



SKRIPSI

**PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR HASIL
PERENKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK
POLISTIRENA (PS) DAN KO-REAKTAN BODIESEL
MINYAK JELANTAH MENGGUNAKAN KATALIS AI-
MCM-41/KERAMIK**

**ANAS ASSARI
NRP. 0121154000086**

**Dosen Pembimbing
Dr. Hendro Juwono, M.Si**

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



SCRIPT

PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM CATALYTIC CRACKING OF POLYSTYRENE (PS) WASTE PLASTIC AND CO-REACTAN WASTE COOKING OIL BODIESEL USING Al-MCM-41/CERAMICS CATALYST

**ANAS ASSARI
NRP. 0121154000086**

**Advisor Lecture
Dr. Hendro Juwono, M.Si**

**DEPARTEMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCES
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

**PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR HASIL
PERENKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK
POLISTIRENA (PS) DAN KO-REAKTAN BODIESEL
MINYAK JELANTAH MENGGUNAKAN KATALIS AI-
MCM-41/KERAMIK**

SKRIPSI

Disusun sebagai syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains
Pada
Program Studi S-1 Kimia
Fakultas Sains
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Disusun Oleh:

Anas Assari
NRP. 0121154000086

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

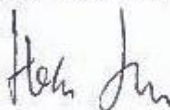
**PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR HASIL
PERENKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK
POLISTIRENA (PS) DAN KO-REAKTAN BODIESEL
MINYAK JELANTAH MENGGUNAKAN KATALIS AL-
MCM-41/KERAMIK**

SKRIPSI

Disusun oleh:

Anas Assari
NRP. 01211540000086

Surabaya, 2 Juli 2019
Menyetujui,
Dosen Pembimbing



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



Prof. Dr. Didik Prasetyoko, S.Si., M.Sc.
NIP 19710616 199703 1 002

PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR HASIL PERENKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK POLISTIRENA (PS) DAN KO-REAKTAN BIODIESEL MINYAK JELANTAH MENGGUNAKAN KATALIS Al-MCM-41/KERAMIK

Nama : Anas Assari
NRP : 0121154000086
Departemen : Kimia ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Hendro Juwono, M.Si

ABSTRAK

Bahan bakar cair telah berhasil didapatkan menggunakan metode perengkahan katalitik. Penelitian ini dilakukan pada limbah plastik polistirena (PS) menggunakan dan tanpa katalis Al-MCM-41/Keramik untuk menghasilkan fraksi hidrokarbon. Efek dari katalis, waktu perengkahan katalitik, dan penambahan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah pada hasil dan fraksi hidrokarbon telah diteliti. Katalis yang digunakan dikarakterisasi menggunakan XRD, SEM, Adsorpsi-desorpsi N₂, FTIR-Piridin, dan hasil perengkahan dianalisa menggunakan Kromatografi Gas-Spektroskopi Massa (KG-SM). Hasil analisa GC-MS menunjukkan bahwa komponen kimia hasil perengkahan PS, PS/Kat60, dan PS/Kat120 tersusun dari hidrokarbon aromatik. Komponen senyawa hidrokarbon aromatik maksimum mencapai 99,87% pada PS/Kat120. Komponen kimia untuk perengkahan katalitik PS/BMJ/Kat60 dan PS/BMJ/Kat120 terdapat senyawa metil ester. Senyawa metil ester PS/BMJ/Kat60 sebesar 47,42%, menurun pada PS/BMJ/Kat120 menjadi 39,31% serta terbentuk hidrokarbon alifatik sebesar 22,16%. Campuran bahan bakar cair jenis CPS/Kat memiliki efisiensi termal tertinggi sebesar 26,49%, dengan karakteristik nilai densitas 0,7405 g/cm³, viskositas 0,3436 cSt, titik nyala -49,4 °C, dan nilai kalor 9743,87 kkal/kg.

Kata Kunci : bahan bakar cair, biodiesel minyak jelantah, perengkahan katalitik, limbah plastik PS, performa bahan bakar cair

PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM CATALYTIC CRACKING OF POLYSTYRENE (PS) WASTE PLASTIC AND CO-REACTAN WASTE COOKING OIL BIODIESEL USING Al-MCM-41/CERAMICS CATALYST

Name : Anas Assari
NRP : 0121154000086
Department : Chemistry ITS
Advisore Lecture : Dr. Hendro Juwono, M.Si

ABSTRACT

Liquid fuel has been obtained successfully by cracking method. This research was carried out on polystyrene plastic waste (PS) with and without Al-MCM-41/Ceramics catalyst to produce hydrocarbon fractions. The effect of the catalyst, time of catalytic cracking, and waste cooking oil biodiesel on the results and properties of hydrocarbons have been investigated. The catalyst used were characterized by XRD, SEM, Adsorption-desorption N₂, FTIR-Pyridine, and cracking result were analyzed using Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS). The GC-MS analysis results showed that the chemical component of PS, PS/Kat60, and PS/Kat120 are composed aromatic hydrocarbons. The maximum component of aromatic hydrocarbon compounds reaches 99.87% in PS/Kat120. The pyrolysis of PS/BMJ/Kat60 and PS/BMJ/Kat120 produce a methyl ester compound. Methyl ester compound of PS/BMJ/Kat60 reached 47.42%, decreased in PS/BMJ/Kat120 to 39.31% and aliphatic hydrocarbons formed by 22.16%. The performance of a mixture of liquid fuel CPS/Kat has the highest thermal efficiency of 26.49%, with a density value of 0.7405 g/cm³, flash point -49.4°C, viscosity of 0.3436 cSt, and calorific value of 9743.87 kcal/kg.

Keywords: catalytic cracking, liquid fuel, liquid fuel performance, PS plastic waste, waste cooking oil biodiesel

*Karya ini ku persembahkan kepada
Ayah, ibu, kakak, adik dan ponakan tersayang
Sahabat Goldschmidt, Squad ISA
Serta keluarga qecyl saya dikampus perjuangan*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan baik naskah Tugas Akhir yang berjudul “**PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR HASIL PERENKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK POLISTIRENA (PS) DAN KO-REAKTAN BIODIESEL MINYAK JELANTAH MENGGUNAKAN KATALIS AI-MCM-41/KERAMIK**”. Tulisan ini tidak akan terwujud tanpa bantuan, dukungan, doa serta dorongan semangat dari semua pihak. Untuk itu penulis sangat berterima kasih kepada:

1. Dr. Hendro Juwono, M.Si selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan selama proses penyusunan naskah Skripsi ini.
2. Prof. Dr. Drs. Taslim Ersam, M.S., selaku Dosen Wali yang telah memberikan bimbingan selama berada di Departemen Kimia.
3. Prof. Dr. Didik Prasetyoko, S.Si, M.Sc selaku Kepala Departemen Kimia FS-ITS atas fasilitas yang telah diberikan hingga naskah Skripsi ini dapat terselesaikan.
4. Ayah, Ibu, Kakek, Nenek, Kakak, Adik dan ponakan yang selalu memberikan dukungan agar cepat lulus.
5. Keluarga qecyl, Goldschmidt, Squad ISA yang selalu membantu, memberi semangat, doa dan dukungan.
6. Semua pihak yang telah membantu yang tidak mungkin saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan naskah Kolokium ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk dapat meningkatkan kualitas dan perbaikan lebih lanjut.

Surabaya, Juli 2019
Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Penelitian	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Polistirena.....	7
2.2 Perengkahan	8
2.2.1 Perengkahan Termal.....	8
2.2.2 Perengkahan Katalitik	9
2.3 Minyak Jelantah	10
2.4 Biodiesel.....	11
2.5 Reaksi Pembuatan Biodiesel	12
2.5.1 Esterifikasi.....	13
2.5.2 Transesterifikasi	13
2.6 Katalis Al-MCM-41	14
2.7 Karakterisasi Katalis.....	16
2.7.1 X-Ray Diffraction (XRD)	16
2.7.2 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	17
2.7.3 Adsorpsi – Desorpsi Nitrogen	19
2.7.4 Analisa Keasaman Material Padatan	22
2.8 Metil Tersier Butil Eter (MTBE).....	23
2.9 Karakterisasi Bahan Bakar Cair	23
2.9.1 Densitas	24

2.9.2	Viskositas	24
2.9.3	Titik Nyala.....	24
2.9.4	GC-MS	25
2.9.5	Nilai Kalor	26
2.9	Karakterisasi Performa Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin.....	27
BAB III METODE PENELITIAN		29
3.1	Alat dan Bahan	29
3.1.1	Alat	29
3.1.2	Bahan	29
3.2	Prosedur Penelitian	29
3.2.1	Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah	29
3.2.2	Preparasi Katalis	30
3.2.3	Karakterisasi Katalis.....	30
3.2.3	Sintesis Minyak PS dari Limbah Plastik Polistirena	30
3.2.4	Sintesis Bahan Bakar Cair PS, PS/BMJ, PS/Kat, dan PS/BMJ/Kat	31
3.3	Campuran Bahan Bakar Cair	32
3.4	Karakterisasi Bahan Bakar Cair	33
3.4.1	<i>Gas Chromatograph-Mass Spectrophotometer</i> (GC-MS)..	33
3.4.2	Penentuan Densitas Bahan Bakar Cair	33
3.4.3	Penentuan Titik Nyala Bahan Bakar Cair.....	34
3.4.4	Penentuan Viskositas.....	34
3.4.5	Penentuan Nilai Kalor Bahan Bakar Cair.....	34
3.5	Penentuan Performa Bahan Bakar pada Mesin Gasolin	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		37
4.1	Hasil Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah.....	37
4.2	Karakterisasi Katalis Al-MCM-41/Keramik	39
4.2.1	Hasil Karakterisasi XRD Katalis Al-MCM-41/Keramik ...	39
4.2.2	Hasil Karakterisasi Adsorpsi-Desorpsi N ₂ Katalis Al-MCM-41/Keramik.....	40
4.2.3	Hasil Karakterisasi SEM Katalis Al-MCM-41/Keramik....	41
4.2.4	Hasil Keasaman Katalis Al-MCM-41/Keramik Metode FTIR-Piridin	42
4.3	Sintesis Minyak PS dari Limbah Plastik Polistirena	43
4.4	Sintesis Bahan Bakar Cair PS, PS/Kat, dan PS/BMJ/Kat ..	44

4.5	Distribusi Senyawa Kimia pada Hasil Perengkahan	47
4.6	Efek Katalis dan Waktu Pada Komponen Kimia Hasil Perengkahan	51
4.7	Mekanisme Pembentukan Senyawa Kimia dari Produk Perengkahan Katalitik.....	52
4.8	Karakterisasi Bahan Bakar Cair	54
4.8.1	Densitas Bahan Bakar Cair.....	55
4.8.2	Titik Nyala Bahan Bakar Cair	56
4.8.3	Viskositas Bahan Bakar Cair.....	57
4.8.4	Nilai Kalor Bahan Bakar Cair	58
4.9	Performa Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin.....	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		61
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA.....		63
LAMPIRAN		71
BIODATA PENULIS.....		99

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat fisik polistirena.....	7
Tabel 2.2 Sifat dan komposisi asam lemak bebas dari minyak jelantah	11
Tabel 2.3 Sifat fisik dan kimia biodiesel	12
Tabel 3.1 Jenis campuran bahan bakar cair	33
Tabel 4.1 Data hasil uji adsorpsi-desorpsi N ₂	41
Tabel 4.2 Sifat keasaman dari Al-MCM-41/Keramik	42
Tabel 4.3 Daftar senyawa terdeteksi pada hasil perengkahan	47
Tabel 4.4 Spesifikasi bahan bakar jenis gasolin	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur polistirena	7
Gambar 2.2	Mekanisme degradasi PS secara termal.....	8
Gambar 2.3	Mekanisme dan rute reaksi pembentukan produk utama selama perengkahan katalitik PS	10
Gambar 2.4	Reaksi esterifikasi.....	13
Gambar 2.5	Reaksi transesterifikasi.....	14
Gambar 2.6	Struktur katalis Al-MCM-41	15
Gambar 2.7	Prinsip kerja hukum Bragg's	16
Gambar 2.8	(a) Hasil XRD sudut pendek Al-MCM-41 (b) Hasil XRD sudut lebar Al-MCM-41.....	17
Gambar 2.9	(a) Skema instrument SEM yang disederhanakan, (b) Skema instrumen SEM yang lebih detail.....	18
Gambar 2.10	Hasil Analisa SEM (a) Al-MCM-41 rasio Al/Si (10), (b) Al-MCM-41 rasio Al/Si (20), dan (c) Al-MCM-41 rasio Al/Si (100).....	19
Gambar 2.11	Jenis-jenis kurva isoterm adsorpsi	20
Gambar 2.12	Grafik isoterm adsorpsi Al-MCM-41	21
Gambar 2.13	Absorbansi FTIR Piridin katalis Al-MCM-41.....	22
Gambar 2.14	Instrumen GC-MS	25
Gambar 2.15	Skema pengujian pada mesin gasolin.....	28
Gambar 3.1	Reaktor Perengkahan	31
Gambar 4.1	Rangkaian alat refluks sintesis biodiesel	37
Gambar 4.2	Pemisahan Biodiesel dan Gliserol	38
Gambar 4.3	Hasil biodiesel minyak jelantah.....	38
Gambar 4.4	(a) Difraktogram puncak khas MCM-41, (b) Difraktogram Al-MCM-41/Keramik.....	39
Gambar 4.5	(a) Grafik isoterm Al-MCM-41, (b) Grafik isoterm Al-MCM-41/Keramik.....	40
Gambar 4.6	(a) SEM Al-MCM-41, (b) SEM Al-MCM-41/ Keramik	42
Gambar 4.7	Spektra Piridin-FTIR Al-MCM-41/Keramik.....	43
Gambar 4.8	(a) Limbah PS berupa <i>styrofoam</i> , (b) <i>Styrofoam</i> yang dipadatkan.....	43
Gambar 4.9	Minyak PS	44

