dari 500-600°C menjadi 240°C dengan adanya katalis. Analisis produk pirolisis menunjukkan bahwa produk dapat digunakan sebagai alternatif yang layak untuk bahan bakar motor. Berdasarkan pengamatan, *yield* yang lebih baik diperoleh pada perlakuan plastik individu dibandingkan plastik campuran kecuali *polypropylene* dalam proses vakum tanpa katalis (Tabel 4.5). Perbandingan laporan GC-FID (TPH) dari minyak yang diperoleh dengan bensin komersial membuktikan bahwa minyak olahan terdiri dari komponen bensin (Gambar 4.7).



Gambar 4.6. Pengaturan eksperimen

Tabel 4.5. Hasil eksperimen dari proses dengan dan tanpa katalis

| Plastic materials | Catalysts | Yield to liquid product (%) | Residue (%) | Temperature maintained (C) | Vacuum pressure applied (mm Hg) | Reaction time (min) |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Polystyrene | No catalysts | 80 | 13.33 | 240 | -550 | 30 |
| Polypropylene | No catalysts | 60.7 | 34.40 | 240 | -500 | 35 |
| Polyethylene | No catalysts | 75 | 22.43 | 240 | -300 | 45 |
| Mixed plastics (PE, PP, PS) | No catalysts | 66.86 | 25.85 | 240 | -350 | 45 |
| Mixed plastics (PE, PP, PS) | Activated carbon | 82.43 | 15.22 | 240 | -300 | 45 |
| Mixed plastics (PE, PP, PS) | Charcoal | 95.54 | 2.33 | 240 | -300 | 35 |
| Mixed plastics (PE, PP, PS, PET) | CaO + activated carbon | 75.50 | 20.33 | 240 | -300 | 45 |



Gambar 4.7. Laporan GC-FID (TPH) untuk bensin, solar dan minyak motor

7. Panda *et al.*, (2019)

Dalam penelitian ini, 20 gram plastik dimuat di setiap reaksi pirolisis di bawah atmosfer udara statis. Reaksi dilakukan dengan menggunakan empat jenis sampel plastik seperti PP, HDPE, LDPE dan plastik campuran PP, HDPE, LDPE (dalam berat 1: 1: 1) dengan campuran zirkonium hidroksida tersulfasi sebagai katalis dalam konsentrasi yang berbeda (5%, 10%, 20% dan 33,3%). Reaksi dilakukan pada suhu yang berbeda mulai dari 400 hingga 550°C dalam reaktor batch. Konsentrasi katalis optimal untuk hasil minyak maksimum

adalah 10% pada 500°C. Hasil maksimum minyak pada kondisi suhu dan konsentrasi katalis optimal adalah 84,1% berat dari PP, 82% berat dari LDPE, 79,5% berat dari HDPE dan 80,5% berat dari plastik campuran. Gravitasi spesifik minyak berada dalam kisaran bahan bakar minyak bumi (bensin, minyak tanah, dan diesel). Viskositas minyak plastik berada dalam kisaran minyak tanah dan diesel. Tuang minyak cukup rendah untuk digunakan dalam cuaca dingin. Nilai kalori minyak setara dengan bahan bakar minyak bumi. Dengan demikian, sifat bahan bakar cocok untuk digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Sifat bahan bakar minyak diperoleh dari plastik dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Sifat bahan bakar minyak diperoleh dari plastik

| Parameters/test protocol | Petro fuel | | | Oil from catalytic pyrolysis at optimum temperature and catalyst concentration | | | |
|---|-------------|--------------|-----------|--|----------|----------|----------------|
| | Gasoline | Kerosene | Diesel | PP oil | LDPE oil | HDPE oil | Mixed plastics |
| Colour | Yellow | Faint yellow | Orange | Straw yellow | | | |
| Specific gravity (g/ml) at 15 °C/15 °C I.S.1448: P:16 | 0.72-0.73 | 0.78-0.82 | 0.83-0.85 | 0.767 | 0.815 | 0.843 | 0.810 |
| Kinematic viscosity in cSt at 30 °C I.S.1448: P:25 | 1.076-1.140 | 1.54-2.2 | 2.4-5.3 | 2.24 | 2.31 | 2.38 | 2.29 |
| Pour point I.S.1448: P:10 | - | - | - | < -40 °C | | | |
| Cloud point I.S.1448: P:10 | - | - | - | < -40 °C | | | |
| Gross calorific value (kcal/kg) I.S. 1448: P:6 | 11,201 | 10,867 | 10,162 | 46.32 | 42.15 | 43.11 | 46.78 |
| Flash point by Abel (°C) I.S.1448: P:20 | -42 | 50-55 | 55-60 | -22 | | | |
| Fire point (°C) I.S.1448: P:20 | -37 | 60 | 68 | -18 | | | |
| Boiling point range (°C) I.S. 1448:P:18 | 40-205 | 175-325 | 150-350 | 65-340 | 75-345 | 70-345 | 65-345 |

BAHAN ACUAN

- Hauli, L., K. Wijaya & A. Syoufian. 2019. Hydrocracking of LDPE Plastic Waste into Liquid Fuel over Sulfated Zirconia from a Commercial Zirconia Nanopowder. *Oriental Journal Of Chemistry*. **35(1)**: 128-133.
- Jannat, M., S. Akter, & M. Ehsan. 2019. Conversion of Waste Polypropylene Plastic into Fuel. AIP Conference Proceedings. **2121**: 1–7.
- Kumar, P.S., M. Bharathikumar, C. Prabhakaran, S. Vijayan & K. Ramakrishnan. 2017. Conversion of Waste Plastics into Low-Emissive Hydrocarbon Fuels through Catalytic Depolymerization in a New Laboratory Scale Batch Reactor. *Int J Energy Environ Eng*. **8**:167–173.
- Miandad, R., A.S. Nizami, M. Rehan, M. Barakat, M.I. Khan, A. Mustafa, I.M.I. Ismail, & J.D. Murphy. 2016. Influence of Temperature and Reaction Time on the Conversion of Polystyrene Waste to Pyrolysis Liquid Oil. *Waste Management*. **58**: 250-259.
- Miandad, R., M. Rehan, M.A. Barakat, A.S. Aburizaiza, H. Khan, I.M. Ismail, J. Dhavamani, J. Gardy, A. Hassanpour & A. Nizami. 2019. Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: Moving Towards Pyrolysis Based Biorefineries. *Front. Energy Res*. **7**: 1-17.
- Miteva, K., S. Aleksovski, & G.B. Gaceva. 2016. Catalytic Pyrolysis of Waste Plastic into Liquid Fuel. *Zastita Materijala*. **57(4)**: 600-604.
- Panda, A.K., A. Alotaibi, I.V. Kozhevnikov & N.R. Shiju. 2019. Pyrolysis of Plastics to Liquid Fuel Using Sulphated Zirconium Hydroxide Catalyst. *Waste and Biomass Valorization*.

Thahir, R., A. Altway, S.R. Juliastuti, & Susianto. 2019. Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. *Energy Reports*. **5**: 70–77.

LATIHAN SOAL

1. Bagaimanakah pengaruh suhu terhadap produk pirolisis cair dari limbah plastik *polypropylene* (PP) pada penelitian yang dilakukan oleh Thahir *et al.*, (2019)?
2. Apa saja produk yang dihasilkan dari pirolisis limbah plastik *polypropylene* pada penelitian yang dilakukan oleh Jannat *et al.*, (2019)?
3. Bagaimanakah proses pembuatan bahan bakar cair pada penelitian Hauli *et al.*, (2019)?
4. Bagaimanakah hasil pirolisis masing-masing plastik dibandingkan dengan hasil pirolisis plastik campuran pada penelitian Kumar *et al.*, (2017)?
5. Berapakah suhu dan konsentrasi katalis optimal untuk hasil minyak maksimum pada penelitian yang dilakukan oleh Panda *et al.*, (2019)?
6. Bagaimanakah pengaruh katalis TA-NZ dan AA-NZ terhadap hasil pirolisis berbagai jenis sampah plastik pada penelitian yang dilakukan oleh Miandad *et al.*, (2019)?
7. Apa sajakah komposisi kimiawi minyak hasil pirolisis berdasarkan hasil analisis GC-MS pada penelitian yang dilakukan oleh Miandad *et al.*, (2019)?

CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB V

(Mengubah Plastik jadi Bahan Bakar dengan Cara Pirolisis)

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki capaian pembelajaran sebagai berikut:

Capaian Pembelajaran Sikap (CPS):

Mahasiswa menjadi lebih peduli terhadap masalah plastik yang mencemari lingkungan

Capaian Pembelajaran Pengetahuan (CPP):

Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan cara mengubah plastik menjadi bahan bakar menggunakan metode pirolisis

Capaian Pembelajaran Keterampilan Umum (CPKU):

Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya

Capaian Pembelajaran Keterampilan Khusus (CPKK):

Mahasiswa mampu menangani limbah plastik dengan metode pirolisis dalam rangka mendapatkan bahan bakar

BAB V

MENGUBAH PLASTIK JADI BAHAN BAKAR MINYAK DENGAN CARA PIROLISIS

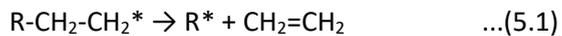
5.1 Pirolisis

Pirolisis berasal dari dua kata yaitu *pyro* yang berarti panas dan *lysis* yang berarti penguraian atau degradasi (Wahyudi *et al.*, 2018). Pirolisis adalah dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen atau reagen kimia lainnya (Nasrun *et al.*, 2015). Pirolisis adalah proses mendegradasi molekul polimer rantai panjang secara termal menjadi molekul yang lebih kecil dan lebih kompleks melalui panas. Proses ini membutuhkan panas yang intens dengan durasi yang lebih singkat dan tanpa oksigen. Tiga produk utama yang dihasilkan selama pirolisis adalah minyak, gas dan arang yang berharga bagi industri terutama produksi dan kilang. Tidak seperti daur ulang, penanganan proses juga jauh lebih mudah dan fleksibel daripada metode daur ulang umum karena tidak memerlukan proses penyortiran yang intens (Sharuddin *et al.*, 2018). Mekanisme degradasi polimer umumnya digambarkan sebagai radikal bebas dalam hal proses termal tanpa katalis. Namun, ketika katalis digunakan, itu umumnya merupakan mekanisme ionik (Almeida & Marques, 2016).

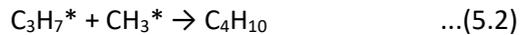
5.1.1 Thermal pyrolysis

Pirolisis termal melibatkan penguraian bahan polimer dengan cara temperatur ketika diterapkan dalam kondisi atmosfer inert (Almeida & Marques, 2016). Pirolisis dilakukan pada temperatur yang berbeda mulai dari 300 hingga 900°C (Chen *et al.*, 2014; Miandad *et al.*, 2016). Pada senyawa yang berderajat polimerisasi tinggi, pirolisis merupakan reaksi depolimerisasi dan

pada suhu tinggi mengikuti mekanisme radikal bebas. Reaksi ini melalui tiga tahap yaitu tahap memulai, tahap perambatan, dan tahap penghentian (Ariet & Schweyer, 1965; Sabarodin & Dewanto, 1998). Pada tahap memulai akan terjadi pemutusan rantai ikatan yang lemah karena adanya kenaikan suhu. Radikal bebas yang terbentuk, pada tahap perambatan akan terpecah lagi membentuk radikal bebas baru yang lebih kecil, atau senyawa stabil seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.1):



Untuk suhu tertentu etilen telah merupakan senyawa stabil, tetapi R^* belum stabil sehingga akan terpecah lagi. Pada tahap penghentian, radikal-radikal bebas yang ada akan membentuk senyawa yang stabil seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.2):



(Sabarodin & Dewanto, 1998).

5.1.2 Pirolisis katalitik

Pirolisis termal memerlukan suhu tinggi karena konduktivitas termal yang rendah dari polimer, yang tidak terlalu selektif dan solusi yang mungkin untuk mengurangi kondisi reaksi ini adalah penggunaan pirolisis yang dikatalisasi. Keunggulan dari katalis dapat mendorong:

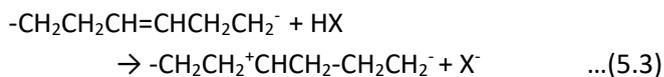
- a. Reaksi dekomposisi pada suhu rendah dengan konsumsi energi yang lebih rendah
- b. Mengurangi biaya
- c. Meningkatkan hasil produk dengan nilai tambah yang lebih tinggi
- d. Meningkatkan selektivitas proses

- e. Reaksi pemutusan yang lebih cepat, yang mengarah ke waktu tinggal yang lebih kecil dan reaktor dengan volume yang lebih kecil
- f. Menghambat pembentukan produk yang tidak diinginkan
- g. Menghambat pembentukan produk yang terutama terdiri dari hidrokarbon siklik, aromatik dan bercabang, dalam hal perengkahan katalitik *polyolefin*
- h. Dapatkan produk cair dengan rentang titik didih yang lebih rendah

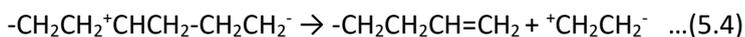
(Almeida & Marques, 2016).

Ketika katalis digunakan dalam pirolisis terjadi dua jenis mekanisme dekomposisi secara bersamaan: perengkahan termal, yang pada gilirannya dapat mengikuti mekanisme yang berbeda (pemotongan rantai acak, pemotongan ujung rantai dan/atau penghapusan gugus samping) dan perengkahan katalitik (ion karbenium) teradsorpsi pada permukaan katalis, pemisahan beta dan desorpsi). Akibatnya, berbagai macam produk dihasilkan, yang pada gilirannya akan bereaksi satu sama lain sehingga menghasilkan mekanisme reaksi yang tak terhitung jumlahnya (Almeida & Marques, 2016). Mekanisme ion karbonium dari pirolisis katalitik polietilen dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Inisiasi: Inisiasi dapat terjadi pada beberapa lokasi cacat rantai polimer. Sebagai contoh, hubungan *olefinic* dapat dikonversi menjadi ion karbonium pada rantai dengan penambahan proton seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.3):



Rantai polimer dapat dipecah melalui pemotongan-β seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.4):

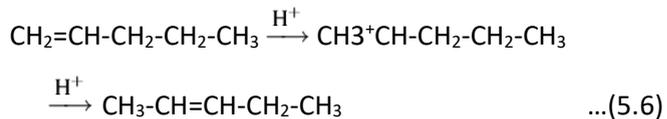


Inisiasi juga dapat terjadi melalui abstraksi ion hidrida acak dengan ion karbonium berbobot molekul rendah (R^+) seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.5):



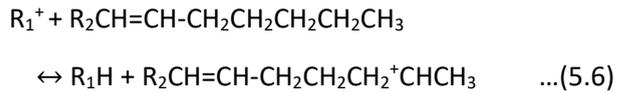
Ion karbonium rantai yang baru terbentuk kemudian mengalami pemotongan- β seperti pada Persamaan (5.4)

2. Depropagasi: Berat molekul rantai polimer utama dapat dikurangi melalui serangan berurutan oleh situs asam atau ion karbonium lainnya dan pembelahan rantai, menghasilkan fraksi oligomer sekitar (C_{30} - C_{80}). Pembelahan lebih lanjut dari fraksi oligomer mungkin dengan pemotongan- β langsung dari ion karbonium rantai akhir mengarah pada pembentukan gas di satu sisi, dan fraksi cair (sekitar C_{10} - C_{25}) di sisi lain.
3. Isomerisasi: Intermediet ion karbonium dapat mengalami penataan ulang oleh pergeseran atom hidrogen atau karbon yang mengarah ke isomerisasi ikatan rangkap dari sebuah olefin seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.6):



Reaksi isomerisasi penting lainnya adalah pergeseran gugus metil dan isomerisasi hidrokarbon jenuh.

