TESIS – SK185401

PENINGKATAN HASIL DAN KUALITAS BAHAN BAKAR CAIR FRAKSI GASOLIN MELALUI KO-PERENGKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK POLISTIRENA DENGAN BIODIESEL MINYAK JELANTAH DAN BIODIESEL MINYAK KEMIRI (*Aleurites moluccana*)

ARIFAH NURFITRIYAH
NRP 01211850010011

Dosen Pembimbing
Dr. Hendro Juwono, M.Si.
Dr. Yuly Kusumawati, M.Si.

Departemen Kimia
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

THESIS – SK185401

IMPROVEMENT OF YIELD AND QUALITY OF LIQUID FUEL ON GASOLINE FRACTION USING CATALYTIC CO-CRACKING OF POLYSTYRENE PLASTIC WASTE WITH USED COOKING OIL BIODIESEL AND CANDLENUT OIL *(Aleurites moluccana)* BIODIESEL

ARIFAH NURFITRIYAH
NRP 01211850010011

Supervisor
Dr. Hendro Juwono, M.Si.
Dr. Yuly Kusumawati, M.Si.

Department of Chemistry
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh

ARIFAH NURFITRIYAH
NRP 01211850010011

Tanggal Ujian: 19 Agustus 2020
Periode Wisuda: September 2020

Disetujui oleh
Pembimbing

1. Dr. Hendro Juwono, M.Si.
   NIP: 19610606 198803 1 001 ……

2. Dr. Yuly Kusumawati, M.Si.
   NIP: 19810128 200812 2 003 ……

Penguji

1. Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D.
   NIP: 19710425 199412 2 001 ……

2. Ratna Ediati, M.S., Ph.D.
   NIP: 19600622 198603 2 002 ……

3. Prof. Dr. Taslim Ersam, MS.
   NIP: 19520816 197903 1 004 ……

Kepala Departemen Kimia
Fakultas Sains dan Analitika Data

Prof. Dr. rer.nat. Fredy Kurniawan, S.Si, M.Si.
NIP: 19740428 199802 1 001

PENINGKATAN HASIL DAN KUALITAS BAHAN BAKAR CAIR FRAKSI GASOLIN MELALUI KO-PERENGKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK POLISTIRENA DENGAN BIODIESEL MINYAK JELANTAH DAN BIODIESEL MINYAK KEMIRI (*Aleurites moluccana*)

Nama Mahasiswa : Arifah Nurfitriyah
NRP : 01211850010011
Pembimbing : Dr. Hendro Juwono, M.Si.
Dr. Yuly Kusuma, M.Si.

ABSTRAK

Masalah utama dalam perengkahan katalitik biomassa adalah rendahnya hasil bahan bakar cair (BBC) yang dihasilkan akibat rendahnya rasio H/C_{eff} biomassa Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik polistirena (PS) yang merupakan material kaya hidrogen dengan rasio H/C_{eff} lebih tinggi dapat meningkatkan hasil dan kualitas bahan bakar cair. Rasio limbah plastik:biomassa menjadi salah satu parameter penting yang dapat mempengaruhi efek sinergis dalam proses ko-perengkahan katalitik. Akan tetapi, terdapat perbedaan hasil penelitian sebelumnya mengenai pengaruh rasio limbah plastik: biomassa terhadap hasil bahan bakar cair yang bergantung pada jenis biomassa yang digunakan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan proses ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel kemiri (*Aleurites moluccana*) dan biodiesel jelantah menggunakan katalis Al-MCM-41/keramik pada suhu 300°C untuk mempelajari pengaruh rasio bahan baku PS:biomassa (1:1, 4:3, 2:1) serta jenis biomassa terhadap hasil dan kualitas BBC yang dihasilkan. Produk BBC hasil ko-perengkahan katalitik dianalisis dengan GC-MS untuk mengetahui komponen fraksi hidrokarbon penyusunnya dan karakteristik sifat fisiknya dibandingkan dengan standar bahan bakar bensin berdasarkan SNI 3506:2017. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hasil BBC meningkat sebagai fungsi penambahan rasio bahan baku. Perengkahan katalitik PS:BMJ menghasilkan BBC berturut-turut 64,6%, 71,6%, dan 80,4% untuk kenaikan rasio bahan baku 1:1, 4:3, dan 2:1. Sedangkan pada perengkahan PS:BMK sebesar 45,4%, 52,0%, dan 68,2%. Pengayaan fraksi hidrokarbonn gasolin ($C_7 – C_{12}$) dicapai pada rasio bahan baku optimum 1:1. Selain itu, pengujian karakteristik sifat fisik menunjukkan bahwa secara keseluruhan, BBC yang dihasilkan telah memenuhi SNI 3506:2017. Perengkahan katalitik PS:BMK menghasilkan BBC dengan nilai kalor dan angka oktan yang lebih tinggi, yakni pada kisaran 16.663 – 27.028 kkal/kg dan RON 97,8 – 100,5, dibandingkan perengkahan katalitik PS:BMJ.

Kata Kunci: Biodiesel Minyak Jelantah, Biodiesel Minyak Kemiri (*Aleurites moluccana*), Ko-Perengkahan Katalitik, Limbah Plastik Polistirena.

IMPROVEMENT OF YIELD AND QUALITY OF LIQUID FUEL ON GASOLINE FRACTION USING CATALYTIC CO-CRACKING OF POLYSTYRENE PLASTIC WASTE WITH USED COOKING OIL BIODIESEL AND CANDLENUT OIL (*Aleurites moluccana*) BIODIESEL

Student Name	: Arifah Nurfitriyah
Student Identity Number	: 01211850010011
Supervisor	: Dr. Hendro Juwono, M.Si.
	Dr. Yuly Kusumawati, M.Si

ABSTRACT

The main problem in biomass catalytic cracking is the low yield of liquid fuel resulting from the low H/C_{eff} ratio of biomass. Some previous studies have shown that the addition of polystyrene plastic waste (PS) which is a hydrogen-rich material with a higher H/C_{eff} ratio can increase the yield and quality of produced liquid fuel. The ratio of plastic waste:biomass is one of the most important parameters that can influence the synergistic effect in the catalytic co-cracking process. However, there are differences in the results of previous studies regarding the effect of the ratio of plastic waste to biomass toward liquid fuel yields which depend on the type of biomass used. Therefore, in this research a catalytic co-cracking process of polystyrene waste with candlenut biodiesel (Aleurites moluccana) and waste cooking biodiesel using Al-MCM-41/ceramic catalyst are conducted at 300°C to study the effect of PS: biomass feedstock ratio (1 : 1, 4: 3, 2: 1) and the type of biomass to the yield and quality of liquid fuel produced. Liquid fuel products resulting from catalytic co-cracking were analyzed by GC-MS to find out the components of the hydrocarbon fraction and their physical characteristics are compared to the gasoline fuel standard based on SNI 3506: 2017. The results of this study indicate that yield of liquid fuel increase as a function of increment feedstock ratios. Catalytic cracking of PS:BMJ resulted in liquid fuel yields of 64.6%, 71.6% and 80.4% respectively, for an increase in the feedstock ratio of 1: 1, 4: 3 and 2: 1. While in cracking PS: BMK are 45.4%, 52.0%, and 68.2%. The enrichment of the gasoline hydrocarbon fraction (C_7 - C_{12}) was achieved at an optimum feedstock ratio of 1: 1. In addition, investigation of physical characteristics showed that overall produced liquid fuel had fulfilled SNI 3506: 2017. Catalytic cracking of PS:BMK produced liquid fuel with higher calorific value and octane number, which is in the range of 16,663 - 27,028 kcal/kg and RON 97.8 - 100.5, compared to catalytic cracking of PS:BMJ.

Keywords: Candlenut oil (*Aleurites moluccana*) biodiesel, Catalytic Co-Cracking, Polystyrene Plastic Waste, Used Cooking Oil Biodiesel.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah tesis **"Peningkatan Hasil dan Kualitas Bahan Bakar Cair melalui Ko-Perengkahan Katalitik Limbah Plastik Polistirena dengan Biodiesel Minyak Jelantah dan Biodiesel Minyak Kemiri (*Aleurites moluccana*)"**. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung dalam menyusun naskah tesis ini, yaitu:

1. Dr. Hendro Juwono, M.Si. dan Dr. Yuly Kusumawati, M.Si. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan selama proses penyusunan naskah tesis ini.
2. Prof. Dr.rer.nat. Fredy Kurniawan, S.Si., M.Si selaku Kepala Departemen Kimia FSAD serta Prof. Dr. Didik Prasetyoko, S.Si, M.Sc selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Kimia atas fasilitas yang telah diberikan hingga naskah tesis ini dapat terselesaikan.
3. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa.
4. DRPM ITS dan Ristekdikiti atas dukungan Dana Riset Skema Penelitian Laboratorium 2019 dan atas Hibah Tesis Magister 2020.
5. BPKLN Kemendikbud yang telah memberikan dana Beasiswa Unggulan selama proses studi magister kimia.
6. Keluarga Qecyl, Grup Riset HJ, dan Squad ISA yang selalu membantu, memberi semangat, doa dan dukungan.
7. Semua pihak yang mendukung terlaksananya penulisan naskah tesis ini.

Penulis menyadari bahwa naskah tesis ini masih terdapat kekurangan. Saran yang membangun penulis harapkan agar naskah tesis ini menjadi lebih baik. Penulis juga berharap semoga naskah tesis ini dapat bermanfaat dan memberi tambahan ilmu bagi pembaca. Amin.

Surabaya, 04 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN i
ABSTRAK i
ABSTRACT ii
KATA PENGANTAR iii
DAFTAR ISI iv
DAFTAR TABEL i
DAFTAR GAMBAR ii
DAFTAR LAMPIRAN v
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 8
1.3. Tujuan Penelitian 9
1.4. Manfaat Penelitian 9
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 11
2.1. Polistirena 11
2.2. Perengkahan (*Cracking*) 12
2.2.1. Perengkahan Termal 12
2.2.2. Perengkahan Katalitik 15
2.3. Perengkahan Limbah Plastik Polistirena (PS) 17
2.4. Biodiesel 20
2.4.1. Biodiesel Minyak Kemiri (*Aleurites moluccana*) 22
2.4.2. Biodiesel Minyak Jelantah 24
2.5. Ko-Perengkahan Katalitik Biomassa dengan Limbah Plastik 25
2.5.1 Pengaruh Rasio Bahan Baku Plastik: Biomassa 27
2.5.2. Mekanisme Ko-Perengkahan Katalitik Biomassa dengan Limbah Plastik 29
2.6. Katalis Al-MCM-41 322
2.7. Karakterisasi Katalis 333
2.7.1. Difraksi Sinar-X 333
2.7.2. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) 355
2.7.3. Adsorpsi-Desorpsi Gas Nitrogen 377

2.7.4. Penentuan Keasaman Permukaan Padatan 399
2.8. Karakterisasi Bahan Bakar Cair 40
2.8.1. Kromatografi Gas – Spektroskopi Massa (GC-MS) 40
2.8.2. Densitas 422
2.8.3. Viskositas 422
2.8.4. Titik Nyala 433
2.8.5. Nilai Kalor 433
2.8.6. Angka Oktan 444
2.9. Karakterisasi Kinerja Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin ... 444
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 47
3.1. Alat dan Bahan 47
3.1.1. Alat 47
3.1.2. Bahan 47
3.2. Prosedur Penelitian 47
3.2.1. Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah 47
3.2.2. Sintesis Biodiesel Kemiri (*Aleurites moluccana*) 48
3.2.3. Sintesis Minyak Plastik dari Limbah Plastik Polistirena (PS) 49
3.2.4. Persiapan Katalis 50
3.2.5. Karakterisasi Katalis Al-MCM-41-keramik 50
3.2.5.1 Struktur Katalis dengan Difraktometer Sinar-X (XRD) 50
3.2.5.2 Struktur Morfologi Permukaan dengan SEM-EDX 50
3.2.5.3 Luas Permukaan dan Porositas Katalis dengan Metode Adsorpsi Gas N_2 51
3.2.5.4 Keasaman Katalis dengan Metode Adsorpsi Piridin-FTIR 51
3.2.6. Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Minyak Jelantah 51
3.2.7. Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Kemiri 53
3.2.8. Analisa *Gas Chromatography – Mass Spectrometer* (GC-MS) 54
3.2.9. Evaluasi Data 55
3.2.10. Karakterisasi Sifat Fisik Bahan Bakar Cair 56
3.2.10.1 Penentuan Densitas Campuran Bahan Bakar Cair 56
3.2.10.2 Penentuan Viskositas Kinematik Campuran Bahan Bakar Cair 57
3.2.10.3 Penentuan Titik Nyala Campuran Bahan Bakar Cair 57

3.2.10.4 Penentuan Nilai Kalor Campuran Bahan Bakar Cair.....58
3.2.10.5 Penentuan Angka Oktan Campuran Bahan Bakar Cair 58
3.2.11. Uji Kinerja Campuran Bahan Bakar Cair 58
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN..... 59
4.1 Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah.....59
4.2 Sintesis Biodiesel Minyak Kemiri 622
4.3 Sintesis Minyak Polistirena.....64
4.4 Karakteristik Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi 66
4.4.1 Karakteristik Struktur Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi 66
4.4.2 Karakteristik Morfologi Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi.....68
4.4.3 Karakteristik Pori Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi.....69
4.4.4 Karakteristik Keasaman Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi.....70
4.5 Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Minyak Jelantah 71
4.6 Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Minyak Kemiri (*Aleurites moluccana*) 73
4.7 % Hasil Ko-Perengkahan Katalitik 75
4.7.1 Pengaruh Rasio Bahan Baku terhadap Hasil Bahan Bakar Cair..75
4.8 Analisis Komposisi Fraksi Produk Hidrokarbon Cair 78
4.8.1 Pengaruh Waktu Reaksi terhadap Komposisi Fraksi Hidrokarbon 78
4.8.2 Pengaruh Jenis Biomassa terhadap Komposisi Fraksi Hidrokarbon 80
4.9 Distribusi Senyawa Kimia dalam Produk Hidrokarbon Cair.....82
4.10 Ko-Perengkahan Katalitik Metil Ester dengan Limbah Polistirena.....85
4.11 Karakteristik Sifat Fisika dan Performa Campuran Bahan Bakar Cair 877
4.11.1 Densitas Campuran Bahan Bakar Cair.....87
4.11.2 Viskositas Campuran Bahan Bakar Cair.....89
4.11.3 Nilai Kalor Campuran Bahan Bakar Cair 900
4.11.4 Titik Nyala Campuran Bahan Bakar Cair 911
4.11.5 Angka Oktan (RON) Campuran Bahan Bakar Cair.....922
4.11.6 Kinerja Campuran Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin 944

BAB 5 KESIMPULAN 977
5.1 Kesimpulan 977
5.2 Saran.....98
DAFTAR PUSTAKA 99
LAMPIRAN 1111
BIODATA PENULIS 142

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat Fisik Polistirena 11

Tabel 2.2 Hasil Perengkahan Termal Polistirena pada Berbagai Kondisi Reaksi 18

Tabel 2.3 Aktivitas Katalis Asam pada Perengkahan PS 19

Tabel 2.4 Karakterisasi dan Komposisi Asam Lemak Minyak Kemiri.....23

Tabel 2.5 Karakterisasi dan Komposisi Asam Lemak Minyak Jelantah.....24

Tabel 2.6 Hasil Studi Ko-Perengkahan Katalitik Biomassa dengan Limbah Plastik 26

Tabel 3.1 Variasi Rasio Volume Bahan Baku Ko-Perengkahan Katalitik Limbah PS dengan Biodiesel Minyak Jelantah 53

Tabel 3.2 Variasi Rasio Volume Bahan Baku Ko-Perengkahan Katalitik Limbah PS dengan Biodiesel Minyak Kemiri.....54

Tabel 3.3 Kondisi Operasi Instrumen GC-MS 55

Tabel 3.4 Komposisi Campuran Bahan Bakar Cair 56

Tabel 4.1 Karakteristik Biodiesel Minyak Jelantah dan Biodiesel Minyak Kemiri terhadap Standar SNI ……... 63

Tabel 4.2 Data Hasil Analisis BET dan BJH ……... 71

Tabel 4.3 Sifat Keasaman Katalis Al-MMCM-41/keramik ……. 72

Tabel 4.4 Waktu Terbentuknya Produk Hidrokarbon Cair Pertama pada Variasi PS:BMJ …… 74

Tabel 4.5 Waktu Terbentuknya Produk Hidrokarbon Cair Pertama pada Variasi PS:BMK ……..….. 76

Tabel 4.6 Komposisi Fraksi Hidrokarbon Cair Hasil Ko-Perengkahan Katalitik …… 84

Tabel 4.7 Karakteristik Sifat Fisika Campuran Bahan Bakar Cair …….. 90

Tabel 4.8 Titik Nyala CBBC …… 94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Polistirena 11
Gambar 2.2 Mekanisme (a) Pemotongan Acak (b) Pemotongan Rantai Ujung pada Reaksi Inisiasi 13
Gambar 2.3 Mekanisme (a) Abstraksi Intermolekuler (b) Abstraksi Intramolekuler pada Reaksi Propagasi 13
Gambar 2.4 Mekanisme Pemotongan β pada Reaksi Propagasi 14
Gambar 2.5 Mekanisme (a) Reaksi Rekombinasi dan (b) Reaksi Disproporsionasi Radikal pada Reaksi Terminasi 14
Gambar 2.6 Mekanisme Perengkahan Polistirena dengan Katalis Asam 16
Gambar 2.7 Reaksi Esterifikasi dengan Katalis Asam Sulfat 20
Gambar 2.8 Mekanisme Transesterifikasi dengan Katalis Basa 21
Gambar 2.9 Reaksi Transesterifikasi 22
Gambar 2.10 Pengaruh Rasio HDPE: Limbah Minyak Goreng terhadap (a) Hasil dan (b) Komposisi Hidrokarbon Cair 28
Gambar 2.11 Jalur Reaksi pada Proses Ko-Perengkahan Katalitik Biomassa dan Limbah Plastik 30
Gambar 2.12 Kemungkinan Mekanisme Perengkahan Katalitik PS dengan Asam Lemak ……..... 31
Gambar 2.13 Struktur Heksagonal Al-MCM-41 32
Gambar 2.14 Difraksi Sinar-X 33
Gambar 2.15 Pola XRD (a) MCM-41 (b) Al-MCM-41(50) (c) Al-MCM-41 (15) 34
Gambar 2.16 Skema Kerja SEM 35
Gambar 2.17 Mikrograf SEM dari (a) MCM-41 Nano (b) MCM-41 Mikro (c) Al-MCM-41 36
Gambar 2.18 Grafik Isotermal Adsorpsi-Desorpsi Gas N_2 dari Al-MCM-41 38
Gambar 2.19 Skema Interaksi Piridin dengan (a) Asam Lewis (b) Asam Bronsted 39
Gambar 2.20 Spektra FTIR-Piridin Al-MCM-41 pada Suhu Kalsinasi (a) 50°C (b) 150°C (c) 250°C (d) 350°C 40

Gambar 2.21 Diagram Skema Kerja GC-MS.....41
Gambar 2.22 Kromatogram GC-MS dari Produk Perengkahan Katalitik Limbah PS.....42
Gambar 2.23 Skema Pengujian pada Mesin Gasolin 45
Gambar 2.24 Grafik Efisiensi Termal Bahan Bakar Cair 46
Gambar 3.1 Desain Reaktor Perengkahan Katalitik.....52
Gambar 3.2 Diagram Rencana dan Jadwal Kegiatan Penelitian.....59
Gambar 4.1 Rangkaian Alat Refluks pada Sintesis Biodiesel …….. 60
Gambar 4.2 Pemisahan Fasa Atas dan Fasa Bawah Hasil Proses Refluks ….. 61
Gambar 4.3 Biodiesel Minyak Jelantah ……...…… 61
Gambar 4.4 Transesterifikasi Minyak Kemiri …….. 63
Gambar 4.5 Biodiesel Minyak Kemiri ……..….. 63
Gambar 4.6 (a) Limbah Polistirena berupa EPS (b) Lempengan Polistirena Hasil Proses Pemampatan ……. 64
Gambar 4.7 (a) Minyak Polistirena (b) Kokas Hasil Pirolisis Limbah Polistirena ……... 65
Gambar 4.8 Kromatogram Produk Cair Hasil Pirolisis Limbah Polistirena … 66
Gambar 4.9 Difraktogram SAXRD Material Keramik dan Al-MCM-41/keramik ……... 67
Gambar 4.10 Difraktogram WAXRD Material Keramik dan Al-MCM-41/keramik ……... 67
Gambar 4.11 Mikrograf SEM (a) Al-MCM-41 dan (b) Al-MCM-41/keramik . 68
Gambar 4.12 Grafik Adsorpsi – Desorpsi Isotherm N_2 dari (a) Al-MCM-41 dan (b) Al-MCM-41/keramik …….. 70
Gambar 4.13 Spektra FTIR Piridin Katalis Al-MCM-41/keramik ……. 71
Gambar 4.14 (a) Pellet Katalis Al-MCM-41/keramik (b) Susunan Katalis Al-MCM-41/keramik dalam Ruang Katalis …….…….. 72
Gambar 4.15 Produk Hidrokarbon Cair Hasil Ko-Perengkahan Katalitik Biodiesel Jelantah dan Minyak Polistirena ……..…….. 73
Gambar 4.16 Produk Hidrokarbon Cair Hasil Ko-Perengkahan Katalitik Biodiesel Kemiri dan Minyak Polistirena ……..…….. 74

Gambar 4.17 % Hasil Hidrokarbon Cair dan Kokas Hasil Ko-Perengkahan Katalitik Limbah Polistirena dan Biodiesel Jelantah ……..…….. 76

Gambar 4.18 % Hasil Hidrokarbon Cair dan Kokas Hasil Ko-Perengkahan Katalitik Limbah Polistirena dan Biodiesel Kemiri ……...…….. 77

Gambar 4.19 Grafik Pengaruh Jenis Biomassa terhadap Komposisi Fraksi Hidrokarbon Cair ……..……..…….. 80

Gambar 4.20 Grafik Pengaruh Jenis Biomassa terhadap Komposisi Senyawa Aromatik ……..……..…….. 81

Gambar 4.21 Distribusi Senyawa Kimia dalam BBC Hasil Ko-Perengkahan Katalitik PS:BMJ dan PS:BMK pada Suhu 300°C selama 120 menit ……...……..…….. 82

Gambar 4.22 Densitas Campuran Bahan Bakar Cair …….…….. 88

Gambar 4.23 Viskositas Campuran Bahan Bakar Cair …….. 89

Gambar 4.24 Nilai Kalor Campuran Bahan Bakar Cair …….……. 90

Gambar 4.25 Nilai RON Campuran Bahan Bakar Cair …….…….. 93

Gambar 4.26 Efisiensi Termal Campuran Bahan Bakar Cair …….…. 94

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Skema Kerja.....111
Lampiran B. Prosedur Kerja 112
B.1 Pirolisis Limbah Plastik Polistirena 112
B.2 Preparasi Katalis.....113
B.3 Sintesis Biodiesel Minyak Kemiri 114
B.4 Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah.....115
B.5 Sintesis Bahan Bakar Cair dari Ko-Perengkahan Katalitik Limbah PS dan Biodiesel Minyak Jelantah.....116
B.6 Sintesis Bahan Bakar Cair dari Ko-Perengkahan Katalitik Limbah PS dan Biodisel Minyak Kemiri 117
Lampiran C. Karakterisasi Katalis 118
C.1 Hasil Karakterisasi XRD Katalis Al-MCM-41/Keramik.....118
C.2 Hasil Karakterisasi Serbuk Keramik Busi.....118
C.3 Hasil Karakterisasi SEM-EDX Katalis Al-MCM-41/Keramik..119
C.4 Karakterisasi Adsorpsi-Desorpsi Gas N2 Katalis Al-MCM-41/Keramik.....120
C.5 Hasil Karakterisasi FTIR-Piridin Katalis Al-MCM-41/Keramik.....121
Lampiran D. Hasil Perengkahan 122
D.1 Hasil Hidrokarbon Cair dari Pirolisis Limbah PS.....122
D.2 Hasil Hidrokarbon Cair dari Perengkahan Katalitik PS:BMJ dan PS:BMK 122
Lampiran E. Karakterisasi GC-MS 123
E.1 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 1:1 (60 menit)....123
E.2 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 1:1 (120 menit)..124
E.3 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 4:3 (60 menit)....126
E.4 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 4:3 (120 menit)..127
E.5 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 2:1 (60 menit)....129
E.6 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 2:1 (120 menit)..130

E.7 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 1:1 (120 menit) 131
E.8 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 4:3 (120 menit) 133
E.9 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 2:1 (60 menit) ..135
E.10 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 2:1 (120 menit) 135
Lampiran F. Karakterisasi Campuran Bahan Bakar Cair.....137
F.1 Karakterisasi Densitas.....137
F.2 Karakterisasi Viskositas.....138
F.3 Karakterisasi Titik Nyala 138
F.4 Karakterisasi Nilai Kalor.....139
F.5 Karakterisasi Angka Oktan (RON) 139
F.6 Karakterisasi Kinerja pada Mesiin Gasolin.....140

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Keterbatasan sumber daya fosil dan isu pencemaran lingkungan mendorong pengembangan bahan bakar alternatif *biofuel* yang dapat diperbarui, efisien, dan ramah lingkungan (Ağbulut, 2019). *Biofuel* merupakan bahan bakar cair maupun gas yang diperoleh dari sumber biomassa dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar kendaraan, mesin, maupun pembangkit listrik (Demirbas, 2008). *Biofuel* generasi pertama seperti bioetanol telah banyak digunakan di beberapa negara, seperti Brazilia, Amerika Serikat, dan Eropa untuk menggantikan bensin komersil sebagai bahan bakar kendaraan. Walaupun bioetanol memiliki angka oktan dan suhu penguapan yang tinggi, produk bioetanol yang ada sekarang memiliki keterbatasan dalam rasio pencampuran dengan bensin karena mutu atau spesifikasi teknis bioetanol yang tidak setara dengan bensin komersil (Balat dan Öz, 2008; Ibeto, dkk., 2011). Bioetanol memiliki densitas energi yang rendah, yakni 24,0 MJ/L (bensin komersil 34,6 MJ/L), tekanan uap rendah, bersifat korosif, dan kecenderungan membentuk campuran azeotrop dengan air yang tinggi (Shamsul dkk., 2017 dan Balat, 2011). Selain itu, dibutuhkan modifikasi mesin pembakaran untuk mengoperasikan kendaraan dengan bahan bakar bioetanol karena adanya perbedaan sifat molekuler dari bioetanol dengan rantai hidrokarbon dari bahan bakar fosil yang mengakibatkan bioetanol tidak dapat digunakan sebagai bahan bakar pengganti bensin komersil secara luas (Gurdeep Singh et al. 2020).

Berbeda dengan bioetanol, biogasolin merupakan bahan bakar berbasis biohidrokarbon dari sumber biomassa yang memiliki rantai karbon pada kisaran fraksi bensin, yakni C_5 – C_{12} (Bakhtyari, dkk., 2017). Biogasolin bisa menjadi alternatif yang lebih baik dari bioetanol karena karakteristik hidrokarbonnya yang mirip dengan bensin komersil. Beberapa studi menunjukkan bahwa biogasolin hasil perengkahan katalitik minyak nabati memiliki nilai kalor dan angka oktan pada kisaran 40,0 MJ/kg – 45 MJ/kg dan 93 – 110 secara berturut-turut, yang setara dengan bensin komersil (Zhang, dkk., 2015; Bayat, dkk., 2016; Weinert, dkk.,

2012; Wako, dkk., 2018). Selain itu, hasil studi yang dilakukan oleh Hoang, dkk. (2018) tentang performa mesin dengan bahan bakar biogasolin hasil perengkahan katalitik menunjukkan adanya peningkatan efisiensi termal sebesar 4,5% dibandingkan bensin komersil dan tidak dibutuhkan modifikasi mesin pembakaran internal. Konversi biomassa menjadi bahan bakar biogasolin dapat dilakukan melalui proses degradasi termal seperti perengkahan termal, perengkahan dengan gas hidrogen, maupun perengkahan katalitik. Diantara berbagai metode tersebut, perengkahan katalitik merupakan rute yang lebih disukai karena reaksinya berlangsung pada suhu yang lebih rendah untuk menghasilkan bahan bakar cair fraksi gasolin, tidak membutuhkan suplai hidrogen, dan reaksinya berlangsung pada tekanan atmosfer (Arajou, dkk., 2017 dan Gurdeep Singh, dkk., 2020). Oleh karena itu, perengkahan katalitik merupakan metode yang dinilai ekonomis berkaitan dengan konsumsi energi yang dibutuhkan selama reaksi berlangsung.

Saat ini bahan baku cair dari biomassa berbasis trigliserida lebih banyak digunakan untuk pembuatan biogasolin melalui perengkahan katalitik karena memiliki kestabilan oksidasi yang lebih baik, densitas energi yang lebih besar, serta pengolahannya yang lebih mudah dibandingkan biomassa berbasis selulosa karena dapat menghasilkan bahan bakar cair secara langsung (Bakhtiyari, dkk., 2017). Akan tetapi, bahan baku trigliserida memiliki nilai viskositas besar yang mengakibatkan pembentukan kokas dan diperlukannya suhu perengkahan yang cukup tinggi (Park, dkk., 2019; Lam, dkk., 2019; Wan Mahari, dkk., 2018; Budianto, dkk., 2014). Viskositas yang besar dari suatu bahan bakar juga menghambat penggunaanya secara langsung karena dapat menurunkan kinerja mesin (Senthilkumar dan Sankaranarayanan 2016). Menurut Billaud, dkk. (1995) dan Chen, dkk. (2016), proses transesterifikasi sebagai perlakuan awal dapat dilakukan untuk menurunkan viskositas minyak mentah dari sumber biomassa sehingga diperoleh lebih banyak produk hidrokarbon cair pada fraksi gasolin. Hal tersebut dikarenakan proses transesterifikasi mengubah trigliserida menjadi senyawa metil ester yang lebih kecil sehingga reaksi perengkahan lebih mudah berlangsung. Pendapat tersebut diperkuat oleh hasil penelitian Seifi dan Sadrameli (2016) yang menunjukkan bahwa terjadi peningkatan hasil hidrokarbon cair dari 89,90% menjadi 91,10% dengan peningkatan distribusi fraksi gasolin sebesar

73,94% setelah dilakukan reaksi transesterifikasi sebagai perlakuan awal pada perengkahan katalitik minyak bunga matahari.

Beberapa biomassa berbasis trigliserida yang telah dilaporkan sebagai bahan baku biogasolin dalam proses perengkahan katalitik antara lain minyak bunga matahari (Araújo, dkk., 2017), minyak kelapa sawit (Al-Muttaqii, dkk., 2019), minyak nyamplung (Juwono, dkk., 2017), minyak kedelai (Yu, dkk., 2013), minyak jarak pagar (Ramya, dkk., 2012), minyak biji malapari (Shadangi, dkk., 2015), dan minyak kemiri (Budianto, dkk., 2014). Dari beberapa biomassa berbasis trigliserida di atas, tanaman kemiri (*Aleurites moluccana*) merupakan jenis biomassa yang potensial untuk dikembangkan. Biji kemiri memiliki kadar minyak yang relatif tinggi, yakni 57 – 69% berat keringnya, dibandingkan sumber biomassa lainnya seperti biji bunga matahari dengan kadar minyak 34 – 45% (Kafja, 2012), biji kedelai 13 – 25%, kelapa sawit 46 – 54%, dan jarak pagar 40 – 60% (Pamata, 2008). Selain itu, minyak kemiri memiliki nilai kalor sebesar 36,29 kJ/kg (Estrada, dkk., 2007) yang cocok digunakan sebagai bahan bakar cair dan kandungan asam linoleat cukup tinggi pada minyak kemiri (kisaran 48,5%) sangat menguntungkan pada proses perengkahan katalitik untuk membentuk senyawa aromatik pada kisaran fraksi gasolin yang dapat meningkatkan angka oktan bahan bakar cair yang dihasilkan (Pham, dkk., 2018). Budianto dkk. (2014) telah melaporkan perengkahan katalitik minyak kemiri dengan katalis Zn/HZSM-5 pada suhu 325°C memberikan hasil hidrokarbon cair sebesar 63,1% dengan selektivitas fraksi biogasolin ($C_5 – C_{12}$) 39%. Nilai kalor dan RON dari produk hidrokarbon cair yang dihasilkan secara berturut-turut sebesar 44,82 kJ/kg dan 124,7 dan memenuhi standar bahan bakar gasolin Eropa EN 590. Berdasarkan beberapa keunggulan kemiri (*Aleurites moluccana*) tersebut, dipilihlah minyak kemiri dengan transesterifikasi sebagai perlakuan awal sebagai bahan baku biogasolin pada proses perengkahan katalitik dalam penelitian ini.

Minyak jelantah juga dianggap cocok sebagai bahan baku dalam produksi *biofuel* karena tidak dapat digunakan untuk pengolahan makanan lebih lanjut, murah, dan ketersediaannya melimpah (Lam, dkk., 2019). Perengkahan katalitik minyak jelantah dapat menghasilkan hasil hidrokarbon cair yang tinggi pada kisaran 43% hingga 76% (Shahruzzaman, dkk., 2018; Chiaramonti, dkk., 2015;

Raja Shahruzzaman, dkk., 2018). Wako, dkk., 2018 memperoleh hasil hidrokarbon cair sebesar 83% dengan 35,65% merupakan fraksi gasolin dari proses perengkahan katalitik minyak jelantah menggunakan katalis ZrO.

Secara umum, masalah utama dalam konversi biomassa menjadi bahan bakar cair melalui metode perengkahan katalitik umumnya adalah pembentukan kokas/jelaga dalam jumlah besar yang tidak menguntungkan. Kokas yang terbentuk dapat memblokir situs asam katalis dan mengakibatkan deaktivasi katalis sehingga hasil bahan bakar cair yang diinginkan menjadi rendah (Park, dkk., 2019). Hal tersebut diakibatkan oleh rendahnya rasio H/C_{eff} dalam bahan baku biomassa (Ma, dkk., 2018; H. Zhang, dkk., 2015). Beberapa studi menunjukkan bahwa pencampuran limbah plastik yang merupakan material kaya hidrogen dapat meningkatkan rasio H/C_{eff} pada bahan baku biomassa. B. Zhang, dkk., 2015 berhasil meningkatkan produk aromatik melalui ko-pirolisis katalitik tongkol jagung (H/C_{eff} = 0,4) dan HDPE (H/C_{eff} = 2,0) menggunakan HZSM-5 karena campuran tongkol jagung dan HDPE menghasilkan nilai rasio H/C_{eff} lebih besar dari 1. Limbah plastik sebagai koreaktan berperan sebagai donor hidrogen untuk meningkatkan kualitas dan hasil bahan bakar cair. Efek sinergitas antara bahan baku biomassa dan transfer hidrogen dari limbah plastik pada proses ko-perengkahan katalitik telah dilaporkan sebelumnya. Wan Mahari, dkk., 2018 membuktikan bahwa selama ko-perengkahan katalitik minyak jelantah dengan HDPE, limbah plastik mentransfer radikal hidrogen ke material organik melalui reaksi aromatisasi. Transfer hidrogen dapat mendorong perengkahan hidrokarbon fraksi berat menjadi hidrokarbon fraksi ringan untuk menghasilkan bahan bakar cair target dan mengurangi pembentukan kokas. Selain itu, Muneer, dkk., 2019 menunjukkan adanya efek sinergis positif dengan nilai sinergis maksimum sebesar 5,75 yang diamati dari peningkatan hasil hidrokarbon cair pada perengkahan katalitik tongkol jagung dengan limbah plastik polistirena (PS) pada rasio pencampuran 1:3.

Salah satu jenis limbah plastik yang dapat digunakan sebagai ko-reaktan dalam perengkahan katalitik biomassa adalah polistirena karena memiliki gugus aromatik benzena dalam monomernya yang berpotensi dapat meningkatkan kualitas dan hasil bahan bakar cair yang dihasilkan. H. Zhang, dkk. (2014) dalam hasil penelitiannya menunjukkan bahwa limbah plastik PS menghasilkan

hidrokarbon cair yang lebih tinggi daripada jenis limbah plastik lainnya seperti PP dan PE dalam ko-perengkahan serbuk kayu pinus. Senyawa hidrokarbon aromatik banyak digunakan pada industri petrokimia untuk meningkatkan angka oktan dari bahan bakar fraksi ringan seperti gasolin (Beims, dkk., 2018). Selain itu, dari beberapa hasil studi sebelumnya diketahui bahwa penggunaan limbah polistirena (PS) yang kaya senyawa aromatik dalam ko-perengkahan katalitik dapat menghasilkan bahan bakar cair dengan nilai kalor yang lebih tinggi daripada perengkahan katalitik biomassa itu sendiri (Shadangi dan Mohanty, 2015; Muneer, dkk., 2019; Abnisa, dkk., 2013).

Efek sinergis positif atau negatif pada ko-perengkahan katalitik biomassa dan limbah plastik dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti suhu, waktu reaksi, laju pemanasan, katalis, dan rasio bahan baku. Diantara faktor-faktor tersebut, rasio pencampuran limbah plastik dan biomassa merupakan salah satu parameter utama yang mempengaruhi efek sinergis secara signifikan (Özsin dan Pütün, 2018). Menurut Wang, dkk., 2017, semakin besar rasio limbah plastik:biomassa maka semakin besar hasil bahan bakar cair yang diperoleh dan semakin kecil jumlah kokas yang terbentuk. Hal tersebut dikarenakan limbah plastik menyediakan sumber hidrogen yang memadai selama proses ko-perengkahan yang dapat menekan pembentukan kokas. Muneer dkk., (2019) telah melaporkan proses ko-perengkahan minyak jagung dan HDPE dengan rasio 1:1, 4:3, dan 2:1 menghasilkan peningkatan hasil bahan bakar cair sebesar 53%, 59%, dan 60% secara berturut-turut. Tren serupa mengenai hasil bahan bakar cair sebagai fungsi dari rasio limbah plastik: limbah biomassa telah diperoleh untuk bahan baku lainnya seperti: minyak biji kenikir – PS (Shadangi dan Mohanty, 2015), minyak malapari – PS (Shadangi dan Mohanty, 2015), dan *Quercus-viriablis* – plastik film (Park, dkk., 2019). Akan tetapi, tren sebaliknya dilaporkan oleh Wan Mahari, dkk. (2018) yang menunjukkan penurunan hasil bahan bakar cair dari 81% menjadi 64% pada variasi HDPE: minyak jelantah 1:1 dan 3:2 secara berturut-turut. Oleh karena itu, digunakan variasi rasio limbah plastik: biomassa 1:1, 4:3, dan 2:1 untuk mengetahui tren hasil bahan bakar cair sebagai fungsi rasio bahan baku pada proses ko-perengkahan katalitik dalam penelitian ini.

Pada proses ko-perengkahan katalitik biomassa dengan limbah plastik, suhu perengkahan menentukan hasil dan distribusi fraksi bahan bakar cair yang diperoleh (Wako, dkk., 2018; Wang dkk., 2017; Bayat, dkk., 2014; Chen, dkk., 2015). Ko-perengkahan katalitik dapat dilakukan pada rentang suhu yang beragam bergantung sifat bahan baku yang digunakan, umumnya 250° - 550°C. Perengkahan katalitik pada suhu tinggi di atas 500°C menyebabkan terjadinya reaksi perengkahan sekunder, sehingga menghasilkan lebih banyak produk dalam fasa gas yang mengakibatkan penurunan hasil bahan bakar cair (Wako, dkk., 2018). Zhang, dkk. (2014) telah melakukan ko-perengkahan katalitik buah pinus dengan limbah plastik polietilena pada suhu 500, 550, 600°C dan menghasilkan penurunan hasil bahan bakar cair secara berturut-turut 73,8%, 69,6%, dan 66,8%. Penentuan suhu ko-perengkahan katalitik dapat dilakukan dengan mempertimbangkan suhu degradasi termal bahan baku yang digunakan. Dari hasil studi sebelumnya, suhu degradasi termal untuk biodiesel minyak kemiri dan biodiesel minyak jelantah diketahui 119-230°C dan 120-256°C secara berturut-turut (Cabral, dkk., 2016 dan Elkady, dkk., 2015). Dengan demikian, perengkahan katalitik biodiesel minyak kemiri dan jelantah dapat dilakukan pada suhu sedikit lebih tinggi dari suhu degradasi termalnya, misalnya pada suhu 300°C agar tercapai konversi maksimum. Lebih lanjut, ko-perengkahan biodiesel minyak jelantah dan limbah plastik polipropilena pada suhu 300°C memberikan hasil bahan bakar cair fraksi gasolin (C_7-C_{12}) maksimum hingga 93,92% (Juwono, dkk., 2019). Berdasarkan hasil studi tersebut, suhu ko-perengkahan katalitik dalam penelitian ini dikontrol pada 300°C.

Selain rasio bahan baku dan suhu, pemilihan katalis dalam ko-perengkahan katalitik biomassa dengan limbah plastik juga penting. Katalis dengan ukuran pori seragam dan situs asam yang memadai dapat mendorong proses perengkahan biomassa dengan selektivitas produk tertentu. Al-MCM-41 dapat dipertimbangkan sebagai salah satu katalis yang menjanjikan karena memiliki luas permukaan besar, ukuran diameter mesopori (30 - 40Å), dan keasaman medium sehingga mampu merengkah molekul besar, tidak rentan terhadap deaktivasi, serta dapat menghasilkan bahan bakar cair pada fraksi gasolin lebih besar (Ratnasari, dkk., 2018; Iliopoulou, dkk., 2007). Pada studi sebelumnya, material ZSM-5 telah banyak digunakan sebagai katalis heterogen dalam proses ko-perengkahan katalitik

biomassa dan limbah plastik karena memiliki selektivitas produk aromatik yang tinggi (Hassan, dkk., 2016; Ma, dkk., 2018; Park, dkk., 2019; Bayat, dkk., 2016; Seifi dan Sadrameli, 2016; Chen, dkk., 2016). Akan tetapi ukuran molekul senyawa oksigenat dalam biomassa yang besar tidak dapat melewati pori ZSM-5 yang berada pada rentang mikropori (5,2 – 5,9Å) sehingga mengakibatkan pembentukan kokas pada permukaan katalis dan deaktivasi katalis secara cepat (Ratnasari, dkk., 2018 dan Karnjanakom, dkk., 2017). Oleh karena itu, beberapa katalis mesopori seperti Al-MCM-41 dengan ukuran pori seragam telah dikembangkan untuk memungkinkan interaksi molekul oksigenat besar dalam *bio-oil* dengan adanya situs aktif dalam pori tersebut. Namun demikian, material Al-MCM-41 memiliki kekurangan yakni kestabilan hidrotermalnya yang relatif rendah dibandingkan zeolite, sehingga menghambat penggunaannya pada proses suhu tinggi (Iliopoulou et al. 2007). Peningkatan stabilitas material Al-MCM-41 dapat dicapai dengan penambahan keramik yang memiliki stabilitas termal dan mekanik yang tinggi. Penggunaan katalis Al-MCM-41/keramik dalam ko-perengkahan limbah plastik PP dan biodiesel minyak jelantah telah terbukti mampu menghasilkan fraksi gasolin (C_7-C_{12}) hingga 93,92% (Juwono, dkk., 2019). Dalam penelitian ini, digunakan material isolator busi yang tersusun atas oksida alumina sebagai sumber keramik.

Kualitas bahan bakar cair hasil ko-perengkahan katalitik biomassa dengan limbah plastik dapat dilihat dari sifat fisiko-kimianya maupun performanya pada mesin. Setiap negara memiliki standar yang berbeda untuk mengatur baku mutu dari masing-masing jenis bahan bakar cair yang diperbolehkan. Di Indonesia, standar baku mutu bahan bakar bensin yang digunakan adalah SNI 3506: 2017. Selain itu, efisiensi termal merupakan parameter penting yang dapat digunakan untuk mengukur kinerja suatu bahan bakar cair pada mesin. Efisiensi termal merupakan ukuran besarnya pemanfaatan energi panas/kalor yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam (Yuvenda, dkk., 2019). Nilai efisiensi termal dipengaruhi oleh daya mesin dimana nilainya meningkat seiring dengan penambahan daya mesin (Shahir, dkk., 2020 dan Yuvenda, dkk., 2019). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pencampuran bio-gasolin pada bahan bakar komersil dapat meningkatkan nilai efisiensi termal pada mesin karena bio-gasolin memiliki kandungan oksigen tinggi yang mengakibatkan

pembakaran sempurna pada mesin (Patil dan Arakerimath, 2012.; Sivaramakrishnan, 2018; Khan dan Hasan, 2006). Juwono, dkk. (2018) melaporkan bahwa kinerja bahan bakar cair dari hasil ko-perengkahan katalitik limbah PP dan biodiesel nyamplung (*Canopyllum inoculum*) dengan rasio 4:1 memberikan nilai efisiensi termal optimum sebesar 27,18% pada daya 2090 watt. Dengan demikian, sifat fisik bahan bakar cair yang diperoleh dalam penelitian ini akan dibandingkan dengan standar bahan bakar bensin SNI 3506: 2017 yang meliputi parameter densitas, viskositas, nilai kalor, titik nyala, dan RON. Selain itu, bahan bakar cair akan diuji pada mesin gasolin untuk mengetahui efisiensi termalnya.

1.2. Rumusan Masalah

Biodiesel minyak kemiri dan minyak jelantah dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan bahan bakar cair fraksi ringan seperti biogasolin (C_7 – C_{12}) dengan proses perengkahan katalitik. Akan tetapi, biomassa memiliki rasio H/C_{eff} rendah (< 1,0) yang mengakibatkan pembentukan kokas dalam jumlah besar. Keberadaan kokas yang berlebih dapat memblokir situs aktif katalis yang menyebabkan deaktivasi katalis dan penurunan hasil serta kualitas bahan bakar cair yang ditargetkan (Ma, dkk., 2018; H. Zhang, dkk., 2015). Peningkatan rasio H/C_{eff} dapat dilakukan dengan penambahan limbah plastik polistirena (PS) karena merupakan material kaya hidrogen dan memiliki gugus aromatik benzena pada struktur monomernya yang dapat meningkatkan hasil dan kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan. Rasio limbah plastik:biomassa menjadi salah satu parameter penting yang dapat mempengaruhi efek sinergis dalam proses ko-perengkahan katalitik (Özsin dan Pütün, 2018; Wang dkk., 2017; Muneer dkk., 2019). Akan tetapi, pada beberapa penelitian sebelumnya terdapat perbedaan mengenai pengaruh rasio limbah plastik: biomassa terhadap hasil bahan bakar cair (Zhang, dkk., 2015; Zhang, dkk., 2014; Wang dkk., 2017). Selain itu, jenis campuran bahan baku juga berpengaruh terhadap efek sinergis yang terjadi, sehingga hasil dan kualitas bahan bakar cair dapat sangat berbeda bergantung bahan baku yang digunakan (Abnisa dkk., 2015). Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel kemiri dan biodiesel minyak jelantah menggunakan katalis Al-MCM-41/keramik dengan variasi rasio

bahan baku 1:1, 4:3, dan 2:1 pada suhu 300°C untuk mengetahui bagaimana kecenderungan hasil bahan bakar cair sebagai fungsi rasio bahan baku dan bagaimana perbedaan komposisi fraksi hidrokarbon dan karakteristik fisik bahan bahan cair sebagai parameter kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan dari bahan baku biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri (*Aleurites moluccana*). Sifat fisik bahan bakar cair yang diperoleh dalam penelitian ini selanjutnya dibandingkan dengan standar bahan bakar bensin menurut SNI 3506: 2017.

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian masalah diatas, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menyelidiki kecenderungan hasil bahan bakar cair sebagai fungsi rasio bahan baku dalam ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri (*Aleurites moluccana*).
2. Untuk membandingkan komposisi fraksi hidrokarbon cair dan karakteristik fisik bahan bakar cair hasil ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri (*Aleurites moluccana*).

1.4. Manfaat Penelitian

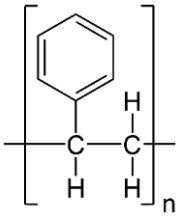
Penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk pengolahan limbah plastik dan sumber biomassa menjadi bahan bakar alternatif sebagai salah satu usaha diversifikasi sumber energi. Pemanfaatan sumber biomassa *non-edible* seperti limbah minyak jelantah dan kemiri mampu menghasilkan bahan bakar yang rendah emisi gas-gas berbahaya (SO_x, NO_x, dan CO_x) sehingga secara sinergis dapat mengatasi permasalahan yang berkaitan dengan pencemaran lingkungan sekaligus meningkatkan nilai guna dari bahan baku tersebut untuk mendukung terwujudnya program teknologi ramah lingkungan.

"*Halaman ini sengaja dikosongkan*"

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Polistirena

Polistirena merupakan senyawa polimer aromatik yang terdiri dari monomer stirena seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. Umumnya polistirena tidak berwarna dan lebih padat/keras dibandingkan jenis plastik lainnya. Polistirena merupakan polimer termoplastik yang berwujud padat pada suhu ruang, akan tetapi dapat mengalir jika dipanaskan pada suhu diatas 100 ^{o}C. Keadaan tersebut disebut sebagai suhu transisi kaca. Suhu transisi kaca merupakan keadaan transisi reversibel dimana suatu bahan amorf yang bersifat keras dan mudah rapuh diubah menjadi kental dan seperti karet.