Gambar 4.10	Perengkahan PS	45
Gambar 4.11	(a) Katalis Al-MCM-41/Keramik, (b) Pellet katalis Al-MCM-41/Keramik	46
Gambar 4.12	(a) Perengkahan katalitik PS, (b) Perengkahan katalitik PS/BMJ	47
Gambar 4.13	Kromatogram GC-MS PS, PS/Kat60, PS/Kat120, PS/BMJ/Kat60, dan PS/BMJ/Kat120	50
Gambar 4.14	Hasil perengkahan PS, PS/Kat60, PS/Kat120, PS/BMJ/Kat60, dan PS/BMJ/Kat120	52
Gambar 4.15	Reaksi perengkahan polistirena dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah.....	53
Gambar 4.16	Mekanisme pembentuk senyawa α -metilstirena..	54
Gambar 4.17	Densitas Bahan Bakar Cair.....	56
Gambar 4.18	Titik nyala bahan bakar cair	57
Gambar 4.19	Viskositas Bahan Bakar Cair	58
Gambar 4.20	Nilai kalor bahan bakar cair.....	59
Gambar 4.21	<i>Brake Thermal Efficiency</i> (BTE) bahan bakar	60

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	71
A.1 Skema Kerja	71
A.2 Prosedur Kerja	73
A.2.1 Sintesis Minyak Polistirena (PS) dari Limbah Plastik Polistirena	73
A.2.2 Preparasi Katalis	74
A.2.3 Sintesis dan Karakterisasi Bahan Bakar Cair	75
A.2.4 Karakterisasi Campuran Bahan Bakar Cair	76
LAMPIRAN B	77
B.1 Karakterisasi Katalis Al-MCM-41/Keramik	77
B.1.1 Hasil Karakterisasi SEM	77
B.1.2 Hasil Karakterisasi Adsorpsi-Desorpsi N ₂	78
B.1.3 Hasil Karakterisasi XRD	79
B.1.4 Hasil FTIR-Piridin Al-MCM-41/Keramik	80
LAMPIRAN C	81
C.1 Sintesis Minyak Polistirena (PS) dari Limbah Plastik Polistirena	81
C.2 Karakterisasi Bahan Bakar Cair (PS dan PS:ko-reaktan biodiesel minyak jelantah)	81
C.2.1 Hasil Perengkahan Bahan Bakar Cair	81
C.2.2 Karakterisasi Densitas Bahan Bakar Cair	82
C.2.3 Karakterisasi Titik Nyala Bahan Bakar Cair	83
C.2.4 Karakterisasi Viskositas Bahan Bakar Cair	83
C.2.5 Karakterisasi Nilai Kalor Bahan Bakar Cair	84
LAMPIRAN D	85
D.1 Hasil Karakterisasi GC-MS Fraksi Rantai Hidrokarbon dalam Bahan Bakar Cair	85
D.1.1 Perengkahan PS	85
D.2 Perengkahan PS/Kat60	87
D.3 Perengkahan PS/Kat120	89
D.4 Perengkahan PS/BMJ/Kat60	90
D.5 Perengkahan PS/BMJ/Kat120	99
LAMPIRAN E	95

E.1	Data Performa Jenis Bahan Bakar Cair dalam Generator Set Gasolin.....	95
-----	--	----

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi energi terus mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi (Kholidah, 2018). Sumber energi paling banyak dikonsumsi berasal dari bahan bakar fosil seperti bensin (*gasoline*), minyak solar (*diesel oil*), dan minyak tanah (*kerosene*). Namun, bahan bakar fosil merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui dan akan habis (Kimura dkk., 2012).

Kebutuhan bahan bakar minyak (BBM) di Indonesia terus mengalami peningkatan, akan tetapi tidak diimbangi dengan hasil produksi dalam negeri. Pada tahun 2010 total kebutuhan BBM Indonesia mencapai 68,14 juta kL, sedangkan tahun 2011 mengalami peningkatan 4,04% mencapai angka 70,89 juta kL. Berbanding terbalik dengan produksi dalam negeri yang diperkirakan cadangan energi minyak mentah Indonesia akan habis selama 22,99 tahun, batubara 82,01 tahun, dan gas selama 58,95 tahun. Sehingga muncul Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 tentang kebijakan Energi Nasional yang menargetkan penggunaan *biofuel* sebanyak 5% pada tahun 2025 (Kementerian ESDM, 2009).

Biofuel merupakan energi terbarukan yang berasal dari biomassa dan memiliki dampak positif untuk mengurangi efek gas rumah kaca (Reijnders, 2006). Penelitian yang telah dilakukan oleh Rifaldi, 2018, *biofuel* diproduksi dari perengkahan katalitik limbah plastik polipropilena dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah menggunakan katalis Al-MCM-41/Keramik didapatkan produk bahan bakar cair pada fraksi gasolin optimum didapatkan 52,72% pada variasi 60% minyak polipropilena dan 40% biodiesel minyak jelantah. *Biofuel* yang dihasilkan memiliki karakteristik yang mendekati karakteristik bahan bakar minyak berjenis bensin sesuai baku mutu SNI 06-3506-1994. Akan tetapi, *Biofuel* yang dihasilkan tidak terdapat senyawa aromatik. Senyawa aromatik pada bahan bakar sangat dibutuhkan sebagai

bahan anti *knocking*. Gasolin harus memiliki alkana rantai bercabang atau alisiklik atau aromatik dibandingkan dengan alkana rantai lurus agar berkualitas baik, sehingga diperlukan alternatif bahan baku yang memiliki gugus aromatik (Irdoni dan Melyna, 2013). Salah satu limbah plastik yang memiliki gugus aromatik adalah limbah plastik polistirena (PS).

Sampah plastik memiliki banyak jenis, salah satu yang sering dijumpai adalah polistirena (PS) yang dimanfaatkan sebagai pembungkus makanan dari *styrofoam*. Polistirena merupakan polimer yang tersusun dari monomer stirena yang memiliki gugus aromatik yaitu benzena. Keberadaan limbah PS sangat berbahaya bagi lingkungan. Selain itu, PS memiliki nilai kalor sebesar 41,4 MJ/kg sehingga dapat diolah menjadi pengganti bahan bakar fosil konvensional (Das dan Pande, 2007).

Konversi PS menjadi bahan bakar minyak dapat dilakukan dengan proses pengolahan seperti gasifikasi, *hydrocracking*, dan perengkahan. Perengkahan merupakan metode konversi yang mendapat perhatian karena dilihat dari sisi ekonomi yang tidak memerlukan biaya tinggi dan sederhana (Reijnders, 2006). Perengkahan katalitik adalah salah satu proses perengkahan yang efektif dan efisien. Diantara semua katalis, katalis MCM-41 termodifikasi sangat menarik karena efektif dalam proses perengkahan (Ratnasari dkk., 2017). Katalis MCM-41 merupakan katalis memiliki beberapa sisi asam dan termasuk material mesopori dengan bentuk heksagonal yang seragam dan memiliki area permukaan yang lebar (Juwono dkk., 2017). Impregnasi logam Al ke dalam MCM-41 meningkatkan jumlah dari sisi asam menyebabkan MCM-41 sebagai katalis yang berpotensi untuk perengkahan katalitik (Rifaldi, 2018).

Saat ini, perengkahan plastik dan ko-reaktan biomassa telah mendapatkan banyak perhatian dalam berbagai literatur. Hal tersebut dikarenakan perengkahan plastik dan ko-reaktan biomassa dapat meningkatkan kualitas yang lebih baik pada bahan bakar cair yang dihasilkan (Paradela dkk., 2009). Salah satu biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar cair adalah minyak jelantah. *Pretreatment* biomassa sebelum perengkahan telah diidentifikasi sebagai salah satu cara yang

paling efisien untuk meningkatkan kualitas dari minyak hasil perengkahan (Meng dkk., 2012). Salah satu metode *pretreatment* yang dapat dilakukan yaitu proses transesterifikasi yang dapat mengubah minyak jelantah menjadi metil ester atau biodiesel minyak jelantah. Biodiesel minyak jelantah dapat menjadi sumber hidrokarbon untuk minyak hasil perengkahan yang membuatnya mendekati karakteristik gasolin (Alfian, 2018).

Gasolin adalah salah satu fraksi hidrokarbon yang digunakan sebagai bahan bakar minyak untuk transportasi. Performa gasolin pada mesin kendaraan dapat ditingkatkan dengan menambahkan senyawa teroksigenasi. Senyawa teroksigenasi memiliki beberapa keuntungan diantaranya: mengurangi emisi gas buang dan ketukan dalam mesin, meningkatkan bilangan oktan, dan emisi senyawa organik yang volatil (Soheil dkk., 2012).

Salah satu senyawa teroksigenasi yang dapat digunakan yaitu Metil Tersier Butil Eter (MTBE). MTBE adalah salah satu dari senyawa teroksigenasi yang dapat ditambahkan pada gasolin. Alasan penambahan MTBE dikarenakan rasio bahan bakar dari MTBE sama dengan gasolin serta panas penguapannya yang mendekati nilai dari kalor penguapan gasolin. Penambahan MTBE akan meningkatkan nilai oktan dari gasolin karena MTBE memiliki nilai oktan yang tinggi. Dalam memperoleh performa mesin yang tinggi diperlukan bahan bakar dengan nilai oktan yang tinggi (Topgul, 2015).

Pada penelitian ini dilakukan perengkahan pada polistirena (PS) dan polistirena/biodiesel minyak jelantah (PS/BMJ) dengan dan tanpa katalis Al-MCM-41/Keramik untuk menghasilkan berbagai macam hidrokarbon. Hasil perengkahan ditambahkan dalam premium dan aditif berupa MTBE untuk meningkatkan performa pada mesin *generator set* gasolin.

1.2 Rumusan Masalah

Kebutuhan akan bahan bakar minyak di Indonesia terus meningkat, berbanding terbalik dengan ketersediaan bahan bakar minyak yang mengalami penurunan, sementara limbah plastik terus meningkat. Perengkahan katalitik limbah plastik jenis polipropilena dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah menjadi

bahan bakar cair adalah salah satu cara untuk mengatasi ketersediaan bahan bakar (Rifaldi,2018). Hasil dari perengkahan katalitik tersebut tidak menghasilkan senyawa aromatik. Senyawa aromatik sangat dibutuhkan untuk bahan bakar sebagai bahan anti *knocking*. Polistirena merupakan salah satu jenis dari plastik yang sering dijumpai berupa *styrofoam* yang tersusun dari monomer stirena yang mengandung gugus aromatik. Ko-reaktan biodiesel minyak jelantah dan Al-MCM-41/Keramik ditambahkan dalam perengkahan. Oleh sebab itu, bagaimana mendapatkan bahan bakar cair dengan persentase senyawa aromatik yang lebih besar. Penelitian ini digunakan limbah plastik PS, ko-reaktan biodiesel minyak jelantah dan katalis Al-MCM-41/Keramik diteliti untuk menghasilkan bahan bakar cair tinggi senyawa aromatik. Hasil perengkahan katalitik kemudian diteliti performa pada mesin *generator set* gasolin.

1.3 Batasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada limbah plastik polistirena (PS), menggunakan katalis Al-MCM-41/Keramik untuk menghasilkan fraksi hidrokarbon. Jumlah katalis yang digunakan sebesar 9 gram (0,9% b/v) dan suhu perengkahan 300°C. Efek dari katalis, waktu perengkahan katalitik, dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah pada hasil perengkahan katalitik diteliti. Bahan bakar cair hasil perengkahan setiap variasi (waktu 60 dan 120 menit) diuji GC-MS untuk menentukan komponen kimia. Hasil perengkan selanjutnya ditambahkan ke dalam premium dan MTBE dan dilakukan uji performa pada mesin *generator set* gasolin.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memproduksi bahan bakar cair hasil perengkahan katalitik dari limbah plastik polistirena dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah yang sesuai dengan karakterisasi SNI 06-3506-1994 bahan bakar cair gasolin, pengaruh waktu perengkahan terhadap fraksi senyawa hidrokarbon, serta performa bahan bakar cair tersebut terhadap efisiensi termal pada mesin *generator set* gasolin.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

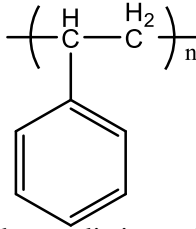
1. Memberikan kontribusi untuk pengembangan bidang perengkahan energi khususnya bahan bakar cair alternatif.
2. Memberikan kontribusi dalam hal pemanfaatan limbah plastik khususnya polistirena dan minyak jelantah sebagai usaha diversifikasi sumber energi.
3. Mendukung terwujudnya program *green industry* dan *green technology*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polistirena

Polistirena terdiri dari banyak monomer stirena yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur polistirena (Billmayer, 1984)

Polistirena merupakan polimer termoplastik dengan banyak sifat yang dapat diinginkan. Polistirena memiliki sifat mekanik dan termal yang cukup baik, tetapi sedikit rapuh dan melunak di bawah suhu 100°C (Billmayer, 1984). Beberapa sifat fisik dari polistirena dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat fisik polistirena

Sifat	Nilai
Densitas	1050 kg/m ³
Konduktivitas elektrik	10-16 S/m
Konduktivitas termal	0,08 W/(m K)
Modulus Young	3000-3600 MPa
Kuat tarik	46-60 MPa
Titik leleh	240°C
<i>Glass temperature</i>	95°C
<i>Heat transfer coefficient</i>	0,17 W/(m ² K)
<i>Specific heat</i>	1,3 kJ/(kg K)
Dekomposisi	X years

(Billmayer, 1984)

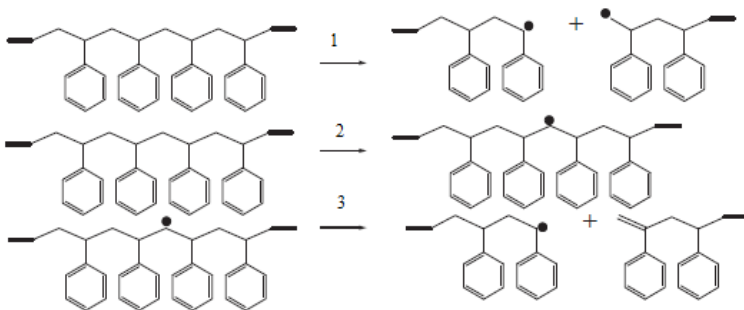
Polistirena sebagian besar dibuat melalui polimerisasi suspensi atau polimerisasi dalam jumlah besar. Polistirena terdegradasi pada temperatur tinggi menjadi campuran senyawa dengan berat molekul rendah sekitar setengahnya yang merupakan stirena. Polistirena relatif inert secara kimiawi seperti kebanyakan polimer (Billmeyer, 1984).