4. Aromatisasi: Beberapa intermediet ion karbonium dapat mengalami reaksi siklisasi. Contohnya adalah ketika abstraksi hidrida pertama kali terjadi pada sebuah olefin pada posisi beberapa karbon dihilangkan dari ikatan rangkap, hasilnya adalah pembentukan ion karbonium *olefinic* seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.6):



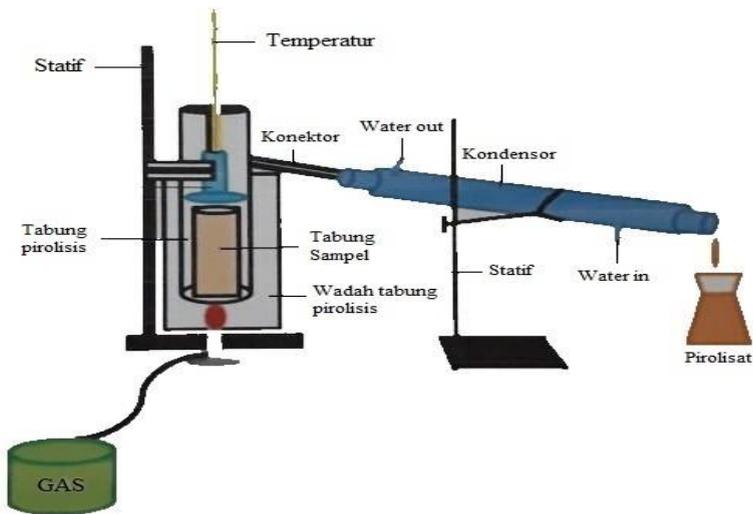
Ion karbonium dapat mengalami serangan intramolekul pada ikatan rangkap:

Reaksi semacam itu menyediakan rute menuju siklisasi dan pembentukan aromatik (Panda *et al.*, 2010).

5.2 Pirolisis Sampah Plastik

Sampah plastik dapat dikonversi menjadi bahan bakar minyak dengan proses perengkahan (*cracking*), yaitu reaksi pemutusan ikatan C-C dari rantai karbon panjang dan berat molekul besar menjadi rantai karbon pendek dengan berat molekul yang lebih kecil (Wahyudi *et al.*, 2016). Menurut Anggono *et al.*, (2009) temperatur optimum yang diperoleh untuk sampel plastik yaitu pada temperatur 425°C. Produk utama dari proses dekomposisi termal plastik ini adalah minyak yang setara dengan bahan bakar konvensional (Liestiono *et al.*, 2017).

Proses pirolisis sampah plastik dapat dilakukan dengan membersihkan sampel terlebih dahulu, dikeringkan dan dicacah lalu dimasukkan ke dalam reaktor kemudian dipanaskan (Wasesa *et al.*, 2016). Pada saat proses pirolisis, terjadi penguapan senyawa volatil dan penguraian polimer plastik menghasilkan uap monomer-monomer plastik. Uap yang terbentuk akan mengalir menuju kondensor untuk didinginkan oleh air pendingin sehingga terkondensasi menjadi minyak plastik (Gambar 5.1) (Liestiono *et al.*, 2017).



Gambar 5.1. Rancangan alat pirolisis (Apriyanti, 2018).

5.3 Parameter yang Mempengaruhi Pirolisis

Parameter memainkan peran utama dalam mengoptimalkan hasil dan produk komposisi dalam setiap proses. Dalam pirolisis plastik, parameter dapat mempengaruhi produksi produk akhir seperti minyak cair, gas dan arang. Parameter penting itu dapat diringkas sebagai suhu, jenis reaktor, tekanan dan waktu tinggal, jenis dan laju gas fluidisasi, dan katalis. Produk yang diinginkan dapat dicapai dengan mengontrol parameter pada pengaturan yang berbeda (Sharuddin *et al.*, 2016).

5.3.1 Temperatur

Suhu adalah salah satu parameter operasi yang paling signifikan dalam pirolisis karena ia mengontrol reaksi perengkahan polimer rantai (Sharuddin *et al.*, 2016), berpengaruh pada produk yang dihasilkan, hal ini disebabkan karena semakin bertambahnya suhu maka proses peruraian akan semakin sempurna (Sitorus *et al.*, 2018). Molekul tertarik bersama oleh gaya Van der Waals dan ini mencegah molekul agar tidak putus. Ketika suhu dalam sistem

meningkat, getaran molekul di dalam sistem akan lebih besar dan molekul cenderung menguap dari permukaan objek. Ini terjadi ketika energi diinduksi oleh gaya Van der Waals di sepanjang rantai polimer lebih besar dari entalpi ikatan C-C dalam rantai, mengakibatkan rusak rantai karbon (Sharuddin *et al.*, 2016). Plastik yang berbeda memiliki degradasi suhu yang berbeda tergantung pada struktur kimianya. Untuk plastik umum seperti PET, HDPE, LDPE, PP dan PS, suhu degradasi termal dimulai pada 350°C kecuali untuk PVC yang degradasi dimulai pada suhu lebih rendah 220°C. Selain itu, suhu pengoperasian yang diperlukan sangat bergantung pada preferensi produk. Jika gas atau produk arang lebih disukai, suhu yang lebih tinggi lebih dari 500°C disarankan. Jika cairan lebih disukai sebagai gantinya, suhu yang lebih rendah dalam kisaran 300-500°C direkomendasikan dan kondisi ini berlaku untuk semua plastik (Sharuddin *et al.*, 2018).

5.3.2 Jenis Reaktor

Pemilihan reaktor yang tepat untuk proses juga penting untuk meningkatkan efisiensi reaksi menuju pencapaian produk akhir yang diinginkan. Sebagian besar pirolisis plastik dalam skala laboratorium dilakukan dalam reaktor *batch*, *semi-batch*, atau aliran kontinu seperti *fluidized bed*, *fixed-bed reactor*, dan *conical spouted bed reactor* (CSBR). Setiap reaktor dapat memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri tergantung pada aplikasinya. Reaktor *batch* atau *semi-batch* kemungkinan digunakan dalam pirolisis termal karena parameter dapat dengan mudah dikontrol. Namun demikian, reaktor ini mungkin tidak cocok untuk pirolisis katalitik karena potensi pembentukan kokas pada permukaan luar katalis ketika mereka dicampur bersama dengan plastik yang akan mengurangi efisiensi katalis. Reaktor *fluidized bed* disimpulkan sebagai reaktor terbaik untuk melakukan pirolisis plastik katalitik karena katalis dapat digunakan berulang kali tanpa perlu

pemakaian, mengingat katalis merupakan zat yang sangat mahal di industri. Di sisi lain, CSBR juga menyediakan pencampuran yang baik dengan kemampuan menangani distribusi ukuran partikel besar dan pemisahan unggul rendah dibandingkan unggul yang mengalami fluidisasi. Namun, berbagai tantangan teknis selama operasi reaktor ini telah dijumpai seperti desainnya yang rumit dengan banyak pompa, pemberian katalis, *entrainment* katalis dan pengumpulan produk (padat dan cair) yang membuatnya kurang menguntungkan (Sharuddin *et al.*, 2018).

5.3.3 Tekanan dan Waktu Tinggal

Tekanan dan waktu tinggal juga mengatur kinerja proses pirolisis. Tekanan dan waktu tinggal adalah faktor ketergantungan suhu yang mungkin memiliki pengaruh potensial pada distribusi produk pirolisis plastik pada suhu yang lebih rendah. Tekanan yang lebih tinggi meningkatkan hasil produk gas dan mempengaruhi distribusi berat molekul untuk produk cair dan gas tetapi hanya terlihat pada suhu tinggi. Berdasarkan literatur, sebagian besar peneliti melakukan studi pirolisis plastik pada tekanan atmosfer dan lebih berfokus pada faktor suhu. Waktu tinggal tidak diperhatikan saat melakukan percobaan sehingga efeknya akan menjadi kurang jelas pada suhu yang lebih tinggi. Selain itu, dalam hal sudut pandang ekonomi, unit tambahan seperti kompresor dan pemancar tekanan perlu ditambahkan ke dalam sistem keseluruhan, sehingga meningkatkan biaya operasi jika faktor tekanan dipertimbangkan. Namun, harus dicatat bahwa kedua faktor ini harus dipertimbangkan berdasarkan preferensi distribusi produk terutama ketika beroperasi pada suhu di bawah 450°C (Sharuddin *et al.*, 2018).

5.3.4 Jenis dan laju gas fluidisasi

Jenis dan laju gas fluidisasi yang digunakan selama pirolisis juga mempengaruhi produk pirolisis. Fluidisasi gas adalah gas inert

(juga dikenal sebagai gas pembawa) yang hanya bergerak dalam pengangkutan produk yang diuapkan tanpa mengambil bagian dalam pirolisis. Ada banyak jenis gas fluidisasi yang dapat digunakan untuk pirolisis plastik seperti nitrogen, helium, argon, etilen, propilena dan hidrogen. Setiap jenis gas fluidisasi memiliki reaktivitas yang berbeda berdasarkan berat molekulnya. Namun demikian, dari semua gas itu, nitrogen umumnya digunakan oleh sebagian besar peneliti sebagai gas fluidisasi dalam pirolisis plastik karena lebih mudah dan lebih aman untuk ditangani daripada gas reaktivitas tinggi seperti hidrogen dan propilena karena bahaya mudah terbakar (Sharuddin *et al.*, 2018). Dalam hal laju aliran gas fluidisasi, Lin & Yen (2005) menemukan bahwa laju degradasi turun secara instan pada laju aliran fluidisasi terendah 300 mL/menit. Waktu kontak untuk produk primer tinggi pada laju aliran yang lebih rendah, menyebabkan pembentukan prekursor kokas (BTX) meningkat dengan produk sekunder yang diperoleh meskipun tingkat degradasi keseluruhan lebih lambat. Pada laju aliran tertinggi 900 mL/menit, fraksi bensin dan gas hidrokarbon dimaksimalkan. Ini jelas menunjukkan bahwa laju aliran gas fluidisasi juga mempengaruhi distribusi produk akhir (Sharuddin *et al.*, 2018).

5.3.5 Katalis

Katalis digunakan dalam proses termal untuk mempercepat reaksi kimia dan meningkatkan distribusi hidrokarbon untuk mendapatkan cairan pirolisis yang memiliki sifat serupa dengan bahan bakar konvensional seperti bensin dan solar (Sharuddin *et al.*, 2018). Ketika katalis digunakan, energi aktivasi dari proses diturunkan, dengan demikian mempercepat laju reaksi (Sharuddin *et al.*, 2016). Tiga jenis katalis yang banyak digunakan dalam pirolisis plastik adalah zeolit, katalis perengkahan fluida (FCC) dan katalis silika-alumina (Sharuddin *et*

al., 2018). Berdasarkan ulasan Sharuddin *et al.*, (2016), uraian ketiga jenis katalis tersebut dapat dilihat sebagai berikut:

- a. Zeolit digambarkan sebagai aluminosilikat kristal saringan memiliki pori-pori terbuka dan kemampuan pertukaran ion. Struktur dibentuk oleh kerangka tiga dimensi di mana atom oksigen menghubungkan sisi tetrahedral. Itu dibangun oleh berbeda rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ tergantung pada jenisnya. Rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menentukan reaktivitas zeolit yang mempengaruhi produk akhir pirolisis.
- b. Katalis FCC (perengkahan katalitik fluida) terbuat dari kristal zeolit dan matriks asam non-zeolit dikenal sebagai silika-alumina dengan binder. Komponen utama katalis FCC selama lebih dari 40 tahun adalah Zeolite-Y karena selektivitas produknya yang tinggi dan stabilitas termal. Katalis FCC biasanya digunakan di industri penyulingan minyak bumi untuk memecahkan fraksi minyak berat dari minyak mentah menjadi bensin dan cairan yang lebih ringan dan lebih diinginkan fraksi petroleum gas (LPG).
- c. Katalis silika-alumina adalah amorf katalis asam yang mengandung situs asam Bronsted dengan atom hidrogen terionisasi dan situs asam Lewis, sebuah situs penerima elektron. Konsentrasi asam katalis silika alumina ditentukan oleh rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Tidak seperti zeolit, kekuatan asam silika-alumina ditentukan sebaliknya di mana rasio tinggi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menunjukkan kekuatan keasaman yang tinggi. Contohnya, SA-1 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,99$) memiliki tingkat keasaman yang lebih tinggi daripada SA-2 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,27$) dan keduanya adalah silika-alumina komersial tersedia di pasar.

Penggunaan katalis zeolit dalam pirolisis plastik hanya memaksimalkan produksi hidrokarbon yang mudah menguap sementara FCC dan silika-alumina memaksimalkan produksi minyak cair. Namun, untuk efisiensi yang lebih tinggi dan

penggunaan waktu siklus yang lebih lama, HZSM direkomendasikan karena laju penonaktifan katalis sangat rendah dan karenanya, lebih efisien untuk regenerasi (Sharuddin *et al.*, 2018).

BAHAN ACUAN

- Almeida, D. & M.D.F. Marques. 2016. Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste. *Polímeros*. **26(1)**: 44-51.
- Anggono, T., E. Wahyu, Handayani, A. Rahmadani, & Abdullah. 2009. Pirolisis Sampah Plastik untuk Mendapatkan Asap Cair dan Penentuan Komponen Kimia Penyusunnya serta Uji Kemampuannya sebagai Bahan Bakar Cair. *Sains dan Terapan Kimia*. **3(2)**: 164-173.
- Apriyanti, M. 2018. *Pirolisis Minyak Sawit Menggunakan Katalis Zeolit dan Karakterisasi Bio Oil yang Dihasilkan*. Skripsi Program Studi Kimia, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru.
- Ariet, M., & H.E. Schwyer. 1965. Pyrolytic Reactions of Asphaltic Materials. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* **3**: 215-220.
- Chen, D., L.Yin, H. Wang, & P. He. 2014. Pyrolysis Technologies for Municipal Solid Waste: A Review. *Waste Management*. **34**: 2466–2486.
- Liestiono, R.P., M.S. Cahyono, W. Widyawidura, A. Prasetya, & M. Syamsiro. 2017. Karakteristik Minyak dan Gas Hasil Proses Dekomposisi Termal Plastik Jenis Low Density Polyethylene (LDPE). *Jurnal OFFSHORE*. **1(2)**: 1-9.
- Lin, Y.H. & H.Y. Yen. 2005. Fluidised Bed Pyrolysis of Polypropylene Over Cracking Catalysts for Producing Hydrocarbons. *Polym Degrad Stab*. **89**: 101-8.
- Miandad, R., M.A. Barakat, A.S. Aburizaiza, M. Rehan, & A.S. Nizami. 2016. Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: A Review. *Process Safety and Environmental Protection*. **102**: 822-838.
- Nasrun, E. Kurniawan, & I. Sari. 2015. Pengolahan Limbah Kantong Plastik Jenis Kresek menjadi Bahan Bakar Menggunakan Proses Pirolisis. *Jurnal Energi Elektrik*. **4(1)**: 1-5.