Gambar 2.1 Struktur polistirena

Polistirena memiliki sifat mekanik dan termal yang baik, dengan banyak sifat yang dapat diinginkan (Billmayer, 1984). Beberapa sifat fisik polistirena dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat fisik polistirena (Billmayer, 1984)

Sifat	Nilai
Densitas	1050 kg/m^3
Konduktivitas elektrik	10 – 16 S/m
Konduktivitas termal	0,08 W/mK
Modulus Young	3000 – 3600 MPa
Kuat Tarik	46 – 60 MPa
Titik leleh	240°C
Glass temperature (Tg)	95°C
Koefisien transfer panas	0,17 W/m^{2}K
Panas spesifik	1,3 kJ/kgK

2.2. Perengkahan (*Cracking*)

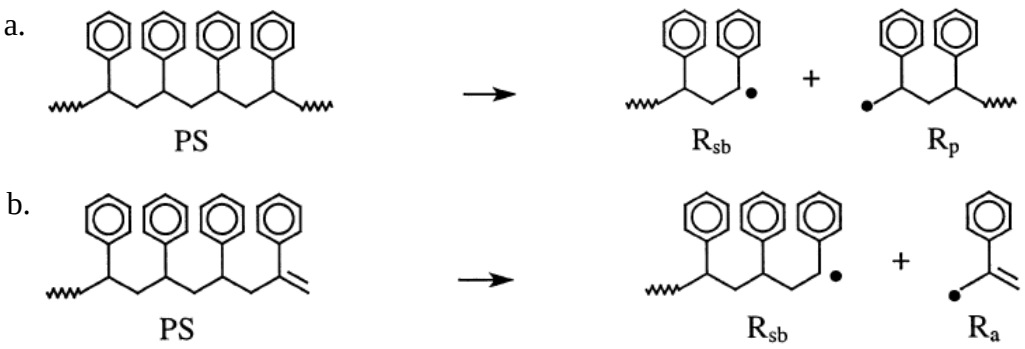
Reaksi perengkahan adalah reaksi degradasi termal untuk memutus ikatan C-C dari rantai karbon panjang dan berat molekul besar menjadi hidrokarbon dengan rantai karbon pendek dan berat molekul kecil yang berlangsung pada kondisi bebas oksigen (Al-Salem, dkk., 2017). Ada tiga produk utama yang dihasilkan dari proses perengkahan antara lain minyak, gas, dan kokas (*coke*). Perengkahan dapat dilakukan pada dua kondisi, yaitu perengkahan terrmal dan perengkahan katalitik. Perengkahan termal menggunakan suhu tinggi sehingga menghasilkan fragmen-fragmen radikal bebas yang cenderung akan mengalami oligomerisasi, sedangkan perengkahan katalitik menggunakan katalis asam yang akan membentuk senyawa intermediet berupa ion karbonium dan pemutusan rantai hidrokarbon terjadi pada posisi beta (β) dari ion karbonium tersebut (Sibarani, 2012).

2.2.1. Perengkahan Termal

Degradasi termal dari beberapa polimer termasuk dalam mekanisme pembentukan rantai radikal yang meliputi reaksi inisiasi, propagasi, dan terminasi (Guyot, 1986). Mekanisme degradasi polistirena (PS) melalui proses perengkahan termal dapat dijelaskan dalam beberapa tahapan reaksi berikut.

Tahap 1: Reaksi Inisiasi

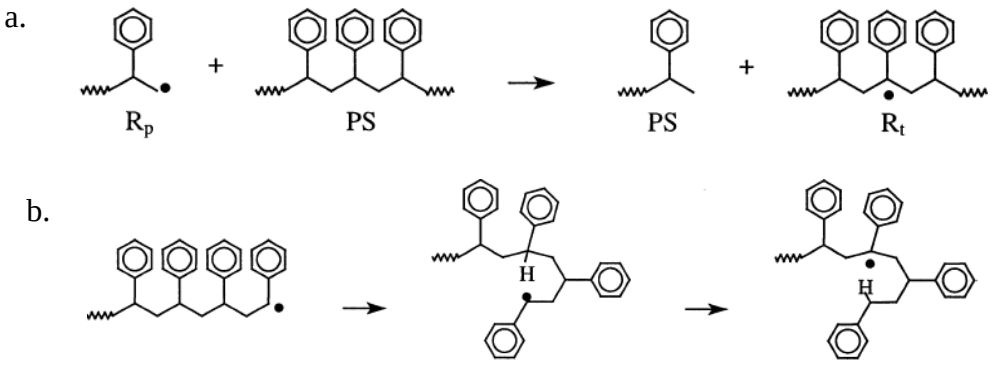
Reaksi inisiasi menentukan pemecahan ikatan C-C dari rantai polimer untuk membentuk senyawa radikal. Ada dua tipe reaksi inisiasi yang dapat terjadi (Gambar 2.2). Tipe pertama adalah pemotongan acak yang dapat membentuk satu radikal primer (R_p) dan satu radikal benzil sekunder (R_{sb}) dengan resonansi yang kuat, sedangkan tipe kedua meliputi pemotongan rantai ujung untuk membentuk satu radikal benzil sekunder (R_{sb}) dan radikal alil benzena (R_a). Reaksi inisiasi tipe kedua memiliki peranan penting dalam proses degradasi termal dikarenakan adanya pertumbuhan rantai pada posisi ujung yang mengakibatkan pengurangan berat molekul dan pembentukan beberapa spesi tidak jenuh akibat reaksi propagasi melalui pemotongan beta (β).



Gambar 2.2 Mekanisme (a) Pemotongan acak (b) Pemotongan rantai ujung pada reaksi inisiasi (Faravelli, dkk., 2001).

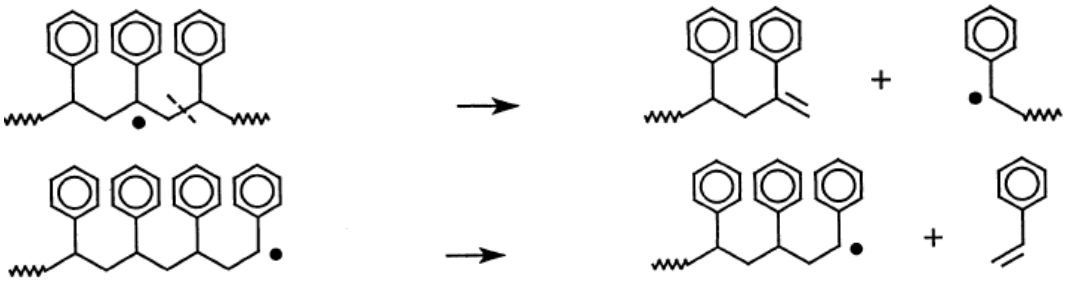
Tahap 2: Reaksi Propagasi

Reaksi propagasi terdiri dari urutan abstraksi atom H dan dekomposisi beta (β) atau disebut juga reaksi *unzipping*. Pada abstraksi intermolekuler, radikal mentransfer atom hidrogen dari suatu molekul yang berbeda (Gambar 2.3 (a)). Karena kestabilan yang lebih tinggi dari resonansi radikal benzilik yang terbentuk, abstraksi hidrogen intermolekuler diperkirakan hanya terjadi pada atom karbon tersier dengan pembentukan R_t. Sedangkan pada abstraksi intramolekuler, radikal R_{sb} dan R_p dapat membentuk senyawa intermediet dengan 5-7 cincin dengan hasil akhir berupa 1-4, 1-5, maupun 1-6 reaksi isomerasi (Gambar 2.3 (b)). Reaksi ini juga disebut juga *back-bitting reaction*. Reaksi dengan enam atau tujuh anggota cincin lebih disukai jika dilihat dari sudut pandang energetik karena memiliki energi regangan lebih rendah, sementara isomerasi 1-4 disukai dari sudut pandang entropi. Akibat halangan sterik dalam fasa cair, reaksi 1-5 *back-bitting* merupakan reaksi yang disukai dan salah satu yang dipertimbangkan.



Gambar 2.3 Mekanisme (a) Abstraksi intermolekuler (b) Abstraksi intramolekuler pada reaksi propagasi (Faravelli, dkk. 2001).

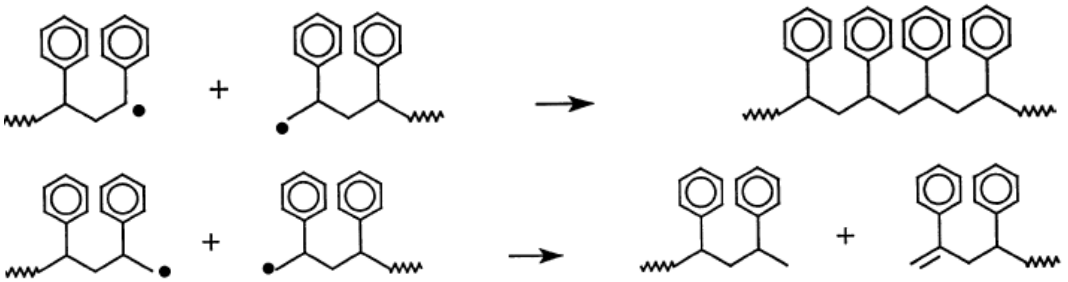
Radikal benzilik tersier mengalami pemotongan ikatan C-C pada posisi β untuk membentuk radikal benzilik sekunder dan sebuah spesi polimer dengan ujung tidak jenuh seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, reaksi *unzipping* merupakan reaksi dekomposisi-β dari radikal R_{sb} dengan pembentukan monomer dan radikal Rsb lainnya dengan unit monomer yang lebih sedikit. Reaksi ini dapat dipertimbangkan sebagai kebalikan dari reaksi poli-adisi.



Gambar 2.4 Mekanisme pemotongan-β pada reaksi propagasi (Faravelli, dkk., 2001)

Tahap 3: Reaksi Terminasi

Reaksi terminasi terjadi apabila dua rantai radikal hidrokarbon bereaksi membentuk hidrokarbon netral (Mao, dkk., 2013). Terdapat dua reaksi terminasi orde dua yang berbeda, yaitu reaksi rekombinasi dan reaksi disproporsionasi radikal yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Perbedaan utama dari kedua reaksi tersebut adalah adanya pembentukan spesi dengan ujung tidak jenuh pada reaksi disproporsionasi.



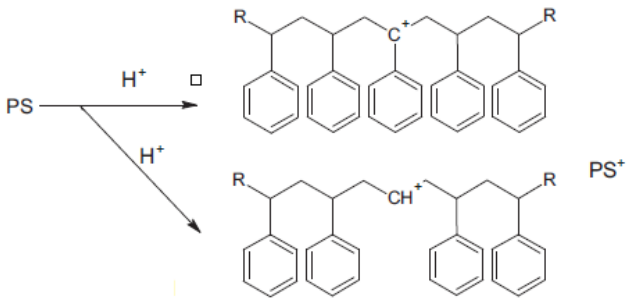
Gambar 2.5 Mekanisme (a) Reaksi rekombinasi dan (b) Reaksi disproporsionasi radikal pada reaksi terminasi (Faravelli, dkk., 2001).

2.2.2. Perengkahan Katalitik

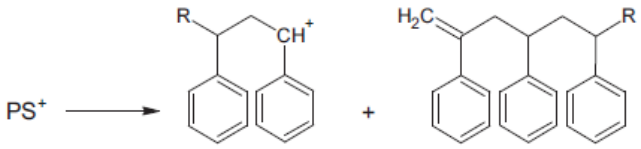
Perengkahan katalitik merupakan proses perengkahan yang dioperasikan pada suhu moderat dengan adanya katalis heterogen. Produk perengkahan katalitik pada dasarnya sama dengan perengkahan termal, penggunaan katalis berfungsi untuk meningkatkan efisiensi proses. Adanya katalis dalam perengkahan dapat menurunkan suhu reaksi, mempercepat waktu reaksi, serta dapat mengontrol selektivitas produk yang dihasilkan (Mao, dkk., 2013).

Selektivitas produk perengkahan katalitik bergantung pada karakteristik katalis yang digunakan. Lin dan White, 1997 dalam hasil penelitiannya menjelaskan bahwa stirena dan produk-produk lainnya seperti benzena, toluena, etilbenzena, α-metilstirena, cumena, turunan senyawa indana, indena, dan naftalena terbentuk dari proses perengkahan katalitik polistirena dengan katalis asam. Mekanisme perengkahan polistirena dengan katalis asam telah dipelajari pada beberapa penelitian sebelumnya (Audisio, dkk., 1990; Marczewski dkk., 2013). Asam Bronsted dapat memprotonasi cincin aromatik yang terikat pada rantai alifatik polistirena mengakibatkan terlepasnya gugus benzena (reaksi dealkilasi) dan pembentukan polikation, sedangkan asam Lewis akan melepaskan anion hidrida dari posisi gugus benzil polistirena dengan pembentukan kation (Skema 1). Tahap selanjutnya yakni pemutusan-β dari ikatan C-C yang terletak pada rantai alifatik. Radikal baru berupa kation maupun anion aktif akan terbentuk pada reaksi lebih lanjut (Skema 2).

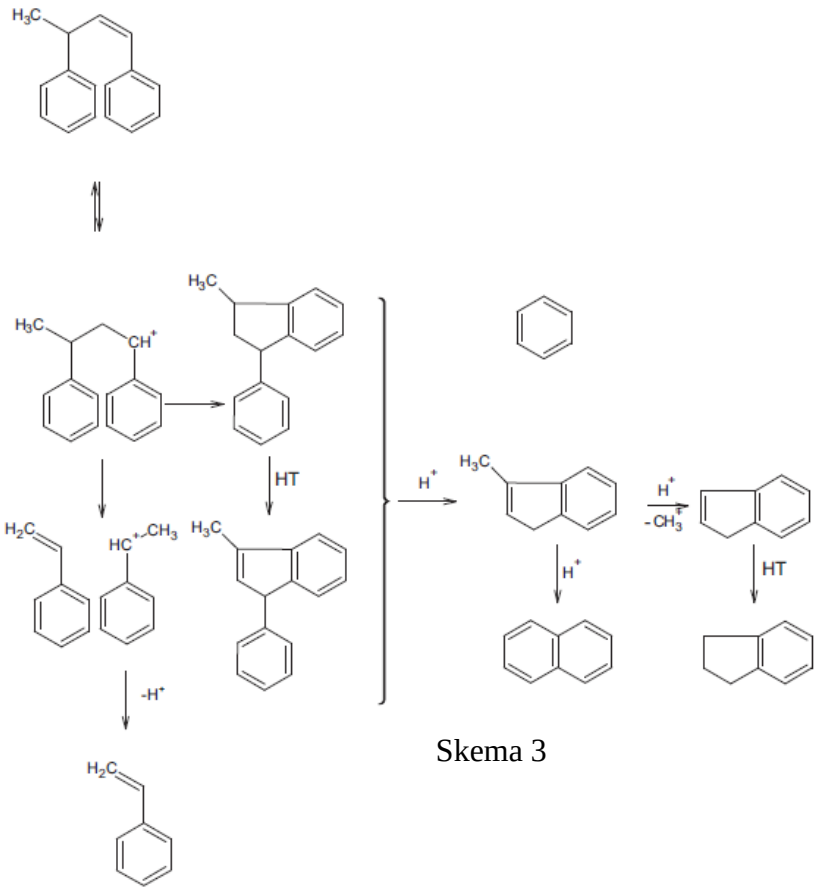
Pengikatan proton pada ikatan rangkap dimer stirena menghasilkan pembentukan ion karbenium yang mengalami dekomposisi (pemutusan-β) menjadi siklisasi stirena kemudian menghasilkan metil-fenil-indana. Adanya aksi dari situs asam Bronsted membentuk ion karbenium yang menghasilkan senyawa benzena, metilindena dan metil indana, indena dan indana, naftalena, serta difenilpropana dan difenilpropena dari urutan reaksi dealkilasi, isomerasi, dan transfer hidrogen (Skema 3). Penyerangan situs asam Bronsted juga dapat terjadi pada cincin aromatik dari dimer stirena sebagaimana ditunjukkan pada skema 4 Gambar 2.6 (b).



Skema 1

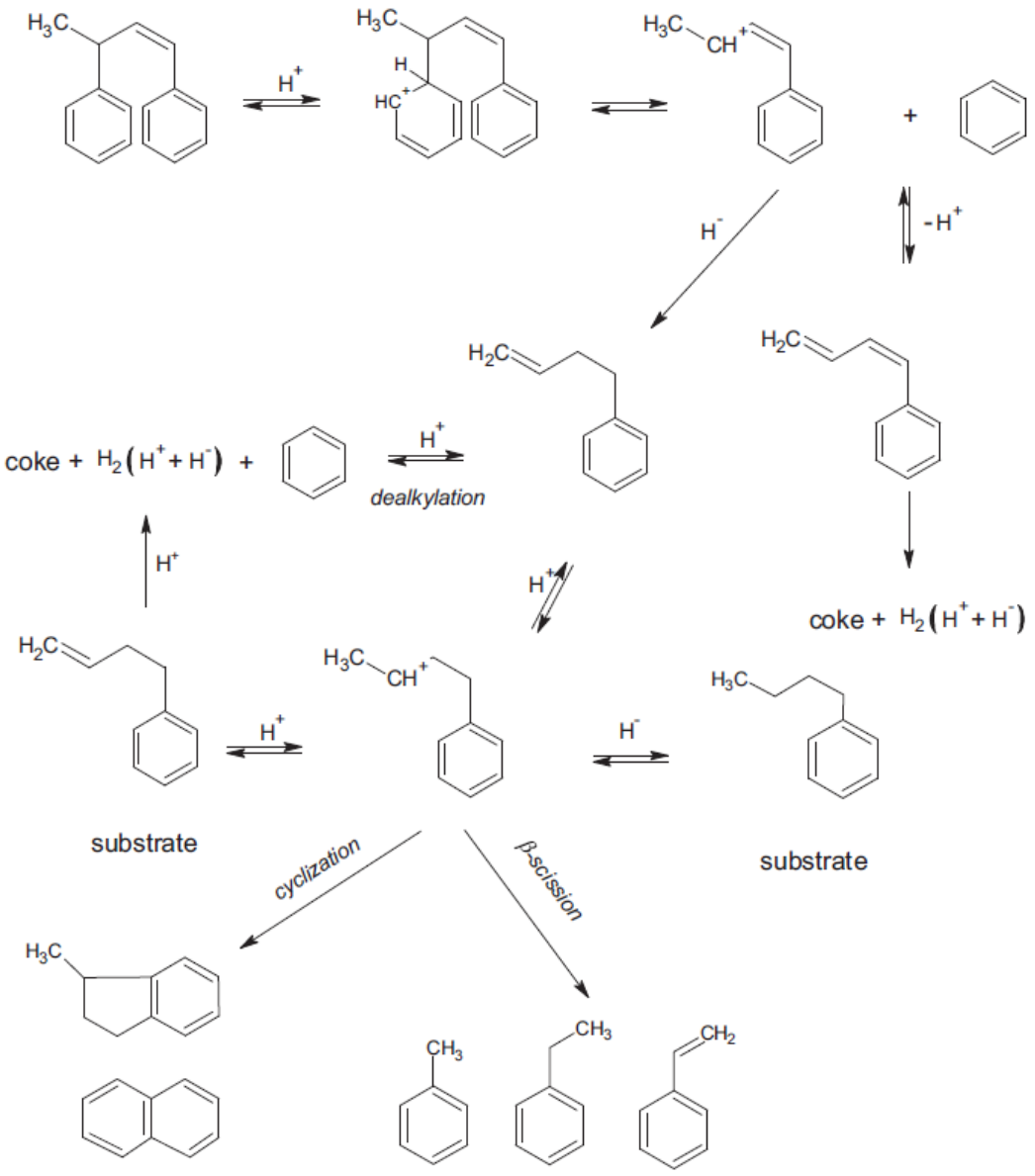


Skema 2



Skema 3

Gambar 2.6 (a) Skema 1, Skema 2, dan Skema 3 pada mekanisme perengkahan polistirena dengan katalis asam (Marczewski, dkk., 2013)



Skema 4

Gambar 2.6 (b) Skema 4 pada mekanisme perengkahan polistirena dengan katalis asam (Marczewski, dkk., 2013)

2.3. Perengkahan Limbah Plastik Polistirena (PS)

Perengkahan termal polistirena (PS) dapat berlangsung pada suhu relatif rendah untuk memperoleh monomer stirena dengan selektivitas tinggi (Serrano, dkk., 2000). Zhang, dkk. (1995) melaporkan % hasil stirena sebesar 70 wt% diperoleh dari degradasi termal PS pada suhu 350°C menggunakan reaktor batch

dengan aliran gas nitrogen secara kontinyu, Kaminsky, dkk., 2004 mencapai % hasil stirena 75 wt% menggunakan reaktor *fluidized bed* pada suhu 450°C, sedangkan Ke, dkk., 2005 memperoleh produk stirena 77 wt% pada suhu 360°C selama 20 menit reaksi. Selain itu, produksi bahan bakar alternatif dari proses perengkahan termal limbah PS sangat menguntungkan karena dapat meningkatkan hasil hidrokarbon cair dengan nilai HHV pada kisaran 41,90 MJ/kg (Al-Salem, dkk., 2017). Tabel 2.2 berikut ini menunjukkan % hasil perengkahan PS dari beberapa studi pada kondisi reaksi yang berbeda.

Tabel 2.2 % Hasil perengkahan termal polistirena pada berbagai kondisi reaksi

No.	Kondisi Reaksi			Tipe Reaktor	Hasil (%)			Pustaka
	Suhu (°C)	Tekanan (atm)	Waktu (menit)		Cair	Gas	Padat	
1.	430	1	60	Batch	54,0	3,0	43,0	Miskolczi, dkk., 2006
2.	410	1	70	-	84,0	12,0	4,0	Nisar, dkk., 2019
3.	500	1	45	Batch	95,80	3,21	0,99	Lerici, dkk., 2015
4.	400	1	60	Semi-batch	86,0	6,0	8,0	Çelikgöğüs dan Karaduman, 2015
5.	300	1	-	Fixed-bed	65,71	25,69	8,60	Soganciogl u, dkk., 2017
6.	350	1	-	Batch	88,0	4,0	8,0	Sarker, dkk., 2012

Berdasarkan Tabel 2.2 di atas dapat diketahui bahwa dalam perengkahan termal PS, faktor operasional seperti suhu, waktu reaksi, dan jenis reaktor dapat mempengaruhi hasil hidrokarbon cair, gas, dan padat (kokas). Secara umum waktu reaksi yang singkat lebih disukai untuk pembentukan hidrokarbon cair selama konversi yang efisien telah tercapai. Waktu reaksi yang panjang meningkatkan kecenderungan terjadinya perengkahan hidrokarbon cair lebih lanjut menjadi gas dan repolimerasi stirena dalam reaktor batch sehingga produk hidrokarbon cair dan stirena berkurang (Aljabri, dkk., 2017). Sedangkan adanya kenaikan suhu hingga nilai tertentu dapat meningkatkan hasil hidrokarbon cair. Akan tetapi, kenaikan

suhu di atas suhu optimum dapat mengakibatkan penurunan hasil hidrokarbon cair dikarenakan terjadinya reaksi perengkahan lebih lanjut yang menghasilkan lebih banyak produk dalam fasa gas (Houshmand, dkk., 2013). Oleh karena itu, produk yang diinginkan dapat dicapai dengan mengendalikan faktor-faktor operasional pada pengaturan yang berbeda.

Tabel 2.3 Aktivitas katalis asam pada perengkahan PS

Katalis	**Kondisi reaksi**			**Hasil hidrokarbon (%)**			**%Hasil stirena**	**Pustaka**
	T (°C)	**t (jam)**	**PS:kat**	**Gas**	**Cair**	**Padat**		
HNZ	400	2	10	9,70	81,50	4,90	60,08	Lee, dkk., 2001
HZSM-5	400	2	10	14,70	75,10	6,30	62,60	
Silika-alumina	400	2	10	7,70	83,50	4,80	48,21	
MCM-41	410	1	20	15,60	83,80	0,60	50,70	Jin, dkk., 2012
Zeolit-Y	500	1	2	23,00	72,01	4,59	81,00	Lerici, dkk., 2015
Halloysite clay	450	2	10	4,80	90,20	5,00	58,82	Tae, 2004

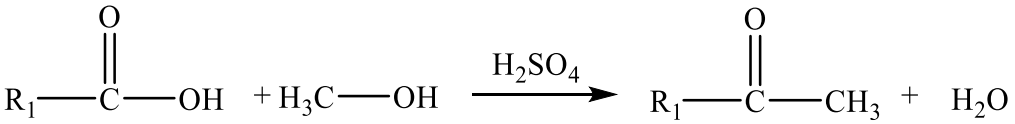
Beberapa jenis katalis asam seperti zeolite alam, silika-alumina, dan MCM-41 telah dipelajari dalam perengkahan katalitik polistirena (Maryudi, dkk., 2018; Moqadam, dkk., 2015; Marcilla, dkk., 2007). Serrano, dkk. (2000) menyelidiki kinerja katalis HZSM-5, HMCM-41, serta silika-alumina (SiO_2 – Al_2O_3) pada perengkahan katalitik polistirena dan menemukan bahwa terdapat perbedaan aktivitas diantara ketiga katalis asam tersebut pada kondisi reaksi yang sama. Aktivitas katalitik tertinggi diperoleh dari katalis HMCM-41 dengan konversi sebesar 35% pada kondisi reaksi meliputi: suhu 375°C, waktu reaksi 30 menit, dan rasio plastik: katalis 18. Nilai konversi tersebut meningkat hingga 45% ketika rasio plastik: katalis diubah menjadi 9. Hal yang sama juga diamati pada katalis silika – alumina, akan tetapi HZSM-5 menunjukkan hasil yang sebaliknya. Konversi PS dengan katalis HZSM-5 justru menurun dari 18% ke 5% ketika rasio plastik: katalis diperkecil. Aktivitas yang lebih tinggi pada katalis HMCM-41 dapat dikaitkan dengan luas permukaan spesifiknya yang besar dan struktur mesopori yang seragam sehingga memungkinkan akses menuju situs aktif internal menjadu lebih cepat dan

efisien. Tabel 2.3 menunjukkan aktivitas dari beberapa katalis asam pada perengkahan PS.

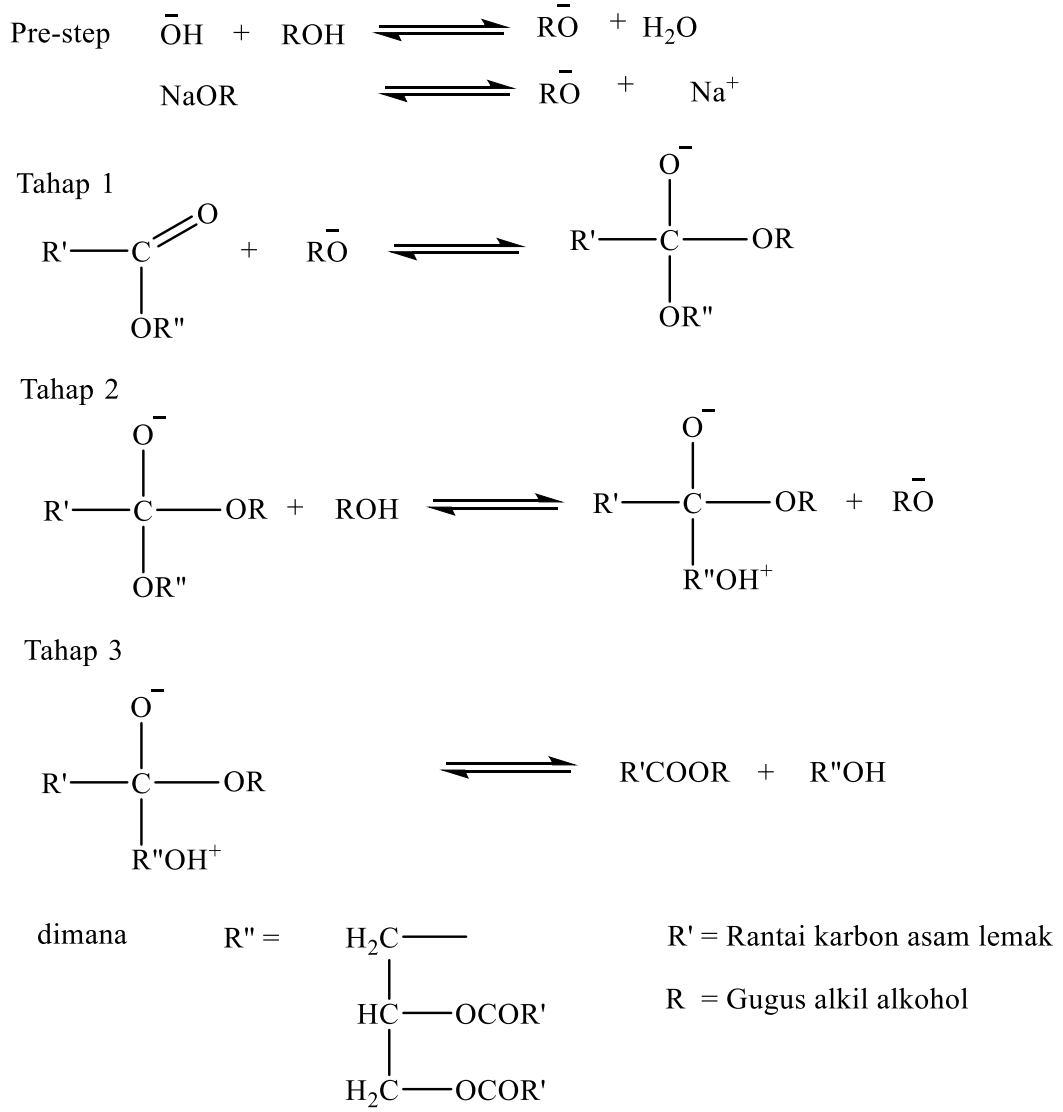
2.4. Biodiesel

Biodiesel merupakan senyawa monoalkil ester dari asam-asam lemak rantai panjang yang terkandung dalam minyak nabati (Holilah, dkk., 2013). Metode pembuatan biodiesel disesuaikan dengan kandungan asam lemak bebas (FFA) dalam minyak nabati yang digunakan sebagai bahan baku. Bila bahan baku yang digunakan memiliki kandungan asam lemak bebas (FFA) tinggi, yakni lebih dari 2%, maka perlu dilakukan proses esterifikasi untuk menurunkan kadar FFA hingga ≤ 1% (Arita, dkk., 2008). Tingginya kandungan FFA akan meningkatkan pembentukan sabun serta menyulitkan pemisahan gliserol dengan metil ester yang terbentuk sehingga dapat menurunkan hasil biodiesel (Djenar dan Lintang, 2012). Sedangkan, bahan baku dengan kandungan FFA rendah dapat dilakukan proses transesterifikasi untuk membentuk senyawa monoalkil ester.

Esterifikasi merupakan tahap konversi asam lemak bebas menjadi senyawa ester dengan bantuan katalis asam (Hidayat, dkk., 2015). Pada reaksi esterifikasi, asam lemak bebas yang memiliki berat molekul 256 – 284 bereaksi dengan metanol menghasilkan air dan ester pada perbandingan 1:1 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Metanol harus ditambahkan dalam jumlah yang sangat berlebih (≥ 10 nisbah stokiometri) untuk mendorong reaksi yang sempurna dengan % hasil metil ester besar (Chongkong, dkk., 2012). Tahap esterifikasi biasa diikuti dengan reaksi transesterifikasi, akan tetapi air dan katalis asam yang dikandungnya harus dipisahkan terlebih dahulu dengan evaporator sebelum produk esterifikasi diumpankan ke tahap transesterifikasi (Thaiyasuit, dkk., 2012).

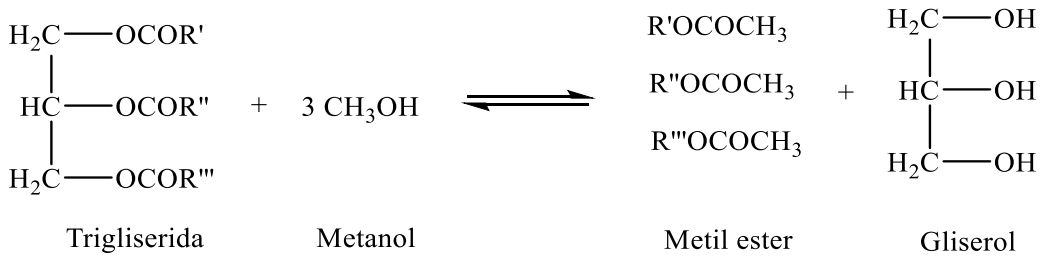


Gambar 2.7 Reaksi esterifikasi dengan katalis asam sulfat.



Gambar 2.8 Mekanisme transesterifikasi dengan katalis basa.

Transesterifikasi merupakan reaksi trigliserida dengan alkohol menghasilkan alkil ester dan gliserol dengan bantuan katalis basa (Arita, dkk., 2008). Reaksi transesterifikasi secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.9. Alkohol yang paling umum digunakan adalah metanol, sehingga disebut juga reaksi metanolisis. Sedangkan katalis basa homogen yang sering digunakan adalah katalis alkali hidroksida seperti NaOH/KOH karena harganya murah dan reaktivitasnya tinggi (Demirbas, 2008). Pada tahap pemisahan menggunakan corong pisah, metil ester yang terbentuk akan berada di fasa atas, sedangkan gliserol berada di fasa bawah (Meher, dkk., 2006).



Gambar 2.9 Reaksi transesterifikasi

Mekanisme reaksi transesterifikasi dengan katalis basa ditunjukkan pada Gambar 2.8. Tahap pertama melibatkan penyerangan ion alkoksida pada gugus karbonil molekul trigliserida yang mengakibatkan terbentuknya intermediet tetrahedral. Senyawa intermediet tersebut selanjutnya bereaksi dengan alkohol menghasilkan ion alkoksida pada tahap kedua. Pada tahap terakhir terjadi penataan ulang intermediet tetrahedral membentuk ester dan digliserida.

2.4.1. Biodiesel Minyak Kemiri (*Aleurites moluccana*)

Tanaman kemiri (*Aleurites moluccana*) termasuk dalam famili *Euphorbiaceae* yang tersebar luas di daerah tropis dan dapat tumbuh dengan cepat pada berbagai macam tekstur tanah (Estrada, dkk., 2007). Buah kemiri tidak dapat langsung dimakan mentah karena beracun, yang disebabkan oleh toxsalbumin. Persenyawaan toxsalbumin dapat dihilangkan dengan cara pemanasan dan dapat dinetralkan dengan penambahan bumbu lainnya seperti garam, merica, dan terasi (Susilowati, 2012). Oleh karena itu, daging buah kemiri hanya dapat digunakan sebagai bumbu dalam jumlah yang relatif kecil. Meskipun demikian, potensi terbesar tanaman kemiri ada pada bijinya karena memiliki kadar minyak tinggi (35 – 65% berat keringnya) yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar (Limbong, 2010).

Minyak kemiri (*Aleurites moluccana*) merupakan *semi drying oil*, berbentuk cair pada suhu kamar, memadat pada suhu -15°C, dan lebih cepat mengering di udara terbuka sehingga tidak dapat digunakan sebagai minyak goreng atau dikonsumsi. Hal tersebut dikarenakan minyak kemiri jika kontak dengan udara pada suhu tinggi akan cepat teroksidasi dan berbau tengik yang mengakibatkannya

menjadi beracun. Karakteristik dan komposisi asam lemak minyak kemiri dapat dilihat pada Tabel 2.4

Tabel 2.4 Karakteristik dan komposisi asam lemak dari minyak kemiri (Pham, dkk., 2018; Imdadul, dkk., 2017)

Sifat fisika dan kimia	
Densitas (kg/m^3)	914
Viskositas kinematik (mm^2/s)	24,89
Bilangan penyabunan (mg KOH/g)	3,29
Kandungan air (wt%)	0,02
Asam lemak bebas, FFA (wt%)	6,9
Warna	Kuning terang
Komposisi asam lemak bebas (wt%)	
Asam palmitat ($C_{16}H_{32}O_2$)	5,5
Asam stearat ($C_{18}H_{36}O_2$)	6,7
Asam oleat ($C_{18}H_{34}O_2$)	10,5
Asam linoleat ($C_{18}H_{32}O_2$)	48,5
Asam linolenat ($C_{18}H_{30}O_2$)	28,5

Kadar asam lemak bebas yang cukup tinggi membuat sebagian besar pengolahan minyak kemiri menjadi biodiesel dilakukan melalui dua tahap, yakni reaksi esterifikasi – transesterifikasi, untuk mengoptimalkan hasil metil ester yang diperoleh. Hariani, dkk., 2013 memperoleh hasil metil ester minyak kemiri sebesar 89,63% melalui reaksi esterifikasi dengan 0,5 v/v% H_2SO_4, diikuti reaksi transesterifikasi dengan 1 wt% NaOH pada suhu 60°C selama 2 jam waktu reaksi. Produksi metil ester minyak kemiri dengan hasil > 90% berhasil dilakukan oleh Sulistyo, dkk. (2008) melalui reaksi dua tahap dengan menggunakan katalis basa KOH pada tahap transesterifikasi. Hasil serupa juga didapatkan oleh Pham, dkk. (2018) yang menunjukkan bahwa hasil metil ester minyak kemiri sebesar 99,3% dapat dicapai melalui reaksi dua tahap dengan menggunakan 1 wt% KOH pada tahap transesterifikasi. Selain itu, beberapa studi telah menunjukkan bahwa konversi minyak kemiri menjadi metil ester dengan reaksi esterifikasi – transesterifikasi dapat menurunkan viskositas minyak kemiri hingga kisaran nilai 4,24 – 5,09 mm^2/s (Pham, dkk., 2018; Mulana, 2011; Hariani, dkk., 2013; Imdadul, dkk., 2017; Sulistyo, dkk., 2009; 2008). Oleh karena itu, konversi biomassa menjadi

metil ester dapat digunakan sebagai salah satu *pretreatment* dalam proses perengkahan katalitik.

2.4.2. Biodiesel Minyak Jelantah

Minyak jelantah merupakan limbah minyak goreng setelah digunakan dalam beberapa kali proses penggorengan yang banyak diperoleh dari limbah rumah tangga dan restoran (Vinyes, dkk., 2013). Penggunaan minyak jelantah dalam pembuatan biodiesel dapat mengurangi biaya produksi karena harga minyak jelantah yang relatif murah (Enweremadu dan Mbarawa, 2009). Akan tetapi, perlu dicatat bahwa tantangan utama dalam produksi biodiesel dari minyak jelantah adalah konsentrasi kontaminan yang tinggi seperti asam lemak bebas dan kandungan air yang tinggi. Oleh karena itu, perlakuan awal limbah minyak goreng dengan konsentrasi kontaminan yang tinggi perlu dilakukan untuk mencegah terbentuknya sabun selama reaksi transesterifikasi. Sifat dan komposisi asam lemak bebas dari minyak jelantah ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Karakteristik dan komposisi asam lemak dari minyak jelantah (Maneerung, dkk., 2016)

Sifat fisika dan kimia	
Densitas (kg/m^3)	902
Viskositas kinematik (mm^2/s)	32,0
Bilangan penyabunan (mg KOH/g)	201,5
Kandungan air (wt%)	2,6
Asam lemak bebas, FFA (wt%)	1,0
Warna	Kuning terang
Komposisi asam lemak bebas (wt%)	
Asam palmitat ($C_{16}H_{32}O_2$)	19,4
Asam stearat ($C_{18}H_{36}O_2$)	2,6
Asam oleat ($C_{18}H_{34}O_2$)	43,2
Asam linoleat ($C_{18}H_{32}O_2$)	30,1
Asam linolenat ($C_{18}H_{30}O_2$)	4,7

Arquiza, (2017) menggunakan metanol dan katalis NaOH dalam reaksi transesterifikasi minyak jelantah dengan kandungan FFA 1,47 wt%. Hasil biodiesel tertinggi sebesar 94% diperoleh dari suhu reaksi 60 – 65°C, 0,5 wt% katalis, dan

rasio mol metanol:minyak 2:1. Refaat, dkk. (2008) melaporkan hasil studinya tentang faktor-faktor yang mempengaruhi hasil dan karakteristik biodiesel yang dihasilkan dari minyak jelantah. Proses transesterifikasi dilakukan dengan KOH dan NaOH pada dua konsentrasi (0,5% dan 1% w/w), dua suhu reaksi (25 dan 65°C) dan tiga rasio mol metanol/minyak (3:1, 6:1, dan 9:1). % Hasil biodiesel lebih tinggi diperoleh dari reaksi transesterifikasi dengan katalis KOH. Hasil menunjukkan bahwa persen hasil tertinggi (96,15%) diperoleh menggunakan rasio mol metanol:minyak 6:1, 1 wt% KOH, dan suhu 65°C selama 1 jam reaksi.

2.5. Ko-Perengkahan Katalitik Biomassa dengan Limbah Plastik

Teknik ko-perengkahan banyak digunakan karena kemudahan dan efisiensi pengoperasiannya dalam produksi bahan bakar cair. Teknik ini tidak membutuhkan pelarut dan dapat dioperasikan pada tekanan atmosfer. Hasil hidrokarbon cair dari proses ko-perengkahan dinilai lebih besar dibandingkan perengkahan biasa, secara umum antara 1,42 – 22 wt% (Abnisa dan Wan Daud, 2015). Selain itu, proses ko-perengkahan juga dapat menghasilkan bahan bakar cair dengan nilai kalor tinggi, yaitu 34,79 – 45,08 MJ/kg, yang berguna untuk kinerja mesin dalam meningkatkan efisiensi termal dan daya luaran (Chen, dkk., 2016).

Ko-perengkahan katalitik menggunakan dua atau lebih bahan baku yang berbeda dan katalis asam untuk produksi bahan bakar cair. Biomassa dan limbah plastik merupakan material yang umum digunakan sebagai bahan baku dalam proses ko-perengkahan. Penambahan katalis asam dalam proses ko-perengkahan dapat menurunkan suhu reaksi dan meningkatkan hasil serta selektivitas produk hidrokarbon melalui perengkahan katalitik (Zhang, dkk., 2015). Katalis memainkan peran penting dalam mengubah spesi oksigenat dari senyawa intermediet volatil yang dihasilkan dari proses dekomposisi termal menjadi produk aromatik dan olefin melalui reaksi seperti perengkahan, deoksigenasi, oligomerasi, dan aromatisasi (Zhou, dkk., 2014). Spesi oksigenat merujuk pada senyawa yang mengandung oksigen seperti asam karboksilat, keton, aldehid, ester, furan, alkohol, dan fenol. Selain meningkatkan mekanisme degradasi biomassa, penggunaan katalis juga berfungsi untuk menggeser produk hidrokarbon ke arah fraksi yang lebih pendek

($C_5 – C_{12}$) dan atau kisaran aromatik (Hassan, dkk., 2016). Tabel 2.6 menunjukkan beberapa hasil studi dari proses perengkahan biomassa dengan limbah plastik.

Tabel 2.6 Hasil studi ko-perengkahan katalitik biomassa dengan limbah plastik

Bahan Baku		**Kondisi reaksi**			**Hasil**		**Ref.**
Biomassa	**Plastik**	**Katalis**	**Rasio plastik: biomassa**	**Suhu (°C)**	**Hasil (%)**	**Selektivitas produk aromatik terbesar**	
Kayu kering	PS	HZSM-5	1:4	500 – 650	70,5% hidrokarbon aromatik	Stirena dan α-metilstiren	Hassan, dkk., 2016
Selulosa	PP	Al-MCM-41	1:3	650	78,2% hidrokarbon cair	Xilena dan trimetil benzena	Chi, dkk., 2018
Black liquor lignin	PP	FCC	1:1	600	18,6% hidrokarbon aromatik	Benzena dan naftalena	Zhang[b], dkk., 2015
	PE				25,3% hidrokarbon aromatik	Benzena dan naftalena	
	PS				55,3% hidrokarbon aromatik	Stirena dan toluena	
Quercus variabilis	Plastik film	HZSM-5	1:1	600	16,28% hidrokarbon aromatik	Toluena dan benzena	Park, dkk., 2019
		HY			4,33% hidrokarbon aromatik	Toluena dan PAH	
Minyak jelantah	HDPE	ZrO_2-keramik	1:1	430	63,1% hidrokarbon cair	19,7% hidrokarbon aromatik	Wang, dkk., 2017
Tongkol jagung	HDPE	HZSM-5	1:1	500	53% hidrokarbon cair	Benzena dan toluena	Muneer, dkk., 2019
			4:3		59% hidrokarbon cair	Benzena dan stirena	
			2:1		60% hidrokarbon cair	Stirena dan etilbenzena	
			4:1		63% hidrokarbon cair	Stirena dan etilbenzena	
			10:1		66% hidrokarbon cair	Stirena dan etilbenzena	
Serbuk kayu pinus	PE	LOSA-1	1:1	600	42,5% hidrokarbon aromatik	Benzena dan toluena	Zhang[a], dkk., 2014

Lanjutan Tabel 2.6 Hasil studi ko-perengkahan katalitik biomassa dengan limbah plastik

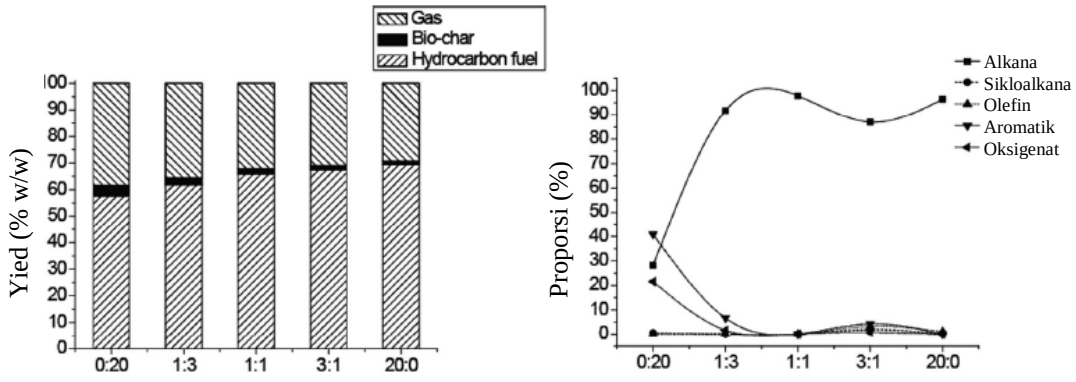
Bahan Baku		Kondisi reaksi			Hasil		Ref.
Biomassa	**Plastik**	**Katalis**	**Rasio plastik: biomasa**	**Suhu (°C)**	**Hasil (%)**	**Selektivitas produk aromatik terbesar**	
Serbuk kayu pinus	PE	FCC FCC	1:4	600	14,7% hidrokarbon aromatik	Benzena dan naftalena	Zhang[a], dkk., 2014
			1:1		37,1% hidrokarbon aromatik	Benzena dan naftalena	
	PP		1:1		34,7% hidrokarbon aromatik	Benzena dan naftalena	
	PS		1:1		47,0% hidrokarbon aromatik	Benzena dan naftalena	

Dari Tabel 2.6 di atas dapat dilihat bahwa ada beberapa faktor yang mempengaruhi hasil dan selektivitas produk hidrokarbon yang diperoleh dari proses ko-perengkahan katalitik, diantaranya komposisi bahan baku, jenis katalis, dan suhu reaksi.

2.5.1 Pengaruh Rasio Bahan Baku Plastik: Biomassa

Komposisi bahan baku sangat mempengaruhi interaksi antara biomassa dengan limbah plastik pada proses ko-perengkahan katalitik yang dapat mengakibatkan perbedaan hasil dan komposisi produk hidrokarbon cair. Secara umum, peningkatan rasio pencampuran plastik pada proses ko-perengkahan biomassa dapat meningkatkan hasil hidrokarbon cair (Zhang[a], dkk., 2014; Zhang[b,] dkk., 2015; Wan Mahari, dkk., 2018). Wang, dkk. (2017**)** menyelidiki pengaruh rasio HDPE: limbah minyak goreng (1:3, 1:1, dan 3:1) terhadap hasil dan komposisi bahan bakar hidrokarbon yang diperoleh dari proses ko-perengkahan katalitik pada suhu 430°C. Hasil studi yang diperoleh dapat dilihat Gambar 2.9. Dari Gambar 2.10 (a) dapat dilihat bahwa hasil hidrokarbon cair meningkat, sedangkan gas dan kokas berkurang seiring meningkatnya rasio HDPE: limbah minyak goreng. Hal tersebut dikarenakan HDPE menyediakan hidrogen dalam jumlah yang cukup selama proses ko-perengkahan berlangsung yang dapat menekan pembentukan kokas akibat

reaksi sekunder antara HDPE dan radikal limbah minyak goreng. Peningkatan hasil hidrokarbon cair (dari 47% menjadi 70%) juga diamati oleh Muneer, dkk. (2019) dengan bertambahnya rasio limbah plastik: biomassa. Rasio optimum yang didapatkan untuk proses ko-perengkahan limbah PS dengan tongkol jagung adalah 3:1.



Gambar 2.10 Pengaruh rasio HDPE: limbah minyak goreng terhadap (a) Hasil dan (b) Komposisi hidrokarbon cair (Wang, dkk., 2017).