2.2 Perengkahan

Perengkahan atau *cracking* merupakan suatu proses memecah rantai karbon panjang (polimer) menjadi senyawa dengan berat molekul yang lebih ringan. Salah satu pemanfaatan proses perengkahan adalah mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar (Surono, 2013). Beberapa jenis proses perengkahan dalam pembuatan bahan bakar, salah satunya yaitu perengkahan termal dan perengkahan katalitik (Kholidah, 2018).

2.2.1 Perengkahan Termal

Perengkahan termal yaitu memanaskan suatu polimer berantai panjang tanpa adanya oksigen. Temperatur pemanasan yang digunakan pada proses ini berkisar antara 250°C hingga 900°C (Surono, 2013).



Gambar 2.2 Mekanisme degradasi PS secara termal (Ordenez dkk., 2016)

Perengkahan termal pada PS ditunjukkan pada Gambar 2.2, menyebabkan reaksi pemotongan rantai panjang membentuk radikal (1). Pemotongan ikatan hidrokarbon untuk menghasilkan radikal intermediet (2) diikuti oleh pemotongan β , olefin dan radikal baru (3) juga dimungkinkan (Ordenez dkk., 2016).

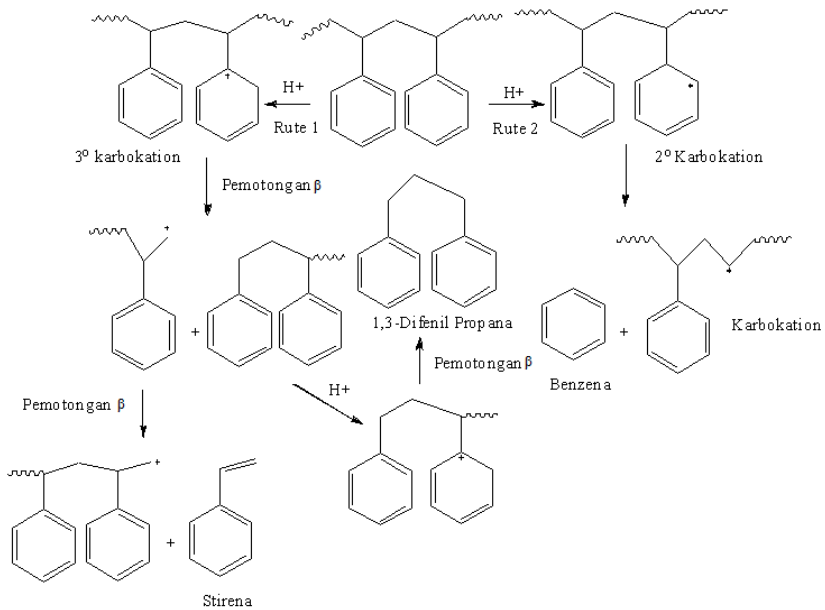
2.2.2 Perengkahan Katalitik

Perengkahan katalitik adalah suatu reaksi yang melibatkan katalis dalam pemutusan senyawa karbon rantai panjang menjadi lebih pendek atau molekul yang lebih sederhana (Sundaryono dkk., 2018). Perengkahan katalitik memerlukan panas (termal) yang dimodifikasi dengan penambahan katalis (Andarini dan Setyawan, 2009). Termal berguna sebagai energi terjadinya ikatan antara reaktan dengan katalis (Nugrahaningtyas dkk., 2015). Katalis yang umum digunakan merupakan katalis heterogen sebagai material yang dapat mempercepat laju reaksi untuk mencapai kesetimbangan dan mendapatkan produk akhir reaksi melalui mekanisme pembentukan karbonium (Sihombing dkk., 2017).

Ringkasan jalur reaksi utama yang terlibat dalam pembentukan berbagai produk selama perengkahan katalitik PS dapat disajikan dalam Gambar 2.3. Langkah pertama dalam pembentukan produk adalah protonasi rantai PS oleh proton asam yang terdapat pada katalis. Proton asam dapat menyerang gugus rantai fenil dalam posisi 1 atau 2 sesuai rute. Protonasi pada rute 2 menghasilkan pembentukan karbokation sekunder. Namun, protonasi pada rute 1 mengarah pada pembentukan karbokation tersier yang lebih stabil.

Karbokation tersier yang dihasilkan oleh rute 1 mengalami pemutusan untuk membentuk karbokation primer rantai akhir dan rantai polimer yang stabil dengan gugus akhir benzil. Karboksi rantai akhir selanjutnya dapat mengalami pemutusan β untuk membentuk stirena. Pergeseran proton intramolekuler dalam karbokation primer rantai akhir menghasilkan pembentukan kation benzil, yang selanjutnya mengalami pemutusan β untuk membentuk α -metil stirena dan radikal benzil rantai akhir. Jalur

pembentukan toluena dan etil benzena melibatkan protonasi gugus fenil rantai PS (Ojha dan Vinu, 2015).



Gambar 2.3 Mekanisme dan rute reaksi pembentukan produk utama selama perengkahan katalitik PS (Ojha dan Vinu, 2015)

2.3 Minyak Jelantah

Minyak goreng merupakan salah satu kebutuhan pokok yang sering digunakan baik dalam skala rumah tangga ataupun skala industri. Hal tersebut menyebabkan konsumsi minyak goreng tiap tahunnya meningkat. Peningkatan konsumsi minyak goreng memiliki dampak negatif berupa minyak goreng bekas yang apabila tidak diolah akan menjadi limbah yang dapat mencemari lingkungan (Hajar dan Mufidah, 2016). Sifat dan komposisi dari minyak jelantah dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Minyak goreng bekas atau minyak jelantah adalah minyak goreng yang digunakan berulang kali pada temperatur tinggi dan akan mengalami penurunan kualitas yang ditandai dengan

perubahan warna dan aroma menjadi gelap serta kurang enak. Selain itu, minyak jelantah akan menurunkan nilai gizi makanan karena kadar asam lemak dan bilangan peroksida yang tinggi (Rahayu dan Purnavita, 2014). Proses penggorengan menyebabkan sebagian ikatan rangkap akan menjadi jenuh (Ramdja, Febrina, dan Krisdianto, 2010).

Tabel 2.2 Sifat dan komposisi asam lemak bebas dari minyak jelantah

Sifat	Minyak Segar	Minyak Jelantah
Bilangan penyabunan (mg KOH/g)	-	201,5
Bilangan asam (mg KOH/g)	0,5	1,9
%FFA (%)	0,3	1
%Kandungan air (%)	0,1	2,6
Densitas pada 15°C (g/cm ³)	892	902
Warna	Kuning terang	Kuning gelap
Komposisi %FFA Massa		
Oleat (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	43,9	43,2
Linoleat (C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	30,4	30,1
Palmitat (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	20,3	19,4
Linolenat (C ₁₈ H ₃₀ O ₂)	4,8	4,7
Stearat (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	2,9	2,6
Rata-rata massa molar	993,5	989,3

(Maneering dkk., 2016)

2.4 Biodiesel

Bahan bakar yang berupa metil ester asam lemak diperoleh melalui reaksi kimia antara minyak nabati dan alkohol dapat disebut biodiesel. Molekul metil ester adalah rantai karbon lurus yang sama dengan bahan bakar diesel dari minyak bumi. Bahan bakar diesel yang umum digunakan yaitu hidrokarbon rantai lurus (*hetadecene* (C₁₆H₃₄)) dan *alpha-methylnaphthalene* (Darmanto dan Sigit, 2006).

Minyak nabati sebagai bahan dasar biodiesel dapat berupa minyak kedelai, minyak kelapa, minyak kelapa sawit dan minyak dari biji-bijian lainnya. Biodiesel memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan bahan bakar diesel berbasis petroleum. Biodiesel dapat mengurangi senyawa karsinogenik, meningkatkan

pelumasan pada mesin, dan mengurangi emisi gas beracun seperti CO, HC, NO_x, SO_x, CO₂ (Sudradjat dkk., 2010). Selain itu, biodiesel memiliki angka setana yang lebih tinggi, menghasilkan lebih sedikit asap dan partikulat, *biodegradable*, tidak beracun, dan dapat diperbarui (Supardan, 2011). Beberapa sifat fisik dan kimia biodiesel terdapat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat fisik dan kimia biodiesel (Santoso dkk., 2013)

Sifat	ASTM D6751
Titik nyala	Minimal 403 K
Air dan sedimen	Maksimal 0,050 % vol
Viskositas kinematik (313 K)	1,9-6,0 mm ² /s
Massa jenis	0,860-0,900 g/mL
Abu sulfat	Maksimal 0,02 % massa
Abu	-
Sulfur	Maksimal 0,05 % massa
Korosi pada tembaga	Maksimal no. 3
Bilangan setana	Minimal 47
Residu karbon	Maksimal 0,05 % massa

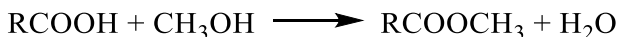
Bahan bakar motor diesel yang baik adalah jenis bahan bakar yang dapat segera terbakar sendiri. Biodiesel dibuat sebagai alternatif energi karena produksi bahan bakar minyak (BBM) mengalami penurunan sebaliknya konsumsi bahan bakar minyak mengalami kenaikan. Adanya biodiesel diharapkan dapat mengurangi ketergantungan terhadap BBM (Sudradjat dkk., 2010).

2.5 Reaksi Pembuatan Biodiesel

Biodiesel dibuat dengan mereaksikan minyak atau lemak dengan alkohol untuk memutuskan tiga rantai gugus ester dari trigliserida menjadi metil ester dan gliserol. Biodiesel dibuat dengan bantuan katalis asam ataupun basa. Pembuatan biodiesel melalui beberapa tahap reaksi yaitu esterifikasi dan transesterifikasi. (Handayani, 2010).

2.5.1 Esterifikasi

Asam karboksilat yang bereaksi dengan alkohol dan membentuk ester merupakan reaksi esterifikasi. Ester asam karboksilat adalah senyawa yang mengandung gugus $-\text{CO}_2\text{R}$, dengan R berupa alkil (Arita dkk., 2008). Dalam reaksi esterifikasi digunakan asam kuat seperti asam sulfat (*sulphuric acid*) dan asam klorida (*chloride acid*) sebagai katalis (Paendong dan Tangkuman, 2010).



Gambar 2.4 Reaksi esterifikasi (Fatmawati dan Shakti 2013)

Reaksi esterifikasi berkatalis asam ditunjukkan pada Gambar 2.4 dilakukan karena minyak yang digunakan memiliki kadar *Free Fatty Acid* (FFA) atau asam lemak bebas yang tinggi (bilangan asam ≥ 5 mgKOH/g). Jadi, dengan esterifikasi kadar FFA akan berkurang dan dapat diperengkahkan menghasilkan ester. Reaksi esterifikasi antara asam lemak dengan metanol menjadi metil ester sebagai berikut (Fatmawati dan Shakti, 2013):

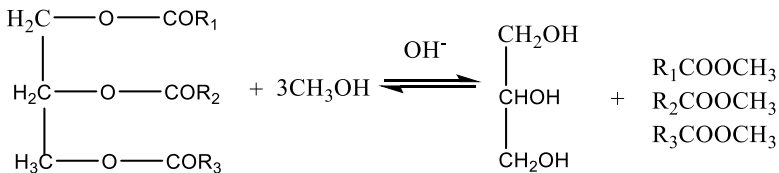
2.5.2 Transesterifikasi

Tahap perengkahan trigliserida dari minyak nabati menjadi produk alkil ester, melalui reaksi dengan alkohol dengan produk samping berupa gliserol merupakan reaksi transesterifikasi. Umumnya alkohol yang digunakan berupa metanol, karena reaktifitas paling tinggi (Handayani, 2010). Reaksi transesterifikasi disebut juga dengan proses esterifikasi alkalin. Pada proses transesterifikasi digunakan katalis alkalin atau katalis basa seperti Sodium Hidroksida (NaOH) atau Kalium Hidroksida (KOH) (Paendong dan Tangkuman, 2010).

Bahan baku minyak nabati yang akan diproses transesterifikasi harus memiliki kadar asam lemak bebas yang kecil ($< 2\%$). Kadar asam lemak bebas yang kecil bertujuan untuk menghindari pembentukan sabun. Hasil dari transesterifikasi berupa metil ester dilapisan atas dan gliserol di lapisan bawah (Arita dkk., 2008).

Transesterifikasi dapat menghasilkan biodiesel dengan rendemen 95% dari bahan baku (Paendong dan Tangkuman, 2010). Akan tetapi hal tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: waktu, temperatur, rasio molar katalis dengan minyak, kadar asam lemak bebas (FFA), kecepatan pengadukan, dan rasio molar metanol dengan minyak.