- Panda, A.K., R.K. Singh, & D.K. Mishra. 2010. Thermolysis of Waste Plastics to Liquid Fuel a Suitable Method for Plastic Waste Management and Manufacture of Value Added Products—A World Prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **14**: 233–248.
- Sabarodin, A., & A. Dewanto. 1998. Pembuatan Minyak Bakar dari Sampah Plastik sebagai Sumber Energi Alternatif. *Buletin Penalaran Mahasiswa UGM*. **4(3)**: 9-12.
- Sharuddin, S.D.A., F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, & M.K. Aroua. 2016. A Review on Pyrolysis of Plastic Wastes. *Energy Conversion and Management*. **115**: 308-326.
- Sharuddin, S.D.A., F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, & M.K. Aroua. 2018. Pyrolysis of Plastic Waste for Liquid Fuel Production as Prospective Energy Resource. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng*. **334**: 1-8.
- Sitorus, C., L. Sukeksi, & A.J. Sidabutar. 2018. Ekstraksi Kalium dari Kulit Buah Kapuk (*Ceiba Petandra*). *Jurnal Teknik Kimia USU*. **7(2)**: 17-22.
- Wahyudi, K., Zultiniar, & E. Saputra. 2016. Pengolahan Sampah Plastik Polipropilena (PP) menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Metode Perengkahan Katalitik Menggunakan Katalis Sintetis. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*. **11(1)**: 17-23.
- Wahyudi, J., H.T. Prayitno, & A.D. Astuti. 2018. Pemanfaatan Limbah Plastik sebagai Bahan Baku Pembuatan Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Litbang*. **14(1)**: 58-67.
- Wasesa, R.S., N. Hilal, & B. Triyantoro. 2016. Pengolahan Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar dengan Alat Pengolahan Sampah Plastik *Fixed-Bed* Reaktor, Dua Kondensor Tahun 2016. *Keslingmas*. **35**: 226-231.

LATIHAN SOAL

1. Apa yang dimaksud dengan pirolisis?
2. Apa sajakah produk utama yang dihasilkan dari proses pirolisis?
3. Bagaimana proses pirolisis sampah plastik menjadi bahan bakar minyak?
4. Apa sajakah parameter yang dapat mempengaruhi produksi produk akhir pirolisis plastik?
5. Apa keunggulan pirolisis dengan menggunakan katalis?
6. Jelaskan mekanisme yang terjadi dalam pirolisis menggunakan katalis!
7. Jelaskan proses mekanisme radikal bebas dalam pirolisis termal!

CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB VI (Karakterisasi Produk Hasil Pirolisis)

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki capaian pembelajaran sebagai berikut:

Capaian Pembelajaran Sikap (CPS):

Mahasiswa menjadi lebih peduli terhadap masalah plastik yang mencemari lingkungan

Capaian Pembelajaran Pengetahuan (CPP):

Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan cara melakukan karakterisasi pada produk hasil pirolisis limbah plastik

Capaian Pembelajaran Keterampilan Umum (CPKU):

Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya

Capaian Pembelajaran Keterampilan Khusus (CPKK):

Mahasiswa mampu melakukan karakterisasi produk hasil pirolisis limbah plastik

BAB VI

KARAKTERISASI PRODUK HASIL PIROLISIS

6.1 Penentuan Berat Jenis (Densitas)

Densitas merupakan sifat penting bahan bakar. Densitas didefinisikan sebagai massa per satuan volume cairan apa pun pada suhu tertentu (Sharma *et al.*, 2014). Penentuan berat jenis (densitas) dapat dilakukan dengan cara piknometer dicuci dan dikeringkan, kemudian ditimbang dan dicatat beratnya. Sampel dimasukkan ke dalam piknometer hingga penuh, kemudian ditutup dan ditimbang beratnya. Berat jenis diperoleh dari massa dibagi dengan volumenya seperti ditunjukkan pada Persamaan (6.1) berikut ini.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \dots(6.1)$$

Keterangan :

ρ = Berat jenis (g/mL)

m = Massa (g)

v = Volume (mL)

6.2 Pengukuran Viskositas Kinematik

Viskositas adalah ukuran gesekan fluida internal atau ketahanan minyak untuk mengalir, yang cenderung menentang setiap perubahan dinamis dalam gerakan fluida. Ketika suhu minyak meningkat, viskositasnya menurun dan karenanya mampu mengalir lebih mudah. Semakin rendah viskositas minyak, semakin mudah memompa dan menyemprotkan dan mencapai tetesan halus. Viskositas diukur menggunakan viskometer Redwood untuk viskositas kinematik dan viskometer Ostwald untuk viskositas kinematik serta viskositas dinamis (Sharma *et al.*, 2014).

Pengukuran viskositas kinematik menggunakan viskometer Ostwald dapat dilakukan dengan cara viskometer dibersihkan terlebih dahulu, kemudian diletakkan pada posisi vertikal. Sampel yang akan dianalisis dimasukkan melalui tabung yang lebih kecil sehingga reservoir terbawa sampel cukup hingga setara atau seimbang. Jari ditempatkan pada tabung yang lebih besar dan *bulb* dimasukkan pada tabung yang lebih kecil kemudian dihisap hingga sampel ke ujung *bulb*. Kemudian lepas jari dan *bulb*, sampel dibiarkan mengalir hingga seperti keadaan semula. Hitung waktu pada saat *bulb* dan jari dilepaskan hingga sampel seperti keadaan semula. Pengukuran dilakukan sebanyak dua kali dan dihitung sesuai Persamaan (6.2) berikut ini :

$$v = \frac{C_1 \cdot t_1 + C_2 \cdot t_2}{2} \quad \dots(6.2)$$

Keterangan :

v = Viskositas kinematik (mm^2/s)

C = Konstanta viskometer

T = Waktu Alir (detik)

6.3 Penentuan Bilangan Asam

6.3.1 Standarisasi Larutan KOH 0,1 N

Larutan asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0,1 N sebanyak 10 mL dimasukkan ke dalam erlenmeyer dan ditambahkan 3 tetes indikator PP. Kemudian dititrasi dengan KOH sampai timbul warna merah muda yang konstan. Perhitungan sesuai Persamaan (6.3) berikut ini:

$$N \text{ KOH} = \frac{N \text{ asam oksalat} \times V \text{ asam oksalat}}{V \text{ KOH}} \quad \dots(6.3)$$

6.1.1 Penentuan Bilangan Asam (SNI 01-3555-1998)

Bilangan asam di dalam bahan bakar dapat mempengaruhi korosinya terhadap mesin. Semakin tinggi bilangan asam maka

korosivitasnya semakin tinggi (Haryanto et al., 2015). Penentuan bilangan asam dapat dilakukan dengan cara sampel minyak sebanyak 0,5 g dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 ml, lalu ditambahkan 5 ml etanol 95% dan indikator PP sebanyak 3-5 tetes. Sampel kemudian dititrasi dengan larutan standar KOH 0,1 N hingga warna berubah menjadi merah muda tetap (tidak berubah selama 15 detik). Bilangan asam ditentukan dengan Persamaan (6.4):

$$\text{Bilangan asam (mgKOH/g)} = \frac{V \text{ (mL)} \times T \text{ (N)} \times 56,1 \text{ (mg/mmol)}}{m \text{ (g)}} \quad \dots(6.4)$$

Keterangan :

V = Volume titrasi (mL)

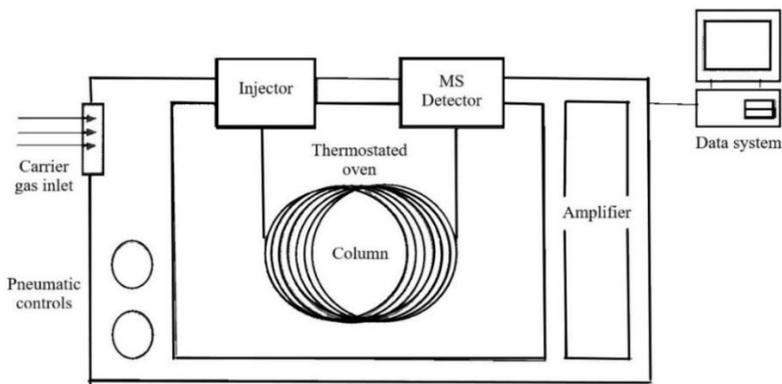
T = Normalitas KOH (N)

m = Berat Sampel (g)

56,1 = Bobot molekul KOH

6.2 Analisis Pirolisat dengan GC-MS

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) merupakan penggabungan antara alat kromatografi gas dan spektroskopi massa. Alat kromatografi gas memiliki fungsi untuk memisahkan komponen-komponen senyawa kimia yang dianalisis sedangkan spektroskopi massa digunakan untuk mendeteksi dari masing-masing senyawa kimia yang telah dipisahkan oleh alat kromatografi gas. Jadi pada prinsipnya alat spektroskopi massa berperan sebagai detektor. Setiap molekul yang dideteksi dengan spektroskopi massa dapat ditentukan pola fragmentasinya. Bagan GC-MS dapat dilihat pada Gambar 6.1 (Rubiyanto, 2017).



Gambar 6.1. Bagan GC-MS (Rubiyanto, 2017).

Sampah plastik yang sudah dipirolisis selanjutnya masing-masing dianalisa dengan menggunakan instrumen *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) untuk mengetahui komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. Penelitian yang dilakukan oleh Bajus & Hajekova (2010) menjelaskan bahwa gas yang dihasilkan dari proses dekomposisi sampah plastik jenis LDPE, HDPE, PS, PP, PVC, dan PET pada suhu 350-500°C mengandung CO, CO₂, dan berbagai senyawa aromatik. Senyawa aromatik tersebut meliputi benzena, toluena, xylene, etil benzena, dan stirena.

BAHAN ACUAN

- Bajus, M. & E. Hajekova. 2010. Thermal Cracking of The Model Seven Components Mixed Plastics Into Oils/Waxes. *Petroleum & Coal*. **52(3)**: 164-172.
- Haryanto, A., U. Silviana, S. Triyono, & S. Prabawa. 2015. Produksi Biodiesel dari Transesterifikasi Minyak Jelantah dengan Bantuan Gelombang Mikro: Pengaruh Intensitas Daya dan Waktu Reaksi terhadap Rendemen dan Karakteristik Biodiesel. *AGRITECH*. **35(2)**: 234-240.
- Rubiyanto, D. 2017. Metode Kromatografi: Prinsip Dasar, Praktikum & Pendekatan Pembelajaran Kromatografi. Deepublish, Yogyakarta.
- Sharma, M.C., N. Soni, & S. Bhatele. 2014. Production OF Alternative Fuel from Waste Engine Oil for 4-S Diesel Engine. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*. **4(4)**: 635-643.

LATIHAN SOAL

1. Apa yang dimaksud dengan densitas?
2. Apa yang dimaksud dengan viskositas?
3. Apa sajakah alat yang dapat digunakan dalam pengukuran viskositas?
4. Bagaimana cara uji viskositas kinematik menggunakan viskometer Ostwald?
5. Apa pengaruh bilangan asam terhadap bahan bakar cair?
6. Apa fungsi dari alat kromatografi gas dalam analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*?
7. Apa peran alat spektroskopi massa dalam analisis *Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*?

CAPAIAN PEMBELAJARAN BAB VII
(Pirolisis Limbah Plastik dari Lingkungan Kampus FMIPA
ULM dan Karakterisasinya sebagai Bahan Bakar Minyak)

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan memiliki capaian pembelajaran sebagai berikut:

Capaian Pembelajaran Sikap (CPS):

Mahasiswa menjadi lebih peduli terhadap masalah plastik yang mencemari lingkungan

Capaian Pembelajaran Pengetahuan (CPP):

Mahasiswa mampu mengetahui dan membandingkan kualitas produk hasil pirolisis limbah plastik dengan standar bahan bakar minyak

Capaian Pembelajaran Keterampilan Umum (CPKU):

Mahasiswa mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi yang memperhatikan dan menerapkan nilai humaniora yang sesuai dengan bidang keahliannya

Capaian Pembelajaran Keterampilan Khusus (CPKK):

Mahasiswa mampu melakukan evaluasi kualitas produk hasil pirolisis limbah plastik

BAB VII

PIROLISIS LIMBAH PLASTIK DARI LINGKUNGAN KAMPUS FMIPA ULM DAN KARAKTERISASINYA SEBAGAI BAHAN BAKAR MINYAK

7.1 Preparasi Bahan Baku dalam Proses Pirolisis

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini perlu dipreparasi agar hasil yang diperoleh cukup maksimal. Sampel plastik yang digunakan dalam penelitian ini adalah kresek, plastik es, gelas plastik dan sedotan. Sampel-sampel tersebut merupakan plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) dan PP (*Polypropylene*). Plastik yang termasuk jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) adalah kantong kresek dan berbagai macam plastik tipis lainnya (Landi & Arijanto, 2017; Mustakim, 2018), sedangkan yang termasuk plastik jenis PP (*Polypropylene*) adalah cup plastik (Landi & Arijanto, 2017; Sitepu *et al.*, 2018), dan sedotan (Maha, 2018).

Preparasi bahan baku dilakukan melalui beberapa tahapan antara lain; pencucian, pengeringan, dan pemotongan. Pencucian dilakukan agar diharapkan sampel terbebas dari kotoran karena sampel yang digunakan berasal dari sampah plastik. Pengeringan dilakukan untuk meminimalisir air dari hasil proses pencucian. Langkah ini diperlukan karena kadar air yang semakin tinggi akan menyebabkan waktu pirolisis yang diperlukan akan semakin lama, sehingga energi yang dibutuhkan semakin besar (Sitorus *et al.*, 2018). Pemotongan dilakukan untuk memperoleh sampel dengan bentuk yang relatif sama dan kecil untuk menyesuaikan dengan ukuran alat yang digunakan. Hal ini sesuai dengan yang disarankan oleh Sitorus *et al.*, (2018), yang menyatakan apabila besar ukuran bahan baku makin besar maka alat yang digunakan semakin besar.

Gambar 7.1 dan Gambar 7.2, berikut ini menampilkan visual sampah plastik sebelum dan sesudah dipreparasi.



Gambar 7.1. Sampah plastik sebelum dipreparasi (dokumen pribadi)



Gambar 7.2. Sampah plastik sesudah dipreparasi (dokumen pribadi)

7.2 Persen Hasil Pirolisis Sampah Plastik (Kresek, Plastik Es, Gelas Plastik, dan Sedotan)

Sampah plastik yang telah dipreparasi dipirolisis untuk memperoleh sampah plastik dalam bentuk cairan, atau disebut minyak plastik dengan cara mengubah fase padat menjadi cair dalam keadaan tanpa atau sedikit oksigen. Pirolisis ini dilakukan pada suhu 425°C. Sampah plastik yang digunakan adalah kresek, plastik es, gelas plastik, dan sedotan, yang mana setiap jenis sampah plastik dipirolisis sebanyak 300 gram dan diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.1.