Pada beberapa penelitian sebelumnya terdapat perbedaan hasil temuan tentang pengaruh rasio plastik: biomassa terhadap komposisi produk hidrokarbon cair. Wang, dkk. (2017) melaporkan bahwa peningkatan rasio plastik:biomassa pada proses ko-perengkahan katalitik HDPE dengan limbah minyak goreng mengakibatkan penurunan proporsi senyawa aromatik dan peningkatan senyawa alkana dalam komposisi hidrokarbon cair yang dihasilkan (Gambar 2.10 (b)). Akan tetapi Zhang[a], dkk. (2014); Zhang[b], dkk. (2015) dan Zhang, dkk. (2014) menjelaskan sebaliknya, yaitu peningkatan rasio plastik:biomassa dapat meningkatkan proporsi senyawa aromatik dan olefin pada proses ko-perengkahan katalitik. Peningkatan hasil hidrokarbon aromatik tersebut dikarenakan reaksi Diels-Alder antara furan (senyawa intermediet utama dari perengkahan katalitik biomassa) dan olefin ringan (senyawa intermediet dari perengkahan katalitik limbah plastik) mendorong terjadinya efek sinergis positif dalam pembentukan senyawa aromatik (Park, dkk., 2019). Adanya temuan yang bertentangan tersebut

mengindikasikan bahwa jenis plastik dan biomassa dapat turut andil mempengaruhi efek sinergis yang berlangsung dalam pembentukan senyawa hidrokarbon.

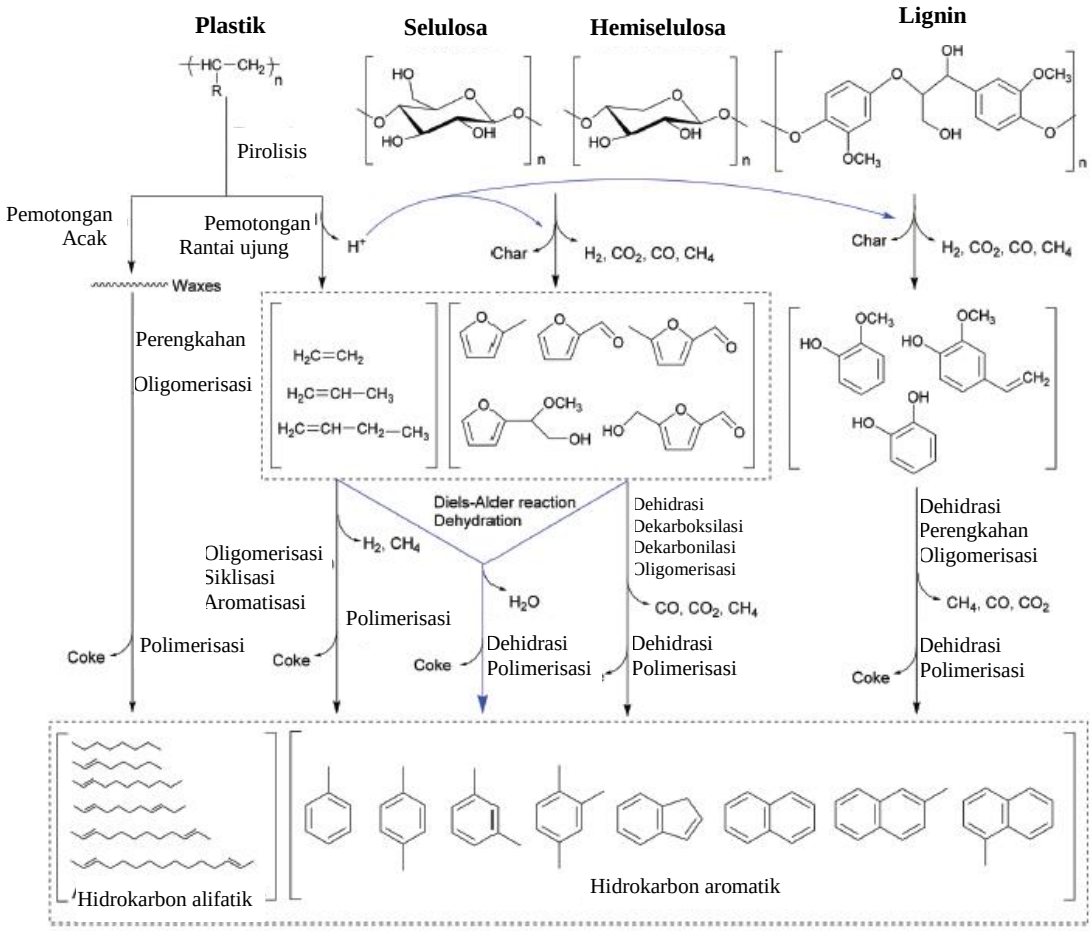
2.5.2. Mekanisme Ko-Perengkahan Katalitik Biomassa dengan Limbah Plastik

Mekanisme ko-perengkahan katalitik dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu mekanisme antara biomassa dan polimer plastik selama degradasi termal dan mekanisme antara senyawa volatil hasil pirolisis pada situs aktif katalis. Pada beberapa penelitian sebelumnya diketahui bahwa terjadi efek sinergis positif dalam pembentukan produk hidrokarbon aromatik selama proses ko-perengkahan katalitik biomassa dan limbah plastik (Li, dkk., 2014; Muneer, dkk., 2019; Park, dkk., 2019; Wan Mahari, dkk., 2018). Hal tersebut dikarenakan adanya interaksi antara senyawa oksigenat dari biomassa dan olefin ringan dari polimer plastik melalui beberapa jalur reaksi. Misalnya, pembentukan hidrokarbon aromatik melalui reaksi Diels-Alder dan dehidrasi. Jalur reaksi tersebut dapat mendorong produksi aromatik dan mengurangi pembentukan kokas dari reaksi polimerisasi furan (Li, dkk., 2014). Zhang, dkk. (2016) mengajukan mekanisme reaksi yang terjadi pada ko-perengkahan katalitik biomassa dan limbah plastik sebagaimana disajikan pada Gambar 2.11.

Dalam degradasi termal, selulosa dapat melalui serangkaian reaksi dehidrasi, dekarbonilasi, dan dekarboksilasi untuk menghasilkan senyawa furan. Tidak seperti selulosa, lignin dalam biomassa didekomposisi menjadi senyawa fenolik. Adapun degradasi termal plastik terjadi melalui dua mekanisme (pemotongan acak dan pemotongan rantai-ujung) yang berbeda dari biomassa. Dua mekanisme yang disebutkan di atas terjadi secara bersamaan, menghasilkan radikal bebas bersama dengan rantai karbon yang panjang. Pada saat yang sama, fragmen radikal dapat diubah menjadi hidrokarbon rantai lurus melalui reaksi transfer hidrogen. Hidrogen dari degradasi termal plastik bertindak sebagai akseptor kuat yang dapat menekan pembentukan kokas.

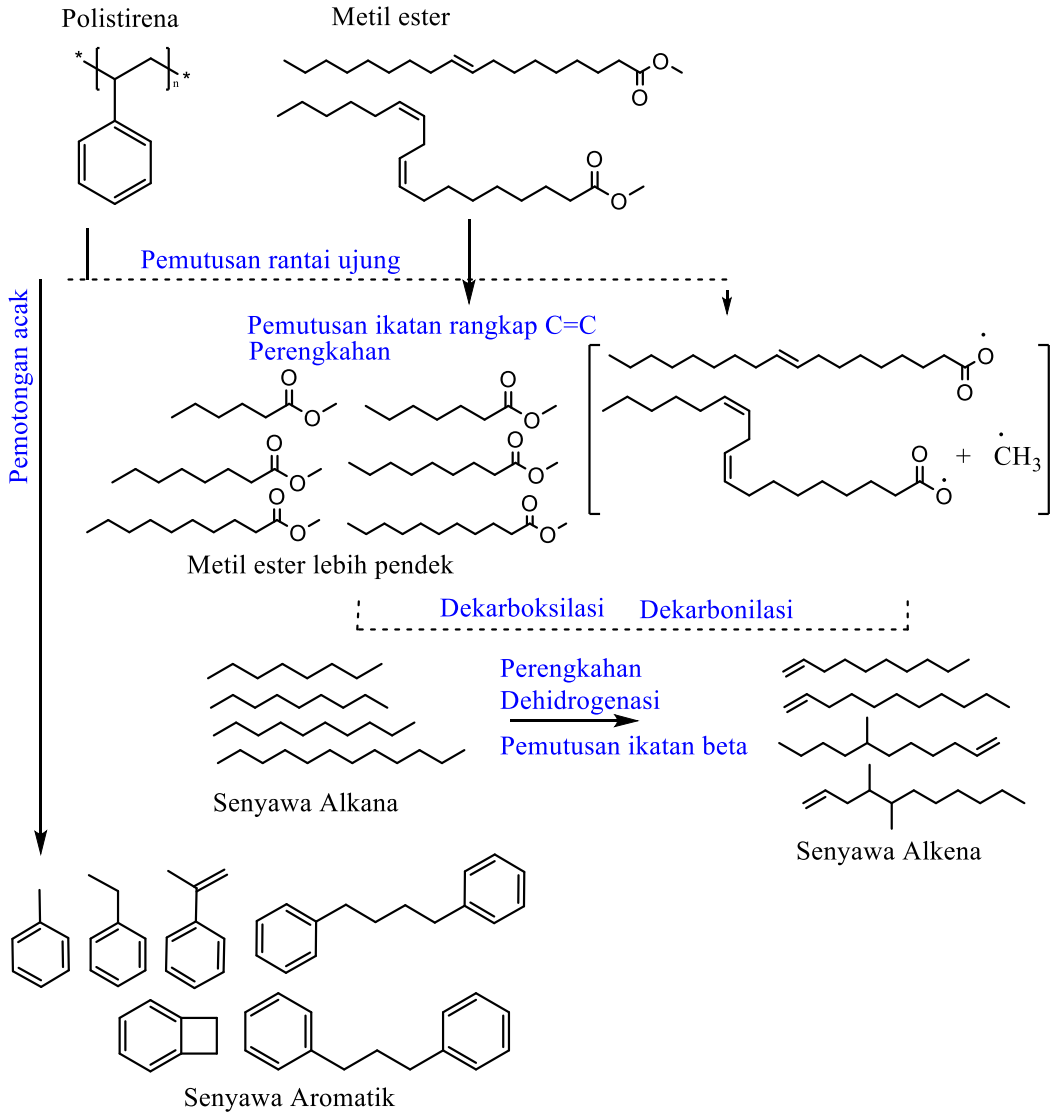
Lilin (*wax*) dengan berat molekul besar dari degradasi termal plastik secara dominan dapat mengalami perengkahan katalitik pada katalis berbasis zeolit

melalui dua mekanisme karbokation, sehingga menghasilkan olefin ringan. Di sisi lain, sejumlah kecil lilin dapat secara langsung mengalami perengkahan katalitik dan reaksi oligomerisasi untuk membentuk alkana cair dan olefin. Olefin ringan selanjutnya dapat bereaksi dengan senyawa furan melalui reaksi Diels-Alder diikuti oleh reaksi dehidrasi untuk membentuk hidrokarbon aromatik. Sementara itu, olefin-turunan plastik ini secara individual dapat mengalami reaksi siklisasi, aromatisasi, dan oligomerisasi untuk memperoleh hidrokarbon aromatik. Reaksi Diels-Alder adalah jalur reaksi dominan selama ko-perengkahan katalitik. Selain itu, senyawa fenolik secara individual dikonversi menjadi hidrokarbon aromatik oleh katalis zeolit melalui reaksi dehidrasi, perengkahan, dan oligomerisasi.



Gambar 2.11 Jalur reaksi pada proses ko-perengkahan katalitik biomassa dan limbah plastik (Zhang, dkk., 2016).

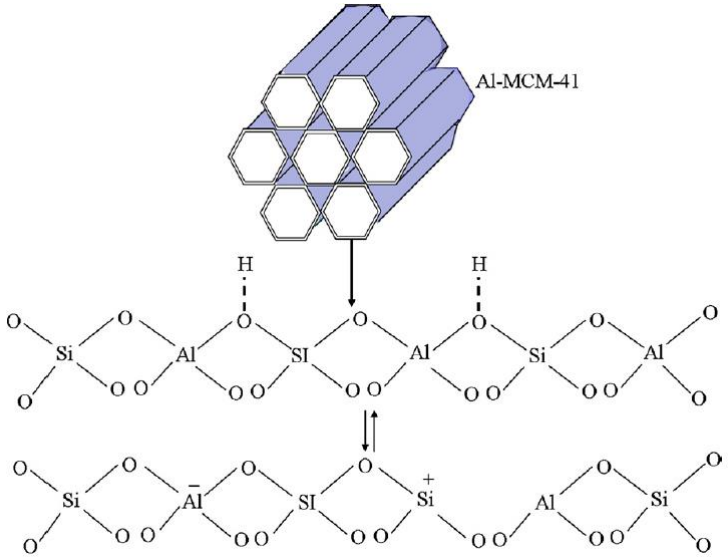
Kemungkinan mekanisme terjadinya perengkahan katalitik PS dengan asam lemak telah dipelajari oleh (Veses dkk., 2019) dan mekanisme tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2.12. Pada gambar tersebut dijelaskan bahwa ada dua rute perengkahan yang terjadi dalam proses perengkahan PS, yitu pemotongan acak dominan yang menghasilkan senyawa turunan stirena dan pemotongan rantai akhir akan menghasilkan H_2 dan radikal bebas yang selanjutnya ditransformasikan menjadi hidrokarbon rantai panjang melalui reaksi dehidrasi, dekarbonilasi, dan dekarboksilasi.



Gambar 2.12 Kemungkinan mekanisme perengkahan katalitik PS dengan asam lemak (Veses dkk., 2019)

2.6. Katalis Al-MCM-41

MCM-41 merupakan padatan mesopori dengan susunan heksagonal seragam yang ukurannya dapat bervariasi dari 1,4 nm hingga lebih dari 10 nm dan memiliki luas permukaan lebih dari 1000 m^2/g dengan keasaman sedang (Adam, dkk., 2006). MCM-41 memiliki sifat yang baik sebagai *template* atau katalis karena memiliki ketahanan termal yang baik dan ukuran pori seragam. Selain itu, keasaman MCM-41 dapat diatur dengan mengontrol rasio Si/Al (Amrullah, 2018) maupun menambahkan ion logam seperti aluminium, titanium, dan zirkonium kedalam struktur kerangka aluminosilikat (Naik, dkk., 2010). Struktur kerangka Al-MCM-41 disajikan pada Gambar 2.13. Iliopoulou, dkk. (2007) mempelajari peningkatan uap pirolisis biomassa secara *in-situ* dengan memanfaatkan katalis Al-MCM-41 dengan rasio Si/Al yang berbeda (30 dan 50). Mereka melaporkan bahwa Al-MCM-41 dengan rasio Si/Al 30 meningkatkan konversi senyawa hidrokarbon menjadi gas dan kokas, sedangkan Al-MCM-41 dengan rasio Si/Al 50 mendorong pembentukan fenol yang dapat dianggap sebagai hidrokarbon yang diinginkan.



Gambar 2.13 Struktur heksagonal Al-MCM-41 (Naik, dkk., 2010).

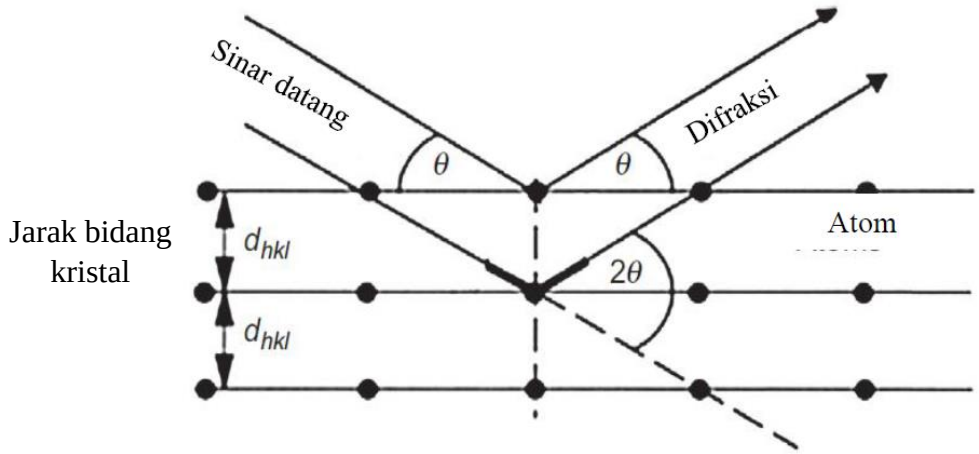
Penggabungan aluminium ke dalam kerangka MCM-41 dapat meningkatkan keasaman dan aktivitas katalitik dari katalis ini. Selain itu, pengenalan logam tunggal atau bimetal ke dalam kerangka aluminosilikat mesopori

Al-MCM-41 menghasilkan efek positif dalam meningkatkan hasil *bio-oil* dalam pirolisis katalitik biomassa atau plastik (Yu, dkk., 2013). Karnjanakom, dkk. (2017) telah menggunakan katalis Al-MCM-41 dalam perengkahan batang bunga matahari dan menghasilkan hasil bahan bakar cair sebesar 86,5% yang memenuhi standar kualitas biodiesel. Chi, dkk. (2018) melaporkan bahwa Al-MCM-41 memiliki aktivitas deoksigenasi dan perengkahan yang lebih baik dibandingkan MCM-41 pada proses ko-perengkahan katalitik limbah plastik PP dan selulosa. Katalis Al-MCM-41 dapat memberikan hasil bahan bakar cair sebesar 78,2% dengan peningkatan selektivitas terhadap produk hidrokarbon aromatik dan olefin.

2.7. Karakterisasi Katalis

2.7.1. Difraksi Sinar-X

Difraksi sinar-X merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengetahui jenis kristal dan kristalinitas suatu material padatan. Metode ini menggunakan prinsip difraksi gelombang sinar-X yang mengalami penghamburan setelah bertumbukan dengan atom kristal dan dapat menghasilkan suatu pola difraksi dengan sudut tertentu. Pola difraksi tersebut bergantung pada panjang gelombang sinar-X tersebut. Semakin pendek panjang gelombang sinar-X maka sudut yang dibentuk akan semakin besar. Pada material yang memiliki struktur kristal, atom-atom tersusun secara teratur dan simetri. Vektor dan bidang atom-atom pada material kristal dapat dijabarkan dalam 3 nilai indeks Miller yang dinotasikan sebagai hkl. (Aliofkhazraei, 2016)



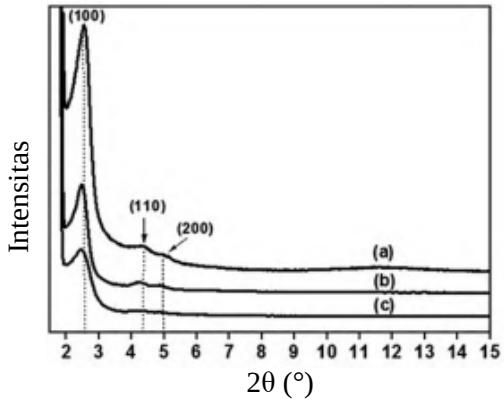
Gambar 2.14 Difraksi sinar-X (Epp, 2016).

Interferensi diantara gelombang yang dipantulkan pada bidang kristal yang berbeda dikenal sebagai difraksi Bragg. Pola difraksi yang dihasilkan merupakan plot intensitas sinar terdifraksi sebagai fungsi 2θ yang dapat dinyatakan dalam persamaan Bragg sebagai berikut:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \qquad (2.1)$$

dimana n adalah orde sinar (bilangan bulat yang nilainya 1, 2, 3, … , n), λ adalah panjang gelombang dari berkas sinar-X, d adalah jarak antar bidang, dan θ adalah sudut difraksi.

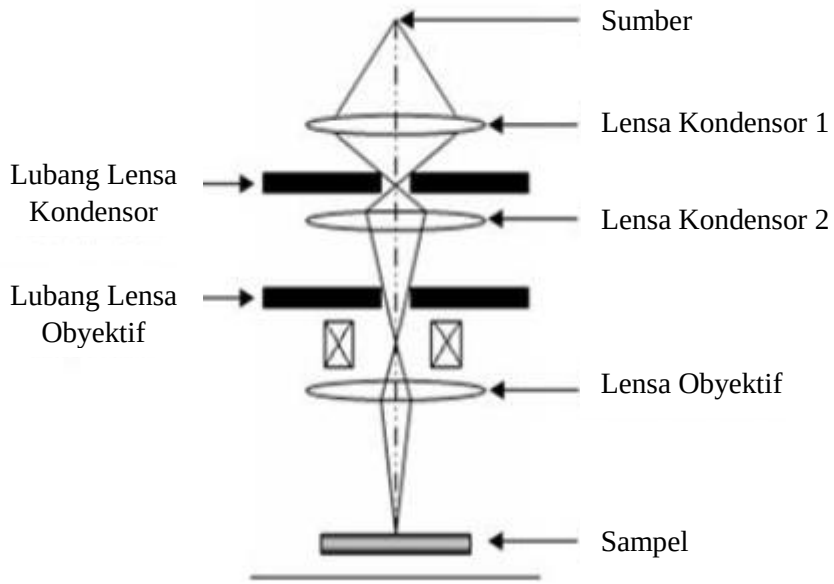
La-Salvia, dkk. (2017) telah mempelajari pengaruh penambahan logam Al kedalam kerangka MCM-41 dan ditunjukkan dengan pola XRD seperti pada Gambar 2.14. Gambar 2.14 (a) MCM-41 menunjukkan sebuah puncak tajam pada 2θ = 2,5° yang bersesuaian dengan bidang (100) dan dua puncak melebar dengan intensitas sangat lemah pada 2θ = 4,3° dan 4,9° yang masing-masing bersesuaian dengan bidang (110) dan (200). Puncak tajam (100) tersebut merupakan karakteristik dari struktur heksagonal MCM-41 murni, sedangkan dua puncak yang lebar yakni (110) dan (200) menunjukkan kristalinitas yang tinggi dan geometri pori yang teratur dari material mesopori. Pada Gambar 2.15 (b) dan (c) dapat dilihat bahwa penambahan logam Al kedalam kerangka MCM-41 tidak menyebabkan perubahan puncak karakteristik dari MCM-41, akan tetapi intensitas puncak karakteristiknya menjadi lebih rendah. Selain itu, peningkatan jarak antar bidang (d_{100} *spacing*) menunjukkan bahwa alumunium berhasil masuk kedalam struktur MCM-41.



Gambar 2.15 Pola XRD (a) MCM-41 (b) Al-MCM-41(50) (c) Al-MCM-41(15) (La-Salvia, dkk., 2017).

2.7.2. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk mengamati sifat permukaan material, morfologi, bentuk, ukuran, dan susunan partikel penyusun material yang berada pada permukaan sampel (Prasetyoko dkk., 2016). Pada analisis SEM, sinar elektron yang berasal dari filamen katoda ditembakkan pada permukaan padatan kemudian sinyal elektron yang diperoleh dari permukaan padatan tersebut dimanfaatkan untuk mengetahui struktur morfologi dan topografi sampel (Mukhopadhyay et al. 2013). Skema kerja SEM ditunjukkan pada Gambar 2.16.

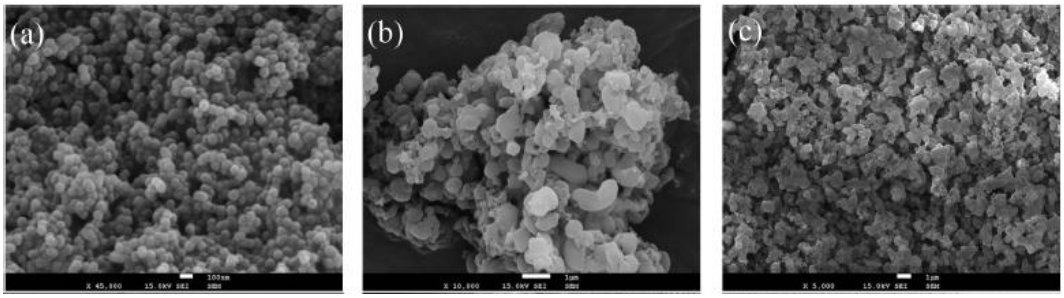


Gambar 2.16 Skema Kerja SEM (Mukhopadhyay, dkk., 2013).

Terdapat tiga detektor yang digunakan dalam SEM yaitu detektor elektron sekunder (SE), *backscattered electron* (BSE), dan sinyal sinar-X (EDS). Detektor SE digunakan untuk pembentukan gambar permukaan sampel dengan resolusi yang lebih tinggi. Detektor BSE dapat memberikan informasi tentang distribusi unsur yang berbeda dalam sampel. Sedangkan pemancaran sinyal sinar-X dapat menghapus berkas elektron dari sampel yang mengakibatkan elektron dengan energi yang lebih tinggi mengisi sel dan melepaskan energi. Karakteristik sinar-X

ini digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur komposisi kelimpahan elemen dalam sampel.

Penambahan spektroskopi EDX (Energy Dispersive X-Ray) pada SEM bertujuan untuk mengidentifikasi komposisi unsur penyusun suatu sampel yang dianalisis. EDX dapat mendeteksi keberadaan suatu unsur pada konsentrasi minimum 0,1%. Aplikasi SEM-EDX meliputi identifikasi suatu material, identifikasi kontaminan, analisis deteksi titik suatu wilayah hingga diameter 10 cm, *quality control screening*, dan lain-lain (Mutalib, dkk., 2017). EDX dihasilkan dari sinar-X karakteristik dengan menembakkan sinar-X pada daerah yang ingin diketahui komposisinya. Selama bertumbukan dengan berkas elektron pada SEM, sampel berinteraksi dengan berkas elektron dan menghasilkan sinar-X yang khas. Karena tidak ada unsur yang memiliki spektrum emisi sinar-X yang sama, maka setiap unsur dalam sampel dapat dibedakan dan diukur konsentrasinya. Selain itu, *elemental mapping* (pemetaan elemen) juga bisa dibuat dengan EDX.



Gambar 2.17 Mikrograf SEM dari (a) MCM-41 Nano (b) MCM-41 Mikro (c) Al-MCM-41 (Gheno, dkk., 2016).

Hasil karakterisasi SEM pada katalis MCM-41 dan Al-MCM-41 yang dilakukan oleh Gheno, dkk. (2016) ditunjukkan pada Gambar 2.17. MCM-41 nano menunjukkan partikel *sphere* yang teratur dengan diameter kurang dari 100 nm, sedangkan MCM-41 menunjukkan partikel agregat yang terbentuk dari partikel primer dengan ukuran rata-rata 1µm dan morfologi yang tidak teratur. Penambahan logam Al kedalam struktur MCM-41 mengakibatkan penurunan ukuran partikel primer dan peningkatan ketidakteraturan partikel.

2.7.3. Adsorpsi-Desorpsi Gas Nitrogen

Adsorpsi nitrogen merupakan adsorpsi fisik untuk menentukan distribusi pori dan luas permukaan spesifik suatu material padatan (Haber dkk., 1995). Bentuk dan ukuran pori material penting diketahui untuk menentukan proses difusi yang melalui material dan selektivitas reaksi katalitik. Luas permukaan spesifik merupakan luas permukaan partikel tiap satuan massa atau volume dari material dan dapat dijelaskan dengan menggunakan teori adsorpsi.

Luas permukaan sampel diukur dari jumlah molekul yang teradsorp pada permukaan monolayer. Sedangkan ukuran pori ditentukan berdasarkan tekanan penguapan gas dalam pori-pori molekul-molekul gas yang teradsorp pada permukaan monolayer dikarenakan adanya gaya tarik antar gas-substrat. Sedangkan molekul gas pada fase multilayer teradsorp karena gaya tarik antar molekul gas. Dari analisa tersebut dapat diketahui luas permukaan spesifik total, distribusi ukuran meso-mikropori, dan volume total meso-mikropori.

Salah satu teori adsorpsi yang dikenal adalah Teori Brunauer-Emmet dan Teller atau disingkat teori BET. Persamaan BET hanya berlaku untuk adsorpsi isotermal yang memenuhi nilai P/Po berkisar antara 0,005 – 0,3. Persamaan tersebut berdasarkan asumsi bahwa terjadi adsorpsi multilayer, terdapat interaksi antar molekul yang teradsorpsi, kecepatan adsorpsi sama dengan kecepatan desorpsi, serta adsorben mempunyai permukaan yang homogen yakni memiliki keadaan energi yang sama. Secara matematis persamaan isotermal BET dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} \times \frac{P}{P_0} \qquad (2.2)$$

Dimana V = jumlah gas yang teradsorpsi pada tekanan P
V_m = jumlah gas dalam monolayer
P_0 = tekanan penjenuhan
C = Konstanta

Grafik isotermal BET merupakan plot antara $P/V((P_0 – P)$ sebagai sumbu y dan P/P_0 sebagai sumbu x. berdasarkan plot tersebut akan didapatkan persamaan garis lurus dengan nilai C-1/VmC sebagai slope dan nilai 1/VmC sebagai

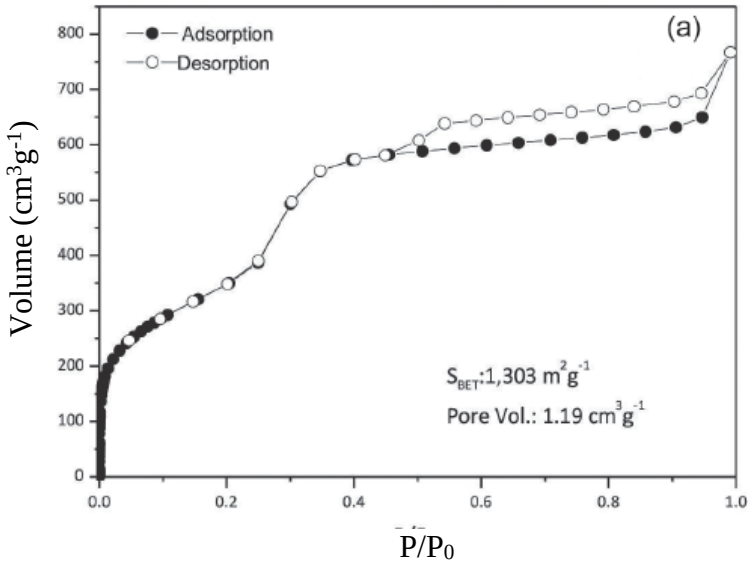
perpotongan (*intersep*), sehingga diperoleh nilai Vm berdasarkan persamaan berikut:

$$V_m = \frac{1}{(\text{intersep+slope})} \tag{2.3}$$

Sedangkan luas permukaan dapat dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$\text{SA} = \frac{V_m}{(0{,}0244)} NA \times 10^{-19} \tag{2.4}$$

Dimana SA = luas permukaan
Vm = jumlah adsorbat (cm^3/g padatan)
N = bilangan Avogadro
A = daerah penampang lintang secara molekuler pada adsorbat (nm)



Gambar 2.18 Grafik isotermal adsorpsi-desorpsi gas N_2 dari Al-MCM-41 (Santos, dkk., 2018).

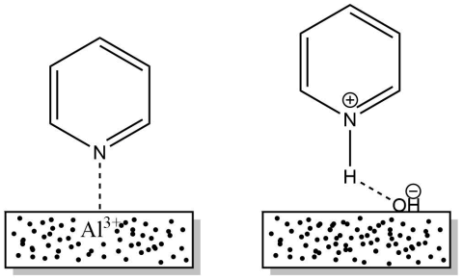
Pada Gambar 2.18 diberikan grafik isotermal adsorpsi-desorpsi gas nitrogen dari katalis Al-MCM-41. Grafik isotermal yang diperoleh bersesuaian dengan grafik isotermal tipe IV dan menunjukkan loop histerisis yang merupakan karakteristik dari material mesopori dengan tubular mesopori dalam susunan heksagonal yang teratur. Luas permukaan spesifik BET dan volume pori yang teramati secara berturut-turut sebesar 1303 m^2/g dan 1,19 cm^3/g (Santos, dkk., 2018).

2.7.4. Penentuan Keasaman Permukaan Padatan

Prinsip dari spektroskopi inframerah adalah gerak vibrasi molekul saat dikenai radiasi sinar inframerah. Inti-inti atom suatu molekul yang terikat secara kovalen akan mengalami getaran saat molekul tersebut menyerap radiasi inframerah. Energi yang diserap menyebabkan kenaikan amplitudo getaran atom-atom yang terikat. Tipe ikatan tertentu akan memberikan serapan pada panjang gelombang tertentu. Hal ini menyebabkan setiap molekul memiliki spektrum inframerah yang khas, sehingga dapat dibedakan dengan molekul lainnya melalui posisi dan intensitas pita serapannya. Spektroskopi inframerah dapat digunakan untuk menentukan struktur dan analisis kualitatif (Sastrohamidjojo, 1992).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan keasaman katalis adalah metode adsorpsi piridin-FTIR. Pada metode ini digunakan *probe* piridin yang akan berinteraksi dengan sisi katalitik suatu katalis (Layman, dkk., 2003). Piridin dipilih sebagai *probe* karena piridin merupakan basa Lewis yang lebih stabil dan selektif daripada NH_3, lebih kuat teradsorpsi daripada CO dan CH_3CN, serta lebih sensitif terhadap sisi asam Lewis daripada NO (Zaki, dkk., 2001).

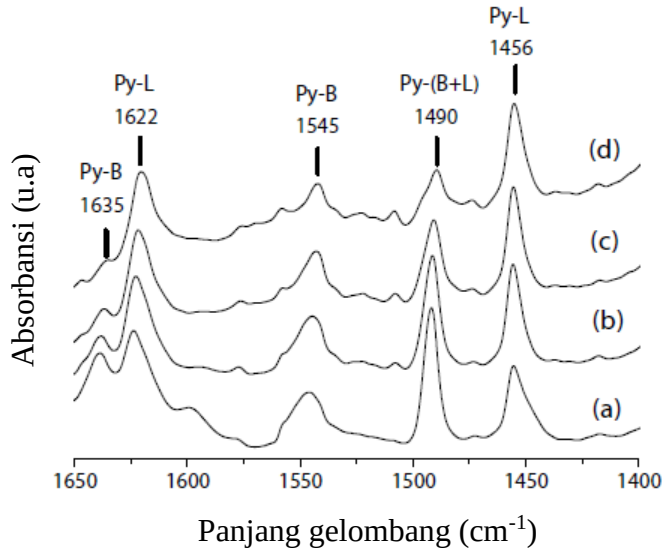
Piridin sebagai *probe* yang bersifat basa akan teradsorpsi pada permukaan katalis yang bersifat asam. Semakin banyak piridin yang teradsorpsi, maka intensitas spektrum yang dihasilkan semakin tinggi. Spektroskopi FTIR dapat digunakan untuk mengetahui interaksi antara piridin dengan kation logam yang memiliki orbital kosong (sisi asam Lewis) dan interaksi piridin dengan proton membentuk ion piridium (sisi asam Bronsted) yang secara skematik dapat digambarkan pada Gambar 2.19.



(a) (b)

Gambar 2.19 Skema interaksi piridin dengan (a) Asam Lewis (b) Asam Bronsted (Zaki, dkk., 2001).

Pada umumnya pita serapan adsorpsi piridin berada pada bilangan gelombang 1700 – 1270 cm^{-1}. Pita adsorpsi asam Lewis berada pada bilangan gelombang 1440 – 1460 cm^{-1}, sedangkan asam Bronsted pada bilangan gelombang 1550 – 1545 dan 1640 cm^{-1} (Layman dkk., 2003). Contoh spektra adsorpsi piridin dari Al-MCM-41 ditunjukkan pada Gambar 2.20.



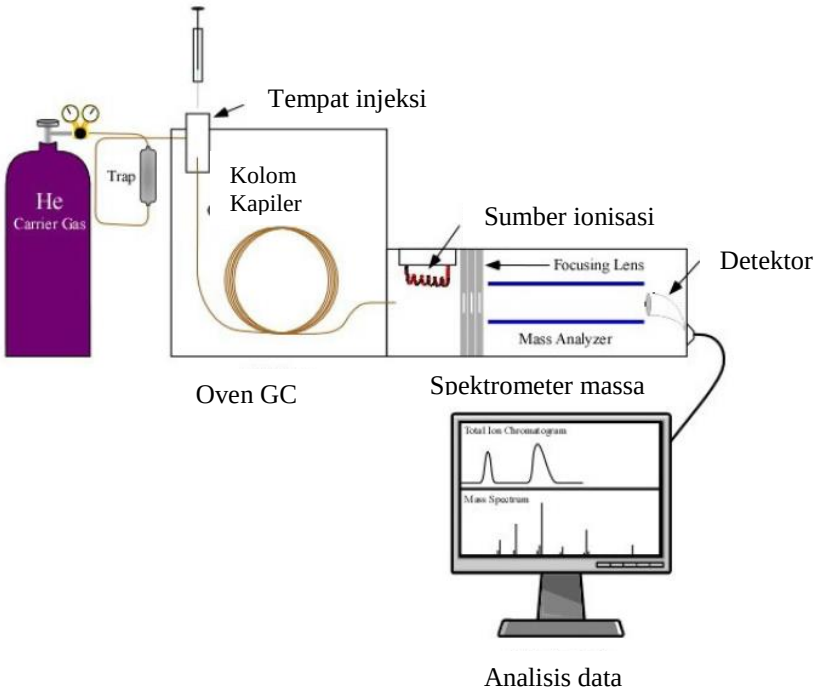
Gambar 2.20 Spektra FTIR-Piridin Al-MCM-41 pada suhu kalsinasi (a) 50°C (b) 150°C (c) 250°C (d) 350°C (Brahmi, dkk., 2016).

2.8. Karakterisasi Bahan Bakar Cair

2.8.1. Kromatografi Gas – Spektroskopi Massa (GC-MS)

Metode analisa menggunakan GC-MS (*Gas Chromatography-Mass* Spectroscopy) digunakan untuk identifikasi secara kualitatif dan pengukuran kuantitatif dari komponen individual dalam senyawa campuran kompleks yang mudah menguap atau volatil (Basu, 2018). Instrumen ini merupakan perpaduan dari dua buah instrumen, yaitu kromatografi gas yang berfungsi untuk memisahkan sampel menjadi senyawa tunggal dan spektroskopi massa yang berfungsi untuk mendeteksi jenis senyawa tunggal yang dipisahkan berdasarkan pola fragmentasinya. Pengukuran menggunakan GC-MS pada umumnya hanya dibatasi untuk senyawa dalam fasa gas atau cairan yang memiliki tekanan uap minimal 10 – 10 torr. Diagram skema kerja GC-MS disajikan pada Gambar 2.21.

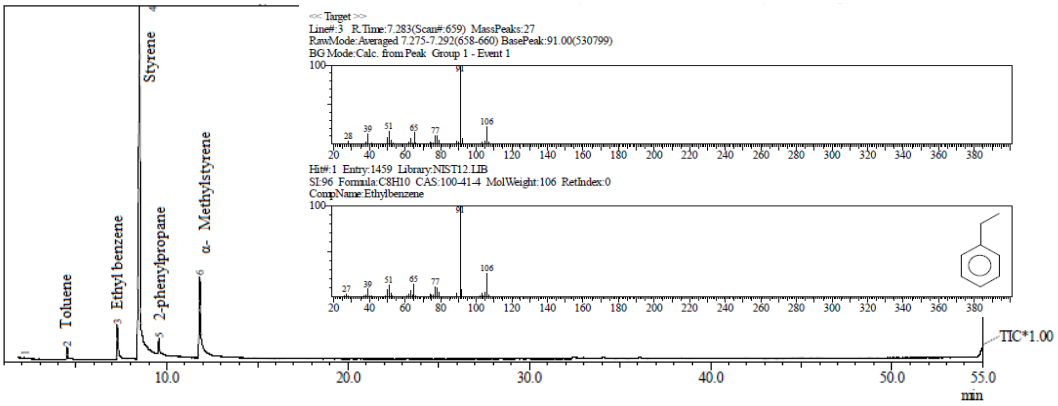
Larutan sampel diinjeksikan ke dalam inlet kromatografi gas akan diubah menjadi fasa uap dan dialirkan melewati kolom kapiler dengan bantuan gas pembawa. Senyawa campuran dipisahkan menjadi senyawa tunggal berdasarkan perbedaan sifat kimianya, yakni interaksi relatifnya dengan lapisan kolom (fase diam) dan gas pembawa (fase gerak), dan waktu yang diperlukan bersifat spesifik untuk masing-masing senyawa (Wu, dkk., 2012). Senyawa yang dielusi dari kolom selanjutnya ditransfer menuju ruang pengionan. Selama ionisasi, senyawa tersebut dibombardir oleh aliran elektron yang mengakibatkan fragmentasi menjadi ion (Mani, dkk., 2017). Setelah itu, ion dipisahkan dalam alat analisis massa (filter) kemudian memasuki detektor. Detektor mengirimkan informasi ke komputer yang merekam semua data yang dihasilkan, mengubah impuls listrik menjadi tampilan visual dan tampilan hard copy. Pencatatan pola fragmentasi yang terbentuk dibandingkan dengan pola fragmentasi senyawa standar yang diindikasikan dengan prosentase *similarity index* (SI).



Gambar 2.21 Diagram skema kerja GC-MS (Wu, dkk., 2012).

Hasil kromatogram GC-MS dari produk perengkahan katalitik limbah PS yang dilakukan oleh Assari, 2019 ditunjukkan pada Gambar 2.22. Berdasarkan hasil

kromatogram tersebut, dapat diketahui bahwa produk perengkahan katalitik limbah PS terdiri dari toluena, etilbenzena, stirena, 2-fenilpropana, dan α-metilstirena. Intensitas terbesar pada puncak karakteristik stirena menunjukkan bahwa stirena merupakan produk utama dengan % hasil terbesar dari proses tersebut.



Gambar 2.22 Kromatogram GC-MS dari produk perengkahan katalitik limbah PS (Assari, 2019).

2.8.2. Densitas

Densitas atau massa jenis didefinisikan sebagai massa per satuan volume. Densitas merupakan salah satu sifat penting pada suatu bahan bakar cair karena dapat digunakan sebagai indikator banyaknya zat-zat pengotor hasil reaksi. Densitas berpengaruh terhadap jumlah bahan bakar yang dapat diinjeksikan ke dalam sistem injeksi yang menyebabkan sistem pembakaran berjalan baik. Jika densitas bahan bakar tinggi, konsumsi bahan bakar menjadi rendah. Sebaliknya, minyak dengan densitas rendah akan mengkonsumsi lebih banyak bahan bakar yang dapat mengakibatkan kerusakan pada mesin. Oleh karena itu, bahan bakar cair dengan densitas telalu rendah maupun terlalu tinggi tidak dikehendaki (Khan dan Hasan, 2006).

2.8.3. Viskositas

Viskositas adalah ukuran besarnya hambatan/tahanan suatu bahan bakar minyak untuk mengalir. Nilai viskositas mengindikasikan kemudahan suatu bahan bakar minyak untuk dipompa dan diatomisasikan. Kenaikan temperatur

mengakibatkan viskositas suatu bahan bakar menurun (Wiratmaja, 2010). Satuan viskositas dalam sistem standar internasional ditetapkan sebagai viskositas kinematik, dengan satuan ukuran cm^2/s atau St (Stokes) (Effendi dan Adawiyah, 2014). Alat ukur yang digunakan untuk menentukan nilai viskositas yaitu viskometer ostwald (Asidu dkk., 2017).

Viskositas dari bahan bakar cair berpengaruh terhadap kemampuan bahan bakar tersebut bercampur dengan udara. Nilai viskositas yang besar cenderung menjadi masalah dari bahan bakar karena kecepatan alir bahan bakar yang melalui injektor dapat mempengaruhi derajat atomisasi di dalam ruang bakar (Hasahatan, dkk., 2012).

2.8.4. Titik Nyala

Titik nyala merupakan suhu terendah dari uap bahan bakar minyak pada permukaan yang dapat terbakar dengan cepat saat didekatkan dengan nyala api. Pengujian titik nyala sangat penting dilakukan untuk mengetahui karakteristik kestabilan bahan bakar terhadap kemungkinan menyala/terbakar serta sebagai pertimbangan cara penyimpanan yang aman (Wiratmaja, 2010). Bahan bakar yang memiliki titik nyala rendah maka lebih mudah terbakar (Sakthivela dkk., 2018).

Titik nyala menandakan kemampuan suatu bahan bakar dapat terbakar serta tinggi rendahnya volatilitas (Setiawati dan Edwar, 2012).Titik nyala dari bahan bakar gasolin dengan metode ASTM D 93 adalah < 42^oC (Ahmad dkk., 2017). Titik nyala yang terlalu rendah akan menimbulkan detonasi berupa ledakan kecil yang dapat terjadi sebelum bahan bakar masuk ke ruang pembakaran, sedangkan titik nyala yang terlalu tinggi menyebabkan keterlambatan pembakaran dalam mesin.

2.8.5. Nilai Kalor

Salah satu sifat bahan bakar yang penting untuk penentuan efisiensi kerja mesin adalah nilai kalor (Khan dan Hasan, 2006). Nilai kalor bahan bakar adalah energi dalam bentuk kalor atau panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar dengan oksigen. Bahan bakar minyak umumnya memiliki nilai kalor yang berkisar antara 10.160-11.000 kkal/kg (Wiratmaja, 2010). Nilai kalor bahan bakar berbanding terbalik dengan berat jenis. Nilai kalor bahan bakar akan semakin

kecil jika memiliki berat jenis yang besar, sebaliknya jika nilai kalor semakin besar maka berat jenis bahan bakar kecil (Sutanto dkk., 2013).

Nilai kalor suatu bahan bakar dapat ditentukan dengan instrumen bom kalorimeter melalui reaksi pembakaran sampel dengan oksigen pada tekanan tinggi. Instrumen ini terdiri dari wadah *stainless steel* yang dikelilingi bak air besar. Bak air bertujuan agar temperatur akhir produk tetap berada di temperatur awal reaktan, yaitu 25^{o}C (Wiratmaja, 2010).

2.8.6. Angka Oktan

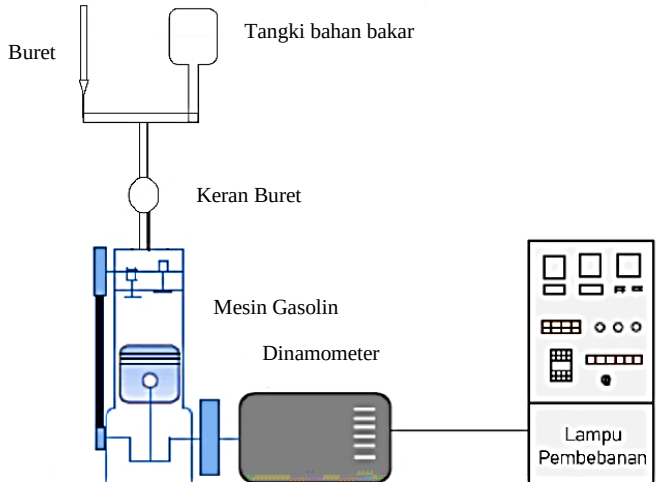
Angka oktan adalah suatu parameter performa *anti-knocking* dari bahan bakar gasolin. Ada dua metode uji dalam menentukan angka oktan, yakni *Research Octane Number* (RON) dan *Motor Octane Number* (MON) yang secara berturut-turut diukur menggunakan metode uji ASTM D 2699 dan ASTM D 2700. Pengujian RON menggunakan dua bahan bakar pembanding utama yaitu n-heptana dan iso-oktana, yang mana masing-masing bahan bakar pembanding memiliki angka oktan 0 dan 100 secara berturut-turut. Uji RON diperlukan untuk memberikan suatu gambaran tentang akselerasi rendah dari suatu kendaraan, beban tinggi, dan ketukan pada suhu medium (Novandy, 2013).

Bensin yang baik mempunyai nilai RON dan MON yang tinggi, sensitivitas yang rendah dan distribusi angka oktan yang homogen. RON ditentukan menggunakan *test engine* dengan variasi *compression ratio*. Semakin tinggi nilai oktan, maka semakin kecil hasil ledakan dini (*pre-ignition*). Motor dengan rasio kompresi rendah dapat menggunakan bahan bakar dengan angka oktan lebih rendah, tetapi motor kompresi tinggi harus menggunakan bahan bakar oktan tinggi untuk menghindari pengapian sendiri dan ketukan (Utut, 2013).

2.9. Karakterisasi Kinerja Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin

Kinerja bahan bakar cair pada mesin dapat diukur dengan beberapa parameter, seperti *Brake Thermal Eficiency* (BTE), *Brake Spesific Fuel Consumtion* (BSFC), *Brake Spesific Energy Consumtion* (BSEC), *Total Heat* (Q_{in}), dan ratio relatif udara bahan bakar (Topgul, 2015). Langkah awal yang dilakukan pada uji performa bahan bakar adalah mengetahui beban (*full load*) dan rpm maksimum.

Tegangan, rpm altemator, arus, dan waktu konsumsi bahan bakar dalam satuan menit adalah sebuah data yang akan diperoleh dari uji kinerja. Proses pengujian pada mesin gasolin dapat ditunjukkan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Skema pengujian pada mesin gasolin (Topgul, 2015).