Reaksi transesterifikasi trigliserida dengan metanol dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5 sebagai berikut :



Gambar 2.5 Reaksi transesterifikasi (Arita dkk., 2008)

2.6 Katalis Al-MCM-41

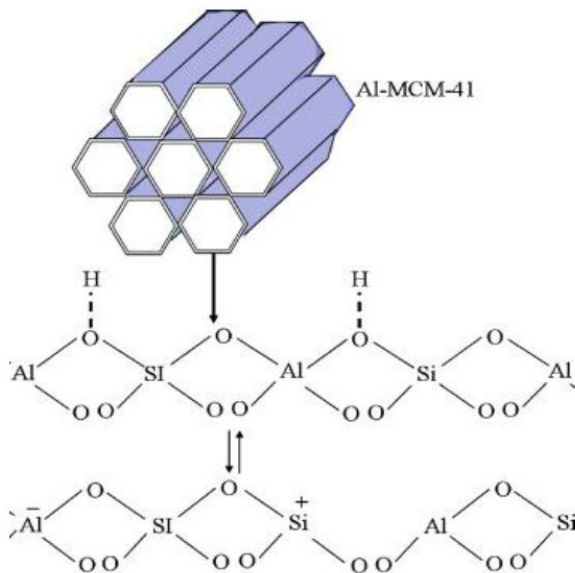
Katalis Al-MCM-41 merupakan katalis dengan sifat asam lewis dengan material silika mesopori MCM-41 sebagai cetakan. MCM-41 adalah padatan mesopori yang tersusun atas silika amorf dan termasuk dalam keluarga silika mesopori M41S. Selain itu, MCM-41 memiliki lebar pori 2-10 nanometer dengan luas permukaan kurang lebih 1000 m²/g, memiliki sifat yang baik sebagai template atau katalis karena ketahanan termal yang baik, serta memiliki struktur heksagonal yang seragam dan teratur dengan bentuk pori heksagonal menyerupai sarang lebah (Gibson, 2014).

Katalis MCM-41 dapat digunakan sebagai adsorpsi, pemisahan senyawa, dan perengkahan bahan bakar. Katalis MCM-41 memiliki sisi aktif asam yang sedikit, menyebabkan aktivitas katalis menjadi rendah. Dalam mengatasi masalah tersebut, banyak peneliti yang menambahkan kation logam seperti logam aluminium untuk meningkatkan sisi asam katalis (Antonakou dkk., 2006).

Beberapa peneliti menambahkan logam aluminium untuk meningkatkan keasaman katalis dengan terbentuk *framework* Al-MCM-41. Al-MCM-41 memiliki luas permukaan 877 m²/g dan

ukuran pori $0,78 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Naik dkk., 2010). Al-MCM-41 memiliki kerangka aluminium silikat yang cocok dalam reaksi organik dan perengkahan dengan senyawa hidrokarbon rantai panjang karena strukturnya yang amorf serta memiliki sisi aktif asam dengan luas permukaan yang besar. Struktur katalis Al-MCM-41 dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Penelitian yang dilakukan oleh Araujo dkk (2007) melakukan produksi bahan bakar cair dari minyak bunga matahari melalui metode perengkahan termal dan katalitik dengan katalis Al-MCM-41. Al-MCM-41 dibuat dengan metode hidrotermal dan didapatkan luas permukaan $857,7 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan rasio Si/Al sebesar 50. Minyak hasil perengkahan katalitik dari bunga matahari memiliki karakteristik yang sama dengan bahan bakar diesel.



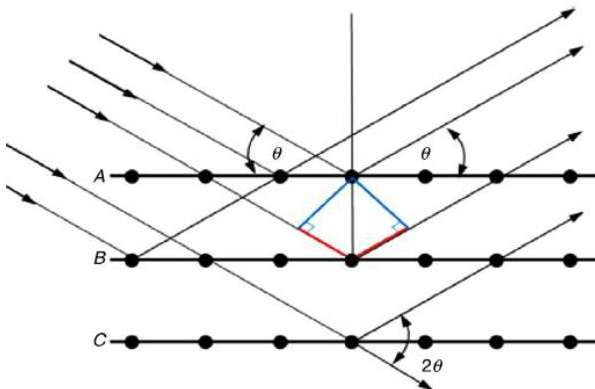
Gambar 2.6 Struktur katalis Al-MCM-41 (Naik dkk., 2010)

2.7 Karakterisasi Katalis

2.7.1 XRD

Difraksi Sinar-X atau XRD adalah metode analisa yang memanfaatkan interaksi antara sinar-x dengan atom yang tersusun dalam sebuah sistem kristal. Analisa XRD digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan senyawa dengan cara mengamati pola pembiasan cahaya akibat dari berkas cahaya yang dibiaskan oleh material (Setiabudi dkk., 2012).

Prinsip kerja XRD, secara sederhana dapat dijelaskan sebagai berikut. Senyawa tersusun atas atom-atom yang membentuk bidang tertentu. Jika sebuah bidang memiliki bentuk tertentu, maka partikel cahaya atau foton yang datang dengan sudut tertentu akan menghasilkan pola pantulan atau pembiasan yang khas. Pola difraksi yang khas dijadikan sebagai landasan dalam analisa kualitatif untuk membedakan senyawa satu dengan lainnya. Pola difraksi pada XRD dinyatakan sebagai besar sudut yang terbentuk dari hasil difraksi berkas cahaya oleh kristal pada material. Nilai sudut dinyatakan dalam 2θ , dimana θ merupakan sudut datang cahaya. Nilai 2θ merupakan besar sudut datang dengan sudut difraksi yang terdeteksi. Prinsip kerja XRD dapat ditinjau pada Gambar 2.7 (Setiabudi dkk., 2012).



Gambar 2.7 Prinsip kerja hukum Bragg's (Setiabudi dkk., 2012)

Hukum Bragg adalah perumusan matematik mengenai proses difraksi yang terjadi. Perumusan hukum Bragg dapat didefinisikan sebagai berikut:

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

Keterangan:

n = orde bias (0,1,2,3,...)

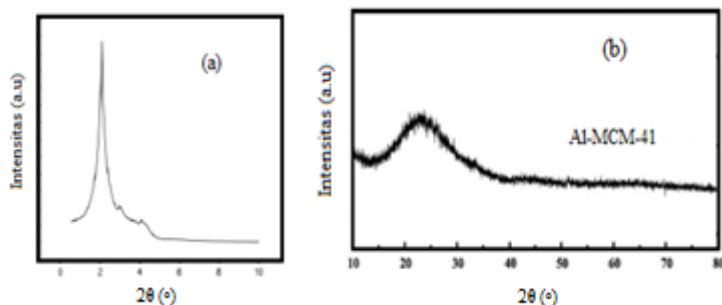
λ = panjang gelombang sinar-X (nm)

d = jarak antara dua bidang kisi (cm)

θ = sudut antara sinar datang dengan bidang normal

Al-MCM-41 memiliki puncak khas pada difraktogram XRD sudut 2θ dengan rentang $1-6^\circ$ dan intensitas sedang sampai tinggi. Intensitas pada sudut $2,23^\circ$ menunjukkan padatan pada bidang (100), serta tiga bidang lainnya antara sudut $4-6^\circ$ yang merefleksikan bidang (110), (200), dan (210) merupakan karakteristik padatan mesopori heksagonal (Zhang dkk., 2016).

Pada Gambar 2.8 (a), menunjukkan pola difraksi sudut pendek Al-MCM-41. Terdapat tiga puncak difraksi yang berbeda (100), (110), dan (200) yang merupakan karakteristik sudut khas dari katalis Al-MCM-41 ($2\theta = 1-5^\circ$) serta puncak Al dengan intensitas yang sangat rendah pada $2\theta = 20^\circ$ (Juwono dkk., 2017).



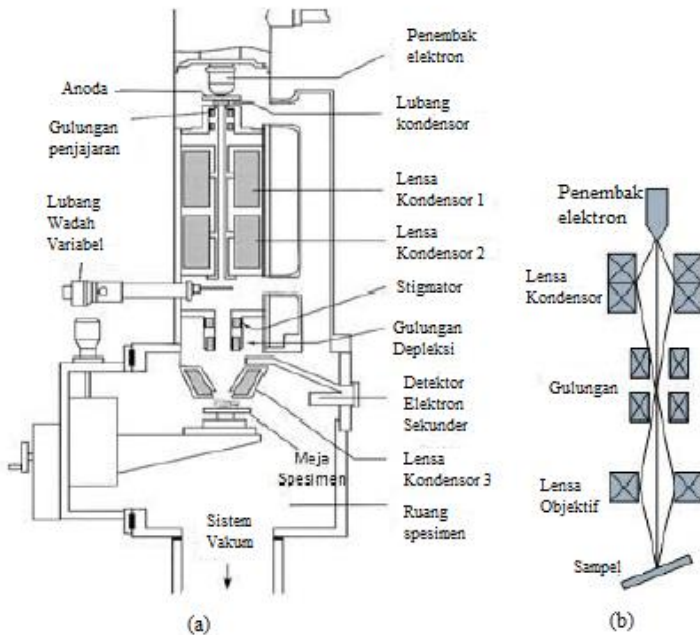
Gambar 2.8 (a) Hasil XRD sudut pendek Al-MCM-41 (b) Hasil XRD sudut lebar Al-MCM-41 (Zhang dkk., 2016)

2.7.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Pada *Scanning Electron Microscopy* (SEM), berkas elektron ditembakkan pada permukaan sampel, sedangkan

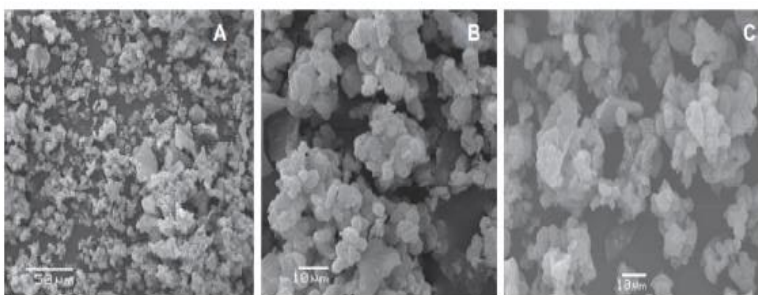
Gambaranya diperoleh berdasarkan hasil deteksi elektron dihamburkan atau berdasarkan elektron sekunder. Elektron yang dihamburkan berasal dari bagian sampel yang lebih dalam serta memberikan informasi mengenai komposisi sampel karena elektron yang lebih berat menghamburkan secara lebih kuat dan tampak lebih terang pada Gambar yang dihasilkan. Elektron sekunder berasal dari permukaan sampel dan memiliki energi yang rendah sekitar 5-50 eV (Setiabudi dkk., 2012).

Secara skematis instrumen SEM dapat ditunjukkan pada Gambar 2.9. Pengoperasian SEM dilakukan dalam keadaan vakum (10^{-6} bar) sehingga elektron hanya berinteraksi dengan sampel yang diteliti.



Gambar 2.9 (a) Skema instrumen SEM yang disederhanakan, (b) Skema instrumen SEM yang lebih detail (Setiabudi dkk., 2012)

Katalis Al-MCM-41 berhasil disintesis dengan struktur berukuran nanomaterial sebagai katalis penataan ulang senyawa *cyclohexanone oxime* terhadap *caprolactan*. Al-MCM-41 merupakan katalis mesopori yang disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan variasi penambahan Al. Analisa morfologi Al-MCM-41 menggunakan SEM yang diketahui morfologi dominan berbentuk sferikal atau hexagonal (Vaschetto dkk., 2014). Bentuk morfologi Al-MCM-41 dengan beberapa rasio Al/Si dapat ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Hasil Analisa SEM (a) Al-MCM-41 rasio Al/Si (10), (b) Al-MCM-41 rasio Al/Si (20), dan (c) Al-MCM-41 rasio Al/Si (100) (Vaschetto dkk. 2014)

2.7.3 Adsorpsi – Desorpsi Nitrogen

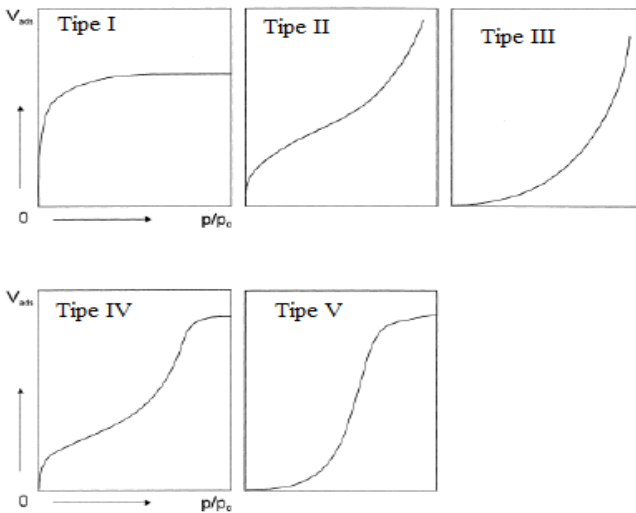
Adsorpsi nitrogen adalah adsorpsi fisik yang bertujuan untuk menentukan luas permukaan dan distribusi ukuran pori dari suatu material padatan (Haber dkk., 1995). Luas permukaan (*Surface area*) adalah parameter penting yang berkaitan dengan permukaan katalis. Luas permukaan total untuk katalis padat sangat penting dalam menentukan jumlah situs aktif di dalam katalis yang berkaitan dengan aktifitas katalis. Perumusan untuk menyatakan isoterm keseimbangan dalam adsorpsi adalah model Brunauer, Emmett, Teller yang dikenal dengan persamaan BET:

$$\frac{v}{V_M} = \frac{cp}{[p_0 - p] \cdot [1 + (c-1)p/p_0]} \quad (2.2)$$

Dalam persamaan (2.2) V_M adalah volume lapis tunggal, dan c adalah panas adsorpsi dan pencairan yang konstan. Persamaan (2.2) valid hanya untuk $p/p_0 \leq 0,3$, lebih dari nilai tersebut kondensasi cairan terjadi di mikropori hingga mesopori (p/p_0 mendekati satu). Pengukuran luas permukaan biasanya menggunakan gas nitrogen sebagai adsorbatnya. Persamaan (2.2) dapat diubah sehingga dapat dibuat plot antara p/p_0 vs $p/[V(p-p_0)]$, pada akhirnya V_M dan luas permukaan dapat ditentukan (Adamson, 1994).

$$\frac{p}{V(p_0-p)} = \frac{1}{V_M \cdot c} + \frac{(c-1)}{V_M \cdot c} (p/p_0) \quad (2.3)$$

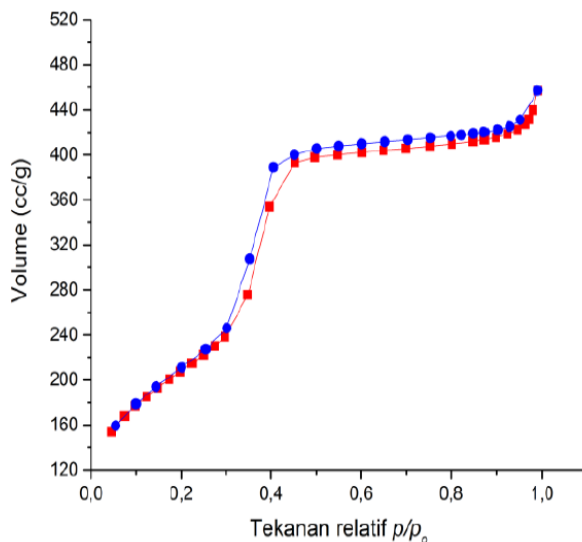
Distribusi ukuran pori (*pore size distribution*) merupakan parameter penting karakterisasi katalis. Sifat-sifat pori seperti distribusi ukuran pori dan volume pori sangat penting untuk katalis yang bersifat selektif terhadap bentuk dan ukuran pori (*shape selective catalysis*).