Gambar 7.3. Produk hasil pirolisis: (1) Kresek; (2) Plastik es; (3) Gelas plastik; (4) Sedotan

Tabel 7.1. Hasil pirolisis total 300 gram per sampel

| No. | Sampel | Volume (mL) | Massa (gram) | Persen hasil (%) |
|-----|-----------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 1. | Kresek (LDPE) | 80 | 60,78 | 20,26 |
| 2. | Plastik Es (LDPE) | 123 | 94,49 | 31,50 |
| 3. | Gelas Plastik (PP) | 216 | 164,27 | 54,76 |
| 4. | Sedotan (PP) | 162 | 121,97 | 40,66 |

Tabel 7.1 menunjukkan hasil yang diperoleh dari proses pirolisis 4 jenis sampah plastik yang digunakan. Variasi jenis sampah plastik ini untuk mengetahui jumlah produk yang didapat antar setiap jenis sampel. Berdasarkan hasil yang diperoleh pada Tabel 7.1 menunjukkan bahwa jenis sampah yang memberikan persen hasil paling besar adalah gelas plastik, dengan persen hasil yang diperoleh sebesar 54,76%. Jenis sampah yang memberikan persen hasil paling rendah adalah plastik jenis kresek, yaitu sebesar 20,26%.

7.3 Karakterisasi Hasil Pirolisis

7.3.1 Berat Jenis

Pengukuran berat jenis dilakukan pada suhu 15°C sesuai dengan metode ASTM D4052/D1298. Pengukuran ini penting untuk dilakukan dalam suatu analisis bahan bakar minyak, untuk mengetahui kualitas berat jenis dari setiap sampel. Berat jenis hasil pirolisis sampah plastik perlu dibandingkan dengan standar berat jenis bahan bakar minyak seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.2.

Tabel 7.2. Berat jenis hasil pirolisis sampah plastik dan standar berat jenis bahan bakar minyak

| Sampel | Massa (gram) | Volume (mL) | Berat jenis 15°C (kg/m ³) | Standar berat jenis 15°C bahan bakar minyak (kg/m ³) | | |
|--------------------|--------------|-------------|---------------------------------------|--|--------------|----------|
| | | | | Bensin RON 98 | Minyak tanah | Solar 48 |
| Kresek (LDPE) | 8,12 | 10,25 | 792 | 715-770 | Maks. 835 | 815-870 |
| Plastik Es (LDPE) | 8,15 | | 795 | | | |
| Gelas Plastik (PP) | 7,91 | | 772 | | | |
| Sedotan (PP) | 7,94 | | 775 | | | |

Sumber: Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi No. 17.K/72/DJM/1999, No. 28.K/10/DJM.T/2016, No. 0177.K/10/DJM.T/2018.

Tabel 7.2 menunjukkan bahwa berat jenis dari hasil pirolisis sampah plastik LDPE sampel kresek dan plastik es sebesar 792 kg/m³ dan 795 kg/m³. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan hasil beberapa penelitian lainnya. Sebagai contoh, berat jenis dari sampah plastik yang diperoleh dari LDPE dalam penelitian yang dilakukan oleh Endang *et al.*, (2016) adalah sebesar 796 kg/m³ dan Mangesh *et al.*, (2019) sebesar 799 kg/m³. Berat jenis dari hasil pirolisis sampah plastik jenis PP sampel gelas plastik dan sedotan sebesar 772 kg/m³ dan 775 kg/m³. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan beberapa penelitian lainnya. Berat jenis minyak yang dihasilkan dari PP dalam penelitian Sitepu *et al.*, (2018) sebesar 773 kg/m³ dan Mangesh *et al.*, (2019) sebesar 771 kg/m³. Semakin tinggi densitas suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya (Juniarta *et al.*, 2017). Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada Tabel 7, berat jenis sampel pirolisat kresek sebesar 792 kg/m³ dengan massa 8,12 gram, plastik es sebesar 795 kg/m³ dengan massa 8,15 gram, gelas plastik sebesar 772

kg/m³ dengan massa 7,91 gram, dan sedotan sebesar 775 kg/m³ dengan massa 7,94 gram. Berdasarkan data yang diperoleh menunjukkan bahwa semua sampel yang diuji memenuhi standar dan mutu (spesifikasi) berat jenis bahan bakar minyak.

7.3.2 Viskositas Kinematik

Karakteristik viskositas suatu sampel merupakan hal yang perlu diketahui dalam suatu analisis bahan bakar cair. Uji ini dilakukan untuk mengetahui kekentalan dari suatu sampel yang digunakan. Pada penelitian ini viskositas kinematik diukur pada suhu 40°C sesuai dengan metode ASTM D445. Tabel 7.3, menunjukkan viskositas kinematik hasil pirolisis sampah plastik dan standar viskositas kinematik bahan bakar minyak.

Tabel 7.3. Viskositas kinematik hasil pirolisis sampah plastik dan standar viskositas kinematik bahan bakar minyak

| Sampel | Rata-rata waktu alir (s) | | Viskositas kinematik 40°C (mm ² /s atau cSt) | Standar viskositas kinematik 40°C bahan bakar minyak (mm ² /s atau cSt) | | |
|--------------------|--------------------------|----------------|---|--|--------------|-----------|
| | t ₁ | t ₂ | | Bensin | Minyak Tanah | Solar |
| Kresek (LDPE) | 5,72 | 13,02 | 3,91 | 1,30-2,40 | 1,40-3,00 | 2,00-4,50 |
| Plastik Es (LDPE) | 6,42 | 14,68 | 4,40 | | | |
| Gelas Plastik (PP) | 4,59 | 10,14 | 3,08 | | | |
| Sedotan (PP) | 4,05 | 8,79 | 2,69 | | | |

Sumber: EN 590; Petroli, 2000; ASTM Standar, 2008; Sharma *et al.*, 2014; SNI 8220:2017; Thahir *et al.*, 2019.

Tabel 7.3 menunjukkan hasil pengukuran viskositas yang diperoleh dari setiap sampel. Besar kecilnya harga viskositas suatu sampel menunjukkan besar kecilnya kekentalan suatu sampel tersebut. Sitepu *et al.*, (2018) dalam penelitiannya menyatakan viskositas dari tiap cairan berbeda karena tingkat kekentalan cairan yang berbeda-beda. Semakin tinggi nilai viskositasnya, maka cairan tersebut semakin kental. Berdasarkan hasil yang diperoleh, viskositas kinematik plastik jenis LDPE sampel kresek sebesar 3,91 cSt dan plastik es sebesar 4,40 cSt sedangkan viskositas kinematik plastik jenis PP sampel gelas plastik sebesar 3,08 cSt dan sedotan sebesar 2,69 cSt. Dapat dilihat bahwa viskositas kinematik minyak dari plastik LDPE lebih besar dibandingkan yang diperoleh dari PP. Hasil yang sama diperoleh oleh Mangesh *et al.*, (2019), dimana viskositas kinematik dari minyak LDPE dan PP yang mereka peroleh masing-masing adalah sebesar 4,98 cSt dan 1,72 cSt. Hal ini menunjukkan bahwa viskositas kinematik (kekentalan) minyak plastik jenis LDPE lebih besar dibanding minyak plastik jenis PP. Peningkatan viskositas kinematik dipengaruhi oleh besar perlawanannya untuk mengalir. Semakin besar perlawanannya untuk mengalir, semakin tinggi viskositasnya (Siskayanti & Kosim, 2017), sehingga waktu yang diperlukan untuk mengalir lebih lama. Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada Tabel 7.3, viskositas kinematik pirolisat kresek sebesar 3,91 cSt dengan waktu alir 5,72 s dan 13,02 s, plastik es sebesar 4,40 cSt dengan waktu alir 6,42 s dan 14,68 s, gelas plastik sebesar 3,08 cSt dengan waktu alir 4,59 s dan 10,14 s, dan sedotan sebesar 2,69 cSt dengan waktu alir 4,05 s dan 8,79 s. Nilai viskositas kinematik (kekentalan) sampel-sampel sampah plastik ini telah memenuhi standar bahan bakar minyak, dan sesuai dengan standar SNI 8220:2017 yaitu 2,00-4,50 mm²/s atau cSt.

7.3.3 Bilangan Asam

Bilangan asam memiliki peranan penting dalam kualitas bahan bakar cair. Bilangan asam yang tidak memenuhi standar dapat mempengaruhi aplikasi sebagai bahan bakar cair. Oleh karena itu, bilangan asam hasil pirolisis sampah plastik perlu dilihat kesesuaiannya terhadap standar bilangan asam bahan bakar minyak seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.4.

Tabel 7.4. Bilangan asam hasil pirolisis sampah plastik dan standar bilangan asam bahan bakar minyak

| Sampel | Bilangan asam (mgKOH/g) | Standar bilangan asam bahan bakar minyak (mgKOH/g) | | |
|--------------------|-------------------------|--|--------------|-----------------------|
| | | Bensin | Minyak tanah | Minyak solar 48 murni |
| Kresek (LDPE) | 1,90 | 0,75 | 0,94 | Maks. 0,50 |
| Plastik Es (LDPE) | 2,37 | | | |
| Gelas Plastik (PP) | 0,95 | | | |
| Sedotan (PP) | 1,42 | | | |

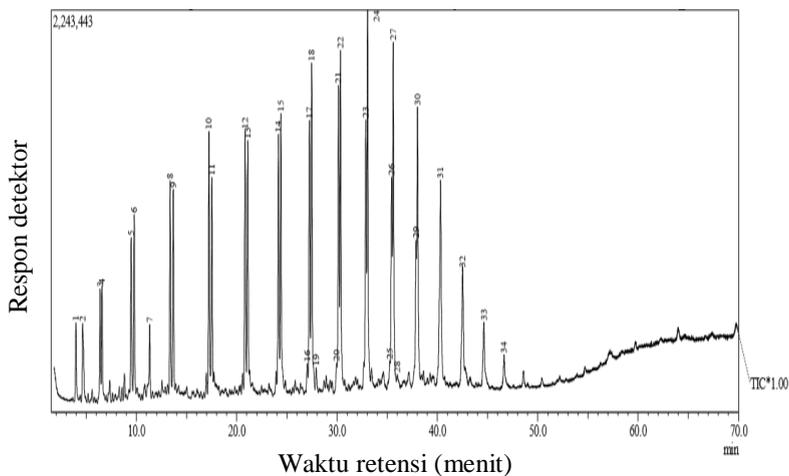
Sumber: SNI 8220:2017; Muryati *et al.*, 2018.

Tabel 7.4 menunjukkan hasil bilangan asam dari setiap sampel. Bilangan asam yang diperoleh dari setiap sampel memiliki nilai yang berbeda-beda. Harga bilangan asam dari 3 sampel, yaitu minyak dari kresek, plastik es, dan sedotan belum memenuhi standar bahan bakar minyak. Namun sampel gelas plastik telah memiliki nilai bilangan asam mendekati standar bahan bakar minyak. Berdasarkan hasil analisis GC-MS, kemungkinan penyebab bilangan asam belum memenuhi standar karena adanya senyawa alkohol. Tingginya nilai bilangan asam dapat memberikan dampak yang tidak diinginkan. Haryanto *et al.*, (2015) menyatakan bahwa bilangan asam di dalam bahan bakar dapat mempengaruhi sifat korosinya terhadap mesin. Semakin tinggi bilangan asam maka

korosivitasnya semakin tinggi. Namun demikian, Kalargaris *et al.*, (2017) menyatakan bahwa jika kondisi asam dari bahan bakar tidak dapat dikelola, bahan bakar masih dapat digunakan untuk sistem injeksi bahan bakar yang terbuat dari *stainless steel*.

7.4 Analisis Pirolisat dengan GC-MS

Sampel pirolisat dari setiap variasi jenis plastik masing-masing memiliki komposisi senyawa kimia yang berbeda-beda. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis GC-MS. Analisis GC-MS akan menghasilkan suatu kromatogram dimana senyawa dalam sampel dapat diidentifikasi berdasarkan puncak yang muncul dalam kromatogram. Pirolisat sampel variasi jenis plastik yang digunakan adalah kresek, plastik es, gelas plastik, dan sedotan. Hasil analisis GC-MS dapat dilihat pada Gambar 7.3, 7.4, 7.5, dan 7.6.



Gambar 7.3. Kromatogram pirolisat sampah plastik kresek (dokumen pribadi)

Gambar 7.3 menunjukkan kromatogram pirolisat sampah plastik kresek dengan rentang waktu retensi dari 3,974 hingga 46,635 menit menghasilkan 34 senyawa. Untuk mengetahui

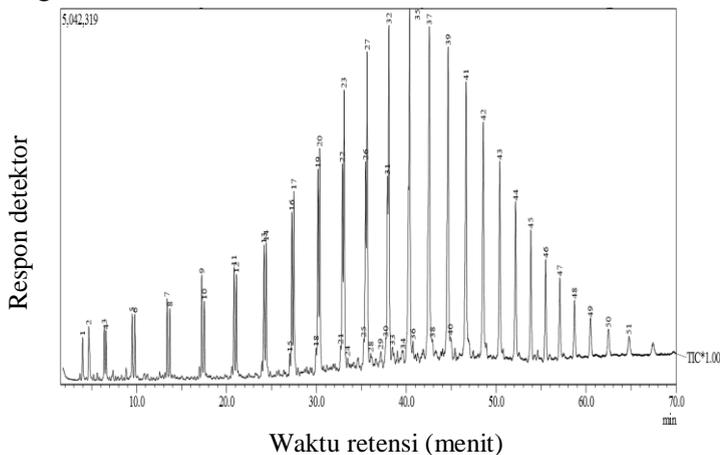
masing-masing senyawa dari 34 senyawa tersebut maka dilakukan identifikasi melalui analisis spektra massa (MS). Senyawa-senyawa yang terkandung dalam pirolisat kresek dikelompokkan menjadi 19 senyawa. Tabel 7.5, berikut ini menampilkan hasil analisis GC-MS terhadap sampel pirolisat dari kresek.