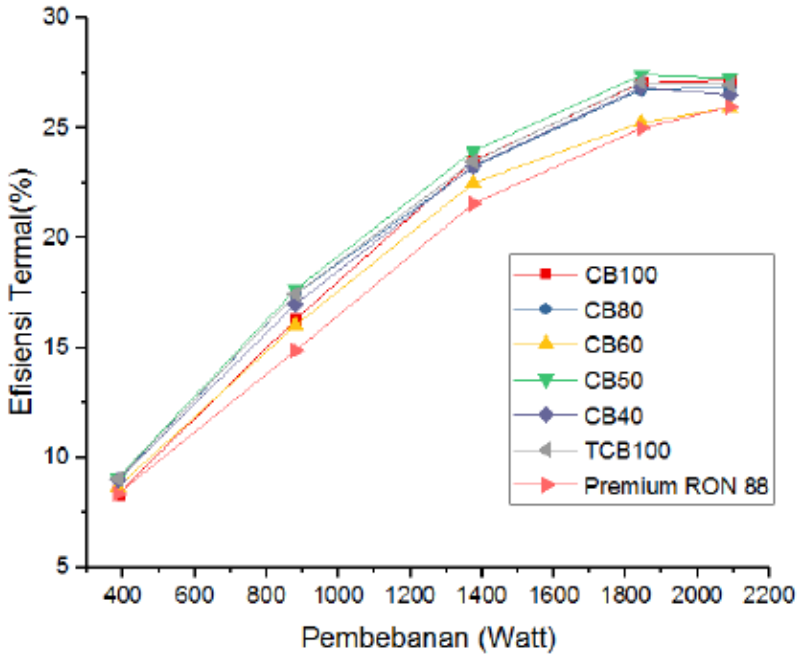
Diantara berbagai parameter yang ada, efisiensi termal merupakan parameter yang penting untuk diketahui pada uji kinerja bahan bakar. Efisiensi termal adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam (Yuvenda, dkk., 2019). Secara teoritis, efisiensi termal dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{Daya efektif yang dihasilkan}}{\text{energi panas bahan bakar/satuan waktu}} \text{ x } 100\% \qquad (2.5)$$

$$\eta = \frac{632}{\text{scf.LHV}} \text{ x } 100\% \qquad (2.6)$$

Dimana LHV (*Low Heating Value*) adalah nilai kalor bahan bakar yang diuji dalam satuan kkal/kg. Dari persamaan 2.5 dapat diketahui bahwa peningkatan efisiensi termal dipengaruhi oleh penambahan daya mesin. Hal tersebut didukung oleh hasil penelitian Juwono, dkk., 2019 yang menunjukkan bahwa efisiensi termal bahan bakar cair hasil perengkahan katalitik limbah PP dengan ko-reaktan biodiesel

minyak jelantah meningkat seiring bertambahnya nilai daya mesin. Pada daya 2090 watt diperoleh nilai efisiensi termal tertinggi, yakni 27,42%, untuk campuran 10% biogasolin dalam premium 88. Grafik efisiensi termal ditunjukkan pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24 Grafik Efisiensi Termal Bahan Bakar Cair (Juwono, dkk., 2019).

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

3.1.1. Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah alu dan mortar, neraca analitik, oven, *press pellet*, desikator, alat *X-Ray Diffraction (XRD), SEM Zeis Bruker 129 eV, Gas Chromatography-Mass Spectrometer* (GC-MS) tipe *GC-MS QP 2010S SHIMADZU* (Kolom Rtx 5 MS), FTIR-piridin, labu leher tiga 500 mL, termometer, pemanas listrik, kondensor, reaktor pirolisis, erlenmeyer 1000 mL, gelas ukur 100 mL, corong pisah 500 mL, pengaduk magnet, piknometer, viskometer Ostwald, bom kalorimeter, dan mesin generator set gasolin.

3.1.2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya minyak jelantah dari minyak goreng sawit merk SUNCO, minyak kemiri (*Aleurites moluccana*), limbah plastik polistirena, metanol p.a. [Merck], KOH p.a. [Merck], katalis Al-MCM-41 yang diperoleh dari penelitian sebelumnya (Juwono dkk., 2013), isolator busi panas merk NGK tipe BP 7 HS yang terdiri dari oksida alumina (Al_2O_3) sebagai material keramik, gas nitrogen (UHP), gas LPG, lem silikon, dan metil tersier butil eter [Merck].

3.2. Prosedur Penelitian

3.2.1. Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah

Sampel minyak jelantah yang digunakan pada pembuatan biodiesel merupakan minyak bekas penggorengan ayam tepung yang diperoleh dari Kantin Pusat FMIPA ITS. Minyak jelantah disaring terlebih dahulu untuk memisahkan pengotor. Minyak jelantah yang telah bebas dari pengotor selanjutnya dipanaskan

pada suhu 105°C selama 1 jam untuk mengurangi kadar airnya. Pengolahan minyak jelantah menjadi biodiesel dilakukan dengan proses transesterifikasi menggunakan katalis basa KOH sebanyak 0.5% dari berat minyak jelantah. Perbandingan mol trigliserida (minyak jelantah) dengan metanol yang dicampurkan yaitu 1:3.

Proses transesterifikasi dilakukan di dalam labu leher tiga 500 mL sebagai reaktor yang dirangkai dengan alat refluks. 200 mL minyak jelantah dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang sudah dirangkai dengan kondensor kemudian dipanaskan hingga suhu 50°C. Sementara itu, 0.8990 gram katalis KOH dilarutkan dalam 51,24 mL metanol hingga homogen. Selanjutnya larutan metoksi dicampurkan ke dalam labu leher tiga yang telah berisi minyak jelantah. Campuran larutan direfluks pada suhu 60°C selama 2 jam sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan 500 rpm. Setelah itu, hasil transesterifikasi dipindahkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan selama 1 x 24 jam hingga terbentuk 2 lapisan. Lapisan atas merupakan biodiesel sedangkan lapisan bawah merupakan gliserol. Biodiesel dipisahkan dari gliserol kemudian diuapkan dengan pompa vakum pada suhu 95°C, kecepatan rotasi 150 rpm, dan waktu evaporasi 3 jam.

3.2.2. Sintesis Biodiesel Kemiri (*Reutealis moluccana*)

Minyak kemiri pada penelitian ini diperoleh dari CV. Nuriana. Biji kemiri diproses menggunakan teknologi *cold press* untuk menghasilkan minyak kemiri murni. Minyak kemiri dengan kandungan *Free Fatty Acid* (FFA) 5,25% dilakukan reaksi esterifikasi terlebih dahulu dengan metanol dan katalis H_2SO_4 4% berat minyak kemiri menggunakan metode refluks untuk menurunkan kadar FFA hingga nilai < 1%. Perbandingan mol trigliserida (minyak jelantah) dengan metanol yang dicampurkan yaitu 1:3. Minyak kemiri dimasukkan ke dalam labu alas bundar dan diletakkan di atas pemanas elektrik. Pada sistem yang lain, metanol dan asam sulfat dicampur pada suhu ruang hingga homogen. Setelah metanol dan asam sulfat tercampur sempurna, campuran dimasukkan ke dalam minyak secara perlahan-lahan. Reaksi esterifikasi dilakukan pada suhu 60°C selama 2 jam sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan 500 rpm. . Setelah itu, hasil

transesterifikasi dipindahkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan selama 1 x 24 jam hingga terbentuk 2 lapisan.

Fasa atas hasil reaksi esterifikasi selanjutnya dilakukan reaksi transesterifikasi dengan metanol dan katalis basa KOH 1 % berat. Reaksi transesterifikasi dilakukan dengan metode refluks. Fasa atas hasil reaksi esterifikasi dimasukkan ke dalam labu alas bundar dan diletakkan di atas pemanas elektrik. Pada sistem yang lain, metanol dan KOH dicampur pada suhu ruang. Setelah metanol dan KOH tercampur sempurna, campuran dimasukkan ke dalam minyak secara perlahan-lahan. Reaksi transesterifikasi dilakukan pada suhu 60°C selama 2 jam sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan 500 rpm. Setelah itu, hasil transesterifikasi dipindahkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan selama 1 x 24 jam hingga terbentuk 2 lapisan. Lapisan atas merupakan biodiesel sedangkan lapisan bawah merupakan gliserol. Biodiesel dipisahkan dari gliserol kemudian diuapkan dengan pompa vakum pada suhu 95°C, kecepatan rotasi 150 rpm, dan waktu evaporasi 3 jam.

3.2.3. Sintesis Minyak Plastik dari Limbah Plastik Polistirena (PS)

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah plastik polistirena (PS) jenis *expanded polystyrene* (EPS). Stirofoam dibersihkan, dikeringkan, kemudian dipotong dengan ukuran 2cm x 2cm. Potongan stirofoam tersebut dimampatkan dengan cara pemanasan pada suhu 80 – 90 °C sambil ditekan hingga membentuk lempengan. Lempengan polistirena kemudian dipirolisis untuk menghasilkan minyak polistirena (PS). Produksi minyak plastik PS dilakukan dalam reaktor pirolisis yang terdiri dari 3 bagian utama yaitu *reactor chamber*, kondensor, dan labu penampung.

Reactor chamber merupakan tempat berlangsungnya proses perengkahan dengan kapasitas 2L dan dilengkapi dengan inlet gas nitrogen. 1 kg lempengan plastik polistirena (PS) dimasukkan kedalam *reactor chamber*. Konektor dipasang hingga melekat pada sisi atas *reactor chamber* dan dihubungkan dengan kondensor. Reaktor dialiri gas nitrogen selama 10 menit, kemudian dipanaskan hingga suhu 250°C selama 120 menit waktu reaksi. Gas hasil proses pirolisis limbah plastik polistirena (PS) terkondensasi membentuk minyak PS setelah melewati kondensor

dan kemudian dialirkan menuju labu penampung. Sementara itu, kokas akan terbentuk pada dasar *reactor chamber*. Volume minyak PS dan massa kokas yang diperoleh masing-masing diukur untuk menghitung % hasil. Komponen fraksi hidrokarbon dari minyak PS hasil pirolisis limbah plastik polistirena dianalisis dengan *gas chromatography-mass spectrometer* (GC-MS).

3.2.4. Persiapan Katalis

Katalis Al-MCM-41 yang diperoleh dari Juwono, dkk. (2013) dipanaskan di dalam oven pada suhu 80°C selama 1 jam untuk menghilangkan uap air yang menutup pori-pori katalis. Katalis Al-MCM-41 kemudian dimasukkan ke dalam desikator. Material keramik pada penelitian ini diperoleh dari isolator busi panas merk NGK tipe BP 7 HS yang terdiri dari oksida alumina (Al_2O_3). Isolator busi digerus dengan alu dan mortar kemudian diayak dengan ayakan mesh 100 untuk mendapatkan ukuran serbuk keramik yang seragam. Katalis Al-MCM-41 selanjutnya dicampur dengan serbuk keramik busi dengan perbandingan komposisi massa 7:3 (Al-MCM-41: keramik) dan diaktivasi kembali pada suhu 80°C. Terakhir, katalis dibentuk menjadi pellet dengan *press pellet*.

3.2.5. Karakterisasi Katalis Al-MCM-41-keramik

3.2.5.1 Struktur Katalis dengan Difraktometer Sinar-X (XRD)

Padatan katalis hasil modifikasi dikarakterisasi strukturnya dengan difraktometer sinar-X (XRD) di Laboratorium Material dan Metalurgi ITS. Mula-mula katalis dipreparasi terlebih dahulu, padatan katalis ditumbuk hingga halus kemudian diletakkan pada sampel holder dan diratakan. Pengukuran dilakukan menggunakan sumber radiasi CuKα yang dioperasikan pada kuat arus 30mA, tegangan 40kV, dan sudut hamburan 2θ antara 5 - 60°. Hasil difraktogram dicocokkan dengan *database* JCPDS-*International Centre for Diffraction Data* tahun 2001 melalui program PCPDFWIN.

3.2.5.2 Struktur Morfologi Permukaan dengan SEM-EDX

Analisis SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan katalis, sedangkan EDX digunakan untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat pada

katalis. Sebelum dilakukan analisis, sampel terlebih dahulu diletakkan secara menyebar pada *carbon tape* yang menempel pada pin kemudian dihembus dengan angin untuk menghilangkan debu yang tertinggal. Pin kemudian dimasukkan ke dalam sampel *holder* untuk proses *coating* dan dimasukkan ke dalam *chamber* SEM pada tegangan 20 kV yang telah terhubung dengan EDX. Permukaan katalis diamati dan ditentukan juga *mapping* serta spektra komposisi unsur-unsurnya.

3.2.5.3 Luas Permukaan dan Porositas Katalis dengan Metode Adsorpsi Gas N_2

Pengukuran luas permukaan dan porositas katalis dilakukan dengan metode adsorpsi-desorpsi gas N_2 pada suhu 77.35K dalam keadaan vakum. Padatan katalis di *degassing* dengan aliran gas N_2 dengan laju alir 30 cm^3/menit pada suhu 125°C selama 3 jam untuk menghilangkan gas-gas pada permukaan katalis. Persamaan Brunauer-Emmett-Teller digunakan untuk menghitung luas permukaan katalis, sedangkan volume pori diukur dengan metode *Barret-Joyner-Halenda* (BJH).

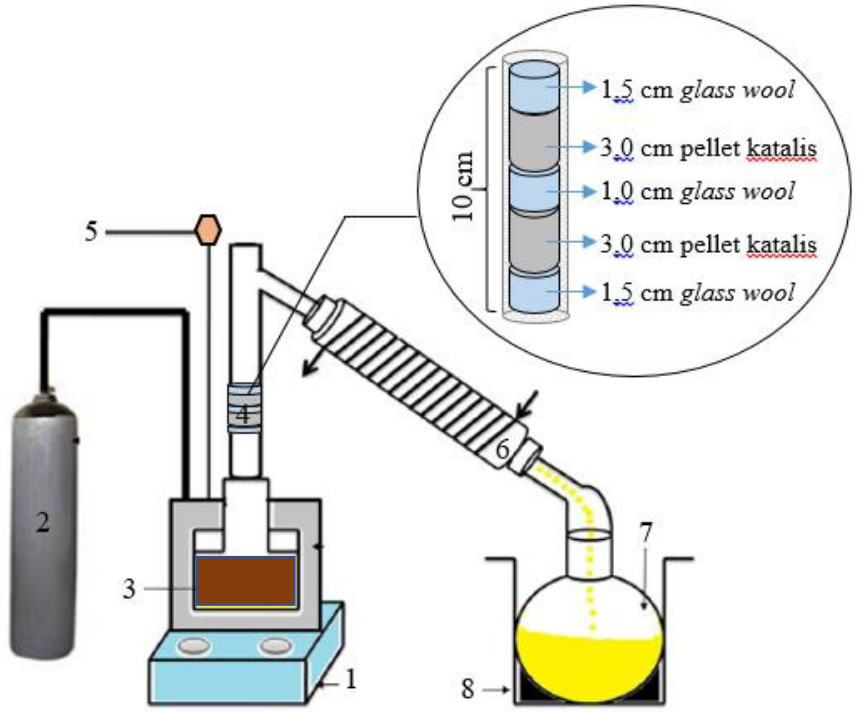
3.2.5.4 Keasaman Katalis dengan Metode Adsorpsi Piridin-FTIR

Keasaman katalis ditentukan dengan metode adsorpsi piridin-FTIR. Uji keasaman katalis dilakukan dengan memasukkan katalis sebanyak ±80 mg ke dalam pipa kaca kemudian disumbat dengan *glass wool* pada kedua ujungnya. Katalis dipanaskan pada suhu 150°C selama 1 jam sambil dialiri gas N_2. Selanjutnya salah satu sumbatan dibuka kemudian katalis ditetesi piridin sebanyak 60 µL dan ditutup kembali. Katalis dipanaskan kembali pada suhu 150°C selama 3 jam dengan aliran gas N_2. Setelah itu katalis didiamkan selama 10 menit pada suhu kamar dan dianalisis dengan spektrofotometer inframerah (FTIR) pada bilangan gelombang 1300 – 1900 cm^{-1}.

3.2.6. Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Minyak Jelantah

Produksi bahan bakar cair dilakukan di dalam reaktor perengkahan katalitik yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. *Reactor chamber* digunakan sebagai tempat bahan baku, yakni minyak PS dengan biodiesel jelantah maupun biodiesel kemiri,

dimana reaksi perengkahan termal berlangsung. *Tubular reactor* digunakan sebagai wadah katalis dan tempat berlangsungnya perengkahan katalitik. *Tubular reactor* dirancang pada bagian atas reaktor perengkahan agar gas hasil perengkahan termal dapat melewati pori katalis untuk mengalami reaksi perengkahan katalitik lebih lanjut. Gas hasil perengkahan katalitik selanjutnya dialirkan menuju kondensor dan terkondensasi menjadi cairan yang ditampung dalam *oil tank* di bagian bawah rangkaian reaktor perengkahan.



Keterangan:

1. Sumber panas
2. Aliran gas N_2
3. *Reactor chamber*
4. *Tubular reactor*
5. Termometer
6. Kondensor
7. Labu penampung
8. Water/ice bath

Gambar 3.1 Desain reaktor perengkahan katalitik

Katalis disusun secara bertingkat untuk memungkinkan reaksi perengkahan katalitik yang efektif. 9 gram katalis Al-MCM-41-keramik yang telah dibentuk menjadi pellet disusun dalam kawat alluminium sepanjang 10 cm dengan susunan 1,5 cm glass wool: 3,0 cm katalis: 1,0 cm glass wool: 3,0 cm katalis: 1,5 cm glass wool pada bagian *tubular reactor*. Untuk variasi rasio limbah plastik: biomassa 1:1,

500 mL minyak polistirena (PS) dicampur dengan 500 mL biodiesel minyak jelantah dan diaduk terlebih dahulu dengan pengaduk magnetik pada kecepatan 350 rpm selama 15 menit. Campuran minyak polistirena (PS) dan biodiesel minyak jelantah dimasukkan kedalam *chamber reactor* dan ditutup dengan *tubular reactor* yang telah berisi pellet katalis. Gas nitrogen dialirkan selama 15 menit menuju *chamber reactor* untuk mendesak gas oksigen yang ada di dalam reaktor perengkahan. Reaktor kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu 300°C selama 120 menit waktu reaksi. Sampel dikonversi menjadi gas, kemudian gas hasil perengkahan katalitik dikondensasi menjadi bahan bakar hidrokarbon cair dalam kondensor dan ditampung dalam labu penampung setiap 60 menit waktu reaksi.

Produksi bahan bakar cair untuk variasi rasio limbah plastik: biomassa 2:1 dan 4:3 dilakukan sebagaimana prosedur kerja di atas dengan volume total campuran 1000 mL. Perbandingan volume bahan baku untuk masing-masing variasi pada proses ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak jelantah disajikan pada Tabel 3.1. Bahan bakar yang dihasilkan dari masing-masing variasi selanjutnya dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui komponen fraksi penyusunnya.

Tabel 3.1. Variasi bahan bakar cair ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak jelantah

No.	Bahan Bakar Cair	Rasio limbah plastik: biomassa	Volume Minyak PS	Volume Biodiesel Minyak Jelantah
1.	PJ50	1:1	500 mL	500 mL
2.	PJ67	2:1	667 mL	333 mL
3.	PJ57	4:3	571 mL	429 mL

3.2.7. Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Minyak Kemiri

Bahan baku pada tahapan ini berupa minyak plastik polistirena (PS) dan biodiesel minyak kemiri. Produksi bahan bakar cair dilakukan di dalam reaktor perengkahan katalitik seperti pada produksi bahan bakar cair dari minyak PS dengan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah sebelumnya. Untuk variasi rasio limbah plastik: biomassa 1:1, 500 mL biodiesel kemiri mula-mula dicampur dengan

500 mL minyak PS dalam gelas beaker kemudian diaduk dengan pengaduk magnetik pada kecepatan 350 rpm selama 15 menit. Campuran tersebut selanjutnya dimasukkan kedalam *chamber reactor* dan disambung dengan *tubular reactor* yang berisi pellet katalis Al-MCM-41-keramik yang telah disusun sedemikian rupa seperti pada Gambar 3.1. Gas nitrogen dialirkan menuju *chamber reactor* selama 15 menit untuk mendesak gas oksigen yang ada di dalam reaktor perengkahan. Reaktor perengkahan katalitik selanjutnya dipanaskan hingga mencapai suhu 300°C dengan total waktu reaksi selama 120 menit. Sampel dikonversi menjadi gas dan dialirkan menuju kondensor. Gas yang terbentuk dikondensasi menjadi bahan bakar hidrokarbon cair oleh kondensor. Bahan bakar cair ditampung dalam penampung minyak yang berada di bagian bawah sistem reaktor setiap 60 menit waktu reaksi.

Produksi bahan bakar cair untuk variasi rasio limbah plastik: biomassa 2:1 dan 4:3 dilakukan sebagaimana prosedur kerja di atas dengan volume total campuran 1000 mL. Perbandingan volume bahan baku untuk masing-masing variasi pada proses ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak kemiri disajikan pada Tabel 3.2. Bahan bakar yang dihasilkan dari masing-masing variasi selanjutnya dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui komponen fraksi penyusunnya.

Tabel 3.2. Variasi bahan bakar cair ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak kemiri

No.	Bahan Bakar Cair	Rasio limbah plastik: biomasa	Volume Minyak PS	Volume Biodiesel Kemiri
1.	PK50	1:1	500 mL	500 mL
2.	PK67	1:2	667 mL	333 mL
3.	PK57	3:4	571 mL	429 mL

3.2.8. Analisa *Gas Chromatography – Mass Spectrometer* (GC-MS)

Bahan bakar cair dikarakterisasi dengan *gas chromatography-mass spectrometer* (GC-MS) untuk mengetahui komposisi fraksi hidrokarbon dari hasil perengkahan katalitik limbah plastik polistirena (PS) dengan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel kemiri sunan.

Pengujian bahan bakar cair hasil perengkahan katalitik dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Universitas Gajah Mada menggunakan instrumen GCMS-*QP2010S SHIMADZU*. Sebanyak 50 mg sampel bahan bakar cair hasil perengkahan katalitik dilarutkan dalam 1 mL n-heksana, sampel kemudian diinjeksikan ke inlet kromatografi dan diproses selama 42 menit. Kondisi operasi dari instrumen GC-MS ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Kondisi operasi instrumen GC-MS

Inlet	
Jumlah suntikan	1 µL
Suhu	310°C
Tekanan	13 kPa
Rasio	66,8
Oven	
Suhu awal	50°C
Suhu akhir	300°C
Hold time	5 menit
Laju	5°C/menit
Kolom	
Tipe	Rtx 5 MS
Gas	Helium
Aliran Gas	0,55 mL/menit

3.2.9. Evaluasi Data

Desain eksperimen gabungan digunakan untuk optimalisasi kondisi proses dan analisis produk bahan bakar cair hasil ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri (*Aleurites moluccana*). Komponen fraksi hidrokarbon dari bahan bakar cair yang diproduksi dapat diketahui dari hasil analisis *gas chromatography-mass spectrometer* (GC-MS). Penentuan presentase konversi, hasil, dan selektivitas dari proses perengkahan katalitik polistirena koreaktan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel kemiri dihitung melalui persamaan berikut:

$$\%\ \text{Hasil} = \frac{\text{Volume Produk}}{\text{Volume Reaktan}} \text{ x } 100\% \qquad (3.1)$$

$$\text{Konversi produk} = \frac{\text{Volume reaktan awal} - \text{Volume reaktan sisa}}{\text{Volume reaktan awal}} \text{ x } 100\% \qquad (3.2)$$

$$\text{Selektivitas} = \frac{\text{Volume produk terbentuk}}{\text{Volume reaktan awal} - \text{Volume reaktan sisa}} \times 100\% \quad (3.3)$$

3.2.10. Karakterisasi Sifat Fisik Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair (BBC) hasil perengkahan katalitik dicampur dengan premium RON 88 dan MTBE terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian karakteristik sifat fisika. Hal ini bertujuan untuk megetahui pengaruh penambahan bahan bakar cair hasil perengkahan katalitik limbah plastik polistirena (PS) dengan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel kemiri terhadap kualitas bahan bakar komersil Premium RON 88. Komposisi campuran bahan bakar cair (CBBC) pada masing-masing variasi bahan baku dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Komposisi campuran bahan bakar cair

Variasi	Volume BBC (mL)	Volume Premium RON 88 (mL)	Volume MTBE (mL)	Campuran BBC (CBBC)
PJ50	225	750	18,4	CJ50
PJ57	225	750	18,4	CJ57
PJ67	225	750	18,4	CJ67
PKS50	225	750	18,4	CKS50
PKS57	225	750	18,4	CKS57
PKS67	225	750	18,4	CKS67
Standar	-	750	18.4	CSTD

Karakteristik bahan bakar cair sangat penting diketahui untuk menentukan keberhasilan perengkahan katalitik. Parameter sifat fisika yang diuji meliputi densitas, viskositas, titik nyala, nilai kalor, dan angka oktan (RON).

3.2.10.1 Penentuan Densitas Campuran Bahan Bakar Cair

Densitas campuran bahan bakar diukur dengan piknometer. Penentuan densitas campuran bahan bakar cair dilakukan pada suhu 15°C. Mula-mula piknometer ditimbang massa kosongnya, kemudian diisi sampel campuran bahan bakar cair hingga memenuhi saluran rongga tutup piknometer dan ditimbang kembali massanya. Densitas campuran bahan bakar cair diperoleh dari perbandingan massa sampel terhadap volume sampel (yang merupakan volume piknometer yakni). Densitas bahan bakar cair dihitung melalui persamaan 3.4.

$$\text{Densitas} = \frac{(\text{Massa piknometer+sampel}) - \text{Massa piknometer}}{\text{Volume piknometer}} \quad (3.4)$$

3.2.10.2 Penentuan Viskositas Kinematik Campuran Bahan Bakar Cair

Viskositas kinematik campuran bahan bakar cair diukur dengan viskometer Ostwald. Pengujian viskositas bahan bakar cair menggunakan viskositas akuades sebagai pembanding. Akuades dimasukkan ke dalam viskometer Ostwald dan dicatat waktu alirnya dari batas atas hingga batas bawah pipa kapiler. Pengujian yang sama dilakukan pada sampel bahan bakar cair. Penentuan viskositas kinematik dilakukan pada suhu 40°C. Nilai viskositas kinematik campuran bahan bakar cair dihitung dengan persamaan 3.5.

$$\eta_{BBC} = \eta_0 \frac{t_{BBC} \times \rho_{BBC}}{t_0 \times \rho_0} \quad (3.5)$$

Keterangan :
η_{BBC} : Viskositas kinematik bahan bakar cair (cSt)
η_0 : Viskositas kinematik aquades (cSt)
t_{BBC} : Waktu alir bahan bakar cair (s)
ρ_{BBC} : Densitas bahan bakar cair (kg/m^3)
t_0 : Waktu alir akuades (s)
ρ_0 : Densitas aquades (kg/m^3)

3.2.10.3 Penentuan Titik Nyala Campuran Bahan Bakar Cair

Titik nyala campuran bahan bakar cair diukur dengan metode bejana terbuka (*open cup flash point method*). Sejumlah sampel bahan bakar cair dituang ke dalam cawan porselen. Termometer digital dipasang di atas cawan porselen hingga menyentuh sampel bahan bakar cair. Suhu sampel dinaikkan secara bertahap melalui pemanasan. Sumber api dari pemantik dilewatkan di atas permukaan sampel secara berkala hingga uap sampel bahan bakar cair dapat menyala sementara. Suhu yang terbaca pada termometer saat terjadi nyala api pertama setelah diberikan sumber api merupakan titik nyala bahan bakar cair.

3.2.10.4 Penentuan Nilai Kalor Campuran Bahan Bakar Cair

Nilai kalor campuran bahan bakar cair diukur dengan bom kalorimeter. Sebanyak 1,00 gram sampel bahan bakar cair dimasukkan ke dalam mangkok pembakaran kemudian dimasukkan ke dalam reaktor bom. Bom ditutup rapat, diisi dengan gas oksigen hingga tekanan 30 atm dan kemudian dimasukkan ke dalam kalorimeter yang telah diisi air. Selanjutnya proses pembakaran sampel dapat dimulai dengan mengalirkan listrik ke dalam kalorimeter. Nilai kalor sampel yang diserap oleh kaloimeter akan ditampilkan pada monitor.

3.2.10.5 Penentuan Angka Oktan Campuran Bahan Bakar Cair

Angka oktan ditentukan dengan metode *Research Octane Number* (RON) menggunakan instrumen *Octane Meter*. Pengukuran angka oktan tersebut didasarkan pada analisis komparatif antara parameter sampel dengan bahan bakar pembanding yang tersimpan pada *data base* mikroprosesor. Pengujian dilakukan di Laboratorium Energi LPPM ITS.

3.2.11. Uji Kinerja Campuran Bahan Bakar Cair

Pengujian kinerja campuran bahan bakar cair dilakukan pada mesin gasolin untuk mengetahui nilai efisiensi termal dari campuran bahan bakar cair terhadap pembebanan yang dihasilkan selama proses pembakaran di dalam mesin. Pengujian dilakukan di Laboratorium Motor Bakar Departemen Teknik Mesin Industri ITS.

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

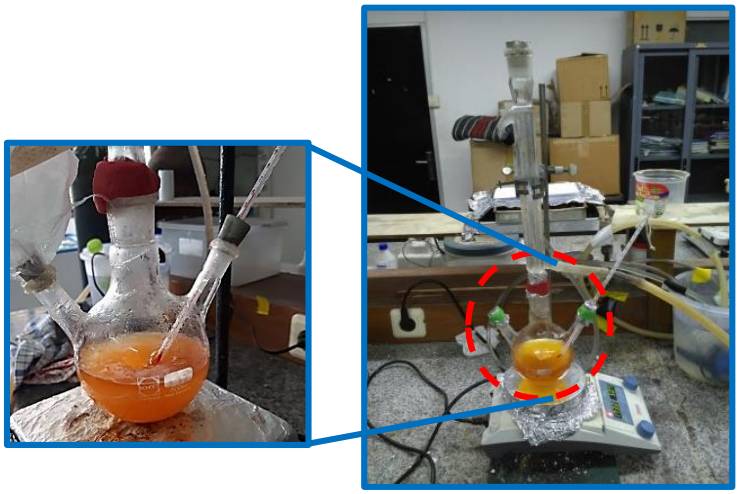
Pada penelitian ini, dilakukan proses ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak kemiri dan biodiesel minyak jelantah untuk menghasilkan produk bahan bakar cair dengan kandungan fraksi hidrokarbon yang menyerupai gasolin pada kisaran hidrokarbon C_5 – C_{12}. Al-MCM-41/keramik sebagai katalis pada proses ko-perengkahan katalitik telah dikarterisasi menggunakan XRD, FTIR-piridin, SEM-EDX, dan adsorpsi-desorpsi gas N_2. Komposisi bahan baku optimum yang dapat menghasilkan hasil bahan bakar cair maksimum dan kualitas yang memenuhi spesifikasi gasolin diselidiki dengan memvariasikan rasio limbah polistirena dan biomassa seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Komponen penyusun produk bahan bakar cair dianalisis dengan kromatografi gas – spektroskopi massa (GC-MS). Bahan bakar cair yang dihasilkan selanjutnya diuji sifat fisikanya, meliputi densitas, viskositas, nilai kalor, titik nyala, dan nilai oktan (RON), untuk mengetahui apakah bahan bakar cair yang disintesis memenuhi spesifikasi bahan bakar bensin menurut SNI 3506:2017. Selain itu, dilakukan uji kinerja bahan bakar cair yang diperoleh pada mesin gasolin untuk mengetahui % efisiensi termal bahan bakar pada masing-masing variasi.

4.1 Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah

Minyak jelantah yang digunakan sebagai bahan baku biodiesel diperoleh dari limbah penggorengan ayam tepung, berwujud cair, dan berwarna kuning kecoklatan. Preparasi minyak jelantah sebagai bahan baku biodiesel diawali dengan proses penyaringan yang bertujuan untuk memisahkan minyak dari pengotor atau residu. Selanjutnya, minyak dipanaskan untuk mengurangi kadar air yang terdapat dalam minyak jelantah.

Sintesis biodiesel minyak jelantah dilakukan dengan metode transesterifikasi menggunakan katalis basa KOH dan metanol dalam sebuah rangkaian alat refluks yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Dalam sintesis biodiesel minyak jelantah, digunakan komposisi optimum dalam penelitian sebelumnya yaitu

minyak jelantah dan metanol dengan perbandingan mol 1:3 serta 0,5% berat katalis per total minyak (Juwono, dkk., 2019). Pengaturan sistem operasi peralatan refluks telah dijelaskan pada sub bab 3.2.1. Larutan metoksi yang terlebih dahulu dibuat dengan cara mereaksikan metanol dan basa KOH, berfungsi untuk membentuk senyawa alkoksida sebagai nukleofilik untuk menyerang gugus karbonil yang terdapat pada trigliserida dalam minyak. Larutan metoksi selanjutnya dicampur dengan minyak jelantah dan direfluks agar reaksi dapat berlangsung membentuk metil ester.



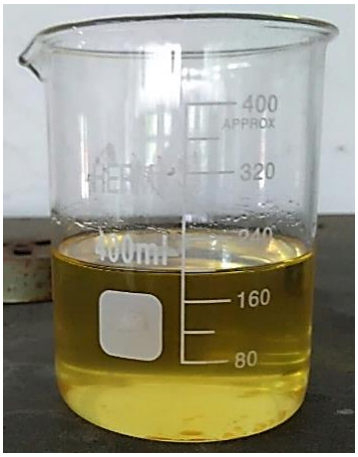
Gambar 4.1 Rangkaian alat refluks pada sintesis biodiesel

Setelah proses refluks selesai, hasil reaksi dipindahkan ke dalam corong pisah dan dibiarkan selama 24 jam. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa terbentuk 2 fasa seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 setelah didiamkan 5 jam. Fasa atas berwarna kuning diduga merupakan produk metil ester (biodiesel) yang terbentuk, sedangkan fasa bawah berwarna coklat merupakan hasil samping berupa gliserol. Pembentukan dua fasa tersebut dikarenakan adanya perbedaan massa jenis dari produk reaksi yang terbentuk, dimana massa jenis biodiesel (0,85 – 0,89 g/cm^3) lebih rendah dibandingkan massa jenis gliserol (1,26 g/cm^3) (Assari, 2019).

Fasa metil ester yang terbentuk diperkirakan masih mengandung sisa metanol yang tidak ikut bereaksi sehingga perlu dilakukan pencucian. Pencucian dilakukan dengan menggunakan air hangat (50°C) hingga diperoleh lapisan metil ester berwarna kuning jernih. Selama proses pencucian, sejumlah metil ester

membentuk emulsi dengan air sehingga diperlukan waktu 7 – 12 jam untuk mendapatkan pemisahan yang sempurna antara lapisan metil ester dan lapisan air yang membawa sisa metanol. Selanjutnya, lapisan metil ester diuapkan dengan *rotary evaporator* untuk menghilangkan sisa air maupun residu lainnya sehingga diperoleh biodiesel minyak jelantah murni. Biodiesel minyak jelantah yang diperoleh berwarna kuning jernih seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3.

Gambar 4.2 Pemisahan fasa atas dan fasa bawah hasil proses refluks.



Gambar 4.3 Biodiesel minyak jelantah

Biodiesel minyak jelantah yang berhasil disintesis dibandingkan karakteristiknya dengan standar biodiesel yang dikeluarkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI). Beberapa karakteristik yang dibandingkan meliputi densitas, viskositas, dan titik nyala. Berdasarkan hasil uji yang diperoleh, sebagaimana tertera pada Tabel 4.1, dapat diketahui bahwa densitas, viskositas, dan titik nyala

biodiesel yang disintesis dari transesterifikasi minyak jelantah dengan katalis KOH telah memenuhi standar biodiesel SNI 04-7182:2015 (Mulana, 2011).

Tabel 4.1 Karakteristik biodiesel minyak jelantah dan biodiesel kemiri terhadap standar SNI.

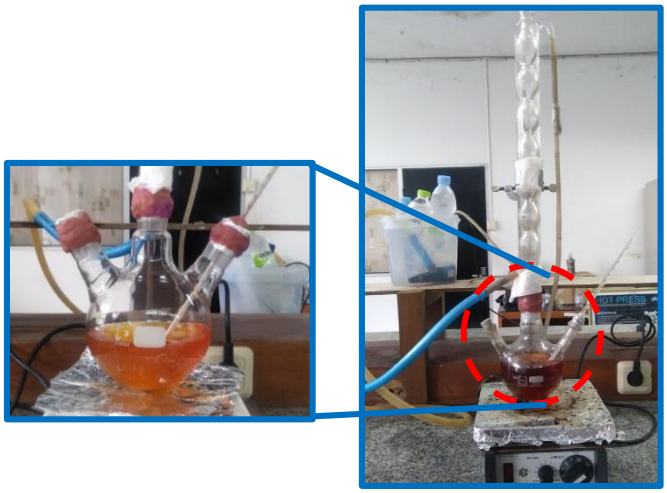
Spesifikasi	Standar Biodiesel SNI 04-7182:2015	Biodiesel Minyak Jelantah	Biodiesel Minyak Kemiri
Densitas (g/cm^3)	0,85 – 0,89	0,8786	0,8724
Viskositas (cSt)	2,3 – 6	4,357	2,413
Titik nyala (°C)	100	130	115

4.2 Sintesis Biodiesel Minyak Kemiri

Uji pendahuluan kadar FFA menunjukkan bahwa minyak kemiri yang digunakan sebagai bahan baku biodiesel memiliki kandungan asam lemak bebas yang tinggi, yakni 5,24%, sehingga perlu dilakukan proses esterifikasi sebagai pengolahan awal untuk menurunkan kandungan asam lemak bebasnya. Tingginya kandungan asam lemak bebas dapat meningkatkan pembentukan sabun serta menyulitkan pemisahan gliserol dengan metil ester yang terbentuk sehingga dapat menurunkan hasil biodiesel (Djenar dan Lintang, 2012) yang diperoleh. Proses esterifikasi dilakukan di dalam rangkaian alat refluks dengan 4% berat katalis H_2SO_4 pada suhu 60°C selama 2 jam. Perbandingan mol minyak dan metanol yang digunakan yaitu 1:3. Kondisi reaksi tersebut ditetapkan berdasarkan kondisi optimum yang diperoleh oleh penulis pada studi pendahuluan yang mengacu pada penelitian Holilah dkk. (2013). Produk reaksi selanjutnya dipindahkan ke dalam corong pisah untuk memisahkan air dan sisa metanol. Hasil perlakuan awal menunjukkan bahwa asam lemak bebas dapat diturunkan menjadi 0,9%, sehingga selanjutnya dapat dilakukan proses transesterifikasi.

Transesterifikasi dilakukan dengan menggunakan katalis basa KOH dan metanol di dalam reaktor labu leher tiga yang dirangkai dengan refluks seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Dalam sintesis biodiesel minyak kemiri, digunakan komposisi optimum dalam penelitian sebelumnya yaitu minyak kemiri dan metanol dengan perbandingan mol 1:3 serta 1% berat katalis per total minyak (Sulistyo, dkk., 2008). Secara umum, fasa atas dari hasil esterifikasi minyak digunakan dalam

proses transesterifikasi untuk memproduksi biodiesel. Akan tetapi pada penelitian ini, biodiesel minyak kemiri justru berhasil disintesis dari fasa bawah hasil esterifikasi. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Sulistyo dkk. (2009), dimana biodiesel kemiri berhasil disintesis dari lapisan bawah hasil esterifikasi minyak kemiri yang dipisahkan untuk proses transesterifikasi lebih lanjut.



Gambar 4.4 Transesterifikasi minyak kemiri

Setelah proses pemisahan dan pemurnian, diperoleh biodiesel minyak kemiri yang berwarna kuning seperti pada Gambar 4.5 dengan hasil sebesar 92,06%. Pengujian karakteristik biodiesel yang meliputi nilai densitas, viskositas, dan titik nyala sebagaimana yang telah disajikan pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa biodiesel minyak kemiri yang disintesis telah memenuhi standar biodiesel berdasarkan SNI 04-7182:2015.

Gambar 4.5 Biodiesel minyak kemiri

4.3 Sintesis Minyak Polistirena

Limbah polistirena yang digunakan dalam sintesis minyak polistirena dalam penelitian ini berupa *expanded polystyrene foam* (EPS) yang telah dibersihkan seperti pada Gambar 4.6 (a). Bahan baku EPS yang awalnya berbentuk padatan dilakukan pemanasan pada suhu 80 - 90°C dan penekanan sehingga terbentuk lempengan polistirena seperti Gambar 4.6 (b). Hal tersebut bertujuan untuk memperkecil volume dari stirofoam sehingga jumlah yang dapat diumpankan ke dalam reaktor perengkahan menjadi lebih banyak.

Gambar 4.6 (a) Limbah polistirena berupa EPS. (b) Lempengan polistirena hasil proses pemampatan.

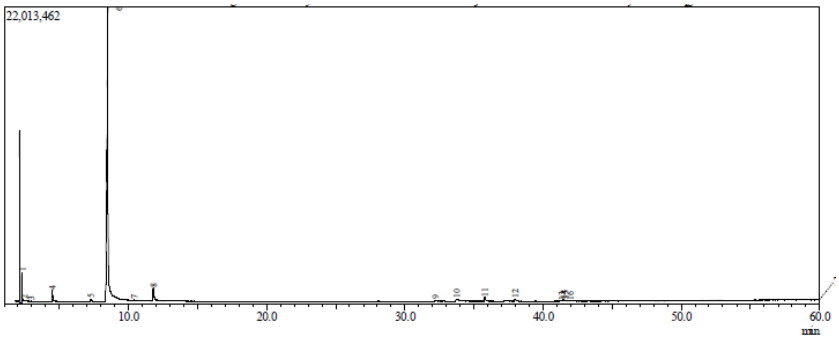
Konversi limbah polistirena menjadi minyak polistirena dilakukan dengan metode pirolisis melalui proses pemanasan tanpa adanya oksigen. Sebelum proses pirolisis dilakukan, gas nitrogen dialirkan kedalam reaktor pirolisis untuk mendesak udara dan oksigen yang ada didalam ruang bahan baku. Proses pemanasan mengakibatkan lempengan polistirena meleleh dan pada suhu yang lebih tinggi akan menguap membentuk fasa gas dan dikondensasi di dalam kondensor. Uap berwarna putih yang terkondensasi mulai menetes setelah melalui kondensor pada menit 12 dengan suhu 200°C dan berakhir pada menit 115 pada suhu reaksi yang ditetapkan yaitu 250°C. Kondensat yang diperoleh berwarna kuning dengan hasil hidrokarbon cair sebesar 88,39% berat. Sedangkan, sisa bahan yang tidak bereaksi membentuk kokas dengan hasil 7,69% sebagai residu berwarna coklat kehitamam dan mudah memadat ketika suhu reaktor pirolisis turun. Kokas yang terbentuk berada di dasar reaktor pirolisis. Produk cair dan kokas hasil pirolisis limbah polistirena ditunjukkan pada Gambar 4.7 (a) dan 4.7 (b) secara berturut-turut.

Gambar 4.7 (a) Minyak polistirena dan (b) Kokas hasil pirolisis limbah polistirena

Minyak PS yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui komponen penyusunnya. Hasil analisis GC-MS terhadap produk cair menunjukkan bahwa minyak polistirena mengandung beberapa kelompok senyawa, diantaranya aromatik, alkana, dan asam karboksilat seperti ditunjukkan hasil kromatogram pada Gambar 4.8. Dari berbagai senyawa yang teramati, produk dominan yang diperoleh yaitu benzosiklobutana, α-metilstirena, dan toluena dengan hasil 77,85%, 3,03%, dan 1,96% secara berturut-turut. Hasil tersebut sesuai dengan temuan Liu, dkk. (2000) yang menyebutkan bahwa degradasi termal polistirena menghasilkan produk monoaromatik berupa toluena, etilbenzena, dan α-metilstirena. % Hasil stirena sebagai monomer dari polistirena tidak teramati secara signifikan. Oleh karena itu, apabila stirena terbentuk pada tahap pertama, maka diperkirakan terjadi reaksi sekunder lebih lanjut untuk membentuk senyawa lainnya yang lebih disukai pada kondisi yang digunakan (Pinto, 1999). Pada penelitian, produk yang diperoleh dengan hasil terbesar adalah benzosiklobutana. Menurut Marcezweski, dkk. (2013), stirena dapat mengalami penyerangan oleh spesi organik reaktif lainnya pada cincin benzena maupun rantai alifatiknya sehingga membentuk ion karbenium dan selanjutnya mengalami siklisasi internal membentuk senyawa benzosiklobutana.

Nilai kalor minyak polistirena yang diperoleh sebesar 40,37 MJ/kg. Nilai tersebut mendekati nilai kalor bahan bakar cair hasil pirolisis PS pada penelitian Yuriandala, dkk. (2016) dan Pinto, dkk. (1999) yaitu sebesar 39,79 MJ/kg dan 43,00 MJ/kg secara berturut-turut. Jika dibandingkan dengan standar nilai bahan bakar

bensin RON 88 menurut SNI yang berada pada nilai 42,49 MJ/kg, maka minyak polistirena dapat dijadikan sebagai bahan baku energi alternatif yang potensial. Akan tetapi, diperlukan proses lanjutin untuk meningkatkan karakteristik lainnya.



Gambar 4.8 Kromatogram produk cair hasil pirolisis limbah polistirena

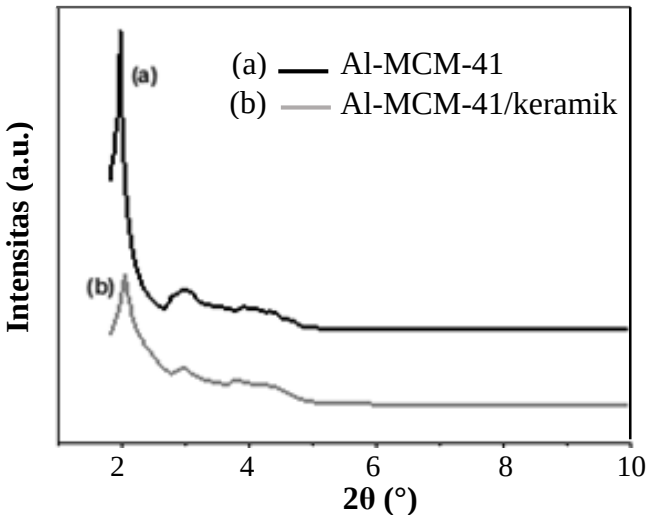
4.4 Karakteristik Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi

Katalis Al-MCM-41 yang telah dimodifikasi dengan penambahan serbuk keramik oksida alumina dikarakterisasi dengan *x-ray diffraction* (XRD), *scanning electron microscopy*- (SEM-EDX), analisis *fourier transform infrared* (FTIR) – piridin, dan adsorpsi-desorpsi gas nitrogen.

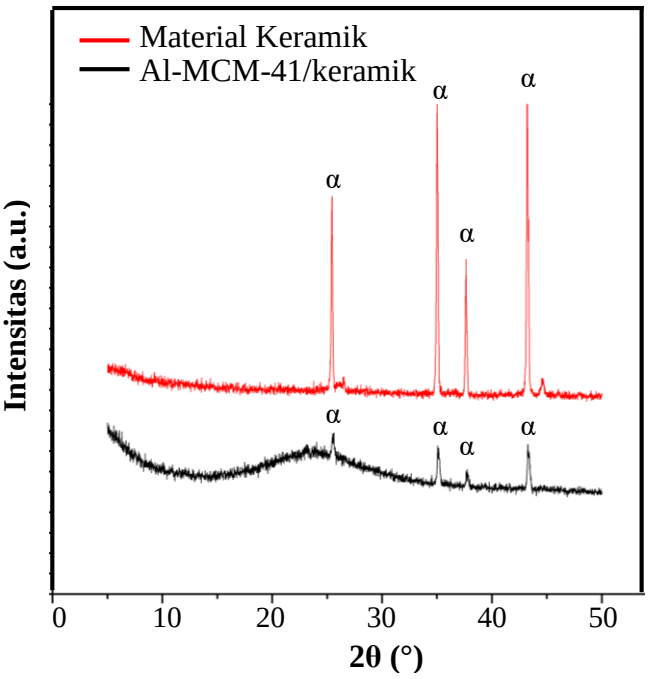
4.4.1 Karakteristik Struktur Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi

Katalis Al-MCM-41 yang telah dipreparasi dengan pencampuran serbuk keramik oksida alumina dikarakterisasi dengan XRD untuk identifikasi struktur kristalnya dan dicocokkan dengan difraktogram dari Al-MCM-41 mula-mula. Hasil karakterisasi SAXRD dari kedua katalis ditunjukkan pada Gambar 4.9. Berdasarkan difraktogram, Al-MCM-41 menunjukkan sebuah puncak tajam pada rentang 2θ = 1,86 – 2,42° serta dua puncak melebar dengan intensitas rendah pada rentang 2θ = 2,74 – 3,85° dan 2θ = 3,89 – 4,87° secara berturut-turut. Puncak-puncak tersebut merupakan puncak-puncak karakteristik dari struktur MCM-41 sesuai yang dilaporkan oleh Beck dkk., (1992) yang menjelaskan bahwa puncak karakteristik dari difraksi heksagonal MCM-41 terdiri dari puncak kuat pada 2θ = 1,8 – 2,4° yang merupakan refleksi bidang (100) dan puncak melebar lainnya pada 2θ = 3,5 – 4.12° dan 2θ = 4,31 – 4,85° yang merupakan refleksi bidang (110) dan

(200). Menurut La-Salvia dkk., (2017) adanya dua puncak yang melebar, yakni (110) dan (200) menunjukkan kristalinitas yang tinggi dan geometri pori yang teratur dari material mesopori. Pada difraktogram Al-MCM-41/keramik dapat dilihat bahwa penambahan serbuk keramik oksida alumina kedalam Al-MCM-41 tidak mengakibatkan perubahan puncak karakteristik dari MCM-41, akan tetapi intensitas puncak karakteristiknya menjadi lebih rendah.