Gambar 2.11 Jenis-jenis kurva isoterm adsorpsi (Setiabudi dkk., 2012)

Metode penyerapan gas digunakan untuk mengkarakterisasi material berpori dengan ukuran mesopori (diameter 2-50 nm) dan mikropori (diameter <2 nm). Kurva isoterm yang diperoleh dari penyerapan gas secara fisik dapat menjelaskan jenis porositas dalam katalis. Pada Gambar 2.11 menunjukkan lima jenis kurva isoterm. Kurva isoterm tipe I mendefinisikan jenis atau ukuran mikropori seperti zeolite, SiO₂, dan karbon. Kurva isoterm tipe IV menjelaskan ukuran atau jenis mesopori seperti MCM-41 (Adamson, 1994).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Juwono dkk (2017) telah melakukan sintesis Al-MCM-41 dengan memasukkan logam Al dalam silika mesopori MCM-41. Logam Al menempati pori heksagonal MCM-41. Grafik isoterm adsorpsi Al-MCM-41 ditunjukkan pada Gambar 2.12, mengikuti grafik isoterm tipe IV.

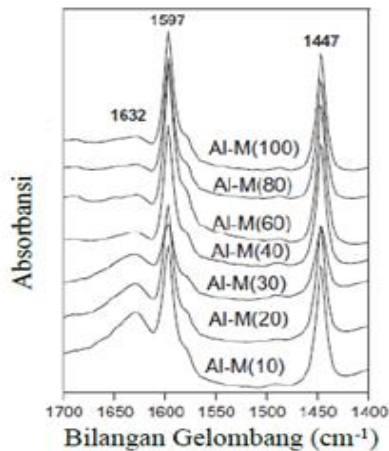


Gambar 2.12 Grafik isoterm adsorpsi Al-MCM-41 (Juwono dkk. 2017)

2.7.4 Analisa Keasaman Material Padatan

Sifat keasaman suatu padatan katalis sangat berpengaruh pada berbagai transformasi senyawa organik. Sisi asam adalah sisi dimana senyawa bersifat basa akan teradsorpsi secara kimia. Dalam proses katalisis, padatan sebagai asam Bronsted (donor proton) dan padatan sebagai asam lewis (akseptor elektron).

Keasaman permukaan katalis dapat menggunakan metode *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dengan senyawa piridin sebagai basa. Penentuan keasaman dilakukan dengan menekan sampel padatan yang diletakkan pada pemegang sampel dan dimasukkan dalam kaca yang terbuat dari pirez mempunyai jendela terbuat dari kalsium florida (CaF_2). Selanjutnya sel kaca dipanaskan pada suhu 400°C selama 4 jam (Prasetyoko dkk., 2016).



Gambar 2.13 Absorbansi FTIR Piridin katalis Al-MCM-41 (Vaschetto dkk. 2014)

Interaksi antara molekul piridin dengan sisi asam Bronsted pada permukaan akan memunculkan pita serapan pada daerah bilangan gelombang $1540\text{-}1545\text{ cm}^{-1}$. Interaksi antara molekul piridin dengan sisi asam Lewis memunculkan pita serapan bilangan gelombang $1440\text{-}1452\text{ cm}^{-1}$ (Prasetyoko dkk., 2016).

Vascheto dkk (2014) melaporkan katalis Al-MCM-41 memiliki dua macam sisi aktif yaitu asam Lewis pada bilangan gelombang 1477 cm^{-1} dari aluminium oksida yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.

2.8 Metil Tersier Butil Eter (MTBE)

Metil Tersier Butil Eter atau biasa disebut MTBE merupakan senyawa hidrokarbon dengan gugus eter yang memiliki rumus molekul $\text{CH}_3\text{OC}(\text{CH}_3)_3$. MTBE memiliki nilai oktan yang relatif tinggi yaitu 116-118 (Taniguchi dan Johnson, 1979), menyebabkan bahan ini sering digunakan sebagai zat aditif bahan bakar gasolin. Selain berfungsi sebagai zat aditif, MTBE dapat digunakan sebagai anti *knocking* dan mengurangi polusi udara akibat reaksi pembakaran yang lebih sempurna (Pecci dan Floris, 1977).

MTBE memiliki berat jenis sebesar 0,7405 setara dengan bensin yang berkisar antara 0,72-0,76. Sifat fisik lain MTBE adalah titik didih sebesar $55,2^\circ\text{C}$ dapat mempengaruhi kurva distilasi bensin yang berhubungan dengan kemudahan penyalaan motor (Taniguchi dan Johnson 1979). Pemanfaatan MTBE sebagai zat aditif bahan bakar telah lama digunakan. Sejak tahun 1979 di Amerika Serikat penggunaan MTBE di izinkan dengan kadar maksimum 7% volume.

2.9 Karakterisasi Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair adalah gabungan dari senyawa hidrokarbon yang dapat berasal dari alam maupun buatan. Suatu materi yang dapat diubah menjadi energi disebut sebagai bahan bakar. Pada umumnya bahan bakar memiliki energi panas yang dapat dilepaskan ataupun dimanipulasikan (Sutanto dkk., 2013).

Bahan bakar cair yang dimanfaatkan saat ini banyak berasal dari minyak bumi. Minyak bumi adalah materi alami hidrokarbon cair yang memiliki sedikit belerang, oksigen, nitrogen, metal, dan mineral. Bahan bakar cair merupakan sumber energi yang mudah ditangani, mudah disimpan, serta nilai kalor pembakaran yang konstan. Bahan bakar cair dapat dikatakan baik jika memenuhi

karakterisai uji fisik maupun kimia meliputi titik nyala, densitas, viskositas, nilai kalor dan lain-lain (Wiratmaja, 2010).

2.9.1 Densitas

Densitas atau massa jenis merupakan salah satu sifat fisik dari bahan bakar cair. Densitas merupakan suatu indikator banyaknya zat-zat pengotor hasil reaksi. Densitas berpengaruh dengan jumlah bahan bakar yang dapat diinjeksikan dalam sistem injeksi yang menyebabkan sistem pembakaran berjalan baik. Pengukuran densitas bahan bakar sangat penting dilakukan karena digunakan sebagai acuan desain pipa semprot yang memengaruhi operasional mesin kedepannya. Nilai densitas bahan bakar harus sesuai dengan standar yang ditentukan karena densitas yang terlalu besar akan mempengaruhi viskositas dan berdampak pada keausan hingga kerusakan mesin (Sakthivela dkk., 2018).

2.9.2 Viskositas

Viskositas atau kekentalan merupakan salah satu karakteristik bahan bakar cair yang sangat penting saat proses pembakaran, khususnya pada proses pengabutan. Viskositas adalah gesekan internal fluida yaitu tahanan mengalir dari suatu sistem yang mendapatkan tekanan. 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).

2.9.3 Titik Nyala

Titik nyala merupakan suhu terendah dari bahan bakar yang dapat menimbulkan api saat didekatkan dengan nyala api. Titik

nyala sangat penting dilakukan untuk alasan keselamatan dan keamanan penyimpanan serta penanganan bahan bakar. Bahan bakar yang memiliki titik nyala rendah maka lebih mudah terbakar (Sakthivela dkk., 2018).

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

2.9.4 GC-MS

Metode analisis yang mana sampel dipanaskan hingga terdekomposisi menjadi molekul yang lebih kecil, dipisahkan melalui kromatografi gas dan kemudian dideteksi menggunakan spektrometri massa merupakan metode *Gas Chromatograph-Mass Spectrophotometer* (GC-MS) (Halket dan Zaikin, 2001). Instrumen *Gas Chromatograph-Mass Spectrophotometer* (GC-MS) dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Instrumen GC-MS (Pavia dkk., 2006)

Sampel diletakkan dalam tabung sampel kuarsa dan dipanaskan hingga suhu $600\text{-}1000^{\circ}\text{C}$ atau dapat juga lebih tinggi tergantung pada aplikasinya. Ada beberapa teknik pemanasan

yang berbeda pada perengkahan yaitu tungku isothermal, pemanasan induktif, dan pemanas resistif menggunakan filamen platina. Molekul-molekul yang berukuran besar terpotong dititik terlemahnya menghasilkan fragmen yang lebih kecil dan lebih volatil. Fragmen ini kemudian dipisahkan menggunakan kromatografi gas. Kromatogram kromatografi gas umumnya sangat kompleks karena produk dekomposisi yang terbentuk mempunyai rentang yang luas. Data dapat digunakan sebagai sidik jari untuk membuktikan identitas material atau data kromatografi gas/spektrometri massa dapat digunakan untuk mengidentifikasi fragmen-fragmen tunggal untuk memperoleh informasi struktur (Erwin dkk., 2008).

Saat kromatografi gas dikombinasikan dengan spektrometri massa maka akan didapatkan sebuah metode analisis yang sangat bagus. Peneliti dapat menganalisis sampel, memasukkannya ke dalam instrumen, memisahkannya menjadi komponen tunggal dan langsung mengidentifikasi sampel tersebut. Selanjutnya, peneliti dapat menghitung analisa kuantitatif dari masing-masing komponen. Informasi yang diperoleh dari kedua teknik ini yang digabung dalam instrumen GC-MS adalah tak lain hasil dari masing-masing spektra. Informasi terpenting yang didapat dari spektra GC adalah waktu retensi untuk tiap-tiap senyawa dalam sampel, sedangkan untuk spektra MS, bisa diperoleh informasi mengenai massa molekul relatif dari senyawa sampel tersebut (Pavia dkk., 2006).

2.9.5 Nilai Kalor

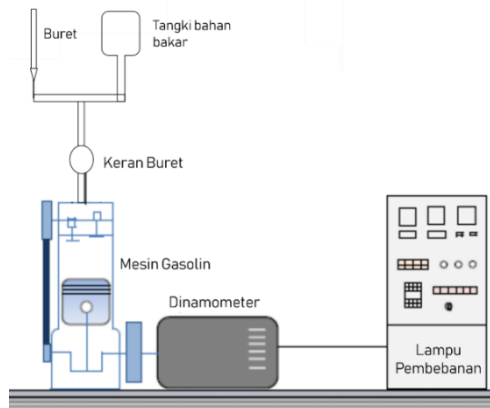
Salah satu sifat dasar bahan bakar yang dianggap penting adalah nilai kalor (*heating value*). Nilai kalor bahan bakar adalah energi dalam bentuk kalor atau panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar dengan oksigen. Bahan bakar minyak umumnya memiliki nilai kalor yang berkisar antara 10.160-11.000 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).

Instrumen yang digunakan untuk menentukan nilai kalor berupa *bomb calorimeter*, yaitu bahan bakar cair yang dibakar dengan oksigen bertekanan. Instrumen ini terdiri dari wadah stainless steel yang dikelilingi bak air besar. Bak air bertujuan agar temperatur akhir produk tetap berada ditemperatur awal reaktan, yaitu 25°C (Wiratmaja, 2010).

2.9 Karakterisasi Performa Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin

Beberapa parameter dapat diukur pada performa bahan bakar cair antara lain: *Brake Thermal Efficiency* (BTE), *Brake Spesific Fuel Consumption* (BSFC), *Brake Spesific Energy Consumption* (BSEC), *Total Heat* (Q_{in}), dan ratio relatif udara bahan bakar. Beberapa parameter di atas menentukan performa dari bahan bakar yang akan diaplikasikan pada mesin diesel ataupun gasolin. Proses pengujian pada mesin gasolin dapat ditunjukkan pada Gambar 2.15 (Topgul, 2015).



Gambar 2.15 Skema pengujian pada mesin gasolin (Topgul, 2015)

Pada uji performa bahan bakar langkah awal yang dilakukan adalah mengetahui beban *full load* dan rpm maksimum. Tegangan, rpm alternator, arus, dan waktu konsumsi bahan bakar

dalam satuan menit adalah sebuah data yang akan diperoleh dari uji performa.

Brake Thermal Efficiency (BTE) merupakan efisiensi energi termal bahan bakar diubah menjadi kerja mekanik dalam mesin. Nilai kalor, densitas, dan viskositas merupakan faktor pengaruh efisiensi dari bahan bakar. Efisiensi termal dari bahan bakar akan berkurang seiring dengan bertambah cepatnya putaran dari mesin gasolin.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

3.1.1 Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah termometer, pemanas listrik, labu leher tiga [schott duran], oven, selang, kompor gas, kondensor, erlenmeyer [pyrex], *chamber reactor*, *tubular reactor*, piknometer [pyrex], gelas ukur [pyrex], pipet ukur, saringan, corong pisah [pyrex], pengaduk magnet, neraca analitik, cawan porselen, bom kalorimeter, dan viskometer ostwald.

3.1.2 Bahan

Pada penelitian ini digunakan beberapa bahan diantaranya adalah NaOH p.a. [Merck], minyak jelantah, limbah plastik polistirena (PS) berupa *styrofoam*, katalis Al-MCM-41/Keramik dari penelitian sebelumnya Rifaldi (2018), metanol p.a. [Merck], Nitrogen UHP, metil tersier butil eter (MTBE) [Merck], gas LPG, dan lem silikon.