Tabel 7.5. Data senyawa kimia yang terkandung dalam sampel pirolisat kresek dari hasil analisis GC-MS

| No. | Peak | Senyawa Kimia (Rumus Molekul) | % Area | BM |
|-----|-----------------------|--|-----------|-----|
| 1 | 1 | butana (C ₄ H ₁₀) | 1,07 | 58 |
| 2 | 2 | 1-heksena (C ₆ H ₁₂) | 1,56 | 84 |
| 3 | 3 | 1-heptena (C ₇ H ₁₄) | 1,41 | 98 |
| 4 | 4 | heptana (C ₇ H ₁₆) | 1,49 | 100 |
| 5 | 5 | 1-oktena (C ₈ H ₁₆) | 2,18 | 112 |
| 6 | 6 | oktana (C ₈ H ₁₈) | 2,47 | 114 |
| 7 | 7 | 2-etil-1-butanol (C ₆ H ₁₄ O) | 1,04 | 102 |
| 8 | 8 | 1-nonena (C ₉ H ₁₈) | 3,04 | 126 |
| 9 | 9 | nonana (C ₉ H ₂₀) | 2,84 | 128 |
| 10 | 10, 12, 14 | 1-undekena (C ₁₁ H ₂₂) | 11,65 | 154 |
| 11 | 11 | dekana (C ₁₀ H ₂₂) | 3,04 | 142 |
| 12 | 13, 15, 18, 22, 24 | dodekana (C ₁₂ H ₂₆) | 25,74 | 170 |
| 13 | 16, 20, 25, 28, 29 | tidak teridentifikasi | 4,06 | - |
| 14 | 17 | 1-dodekena (C ₁₂ H ₂₄) | 4,38 | 168 |
| 15 | 19 | 7-metil-1-undekena (C ₁₂ H ₂₄) | 0,44 | 168 |
| 16 | 21, 23, 26 | 1-tetradekena (C ₁₄ H ₂₈) | 12,66 | 196 |
| 17 | 27, 30 | heksadekana (C ₁₆ H ₃₄) | 11,00 | 226 |
| 18 | 31, 32, 34 | pentakosana (C ₂₅ H ₅₂) | 8,47 | 352 |
| 19 | 33 | trikosana (C ₂₃ H ₄₈) | 1,46 | 324 |

Tabel 7.5 menampilkan hasil GC-MS pirolisat dari sampel kresek yang menunjukkan bahwa dalam pirolisat terkandung

sejumlah senyawa. Senyawa yang terkandung dalam pirolisat kresek ini berupa senyawa alkana, alkena, dan alkohol dengan rantai C_4 - C_{23} . Senyawa dengan persentase terbesar adalah dodekana, yaitu sebesar 25,74%. Terdapat 9 macam senyawa alkana dengan rantai C_4 - C_{23} yaitu butana (C_4H_{10}), heptana (C_7H_{16}), oktana (C_8H_{18}), nonana (C_9H_{20}), dekana ($C_{10}H_{22}$), dodekana ($C_{12}H_{26}$), heksadekana ($C_{16}H_{34}$), pentakosana ($C_{25}H_{52}$), dan trikosana ($C_{23}H_{48}$) dengan total persentase kandungan senyawa alkana sebesar 57,58%. Untuk senyawa alkena, terdapat 8 macam senyawa alkena dengan rantai C_6 - C_{14} , yaitu 1-heksena (C_6H_{12}), 1-heptena (C_7H_{14}), 1-oktena (C_8H_{16}), 1-nonena (C_9H_{18}), 1-undekena ($C_{11}H_{22}$), 1-dodekena ($C_{12}H_{24}$), 7-metil-1-undekena ($C_{12}H_{24}$), dan 1-tetradekena ($C_{14}H_{28}$) dengan total persentase kandungan senyawa alkena sebesar 37,32%. Hanya terdapat 1 macam senyawa alkohol dengan rantai C_6 yaitu 2-etil-1-butanol ($C_6H_{14}O$) sebesar 1,04%. Selain itu, juga terdapat senyawa tidak teridentifikasi dengan nilai $SI < 90$, sebanyak 4,06% dari sampel. Lutfia & Atun (2018) menyatakan bahwa berdasarkan basis data yang ada dalam pusat data GC-MS, puncak dengan $SI < 90$ belum dapat teridentifikasi dengan baik.



Gambar 7.4. Kromatogram pirolisat sampah plastik es (dokumen pribadi)

Gambar 7.4 menunjukkan kromatogram pirolisat sampah plastik es dengan rentang waktu retensi dari 3,978 hingga 64,755 menit menghasilkan 51 senyawa. Untuk mengetahui masing-masing senyawa dari 51 senyawa tersebut maka dilakukan identifikasi melalui analisis spektra massa (MS). Senyawa-senyawa yang terkandung dalam pirolisat plastik es dikelompokkan menjadi 24 senyawa. Berikut ke-24 senyawa tersebut ditunjukkan pada Tabel 7.6.

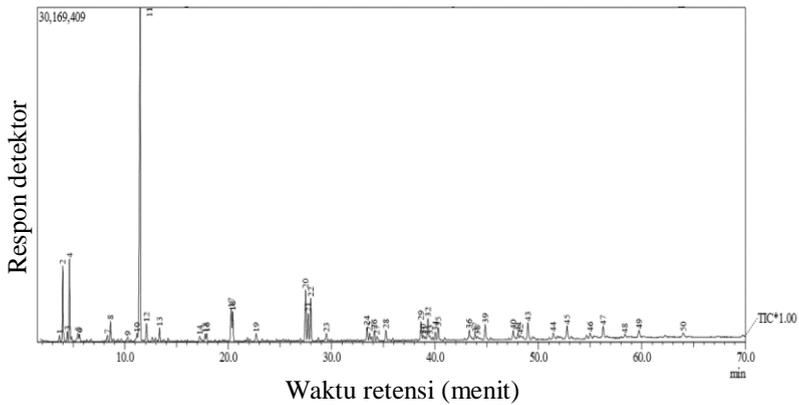
Tabel 7.6. Data senyawa kimia yang terkandung dalam sampel pirolisat plastik es dari hasil analisis GC-MS

| No. | Peak | Senyawa Kimia (Rumus Molekul) | % Area | BM |
|-----|---|---|-----------|-----|
| 1 | 1 | pentana (C ₅ H ₁₂) | 0,53 | 72 |
| 2 | 2 | 1-heksena (C ₆ H ₁₂) | 0,80 | 84 |
| 3 | 3 | 1-heptena (C ₇ H ₁₄) | 0,66 | 98 |
| 4 | 4 | heptana (C ₇ H ₁₆) | 0,58 | 100 |
| 5 | 5 | 1-oktana (C ₈ H ₁₆) | 0,78 | 112 |
| 6 | 6 | oktana (C ₈ H ₁₈) | 0,72 | 114 |
| 7 | 7 | 1-nonena (C ₉ H ₁₈) | 0,90 | 126 |
| 8 | 8 | nonana (C ₉ H ₂₀) | 0,80 | 128 |
| 9 | 9, 11, 13, 16 | 1-undekena (C ₁₁ H ₂₂) | 6,42 | 154 |
| 10 | 10 | dekana (C ₁₀ H ₂₂) | 0,96 | 142 |
| 11 | 12 | undekana (C ₁₁ H ₂₄) | 1,24 | 156 |
| 12 | 14, 17, 20, 23 | dodekana (C ₁₂ H ₂₆) | 11,74 | 170 |
| 13 | 15, 18, 21, 25, 28, 29, 30, 34, 38, 40 | tidak teridentifikasi | 3,75 | - |
| 14 | 19, 22, 24, 26, 31 | 1-tetradekena (C ₁₄ H ₂₈) | 11,63 | 196 |
| 15 | 27, 32 | heksadekana (C ₁₆ H ₃₄) | 9,46 | 226 |
| 16 | 33 | 1-heksadekana (C ₁₆ H ₃₂) | 0,42 | 224 |
| 17 | 35, 37 | eikosana (C ₂₀ H ₄₂) | 15,83 | 282 |
| 18 | 36 | 2-etil-1-dodekanol (C ₁₄ H ₃₀ O) | 0,40 | 214 |
| 19 | 39, 42 | trikosana (C ₂₃ H ₄₈) | 11,12 | 324 |
| 20 | 41, 43, 46, 49 | pentakosana (C ₂₅ H ₅₂) | 12,07 | 352 |

Tabel 7.6. Lanjutan...

| No. | Peak | Senyawa Kimia (Rumus Molekul) | % Area | BM |
|-----|--------|--|-----------|-----|
| 21 | 44, 50 | triakontana (C ₃₀ H ₆₂) | 3,59 | 422 |
| 22 | 45, 47 | nonadekana (C ₁₉ H ₄₀) | 3,93 | 268 |
| 23 | 48 | 11-(1- etilpropil)heneikosana (C ₂₆ H ₅₄) | 1,12 | 366 |
| 24 | 51 | pentatriakontana (C ₃₅ H ₇₂) | 0,55 | 493 |

Tabel 7.6 menunjukkan hasil GC-MS pirolisat dari sampel plastik es yang menunjukkan bahwa dalam pirolisat terkandung sejumlah senyawa. Senyawa yang terkandung dalam pirolisat plastik es ini berupa senyawa alkana, alkena, dan alkohol dengan rantai karbon C₅-C₃₅. Senyawa dengan persentase terbesar adalah eikosana, yaitu sebesar 15,83%. Terdapat 15 macam senyawa alkana dengan rantai C₅-C₃₅ yaitu pentana (C₅H₁₂), heptana (C₇H₁₆), oktana (C₈H₁₈), nonana (C₉H₂₀), dekana (C₁₀H₂₂), undekana (C₁₁H₂₄), dodekana (C₁₂H₂₆), heksadekana (C₁₆H₃₄), eikosana (C₂₀H₄₂), trikosana (C₂₃H₄₈), pentakosana (C₂₅H₅₂), triakontana (C₃₀H₆₂), nonadekana (C₁₉H₄₀), 11-(1-etilpropil)heneikosana (C₂₆H₅₄), dan pentatriakontana (C₃₅H₇₂) dengan total persentase kandungan senyawa alkana sebesar 74,24%. Untuk senyawa alkena, terdapat 7 macam senyawa alkena dengan rantai C₆-C₁₆, yaitu 1-heksena (C₆H₁₂), 1-heptena (C₇H₁₄), 1-oktena (C₈H₁₆), 1-nonena (C₉H₁₈), 1-undekena (C₁₁H₂₂), 1-tetradekena (C₁₄H₂₈), dan 1-heksadekana (C₁₆H₃₂) dengan total persentase kandungan senyawa alkena sebesar 21,61%. Hanya terdapat 1 macam senyawa alkohol dengan rantai C₁₄ yaitu 2-etil-1-dodekanol (C₁₄H₃₀O) sebesar 0,40%. Selain itu, juga terdapat senyawa tidak teridentifikasi dengan nilai SI < 90, sebanyak 3,75% dari sampel.



Gambar 7.5. Kromatogram pirolisis sampah gelas plastik (dokumen pribadi)

Gambar 7.5 menunjukkan kromatogram pirolisis sampah gelas plastik dengan rentang waktu retensi dari 3,672 hingga 63,993 menit menghasilkan 50 senyawa. Untuk mengetahui masing-masing senyawa dari 50 senyawa tersebut maka dilakukan identifikasi melalui analisis spektra massa (MS). Senyawa-senyawa yang terkandung dalam pirolisis gelas plastik dikelompokkan menjadi 19 senyawa. Berikut ke-19 senyawa tersebut ditunjukkan pada Tabel 7.7.

Tabel 7.7. Data senyawa kimia yang terkandung dalam sampel pirolisis gelas plastik dari hasil analisis GC-MS

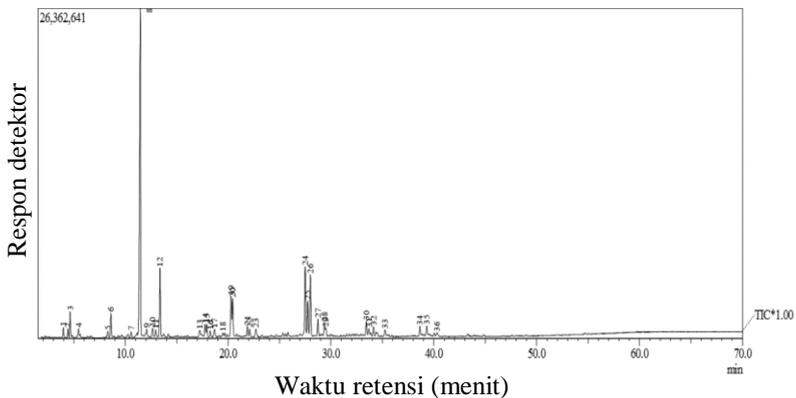
| No. | Peak | Senyawa Kimia (Rumus Molekul) | % Area | BM |
|-----|------|--|-----------|----|
| 1 | 1 | 2-metil-1-propena (C ₄ H ₈) | 0,49 | 56 |
| 2 | 2 | pentana (C ₅ H ₁₂) | 5,34 | 72 |
| 3 | 3 | 2-metilpentana (C ₆ H ₁₄) | 0,73 | 86 |
| 4 | 4 | 2-metil-1-pentena (C ₆ H ₁₂) | 5,79 | 84 |
| 5 | 5 | 2,4-dimetil-1-pentena (C ₇ H ₁₄) | 0,86 | 98 |
| 6 | 6 | 2,4-dimetil-1,4- pentadiena (C ₇ H ₁₂) | 0,60 | 96 |

Tabel 7.7. Lanjutan...

| No. | Peak | Senyawa Kimia (Rumus Molekul) | % Area | BM |
|-----|--|---|-----------|-----|
| 7 | 7, 10, 13, 19, 23, 28, 31, 33, 35, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 | tidak teridentifikasi | 20,17 | - |
| 8 | 8 | 4-metilheptana (C ₈ H ₁₈) | 1,69 | 114 |
| 9 | 9 | cis-1,1,3,4- tetrametilsiklopentana (C ₉ H ₁₈) | 0,47 | 126 |
| 10 | 11 | 4-metil-1-heptena (C ₈ H ₁₆) | 31,19 | 112 |
| 11 | 12 | 1,3,5-trimetilsikloheksana (C ₉ H ₁₈) | 1,63 | 126 |
| 12 | 14 | 2-metilundekana-2-tiol (C ₁₂ H ₂₆ S) | 0,63 | 202 |
| 13 | 15, 16 | 2,6-dimetilnonana (C ₁₁ H ₂₄) | 1,23 | 156 |
| 14 | 17 | 1-undekena (C ₁₁ H ₂₂) | 2,78 | 154 |
| 15 | 18 | 3,7-dimetil-1-oktanol (C ₁₀ H ₂₂ O) | 2,35 | 158 |
| 16 | 20, 21, 22, 24, 25, 26, 30, 34 | 7-metil-1-undekena (C ₁₂ H ₂₄) | 15,14 | 168 |
| 17 | 27 | 1-heksakosanol (C ₂₆ H ₅₄ O) | 0,62 | 382 |
| 18 | 29, 32 | 2-heksil-1-oktanol (C ₁₄ H ₃₀ O) | 4,25 | 214 |
| 19 | 36, 37, 40, 41 | 1-heptakosanol (C ₂₇ H ₅₆ O) | 4,06 | 396 |

Tabel 7.7 menunjukkan hasil GC-MS pirolisat dari sampel gelas plastik yang menunjukkan bahwa dalam pirolisat terkandung sejumlah senyawa. Senyawa yang terkandung dalam pirolisat gelas plastik ini berupa senyawa alkana, alkena, alkohol, dan tiol dengan rantai C₄-C₂₇. Senyawa dengan persentase terbesar adalah 4-metil-1-heptena, yaitu sebesar 31,19%. Terdapat 6 macam senyawa alkana dengan rantai karbon C₅-C₁₁ yaitu pentana (C₅H₁₂), 2-metilpentana (C₆H₁₄), 4-metilheptana (C₈H₁₈), cis-1,1,3,4-tetrametilsiklopentana (C₉H₁₈), 1,3,5-trimetilsikloheksana (C₉H₁₈), dan 2,6-dimetilnonana (C₁₁H₂₄) dengan total persentase

kandungan senyawa alkana sebesar 11,09%. Untuk senyawa alkana, terdapat 7 macam senyawa alkana dengan rantai C₄-C₁₂, yaitu 2-metil-1-propena (C₄H₈), 2-metil-1-pentena (C₆H₁₂), 2,4-dimetil-1-pentena (C₇H₁₄), 2,4-dimetil-1,4-pentadiena (C₇H₁₂), 4-metil-1-heptena (C₈H₁₆), 1-undekena (C₁₁H₂₂), dan 7-metil-1-undekena (C₁₂H₂₄) dengan total persentase kandungan senyawa alkana sebesar 56,85%. Terdapat 4 macam senyawa alkohol dengan rantai C₁₀-C₂₇ yaitu 3,7-dimetil-1-oktanol (C₁₀H₂₂O), 1-heksakosanol (C₂₆H₅₄O), 2-heksil-1-oktanol (C₁₄H₃₀O), dan 1-heptakosanol (C₂₇H₅₆O) dengan total kandungan sebesar 11,28%. Terdapat 1 senyawa tiol dengan rantai C₁₂ yaitu 2-metilundekana-2-tiol (C₁₂H₂₆S) sebesar 0,63%. Selain itu, juga terdapat senyawa tidak teridentifikasi dengan nilai SI < 90, sebanyak 20,17% dari sampel.