Gambar 4.9 Difraktogram SAXRD Al-MCM-41 dan Al-MCM-41/keramik

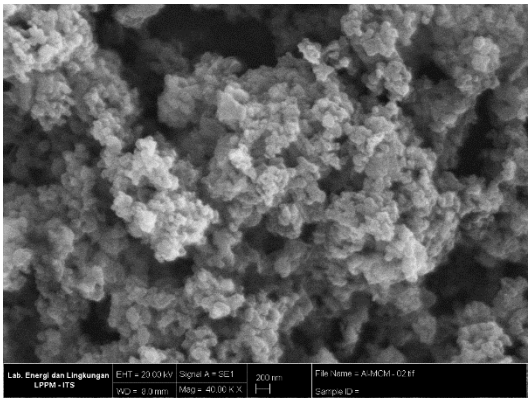


Gambar 4.10 Difraktogram WAXRD material keramik dan Al-MCM-41/keramik

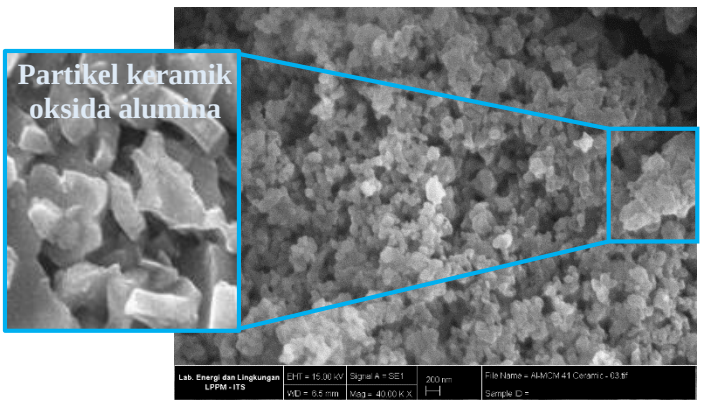
Gambar 4.10 menampilkan difraktogram dari material keramik oksida alumina dan katalis Al-MCM-41 setelah penambahan serbuk keramik oksida alumina. Difraktogram material keramik menunjukkan beberapa puncak fasa kristalin pada 2θ = 25.46°, 35,02°, 37,64°, dan 44,53°. Puncak tersebut merupakan puncak karakteristik dari fasa kristalin α-Al_2O_3 yang bersesuaian dengan refleksi bidang (012), (104), (110), dan (113) secara berturut-turut (Mariscal-Becerra, dkk., 2016). Sedangkan pada difraktogram WAXDR Al-MCM-41/keramik terdapat puncak yang melebar berpusat pada 2θ = ~ 25 serta beberapa puncak karakteristik dari fasa kristalin α-Al_2O_3. Dengan demikian, diketahui bahwa katalis Al-MCM-41/keramik yang dipreparasi tidak mengubah struktur kristal dari heksagonal MCM-41 maupun keramik oksida alumina.

4.4.2 Karakteristik Morfologi Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi

(a)



(b)



Gambar 4.11 Mikrograf SEM (a) Al-MCM-41 dan (b) Al-MCM-41/keramik

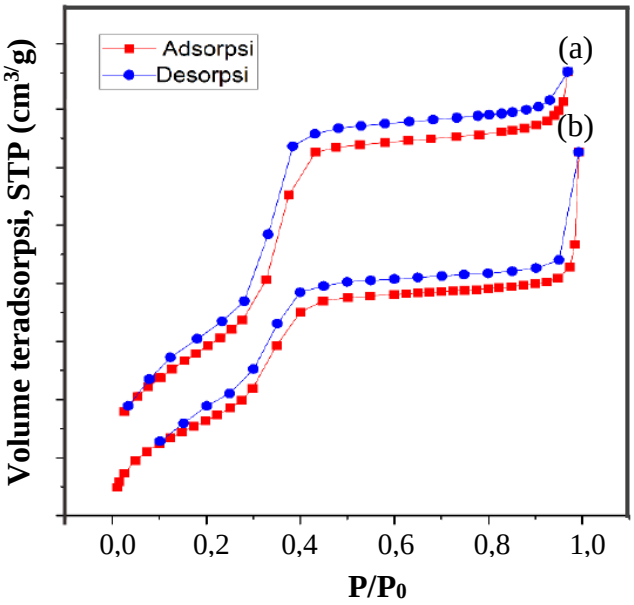
Morfologi katalis Al-MCM-41 dan Al-MCM-41/keramik dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Berdasarkan mikrograf SEM dapat dilihat bahwa katalis Al-MCM-41 dan Al-MCM-41/keramik menunjukkan adanya aglomerasi dari partikel dengan struktur heksagonal yang merupakan karakteristik dari morfologi material MCM-41. Partikel serbuk keramik oksida alumina yang ditambahkan, ditunjukkan dengan adanya aglomerasi partikel dalam bentuk lembaran yang menempel pada partikel Al-MCM-41. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa tidak terjadi kerusakan struktural dari katalis Al-MCM-41 setelah pencampuran serbuk keramik oksida alumina karena tidak ada perbedaan signifikan dalam morfologi yang teramati.

4.4.3 Karakteristik Pori Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi

Porositas katalis dalam proses perengkahan merupakan faktor penting untuk memfasilitasi proses difusi dari molekul minyak dengan berat molekul besar. Analisis adsorpsi-desorpsi gas N_2 dilakukan untuk mengetahui luas permukaan dan karakteristik pori katalis Al-MCM-41 sebelum dan setelah penambahan serbuk keramik oksida alumina. Grafik isotherm adsorpsi-desorpsi N_2 yang diperoleh, ditunjukkan pada Gambar 4.12. Profil katalis Al-MCM-41 dan MCM-41/keramik menunjukkan grafik isotherm tipe IV berdasarkan klasifikasi IUPAC dan histeresis yang teramati merupakan karakteristik material mesopori, dengan mesopori silindris dalam susunan heksagonal yang teratur (Santos, dkk., 2018). Luas permukaan BET dan distribusi ukuran pori yang dihitung dengan metode BJH dari kedua katalis dirangkum dalam Tabel 4.2.

Dari tabel 4.2 diketahui bahwa serbuk keramik oksida alumina dapat meningkatkan luas permukaan BET dari katalis Al-MCM-41. Peningkatan tersebut dapat terjadi karena distribusi keramik oksida alumina yang ditambahkan tersebar lebih merata dengan ukuran partikel yang lebih kecil (Suseno, dkk., 1999). Selain itu, volume pori dan rerata jari-jari pori katalis juga meningkat setelah pencampuran keramik oksida alumina kedalam Al-MCM-41. Al-MCM-41 memiliki volume pori 0,50 cm^3/g dan rerata jari-jari pori 15,12Å, sedangkan Al-MCM-41/keramik memiliki volume pori 0,546 cm^3/g dan rerata jari-jari pori 22,22Å. Dengan adanya

peningkatan luas permukaan dan rerata jari-jari pori dari Al-MCM-41 diharapkan dapat meningkatkan aktivitas perengkahan molekul oksigenat dengan berat molekul besar.



Gambar 4.12 Grafik adsorpsi – desorpsi isotermal N_2 dari (a) Al-MCM-41 dan (b) Al-MCM-41

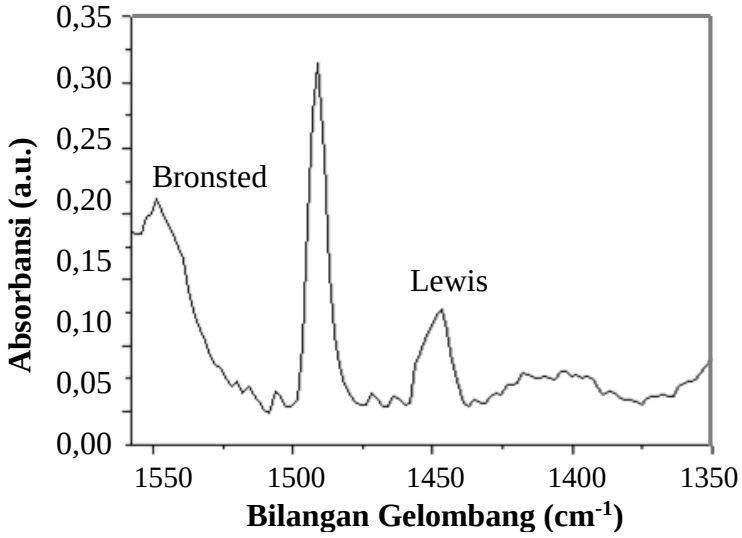
Tabel 4.2 Data hasil analisis BET dan BJH

Parameter	Al-MCM-41	Al-MCM-41/keramik
Luas permukaan (m^2/g)	419,930	490,665
Volume pori (cm^3/g)	0,500	0,546
Radius pori rata-rata (Å)	15,120	22,220

4.4.4 Karakteristik Keasaman Katalis Al-MCM-41 Termodifikasi

Analisis spektroskopi FTIR dengan piridin sebagai molekul *probe* (penyidik) digunakan untuk menentukan jenis sisi asam dari katalis pada permukaannya, yaitu sisi asam Bronsted dan asam Lewis. Berdasarkan Gambar 4.13, spektra FTIR piridin menunjukkan adanya puncak serapan pada bilangan gelombang 1431 – 1460 cm^{-1} yang merupakan pita adsorpsi sisi asam Lewis, sedangkan puncak serapan pada bilangan gelombang 1533 – 1558 cm^{-1} menunjukkan bahwa piridin teradsorb pada sisi asam Bronsted. Hasil tersebut sesuai dengan temuan Layman dkk. (2003) yang melaporkan bahwa pita adsorpsi

asam Lewis berada pada bilangan gelombang 1440 – 1460 cm^{-1}, sedangkan asam Bronsted pada bilangan gelombang 1550 – 1545 dan 1640 cm^{-1}. Sifat keasaman katalis Al-MCM-41/keramik dirangkum dalam Tabel 4.3.



Gambar 4.13 Spektra FTIR Piridin katalis Al-MCM-41/keramik

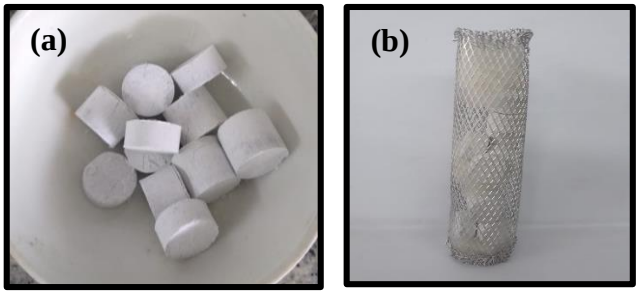
Tabel 4.3 Sifat keasaman katalis Al-MCM-41/keramik

Jenis Asam	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Jumlah Asam (mmol/g)
Asam Lewis	1431 – 1460	0,0311
Asam Bronsted	1533 - 1558	0,0344

4.5 Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Minyak Jelantah

Pada penelitian ini, proses ko-perengkahan katalitik minyak plastik PS dengan biodiesel jelantah dilakukan secara *ex-situ*, dimana uap yang terbentuk selama pirolisis campuran minyak PS dan biodiesel jelantah selanjutnya dilewatkan melalui ruang katalis yang terpisah dari ruang bahan baku untuk memungkinkan proses termal dan katalitik dilakukan secara bertahap. Proses ko-perengkahan katalitik dilakukan menggunakan 9 gram katalis Al-MCM-41/keramik yang telah dibentuk menjadi pellet dan disusun dalam kawat alluminium sepanjang 10 cm dengan susunan 1,5 cm glass wool: 3,0 cm katalis: 1,0 cm glass wool: 3,0 cm katalis: 1,5 cm glass wool pada bagian ruang katalis seperti ditunjukkan pada

Gambar 4.14. Hal tersebut bertujuan untuk menghindari pembentukan kokas karena susunan katalis yang terlalu rapat serta memungkinkan fasa uap mengalami perengkahan katalitik secara bertingkat, sehingga pengendalian hasil dan komposisi bahan bakar cair dapat dicapai dengan lebih baik.



Gambar 4.14 (a) Pellet katalis Al-MCM-41/keramik (b) Susunan katalis Al-MCM-41/keramik dalam ruang katalis

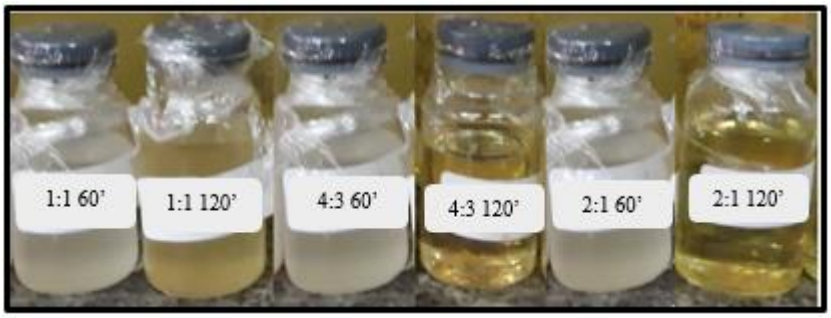
Pada penelitian ini ko-perengkahan katalitik dilakukan pada suhu 300°C selama 120 menit dengan variasi perbandingan volume biodiesel jelantah dan minyak PS sebagaimana telah dijelaskan pada Tabel 3.2 subab 3.2.6. Suhu tersebut merupakan suhu optimum dari penelitian sebelumnya yang menggunakan biodiesel jelantah dan minyak polipropilena (PP) sebagai bahan baku dalam proses perengkahan katalitik (Juwono, dkk., 2019). Sebelum proses ko-perengkahan katalitik dilakukan, gas nitrogen dialirkan kedalam ruang bahan baku pada reaktor perengkahan untuk mendesak udara didalamnya sehingga keadaan bebas oksigen selama proses perengkahan dapat tercapai. Pemanasan suhu tinggi mengakibatkan gerakan molekul semakin cepat sehingga terjadi perubahan fasa cair menjadi fasa gas serta adanya pemutusan ikatan pada rantai karbon molekul penyusunnya. Fasa gas yang terbentuk kemudian mengalami reaksi perengkahan katalitik dalam ruang katalis Al-MCM-41/keramik dan dikondensasi di dalam kondensor.

Uap yang terkondensasi mulai menetes setelah melalui kondensor pada waktu yang berbeda-beda untuk setiap variasi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan ditampung setiap 60 menit. Semakin besar rasio pencampuran minyak plastik yang digunakan, semakin cepat pula waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh produk hidrokarbon cair. Hal tersebut dikarenakan adanya peningkatan jumlah senyawa volatil dengan bertambahnya jumlah rasio minyak PS yang ditambahkan

(Shadangi dan Mohanty, 2015). Selain itu, warna produk hidrokarbon cair menjadi lebih gelap seiring bertambahnya waktu reaksi. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Bayat (2016) pada perengkahan katalitik metil ester dari minyak kanola yang menjelaskan bahwa warna produk hidrokarbon cair semakin gelap dengan bertambahnya suhu dan waktu reaksi. Hal tersebut dikarenakan adanya senyawa aromatik besar maupun senyawa aromatik oksigenat dalam komponen produk hidrokarbon cair. Produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dan biodiesel minyak jelantah ditunjukkan pada Gambar 4.15.

Tabel 4.4 Waktu terbentuknya produk hidrokarbon cair pertama variasi PS:BMJ

No.	Variasi BBC	Rasio Limbah Plastik: Biomassa	Waktu Menetes Produk Hidrokarbon Pertama
1.	PJ50	1:1	11 menit 40 detik
2.	PJ57	4:3	8 menit 54 detik
3.	PJ67	2:1	6 menit 15 detik



Gambar 4.15 Produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan katalitik biodiesel minyak jelantah dan minyak polistirena

4.6 Ko-Perengkahan Katalitik Minyak Plastik PS dengan Biodiesel Minyak Kemiri (*Aleurites moluccana*)

Ko-perengkahan katalitik minyak PS dengan biodiesel minyak kemiri (*Aleurites moluccana*) dilakukan pada kondisi reaksi yang sama seperti pada proses ko-perengkahan katalitik minyak PS dengan biodiesel minyak jelantah pada bagian sebelumnya. Hal tersebut bertujuan untuk mengontrol kondisi reaksi, yang meliputi suhu, waktu reaksi, jenis dan jumlah katalis, serta rasio bahan baku, sebagai variabel tetap pada penelitian ini sehingga hasil ko-perengkahan minyak PS dengan biodiesel minyak jelantah maupun biodiesel minyak kemiri dapat dibandingkan.

Minyak PS dan biodiesel minyak kemiri dicampur terlebih dahulu dengan perbandingan volume yang telah ditetapkan sebagaimana pada Tabel 3.2 sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan 350 rpm selama 15 menit pada suhu ruang. Kedua sampel dapat bercampur secara homogen tanpa adanya pemisahan fasa yang terbentk. Hal ini menunjukkan bahwa minyak PS dan biodiesel kemiri memiliki senyawa dengan kepolaran yang sama sehingga dapat larut satu sama lain. Campuran tersebut selanjutnya dimasukkan kedalam *chamber reactor* dan disambung dengan *tubular reactor* yang berisi pellet katalis Al-MCM-41-keramik yang telah disusun sedemikian rupa seperti Gambar 4.14 (b). Gas nitrogen dialirkan menuju *chamber reactor* selama 15 menit untuk mendesak gas oksigen yang ada di dalam reaktor perengkahan. Reaktor perengkahan katalitik selanjutnya dipanaskan hingga mencapai suhu 300°C. Sampel dikonversi menjadi gas dan melewati pori katalis Al-MCM-41/keramik di ruang katalis. Gas yang terbentuk dikondensasi menjadi produk hidrokarbon cair setelah melewati kondensor dan kemudian ditampung dalam penampung minyak yang berada di bagian bawah reaktor setiap 60 menit waktu reaksi. Produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan minyak PS dengan biodiesel minyak kemiri ditunjukkan pada Gambar 4.16.

Gambar 4.16 Produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan katalitik minyak PS dengan biodiesel minyak kemiri (*Aleurites moluccana*)

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa semakin besar rasio pencampuran minyak plastik yang digunakan, semakin cepat pula waktu yang dibutuhkan untuk

memperoleh produk hidrokarbon cair. Hal tersebut sesuai dengan pengamatan pada ko-perengkahan katalitik minyak PS dengan biodiesel minyak jelantah yang terjadi karena adanya peningkatan jumlah senyawa volatil dengan bertambahnya jumlah rasio minyak PS yang ditambahkan (Shadangi dan Mohanty, 2015). Akan tetapi, secara umum ko-perengkahan katalitik biodiesel kemiri membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan biodiesel minyak jelantah. Hal tersebut mengindikaskan bahwa biodiesel minyak kemiri memiliki kandungan senyawa volatile yang lebih rendah dibandingkan biodiesel minyak jelantah sehingga proses ko-perengkahan menjadi lebih sulit. Selain itu, warna produk hidrokarbon cair yang dihasilkan juga berubah dari tidak berwarna menjadi kekuningan seiring bertambahnya waktu reaksi. Hal ini sesuai dengan pengamatan pada ko-perengkahan katalitik minyak PS dengan biodiesel minyak jelantah karena adanya senyawa aromatik besar maupun senyawa aromatik oksigenat dalam komponen produk hidrokarbon cair yang mengakibatkan perubahan warna bahan bakar cair (Bayat, 2016).

Tabel 4.5 Waktu terbentuknya produk hidrokarbon cair pertama variasi PS:BMK

No.	Variasi BBC	Rasio Limbah Plastik: Biomassa	Waktu Menetes Produk Hidrokarbon Pertama
1.	PK50	1:1	20 menit 07 detik
2.	PK57	4:3	15 menit 39 detik
3.	PK67	2:1	9 menit 52 detik

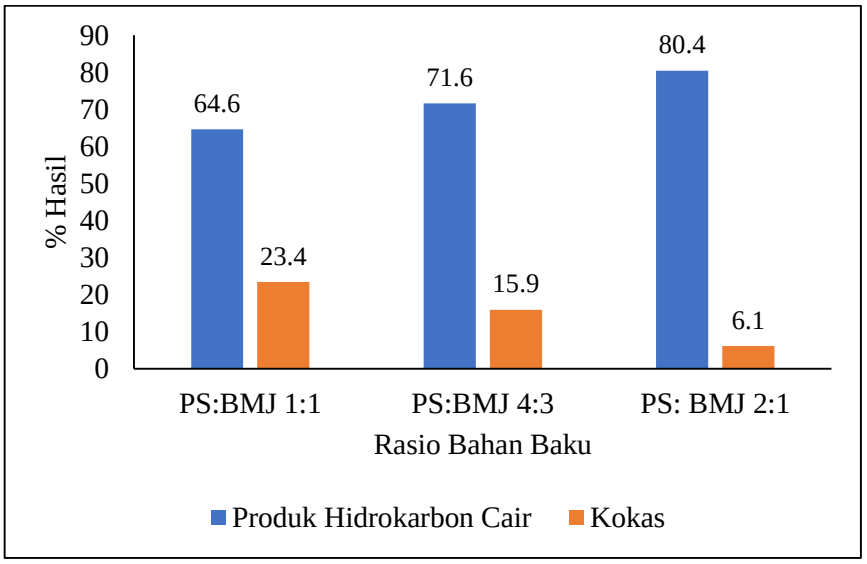
4.7 % Hasil Ko-Perengkahan Katalitik

Ko-perengkahan katalitik minyak PS dengan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri menghasilkan produk hidrokarbon cair, padat, dan gas. Akan tetapi, produk gas pada penelitian ini tidak diamati. % Hasil hidrokarbon cair dan kokas dihitung berdasarkan massa aktual kondensat yang ditampung dan massa residu padat yang tertinggal pada dasar reaktor perengkahan secara berturut-turut.

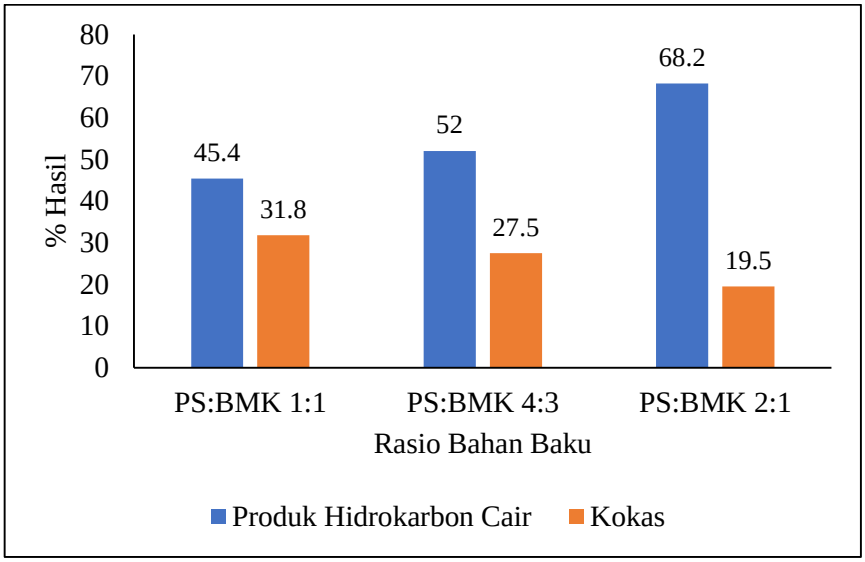
4.7.1 Pengaruh Rasio Bahan Baku terhadap % Hasil Bahan Bakar Cair

Ko-perengkahan katalitik minyak PS dengan biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri masing-masing diselidiki pada rasio minyak PS: biodiesel yang berbeda, yakni 1:1, 4:3, dan 2:1 untuk meningkatkan produksi bahan bakar

cair. Proses tersebut tidak hanya menghasilkan produk hidrokarbon cair, tetapi juga kokas yang berwarna coklat kehitaman dan mudah memadat pada suhu ruang. Hasil hidrokarbon cair dan kokas pada ko-perengkahan katalitik biodiesel minyak jelantah dengan minyak PS untuk masing-masing variasi ditunjukkan pada Gambar 4.17. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa adanya peningkatan rasio minyak PS terhadap biodiesel minyak jelantah mengakibatkan % hasil hidrokarbon cair meningkat, sedangkan kokas yang terbentuk berkurang. Tren yang sama tentang peningkatan hasil hidrokarbon cair sebagai fungsi peningkatan rasio pencampuran minyak PS juga diamati pada ko-perengkahan biodiesel minyak kemiri seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18. Hal tersebut menegaskan bahwa peningkatan rasio minyak PS sebagai ko-reaktan dalam perengkahan katalitik biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri memberikan efek sinergis positif dengan meningkatkan hasil bahan bakar cair. Hasil ini sesuai dengan penelitian Wang dkk. (2017) dan Mahari dkk. (2018) pada ko-pirolisis minyak jelantah dan limbah plastik HDPE. % Hasil hidrokarbon cair tertinggi untuk kedua variasi PS:BMJ dan PS:BMK diperoleh dari rasio 2:1 dengan hasil sebesar 80,4% dan 68,2% secara berturut-turut.



Gambar 4.17 %Hasil hidrokarbon cair dan kokas hasil ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dan biodiesel jelantah



Gambar 4.18 %Hasil hidrokarbon cair dan kokas hasil ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dan biodiesel kemiri

Menurut Mahari dkk. (2018), adanya jumlah limbah plastik yang lebih banyak dengan kandungan senyawa volatil tinggi dari penggunaan proporsi limbah plastik yang lebih tinggi dibandingkan biomassa menyebabkan produk uap pirolisis menjadi lebih banyak. Uap pirolisis tersebut yang kemudian dikondensasi menjadi bahan bakar cair selama proses perengkahan katalitik. Hasil analisis proksimat dan ultimat yang dilakukan oleh Shadangi dan Mohanty (2015) menunjukkan bahwa limbah polistirena memiliki kadar senyawa volatil hingga 99,5%. Oleh karena itu, % hasil hidrokarbon yang lebih tinggi diperoleh dari rasio bahan baku PS:BMJ dan PS:BMK yang lebih tinggi. Selain itu, minyak PS terdiri dari berbagai senyawa aromatik seperti benzosiklobutana, α-metilstirena, dan toluena yang dapat bertindak sebagai sumber hidrogen selama ko-perengkahan katalitik, sehingga dapat mendorong beberapa reaksi radikal seperti reaksi inisiasi, pembentukan radikal, dan reaksi tautan silang (Mahari dkk., 2018). Reaksi tersebut mengakibatkan peningkatan pembentukan senyawa volatil, yang selanjutnya terkondensasi membentuk produk hidrokarbon cair. Adanya interaksi atau sinergi dari limbah plastik dan biomassa selama proses ko-perengkahan juga dilaporkan pada beberapa penelitian sebelumnya (Muneer dkk., 2019 dan Park dkk., 2019). Selama proses ko-pirolisis, limbah plastik dapat mentransfer radikal hidrogennya kepada molekul penyusun biomassa melalui reaksi aromatisasi (Xue, 2017). Transfer hidrogen yang

terjadi dapat meningkatkan perengkahan senyawa hidrokarbon fraksi berat pada biomassa menjadi senyawa hidrokarbon fraksi lebih pendek yang berpotensi sebagai bahan bakar cair alternatif untuk kendaraan bermotor (Hassan [b] dkk., 2016).

Penurunan % hasil kokas dengan bertambahnya rasio PS: BMJ dan PS:BMK juga merupakan parameter lainnya yang menunjukkan adanya efek sinergis positif dari penambahan minyak PS pada proses perengkahan katalitik biodiesel minyak jelantah dan biodiesel minyak kemiri. Kokas merupakan produk samping dari proses perengkahan katalitik biomassa yang dapat menurunkan produksi bahan bakar cair. Sumber hidrogen yang disuplai oleh minyak PS selama proses perengkahan dapat mengurangi kemungkinan terjadinya reaksi sekunder antara PS dan radikal biomassa (Wang dkk., 2017). Reaksi sekunder yang dihasilkan dari interaksi antara radikal tersebut meningkatkan pembentukan kokas yang kemungkinan disebabkan oleh adsorpsi senyawa volatil (Martinez, dkk., 2014).

4.8 Analisis Komposisi Fraksi Produk Hidrokarbon Cair

Produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan katalitik dianalisis menggunakan instrumen GC-MS untuk mengetahui pengaruh jenis biomassa yang digunakan (biodiesel minyak jelantah dan minyak kemiri) dalam ko-perengkahan katalitik minyak PS dan pengaruh rasio bahan baku terhadap komposisi fraksi produk hidrokarbon cair. Fraksi komponen karbon dalam produk hidrokarbon cair dikelompokkan menjadi hidrokarbon di bawah C_7, hidrokarbon fraksi gasolin pada rentang $C_7 – C_{12}$, dan hidrokarbon di atas C_{12}. % Hasil untuk masing-masing fraksi ditentukan secara kuantitatif berdasarkan % luas pucak kromatogram. Analisis GC-MS dilakukan pada kondensat yang diperoleh pada 60 menit dan 120 menit waktu reaksi untuk mengetahui profil ko-perengkahan katalitik yang terjadi.

4.8.1 Pengaruh Waktu Reaksi terhadap Komposisi Fraksi Hidrokarbon

Hasil analisis komposisi fraksi hidrokarbon untuk semua variasi ditunjukkan pada Tabel 4.6. Penambahan waktu perengkahan menyebabkan % hasil hidrokarbon fraksi gasolin bertambah. % Hasil fraksi gasolin terbesar, yakni 81,17% diperoleh dari variasi ko-perengkahan katalitik PS:BMK 1:1 untuk waktu

reaksi 120 menit. Selama perengkahan katalitik, molekul hidrokarbon besar dipecah menjadi relatif lebih kecil melalui serangkaian reaksi seperti depolimerisai, dehidrasi, dekarbonilasi, dekarboksilasi, deoksigenasi, oligomerisasi, dan aromatisasi (Kabakci dan Hacıbektaşoğlu, 2017). Ketika waktu reaksi bertambah, uap produk perengkahan mengalami perengkahan lebih lanjut yang mendorong pembentukan hidrokarbon fraksi ringan seperti gasolin pada rentang $C_7 – C_{12}$.

Hasil yang sebaliknya terjadi pada rasio penambahan minyak plastik yang lebih tinggi. % Hasil fraksi gasolin berkurang dari 63,6% menjadi 31,19% dan dari 77,64% menjadi 67,66% untuk variasi PS:BMJ 2:1 dan PS:BMK 2:1 berturut-turut seiring bertambahnya waktu reaksi. Hal tersebut dikarenakan produk stirena hasil perengkahan limbah polistirena cenderung mengalami reaksi repolimerisasi membentuk senyawa dimer seperti 1,3-difenil butana pada waktu perengkahan yang relatif lebih panjang. Pada rasio penambahan minyak PS yang lebih tinggi, jumlah stirena yang mengalami reaksi repolimerisasi juga semakin meningkat. Oleh karena itu, %hasil fraksi gasolin berkurang sementara hasil hidrokarbon diatas C_{12} bertambah.

Tabel 4.6 Komposisi fraksi hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan katalitik

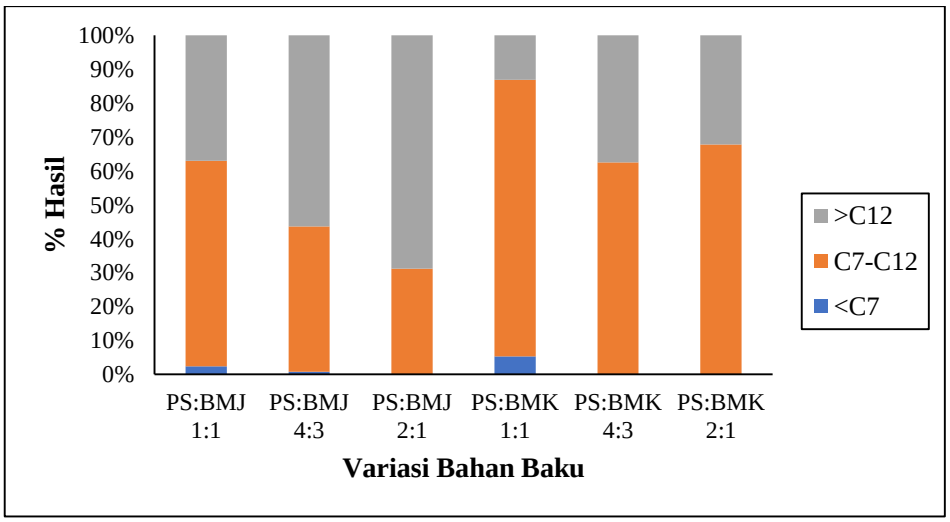
Variasi BBC	**Waktu (menit)**	**% Hasil**		
		< C_7	**$C_7 – C_{12}$**	**> C_{12}**
PS:BMJ 1:1	60	2,32	55,29	42,4
	120	2,32	60,69	37,04
PS:BMJ 4:3	60	0,34	16,42	78,53
	120	0,76	42,9	56,33
PS:BMJ 2:1	60	0	63,6	36,39
	120	0	31,19	68,78
PS:BMK 1:1	60	Tidak bisa diuji		
	120	5,23	81,17	13,05
PS:BMK 4:3	60	Tidak bisa diuji		
	120	0	62,52	27,48
PS:BMK 2:1	60	0	77,64	22,34
	120	0	67,66	32,05

Sampel produk hidrokarbon cair variasi PS:BMK 1:1 dan 4:3 yang diperoleh dari proses ko-perengkahan katalitik selama 60 menit tidak dapat diuji dengan GC-MS karena membentuk gel. Peristiwa pembentukan gel juga terjadi

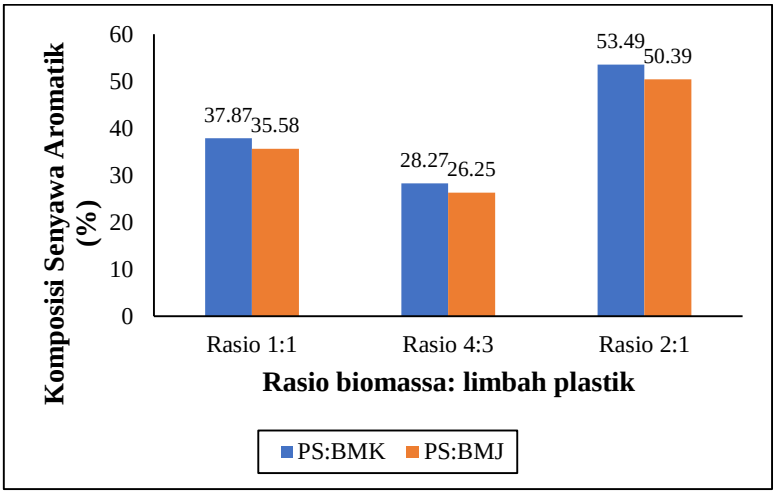
pada sampel minyak PS hasil pirolisis selama proses penyimpanan. Hal ini menunjukkan bahwa produk hidrokarbon cair variasi PS:BMK 1:1 dan 4:3 (60 menit) memiliki komposisi senyawa dominan yang sama dengan minyak pirolisis PS, yaitu monomer stirena dengan jumlah >80 % (Imani Moqadam dkk., 2015). Monomer stirena hasil pirolisis PS akan mengalami reaksi repolimerisasi membentuk polistirena ketika dibiarkan terlalu lama yang menyebabkan viskositasnya meningkat dan membentuk gel.

4.8.2 Pengaruh Jenis Biomassa terhadap Komposisi Fraksi Hidrokarbon

Berdasarkan Gambar 4.19 diketahui bahwa untuk waktu reaksi 120 menit, ko-perengkahan katalitik PS:BMK memberikan hasil fraksi gasolin lebih besar dibandingkan PS:BMJ, yakni rata-rata 62,52 – 81,17%. Fraksi hidrokarbon gasolin tersebut meliputi senyawa alifatik, aromatik, serta senyawa yang mengandung oksigen seperti alkohol, aldehid, keton, dan ester. Sementara itu, produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan katalitik PS:BMJ lebih mengarah pada fraksi hidrokarbon > C_{12} (fraksi diesel) dengan hasil 37,04 – 68,78%. Hal tersebut menunjukkan bahwa jenis biomassa pada proses ko-perengkahan katalitik dengan minyak PS memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil fraksi hidrokarbon gasolin.



Gambar 4.19 Grafik pengaruh jenis biomassa terhadap komposisi fraksi hidrokarbon cair



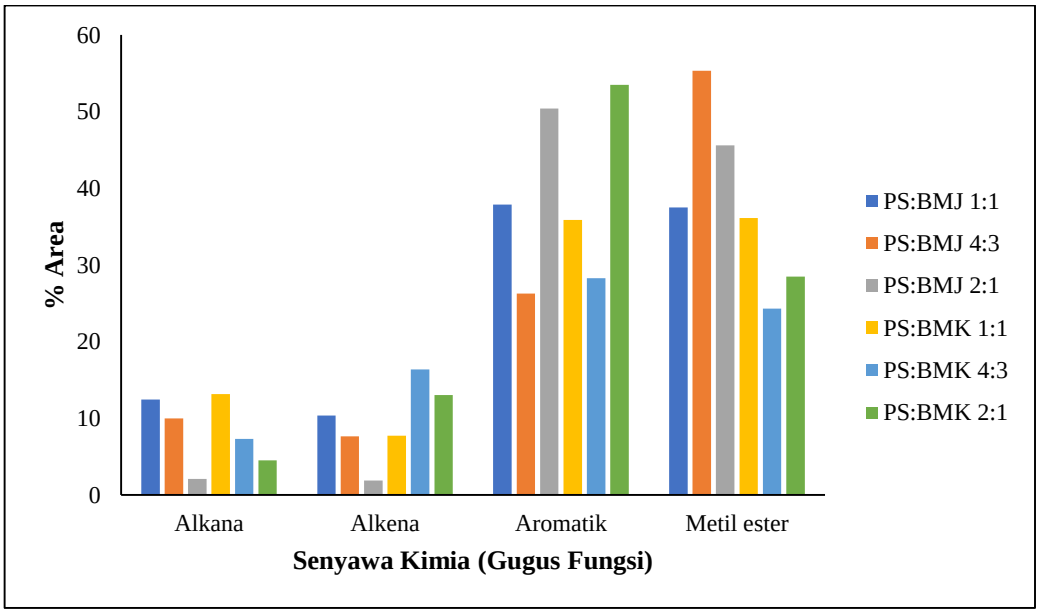
Gambar 4.20 Grafik pengaruh jenis biomassa terhadap komposisi senyawa aromatik

Pengaruh jenis biomassa terhadap komposisi fraksi hidrokarbon cair dapat terjadi akibat adanya perbedaan panjang rantai karbon maupun ketidakjenuhan molekul hidrokarbon penyusunnya. Dilihat dari komposisi penyusun utamanya, minyak kemiri tersusun atas asam lemak linoleat dan linolenat dengan ketidakjenuhan yang lebih tinggi dibandingkan asam oleat sebagai penyusun utama minyak jelantah. Biomassa dengan kandungan asam lemak tidak jenuh dan rantai karbon pendek yang relatif tinggi dapat memungkinkan diperolehnya fraksi gasolin dengan kandungan senyawa aromatik yang tinggi (Araújo dkk., 2017). Hal tersebut dikarenakan adanya ikatan rangkap dalam asam lemak tidak jenuh memfasilitasi pemutusan rantai karbon, reaksi siklik, dan selanjutnya reaksi aromatisasi pada proses perengkahan biomassa (Kubicka dan Kaluza, 2010). Di sisi lain, biomassa dengan kandungan asam lemak jenuh tinggi dan rantai karbon besar memungkinkan diperolehnya fraksi diesel dengan kandungan senyawa aromatik yg lebih rendah. Pendapat tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh pada penelitian ini. Gambar 4.20 menunjukkan bahwa pada rasio bahan baku yang sama, ko-perengkahan PS:BMK menghasilkan senyawa aromatik yang sedikit lebih tinggi daripada PS:BMJ. Rata-rata peningkatan komposisi senyawa aromatik dalam produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan PS:BMK yang dicapai sebesar 6,76%. Dengan demikian, dapat diketahui bahwa ko-perengkahan biodiesel minyak kemiri

dengan minyak PS lebih menguntungkan untuk pengayaan bahan bakar cair fraksi gasolin dengan kandungan senyawa aromatik yang lebih tinggi.

4.9 Distribusi Senyawa Kimia dalam Produk Hidrokarbon Cair

Analisis distribusi senyawa kimia dalam produk hidrokarbon cair dilakukan untuk variasi waktu reaksi 120 menit dan hasilnya dirangkum dalam Gambar 4.21. Dari grafik tersebut, diketahui bahwa produk hidrokarbon cair hasil ko-perengkahan katalitik PS:BMJ dan PS:BMK terdiri dari senyawa dominan berupa hidrokarbon aromatik dan metil ester, serta sejumlah kecil hidrokarbon alifatik seperti senyawa alkana dan alkena. Kecenderungan distribusi senyawa kimia yang acak menunjukkan bahwa rasio bahan baku tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap produk perengkahan.



Gambar 4.21 Distribusi senyawa kimia dalam BBC hasil ko-perengkahan katalitik PS:BMJ dan PS:BMK pada suhu 300°C selama 120 menit

Berbeda dari rasio bahan baku, jenis biomassa sedikit mempengaruhi distribusi senyawa kimia dalam produk hidrokarbon cair. Secara umum, proses ko-perengkahan katalitik minyak kemiri menghasilkan komposisi produk hidrokarbon aromatik dan alifatik yang lebih tinggi dibandingkan minyak jelantah. Produk perengkahan katalitik minyak jelantah masih mengandung senyawa oksigenat

berupa metil ester yang cukup tinggi, yakni 37,51%, 55,33%, dan 45,61% untuk rasio bahan baku 1:1, 4:3, dan 2:1 secara berturut-turut. Sedangkan komposisi metil ester dalam produk perengkahan katalitik minyak kemiri hanya berkisar 24,3 – 36,12% untuk masing-masing variasi rasio bahan baku. Hal tersebut secara tidak langsung menunjukkan bahwa biodiesel minyak kemiri lebih mudah direngkah menjadi senyawa hidrokarbon alifatik yang lebih pendek dibandingkan biodiesel minyak jelantah.

Tabel 4.6 Daftar senyawa hasil ko-perengkahan katalitik

Nama Senyawa	Rumus Molekul	% Area Variasi PS:BMJ			% Area Variasi PS:BMK		
		1:1	4:3	2:1	1:1	4:3	2:1
Senyawa Hidrokarbon Aromatik							
Toluena	C_7H_8	4,32	2,45	2,76	5,56	-	-
Benzosiklobutana	C_8H_8	15,26	9,13	9,56	19,40	16,09	35,93
Etil benzena	C_8H_{10}	4,92	1,89	1,37	2,89	-	-
α-Metilstirena	C_9H_{10}	6,45	4,01	4,86	5,01	3,35	6,93
1,3-difenil propana	$C_{15}H_{16}$	3,61	5,89	17,51	2,72	6,26	8,92
1,4-difenil butana	$C_{16}H_{18}$	-	-	3,48	-	-	2,16
Senyawa Hidrokarbon Alifatik							
Oktana	C_8H_{18}	1,40	0,87		1,01	-	-
Nonana	C_9H_{20}	2,40	2,00	1,39	1,42	-	-
Dekana	$C_{10}H_{22}$	1,44	0,64		0,60	-	-
Dodekana	$C_{12}H_{26}$	4,87	3,20	0,68	7,76	4,02	-
Heksena	C_6H_{12}	1,04	0,76	-	-	-	-
4-Metil heptena		-	-	-	-	2,43	5,01
Dekena	$C_{10}H_{20}$	1,18	-	0,53	0,67	-	-
Undekena	$C_{11}H_{22}$	1,26	0,93	0,31	0,67	-	-
7-Metil undekena	$C_{12}H_{24}$	-	-	-	-	4,29	1,59
4,5-dimetil undekena	$C_{13}H_{26}$	-	-	-	-	4,62	5,09
Tetradekena	$C_{14}H_{28}$	-	-	-	1,35	-	-
8-Heptadekena	$C_{17}H_{34}$	-	-	-	1,50	-	-
Senyawa Metil Ester							
Metil heksanoat	$C_7H_{14}O_2$	-	-	-	2,51	-	1,62
Metil heptanoat	$C_8H_{16}O_2$	0,90	-	-	3,83	1,31	2,12
Metil oktanoat	$C_9H_{18}O_2$	1,53	1,12	0,49	5,41	2,33	2,61
Metil nonanoat	$C_{10}H_{20}O_2$	1,98	1,37	0,58	3,41	1,97	2,29
Metil dekanoat	$C_{11}H_{22}O_2$	4,37	4,78	4,36	8,33	-	-
Metil undekanoat	$C_{12}H_{24}O_2$	0,60	-	-	-	13,48	7,85
Dimetil dekanadioat	$C_{12}H_{22}O_4$	1,40	1,94	2,72	1,43	3,78	2,01
Metil heksadekanoat	$C_{17}H_{34}O_2$	18,86	-	-	2,82	7,39	4,42
Metil oktadekanoat	$C_{19}H_{38}O_2$	5,19	31,75	29,12	0,54	3,24	-
Metil oktadek-9-enoat	$C_{19}H_{36}O_2$	-	7,54	-	-	8,95	2,78
Metil oktadek-11-enoat	$C_{19}H_{36}O_2$	3,93	5,63	5,68	1,52	-	2,79

Senyawa metil ester dalam hidrokarbon cair berasal dari bahan baku biodiesel minyak jelantah dan kemiri yang digunakan. Daftar senyawa kimia hasil ko-perengkahan katalitik ditunjukkan pada Tabel 4.6. Pada ko-perengkahan katalitik PS:BMJ, produk metil ester paling dominan berupa metil dekanoat, metil oktadekanoat, dan metil oktadek-11-enoat. Senyawa ester tersebut diturunkan dari asam lemak penyusun utama minyak jelantah selama proses transesterifikasi. Sementara itu, produk metil ester yang diperoleh dari hasil perengkahan katalitik PS:BMK lebih beragam dengan rantai karbon lebih pendek seperti metil heksanoat, metil heptanoat, metil oktanoat, metil nonanoat dan metil undekanoat. Hal tersebut menegaskan bahwa pada suhu perengkahan 300°C, molekul metil ester minyak kemiri mengalami pemutusan ikatan rangkap pada asam lemak tidak jenuh penyusunnya, membentuk radikal hidrokarbon dan senyawa metil ester dengan rantai karbon yang lebih pendek (Lam dkk., 2019). Akan tetapi pada perengkahan biodiesel minyak jelantah, suhu tersebut belum mampu untuk mengatasi energi ikatan pada molekulnya sehingga sejumlah besar senyawa metil ester penyusunnya belum terdegradasi.

Hidrokarbon cair hasil perengkahan katalitik PS:BMK memiliki komposisi produk hidrokarbon aromatik yang mirip dengan PS:BMJ, meliputi benzosiklobutana, α-metilstirena, 1,3-difenilpropana, toluena, dan etilbenzena. Diantara senyawa aromatik tersebut, benzosiklobutana merupakan produk paling dominan dengan % luas puncak maksimum sebesar 15,26% pada perengkahan katalitik PS:BMJ dan 35,93% pada PS:BMK. Adanya kemiripan komposisi senyawa aromatik pada produk ko-perengkahan katalitik (PS:BMJ dan PS:BMK) dengan minyak PS mengindikasikan bahwa senyawa aromatik tersebut berasal dari degradasi limbah PS. Selain itu, menurut Veses dkk. (2019) penggunaan katalis mesopori mendorong terjadinya reaksi perengkahan sekunder molekul biomassa seperti reaksi isomerisasi, aromatisasi, dan reaksi Diels-Alder untuk menghasilkan lebih banyak senyawa aromatik.

Sementara itu, senyawa hidrokarbon alifatik alkana yang terbentuk memiliki komposisi rantai karbon $C_8 – C_{12}$ dimana dodekana merupakan senyawa dominan pada kedua produk perengkahan katalitik PS:BMJ dan PS:BMK. Senyawa alkena dengan rantai karbon $C_6 – C_{17}$ juga teramati pada produk hidrokarbon cair.