3.2 Prosedur Penelitian

3.2.1 Sintesis Biodiesel dari Minyak Jelantah

Metode sintesis biodiesel dari minyak jelantah telah dilakukan oleh (Rifaldi, 2018). Minyak jelantah diperoleh dari kantin pusat ITS kemudian dipisahkan dari pengotor dengan cara disaring. Hasil saringan minyak jelantah dipanaskan untuk menghilangkan kadar air. Minyak jelantah dilakukan proses transesterifikasi dengan perbandingan mol asam oleat (minyak jelantah):metanol yaitu 1:2. Katalis yang digunakan yaitu katalis basa berupa NaOH sebanyak 0,5% dari berat minyak jelantah.

Minyak jelantah sebanyak 200 mL dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang sudah dirangkai dengan kondensor kemudian dipanaskan hingga suhu 50°C. Katalis NaOH yang sudah ditimbang sebanyak 0,8990 gram dilarutkan dalam 51,24 mL metanol. Larutan metoksi dimasukkan ke dalam labu leher tiga yang telah berisi minyak jelantah. Temperatur dijaga 50°C selama

2 jam dan dilakukan pengadukan dengan kecepatan 500 rpm. Proses transesterifikasi dihentikan setelah 2 jam lalu hasil transesterifikasi dipindah ke dalam corong pisah dan didiamkan selama 1x24 jam. Biodiesel yang terbentuk berada di lapisan atas kemudian dilakukan analisa densitas, viskositas, dan uji nyala.

3.2.2 Preparasi Katalis

Katalis Al-MCM-41/Keramik diaktivasi dengan cara dioven pada suhu 80°C. Katalis yang sudah dioven kemudian didinginkan dalam desikator. Katalis kemudian di pellet dengan alat *press pellet*.

3.2.3 Karakterisasi Katalis

Ukuran pori dan porositas katalis digunakan metode adsorpsi-desorpsi N₂ (*Micromeritics TriStar II 3020 Automatic Physisorption Analyzer*). Katalis Al-MCM-41/Keramik divakum pada suhu 300°C selama 1 jam untuk menghilangkan gas yang tersandung di dalamnya. Persamaan Brunauer-Emmett-Teller digunakan untuk menghitung area permukaan dengan menggunakan data adsorpsi yaitu $p / p_0 = 0,05 - 0,25$. Volume pori diukur melalui metode *Barrett-Joyner-Halenda* (BJH).

Pola serbuk *X-ray Diffraktion* (XRD) dilakukan analisa di Departemen Material Metalurgi ITS dengan sumber sinar-X dari Cu K α , yang dioperasikan pada 40 kV dan 40 mA. Hamburan sudut 2 θ diubah dari 10° hingga 80°.

Ukuran partikel penyusun dan morfologi permukaan sampel dievaluasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM, FEI Quanta 20 F).

Keasaman pada permukaan katalis digunakan metode analisa *Pyridine-Adsorption Fourier Transform Infrared* (Piridin-FTIR).

3.2.3 Sintesis Minyak PS dari Limbah Plastik Polistirena

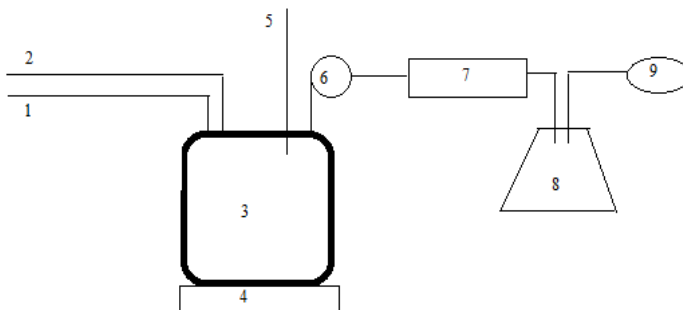
Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah limbah plastik polistirena (PS) berupa *styrofoam*. Sampel dibersihkan, dikeringkan kemudian dipotong kecil-kecil. Potongan limbah PS

lalu dipadatkan dengan cara dipanaskan dalam panci dan ditekan hingga berbentuk lempengen.

Sintesis minyak PS dilakukan dalam reaktor tertutup. Terdapat tiga bagian utama pada reaktor yaitu *chamber reactor*, kondensor, dan labu penampung. Limbah plastik PS sebanyak 1 kg dimasukkan ke dalam *chamber reactor*. Reaktor dialiri gas nitrogen kemudian dipanaskan hingga suhu 250°C selama 2 jam. Perengkahan sampel menjadi gas dan menuju kondensor. Hasil kondensasi ditampung dalam labu penampung yang sudah dimasukkan dalam labu penampung.

3.2.4 Sintesis Bahan Bakar Cair PS, PS/Kat, dan PS/BMJ/Kat

Sintesis bahan bakar cair pada penelitian ini berasal dari polistirena (PS) dan polistirena/biodiesel minyak jelantah (PS/BMJ). Sintesis bahan bakar cair digunakan metode perengkahan dalam reaktor tertutup yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Pada reaktor terdapat beberapa bagian berupa *chamber reactor*, *tubular reactor*, kondensor, dan labu penampung.



Gambar 3.1 Reaktor perengkahan

Keterangan :

- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| 1. Aliran gas N ₂ | 6. <i>Tubular reactor</i> |
| 2. Jalur sampel | 7. Kondensor |
| 3. <i>Chamber reactor</i> | 8. Labu penampung |
| 4. Sumber panas | 9. GC/MS |
| 5. Termometer | |

Sampel (PS dan PS/BMJ) dimasukkan ke dalam *Chamber reaktor* yang digunakan sebagai tempat terjadinya proses perengkahan. Gas nitrogen (N_2) dialirkan untuk mengeluarkan oksigen yang ada dalam reaktor. Perengkahan dilakukan selama 2 jam pada temperatur $300^\circ C$. Selama perengkahan berlangsung kondensator dialiri air dingin agar uap yang terbentuk terkondensasi menjadi cair. Cairan yang terbentuk kemudian ditampung dalam labu penampung dan diambil untuk diuji GC-MS.

Pada penggunaan katalis, *Tubular reactor* digunakan sebagai wadah katalis serta tempat terjadinya perengkahan katalitik. Dalam *tubular reactor* tersusun atas bagian-bagian, yaitu: kawat kasa, *glass wool*, 5 *pellet* katalis kemudian *glass wool*, 5 *pellet* katalis, *glass wool* dan terakhir ditutup kawat kasa.

Pada penelitian ini, katalis yang digunakan yaitu Al-MCM-41/Keramik. Katalis ditimbang 9 g kemudian dibentuk menjadi *pellet* menggunakan *press pellet*. *Pellet* yang terbentuk akan dimasukkan ke dalam *tubular reactor*. *Tubular reactor* diletakkan di atas *chamber reactor* sehingga gas hasil perengkahan dapat mengalir menuju *tubular reactor* untuk mengalami reaksi katalitik. *Tubular reactor* terhubung dengan kondensator yang mengkondensasi gas hasil perengkahan katalitik. Hasil dari kondensasi gas yang berupa cairan ditampung. Saat perengkahan katalitik berlangsung, dilakukan variasi waktu 60 dan 120 menit. Setiap 60 dan 120 menit cairan atau minyak hasil perengkahan katalitik diambil untuk diuji GC-MS.

Bahan bakar cair dengan variasi tanpa katalis dapat disebut PS. Bahan bakar cair dengan variasi katalis, penambahan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah dan waktu dapat disebut PS/Kat60, PS/Kat120, PS/BMJ/Kat60, dan PS/BMJ/Kat120.

3.3 Campuran Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair yang telah dibuat dengan metode perengkahan dicampur dengan bahan bakar premium (RON 88). Campuran bahan bakar cair kemudian ditambah dengan aditif Metil Tersier Butil Eter (MTBE) dan diaduk selama 10 menit menggunakan pengaduk magnet. Campuran bahan bakar cair dengan variasi volume yang dapat ditinjau pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jenis campuran bahan bakar cair

Variasi <i>Feedstock</i>	Volume <i>Feedstock</i> (mL)	Volume Premium (mL)	Volume MTBE (mL)	Campuran Bahan Bakar Cair
PS/Kat	75	750	18,4	CPS/Kat
PS/BMJ/Kat	75	750	18,4	CPS/BMJ/Kat1
	150	750	18,4	CPS/BMJ/Kat2
	225	750	18,4	CPS/BMJ/Kat3
Std	0	750	18,4	Std

3.4 Karakterisasi Bahan Bakar Cair

Karakterisasi campuran bahan bakar cair dilakukan dengan analisa karakteristik sifat fisik yang meliputi densitas, viskositas kinematik, titik nyala, dan nilai kalor. Selain analisa karakteristik sifat fisik campuran bahan bakar cair, perlu dilakukan analisa *Gas Chromatography-Mass spectrometer* (GC-MS) yang bertujuan untuk mengetahui komposisi fraksi hidrokarbon mirip gasolin.

3.4.1 *Gas Chromatograph-Mass Spectrophotometer* (GC-MS)

Bahan bakar cair hasil perengkahan dikarakterisasi dengan instrumen GC-MS *Agilent Technologies 7890A GC-5975MS*. Sampel hasil perengkahan sebanyak 50 mg dilarutkan dalam 1 mL n-heksana, lalu sampel diinjeksikan ke inlets kromatografi dan diproses selama 70 menit. *Gas Chromatograph-Mass Spectrophotometer* (GC-MS) dikondisikan sebagai berikut:

1. Inlets: jumlah suntikan 1 μL , suhu 310°C, tekanan 13 kPa, dan rasio 66,8.
2. Oven: suhu awal 50°C, suhu akhir 300°C, *hold time* 5 menit, laju 5°C/menit.
3. Kolom: tipe Rtx 5MS, gas helium, aliran gas 0,55 mL/menit.

3.4.2 Penentuan Densitas Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair dilakukan uji densitas menggunakan piknometer. Piknometer kosong ditimbang menggunakan neraca analitik. Piknometer yang sudah ditimbang kemudian diisi dengan bahan bakar cair hingga memenuhi saluran rongga tutup

piknometer lalu ditimbang massa piknometer yang sudah diisi bahan bakar cair. Penentuan densitas dilakukan pada suhu 15°C. Densitas dapat diperoleh dengan persamaan (3.1).

$$\text{Densitas} = \frac{\text{massa bahan bakar cair}}{\text{volume piknometer}} \quad (3.1)$$

3.4.3 Penentuan Titik Nyala Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair dimasukkan ke dalam *freezer* lalu dituang ke cawan porselen. Termometer dipasang di atas cawan porselen hingga menyentuh bahan bakar cair. Pemantik api disulutkan pada permukaan bahan bakar cair. Suhu yang terbaca pada termometer saat terjadi nyala api pertama dicatat sebagai titik nyala bahan bakar cair.

3.4.4 Penentuan Viskositas

Viskositas bahan bakar cair dapat diukur menggunakan Viskometer Ostwald. Pengujian viskositas bahan bakar cair melibatkan aquades sebagai pembanding. Aquades dimasukkan ke dalam viskometer ostwald kemudian dicatat waktu alirnya dari batas atas sampai batas bawah kapiler. Penentuan viskositas dilakukan pada suhu 40°C.

$$\eta_{\text{BBC}} = \eta_0 \frac{t_{\text{BBC}} \times \rho_{\text{BBC}}}{t_0 \times \rho_0} \quad (3.2)$$

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/m³)

t_0 : Waktu alir aquades (s)

ρ_0 : Densitas aquades (kg/m³)

3.4.5 Penentuan Nilai Kalor Bahan Bakar Cair

Dalam menentukan nilai kalor digunakan instrumen bom kalorimeter. Ditimbang bahan bakar cair 1,0 g, kemudian dimasukkan ke dalam krusibel dan dimasukkan ke dalam reaktor

bom. Reaktor bom ditutup rapat, lalu diisi dengan oksigen (O_2) hingga tekanan 30 atm. Reaktor bom kemudian dimasukkan ke dalam kalorimeter yang telah berisi air. Setelah preparasi selesai dilakukan, maka proses pembakaran dapat dilakukan dengan mengalirkan listrik ke dalam kalorimeter. Nilai kalor yang terserap akan ditampilkan pada monitor kalorimeter.

3.5 Penentuan Performa Bahan Bakar pada Mesin Gasolin

Bahan bakar cair diuji efisiensi yang dihasilkan oleh waktu dengan mengukur waktu pembakaran 20 mL bahan bakar cair terhadap pembebanan yang dihasilkan oleh proses pembakaran dalam satuan watt. Bahan bakar cair diuji pada range 200 watt. Pengujian dilakukan di Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi ITS Laboratorium Motor Bakar.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Sintesis Biodiesel Minyak Jelantah

Sintesis biodiesel minyak jelantah digunakan metode transesterifikasi dengan bantuan katalis basa yaitu NaOH. Transesterifikasi bertujuan untuk mengubah trigliserida menjadi metil ester. Sebelum dilakukan sintesis biodiesel, minyak jelantah yang digunakan harus dipreparasi terlebih dahulu. Preparasi minyak jelantah meliputi penyaringan dan pemanasan. Penyaringan minyak jelantah bertujuan untuk memisahkan minyak jelantah dari pengotor atau residu. Minyak jelantah yang telah disaring kemudian dipanaskan dengan tujuan untuk menghilangkan air yang terdapat dalam minyak jelantah.