Gambar 7.6. Kromatogram pirolisat sampah plastik sedotan (dokumen pribadi)

Gambar 7.6 menunjukkan kromatogram pirolisat sampah plastik sedotan dengan rentang waktu retensi dari 3,976 hingga 40,319 menit menghasilkan 36 senyawa. Untuk mengetahui masing-masing senyawa dari 36 senyawa tersebut maka dilakukan identifikasi melalui analisis spektra massa (MS). Senyawa-senyawa

yang terkandung dalam pirolisat sedotan dikelompokkan menjadi 19 senyawa. Berikut ke-19 senyawa tersebut ditunjukkan pada Tabel 7.8.

Tabel 7.8. Data senyawa kimia yang terkandung dalam sampel pirolisat sedotan dari hasil analisis GC-MS

| No. | Peak | Senyawa Kimia (Rumus Molekul) | % Area | BM |
|-----|----------------------------------|---|-----------|-----|
| 1 | 1 | 2-metil-1-propanol (C ₄ H ₁₀ O) | 0,88 | 74 |
| 2 | 2 | 2-metilpentana (C ₆ H ₁₄) | 0,71 | 86 |
| 3 | 3 | 2-metil-1-pentena (C ₆ H ₁₂) | 2,23 | 84 |
| 4 | 4 | 2,4-dimetil-1-pentena (C ₇ H ₁₄) | 1,08 | 98 |
| 5 | 5, 12, 21, 22, 23, 29, 33, 36 | tidak teridentifikasi | 12,73 | - |
| 6 | 6 | 4-metilheptana (C ₈ H ₁₈) | 2,41 | 114 |
| 7 | 7 | 2,4-dimetilheptana (C ₉ H ₂₀) | 0,57 | 128 |
| 8 | 8 | 4-metil-1-heptena (C ₈ H ₁₆) | 35,83 | 112 |
| 9 | 9 | 1,3,5-trimetilsikloheksana (C ₉ H ₁₈) | 0,95 | 126 |
| 10 | 10, 11 | 3,3,5-trimetilsikloheksana (C ₉ H ₁₆) | 1,82 | 124 |
| 11 | 13, 17 | (E)-3-undekena (C ₁₁ H ₂₂) | 1,98 | 154 |
| 12 | 14 | 4-metildekana (C ₁₁ H ₂₄) | 1,38 | 156 |
| 13 | 15 | 2,6-dimetilnonana (C ₁₁ H ₂₄) | 1,22 | 156 |
| 14 | 16 | 2-etil-1-pentanol (C ₇ H ₁₆ O) | 0,65 | 116 |
| 15 | 18, 28 | 4,6,8-trimetil-1-nonena (C ₁₂ H ₂₄) | 1,98 | 168 |
| 16 | 19 | 1-undekena (C ₁₁ H ₂₂) | 4,29 | 154 |
| 17 | 20 | 3,7-dimetil-1-oktena (C ₁₀ H ₂₀) | 3,75 | 140 |
| 18 | 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32 | 7-metil-1-undekena (C ₁₂ H ₂₄) | 23,24 | 168 |
| 19 | 34, 35 | 2-heksil-1-oktanol (C ₁₄ H ₃₀ O) | 2,31 | 214 |

Tabel 7.8 menunjukkan hasil GC-MS pirolisat dari sampel sedotan yang menunjukkan bahwa dalam pirolisat terkandung sejumlah senyawa. Senyawa yang terkandung dalam pirolisat sedotan ini berupa senyawa alkana, alkena, dan alkohol dengan rantai C₄-C₁₄. Senyawa dengan persentase terbesar adalah 4-metil-

1-heptena, yaitu sebesar 35,83%. Terdapat 6 macam senyawa alkana dengan rantai C₆-C₁₁ yaitu 2-metilpentana (C₆H₁₄), 4-metilheptana (C₈H₁₈), 2,4-dimetilheptana (C₉H₂₀), 1,3,5-trimetilsikloheksana (C₉H₁₈), 4-metildekana (C₁₁H₂₄), dan 2,6-dimetilnonana (C₁₁H₂₄) dengan total persentase kandungan senyawa alkana sebesar 7,24%. Untuk senyawa alkena, terdapat 9 macam senyawa alkena dengan rantai C₆-C₁₂, yaitu 2-metil-1-pentena (C₆H₁₂), 2,4-dimetil-1-pentena (C₇H₁₄), 4-metil-1-heptena (C₈H₁₆), 3,3,5-trimetilsikloheksena (C₉H₁₆), (E)-3-undekena (C₁₁H₂₂), 4,6,8-trimetil-1-nonena (C₁₂H₂₄), 1-undekena (C₁₁H₂₂), 3,7-dimetil-1-oktana (C₁₀H₂₀), dan 7-metil-1-undekena (C₁₂H₂₄) dengan total persentase kandungan senyawa alkena sebesar 76,2%. Terdapat 3 senyawa alkohol dengan rantai C₄-C₁₄ yaitu 2-metil-1-propanol (C₄H₁₀O), 2-etil-1-pentanol (C₇H₁₆O), dan 2-heksil-1-oktanol (C₁₄H₃₀O) dengan total kandungan sebesar 3,84%. Selain itu, juga terdapat senyawa tidak teridentifikasi dengan nilai SI<90, sebanyak 12,73% dari sampel.

7.5 Senyawa Hidrokarbon Pirolisat Plastik

Analisis GC-MS dari ke-4 sampel sampah plastik menunjukkan hasil kandungan senyawa beserta persentase areanya. Senyawa utama yang terkandung dalam setiap sampel tersebut adalah senyawa alkana dan alkena seperti ditunjukkan pada Tabel 7.9. Besarnya persentase area hidrokarbon diketahui dari jumlah alkana dan alkena dari setiap sampel.

Tabel 7.9. Data senyawa kimia utama dengan persentase terbesar yang terkandung dalam sampel pirolisat plastik dari hasil analisis GC-MS

| Sampel | Total persentase area | | Senyawa | |
|--------------------|-----------------------|------------|------------------------|----------------------------|
| | Alkana (%) | Alkena (%) | Alkana (%) | Alkena (%) |
| Kresek (LDPE) | 57,58 | 37,32 | dodekana 25,74 | 1-tetradekena 12,66 |
| Plastik Es (LDPE) | 74,24 | 21,61 | eikosana 15,83 | 1-tetradekena 11,63 |
| Gelas Plastik (PP) | 11,09 | 56,85 | pentana 5,34 | 4-metil-1-heptena 31,19 |
| Sedotan (PP) | 7,24 | 76,20 | 4-metilheptana 2,41 | 4-metil-1-heptena 35,83 |

Tabel 7.9 menunjukkan kandungan senyawa terbesar antar senyawa yang terkandung dalam setiap sampel. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa sampah plastik jenis LDPE yakni kresek dan plastik es memiliki kandungan senyawa terbesar yang sama yaitu pada senyawa alkana, sedangkan sampah plastik jenis PP yakni gelas plastik dan sedotan memiliki kandungan senyawa terbesar pada senyawa alkena. Hasil ini serupa dengan yang dilaporkan oleh Yan *et al.*, (2015). Dalam penelitian mereka, kandungan senyawa terbesar dalam LDPE adalah alkana, dan dalam PP, kandungan terbesar adalah senyawa alkena. Yan *et al.*, (2015) menyatakan bahwa karena adanya gugus samping CH_3 dalam struktur PP, sejumlah besar senyawa dengan ikatan rangkap karbon ($\text{C}=\text{C}$) diperoleh dalam produk perengkahan PP, dan hasil hidrokarbon bercabang lebih banyak dalam jenis PP daripada LDPE. Berdasarkan fraksi-fraksi hidrokarbon yang terkandung dalam suatu sampel dapat dilihat

kemiripannya terhadap fraksi bahan bakar minyak seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.10.

Tabel 7.10. Persentase area sampel pirolisat plastik dari hasil analisis GC-MS terhadap fraksi bahan bakar minyak

| No. | Sampel | % Area Fraksi Hidrokarbon | | |
|-----|--------------------|---|---|--|
| | | Bensin (C ₅ -C ₉) | Minyak tanah (C ₁₀ -C ₁₃) | Solar (C ₁₄ -C ₂₀) |
| 1. | Kresek (LDPE) | 14,99 | 45,25 | 23,66 |
| 2. | Plastik Es (LDPE) | 5,77 | 20,36 | 41,27 |
| 3. | Gelas Plastik (PP) | 48,30 | 19,15 | 0 |
| 4. | Sedotan (PP) | 45,60 | 37,84 | 0 |

Sumber: Arayakul & Jitkarnka, 2013; Piyawongpinyoa & Jitkarnka, 2013; Abadi *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2014; Sajjad *et al.*, 2014; Hanafi *et al.*, 2015; Motawie *et al.*, 2015; Habibie *et al.*, 2018; Zeman *et al.*, 2019.

Tabel 7.10 menunjukkan bahwa sampel-sampel sampah plastik dengan persentase area tersebut memiliki kemiripan dengan fraksi bahan bakar minyak seperti bensin, minyak tanah, dan solar. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa hidrokarbon sampah plastik jenis LDPE dengan persentase area fraksi terbesar ada pada rentang karbon fraksi minyak tanah yaitu C₁₀-C₁₃ sebesar 45,25% pada sampel kresek. Amoloye *et al.*, (2013) dalam penelitiannya menyatakan bahwa pirolisis LDPE juga menghasilkan hidrokarbon terbesar pada fraksi minyak tanah. Selain itu, sampah plastik jenis LDPE juga memiliki persentase area fraksi terbesar pada rentang karbon fraksi solar yaitu C₁₄-C₂₀ sebesar 41,27% pada sampel plastik es. Sama halnya dengan penelitian Yan *et al.*, (2015) pirolisis LDPE juga menghasilkan fraksi terbesar pada fraksi solar. Sampah plastik jenis PP sampel gelas plastik dan sedotan memiliki persentase area fraksi terbesar pada rentang karbon fraksi bensin yaitu C₅-C₉ sebesar 48,30% dan 45,60%. Yan *et al.*, (2015) dalam penelitiannya pirolisis PP juga menghasilkan fraksi terbesar pada fraksi bensin.

Tabel 7.10 juga menunjukkan bahwa sampel pirolisat kresek dan plastik es memiliki rantai karbon yang lebih panjang yaitu C_{14} - C_{20} dengan persentase area 23,66% dan 41,27% dibanding dengan pirolisat gelas plastik dan sedotan yang lebih pendek yaitu C_{10} - C_{13} dengan persentase area 19,15% dan 37,84%. Sudradjat *et al.*, (2010) menyatakan bahwa semakin panjang rantai molekul, maka densitas akan semakin meningkat. Hasil ini sesuai dengan hasil berat jenis pirolisat plastik yang diperoleh (Tabel 7.2), yang mana berat jenis pirolisat kresek dan plastik es yaitu 792 kg/m^3 dan 795 kg/m^3 lebih besar dari gelas plastik dan sedotan yaitu 772 kg/m^3 dan 775 kg/m^3 . Selain itu, peningkatan viskositas kinematik juga dipengaruhi oleh fitur struktur seperti rantai molekul. Semakin panjang rantai karbon maka semakin tinggi nilai viskositas kinematik, namun dengan keberadaan ikatan rangkap akan menurunkan nilai viskositas kinematiknya (Knothe, 2005; Knothe & Steidley, 2011; Verduzco *et al.*, 2012; Wahyuni *et al.*, 2016). Hal ini sesuai dengan hasil viskositas kinematik pirolisat plastik yang diperoleh (Tabel 7.3), yang mana viskositas kinematik pirolisat kresek dan plastik es sebesar 3,91 cSt dan 4,40 cSt lebih besar dari gelas plastik dan sedotan sebesar 3,08 cSt dan 2,69 cSt. Namun, viskositas kinematik pada pirolisat sedotan lebih kecil dari pirolisat gelas plastik, karena adanya ikatan rangkap (senyawa alkena) pada pirolisat sedotan dengan persentase lebih besar yaitu 76,20% dibanding dengan gelas plastik yaitu 56,85% (Tabel 7.9). Adanya ikatan rangkap ini menurunkan nilai viskositas kinematiknya.

7.6 Potensi Sampah Plastik terhadap Bahan Bakar Minyak

Sampah plastik yang dianalisis dalam penelitian ini adalah plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) dan PP (*Polypropylene*). Plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) yakni sampel kresek dan plastik es sedangkan plastik jenis PP (*Polypropylene*) yakni gelas plastik dan sedotan. Plastik jenis LDPE

merupakan plastik jenis PE (Polyethylene). Berdasarkan hasil analisis bahwa sampah plastik jenis-jenis tersebut memiliki potensi sebagai bahan bakar minyak. Menurut *United Nations Environment Programme* (2009), plastik jenis *Polyethylene* (PE) dan *Polypropylene* (PP) dengan produk utama hidrokarbon cair ini diizinkan sebagai bahan baku bahan bakar minyak. Polimer plastik jenis *Polyethylene* (PE) dan *Polypropylene* (PP) terdiri dari karbon dan hidrogen ini merupakan bahan baku khas untuk produksi bahan bakar karena nilai panas tinggi dan gas buang yang bersih. Berdasarkan pengumpulan sampah plastik dalam sehari diperoleh jumlah berat bersih sampah plastik minimum 0,76 kg. Jika hasil pirolisis diperoleh minyak rata-rata dari keseluruhan sampel sebesar 145,25 mL dalam 300 gram maka perkiraan potensi minimum volume minyak hasil pirolisis yang diperoleh dalam sehari dan hari berikutnya ditunjukkan seperti pada Tabel 7.11.

Tabel 7.11. Perkiraan potensi minimum minyak hasil pirolisis sampah plastik

| Hari | Sampah plastik (kg) | Volume pirolisis (L) |
|--------------|---------------------|----------------------|
| Sehari (1) | 0,76 | 0,37 |
| Seminggu (5) | 3,81 | 1,85 |
| Sebulan (20) | 15,24 | 7,38 |

Tabel 7.11 menunjukkan perkiraan potensi minimum minyak hasil pirolisis sampah plastik yang dihasilkan dalam perkiraan waktu tertentu. Dapat dilihat bahwa perkiraan minyak hasil pirolisis sampah plastik yang dihasilkan dalam sehari sebanyak 0,37 L. Minyak yang dihasilkan selama 5 hari diperoleh perkiraan sebanyak 1,85 L. Dengan demikian, perkiraan potensi minimum minyak hasil pirolisis sampah plastik yang berasal dari Lingkungan Kampus FMIPA ULM Banjarbaru perkiraan dalam waktu 20 hari sebanyak 7,38 L.