Senyawa alkena pada PS:BMJ terdiri dari 1-heksena, 1-dekena, dan 1-undekena, sedangkan pada PS:BMK pembentukan senyawa alkena dengan rantai cabang seperti 4-metil heptena, 7-metil undekena, dan 4,5-dimetil undekena lebih dominan (rata-rata 4 - 5%) sebagai produk perengkahan katalitik. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menjelaskan bahwa radikal hidrokarbon hasil reaksi dekarboksilasi molekul ester bergabung dengan fragmen radikal bebas dari limbah plastik untuk membentuk senyawa hidrokarbon alifatik (Lam dkk., 2019)

4.10 Ko-Perengkahan Katalitik Metil Ester dengan Limbah Polistirena

Pada penelitian ini, proses perengkahan terjadi karena adanya pengaruh temal dan katalitik secara bersamaan. Adanya pengaruh termal mengakibatkan terjadinya perengkahan molekul hidrokarbon menjadi fragmen radikal bebas yang selanjutnya cenderung mengalami reaksi oligomerisasi. Sedangkan peran katalis adalah untuk mengkatalisis reaksi rengkah dengan pembentukan ion karbonium melalui pemutusan rantai karbon pada posisi beta dari ion karbonium tersebut. Dalam proses ini selain reaksi pemutusan rantai hidrokarbon juga terjadi reaksi perengkahan sekunder lainnya seperti isomerisasi, siklikasi, dan repolimerisasi (Sibarani, 2012).

Minyak plastik PS yang dicampurkan dalam biodisel minyak kemiri (BMK) dan biodiesel minyak jelantah (BMJ) berperan sebagai sumber hidrogen selama proses perengkahan katalitik yang dapat mengarahkan terjadinya beberapa reaksi radikal (seperti inisiasi, pembentukan radikal, dan *cross link reaction*). Terjadinya beberapa reaksi radikal tersebut dapat meningkatkan produksi senyawa volatil yang kemudian akan terkondensasi membentuk bahan bakar cair. Semakin banyaknya minyak plastik yang ditambahkan menyebabkan semakin meningkatnya produk senyawa volatil. Akan tetapi senyawa monoaromatik hasil perengkahan limbah PS cenderung mengalami reaksi repolimerisasi membentuk fraksi hidrokarbon yang lebih besar dan menurunkan hasil hidrokarbon fraksi gasolin sehingga diperlukan rasio komposisi bahan baku yang tepat. Teori tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini bahwa % hasil bahan bakar cair meningkat dengan bertambahnya rasio minyak PS yang ditambahkan, akan tetapi komposisi fraksi hidrokarbon gasolinnya ($C_7 – C_{12}$) semakin berkurang.

Mekanisme reaksi yang terjadi pada proses ko-perengkahan katalitik metil ester dengan minyak PS pada penelitian ini mengikuti mekanisme yang telah dilaporkan oleh Veses, dkk. (2019) yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Mekanisme degradasi termal polistirena pada suhu tinggi menghasilkan radikal rantai akhir dengan pemutusan rantai utama yang diikuti depolimerisasi dan pemindahan hidrogen intramolekul (Hassan dkk., 2016). α-metilstirena dapat dibentuk dari reaksi antara monomer stirena dengan radikal metil yang berasal dari degradasi senyawa metil ester. Sedangkan senyawa aromatik yang lebih besar seperti 1,3-difenil propana dan 1,4-difenil butana dihasilkan dari reaksi antara radikal stirena dengan radikal benzil yang terbentuk dari degradasi stirena dan reaksi dimerisasi dua radikal stirena secara berturut-turut. Sementara itu, dealkilasi senyawa fenil butena hasil degradasi polistirena menghasilkan suatu radikal yang selanjutnya dapat mengalami dua reaksi utama, yakni siklisasi internal dan perengkahan rantai ujung. Reaksi pertama menghasilkan produk benzosiklobutana, sedangkan reaksi perengkahan melalui pemutusan ikatan C-C pada posisi β (*β-scission*) menghasilkan produk toluena dan etil benzena.

Mekanisme reaksi perengkahan metil ester dipelajari oleh Botton dkk. (2016) menggunakan minyak jarak. Ikatan rangkap pada asam lemak tidak jenuh dalam senyawa metil ester dapat mengalami reaksi pembelahan membentuk radikal hidrokarbon dan senyawa metil ester dengan rantai lebih pendek. Selain itu, metil ester juga mengalami reaksi pemutusan rantai akhir H^+ yang diikuti oleh reaksi dekarboksilasi dan dekarbonilasi menghasilkan senyawa alkana rantai panjang. Senyawa tersebut selanjutnya dapat mengalami reaksi perengkahan maupun dehidrogenasi dan pemutusan β membentuk senyawa alkana dengan rantai hidrokarbon lebih pendek maupun senyawa alkena secara berturut-turut. Mekanisme reaksi yang diusulkan tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini yang menunjukkan bahwa reaksi perengkahan biodiesel minyak kemiri dan biodiesel minyak jelantah dengan minyak PS menghasilkan senyawa metil ester yang lebih kecil seperti metil heksanoat hingga metil dekanoat serta dodekana sebagai produk senyawa alifatik paling dominan. Sementara itu menurut Lam dkk. (2019), radikal hidrokarbon dari reaksi dekarboksilasi metil ester dapat bergabung dengan radikal stirena membentuk senyawa alkil benzena.

4.11 Karakteristik Sifat Fisika dan Kinerja Campuran Bahan Bakar Cair

Karakteristik sifat fisika bahan bakar cair sangat penting diselidiki untuk mengetahui pengaruh penambahan hasil perengkahan pada bahan bakar komersil premium. Apabila dengan penambahan hasil perengkahan dapat meningkatkan karakteristik dari bahan bakar dan sesuai dengan standar bahan bakar gasolin, maka produksi campuran bahan bakar cair pada penelitian ini berhasil dan dapat direkomendasikan sebagai alternatif bahan bakar gasolin. Standar bahan bakar gasolin berdasarkan SNI 3506:2017 dapat ditunjukkan pada Tabel 4.7.

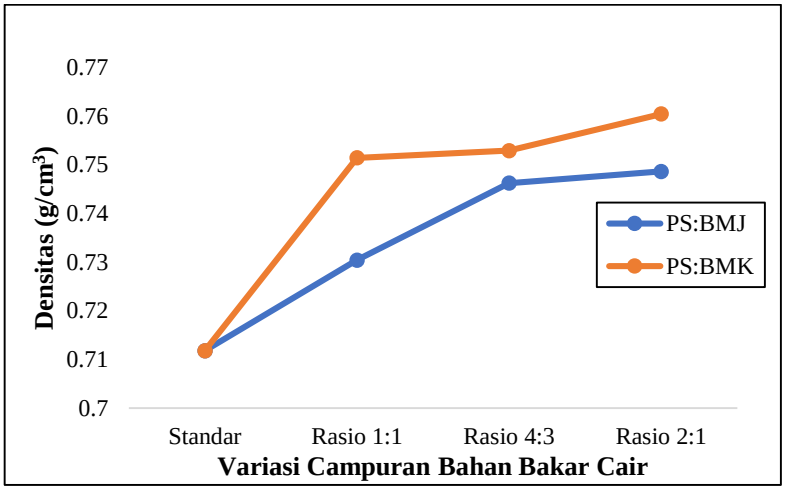
Terdapat beberapa parameter sifat fisika bahan bakar cair yang dilakukan pada penelitian ini yaitu densitas, viskositas, titik nyala, nilai kalor, dan angka oktan (RON).

Tabel 4.7 Karakteristik sifat fisika campuran bahan bakar cair

Parameter Sifat Fisika	Standar Mutu Gasolin SNI 3506:2017	Hasil Produksi Bahan Bakar Cair					
		PS:BMJ 1:1	PS:BMJ 4:3	PS:BMJ 2:1	PS:BMK 1:1	PS:BMK 4:3	PS:BMK 2:1
Densitas pada 15^{o}C (g/cm^{3})	0,71 – 0,77	0,7304	0,7462	0,7486	0,7514	0,7529	0,7604
Viskositas Kinematik pada 40^{o}C (mm^{2}/s)	<1,17	0,34	0,36	0,41	0,49	0,33	0,39
Nilai kalor (kkal/kg)	10.150	19.226	18.523	9.875	16.663	20.843	27.028
Titik nyala (^{o}C)	<42	< -39	< -39	< -39	< -20,0	< -10,8	< -16,5
Angka oktan (RON)	Min. 88	97,4	99,7	98,5	100,5	97,8	98,1

4.11.1 Densitas Campuran Bahan Bakar Cair

Nilai densitas pada bahan bakar sangat penting untuk diketahui dikarenakan berhubungan dengan kualitas pembakaran bahan bakar. Pada umunya bahan bakar yang memiliki densitas rendah lebih menguntungkan karena akan mudah menguap dan mudah terbakar pada mesin pembakaran (Wang, dkk., 2017). Hasil penentuan densitas campuran bahan bakar cair hasil perengkahan katalitik pada setiap variasi disajikan dalam Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Densitas campuran bahan bakar cair

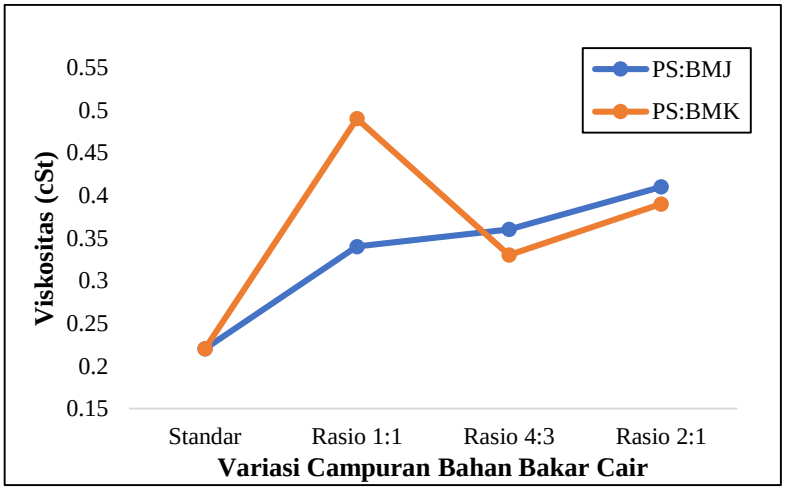
Gambar 4.24 menunjukkan bahwa campuran bahan bakar cair (CBBC) hasil perengkahan memiliki densitas yang lebih besar dibandingkan standar bahan bakar Premium yang digunakan. Hal tersebut dikarenakan produk perengkahan masih mengandung sejumlah besar senyawa oksigenat dengan rantai hidrokarbon panjang (Mahari, dkk., 2018). Selain itu, peningkatan rasio minyak PS yang ditambahkan menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan terhadap densitas CBBC hasil perengkahan katalitik PS:BMJ maupun PS:BMK. Pada rasio bahan baku 2:1 CBBC variasi PS:BMJ dan PS:BMK memberikan densitas terbesar, yakni 0,7486 g/cm^3 dan 0,7604 g/cm^3 secara berturut-turut. Densitas CBBC semakin besar seiring dengan meningkatnya rasio minyak PS yang ditambahkan. Peningkatan densitas CBBC dapat dikaitkan dengan bertambahnya jumlah fraksi hidrokarbon di atas C_{12} akibat reaksi repolimerisasi monomer stirena pada jumlah penambahan minyak PS yang semakin besar.

Pada variasi jenis biomassa, perengkahan katalitik PS:BMK menghasilkan densitas yang lebih tinggi dibandingkan PS:BMJ. Hal tersebut dapat dikaitkan dengan tingginya komposisi senyawa aromatik pada produk hidrokarbon cair dari perengkahan PS:BMK. Senyawa aromatik seperti α-metilstirena, benzosiklobutana, dan 1,3-difenil propana sebagai komponen yang dominan dalam BBC memiliki densitas yang tinggi pada kisaran 0,91 – 0,98 g/ cm^3 sehingga dapat meningkatkan densitas CBBC yang dihasilkan secara keseluruhan.

Densitas dari seluruh variasi campuran bahan bakar cair yang diperoleh pada penelitian ini telah memenuhi kriteria standar bahan bakar gasolin berdasarkan SNI 3506:2017 dikarenakan masih masuk dalam kisaran nilai densitas yang diizinkan yaitu 0,175-0,770 g/ cm^3. Berdasarkan hasil analisis data densitas diatas, biodiesel minyak jelantah lebih baik dalam meningkatkan karakteristik densitas CBBC dibandingkan biodiesel minyak kemiri karena menghasilkan nilai densitas yang lebih rendah.

4.11.2 Viskositas Campuran Bahan Bakar Cair

Viskositas dari bahan bakar berkaitan dengan kekentalan suatu bahan bakar (Mahari dkk., 2018). Viskositas yang terlalu rendah menyebabkan kebocoran pada jalur injeksi, sedangkan viskositas yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan injeksi tersumbat dan mempersulit pengabutan bahan bakar (Assari, 2019). Hasil pengujian viskositas dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Viskositas campuran bahan bakar cair

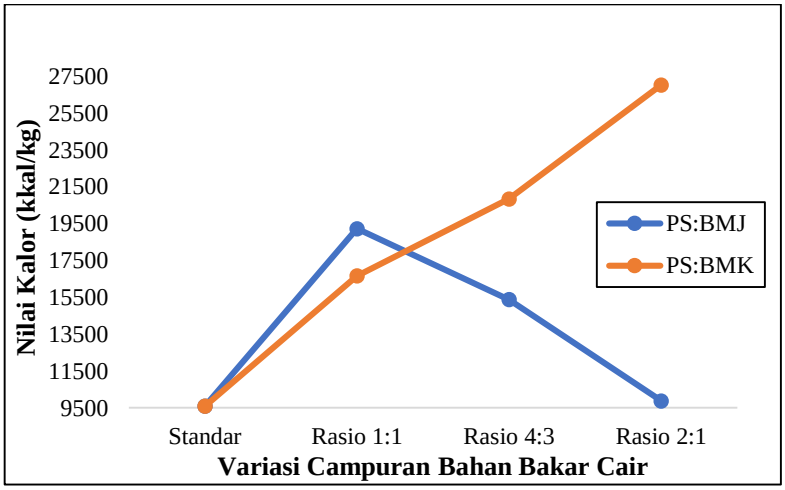
Nilai viskositas campuran bahan bakar cair pada variasi PS:BMJ memiliki kecenderungan yang sama dengan nilai densitasnya yang mana nilai viskositas CBBC meningkat seiring dengan bertambahnya rasio minyak PS yang dicampurkan dalam perengkahan katalitik. Menurut Wako dkk. (2018), viskositas dan densitas bergantung pada interaksi antar molekulnya. Senyawa dengan rantai hidrokarbon yang lebih panjang memiliki interaksi yang lebih kuat yang mengakibatkan nilai

viskositas dan densitas lebih besar. Hal tersebut sesuai dengan data % hasil komponen fraksi hidrokarbon yang menunjukkan bahwa semakin banyak minyak plastik PS yang ditambahkan, fraksi hidrokarbon yang terbentuk semakin mengarah pada fraksi hidrokarbon panjang (> C_{12}). Kandungan fraksi hidrokarbon di atas C_{12} yang tinggi mengakibatkan meningkatnya viskositas CBBC.

Pada variasi PS:BMK, nilai viskositas CBBC tidak dipengaruhi oleh rasio minyak PS yang ditambahkan dalam proses ko-perengkahan katalitik. Perengkahan katalitik PS:BMK menghasilkan CBBC dengan viskositas terbesar pada rasio PS:BMK 1:1, yaitu 0,49 cSt. Meskipun demikian, nilai viskositas untuk semua variasi CBBC yang dihasilkan pada penelitian ini telah memenuhi standar SNI 3506:2017 dengan nilai viskositas dibawah 1,17 cSt.

4.11.3 Nilai Kalor Campuran Bahan Bakar Cair

Penentuan nilai kalor campuran bahan bakar cair dilakukan dengan instrumen bom kalorimeter. Hasil analisis nilai kalor campuran bahan bakar cair ditampilkan dalam Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Nilai kalor campuran bahan bakar cair

Rasio bahan baku memiliki pengaruh yang berbeda terhadap nilai kalor CBBC pada jenis biomassa yang berbeda. Pada proses perengkahan PS:BMJ nilai kalor CBC berkurang dari 19.226 kkal/kg – 9.875 kkal/kg seiring bertambahnya rasio minyak PS yang ditambahkan. Akan tetapi, nilai kalor CBBC meningkat dari

16.663 – 27.028 kkal/kg seiring bertambahnya rasio minyak PS pada proses perengkahan PS:BMK.

Adanya perbedaan kecenderungan nilai kalor tersebut dapat dikaitkan dengan komposisi senyawa penyusun produk hidrokarbon cair pada masing-masing variasi. Shadangi dan Mohanty (2015) melaporkan bahwa karena pirolisis limbah polistirena menghasilkan senyawa kaya aromatik, produk hidrokarbon cair yang dihasilkan akan memiliki lebih banyak kandungan energi yang dapat meningkatkan nilai kalor produk BBC yang dihasilkan. Lebih lanjut, Hassan dkk. (2016) menjelaskan bahwa perengkahan katalitik biomassa dapat secara efektif menurunkan kandungan senyawa oksigenat dalam produk hidrokarbon cairnya melalui reaksi dehidrasi, dekarbonilasi, serta dekarboksilasi sehingga terjadi peningkatan nilai kalor dari bahan bakar cair yang dihasilkan. Hasil tersebut sesuai dengan hasil pada penelitian ini. Peningkatan rasio penambahan minyak PS pada perengkahan katalitik PS:BMJ menghasilkan peningkatan komponen senyawa oksigenat (metil ester) hingga 21,56% dari rasio PS:BMJ 1:1 menjadi 2:1, sedangkan hal sebaliknya terjadi pada proses perengkahan PS:BMK. Oleh karena itu, nilai kalor CBBC pada perengkahan PS:BMJ berkurang seiring bertambahnya rasio minyak PS yang ditambahkan.

Senyawa metil ester minyak kemiri dengan kandungan asam lemak tidak jenuh yang relatif lebih tinggi dibandingkan metil ester minyak jelantah dapat memungkinkan diperolehnya fraksi gasolin dengan kandungan senyawa aromatik yang lebih tinggi sebagaimana ditunjukkan pada Gambaar 4.19. Hal tersebut yang mendasari perolehan nilai kalor yang lebih tinggi pada CBBC hasil perengkahan PS:BMK dibandingkan PS:BMJ. Berdasarkan hasil analisis diatas, dapat diketahui bahwa karakteristik nilai kalor CBBC pada penelitian ini memenuhi standar SNI 3506:2017. Selain itu, produk perengkahan katalitik PS:BMK dapat meningkatkan kualitas CBBC lebih baik dibandingkan variasi PS:BMJ yang ditunjukkan dengan nilai kalor CBBC yang lebih tinggi.

4.11.4 Titik Nyala Campuran Bahan Bakar Cair

Pengujian titik nyala sangat penting dilakukan untuk mengetahui karakteristik kestabilan bahan bakar terhadap kemungkinan menyala/terbakar serta

sebagai pertimbangan cara penyimpanan yang aman (Wiratmaja, 2010). Bahan bakar yang memiliki titik nyala rendah maka lebih mudah terbakar (Sakthivela dkk., 2018). Hasil pengujian titik nyala campuran bahan bakar cair ditunjukkan pada Tabel 4.8

Tabel 4.8 Titik nyala CBBC

Variasi CBBC	Temperatur Titik Nyala (ºC)
PS:BMJ 1:1	< -39
PS:BMJ 4:1	< -39
PS:BMJ 2:1	< -39
PS:BMK 1:1	< -20
PS:BMK 4:3	< -10,8
PS:BMK 2:1	< - 16,5

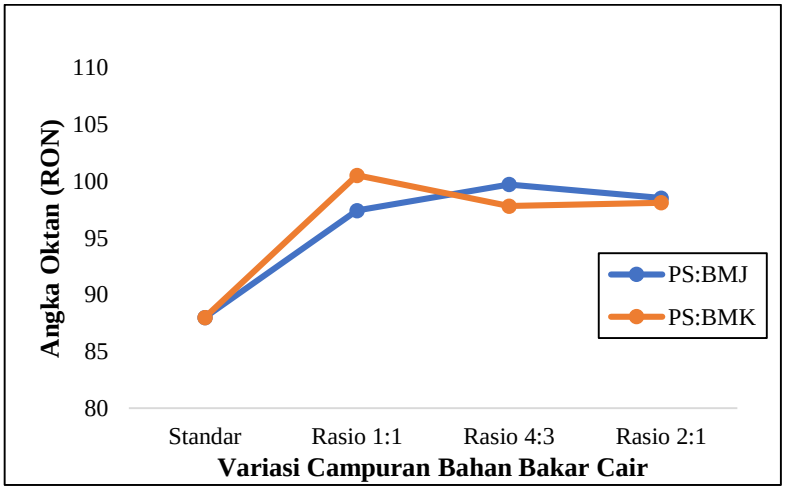
Temperatur titik nyala yang tercatat merupakan temperatur saat terjadi nyala api pertama setelah diberikan sumber api. Pada proses penentuan titik nyala, campuran bahan bakar cair akan dikondisikan pada suhu terendah menggunakan *dry ice*. Suhu terendah yang dapat dicapai mencapai -40 °C. Bahan bakar komersil "Premium RON 88" sebagai standar diuji terlebih dahulu untuk membandingkan nilai titik nyalanya dengan hasil produksi campuran bahan bakar cair. Titik nyala premium diperoleh pada temperatur -7 °C. Berdasarkan hasil tersebut, masing-masing variasi CBBC memiliki titik nyala dibawah "Premium RON 88". Temperatur titik nyala CBBC yang sebenarnya masih berada dibawah temperatur yang tertulis dalam Tabel 4.2. Akan tetapi, instumen yang digunakan untuk pengukuran titik nyala memiliki keterbatasan suhu minimum (-50°C) sehingga korelasi yang tepat antara pengaruh jenis biomassa dan rasio bahan dalam perengkahan katalitik PS:BMJ dan PS:BMK terhadap karakteristik titik nyala belum diketahui secara tepat.

4.11.5 Angka Oktan (RON) Campuran Bahan Bakar Cair

Angka oktan adalah suatu parameter performa *anti-knocking* dari bahan bakar gasolin. Pengujian nilai RON CBBC dilakukan dengan instrumen *Octane Meter*. Hasil pengujian RON disajikan dalam Gambar 4.27. Data hasil analisis RON

menunjukkan bahwa nilai RON seluruh variasi CBBC berada diatas standar yang ditetapkan dalam SNI 3506:2017 dengan nilai RON tertinggi diperoleh pada variasi CBBC PS:BMK 1:1 (100,5), kemudian diikuti dengan variasi PS:BMJ 4:3 (99,7), PS:BMJ 2:1 (98,5), PS: BMK 2:1 (98,1), PS:BMK 4:3 (97,8) dan terendah adalah PS:BMJ 1:1 (97,4).

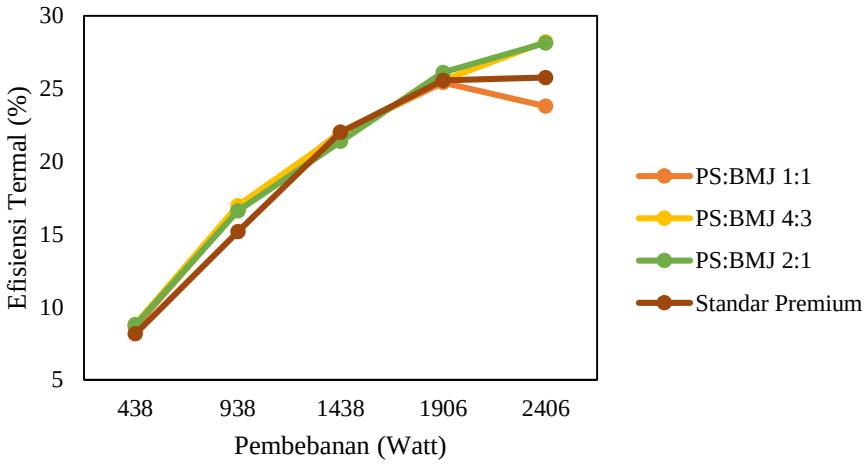
Berdasarkan Gambar 4.25 diketahui bahwa CBBC hasil perengkahan PS:BMK menunjukkan nilai RON yang cenderung lebih tinggi dibandingkan variasi PS:BMJ. Peningkatan angka oktan pada CBBC hasil perengkahan katalitik PS:BMK dapat dikaitkan dengan tingginya komposisi senyawa hidrokarbon aromatik didalamnya. Hasil tersebut sesuai dengan hasil penelitian Bayat dkk. (2016) yang melaporkan bahwa perengkahan katalitik metil ester minyak kanola menghasilkan bahan bakar cair dengan komponen penyusun utamanya berupa hidrokarbon aromatik hingga 21,8% dan nilai oktan yang tinggi pada kisaran 100 – 105. Selain itu, berdasarkan analisa antara %*yeild* fraksi hidrokarbon dengan nilai RON didapat informasi bahwa nilai RON juga dipengaruhi oleh banyaknya fraksi hidrokarbon gasolin (C_7 – C_{12}). Bahan bakar cair variasi PS:BMK 1:1 dengan nilai RON terbesar memiliki fraksi hidrokarbon gasolin paling tinggi pula, yakni mencapai 81,17%.



Gambar 4.25 Nilai RON campuran bahan bakar

4.11.6 Kinerja Campuran Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin

Kinerja bahan bakar cair pada mesin dapat diukur dengan beberapa parameter, seperti *Brake Thermal Eficiency* (BTE), *Brake Spesific Fuel Consumtion* (BSFC), *Brake Spesific Energy Consumtion* (BSEC), *Total Heat* (Q_{in}), dan ratio relatif udara bahan bakar (Topgul, 2015). Pada penelitian ini, kinerja CBBC dilihat dari parameter *Brake Thermal Eficiency* (BTE) atau bisa disebut % efisiensi termal. Efisiensi termal adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam (Yuvenda, dkk., 2019). Karakteristik viskositas, densitas dan nilai kalor yang telah diketahui sebelumnya pada campuran bahan bakar cair sangat berpengaruh terhadap kinerja campuran bahan bakar cair.



Gambar 4.26 Efisiensi termal campuran bahan bakar cair

Pengujian kinerja CBBC pada mesin gasolin untuk hasil perengkahan katalitik PS:BMK tidak bisa dilakukan karena viskositasnya yang terlalu besar. Bahan bakar dengan viskositas tinggi akan menyumbat inlet ruang pembakaran sehingga proses pembakaran terganggu dan dapat merusak mesin (Shadangi dkk., 2015). Secara teori, peningkatan efisiensi termal dipengaruhi oleh penambahan daya mesin. Hasil pengujian kinerja CBBC untuk PS:BMJ menunjukkan hasil yang sesuai dengan teori tersebut. Persen efisiensi termal campuran bahan bakar cair

semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pembebanan (Watt) pada mesin gasolin seperti ditunjukkan pada Gambar 4.26.

Persen efisiensi termal “Premium RON 88” sebagai standar pada nilai pembebanan 2145 Watt diketahui sebesar 25,75 %. Pencampuran BBC hasil perengkahan katalitik PS:BMJ mengakibatkan % efisiensi termal CBBC semakin tinggi dan nilai tersebut semakin meningkat seiring bertambahnya rasio pencampuran minyak PS. Campuran bahan bakar cair dengan variasi PS:BMJ 4:3 memiliki efisiensi termal terbesar, yakni 28,22% pada pembebanan 2118 Watt. Peningkatan nilai persen efisiensi termal ini dipengaruhi oleh peningkatan nilai RON dari campuran bahan bakar cair tersebut. Semakin besar nilai RON suatu bahan bakar cair, semakin rendah ketukan (*knocking*) yang terjadi sehingga meningkatkan atomisasi campuran udara dan bahan bakar yang mengarah pada peningkatan *Brake Thermal Efficiency* (BTE) (Senthilkumar dan Sankaranarayanan, 2016). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Arisandi dkk. (2012) dimana efisiensi termal campuran bahan bakar cair biodiesel dengan diesel dipengaruhi oleh nilai RON. Semakin besar nilai RON sampel BBC, semakin besar pula efisiensi termalnya. Dengan demikian, berdasarkan analisis nilai % efisiensi termalnya, penambahan BBC hasil perengkahan katalitik PS:BMJ dapat meningkatkan kinerja bahan bakar secara efektif.

"*Halaman ini sengaja dikosongkan*"

BAB 5
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini, peningkatan hasil dan kualitas bahan bakar cair telah berhasil dicapai melalui proses ko-perengkahan katalitik limbah polistirena dengan biodiesel minyak jelantah (BMJ) dan biodiesel minyak kemiri (*Aleurites moluccana*) (BMK) menggunakan katalis Al-MCM-41/keramik. Rasio minyak PS yang ditambahkan berpengaruh terhadap hasil bahan bakar cair yang dihasilkan. Hasil bahan bakar cair cenderung meningkat sebagai fungsi kenaikan rasio bahan baku minyak PS dalam ko-perengkahan katalitik PS:BMJ dan PS: BMK. Perengkahan katalitik PS:BMJ memberikan % hasil bahan bakar cair (BBC) berturut-turut 64,6%, 71,6%, dan 80,4% untuk kenaikan rasio bahan baku 1:1, 4:3, dan 2:1. Sedangkan pada perengkahan PS:BMK sebesar 45,4%, 52,0%, dan 68,2%.

Secara umum, biodiesel minyak kemiri menghasilkan peningkatan kualitas bahan bakar cair yang lebih baik dibandingkan biodiesel minyak jelantah dalam proses ko-perengkahan katalitik limbah polistirena. Peningkatan kualitas yang lebih baik tersebut ditunjukkan dengan nilai kalor dan RON bahan bakar cair yang lebih tinggi pada variasi perengkahan katalitik PS:BMK. Nilai kalor dan RON BBC variasi PS:BMK berada pada kisaran 16.663 – 27.028 kkal/kg dan 97,8 – 100,5, sedangkan untuk variasi PS:BMJ hanya 9.875 – 19.226 kkal/kg dan 97, 4 – 99,7 secara berturut-turut. Sementara itu, fraksi hidrokarbon gasolin (C_7 – C_{12}) tertinggi diperoleh pada rasio bahan baku optimum 1:1 dengan % hasil yang lebih tinggi pada variasi PS:BMK (80,17%) dibandingkan PS:BMJ (60,69%). Hasil pengujian karakteristik sifat fisik (densitas, viskositas, dan nilai kalor, titik nyala, dan RON) juga menunjukkan bahwa secara keseluruhan campuran bahan bakar cair yang diproduksi dalam penelitian ini telah memenuhi standar SNI 06-3506-1994 tentang mutu bahan bakar minyak jenis bensin sehingga dapat direkomendasikan sebagai alternatif bahan bakar gasolin yang potensial.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya diharapkan proses ko-perengkahan katalitik PS:BMK maupun PS:BMJ dapat dilakukan pada variasi suhu yang lebih tinggi untuk mengoptimalkan konversi produk hidrokarbon cair yang dihasilkan. Selain itu, jenis limbah plastik dengan rantai olefin seperti polietilen (PE) dan polipropilen (PP) dapat digunakan pada proses ko-perengkahan katalitik biomassa untuk meningkatkan kandungan fraksi hidrokarbon gasolin ($C_7 – C_{12}$).

DAFTAR PUSTAKA

Abnisa, F., dan Daud, W.M.A.W., (2015[a]), "Optimization of Fuel Recovery through the Stepwise Co-Pyrolysis of Palm Shell and Scrap Tire", *Energy Conversion and Management*, Vol. 99, hal. 334–45.

Abnisa, F., Daud, W.M.A.W.D., Ramalingam, S., Naqiuddin, M. dan Sahu, J.N., (2013[b]) "Co-Pyrolysis of Palm Shell and Polystyrene Waste Mixtures to Synthesis Liquid Fuel", *Fuel*, Vol. 108, hal. 311–318.

Adam, J., Antonakou, E., Lappas, A., Stöcker, M., Nilsen, M.H., Bouzga, A., Hustad, J.E. dan Øye, G., (2006) "In Situ Catalytic Upgrading of Biomass Derived Fast Pyrolysis Vapours in a Fixed Bed Reactor Using Mesoporous Materials", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 96, hal. 93–101.

Ağbulut, Ü., (2019), "Turkey's Electricity Generation Problem and Nuclear Energy Policy", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 41, No. 18, hal. 2281–298.

Ahmad, I., Khana, M.I., Khan, H., Ishaqa, M., Khana, R. dan Gula, K., (2017), "Influence of Waste Brick Kiln Dust on Pyrolytic Conversion of Polypropylene in to Potential Automotive Fuels", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 126, hal. 247–256.

Aho, A., Tokarev, A., Backman, P., Kumar, N., Eränen, K., Hupa, M., Holmbom, B., Salmi, T. dan Murzin, D.Y., (2011) "Catalytic Pyrolysis of Pine Biomass Over H-Beta Zeolite in a Dual-Fluidized Bed Reactor: Effect of Space Velocity on the Yield and Composition of Pyrolysis Products", *Topics in Catalysis*, Vol. 54, No. 13–15, hal. 941–948.

Aljabri, N.M., Lai, Z., Hadjichristidis, N. dan Huang, K.W., (2017), "Renewable Aromatics from the Degradation of Polystyrene under Mild Conditions", *Journal of Saudi Chemical Society*, Vol. 21, No. (8), hal. 983–989.

Al-Muttaqii, M., Kurniawansyah, F., Prajitno, D.H. dan Roesyadi A., (2019), "Bio-Kerosene and Bio-Gasoil from Coconut Oils via Hydrocracking Process over Ni-Fe/HZSM-5 Catalyst", *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, Vol. 14, No. 2, hal. 309.

Al-Salem, S.M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G. dan Dutta, A., (2017), "A Review on Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Solid Waste (PSW)", *Journal of Environmental Management*, Vol. 197, hal. 177–198.

Araújo, A.M.M., Lima, R.O., Gondim, A.D., Diniz, J., Souza, L.D. dan Araujo, A.S., (2017), "Thermal and Catalytic Pyrolysis of Sunflower Oil Using AlMCM-41", *Renewable Energy*, Vol. 101, hal. 900–906.

Arita, S., Afrianto, I. dan Fitriana, Y., (2008), "Produksi Biodiesel dari Minyak Jelantah dengan Menggunakan Reaksi 2 Tahap (Esterifikasi dan Transesterifikasi)", *Jurnal Teknik* Kimia, Vol. 15, No. 4, hal. 57–65.

Assari, A., (2019), *Produksi Bahan Bakar Cair Hasil Perengkahan Katalitik Limbah Plastik Polistiren (PS) dan Ko-Reaktan Biodiesel Minyak Jelantah Menggunakan Katalis Al-MCM-41/Keramik,* Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Audisio, G., Bertini, F., Beltrame, P.L. dan Carniti, P., (1990), "Catalytic Degradation of Polymers: Part III—Degradation of Polystyrene", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 29, hal. 191–200.

Aziz, R., Aisyah dan Ilyas, A., (2016). "Sintesis Metil Ester dari Minyak Biji Kemiri (Aleurites Molluccana) Menggunakan Metode Ultrasonokimia", *Al-Kimia*, Vol. 4, No. 1, hal. 21–30.

Basu, P., (2018), *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory,* 3rd Edition, Elsevier, Netherland.

Bayat, A., Sadrameli, S.M. dan Towfighi, J., (2016), "Production of Green Aromatics via Catalytic Cracking of Canola Oil Methyl Ester (CME) Using HZSM-5 Catalyst with Different Si/Al Ratios", *Fuel*, Vol. 180, hal. 244–255.

Beims, R.F., Botton, V., Ender, L., Scharf, D.R., Simionatto, E.L., Meier, H.F. dan Wiggers, V.R., (2018), "Effect of Degree of Triglyceride Unsaturation on Aromatics Content in Bio-Oil", *Fuel*, Vol. 217, hal. 175–184.

Billaud, F., Dominguez, V., Broutin, P. dan Busson, C., (1995), "Production of Hydrocarbons by Pyrolysis of Methyl Esters from Rapeseed Oil", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 72, hal. 1149–54.

Billmayer, F.W., (1984), *Textbook of Polymer Science*, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York.

Brahmi, L., Dahmane, T.A, Hamacha, R, dan Hacini, S., (2016), "Catalytic Performance of Al-MCM-41 Catalyst for the Allylation of Aromatic Aldehydes with Allyltrimethylsilane: Comparison with TiCl4 as Lewis Acid", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical,* Vol. 423, hal. 31–40.

Budianto, A., Prajitno, D.H. dan Budhikarjono, K., (2014), "Biofuel Production from Candlenut Oil Using Catalytic Cracking Process with Zn/HZSM-5 Catalyst", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 9, No. 11, hal. 2121–2124.

Çelikgöğüs, Ç. dan Karaduman, A., (2015), "Thermal-Catalytic Pyrolysis of Polystyrene Waste Foams in a Semi-Batch Reactor", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 37, No. 23, hal. 2507–2513.

Chen, L., Li, H., Fu, J., Miao, C., Lv, P. dan Yuan, Z., (2016), "Catalytic Hydroprocessing of Fatty Acid Methyl Esters to Renewable Alkane Fuels over Ni/HZSM-5 Catalyst", *Catalysis Today*, Vol. 259, hal. 266–276.

Chi, Y., Xue, J., Zhuo, J., Zhang, D., Liu, M. dan Yao, Q., (2018), "Catalytic Co-Pyrolysis of Cellulose and Polypropylene over All-Silica Mesoporous Catalyst MCM-41 and Al-MCM-41", *Science of The Total Environment*, Vol. 633, hal. 1105–1113.

Chiaramonti, D., Buffi, M., Rizzo, A.M., Prussi, M. dan Martelli, F., (2015), "Bio-Hydrocarbons through Catalytic Pyrolysis of Used Cooking Oils: Towards Sustainable Jet and Road Fuels", *Energy Procedia*, Vol. 82, hal. 343–349.

Chongkhong, S., Kanjaikaew, U. dan Tongurai, C., (2010) "A Review of FFA Esterification for Biodiesel Production", *Proceeding on Conference: The 10th International PSU Engineering Conference*, Pennsylvania State University, United State.

Demirbas, A., (2008), "Biofuels Sources, Biofuel Policy, Biofuel Economy and Global Biofuel Projections", *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 8, hal. 2106–2116.

Effendi, M.S., dan Adawiyah, R., (2014), "Penurunan Nilai Kekentalan Akibat Pengaruh Kenaikan Temperatur Pada Beberapa Merek Minyak Pelumas,", *Jurnal INTEKNA*, Vol. 14, hal. 1–101.

Enweremadu, C.C., dan Mbarawa, M.M., (2009), "Technical Aspects of Production and Analysis of Biodiesel from Used Cooking Oil—A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 9, hal. 2205–2224.

Epp, J., (2016), "X-Ray Diffraction (XRD) Techniques for Materials Characterization", dalam *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, 81–124. Elsevier.

Estrada, F., Gusmao, R. dan Indraswati, N., (2007), "Pengambilan Minyak Kemiri dengan Cara Pengepresan dan Dilanjutkan Ekstraksi Cake Oil", *Widya Teknik*, Vol. 6, No. 2, hal. 121–130.

Faravelli, T, Pinciroli, M., Pisano, F., Bozzano, G., Dente, M. dan Ranzi, E., (2001), "Thermal Degradation of Polystyrene", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, Vol. 60, hal. 103–121.

Gheno, G., Basso, N.R.S., Livotto, P.R., Ribeiro, M.R., Lourenço, J.P., Ferreira, A.E. dan Galland, G.B., (2016), "A New Post-Metallocene-Ti Catalyst with Maltolate Bidentade Ligand: An Investigation in Heterogeneous Polymerization Reactions in Different Mesoporous Supports." *Journal of the Brazilian Chemical Society*. Vol. 27, No. 11, hal. 2082–2092.

Guyot, A., (1986), "Recent Developments in the Thermal Degradation of Polystyrene - A Review", *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 15, No. 3, hal. 219–235.

Hariani, P. L., Riyanti, F. dan Riska, M., (2013), "Pengaruh Variasi Temperatur Dan Konsentrasi Minyak Terhadap Rendemen Dan Karakteristik Biodiesel Dari Minyak Biji Kemiri (Aleurites Moluccana)", *Proceeding Semirata*, Universitas Lampung, Lampung, hal. 333–338.

Hasahatan, D., Sunaryo, J. dan Komariah, L.N., (2012), "Pengaruh Ratio H2SO4 Dan Waktu Reaksi Terhadap Kuantitas Dan Kualitas Biodiesel Dari Minyak Jarak Pagar", *Jurnal Teknik Kimia*, Vol. 18, No. 2, hal. 26–36.

Hassan [a], E. B., Elsayed, I. dan Eseyin, A., (2016), "Production High Yields of Aromatic Hydrocarbons through Catalytic Fast Pyrolysis of Torrefied Wood and Polystyrene", *Fuel*, Vol. 174, hal. 317–24.

Hassan [b], H., Lim, J.K. dan Hameed, B.H., (2016), "Recent Progress on Biomass Co-Pyrolysis Conversion into High-Quality Bio-Oil", *Bioresource Technology*, Vol. 221, hal. 645–655.

Hidayat, A., Rochmadi, Wijaya, K. dan Budiman, A., (2015), "Esterification of Free Fatty Acid on Palm Fatty Acid Distillate Using Activated Carbon Catalysts Generated from Coconut Shell", *Procedia Chemistry*, Vol. 16, hal. 365–371.

Holilah, Utami, T.P. dan Prasetyoko, D., (2013), "Sintesis dan Kakarterisasi Biodiesel dari Minyak Kemiri Sunan (*Reutealis trisperma*) dengan Variasi Konsentrasi Katalis NaOH", *Jurnal MIPA*, Vol. 36, No. 1, hal. 51–59.

Houshmand, D., Roozbehani, B. dan Badakhshan, A., (2013). "Thermal and Catalytic Degradation of Polystyrene with a Novel Catalyst", *Science International*, Vol. 25, No. 4.

Huang, W., Gong, F., Fan, M., Zhai, Q., Hong, C. dan Li, Q., (2012), "Productiont of Light Olefins by Catalytic Conversion of Lignocellulosic Biomass with HZSM-5 Zeolite Impregnated with 6wt.% Lanthanum", *Bioresource Technology*, Vol. 121, hal. 248–255.

Iliopoulou, E.F., Antonakou, E.V., Karakoulia, S.A., Vasalos, I.A., Lappas, A.A. dan Triantafyllidis, K.S., (2007), "Catalytic Conversion of Biomass Pyrolysis Products by Mesoporous Materials: Effect of Steam Stability and Acidity of Al-MCM-41 Catalysts", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 134 hal. 51–57.

Imdadul, H. K., Zulkifli, N.W.M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Kamruzzaman, M., Rashed, M.M., Rashedul, H.K. dan Alwi, A., (2017), "Experimental Assessment of Non-Edible Candlenut Biodiesel and Its Blend Characteristics as Diesel Engine Fuel", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, No. 3, hal. 2350–2363.

Jin, S., Cui, K., Guan, H., Yang, M., Liu, L. dan Lan, C., (2012), "Preparation of Mesoporous MCM-41 from Natural Sepiolite and Its Catalytic Activity of Cracking Waste Polystyrene Plastics", *Applied Clay Science*, Vol. 56, hal. 1–6.

Juwono, H., Nugroho, K.A., Alfian, R., Ni'mah, Y.L., Sugiarso, D. dan Harmami, (2019), "New Generation Biofuel from Polypropylene Plastic Waste with Co-Reactant Waste Cooking Oil and Its Characteristic Performance", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1156, hal. 012013.

Juwono, H., Triyono, Sutarno dan Wahyuni, E.T., (2013), "The Influence of Pd Impregnation into Al-MCM-41 on The Characters and Activity for Biogasoline Production by Catalytic Hydrocracking of FAMEs from Nyamplung Seed Oil (*Calophyllum Inophyllum*)", *Indonesian Journal of Chemistry*, Vol. 13, No. 2, hal. 171–175.

Juwono, H., Triyono, Sutarno, Wahyuni, E.T., Harmami, Ulfin, I. dan Kurniawan, F., (2017), "Production of Hydrocarbon (C7-C20) from Hydrocracking of Fatty Acid Methyl Esters on Pd/Al-MCM-41 Catalyst", *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, Vol. 12, No. 3, hal. 337.

Juwono, H., Yamin, A., Alfian, R., Ni'mah, Y.L. dan Harmami, (2018), "Production of Liquid Fuel from Plastic Waste with Co-Reactan Nyamplung Oil (Callophyllum Inophyllum) and Its Performance in Gasoline Machine by Adding MTBE Additive", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2049, No. 020081. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Kabakcı S. B. dan Hacıbektaşoğlu, S., "Catalytic Pyrolysis of Biomass," in *Pyrolysis*, M. Samer, Ed. InTech, 2017.

Kaminsky, W., Predel, M. dan Sadiki, A., (2004), "Feedstock Recycling of Polymers by Pyrolysis in a Fluidised Bed", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 85, No. 3, hal. 1045–1050.

Karnjanakom, S., Umporn, T.S., Bayu, A., Kongparakul, S., Samart, C., Fushimi, C., Abudula, A. dan Guan, G., (2017), "High Selectivity and Stability of Mg-Doped Al-MCM-41 for in-Situ Catalytic Upgrading Fast Pyrolysis Bio-Oil", *Energy Conversion and Management*, Vol. 142, hal. 272–285.

Ke, H., Li-hua, T., Zi-bin, Z. dan Cheng-fang, Z., (2005), "Reaction Mechanism of Styrene Monomer Recovery from Waste Polystyrene by Supercritical Solvents", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 89, No. 2, hal. 312–316.

Khan, M.Y. dan Hasan, S.A., (2006), "Effects of Diesel Addition on Viscosity of Linseed Oil and Consequent Effects on Performance Characteristics of CI Engine", *National Conference on Recent Developments and Future Trends in Mechanical Engineering*, NIT, Hamirpur.

Kubicka, D. dan Kaluza, L., (2010), "Deoxygenation of Vegetable Oils over sulfided Ni, Mo, and NiMo Catalysts", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 372, hal. 199–208.

Lam, S.S., Mahari, W.A.W., Ok, Y.S., Peng, W., Chong, C.T., Ma, Y.L. dan Chase, H.A., (2019), "Microwave Vacuum Pyrolysis of Waste Plastic and Used Cooking Oil for Simultaneous Waste Reduction and Sustainable Energy Conversion: Recovery of Cleaner Liquid Fuel and Techno-Economic Analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 115, hal. 109359.

La-Salvia, N., Lovón-Quintana, J.J., Lovón, A.S.P. dan Valença, G.P., (2017), "Influence of Aluminum Addition in the Framework of MCM-41 Mesoporous Molecular Sieve Synthesized by Non-Hydrothermal Method in an Alkali-Free System", *Materials Research*, Vol. 20, No. 6, hal. 1461–1469.

Layman, K.A., Ivey, M.M. dan Hemminger, J.C., (2003), "Pyridine Adsorption and Acid-Base Complex Formation on Ultrathin Films of γ-Al_2O_3 on NiAl(100)", *J Phys Chem B*, Vol. 107, hal. 8538–8546.

Lee, S.Y., Yoon, J.H., Kim, J.R. dan Park, D.W., (2001), "Catalytic Degradation of Polystyrene over Natural Clinoptilolite Zeolite", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 74, No. 2, hal. 297–305.

Lerici, L.C., Renzini, M.S. dan Pierella, L.B., (2015), "Chemical Catalyzed Recycling of Polymers: Catalytic Conversion of PE, PP and PS into Fuels and Chemicals over H-Y", *Procedia Materials Science*, Vol. 8, hal. 297–303.

Li, X., Li, J., Zhou, G., Feng, Y., Wang, Y., Yu, G., Deng, S., Huang, J. dan Wang, B., (2014), "Enhancing the Production of Renewable Petrochemicals by Co-Feeding of Biomass with Plastics in Catalytic Fast Pyrolysis with ZSM-5 Zeolites", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 481, hal. 173–182.

Lin, R. dan White, R.L, (1997), "Acid-Catalyzed Cracking of Polystyrene", *Journal Applied Polymer Science*, Vol. 63, No. 10, hal 1287–1298.

Limbong, J., (2010), *Pengaruh Katalis KOH dan CaOH pada Pembuatan Biodiesel Minyak Kemiri dengan Reaksi Transesterifikasi Menggunakan Eter sebagai Ko-Solven*, Tesis, Universitas Sumatra Utara, Medan.

Ma, W., Liu, B., Zhang, R., Gu, T., Ji, X., Zhong, L., Chen, G., Ma,L., Cheng, Z. dan Li, X., (2018), "Co-Upgrading of Raw Bio-Oil with Kitchen Waste Oil through Fluid Catalytic Cracking (FCC)", *Applied Energy*, Vol. 217, hal. 233–240.

Mahari, W.AW., Chong, C.T., Cheng, C.K., Lee, C.L., Hendrata, K., Yek, P.N.Y., Ma, Y.L. dan Lam, S.S., (2018), "Production of Value-Added Liquid Fuel via Microwave Co-Pyrolysis of Used Frying Oil and Plastic Waste", *Energy*, Vol. 162, hal. 309–317.

Mamaeva, A., Tahmasebi, A., Tian, L. dan Yu, J., (2016), "Microwave-Assisted Catalytic Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass for Production of Phenolic-Rich Bio-Oil", *Bioresource Technology*, Vol. 211, hal. 382–389.