Gambar 4.1 Rangkaian alat reflus sintesis biodiesel

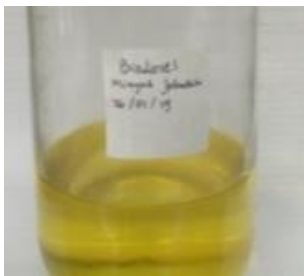
Tahap selanjutnya adalah pembuatan larutan metoksi dengan cara dilarutkan NaOH sebanyak 0,8950 g ke dalam 51,24 mL metanol. Pembuatan larutan metoksi bertujuan untuk membentuk ion alkoksida sebagai nukleofilik untuk menyerang ikatan karbonil yang terdapat pada trigliserida minyak. Proses selanjutnya dilakukan sintesis biodiesel dengan cara dicampurkan minyak jelantah dan larutan metoksi dalam labu leher tiga dan direaksikan pada sistem reflus. Rangkaian alat reflus ditunjukkan pada Gambar 4.1. Suhu reaksi yang digunakan yaitu 50°C selama 120 menit dengan kecepatan pengadukan 500 rpm.

Campuran hasil refluks dipindahkan ke corong pisah untuk memisahkan fasa yang terbentuk. Fasa atas merupakan lapisan metil ester dimana biodiesel terbentuk dan fasa bawah adalah lapisan gliserol. Adanya pembentukan lapisan dikarenakan perbedaan massa jenis antara biodiesel (0,850-0,890 g/mL) dan gliserol (1,260 g/mL). Pemisahan biodiesel ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pemisahan Biodiesel dan Gliserol

Biodiesel yang sudah dipisahkan kemudian dicuci dengan air hangat hingga warna air tidak keruh. Menurut Lopez dkk. (2009), pencucian berfungsi mencegah presipitasi metil ester jenuh dan pembentukan emulsi. Biodiesel di evaporasi agar didapatkan biodiesel yang murni. Biodiesel minyak jelantah yang didapat memiliki karakteristik fisik berupa densitas 0,8868 g/mL, viskositas kinematik 4,357 cSt, titik nyala pada suhu 130°C yang sesuai dengan SNI 04-7182-2006 (Widyawati, 2007). Biodiesel yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.3.

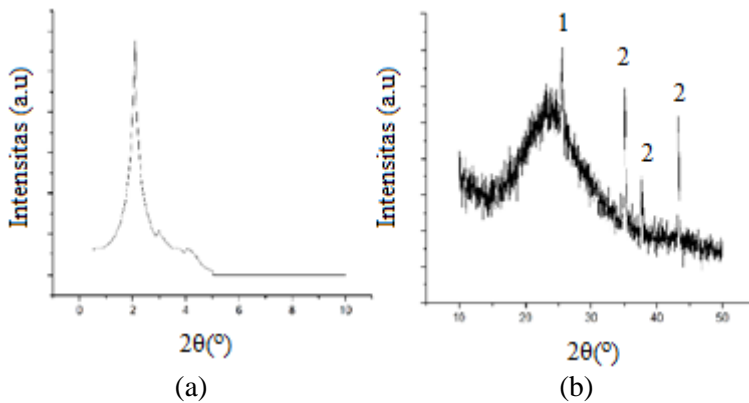


Gambar 4.3 Hasil biodiesel minyak jelantah

4.2 Karakterisasi Katalis Al-MCM-41/Keramik

4.2.1 Hasil Karakterisasi XRD Katalis Al-MCM-41/Keramik

Puncak SAXRD pada 2θ adalah $0,5^\circ$ - $4,9^\circ$ merupakan SAXRD dari penelitian yang telah dilakukan (Juwono dkk., 2017b) yang digabungkan dengan XRD katalis Al-MCM-41/Keramik pada 2θ adalah 5° - 10° . Puncak XRD yang didapat terlihat turun dari puncak sebelumnya, sehingga penggabungan dua XRD cocok disatukan seperti yang terlihat pada Gambar 4.4. Saat digabungkan puncak Al-MCM-41 tetap ada sehingga tidak merusak struktur heksagonal Al-MCM-41 akibat adanya keramik.

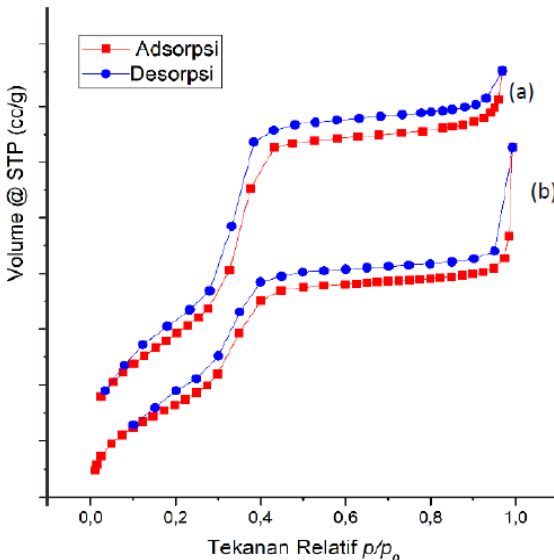


Gambar 4.4 (a) Difraktogram puncak khas MCM-41, (b) Difraktogram Al-MCM-41/Keramik

Pada Gambar 4.4 (b) 2θ di atas $22,50^\circ$ merupakan puncak silika. Pada Gambar 4.4 (b) yang ditunjukkan pada nomor 1 yaitu $25,58^\circ$ merupakan puncak khas dari Al yang bergeser pada 2θ di atas 20° . Pada Gambar 4.4 (b) yang ditunjukkan pada nomor 2 merupakan puncak khas dari keramik. Hal ini diketahui bahwa penambahan keramik pada katalis Al-MCM-41 tidak mengubah struktur dari Al-MCM-41.

4.2.2 Hasil Karakterisasi Adsorpsi-Desorpsi N₂ Katalis Al-MCM-41/Keramik

Pada hasil analisa adsorpsi-desorpsi nitrogen yang telah dilakukan pada katalis Al-MCM-41/Keramik didapatkan grafik isoterm tipe IV. Grafik isoterm tipe IV merupakan grafik khas dari MCM-41. Hal tersebut membuktikan bahwa adanya penambahan keramik tidak merubah tipe grafik dari MCM-41.



Gambar 4.5 (a) Grafik isoterm Al-MCM-41 (Juwono dkk., 2017b), (b) Grafik isoterm Al-MCM-41/Keramik

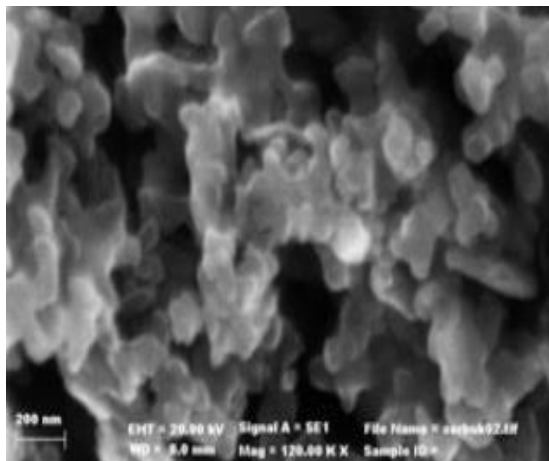
Pada Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa penambahan keramik pada katalis Al-MCM-41 dapat meningkatkan luas permukaan dibandingkan dengan Al-MCM-41 yang di sintesis sebelumnya oleh (Juwono dkk., 2017b). Luas permukaan meningkat dikarenakan bertambahnya luas permukaan dari keramik. Volume pori dan radius rata-rata mengalami peningkatan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 akibat dari pencampuran keramik karena tarikan dari keramik terhadap katalis Al-MCM-41.

Tabel 4.1 Data hasil uji adsorpsi-desorpsi N₂

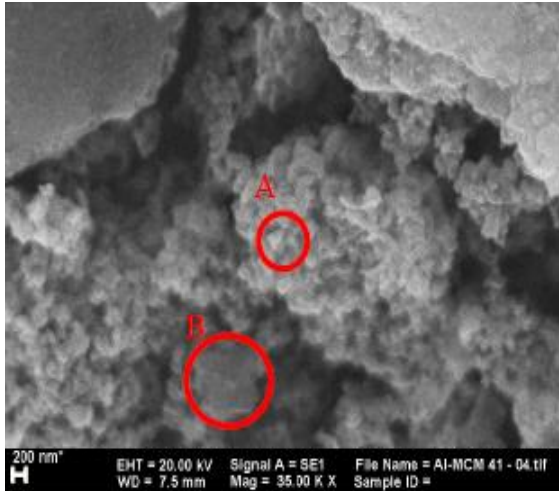
No.	Katalis	Luas Permukaan (m ² /g)	Volume Pori (cc/g)	Pori Rata-rata Radius (Å)
1.	Al-MCM-41	419,93	0,50	15,12
2.	Al-MCM-41/ Keramik	490,665	0,546	22,22

4.2.3 Hasil Karakterisasi SEM Katalis Al-MCM-41/Keramik

Pada mikrogram SEM, Al-MCM-41 menempel pada permukaan keramik. Al-MCM-41 ditunjukkan pada titik A dan keramik dapat ditunjukkan pada titik B di Gambar 4.6 (b). Pada Al-MCM-41, terlihat permukaan halus berupa aglomerasi dari padatan dengan struktur heksagonal. Al-MCM-41/Keramik terdapat partikel halus dengan struktur heksagonal yang berasal dari Al-MCM-41 menempel pada permukaan keramik yang berfungsi sebagai padatan pendukung.



(a)



(b)

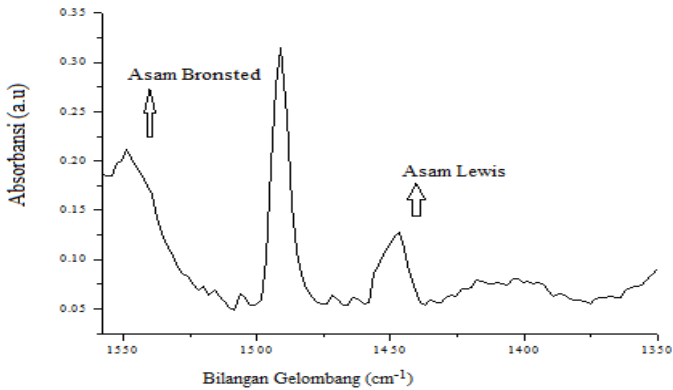
Gambar 4.6 (a)SEM Al-MCM-41, (b)SEM Al-MCM-41/Keramik

4.2.4 Hasil Keasaman Katalis Al-MCM-41/Keramik Metode FTIR-Piridin

Analisa FTIR dengan senyawa piridin bertujuan untuk menentukan nilai keasaman permukaan katalis. Spektrum pada Gambar 4.7 menunjukkan interaksi antara senyawa piridin dengan sisi aktif katalis Al-MCM-41/Keramik. Tabel 4.2 menunjukkan sifat keasaman katalis Al-MCM-41/Keramik dengan bilangan gelombang 1533-1558 cm^{-1} menunjukkan sisi aktif Asam Bronsted dengan jumlah 0,0344 mmol/g. Pada bilangan gelombang 1431-1460 cm^{-1} menunjukkan sisi aktif Asam Lewis dengan jumlah 0,0311 mmol/g (Juwono dkk. 2017b).

Tabel 4.2 Sifat keasaman dari 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



Gambar 4.7 Spektra Piridin-FTIR Al-MCM-41/Keramik

4.3 Sintesis Minyak PS dari Limbah Plastik Polistirena

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah plastik polistirena (PS) yang berupa *styrofoam*. Limbah PS berupa *styrofoam* yang diperoleh kemudian dipotong hingga berukuran kecil. Potongan *styrofoam* kemudian dipadatkan dengan cara dipanaskan dalam panci dan ditekan. Limbah PS berupa *styrofoam* dan hasil pepadatan *styrofoam* ditunjukkan pada Gambar 4.8. Tujuan dilakukan pepadatan agar massa yang dimasukkan dalam reaktor semakin banyak.



Gambar 4.8 (a) Limbah PS berupa *styrofoam*, (b) *Styrofoam* yang dipadatkan

Perengkahan PS menjadi bahan bakar cair dilakukan dengan prinsip destilasi, yaitu dimana fasa uap yang terbentuk akan melewati kondensor dengan temperatur rendah dan akan berubah menjadi fasa cair berupa minyak. Perengkahan PS diawali dengan penimbangan PS yang sudah dipadatkan sebanyak 1 kg dan dimasukkan ke dalam *chamber reactor*. *Tubular reactor* dan kondensor disusun hingga melekat pada sisi atas *chamber reactor*. Kondensor dialiri air dingin dengan tujuan untuk mengubah fasa uap menjadi fasa cair pada temperatur rendah. Setelah semua tersusun, *chamber reactor* dialiri gas N_2 yang bertujuan untuk menghilangkan oksigen yang berada dalam reaktor. Reaktor kemudian dipanaskan selama 2 jam dengan suhu $300^\circ C$. Suhu yang digunakan melebihi dari suhu titik leleh PS yaitu $240^\circ C$ agar PS meleleh sempurna dan menghasilkan fasa uap (Billmeyer, 1984). Fasa uap yang terbentuk di dalam *chamber reactor* melewati *tubular reactor* menuju kondensor. Terjadi perubahan fasa dari fasa gas menjadi cair yang terbentuk dikondensor akan ditampung dalam labu penampung. Pada satu kali reaksi perengkahan PS dalam waktu 2 jam didapatkan minyak PS sebanyak 1 liter. Perengkahan limbah PS menjadi minyak PS ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Minyak PS

4.4 Sintesis Bahan Bakar Cair PS, PS/Kat, dan PS/BMJ/Kat

Perengkahan atau perengkahan dilakukan dalam reaktor tertutup. Tipe reaktor yang digunakan adalah *continous reactor*. Pada reaktor ini terdapat beberapa bagian seperti *chamber*

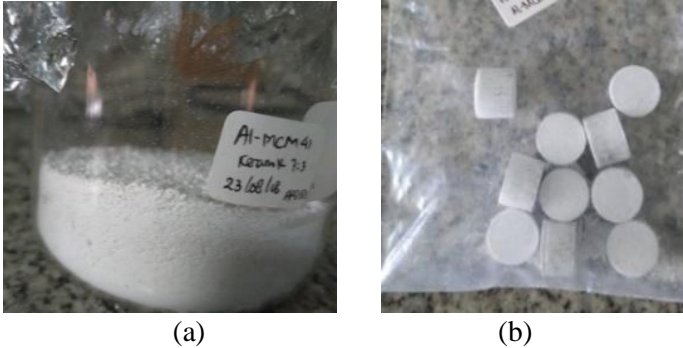
reactor, *tubular reactor*, kondensor, dan labu penampung. *Chamber reactor* sebagai wadah reaktan dan tempat terjadinya proses perengkahan. Reaktan yang digunakan berupa PS dengan total volume 1 liter. *Tubular reactor*, kondensor dan labu penampung disusun.