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan maka dapat disimpulkan:

1. Sampah plastik jenis LDPE (kresek dan plastik es) dan PP (gelas plastik dan sedotan) telah dipirolisis dengan metode *thermal cracking* pada temperatur 425°C menghasilkan sampah plastik dalam bentuk cair dengan persen hasil (*yield*) kresek 20,26%, plastik es 31,50%, gelas plastik 54,76%, dan sedotan 40,66%.
2. Berat jenis dan viskositas kinematik pirolisat plastik pada penelitian ini berkisar antara 772-795 kg/m³ dan 2,69-4,40 cSt, memenuhi standar bahan bakar minyak.
3. Bilangan asam pirolisat plastik berkisar antara 0,95-2,37 mgKOH/g, secara umum belum memenuhi standar SNI 8220:2017 yang mensyaratkan bilangan asam bahan bakar maks. 0,50 mgKOH/g.
4. Senyawa kimia utama yang terkandung dalam sampel plastik adalah senyawa hidrokarbon berupa alkana dan alkena.
5. Potensi total sampah plastik sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar cair di Lingkungan Kampus FMIPA ULM Banjarbaru dalam waktu 20 hari adalah minimum 15,24 kg atau setara dengan 7,38 L bahan bakar minyak.

Bilangan asam pirolisat dalam penelitian ini secara umum belum memenuhi standar. Oleh karena itu, disarankan perlu adanya upaya lebih lanjut untuk menurunkan bilangan asam dari pirolisat. Penurunan bilangan asam dapat dilakukan dengan cara esterifikasi (Sudradjat *et al.*, 2010; Wahyuni *et al.*, 2016). Mawiney (2017) menyatakan terjadi penurunan bilangan asam setelah dilakukan proses esterifikasi.

BAHAN ACUAN

- Abadi, M.S.A., M.N. Haghghi, H. Yeganeh, & A.G. Mcdonald. 2014. Evaluation of Pyrolysis Process Parameters on Polypropylene Degradation Products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. **109**: 272–277.
- Amoloye T.O., S.A. Abdulkareem, & N.A. Eleburuike. 2013. Thermal Cracking of Low Density Polyethylene (LDPE) Waste into Useful Hydrocarbon Products. *CSJ*. **4(2)**: 72-75.
- Arayukul, P.S. & S. Jitkarnka. 2013. An Attempt on Using a Regenerated Commercial NiMoS/Al₂O₃ as a Catalyst for Waste Tyre Pyrolysis. *Chemical Engineering Transactions*. **35**: 1339-1344
- Endang, K., G. Mukhtar, A. Nego, & F.X.A. Sugiyana. 2016. *Pengolahan Sampah Plastik dengan Metoda Pirolysis menjadi Bahan Bakar Minyak*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”. UPN “Veteran”, Yogyakarta.
- Habibie, T.K., B.H. Susanto, & M.F. Carli. 2018. Effect of NiMo/Zeolite Catalyst Preparation Method for Bio Jet Fuel Synthesis. *E3S Web of Conferences*. **67**: 1-6.
- Hanafi, S.A., M.S. Elmelawy, H.A. El-Syed & N.H. Shalaby. 2015. Hydrocracking of Waste Cooking Oil as Renewable Fuel on NiW/SiO₂-Al₂O₃ Catalyst. *Journal of Advanced Catalysis Science and Technology*. **2**: 27-37.
- Haryanto, A., U. Silviana, S. Triyono, & S. Prabawa. 2015. Produksi Biodiesel dari Transesterifikasi Minyak Jelantah dengan Bantuan Gelombang Mikro: Pengaruh Intensitas Daya dan Waktu Reaksi terhadap Rendemen dan Karakteristik Biodiesel. *AGRITECH*. **35(2)**: 234-240.
- Juniarta, I.K., I.K.G. Wirawan, & A. Ghurri. 2017. Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Tekanan terhadap Sudut Semburan Minyak Jelantah. *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika*. **6(2)**: 215-219.

- Kalargaris, I., G. Tian, & S. Gu. 2017. Experimental Evaluation of a Diesel Engine Fuelled by Pyrolysis Oils Produced from Low-Density Polyethylene and Ethylene–Vinyl Acetate Plastics. *Fuel Processing Technology*. **161**: 125–131.
- Kang, S.H., J.H. Ryu, J.H. Kim, H.S. Kim, C.G. Lee, Y.J. Lee, & K.W. Jun. 2014. Fischer-Tropsch Synthesis of the Promoted Co/ZSM-5 Hybrid Catalysts for the Production of Gasoline Range Hydrocarbons. *Modern Research in Catalysis*. **3**: 99–106.
- Knothe, G. 2005. Dependence of Biodiesel Fuel Properties on the Structure of Fatty Acid Alkyl Esters. *Fuel Process Technol.* **86**: 1059–1070.
- Knothe, G., & K.R. Steidley. 2011. Kinematic Viscosity of Fatty Acid Methyl Esters: Prediction, Calculated Viscosity Contribution of Esters with Unavailable Data, and Carbon-Oxygen Equivalentss. *Fuel*. **90(11)**: 3217– 3224.
- Landi, U. & Ariyanto. 2017. Perancangan dan Uji Alat Pengolah Sampah Plastik Jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) menjadi Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Teknik Mesin*. **5(1)**: 1-8.
- Lutfia, N. & S. Atun. 2018. Isolasi dan Identifikasi Senyawa Metabolit Sekunder pada Fraksi Etil Asetat Daun Mindi. *Jurnal Penelitian Saintek*. **23(2)**: 95-102.
- Maha, K.M. 2018. *Pembuatan Bahan Bakar Minyak dari Reject Plastic Menggunakan Limbah Fly Ash Batubara sebagai Katalis*. Skripsi Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Mangesh, V.L., S. Padmanabhan, P. Tamizhdurai, & A. Ramesh. 2019. Experimental Investigation to Identify the Type of Waste Plastic Pyrolysis Oil Suitable for Conversion to Diesel Engine Fuel. *Journal of Cleaner Production*. 1-28.

- Mawiney, Y. 2017. Esterifikasi *Bio-Oil* dari Pirolisis CPO Parit dalam Rangka Mendapatkan *Biofuel*. Skripsi Program Studi Kimia, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru.
- Motawie, M., S.A. Hanafi, M.S. Elmelawy, S.M. Ahmed, N.A. Mansour, M.S.A. Darwish, & D.E. Abulyazied. 2015. Wax Co-Cracking Synergism of High Density Polyethylene to Alternative Fuels. *Egyptian Journal of Petroleum*. **24**: 353–361.
- Muryati, T.S., A. Sundaryono, & D. Handayani. 2018. Pembuatan Biofuel dari Limbah Cair PMKS dengan Katalis MoCo-HZ. *Jurnal Pendidikan dan Ilmu Kimia*. **2(2)**: 161-165.
- Mustakim, Z. 2018. *Analisis Bahan Bakar Cair Hasil Produk Pirolisis Jenis Plastik LDPE Dibanding dengan Bahan Bakar Premium terhadap Konsumsi Bahan Bakar Mesin Motor*. Artikel Skripsi. Universitas Nusantara PGRI Kediri, Kediri.
- Petroli, A. 2000. ASTM Product Specification Diesel Fuel ASTM Product Specification (Unleaded Gasoline for Italy). 1-4.
- Piyawongpinyoa, Y. & S. Jitkarnka. 2013. NiMo/HBETA as Catalysts with Dual Functions Beneficial to Waste Tyre Pyrolysis. *Chemical Engineering Transactions*. **35**: 847-852.
- Sajjad, H., H.H. Masjuki, M. Varman, M.A. Kalam, M.I. Arbab, S. Imtenan, & S.M.A. Rahman. 2014. Engine Combustion, Performance and Emission Characteristics of Gas to Liquid (GTL) Fuels and its Blends with Diesel and Bio-Diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **30**: 961–986.
- Sharma, B.K., B.R. Moser, K.E. Vermillion, K.M. Doll, & N. Rajagopalan. 2014. Production, Characterization and Fuel Properties of Alternative Diesel Fuel from Pyrolysis of Waste Plastic Grocery Bags. *Fuel Processing Technology*. **122**: 79-90.

- Siskayanti, R. & M.E. Kosim. 2017. Analisis Pengaruh Bahan Dasar terhadap Indeks Viskositas Pelumas Berbagai Kekentalan. *Jurnal Rekayasa Proses*. 11(2): 94-100.
- Sitepu, G.D.B., S.B. Daulay, & A. Rindang. 2018. Uji Berbagai Jenis Limbah Plastik pada Metode Pirolisis. *J. Rekayasa Pangan dan Pert.* 6(3): 562-566.
- Sitorus, C., L. Sukeksi, & A.J. Sidabutar. 2018. Ekstraksi Kalium dari Kulit Buah Kapuk (*Ceiba Petandra*). *Jurnal Teknik Kimia USU*. 7(2): 17-22.
- Sudradjat, R., E. Pawoko, D. Hendra, & D. Setiawan. 2010. Pembuatan Biodiesel dari Biji Kesambi (*Schleicbera Oleosa L.*). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 28(4): 358-379.
- Thahir, R., A. Altway, S.R. Juliastuti, & Susianto. 2019. Production of Liquid Fuel from Plastic Waste Using Integrated Pyrolysis Method with Refinery Distillation Bubble Cap Plate Column. *Energy Reports*. 5: 70-77.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2009. *Converting Waste Plastics into a Resource*. Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre, Osaka/Shiga.
- Verduzco L.F.R., J.E.R. Rodriguez, & A.J. Jacob. 2012. Predicting Cetane Number, Kinematic Viscosity, Density and Higher Heating Value of Biodiesel from its Fatty Acidmethyl Ester Composition. *J Fuel*. 91(1): 102-111.
- Wahyuni, S., E. Hambali, & B.T.H. Marbun. 2016. Esterifikasi Gliserol dan Asam Lemak Jenuh Sawit dengan Katalis MESA. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 26(3): 333-342.
- Yan, G., X. Jing, H. Wen, & S. Xiang. 2015. Thermal Cracking of Virgin and Waste Plastics of PP and LDPE in a Semibatch Reactor under Atmospheric Pressure. *Energy Fuels*. 29: 2289–2298.

Zeman, P., V. Honig., M. Kotek, J. Taborsky, M. Obergruber, J. Marik, V. Hartova, & M. Pechout. 2019. *Article: Hydrotreated Vegetable Oil as a Fuel from Waste Materials*. Creative Commons CC BY.

LATIHAN SOAL

1. Mengapa perlu dilakukan peraparasi bahan baku terlebih dahulu sebelum dilakukan pirolisis?
2. Bagaimana kualitas berat jenis hasil pirolisis sampah plastik kresek, plastik es, gelas plastik, dan sedotan?
3. Mengapa perlu dilakukan uji viskositas?
4. Apakah viskositas kinematik yang diperoleh dari hasil pirolisis sampah plastik kresek, plastik es, gelas plastik, dan sedotan telah memenuhi standar bahan bakar minyak?
5. Apa yang dimaksud dengan senyawa tidak teridentifikasi?
6. Apa sajakah senyawa utama yang terkandung dalam minyak hasil pirolisis sampah plastik kresek, plastik es, gelas plastik, dan sedotan?
7. Apa upaya yang dapat dilakukan jika kandungan bilangan asam melebihi standar yang telah ditetapkan?
8. Jelaskan kemiripan minyak pirolisis sampah plastik terhadap bahan bakar minyak berdasarkan rantai karbon dari setiap sampel yang diperoleh dari hasil analisis GC-MS!

LAMPIRAN

Silabi Teknologi Tepat Guna

Teknologi Tepat Guna (2 SKS)

Isi Mata Kuliah:

Pengantar teknologi tepat guna, teknologi pengolahan air, teknologi pembuatan karbon aktif, teknologi pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak, teknologi pengolahan asap cair, teknologi pengolahan kitin dan kitosan, teknologi pembuatan *virgin coconut oil*, teknologi pengolahan membran, teknologi pembuatan pupuk lepas lambat, teknologi pengolahan sabun herbal, teknologi pembuatan plastik *biodegradable*, teknologi pengolahan minyak atsiri, teknologi pengolahan serbuk herbal, teknologi pengolahan ampas kopi, teknologi pengolahan kompos.

Referensi:

1. Tanaka, N. 2015. *Teknologi Tepat Guna & Dunia Alternatif*. PT Bhuana Ilmu Populer, Jakarta.
2. Siregar, S.A. 2005. *Instalasi Pengolahan Air Limbah*. Kanisius, Yogyakarta.
3. Udyani, K., D.Y. Purwaningsih, R. Setiawan, & K. Yahya. 2019. Pembuatan Karbon Aktif dari Arang Bakau Menggunakan Gabungan Aktivasi Kimia dan Fisika dengan Microwave. *Jurnal IPTEK*. **23(1)**: 39- 46.
4. Trisunaryanti, W. 2018. *Dari Sampah Plastik menjadi Bensin Solar*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

5. Aisyah, I. 2019. *Multimanfaat Arang dan Asap Cair Limbah Biomasa*. Deepublish, Yogyakarta.
6. Agustina, S., I.M.D. Swantara, & I.N. Suartha. 2015. Isolasi Kitin, Karakterisasi, dan Sintesis Kitosan dari Kulit Udang. *Jurnal Kimia*. **9(2)**: 271-278.
7. Dwijayanti, K., E. Darmawanto, & K. Umam. 2018. Penerapan Pengolahan Kelapa menjadi Minyak Murni (VCO) Menggunakan Teknologi Pemanas Buatan. *JDC*. **2(1)**: 27-38.
8. Avisha, A.P., J.A. Pinem, & F. Akbar. 2019. Sintesis dan Karakterisasi Membran Silika (SiO₂) untuk Pengolahan Limbah Cair Hotel Pengaruh Variasi Komposisi. *JOM FTEKNIK*. **6(1)**: 1-6.
9. Indriyani, V., Y. Novianty, & A. Mirwan. 2017. Pembuatan Membran Ultrafiltrasi dari Polimer Selulosa Asetat dengan Metode Inversi Fasa. *Konversi*. **6(1)**: 11-16.
10. Apriani, R., T. Rohman, & K. Mustikasari. 2017. Sintesis dan Karakterisasi Membran Selulosa Asetat dari Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. **9(2)**: 91-98.
11. Saleh, M., Zulmanwardi, & O.S.R. Pasanda. 2018. Pembuatan Pupuk SRF (*Slow Release Fertilizer*) dengan Menggunakan Polimer Amilum. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*. 80-85.
12. Yerizam, M., I. Purnamasari, A. Hasan, & R. Junaidi. 2017. Modifikasi Urea menjadi Pupuk Lepas Lambat Menggunakan *Fly Ash* Batubara dan NaOH sebagai Binder. *Jurnal Teknik Kimia*. **4(23)**: 226-229.
13. Erlangga, B.D., Widodo, E.N. Dida, N.Y. Andriani, H. Sembiring, & Solihin. 2015. Studi Pendahuluan Pembuatan Pupuk Padatan *Slow Release* Menggunakan Air Lindi dan Mineral Silika Limbah Geotermal. *ISBN 978- 979-8636-30-1*.