Mao, L.V., Raymond, Yan, H.T., Muntasar, A. dan Al-Yassir, N., (2013), "Blending of Non-Petroleum Compounds with Current Hydrocarbon Feeds to Use in the Thermo-Catalytic Steam-Cracking Process for the Selective Production of Light Olefins", dalam *New and Future Developments in Catalysis*, Elsevier, Netherland, hal. 143–173.

Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y. dan Wang, C., (2016), "Sustainable Biodiesel Production via Transesterification of Waste Cooking Oil by Using CaO Catalysts Prepared from Chicken Manure", *Energy Conversion and Management*, Vol. 123, hal. 487–497.

Mani, D., Kalpana, M.S., Patil, D.J. dan Dayal, A.M., (2017), "Organic Matter in Gas Shales." dalam *Shale Gas*, Elsevier, Netherland, 25–54.

Marcilla, A., Gómez-Siurana, A., García Quesada, J.C. dan Berenguer, D., (2007), "Characterization of High-Impact Polystyrene by Catalytic Pyrolysis over Al-MCM-41: Study of the Influence of the Contact between Polymer and Catalyst", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 92, No. 10, hal. 1867–1872.

Marczewski, M., Kamińska, E., Marczewska, H., Godek, M., Rokicki, G. and Sokołowski, J., (2013), "Catalytic Decomposition of Polystyrene. The Role of Acid and Basic Active Centers", *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 129, hal. 236–246.

Maryudi, S.S. dan Aktawan, A., (2018), "Product Distribution of Pyrolysis of Polystyrene Foam Waste Using Catalyst of Natural Zeolite and Nickel/Silica", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 175, hal. 012012.

Miskolczi, N., Bartha, L. dan Deák, G., (2006), "Thermal Degradation of Polyethylene and Polystyrene from the Packaging Industry over Different Catalysts into Fuel-like Feed Stocks", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, No. 3, hal. 517–526.

Mukhopadhyay, Sanjay, Gujral, M., Abraham, J.L., Scalzetti, E.M. dan Iannuzzi, M.C., (2013), "A Case of Hut Lung", *Chest*, Vol. 144, No. 1, hal. 323–327.

Mulana, F., (2011), "Penggunaan Katalis NaOH dalam Proses Transesterifikasi Minyak Kemiri menjadi Biodiesel", *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, Vol. 8, No. 2, hal. 73–78.

Muneer, B., Zeeshan, M., Qaisar, S., Razzaq, M. dan Iftikhar, H., (2019), "Influence of In-Situ and Ex-Situ HZSM-5 Catalyst on Co-Pyrolysis of Corn Stalk and Polystyrene with a Focus on Liquid Yield and Quality", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 237, hal. 117762.

Murata, K., Liu, Y., Inaba, M. dan Takahara, I., (2012), "Catalytic Fast Pyrolysis of Jatropha Wastes", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 94, hal. 75–82.

Mutalib, A.M., Rahman, M.A., Othman, M.H.D., Ismail, A.F. dan Jaafar, J., (2017), "Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-Ray (EDX) Spectroscopy", dalam *Membrane Characterization*, Elsevier, 161–179.

Moqadam, I., Saeedeh, Mirdrikvand, M., Roozbehani, B., Kharaghani, A. dan Shishehsaz, M.R., (2015), "Polystyrene Pyrolysis Using Silica-Alumina Catalyst in Fluidized Bed Reactor", *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 17, No. 7, hal. 1847–1860.

Naik, S.P., Bui, V., Ryu, T., Miller, J.D. dan Zmierczak, W., (2010), "Al-MCM-41 as Methanol Dehydration Catalyst", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 381, hal. 183–190.

Nisar, J., Ali, G., Shah, A., Iqbal, M., Khan, R.A., Sirajuddin, Anwar, F., Ullah, R. dan Akhter, M.S., (2019), "Fuel Production from Waste Polystyrene via Pyrolysis: Kinetics and Products Distribution", *Waste Management*, Vol. 88, hal. 236–247.

Novandy, A., (2013), "Korelasi Angka Oktan dan Nilai Kalor Bensin", *Swara Patra*, Vol. 03, No. (4).

Özsin, G. dan Pütün, A.E., (2018), "A Comparative Study on Co-Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass with Polyethylene Terephthalate, Polystyrene, and Polyvinyl Chloride: Synergistic Effects and Product Characteristics", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 205, hal. 1127–1138.

Park, Y., Lee, B., Lee, H.W., Watanabe, A., Jae, J., Tsang, Y.F. dan Kim. Y., (2019), "Co-Feeding Effect of Waste Plastic Films on the Catalytic Pyrolysis of Quercus Variabilis over Microporous HZSM-5 and HY Catalysts", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 378, hal. 122151.

Patil, D. dan Arakerimath, R., (2012), "Performance Characteristics and Analysis of Jatropha Oil in Multi- Cylinder Turbocharge Compression Ignition Engine", *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 1, No. 10, hal. 50–55.

Pham, L.N., Luu, B.V., Phuoc, H.D., Le, H.N.T., Truong, H.T., Luu, P.D., Furuta, M., Imamura, K., dan Maeda. Y., (2018), "Production of Biodiesel from Candlenut Oil Using a Two-Step Co-Solvent Method and Evaluation of Its Gaseous Emissions", *Journal of Oleo Science*, Vol. 67, No. 5, hal. 617–626.

Prasetyoko, D., Fansuri, H., Nikmah, Y.L. dan Fadlan A., (2016), *Karakterisasi Struktur Padatan*, Budi Utama, Yogyakarta.

Ramya, G., Sudhakar, R., Joice, J.A.I., Ramakrishnan, R. dan Sivakumar, T., (2012), "Liquid Hydrocarbon Fuels from Jatropha Oil through Catalytic

Cracking Technology Using AlMCM-41/ZSM-5 Composite Catalysts", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 433–434, hal. 170–178.

Ratnasari, D.K., Yang, W. dan Jönsson, P.G., (2018), "Two-Stage Ex-Situ Catalytic Pyrolysis of Lignocellulose for the Production of Gasoline-Range Chemicals", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 134, hal. 454–464.

Refaat, A. A., Attia, N.K., Sibak, H.A., El Sheltawy, S.T. dan ElDiwani, G.I., (2008), "Production Optimization and Quality Assessment of Biodiesel from Waste Vegetable Oil", *International Journal of Environmental Science & Technology*, Vol. 5 No. 1, hal. 75–82.

Sakthivela, R., Ramesh, K., Purnachandrana, R., and Shameera, P.M., (2018), "A Review on the Properties, Performance, and Emission Aspects of the Third Generation Biodiesels", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, hal. 2970–2992.

Santos, E., Costa, L., Oliveira, E., Bessa, R., Freitas, A., Oliveira, C., Nascimento, R. dan Loiola, A., (2018), "Al-MCM-41 Synthesized from Kaolin via Hydrothermal Route: Structural Characterization and Use as an Efficient Adsorbent of Methylene Blue", *Journal of the Brazilian Chemical Society*, Vol. 44, No. 1, 185–188.

Sarker, M., Rashid, M.M., Rahman, M.S. dan Molla, M., (2012), "Production of Valuable Heavy Hydrocarbon Fuel Oil by Thermal Degradation Process of Post-Consumer Municipal Polystyrene (PS) Waste Plastic in Steel Reactor", *Energy and Power*, Vol. 2, No. 5, hal. 89–95.

Sastrohamidjojo, H., (1992), *Spektroskopi Infra Merah*. Cetakan Pertama, Liberti, Yogyakarta.

Seifi, H., dan Sadrameli, S.M., (2016), "Improvement of Renewable Transportation Fuel Properties by Deoxygenation Process Using Thermal and Catalytic Cracking of Triglycerides and Their Methyl Esters", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, hal. 1102–1110.

Senthilkumar, P. dan Sankaranarayanan, G., (2016), "Effect of Jatropha Methyl Ester on Waste Plastic Oil Fueled DI Diesel Engine." *Journal of the Energy Institute*, Vol. 89, No. 4, hal. 504–512.

Serrano, D.P., Aguado, J. dan Escola, J.M., (2000), "Catalytic Conversion of Polystyrene over HMCM-41, HZSM-5 and Amorphous SiO2–Al2O3: Comparison with Thermal Cracking", *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 25, hal. 181–89.

Setiawati, E., dan Edwar, F., (2012), "Teknologi Pengolahan Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas dengan Teknik Mikrofiltrasi dan Transesterifikasi sebagai Alternatif Bahan Bakar Mesin Diesel", *Jurnal Riset Industri*, Vol. 6, No. 2, hal. 117–127.

Shadangi, K.P. dan Mohanty, K., (2015). "Co-Pyrolysis of Karanja and Niger Seeds with Waste Polystyrene to Produce Liquid Fuel", *Fuel*, Vol. 153, hal. 492–498.

Shahir, V.K., Jawahar, C.P., Vinod, V. dan Suresh, P.R., (2020), "Experimental Investigations on the Performance and Emission Characteristics of a Common Rail Direct Injection Engine Using Tyre Pyrolytic Biofuel", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 32, No. 1, hal. 78–84.

Shahruzzaman, R., R.M.H., Salmiaton, A., Yunus, R. dan Taufiq-Yap, Y.H., (2018[a]), "Modified Local Carbonate Mineral as Deoxygenated Catalyst for Biofuel Production via Catalytic Pyrolysis of Waste Cooking Oil." In *AIP Conference Proceeding*, Ho Chi Minh, Vietnam, 020006.

Shahruzzaman, R., Hafriz, R.M., Ali, S., Yunus, R. dan Yun-Hin, T.Y., (2018[b]), "Green Biofuel Production via Catalytic Pyrolysis of Waste Cooking Oil Using Malaysian Dolomite Catalyst", *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, Vol. 13, No. 3, hal. 489-501.

Sibarani, K.L., (2012), *Preparasi, Karakterisasi, dan Uji Aktifitas Katalis Ni-Cr/Zeolit Alam pada Proses Perengkahan Limbah Plastik Menjadi Fraksi Bensin*, Skripsi, Universitas Indonesia, Jakarta.

Sivaramakrishnan, K., (2018), "Investigation on Performance and Emission Characteristics of a Variable Compression Multi Fuel Engine Fuelled with Karanja Biodiesel–Diesel Blend", *Egyptian Journal of Petroleum*, Vol. 27, No. 2, hal. 177–186.

Sogancioglu, M., Yel, E. dan Ahmetli, G., (2017), "Investigation of the Effect of Polystyrene (PS) Waste Washing Process and Pyrolysis Temperature on (PS) Pyrolysis Product Quality", *Energy Procedia*, Vol. 118, hal. 189–194.

Sulistyo, H., Rahayu, S.S., Suardjaja, I.M. dan Setiadi, U.H., (2009[a]). "Crude Candlenut Oil Ethanolysis to Produce Renewable Energy at Ambient Condition", *Proceeding on of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Fransisco, USA.

Sulistyo, H., Rahayu, S.S., Winoto, G. dan Suardjaja, I.M., (2008[b]), "Biodiesel Production from High Iodine Number Candlenut Oil", *Proceeding on of the World Academy of Science, Engineering and Technology*, San Fransisco, USA, hal. 402–404.

Susilowati, N. dan Primaswari, R., (2012), *Pengambilan Minyak Biji Kemiri (Aleurites moluccana, Wild) melalui Ekstraksi dengan Menggunakan Soxhleti*, Tugas Akhir, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

Sutanto, R., Jaya, H. dan Mulyanto, A., (2013), "Analisa Pengaruh Lama Fermentasi Dan Temperatur Distilasi Terhadap Sifat Fisik (Specific Gravity

Dan Nilai Kalor) Bioetanol Berbahan Baku Nanas (Ananas Comosus)", *Dinamika Teknik Mesin*, Vol. 3, No. 2, hal. 91–100.

Tae, J., (2004), "Catalytic Degradation of Polystyrene Using Acid-Treated Halloysite Clays", *Solid State Ionics*, Vol. 172, hal. 129–133.

Thaiyasuit, P., Pianthong, K. dan Worapun, I., (2012), "Acid Esterification-Alkaline Transesterification Process for Methyl Ester Production from Crude Rubber Seed Oil", *Journal of Oleo Science*, Vol. 61, No. 2, hal. 81–88.

Topgul, T., (2015), "The Effects of MTBE Blends on Engine Performance and Exhaust Emissions in a Spark Ignition Engine", *Fuel Processing Technology*, Vol. 138, hal. 483–489.

Utut W., (2013), *Nilai Kalor Minyak Nabati dari Buah Kepayang*, Skripsi, Universitas Gunadarma, Jakarta.

Veses, A., Navarro, M. V, López, J. M., Murillo, R., Callén, M. S., & García, T. (2019). Drop-in biofuels from the co-pyrolysis of grape seeds and polystyrene. *Chemical Engineering Journal*, *377*, 120246.

Vinyes, E., Oliver-Solà, J., Ugaya, C., Rieradevall, J. and Gasol, C.M., (2013), "Application of LCSA to Used Cooking Oil Waste Management", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 18, No. 2, hal. 445–455.

Wako, F. M., Reshad, A.S., Bhalerao, M.S. dan Goud, V.V., (2018), "Catalytic Cracking of Waste Cooking Oil for Biofuel Production Using Zirconium Oxide Catalyst", *Industrial Crops and Products*, Vol. 118, hal. 282–289.

Wang, Y., Dai, L., Fan, L., Cao, L., Zhou, Y., Zhao, Y., Liu, Y. dan Ruan, R., (2017), "Catalytic Co-Pyrolysis of Waste Vegetable Oil and High Density Polyethylene for Hydrocarbon Fuel Production", *Waste Management*, Vol. 61, hal 276–282.

Wiratmaja, I.G., (2010), "Pengujian Karakteristik Fisika Biogasoline Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pengganti Bensin Murni", *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Vol. 4, No. 2, hal. 145–154.

Wu, S., Lv, G. dan Lou, R., (2012). "Applications of Chromatography Hyphenated Techniques in the Field of Lignin Pyrolysis", dalam *Applications of Gas Chromatography*, Editor Davarnejad, R., InTech hal. 41–62,

Xue, Yuan, (2017), *Thermochemical Conversion of Organic and Plastic Waste Materials through Pyrolysis*. Dissertation. Iowa State University. Iowa.

Yu, F., Gao, L., Wang, W., Zhang, G. dan Ji, J., (2013), "Bio-Fuel Production from the Catalytic Pyrolysis of Soybean Oil over Me-Al-MCM-41 (Me=La, Ni or Fe) Mesoporous Materials", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 104, hal. 325–329.

Yuvenda, D., Sudarmanta, B., Putra, R.P., Martias, dan Alwi, E., (2019), "Pengaruh Tekanan Injeksi Gas Terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Efisiensi Termal pada Mesin Diesel Dual Fuel", *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, Vol. 19, No. 1, hal. 35–42.

Zaki M.I., Hasan M.A., Al-Sagheer F.A. dan Pasupulety L., (2001), "In Situ FTIR Spectra of Pyridine Adsorbed on SiO_2- Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2, dan CeO_2 : General Considerations for the Identification of Acid Sites on Surfaces of Finely Divided Metal Oxides", *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 190, hal. 261-274.

Zhang, B., Zhong, Z., Ding, K., dan Song, Z., (2015), "Production of Aromatic Hydrocarbons from Catalytic Co-Pyrolysis of Biomass and High Density Polyethylene: Analytical Py–GC/MS Study", *Fuel*, Vol. 139, hal. 622–628.

Zhang, H., Nie, J., Xiao, R., Jin, B., Dong, C., dan Xiao, G., (2014[a]), "Catalytic Co-Pyrolysis of Biomass and Different Plastics (Polyethylene, Polypropylene, and Polystyrene) to Improve Hydrocarbon Yield in a Fluidized-Bed Reactor", *Energy & Fuels*, Vol. 28, No. 3, hal. 1940–1947.

Zhang, H., Xiao, R., Nie, J., Jin, B., Shao, S. dan Xiao, G., (2015[b]), "Catalytic Pyrolysis of Black-Liquor Lignin by Co-Feeding with Different Plastics in a Fluidized Bed Reactor", *Bioresource Technology*, Vol. 192, hal. 68–74.

Zhang, X., Lei, H., Zhu, L., Qian, M., Zhu, X., Wu, J., dan Chen, S., (2016), "Enhancement of Jet Fuel Range Alkanes from Co-Feeding of Lignocellulosic Biomass with Plastics via Tandem Catalytic Conversions", *Applied Energy*, Vol. 173, hal. 418–430.

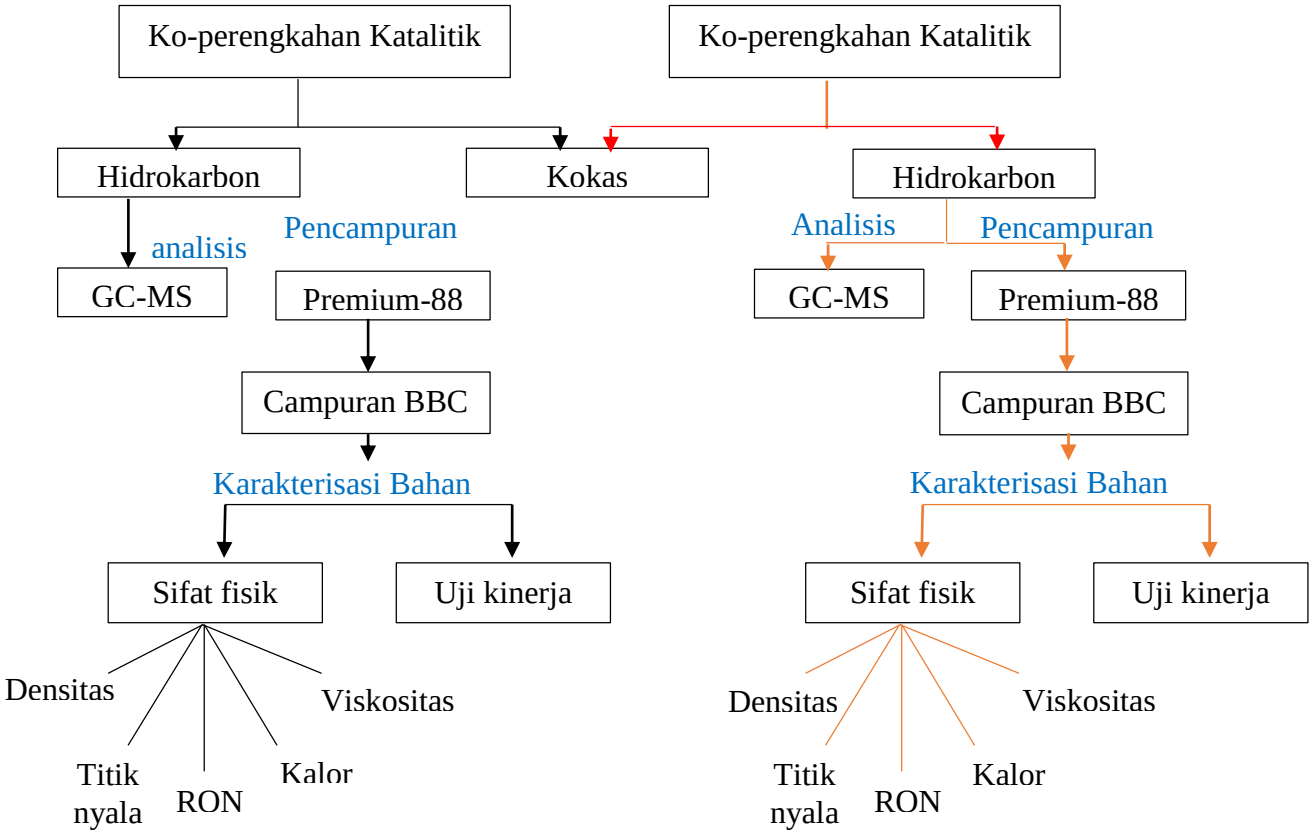
Zhang, Z., Hirose, T., Nishio, S., Morioka, Y., Azuma, N., Ueno, A., Ohkita, H. dan Okada, M., (1995), "Chemical Recycling of Waste Polystyrene into Styrene over Solid Acids and Bases", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 34, No. 12, hal. 4514–4519.

Zheng, A., Zhao, Z., Chang, S., Huang, Z., Wu, H., Wang, X., He, F. dan Li, H., (2014), "Effect of Crystal Size of ZSM-5 on the Aromatic Yield and Selectivity from Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, Vol. 383–384, hal. 23–30.

Zhou, G., Li, J., Yu, Y., Li, X., Wang, Y., Wang, W. dan Komarneni, S., (2014). "Optimizing the Distribution of Aromatic Products from Catalytic Fast Pyrolysis of Cellulose by ZSM-5 Modification with Boron and Co-Feeding of Low-Density Polyethylene", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 487, hal. 45–53.

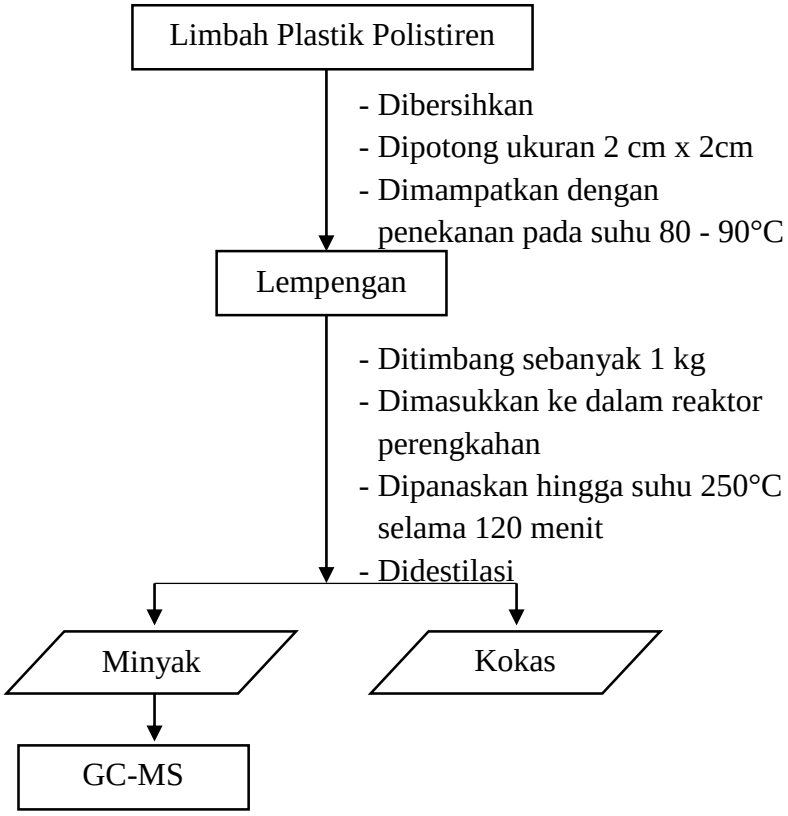
LAMPIRAN

Lampiran A. Skema Kerja

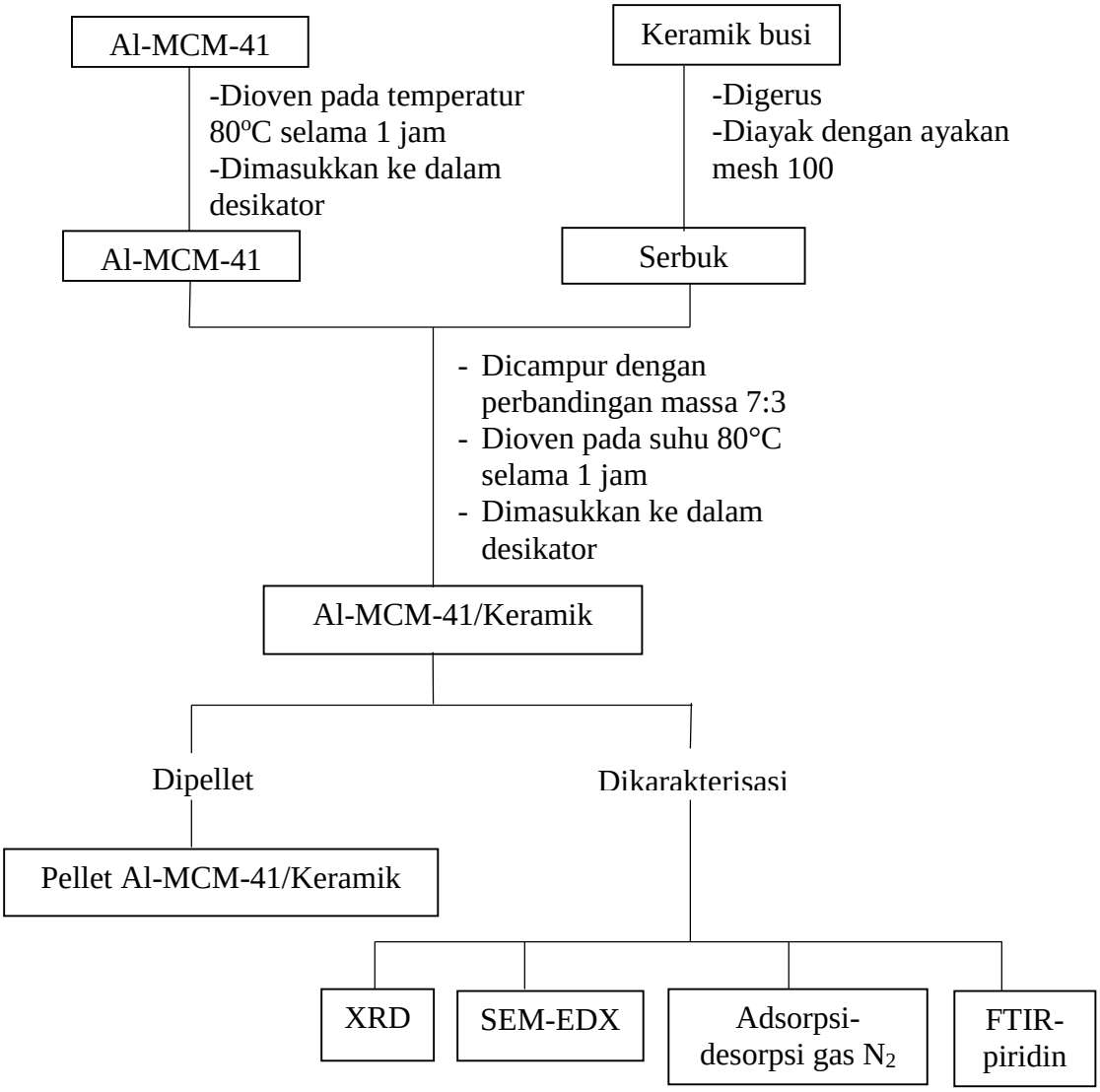


Lampiran B. Prosedur Kerja

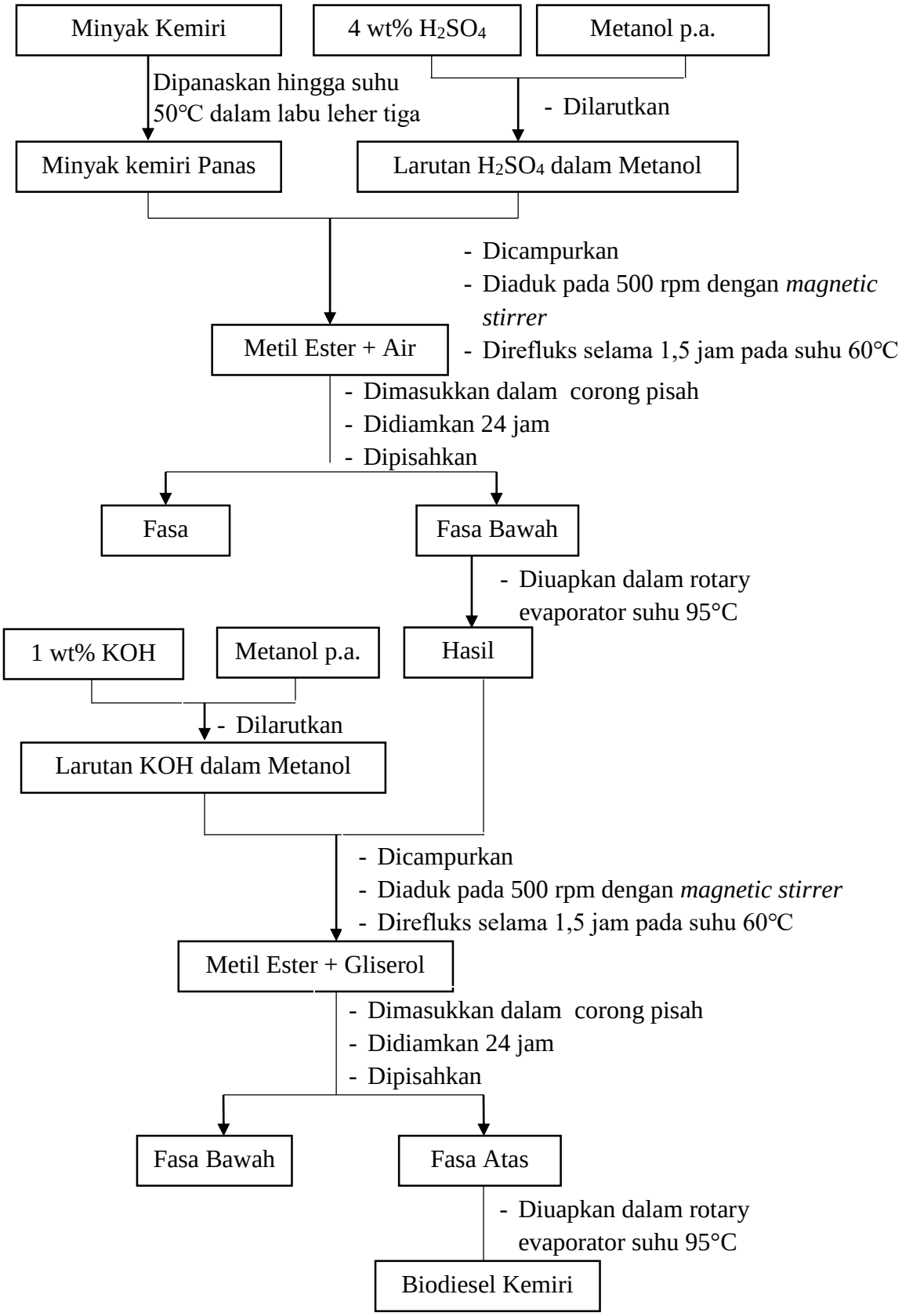
B.1 Pirolisis Limbah Plastik Polistrena (PS)



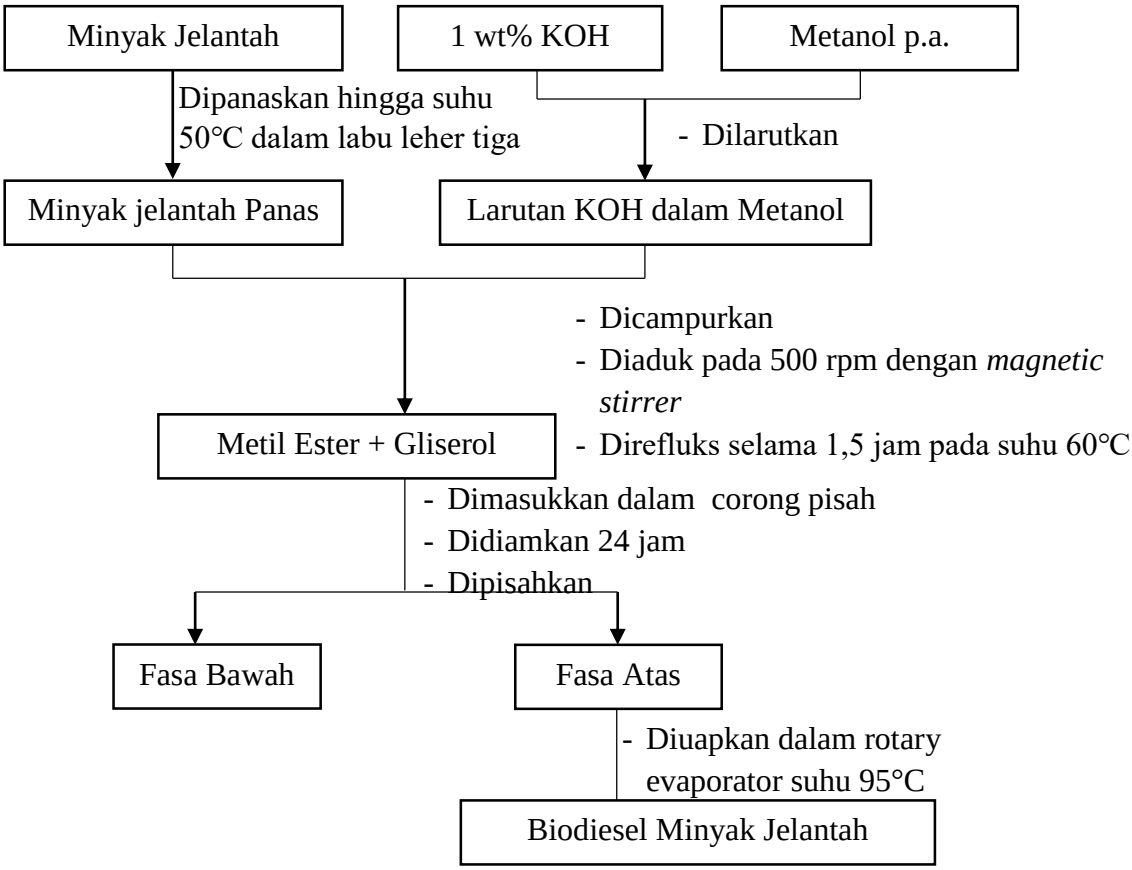
B.2 Preparasi Katalis



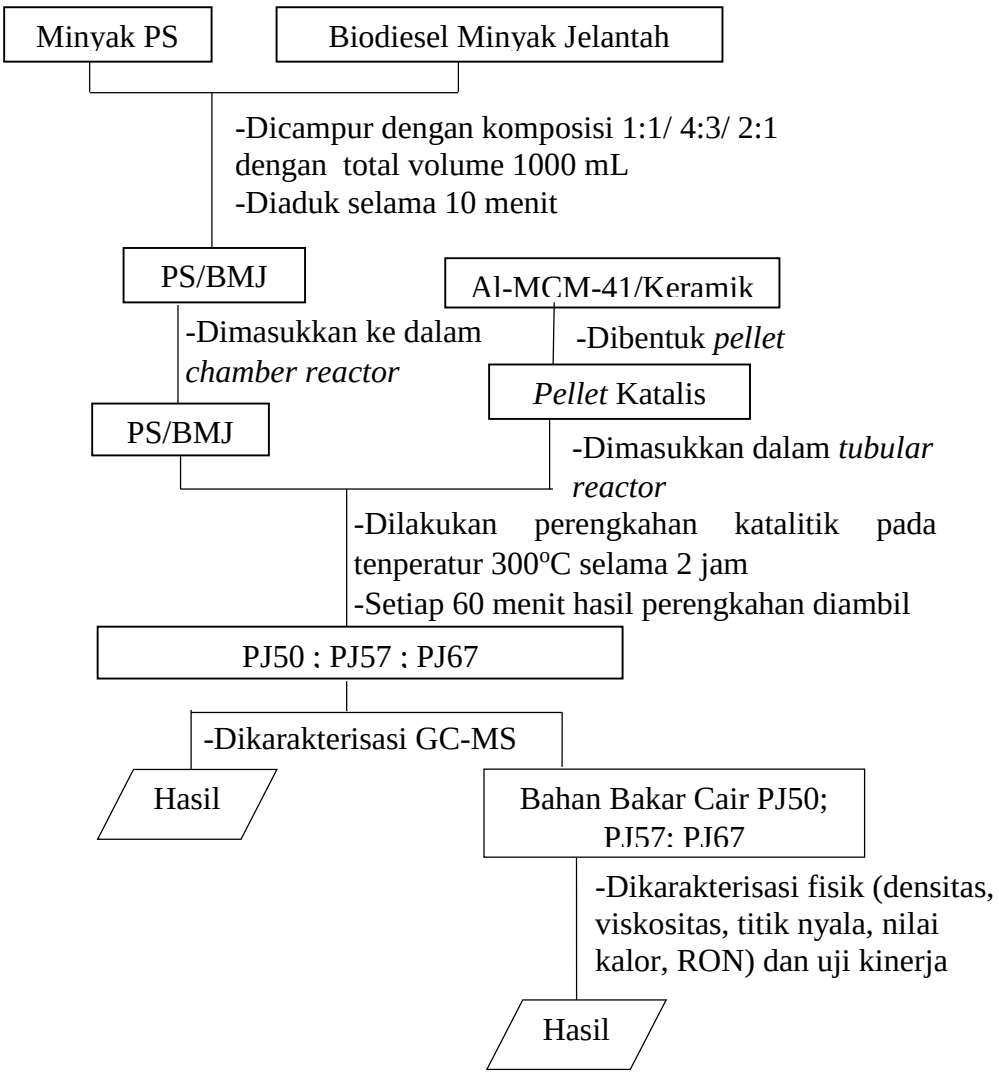
B.3 Sintesis Biodiesel Minyak Kemiri



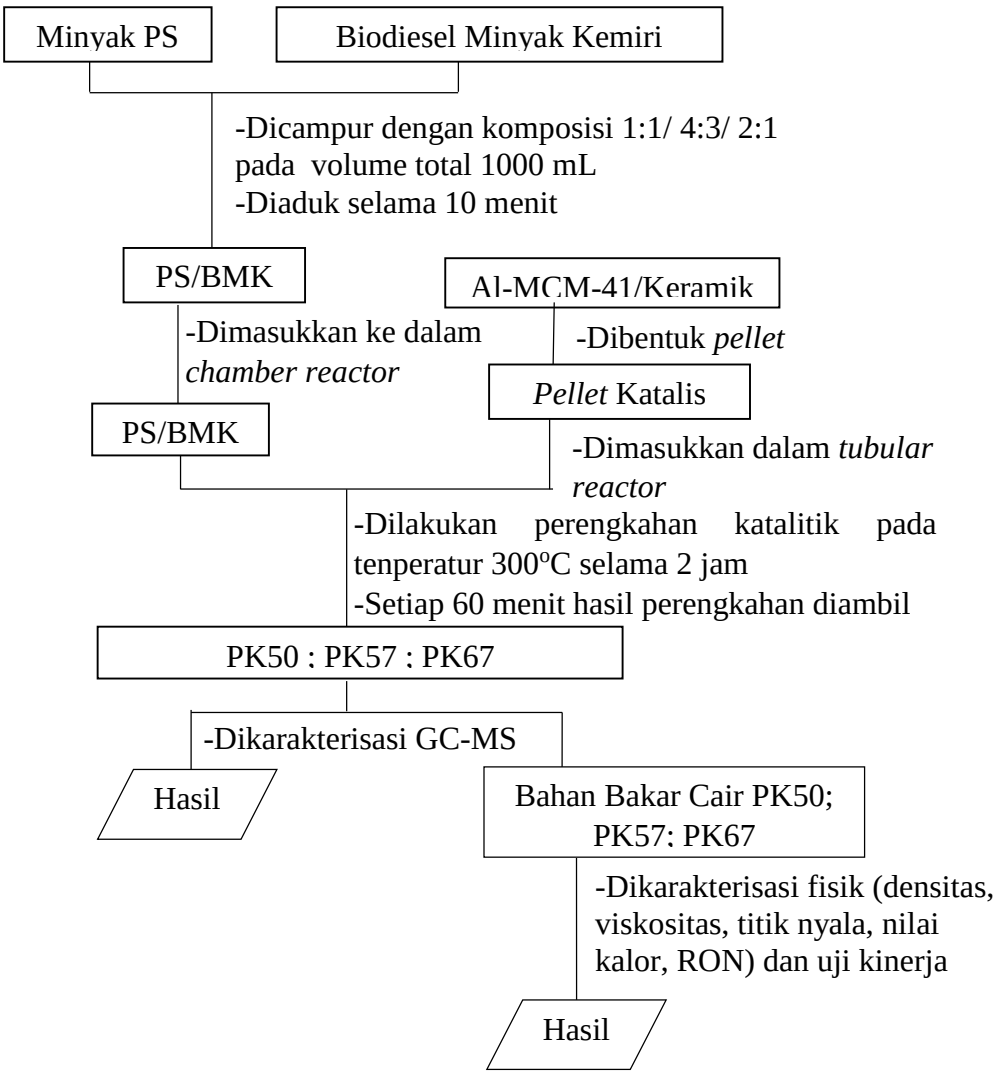
B.4 Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah



B.5 Sintesis Bahan Bakar Cair dari Ko-Perengkahan Katalitik Limbah PS dan Biodiesel Minyak Jelantah

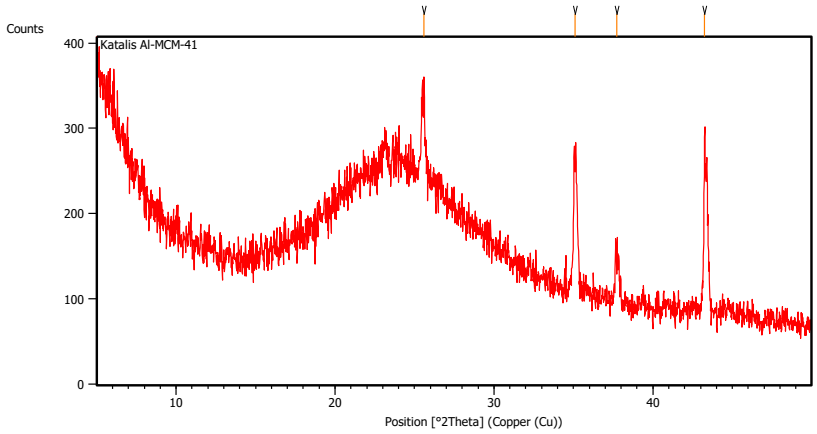


B.6 Sintesis Bahan Bakar Cair dari Ko-Perengkahan Katalitik Limbah PS dan Biodiesel Minyak Kemiri



Lampiran C. Karakterisasi Katalis

C.1 Hasil Karakterisasi XRD Katalis Al-MCM-41/keramik

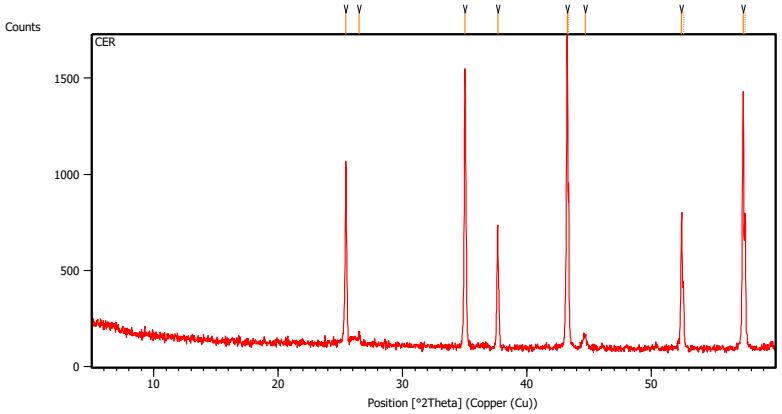


Gambar C. 1 Hasil karakterisasi XRD katalis Al-MCM-41/keramik

Tabel C.1 Hasil karakterisasi XRD katalis Al-MCM-41:Keramik (7:3)

Pos. [°2θ]	Height [cts]	FWHM Left [°2θ]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.5797	100.27	0.2007	3.48248	48.71
35.0866	152.26	0.2342	2.55763	73.97
37.7459	63.37	0.2007	2.38333	30.78
43.2584	205.84	0.0612	2.08980	100.00

C.2 Hasil Karakterisasi XRD Serbuk Keramik Busi

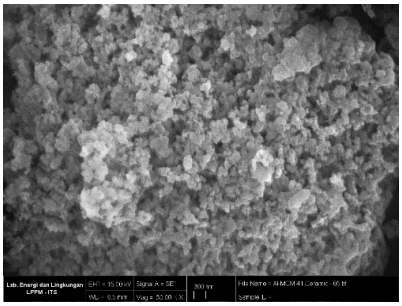


Gambar C.2 Hasil karakterisasi XRD serbuk keramik

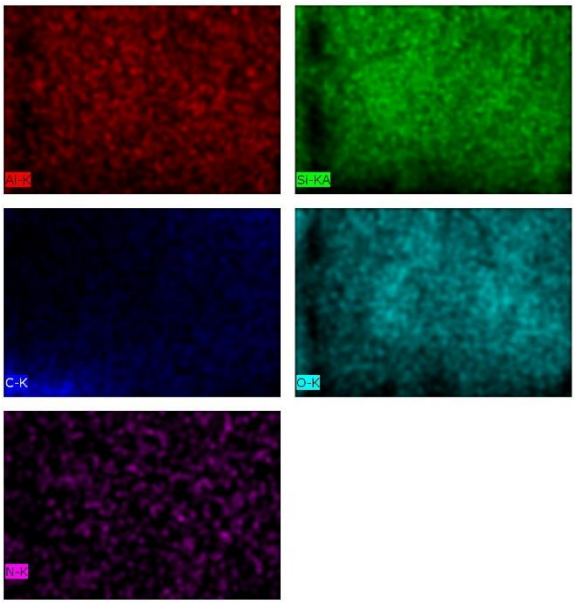
Tabel B. 2 Hasil karakterisasi XRD serbuk keramik

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.4382	949.86	0.1171	3.50153	57.98
26.5024	58.86	0.1338	3.36330	3.59
35.0078	1447.88	0.0836	2.56321	88.37
37.6324	627.02	0.0669	2.39026	38.27
43.2141	1638.37	0.1020	2.09184	100.00
43.3452	839.72	0.0612	2.09100	51.25
44.6693	60.04	0.2448	2.02702	3.66
52.4165	707.82	0.1020	1.74420	43.20
52.5723	320.71	0.0612	1.74372	19.57
57.3684	1336.54	0.1224	1.60485	81.58
57.5336	678.23	0.1020	1.60461	41.40

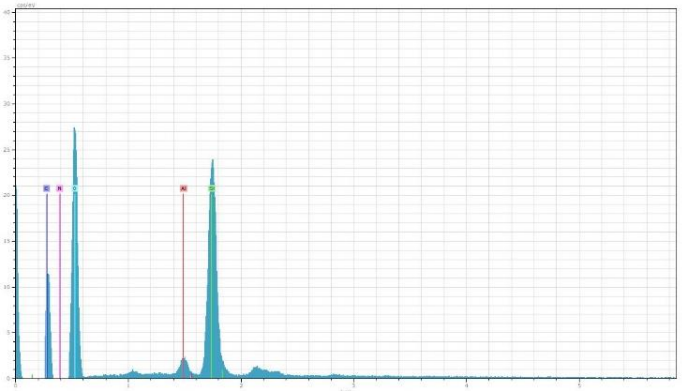
C.3 Hasil Karakterisasi SEM-EDX Katalis Al-MCM-41/keramik



Gambar C.3 Hasil karakterisasi SEM katalis Al-MCM-41:Keramik (7:3)



Gambar C. 4 Hasil karakterisasi EDX katalis Al-MCM-4/keramik

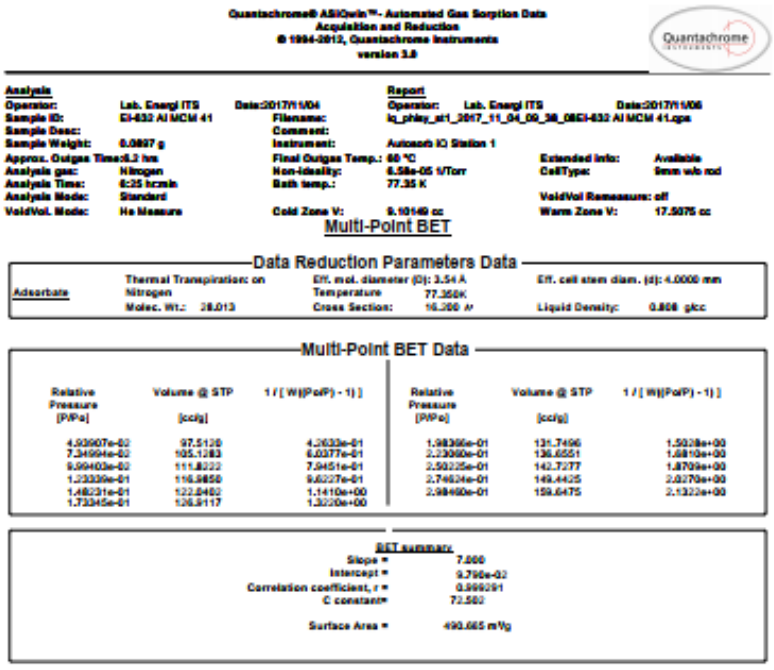


Gambar C.5 Grafik komposisi unsur pada katalis Al-MCM-41:Keramik (7:3)

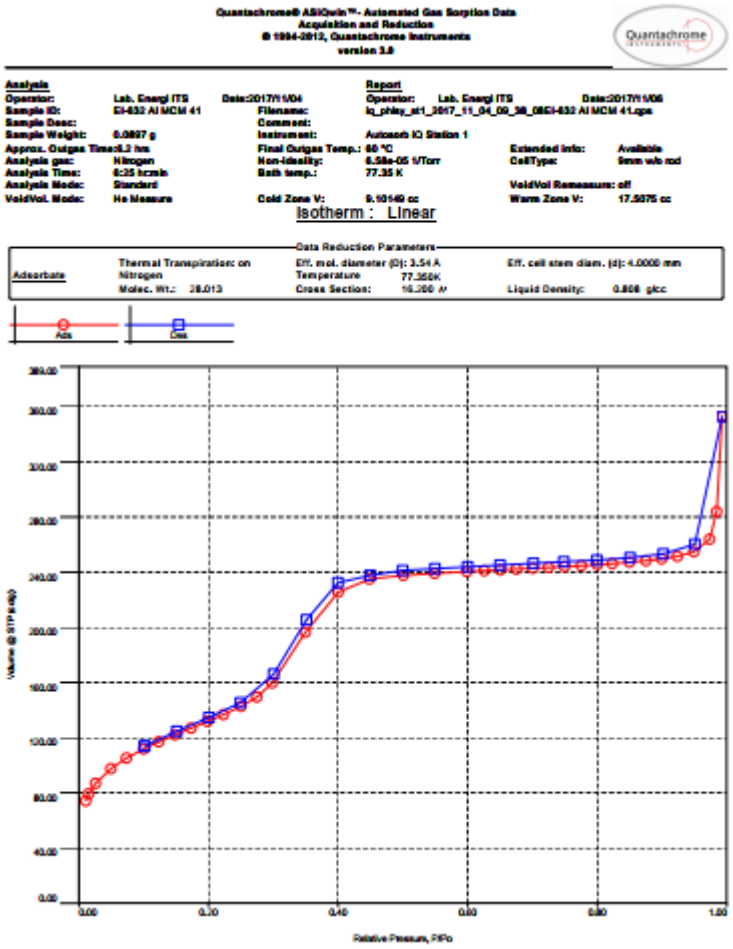
Tabel C.3 Komposisi unsur pada katalis Al-MCM-41:Keramik (7:3)

Unsur	Ar	Series	unn. C (wt. %)	Norm. C (wt. %)	Atom. C (at. %)	Error (%)
O	8	K-Series	66,80	66,80	66,90	21,4
Si	14	K-Series	17,29	17,29	10,16	0,7
C	6	K-Series	14,71	14,71	20,21	5,5
Al	13	K-Series	1,19	1,19	0,73	0,2
N	7	K-Series	0,00	0,00	0,00	0,0
		Total	100,00	100,00	100,00	

C.4 Karakterisasi Adsorpsi-Desorpsi Gas N_2 Katalis Al-MCM-41/keramik

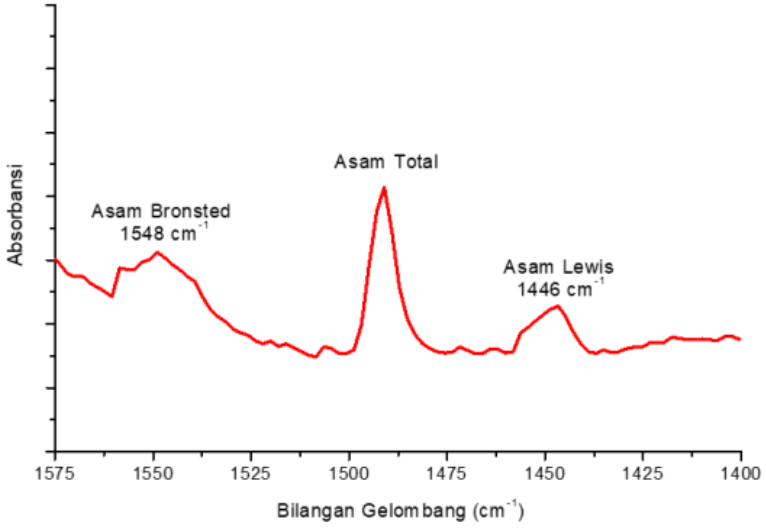


Gambar C. 6 Data luas permukaan katalis Al-MCM-4/keramik



Gambar C.7 Grafik isoterm adsorpsi-desorpsi Al-MCM-41/keramik

C.5 Hasil Karakterisasi FTIR-piridin Katalis Al-MCM-41/keramik



Gambar C.8 Hasil karakterisasi FTIR-Piridin katalis Al-MCM/keramik

Tabel C.4 Perhitungan keasaman katalis Al-MCM-41:Keramik (7:3)

Jenis Asam	Bil. Gelombang (cm-1)	Jumlah Asam (mmol/g)
Lewis	1437-1454	0,0342
Bronsted	1537-1554	0,0311

Lampiran D. % Hasil Perengkahan

D.1 % Hasil Hidrokarbon Cair Hasil Pirolisis Limbah PS

Penentuan % hasil minyak PS dan kokas dihitung berdasarkan rasio massa kondensat yang ditampung dan massa residu pada dasar reaktor dengan massa lempengan limbah PS yang dipirolisis. Adapun contoh perhitungan % hasil minyak PS adalah sebagai berikut :

$$\% \text{ Hasil minyak PS} = \frac{massa\ minyak\ PS}{massa\ limbah\ PS} \times 100\%$$

$$= \frac{819{,}20\ gram}{1131{,}00\ gram} \times 100\%$$

% Hasil minyak PS = 72,431 %

Tabel D.1 Data pirolisis minyak PS dari limbah plastik PS

Massa PS (g)	Minyak PS (g)	Kokas (g)	Hasil Minyak PS (%)	Hasil Kokas (%)
999,69	950	87,04	95,03 %	8,71 %
1131,00	1000	65,89	88,42 %	5,82 %

D.2 % Hasil Hidrokarbon Cair Hasil Perengkahan Katalitik PS:BMJ dan PS:BMK

Penentuan % hasil hidrokarbon cair dan kokas dalam perengkahan katalitik ditentukan berdasarkan rasio volume kondensat yang ditampung dan residu yang terbentuk dengan volume bahan baku. Adapun contoh perhitungan % hasil hidrokarbon cair ditunjukkan sebagai berikut:

$$\% \text{ Hasil BBC} = \frac{volume\ BBC}{volume\ feedstock} \times 100\%$$

$$= \frac{646\ mL}{1000\ mL} \times 100\%$$

% Hasil BBC = 64,60 %

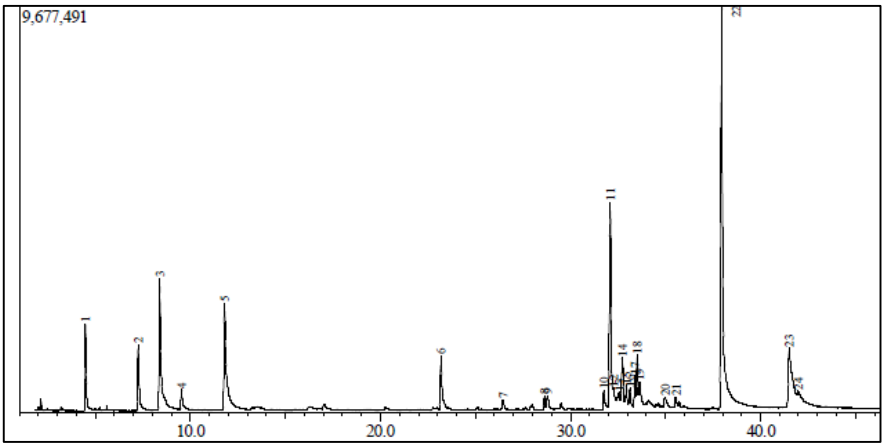
Perhitungan diatas merupakan perhitungan untuk perolehan BBC variasi PS:BMJ 1:1. Selanjutnya digunakan cara yang sama untuk menghitung % hasil BBC pada variasi BBC lainnya.