14. Gusviputri, A., P.S.N. Meliana, Aylilianawati, & N. Indraswati. 2013. Pembuatan Sabun dengan Lidah Buaya (*Aloe Vera*) sebagai Antiseptik Alami. *WIDYA TEKNIK*. **12(1)**: 11-21.
15. Fatimah & Jamilah. 2018. Pembuatan Sabun Padat Madu dengan Penambahan Ekstrak Kunyit (*Curcuma domestica*). *Jurnal Teknologi Agro-Industri*. **5(2)**: 90-100.
16. Nisah, K. 2018. Pembuatan Plastik *Biodegradable* dari Polimer Alam. *Journal of Islamic Science and Technology*. **4(2)**: 65-75.
17. Sarma, C., P. Rasane, S. Kaur, J. Singh, J. Singh, Y. Gat, U. Garba, D. Kaur, & K. Dhawan. Antioxidant and antimicrobial potential of selected varieties of *Piper betle* L. (Betel leaf). *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*. **90(4)**: 3871-3878.
18. Sulaswatty, A., M.S. Rusli, H. Abimanyu, & S. Tursiloadi. *Quo Vadis Minyak Serai Wangi dan Turunannya*. LIPI Press, Jakarta.
19. Moehady, B.I. 2015. Serbuk Temulawak sebagai Bahan Baku Minuman. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*. **6**: 55-60.
20. Fernianti, D. 2013. Analisis Kemampuan Adsorpsi Karbon Aktif dari Ampas Kopi Bubuk yang Sudah Diseduh. *Berkala Teknik*. **3(2)**: 563-572.
21. Baryatik, P., A.D. Moelyaningrum, U. Asihita, W. Nurcahyaningasih, A. Baroroh, & H. Riskianto. 2019. Pemanfaatan Arang Aktif Ampas Kopi sebagai Adsorben Kadmium pada Air Sumur. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*. **2(1)**: 11-19.
22. Santoso, H.B. 1998. *Teknologi Tepat Guna: Pupuk Kompos*. Kanisius, Yogyakarta.

GLOSARIUM

A

- Abiotik : Tidak memiliki ciri hidup; tidak hidup
- Aditif : Zat yang ditambahkan pada suatu produk
- Adsorpsi : Penjerapan
- Agregat : Material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah dan kerak tungku besi, yang dipakai secara bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton semen hidraulik atau adukan.
- Akuatik : Segala kegiatan yang berhubungan dengan air
- Alifatik : Senyawa yang memiliki rantai terbuka
- Alkana : Sebuah rantai karbon panjang dengan ikatan-ikatan tunggal.
- AMU : *Atomic Mass Unit*
- Aromatik : Senyawa hidrokarbon dengan ikatan tunggal dan ikatan rangkap diantara atom-atom karbonnya.
- ASTM : *American Standard Testing and Material*
- Atmosfer : Lapisan udara yang menyelubungi bumi sampai ketinggian 300 km (terutama terdiri atas campuran berbagai gas, yaitu nitrogen, oksigen, argon, dan sejumlah kecil gas lain);

B

- Biodegradasi : Proses dimana bahan organik yang dirobuhkan oleh enzim dihasilkan oleh organisme hidup
- Biotik : Makhluk hidup (tumbuhan, hewan, manusia), baik yang mikro maupun yang makro serta prosesnya

C

Char : Arang

D

Dekomposisi : Proses perubahan menjadi bentuk yang lebih sederhana; penguraian

Derajat polimerisasi : Jumlah monomer yang terlibat dalam pembentukan rantai

E

Ekosistem : Suatu sistem ekologi yang terbentuk oleh hubungan timbal balik tak terpisahkan antara makhluk hidup dengan lingkungannya

Energi aktivasi : Energi minimum yang dibutuhkan agar reaksi kimia tertentu dapat terjadi

Esterifikasi : Reaksi pengubahan dari suatu asam karboksilat dan alkohol menjadi suatu ester dengan menggunakan katalis asam.

Extruder : Sebuah mesin yang dibuat khusus untuk mencetak berbagai macam bentuk kebutuhan manusia, secara global, cara kerja dari mesin *extruder* ini hampir sama dengan mesin injection molding.

G

Gaya van der Waals : Jumlah gaya tarik menarik atau tolak menolak antar molekul (atau antar bagian dalam molekul yang sama).

GC-FID : *Gas Chromatography - Flame Ionization Detector*

Globalisasi : Proses masuknya ke ruang lingkup dunia

H

Hopper : Komponen yang terdapat pada mesin pencetak pelet

Hydrocracking : Suatu proses yang mengkonversi umpan menjadi produk yang lebih ringan dengan bantuan katalis dan gas hidrogen

I

Insinerator : Tungku perapian atau pembakaran

Invertebrata : Binatang yang tidak ber-tulang punggung, termasuk ameba, cacing, lalat

K

Kondensasi : Perubahan uap air atau benda gas menjadi benda cair pada suhu udara di bawah titik embun

Kondensat : Hasil penyulingan berupa cairan

Kondensor : Peralatan yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air

Konduktivitas termal : Kemampuan yang dimiliki suatu benda dalam memindahkan kalor melalui benda tersebut

Kontaminasi : Pengotoran; pencemaran (khususnya karena termasuk unsur luar)

M

Manufaktur : Suatu cabang industri yang mengaplikasikan mesin, peralatan dan tenaga kerja dan suatu medium proses untuk mengubah bahan mentah menjadi barang jadi yang memiliki nilai jual

Modifikasi : Perubahan

Monomer : Sebuah atom atau molekul kecil yang dapat mengikat secara kimia dengan monomer lain untuk membentuk Polimer (berarti banyak bagian).

O

Oligomer : Bahan polimer yang mengandung beberapa unit berulang

P

Pelarut superkritis : Zat yang berada pada suhu dan tekanan di atas titik kritis termodinamika.

Petrokimia : Bahan kimia yang diambil atau didapat dari petroleum atau gas alam

Photooxidation : Degradasi permukaan polimer dengan adanya oksigen atau ozon

Pirolisat : Hasil pirolisis

Polusi : Pengotoran (tentang air, udara, dan sebagainya); pencemaran

Polutan : Bahan yang mengakibatkan polusi

Predator : Binatang yang hidupnya dari memangsa binatang lain; hewan pemangsa hewan lain

Proton : Salah satu jenis partikel pembentuk struktur atom yang terdapat dalam semua inti atom positif satu satuan

R

Reaktivitas : Sifat suatu unsur yang mudah bereaksi, mudah menangkap dan melepaskan elektron

Residu : Ampas; endapan (tentang minyak tanah, gula, dan sebagainya)

Rutting : Penurunan yang terjadi pada perkerasan aspal yang terletak pada bagian yang sering dilewati oleh roda kendaraan.

S

Senyawa Siklik : Senyawa yang memiliki rantai tertutup

Shredder atau *chipper* : Mesin penghancur

SI : *Similarity* Index

SNI : Standar Nasional Indonesia

Sortir : Memilih (yang diperlukan dan mengeluarkan yang tidak diperlukan dan sebagainya); memilih-milih; memilah (barang dan sebagainya)

Spesimen : Bagian dari kelompok atau bagian dari keseluruhan

Substitusi : Penggantian

T

Termal : Berkaitan dengan panas

TPH : Total Petroleum Hidrokarbon

V

Vertebrata : Binatang yang bertulang belakang (seperti binatang menyusui dan burung)

Volatil : Mudah menguap

W

Waktu retensi : Waktu yang dibutuhkan oleh senyawa untuk bergerak melalui kolom menuju detektor disebut sebagai waktu retensi

INDEKS

A

abiotik, 21
aditif, 21
agregat, 35, 38
akuatik, 20
alifatik, 42, 54
alkana, 100, 102, 105, 107, 108,
109, 113
AMU, 4, 124
aromatik, 54, 69, 71, 86
ASTM, 93, 95, 96, 116, 124
atmosfer, 20, 25, 29, 59, 67, 74

B

biodegradasi, 9, 20, 21
biotik, 20, 21

C

char, 50
chipper, 33, 127

D

dekomposisi, 25, 39, 46, 67, 68, 69,
71, 86
dimodifikasi, 4, 53
disortir, 33

E

ekosistem, 20, 21
energi aktivasi, 76
esterifikasi, 113
extruder, 33, 125

G

gaya Van der Waals, 73
GC-FID, x, 58, 59, 125
globalisasi, 19

H

hopper, 33
hydrocracking, x, 56, 57

I

insinerator, 20
invertebrata, 24

K

Kelarutan, vi
kondensasi, 9
kondensat, 50
kondensor, 71
konduktivitas termal, 68

M

manufaktur, 34
monomer, 3, 4, 5, 8, 38, 39, 46, 71,
124, 126

O

Oksida, v
oligomer, 38, 39, 70

P

pelarut superkritis, 40

petrokimia, 8, 42
photooxidation, 20
pirolisat, viii, ix, xi, 94, 96, 98, 99,
100, 101, 102, 103, 104, 105,
106, 107, 108, 109, 110, 112,
113
polusi, iv, 20, 22, 23, 26, 36, 127
polutan, 26, 29
predator, 25
proton, 69

R

reaktivitas, 75, 76
Rendemen, vi
residu, 52, 53, 56
rutting, 38

S

shredder, 33
SI, 100, 103, 105, 108, 127
siklik, 69

SNI, vii, 36, 84, 96, 97, 113, 127
spesimen, 36
substitusi, 35

T

terkondensasi, 43, 53, 71
terkontaminasi, 21
termal, 4, 6, 13, 20, 51, 53, 67, 68,
69, 71, 73, 75, 76, 80, 126
TPH, x, 58, 59, 128

V

vertebrata, 24
Viskositas, vi
volatil, 71

W

waktu retensi, 53, 99, 101, 103,
106, 128

TENTANG PENULIS



Prof. Dr. Abdullah, S.Si., M.Si.

Lahir di Banjarmasin pada tanggal 7 Agustus 1968. Menamatkan pendidikan dari Sekolah Dasar hingga Perguruan Tinggi di kota Jogjakarta. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 (1987-1993). Pendidikan S2 (1996-1999). Penulis meraih gelar Doktor pada tahun 2010-2014 di Pasca Sarjana Ilmu Kimia FMIPA UGM Jogjakarta dengan predikat cumlaude. Penulis juga telah meraih gelar Guru Besar pada Tanggal 1 Maret 2018.

Penulis kini bekerja sebagai Dosen pada bidang Ilmu Kimia di Universitas Lambung Mangkurat mulai tahun 1994 sampai sekarang. Selain mengampu pada mata kuliah Kimia Bahan Bakar Hayati, penulis juga mengampu pada beberapa mata kuliah lainnya seperti Termodinamika Kimia (KF I), Keseimbangan Kimia dan Fasa (KF II), Kinetika Kimia, dan Kimia Polimer. Selain mengajar, saat ini penulis juga aktif melakukan penelitian dengan tema Energi Terbarukan.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan *cetane improver* dari minyak jarak pagar (*Jathropa curcas oil*) dan uji kinerjanya pada mesin diesel.
2. Pembuatan *cetane improver* berbahan baku minyak jarak kastor (*Ricinus communis oil*).
3. Pirolisis minyak sawit untuk mendapatkan *biofuel*.
4. Pembuatan *cetane improver* berbahan baku *bio-oil*.

Selain itu, penulis juga aktif menulis dalam beberapa jurnal ilmiah seperti:

1. Production of cetane improver from *Jathropa curcas* oil. Indonesian Journal of Chemistry. 2010. Vol. 10, No. 3.
2. Sintesis *cetane improver* dari biodiesel minyak jarak pagar dan pengujiannya pada mesin diesel. Jurnal Sains dan Terapan Kimia. Vol. 6, No. 1.
3. Kinetics study on nitration of methyl ricinoleate. Indonesian Journal of Chemistry. 2012. Vol. 12, No. 2.
4. The optimum reaction time, activation energy, and frequency factor of methyl ricinoleate nitration. Indonesian Journal of Chemistry. 2013. Vol. 13, No. 1.
5. Purification of methyl ricinoleate on producing of cetane improver. Journal of Physics Conference Series. 2016. ISSN: 17426588 (Prosiding).
6. Proses degumming dan netralisasi asam lemak bebas *crude palm oil* (CPO) pada pembuatan biodiesel. Seminar Nasional Industri Kimia dan Sumber Daya Alam. 2016. ISSN: 978-70195-1-5 (Prosiding).
7. Conversion of palm oil sludge to biodiesel using alum and KOH as catalysts. Sustainable Environment Research. 2017. ISSN: 24682039,10227636.

Penulis juga telah mempunyai paten, seperti:

1. Pembuatan *cetane improver* dari minyak jarak pagar (*Jathropa Curcas oil*). 21 Oktober 2016. No. Paten: IDP000043099.



Utami Irawati, S.Si., M.ES., PhD.

Lahir di Banjarmasin pada tanggal 14 Februari 1981. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di MIPA Kimia Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia (Agustus 1999-Februari 2004). Pendidikan S2 di Master of Environment & Sustainability, Monash University (January 2008-July 2009, beasiswa Australian Partnership Award). Pendidikan S3 di Div. of Environmental Engineering, School of Civil Engineering, Purdue University (August 2013-August 2018, beasiswa Fulbright).

Penulis kini bekerja sebagai Dosen pada bidang Ilmu Kimia di Universitas Lambung Mangkurat. Penulis mengampu beberapa mata kuliah seperti Kimia Lingkungan, Limbah Industri dan Pengelolaannya, Dasar AMDAL, Pengenalan Lingkungan Lahan Basah, dan Kimia Tanah.



Nurul Qomariah, S.Si. Lahir di Pundu pada tanggal 16 Mei 1997. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SDN 1 Pundu (2003-2009), Sekolah Menengah Pertama di SMPN 2 Cempaga (2009-2012) dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Cempaga Hulu (2012-2015). Penulis melanjutkan Pendidikan S1 di Program Studi Kimia FMIPA ULM pada tahun 2015 dan selesai pada Januari

2020.

Penulis selama kuliah pernah aktif organisasi di *Science Goes to Opera* (SGO) sebagai anggota Divisi Sastra periode 2016 dan Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMAMIA) sebagai anggota Divisi Dana dan Wirausaha Mahasiswa (DWM) periode 2018. Ia juga pernah menjadi Asisten praktikum kimia dasar I untuk prodi Fisika. Melaksanakan Kerja Praktik di bagian Identifikasi Reskrimum Polda Kalsel (2018) dan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Dukuh Rejo, Tanah Bumbu (2018).



Nor Ain, S.Si dilahirkan di kota Barabai pada tanggal 11 Oktober 1994. Menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar (2001-2006), Sekolah Menengah Pertama (2007-2009), Sekolah Menengah Atas (2010-2012), dan pendidikan S-1 Kimia FMIPA ULM (2013-2019).

Penulis selama kuliah pernah mengikuti Latihan Kepemimpinan dan Manajemen Mahasiswa di Pelaihari (2014), mengikuti Konferensi Mahasiswa Muslim Kalimantan (2015), Kongres Mahasiswi Islam untuk Peradaban (2015 & 2016), koordinator divisi Pendidikan dan Pelatihan Angkatan Muda Al-Baytar (2015-2016), Kuliah Kerja Nyata Revolusi Mental di desa Tamban Muara Baru (2016), Asisten praktikum untuk prodi Kimia, Biologi, Fisika, Farmasi, Anfarma dan Teknik Lingkungan dan sebagai Presenter pada Seminar Nasional Fisika dan Terapannya (2018).

Demikian sekilas tentang penulis dalam buku ini. Kritik dan saran yang bersifat membangun demi baiknya buku ini sangat dinantikan dan dapat dialamatkan ke abdullahunlam@gmail.com. Terima kasih. Salam.

**BUKU AJAR
TEKNOLOGI TEPAT GUNA
MENGOLAH SAMPAH PASTIK MENJADI BAHAN
BAKAR MINYAK**

ISBN 978-623-7533-24-5



9 786237 533245