Tabel D.2 Data hasil BBC hasil perengkahan katalitik

Variasi BBC	Volume BBC (mL)	Volume Kokas (mL)	Hasil BBC (%)	Hasil Kokas (%)
PS:BMJ 1:1	646	234	64,6	23,4
PS:BMJ 4:3	716	159	71,6	15,9
PS:BMJ 2:1	804	61	80,4	6,1
PS:BMK 1:1	454	318	45,4	31,8
PS:BMK 4:3	520	275	52,0	27,5
PS:BMK 2:1	682	195	68,2	19,5

Lampiran E Karakterisasi GC-MS

E.1 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 1:1 (60 menit)



Gambar E. 1 Kromatogram BBC variasi PS:BMJ 1:1 (60 Menit)

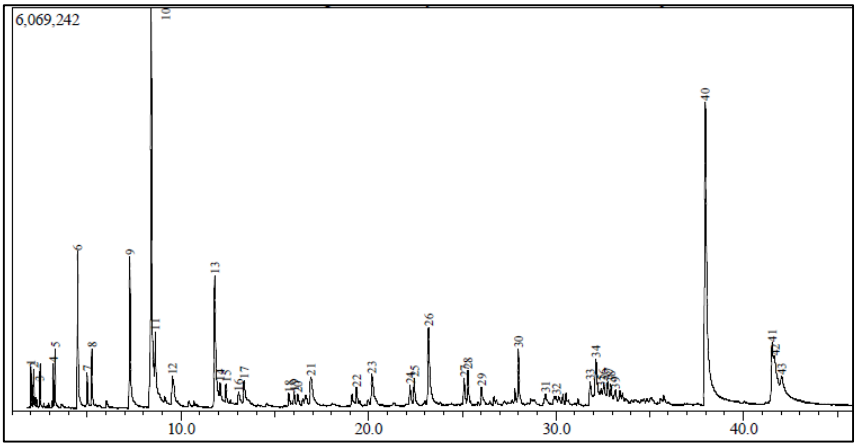
Tabel E.1 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 1:1 (60 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
1	4,888	4,425	4,717	3,25	C7
2	7,267	7,192	7,542	3,18	C8
3	8,401	8,283	8,833	8,33	C8
4	9,547	9,475	9,742	0,96	C9
5	11,803	11,708	12,308	9,21	C9
6	23,188	23,092	23,500	3,66	C11
7	26,441	26,350	26,592	0,59	C13
8	28,632	28,525	28,717	0,69	C13
9	28,791	28,717	28,983	0,89	C14
10	31,571	31,667	31,925	1,30	C12

Lanjutan Tabel E.1. Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 1:1 (60 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
11	32,096	31,925	32,233	12,52	C15
12	32,275	32,233	32,350	1,14	C11
13	32,562	32,350	32,633	1,88	C16
14	32,727	32,633	32,858	3,46	C16
15	32,945	32,858	33,042	1,28	C17
16	33,133	33,042	33,275	1,03	C16
17	33,391	33,275	33,442	1,41	C17
18	32,971	33,442	33,575	2,30	C15
19	35,544	33,575	33,875	1,81	C10
20	34,971	34,875	35,250	0,90	C16
21	35,544	35,417	35,658	0,72	C16
22	37,959	37,808	38,533	30,02	C19
23	41,507	41,375	41,925	8,05	C19
24	41,999	41,925	42,925	1,40	C19

E.2 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 1:1 (120 menit)



Gambar E. 2 Kromatogram BBC variasi PS:BMJ 1:1 (120 Menit)

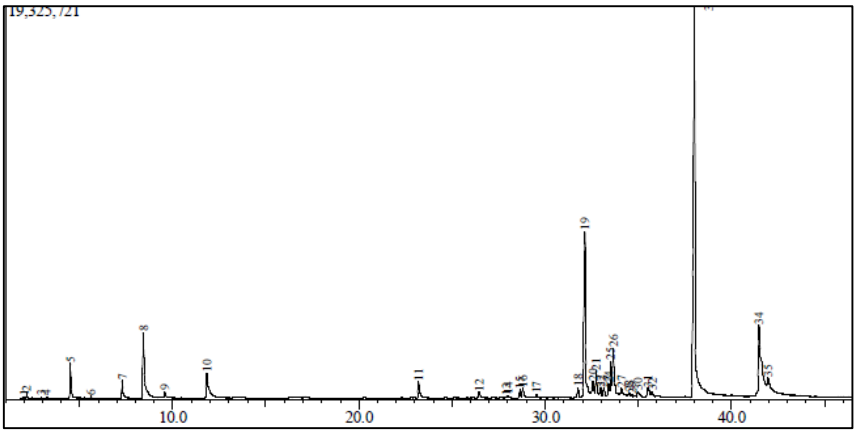
Tabel E.2 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 1:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
1	2,009	1,975	2,100	0,67	C3
2	2,148	2,100	2,200	0,61	C5
3	2,450	2,375	2,550	1,04	C6
4	3,186	3,150	3,242	0,68	C7
5	3,282	3,242	3,350	0,89	C7
6	4,487	4,408	4,742	4,32	C7
7	5,000	4,917	5,117	0,84	C8
8	5,236	5,117	5,383	1,40	C8
9	7,265	7,183	7,500	4,92	C8
10	8,410	8,250	8,575	15,26	C8
11	8,628	8,575	8,800	2,40	C9
12	9,551	9,475	9,758	1,49	C9
13	11,797	11,717	12,025	6,45	C9
14	12,090	12,025	12,258	1,18	C11
15	12,408	12,258	12,558	0,80	C12
16	13,067	12,975	13,217	0,55	C8
17	13,365	13,217	13,525	0,90	C8
18	15,743	15,667	15,850	0,53	C11
19	16,021	15,850	16,142	0,64	C12
20	16,218	16,142	16,383	0,53	C11
21	16,921	16,850	17,167	1,53	C9
22	19,363	19,192	19,492	0,67	C12
23	20,177	20,108	20,508	1,98	C10
24	22,212	22,125	22,350	0,73	C12
25	22,441	22,350	22,592	0,91	C12
26	23,192	23,092	23,517	4,37	C11
27	25,095	25,008	25,225	0,99	C14
28	25,303	25,225	25,450	1,13	C12
29	26,016	25,933	26,133	0,60	C13
30	27,994	27,908	28,200	1,96	C12
31	29,436	29,283	29,592	0,60	C14
32	29,998	29,817	30,100	0,64	C12
33	31,806	31,700	31,950	1,40	C12
34	32,122	31,950	32,342	3,61	C15
35	32,403	32,342	32,467	0,72	C17
36	32,537	32,467	32,675	1,36	C17
37	32,765	32,675	32,875	1,24	C16
38	32,926	32,875	33,075	0,91	C13
39	33,156	33,075	33,292	0,58	C16
40	37,959	37,825	38,375	18,86	C19
41	41,527	41,400	41,617	3,39	C19

Lanjutan Tabel E.2. Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 1:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
42	41,675	41,617	41,933	3,93	C19
43	42,010	41,933	42,308	1,80	C19

E.3 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 4:3 (60 menit)



Gambar E. 3 Kromatogram BBC variasi PS:BMJ 4:3 (60 Menit)

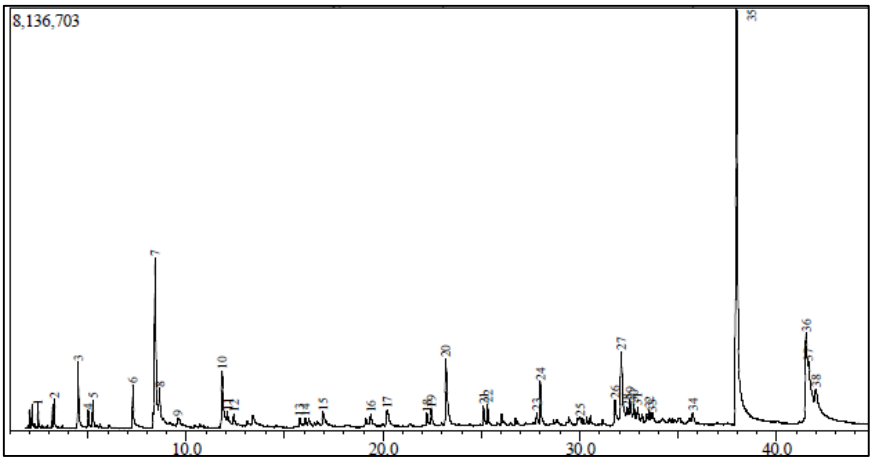
Tabel E.3 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 4:3 (60 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
1	2,019	1,975	2,117	0,07	C5
2	2,155	2,117	2,308	0,21	C3
3	2,961	2,917	3,042	0,06	C6
4	3,202	3,167	3,258	0,05	C7
5	4,502	4,425	4,775	2,07	C7
6	5,616	5,550	5,742	0,13	C6
7	7,284	7,183	7,542	1,32	C8
8	8,418	8,283	8,942	6,42	C8
9	9,564	9,483	9,783	0,48	C9
10	11,823	12,342	12,342	3,51	C9
11	23,195	23,100	23,517	1,62	C11
12	26,447	26,333	26,667	0,62	C13
13	27,892	27,817	27,950	0,11	C14
14	27,996	27,950	28,117	0,17	C20
15	28,637	28,525	28,725	0,62	C13
16	28,795	28,725	29,025	0,85	C14

Lanjutan Tabel E.3. Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 4:3 (60 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
17	29,525	29,408	29,692	0,27	C15
18	31,749	31,667	31,933	0,82	C12
19	32,130	31,667	32,450	14,35	C15
20	32,562	32,450	32,650	1,80	C16
21	32,729	32,650	32,858	2,42	C16
22	32,959	32,858	33,067	0,91	C17
23	33,145	33,067	33,317	0,82	C16
24	33,405	33,317	33,450	0,89	C17
25	33,517	33,405	33,575	2,19	C14
26	33,643	33,575	33,917	4,70	C10
27	34,089	33,917	34,317	1,33	C15
28	34,508	34,317	34,592	0,40	C16
29	34,675	34,592	34,742	0,09	C14
30	34,980	34,900	35,192	0,46	C16
31	35,528	35,400	35,667	0,92	C16
32	35,730	35,667	35,908	0,39	C17
33	38,004	37,833	38,600	34,75	C19
34	41,483	41,275	41,875	11,76	C19
35	41,974	41,875	42,350	2,41	C19

E.4 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 4:3 (120 menit)

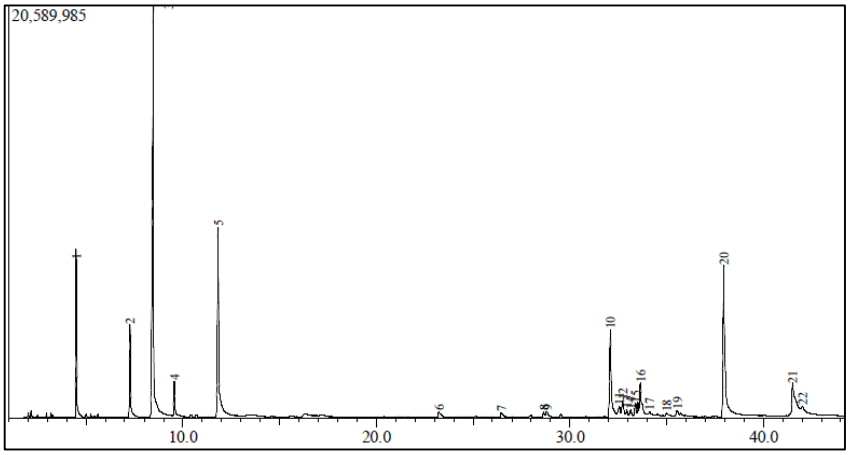


Gambar E. 4 Kromatogram BBC variasi PS:BMJ 4:3 (120 Menit)

Tabel E.4 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 4:3 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
1	2,448	2,300	2,550	0,76	C6
2	3,289	3,250	3,358	0,56	C7
3	4,497	4,425	4,733	2,45	C7
4	5,011	4,942	5,142	0,56	C8
5	5,246	5,142	5,392	0,87	C8
6	7,276	7,175	7,492	1,89	C8
7	8,409	8,258	8,583	9,13	C8
8	8,635	8,583	8,800	2,00	C9
9	9,559	9,942	9,775	0,64	C9
10	11,813	11,725	12,050	4,01	C9
11	12,103	12,050	12,267	0,94	C11
12	12,422	12,267	12,567	0,64	C10
13	15,758	15,683	15,883	0,53	C11
14	16,046	15,883	16,167	0,61	C12
15	16,947	16,858	17,192	1,12	C9
16	19,378	19,208	19,500	0,60	C12
17	20,192	20,117	20,500	1,37	C10
18	22,223	22,133	22,367	0,64	C12
19	22,451	22,367	22,575	0,74	C12
20	23,187	23,100	23,525	4,78	C11
21	25,103	25,000	25,242	0,93	C12
22	25,314	25,242	25,458	0,94	C12
23	27,810	27,750	27,925	0,55	C12
24	27,999	27,925	28,192	1,97	C12
25	30,017	29,800	30,100	0,83	C18
26	31,775	31,683	31,950	1,94	C12
27	32,108	31,950	32,350	5,89	C15
28	32,403	32,350	32,467	0,93	C17
29	32,543	32,467	32,667	1,82	C13
30	32,752	32,667	32,867	1,45	C15
31	32,933	32,867	33,083	1,05	C12
32	33,530	33,475	33,608	0,59	C15
33	33,670	33,608	33,883	0,73	C10
34	35,737	35,675	35,917	0,61	C17
35	37,962	37,842	38,542	28,00	C19
36	41,498	41,300	41,567	5,63	C19
37	41,599	41,567	41,908	7,54	C19
38	41,987	41,908	42,442	3,75	C19

E.5 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 2:1 (60 menit)

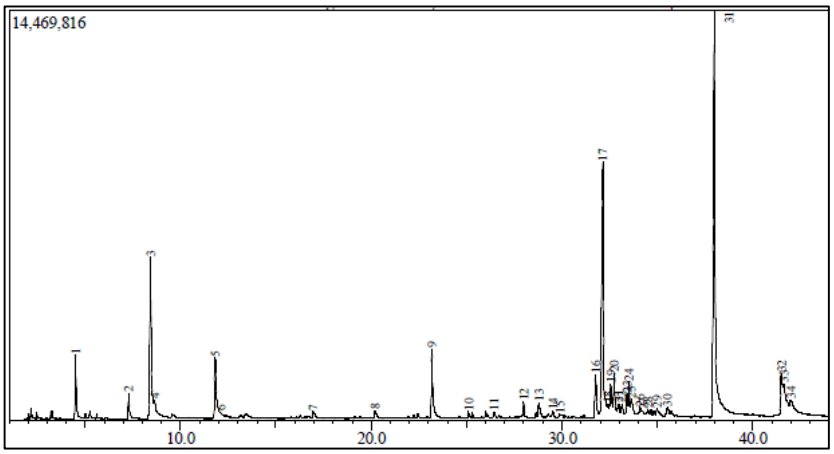


Gambar E. 5 Kromatogram BBC variasi PS:BMJ 2:1 (60 Menit)

Tabel E.5 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 2:1 (60 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
1	4,496	4,408	4,842	7.20	C7
2	7,276	7,175	7,675	5.05	C8
3	8,483	8,275	9,108	30.64	C8
4	9,557	9,475	9,858	1.99	C9
5	11,826	11,658	12,442	14.18	C9
6	23,244	23,142	23,508	0.49	C11
7	26,460	26,342	26,692	0.43	C13
8	28,647	28,525	28,725	0.35	C13
9	28,808	28,725	29,042	0.52	C14
10	32,102	31,942	32,442	7.35	C15
11	32,544	32,442	32,642	1.03	C16
12	32,733	32,642	32,858	1.40	C16
13	32,950	32,858	33,058	0.51	C17
14	33,141	33,058	33,275	0.44	C16
15	33,394	33,275	33,458	0.78	C17
16	33,648	33,458	33,975	4.05	C10
17	34,121	33,975	34,342	0.40	C15
18	34,992	34,908	35,458	0.28	C16
19	35,551	35,458	35,675	0.50	C16
20	37,962	37,808	38,658	14.59	C19
21	41,513	41,308	41,908	6,16	C19
22	42,019	41,908	42,492	1,65	C19

E.6 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMJ 2:1 (120 menit)



Gambar E. 6 Kromatogram BBC variasi PS:BMJ 2:1 (120 Menit)

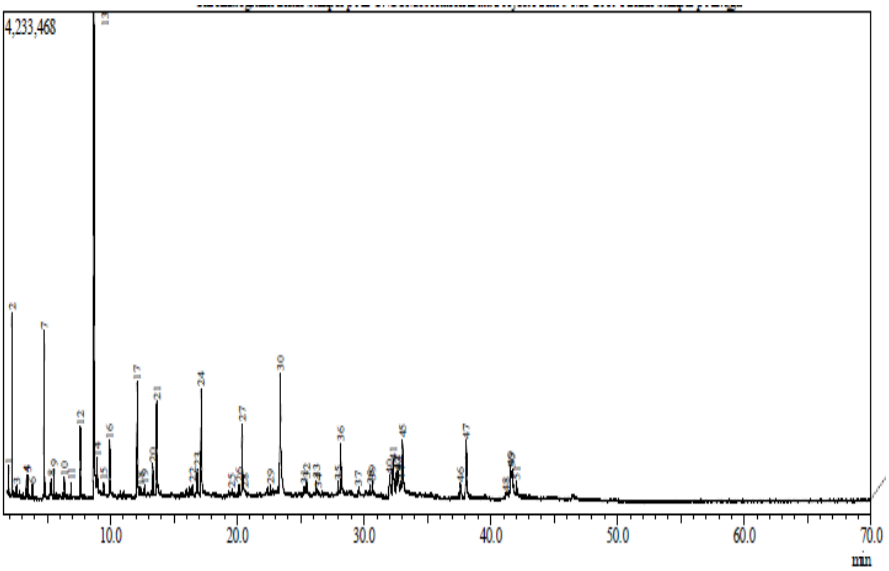
Tabel E.6 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 2:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
1	4,498	4,433	4,800	2,76	C7
2	7,278	7,200	7,517	1,37	C8
3	8,422	8,258	8,600	9,56	C8
4	8,635	8,600	8,950	1,39	C9
5	11,813	11,725	12,.067	4,86	C9
6	12,108	12,067	12,292	0,53	C10
7	16,953	16,892	17,183	0,49	C9
8	20,188	20,083	20,417	0,58	C10
9	23,176	23,083	23,517	4,36	C11
10	25,097	25,008	25,242	0,31	C14
11	26,433	26,333	26,617	0,39	C13
12	27,987	27,925	28,117	0,68	C12
13	28,787	28,708	29,008	1,00	C14
14	29,517	29,467	29,683	0,34	C15
15	29,895	29,775	30,092	0,37	C10
16	31,749	31,658	31,942	2,72	C12
17	32,139	31,942	32,358	17,17	C15
18	32,405	32,358	32,450	0,69	C14
19	32,553	32,450	32,650	2,63	C16
20	32,732	32,650	32,867	3,01	C16
21	32,956	32,867	33,042	0,98	C17
22	33,141	33,042	33,300	0,96	C16
23	33,406	33,300	33,450	1,18	C17

Lanjutan Tabel E.6. Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMJ 2:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
24	33,511	33,450	33,575	1,66	C15
25	33,634	33,575	33,892	1,58	C14
26	34,099	34,025	34.,167	0,56	C15
27	34,225	34,167	34,317	0,36	C14
28	34,505	34,317	34,600	0,47	C16
29	34,987	34,900	35,175	0,48	C16
30	35,525	35,375	35,667	0,73	C16
31	37,980	37,817	38,650	27,58	C19
32	41,500	41,350	41,575	2,92	C19
33	41,617	41,575	41,908	3,76	C19
34	42,006	41,908	42,317	1,54	C19

E.7 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 1:1 (120 menit)



Gambar E. 7 Kromatogram BBC variasi PS:BMK 1:1 (120 Menit)

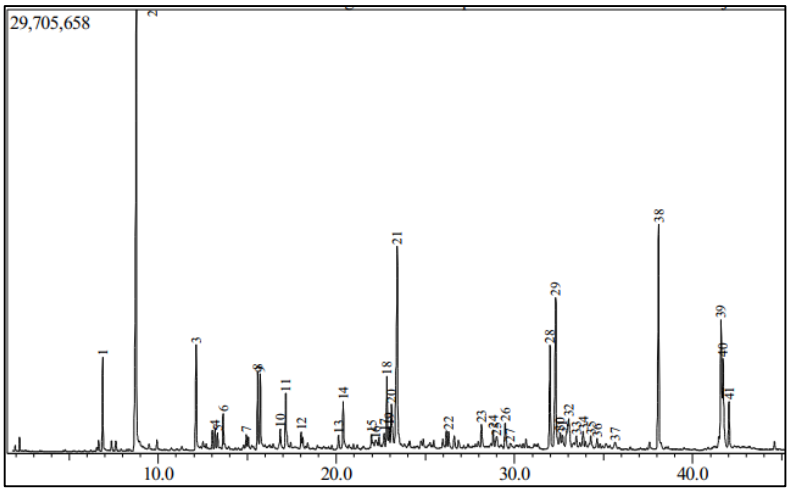
Tabel E.7 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMK 1:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
1	1,971	1,917	2,042	0,63	C6
2	2,214	2,175	2,283	3,33	C3
3	2,592	2,417	2,633	0,56	C6
4	3,367	3,250	3,442	0,76	C7
5	3,472	3,442	3,525	0,57	C7
6	3,848	3,783	3,942	0,43	C5
7	4,762	4,675	4,908	5,56	C7
8	5,313	5,258	5,433	0,59	C8
9	5,551	5,467	5,625	1,01	C8
10	6,362	6,283	6,483	0,84	C6
11	6,874	6,808	6,917	0,46	C9
12	7,617	7,533	7,800	2,89	C8
13	8,686	8,567	8,867	19,40	C8
14	8,941	8,867	9,058	1,42	C9
15	9,468	9,383	9,533	0,58	C7
16	9,931	9,825	10,117	2,51	C7
17	12,095	12,00	12,233	5,01	C9
18	12,374	12,233	12,433	0,67	C10
19	12,685	12,558	12,750	0.60	C10
20	13,330	13,275	13,433	1,26	C8
21	13,639	13,567	13,850	3,83	C8
22	13,465	16,400	16,525	0,38	C11
23	16,851	16,792	16,967	1,30	C9
24	17,146	17,008	17,425	4,56	C9
25	19,569	19,400	19,675	0,49	C12
26	20,143	20,083	20,250	0,55	C10
27	20,379	20,250	20,483	3,41	C10
28	20,575	20,483	20,642	0,51	C9
29	22,626	22,575	22,742	0,46	C12
30	23,390	23,250	23,725	8,33	C11
31	25,290	25,208	25,425	0,88	C11
32	25,475	25,425	25,592	0,86	C11
33	26,232	26,092	26,300	0,85	C9
34	26,380	26,300	26,458	0,39	C12
35	27,974	27,892	28,075	0,67	C11
36	28,156	28,075	28,467	2,96	C12
37	29,574	29,500	29,675	0,46	C11
38	30,508	30,392	30,600	0,45	C12
39	30,668	30,600	30,750	0,62	C12
40	32,027	31,942	32,175	1,43	C12
41	32,287	32,175	32,475	2,72	C15

Lanjutan Tabel E.7. Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMK 1:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	% Area	Fraksi
42	32,565	32,475	32,625	1,35	C14
43	32,677	32,625	32,817	1,50	C7
44	32,891	32,817	32,958	0,70	C16
45	32,050	32,958	33,250	2,99	C12
46	37,614	37,542	37,717	0,65	C15
47	38,065	37,958	38,283	2,82	C17
48	41,183	41,125	41,400	0,51	C16
49	41,570	41,467	41,617	1,52	C19
50	41,669	41,617	41,875	2,24	C17
51	42,033	41,942	42,133	0,54	C19

E.8 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 4:3 (120 menit)



Gambar E. 8 Kromatogram BBC variasi PS:BMK 4:3 (120 Menit)

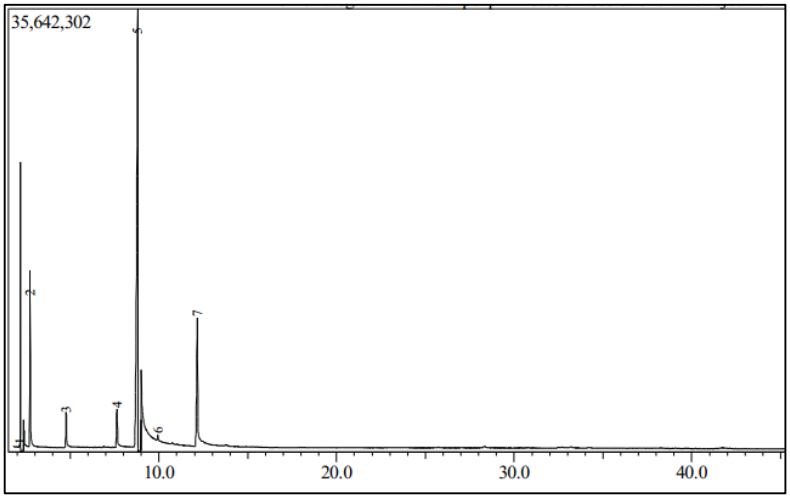
Tabel E.8 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMK 4:3 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	%Area	Fraksi
1	6.88	6.775	7.283	2.43	C9
2	8.764	8.558	10.108	16.09	C8
3	12.124	11.95	12.317	3.35	C9
4	13.184	13.117	13.258	0.62	C11
5	13.323	13.258	13.45	0.6	C8
6	13.643	13.567	13.867	1.31	C8
7	14.939	14.85	15.008	0.59	C12
8	15.582	15.45	15.658	2.2	C13

Lanjutan Tabel E.8. Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMK 4:3 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	%Area	Fraksi
9	15.728	15.658	15.917	2.42	C13
10	16.847	16.675	17.017	1.03	C12
11	17.154	17.017	17.375	2.33	C9
12	18.021	17.917	18.067	0.57	C12
13	20.119	19.917	20.217	0.62	C10
14	20.379	20.217	20.625	1.97	C10
15	21.973	21.8	22.017	0.62	C9
16	22.197	22.117	22.342	0.79	C12
17	22.68	22.558	22.75	0.77	C12
18	22.835	22.75	22.9	2.15	C12
19	22.959	22.9	23.017	0.82	C11
20	23.086	23.017	23.208	2.14	C12
21	23.415	23.225	28.058	13.48	C11
22	26.298	26.233	26.492	0.59	C12
23	28.142	28.058	28.325	1.19	C12
24	28.797	28.733	28.875	0.71	C16
25	28.984	28.875	29.15	1	C14
26	29.473	29.383	29.65	1.21	C12
27	29.753	28.65	29.975	0.62	C10
28	31.994	31.767	32.133	3.78	C12
29	32.31	32.133	32.458	6.26	C15
30	32.558	32.458	32.625	0.84	C17
31	32.688	32.625	32.825	0.83	C17
32	33.039	32.825	33.2	2.83	C15
33	33.465	33.392	33.558	0.63	C16
34	33.848	33.733	33.933	0.94	C11
35	34.28	34.192	34.425	0.79	C13
36	34.632	34.425	34.708	0.64	C10
37	35.637	35.45	35.817	0.66	C24
38	38.084	37.925	39.192	7.39	C17
39	41.593	41.5	41.65	4.81	C19
40	41.703	41.65	41.917	4.14	C19
41	42.034	41.917	44.517	3.24	C19

E.9 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 2:1 (60 menit)

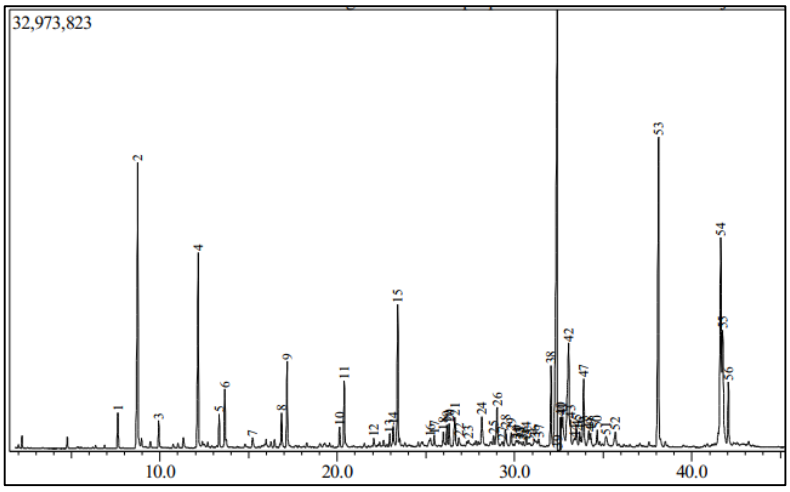


Gambar E. 9 Kromatogram BBC variasi PS:BMK 2:1 (60 Menit)

Tabel E.7 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PP:BMK 2:1 (60 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	%Area	Fraksi
1	2.142	2.092	2.225	5.44	C2
2	2.740	2.675	3.075	9.22	C1
3	4.774	4.692	5,108	2.86	C7
4	7.635	7.542	7.958	3.65	C8
5	8.788	8.592	10.208	62.31	C8
6	9.936	9.858	10.142	0.47	C9
7	12.159	12.025	12.875	16.04	C9

E.10 Hasil Analisis GC-MS BBC Variasi PS:BMK 1:1 (120 menit)



Gambar E. 10 Kromatogram BBC variasi PS:BMK 2:1 (120 Menit)

Tabel E.10 Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PP:BMK 2:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	%Area	Fraksi
1	7.621	7.533	7.792	0.79	C8
2	8.746	8.558	8.883	7.62	C8
3	9.925	9.825	10.258	0.64	C7
4	12.155	11.9	12.325	5.08	C9
5	13.333	13.258	13.483	0.73	C8
6	13.656	13.483	14.517	1.52	C8
7	15.218	15.05	15.375	0.36	C8
8	16.855	16.783	17.067	0.88	C9
9	17.167	17.067	20.033	2.95	C9
10	20.127	20.033	20.208	0.53	C10
11	20.39	20.208	21.983	2.54	C10
12	22.059	21.983	22.167	0.35	C10
13	22.955	22.875	23.025	0.41	C11
14	23.15	23.025	23.283	0.85	C11
15	23.41	23.283	23.475	3.53	C11
16	25.253	25.075	25.333	0.67	C12
17	25.464	25.333	25.633	0.63	C12
18	25.977	25.833	26.108	0.72	C12
19	26.183	26.108	26.242	0.63	C12
20	26.306	26.242	26.417	0.74	C12
21	26.624	26.417	26.758	1.41	C13
22	26.85	26.758	27	0.59	C10
23	27.399	27.333	27.458	0.34	C14
24	28.151	28.008	28.325	1.46	C12
25	28.815	28.75	28.892	0.47	C13
26	29.009	28.892	29.167	1.63	C14
27	29.31	29.167	29.383	0.47	C14
28	29.478	29.383	29.683	1	C11
29	29.81	29.683	29.9	0.71	C15
30	30.082	29.992	30.125	0.37	C15
31	30.191	30.125	30.258	0.37	C15
32	30.313	30.258	30.417	0.4	C14
33	30.481	30.417	30.567	0.34	C14
34	30.655	30.567	30.725	0.48	C16
35	30.841	30.725	30.933	0.46	C17
36	31.117	30.933	31.183	0.64	C17
37	31.356	31.292	31.442	0.43	C19
38	32.058	31.892	32.15	2.42	C20
39	32.45	32.15	32.575	14.38	C5
40	32.583	32.575	32.658	0.7	C5
41	32.707	32.658	32.85	1.46	C15
42	33.046	32.85	33.108	5.06	C16
43	33.142	33.108	32.242	0.86	C16
44	33.362	33.242	33.425	0.63	C22
45	33.495	33.425	33.583	0.75	C16
46	33.674	33.583	33.775	0.76	C14

Lanjutan Tabel E.10. Data hasil karakterisasi MS BBC variasi PS:BMK 2:1 (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	%Area	Fraksi
47	33.895	33.775	34.042	2.43	C10
48	34.182	34.042	34.233	0.76	C16
49	34.284	34.233	34.433	0.64	C13
50	34.658	34.575	34.742	0.66	C16
51	35.157	35.025	35.45	0.96	C16
52	35.681	35.45	35.792	0.94	C16
53	38.113	37.925	38.383	9.1	C17
54	41.63	41.325	41.683	7.54	C19
55	41.733	41.683	41.95	4.37	C19
56	42.052	41.95	42.267	1.85	C20

Lampiran F Karakterisasi Campuran Bahan Bakar Cair

F.1 Karakterisasi Densitas

Contoh perhitungan densitas bahan bakar cair untuk variasi PS:BMK 1:1 ditunjukkan sebagai berikut:

Massa BBC = 7, 6385 gram

Volume piknometer = 10,1647 ml

$$\text{Densitas} = \frac{\text{massa bahan bakar cair}}{\text{volume piknometer}}$$

$$= \frac{7{,}6385\ \text{g}}{10{,}1647\ \text{mL}}$$

= 0, 7514 g/mL

Perhitungan densitas pada masing-masing variasi ditunjukkan pada Tabel E.1.

Tabel F.1 Data karakterisasi densitas CBBC

Variasi CBBC	Massa pikno (gr)	Massa pikno+BBC (gr)	Massa BBC (gr)	Volume pikno (mL)	Densitas (g/mL)
PS: BMJ 1:1	17,2526	24,6768	7,4242	10,1647	0,7304
PS: BMJ 4:3	17,3485	24,9943	7,6085	10,1647	0,7462
PS: BMJ 2:1	17,3485	25,0169	7,6324	10,1647	0,7486
PS: BMK 1:1	15,9775	23,6160	7,6385	10,1647	0,7514
PS: BMK 4:3	15,9842	23,6370	7,6528	10,1647	0,7529
PS: BMK 2:1	15,9786	23,7075	7,7289	10,1647	0,7604
Standar	15,9776	23,213	7,2355	10,1647	0,7118

F.2 Karakterisasi Viskositas

Contoh perhitungan viskositas bahan bakar cair variasi PS:BMK 1:1 ditunjukkan sebagai berikut:

η_0 (40ºC) = 0,658 x 10^{-6} m^2/s = 0,658 cSt

t_0 = 0,62 s

ρ_0 = 996,44 kg/m^3

t_{BBC} = 0, 485 s

ρ_{BBC} = 751,4 kg/m^3

$$\eta_{BBC} = \eta_0 \frac{t_{BBC} \times \rho_{BBC}}{t_0 \times \rho_0}$$

$$= 0{,}658 \frac{0{,}48 \times 751{,}4}{0{,}62 \times 996{,}44}$$

= 0,49 cSt

Perhitungan viskositas pada masing-masing variasi ditunjukkan pada Tabel E.2.

Tabel F.2 Data karakterisasi viskositas CBBC

Variasi CBBC	t_{BBC} (det)	ρ_{BBC} (g/cm^3)	η_0 (cSt)	t_0 (det)	ρ_0 (g/cm^3)	η_{BBC} (cSt)
PS: BMJ 1:1	0,476	0,7304	0,658	0,62	0,99644	0,34
PS: BMJ 4:3	0,414	0,7462	0,658	0,62	0,99644	0,36
PS: BMJ 2:1	0,456	0,7486	0,658	0,62	0,99644	0,41
PS: BMK 1:1	0,485	0,7514	0,658	0,62	0,99644	0,49
PS: BMK 4:3	0,414	0,7529	0,658	0,62	0,99644	0,33
PS: BMK 2:1	0,476	0,7604	0,658	0,62	0,99644	0,39
Standar	0,360	0,7118	0,658	0,62	0,99644	0,27

F.3 Karakterisasi Titik Nyala

Tabel F.3 Data karakterisasi titik nyala CBBC

Variasi CBBC	Temperatur Titik Nyala (ºC)
PS:BMJ 1:1	< -39
PS:BMJ 4:1	< -39
PS:BMJ 2:1	< -39
PS:BMK 1:1	< -20
PS:BMK 4:3	< -10,8
PS:BMK 2:1	< - 16,5
Standar	< -7

F.4 Karakterisasi Nilai Kalor

Contoh perhitungan nilai kalor bahan bakar premium sebagai standar ditunjukkan, sebagai berikut:

Cv asam benzoat : 1.974,375 (kal/^{o}C)

Faktor koreksi sisa kawat : 2,3 kal/cm

$$\text{Nilai kalor} = \frac{(\text{Cv asam benzoat} \times (T2 - T1)) + \text{Qv sisa kawat}}{\text{berat sampel}}$$

$$= \frac{(1.974{,}375 \times (35{,}9 - 30{,}3)) + 0}{1{,}0384}$$

$$= 9595{,}99 \text{ kal/g}$$

Perhitungan nilai kalor pada masing-masing variasi ditunjukkan pada Tabel F.6.

Tabel F.4 Data karakterisasi nilai kalor CBBC

Variasi CBBC	Massa sampel (g)	T_1 (^{o}C)	T_2 (^{o}C)	Sisa Kawat (cm)	Qv Sisa Kawat (kal)	Nilai Kalor (kal/g)
PS: BMJ 1:1	1,037	29	35	2,3	5,29	19226,47
PS:BMJ 4:1	1,0798	29	34	0	0	15380,12
PS:BMJ 2:1	1,0103	29	32	3,2	7,36	9875,14
PS:BMK 1:1	1,0165	29,7	34,8	0,7	1,5	16663,5
PS:BMK 4:3	1,0285	29,8	36,2	1,3	3	20843,9
PS:BMK 2:1	1,0391	29,2	37,7	1,1	2,53	27028,9
Standar	1,0384	30,3	35,9	0	0	9595,99

F.5 Karakterisasi Angka Oktan (RON)

Tabel F.5 Data hasil uji RON CBBC

Variasi BBC	Nilai RON
PS: BMJ 1:1	97,4
PS:BMJ 4:1	99,7
PS:BMJ 2:1	98,5
PS:BMK 1:1	100,5
PS:BMK 4:3	97,8
PS:BMK 2:1	98,1
Standar	88

F.6 Karakterisasi Kinerja pada Mesin Gasolin

Tabel F.6 Data hasil uji kinerja CBBC

Beban	Tegangan (V)	Arus (A)	t/20cc bb (sc)	Daya G (Watt)	Daya P (Watt)	Torsi (N-m)	m bb (kg/jam)	Bmep(Pa)	BSFC (kg/w-jam)	Eff (%)
Sampel PS:BMJ 1:1										
4	220	1,40	120,04	385	438	1,23	0,46	11515	0,0010	8,64
8	220	3,00	108	825	938	2,63	0,51	24675	0,0005	16,66
12	220	4,60	93	1265	1438	4,03	0,59	37835	0,0004	22,00
16	220	6,10	81	1678	1906	5,34	0,68	50172	0,0004	25,41
20	220	7,70	60,09	2118	2406	6,74	0,91	63332	0,0004	23,79
Sampel PS:BMJ 2:1										
4	220	1,40	120,07	385	438	1,23	0,45	11515	0,0010	8,77
8	220	3,00	106	825	938	2,63	0,51	24675	0,0005	16,59
12	220	4,50	91	1238	1406	3,94	0,59	37012	0,0004	21,37
16	220	6,10	82	1678	1906	5,34	0,66	50172	0,0003	26,10
20	220	7,70	70	2118	2406	6,74	0,77	63332	0,0003	28,13
Sampel PS:BMJ 4:3										
4	220	1,40	120,05	385	438	1,23	0,45	11515	0,0010	8,80
8	220	3,00	108	825	938	2,63	0,50	24675	0,0005	16,96
12	220	4,60	91	1265	1438	4,03	0,59	37835	0,0004	21,91
16	220	6,10	80	1678	1906	5,34	0,67	50172	0,0004	25,55
20	220	7,70	70	2118	2406	6,74	0,77	63332	0,0003	28,22
Std										
4	220	1,40	118	385	438	1,23	0,48	11515	0,0011	8,15
8	220	3,00	104	825	938	2,63	0,56	24675	0,0006	15,16
12	220	4,60	90	1265	1438	4,03	0,59	37835	0,0004	21,99
16	220	6,20	81	1705	1938	5,43	0,68	50995	0,0004	25,55
20	220	7,80	60,09	2145	2438	6,83	0,85	64155	0,0003	24,75

BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Lamongan pada tanggal 25 Februari 1995 dengan nama lengkap Arifah Nurfitriyah. Penulis pernah menempuh pendidikan formal di SDN Jetis VI Lamongan, SMPN 1 Lamongan, SMAN 10 Malang (Sampoerna Academy), dan Pendidikan S1 di Jurusan Pendidikan Kimia Universitas Negeri Malang. Penulis diterima di Program Pascasarjana Jurusan Kimia ITS pada tahun 2018 dengan Beasiswa Unggulan dari BPKLN Kemendikbud dan terdaftar sebagai mahasiswa pascasarjana dengan NRP 01211850010011. Selama masa studi pascasarjana, penulis telah berpartisispasi dalam beberapa kegiatan seminar internasional baik sebagai *presenter* maupun *co-author* seperti *The Science and Science Education International Seminar* (SSEIS) 2019 di UNY, *10th International Conference on Green Technologi* (ICGT) 2019 di UIN Maulana Mallik Ibrahim Malang, dan *The 6th International Seminar on Science and Technology* (ISST) 2020 di ITS. Penulis mengambil bidang minat kimia fisik dan menyelesaikan studi pascasarjani di Departemen Kimia dengan mengambil Tesis yang berjudul "Peningkatan Hasil dan Kualitas Bahan Bakar Cair Fraksi Gasolin Melalui Ko-Perengkahan Katalitik Limbah Polistirena dengan Biodiesel Minyak Jelantah dan Minyak Kemiri (*Aleurites moluccana*)" dengan bimbibgan Bapak Dr. Hendro Juwono, M.Si. dan Ibu Dr. Yuly Kusumawati, M.Si. Segala kritik dan saran atau diskusi mengenai topik Tesis ini dapat menghubungi penulis melalui email arifah.nurfitriyah@gmail.com.