Gambar 4.10 Perengkahan PS

Proses perengkahan atau perengkahan dilakukan selama 120 menit pada suhu 300°C. Reaktor dialiri gas N₂ (nitrogen) untuk menghilangkan gas oksigen yang dapat mengganggu proses perengkahan. Pemanasan suhu tinggi menyebabkan gerakan antar atom dalam senyawa semakin cepat sehingga ikatan polimer akan mengalami pemutusan. Pemanasan menyebabkan fasa cair menjadi fasa gas. Fasa gas yang terbentuk kemudian melewati kondensor yang sudah dialiri air dingin. Penggunaan air dingin menyebabkan suhu di dalam kondensor dingin sehingga gas akan terkondensasi menjadi cairan. Cairan yang terbentuk kemudian di tampung dalam labu penampung yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.

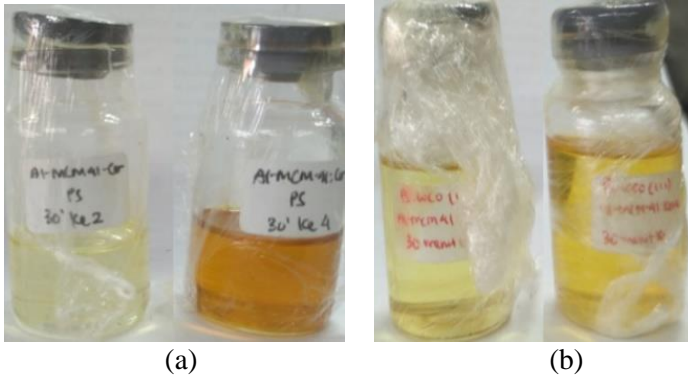
Katalis Al-MCM-41/Keramik berupa serbuk halus berwarna putih ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a) yang diperoleh dari penelitian sebelumnya oleh Rifaldi (2018). Penambahan keramik sebagai material pendukung yang dapat memaksimalkan proses perengkahan katalitik. Katalis ini dibentuk menjadi *pellet* dengan berat total 9 gram yang dapat dilihat pada Gambar 4.11 (b). Pembentukan *pellet* bertujuan untuk memaksimalkan kinerja katalis karena tidak terlalu padat dan rapat sehingga reaktan dan katalis berinteraksi dengan baik.



Gambar 4.11 (a) Katalis Al-MCM-41/Keramik, (b) Pellet katalis Al-MCM-41/Keramik

Hal yang sama dilakukan untuk perengkahan menggunakan katalis seperti perengkahan tanpa katalis. Reaktan yang digunakan berupa PS dan PS dengan penambahan biodiesel minyak jelantah. Perbedaan terletak pada *tubular reactor* yang diletakkan di atas *chamber reactor* digunakan sebagai wadah katalis serta tempat terjadinya perengkahan katalitik. *Tubular reactor* disusun dengan komposisi bertingkat berupa *glass wool*, katalis, *glass wool*, katalis, dan *glass wool*. *Glass wool* digunakan sebagai penahan katalis serta memiliki sifat isolator panas sehingga tahan terhadap suhu tinggi. Fasa gas yang terbentuk akan menuju *tubular reactor* dan mengalami proses katalitik sedangkan fraksi yang lebih berat akan tetap berada pada *chamber reactor* sebagai kokas.

Perengkahan katalitik terjadi pemutusan ikatan karbon beta pada reaktan fasa gas berupa fraksi hidrokarbon ringan hasil perengkahan dari *chamber reactor* dengan berikatannya pada sisi aktif katalis Al-MCM-41/Keramik. *Tubular reactor* terhubung dengan kondensor yang akan mengubah fasa gas hasil perengkahan katalitik menjadi fasa cair. Fasa cair hasil kondensasi di tampung dalam labu penampung. Penampungan fasa cair dilakukan pada waktu 60 menit dan 120 menit.. Produk hasil perengkahan masing-masing variasi ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 (a) Perengkahan PS katalitik, (b) Perengkahan PS/BMJ katalitik

4.5 Distribusi Senyawa Kimia pada Hasil Perengkahan

Perengkahan PS, PS/Kat, PS/BMJ/Kat dilakukan pada suhu 300°C selama 120 menit. Pada PS/Kat dan PS/BMJ/Kat dilakukan variasi waktu 60 dan 120 menit untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap komposisi senyawa hidrokarbon. Pada penelitian ini, komposisi kimia hasil perengkahan untuk masing-masing variasi ditentukan menggunakan GC-MS. Senyawa dengan area puncak tertinggi dipilih, diintegrasikan dan persen area ditentukan kuantitatifnya didasarkan atas area puncak. Komposisi kimia untuk hasil perengkahan dari setiap variasi dapat ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Semua senyawa kimia yang terdeteksi dari perengkahan PS, PS/Kat60, dan PS/Kat120 adalah hidrokarbon aromatik. Senyawa aromatik berasal dari degradasi polistirena. Pada PS/Kat60 senyawa hidrokarbon aromatik memiliki fraksi hidrokarbon yang lebih luas antara C₇-C₁₆, jika dibandingkan dengan PS/Kat120 senyawa aromatik yang terbentuk antara C₇-C₉. Hal tersebut dikarenakan pemotongan atau pemutusan β ikatan C-C pada polistirena dengan katalis pada waktu 120 menit lebih sering terjadi dibandingkan pada waktu 60 menit.

Disisi lain, pada PS/BMJ/Kat60 dan PS/BMJ/Kat120 terdapat senyawa metil ester yang disebabkan karena penambahan biodiesel minyak jelantah. PS/BMJ/Kat120 memiliki senyawa

hidrokarbon yang berbeda yaitu adanya senyawa hidrokarbon alifatik. Hal tersebut disebabkan adanya pemotongan ikatan C-C yang terjadi pada senyawa metil ester.

Tabel 4.3 Daftar senyawa pada hasil perengkahan

Nama Senyawa	Rumus	Sampel				
		PS	PS/ Kat 60	PS/ Kat 120	PS/ BMJ/ Kat 60	PS/BMJ /Kat 120
Senyawa Hidrokarbon Aromatik						
Benzena	C_6H_6	*				
Toluena	C_7H_8	*	*	*	*	*
Etilbenzena	C_8H_{10}	*	*	*	*	*
Stirena	C_8H_8	*	*	*	*	*
1-Fenil propena	C_9H_{10}	*				
α -Metilstirena	C_9H_{10}	*	*	*	*	*
1,3-Difenil propana	$C_{15}H_{16}$	*	*		*	*
3-Fenil butena	$C_{10}H_{12}$	*	*		*	
2-Fenil propana	C_9H_{12}		*	*	*	*
Difenil metana	$C_{13}H_{12}$		*		*	
1,2-Difenil etana	$C_{14}H_{14}$		*		*	
1,3-Difenil-1-butena	$C_{16}H_{16}$		*		*	*
1,3-Difenil-1-butana	$C_{16}H_{18}$		*			
3-Benzil-1,2-dihidro naftalena	$C_{17}H_{16}$		*		*	
1,4-Difenil-1,3-butadiena	$C_{16}H_{14}$		*			
1,2-Benzo-1,3-siklo heptadiena	$C_{11}H_{12}$				*	
Dimerstirena	$C_{16}H_{16}$				*	*

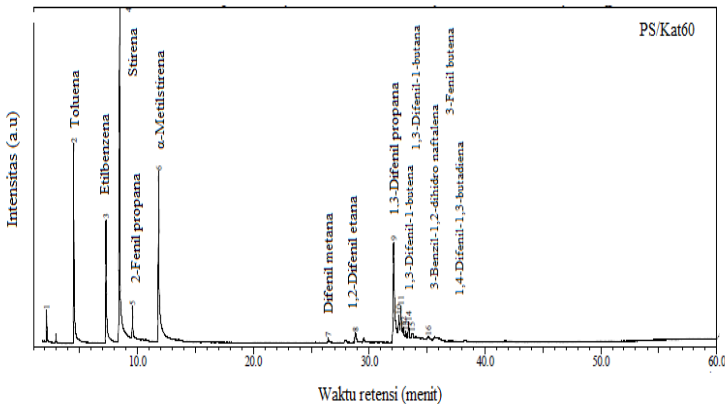
(Keterangan * : merupakan komponen senyawa yang ada)

Lanjutan Tabel 4.3 Daftar senyawa pada hasil perengkahan

Nama Senyawa	Rumus	Sampel				
		PS	PS/ Kat 60	PS/ Kat 120	PS/ BMJ/ Kat 60	PS/BMJ /Kat 120
Senyawa Metil Ester						
Metil oktadekanoat	$C_{19}H_{38}O_2$				*	*
Metil dekanooat	$C_{11}H_{22}O_2$				*	*
Metil dodekanoat	$C_{12}H_{26}O_2$				*	*
Dimetil dekanadioat	$C_{12}H_{22}O_4$				*	*
Metil tetradekanoat	$C_{15}H_{30}O_2$				*	
Metil-11-Oktadekenoat	$C_{19}H_{36}O_2$				*	*
Metil-3-heptenoat	$C_8H_{14}O_2$					*
Metil heptanoat	$C_8H_{16}O_2$					*
Metil oktanoat	$C_9H_{18}O_2$					*
Metil nonanoat	$C_{10}H_{20}O_2$					*
Senyawa Alifatik						
Pentana	C_5H_{12}					*
1-Hexena	C_6H_{12}					*
1-Heptena	C_7H_{14}					*
Heptana	C_7H_{16}					*
1-Oktena	C_8H_{16}					*
Oktana	C_8H_{18}					*
Nonana	C_9H_{20}					*
1-Undekena	$C_{11}H_{22}$					*
Dodekana	$C_{12}H_{26}$					*
2-undekena	$C_{11}H_{22}$					*
1-Dodekena	$C_{12}H_{24}$					*
1-Tetradekena	$C_{14}H_{28}$					*
1-Dodekuna	$C_{12}H_{22}$					*
8-Heptadekena	$C_{17}H_{34}$					*
Tridekana	$C_{13}H_{28}$					*

Senyawa yang paling banyak terbentuk memiliki puncak kromatogram yang tinggi. Pada hasil kromatogram GC-MS diperoleh senyawa utama yang terbentuk dari PS, PS/Kat60, dan PS/Kat120 adalah stirena (C_8H_8).

Stirena merupakan monomer penyusun dari polistirena. Hasil perengkahan dengan penambahan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah menunjukkan hasil yang berbeda yaitu selain stirena (C_8H_8) terdapat senyawa metil ester berupa metil oktadekanoat ($C_{19}H_{38}O_2$) yang paling dominan. Selain hasil senyawa hidrokarbon aromatik dan metil ester, terdapat pula senyawa alifatik (alkana, alkena, alkuna).



Gambar 4.13 Kromatogram GC-MS dari PS/Kat60

Gambar 4.13 menunjukkan salah satu kromatogram GC-MS hasil perengkahan yaitu PS/Kat60. Kromatogram GC-MS menunjukkan semakin banyak puncak yang ada pada kromatogram maka semakin banyak senyawa kimia yang terdeteksi dalam hasil perengkahan. Hal tersebut sesuai dengan Tabel 4.3 yang menunjukkan PS/BMJ/Kat120 memiliki senyawa kimia yang beragam yaitu hidrokarbon aromatik, senyawa metil ester, dan senyawa hidrokarbon alifatik.

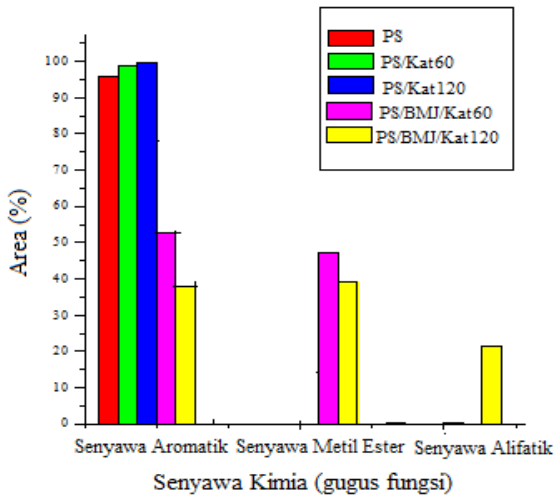
4.6 Efek Katalis dan Waktu Pada Komponen Kimia Hasil Perengkahan

Gambar 4.14 menunjukkan persentase area senyawa kimia produk perengkahan PS, PS/Kat60, PS/Kat120, PS/BMJ/Kat60, dan PS/BMJ/Kat120. Senyawa kimia yang diidentifikasi dalam Tabel 4.3 dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama: senyawa hidrokarbon aromatik, metil ester, dan alifatik. Perengkahan PS, PS/Kat60, dan PS/Kat120 senyawa utama yang terbentuk adalah hidrokarbon aromatik bukan metil ester ataupun alifatik.

Hasil dari senyawa aromatik pada PS mencapai 95,89%, mengalami kenaikan pada PS/Kat60 menjadi 98,85% dan pada PS/Kat120 menjadi 99,87%. Hasil ini membuktikan pada sampel PS peran katalis Al-MCM-41/Keramik efektif menghasilkan senyawa hidrokarbon aromatik. Hasil tertinggi senyawa aromatik pada PS dapat dijelaskan bahwa sebagian besar produk aromatik berasal dari fragmen aromatik degradasi PS.

Hasil dari senyawa aromatik pada PS/BMJ/Kat60 52,56% dan PS/BMJ/Kat120 menjadi 37,87%. Pencampuran polistirena dengan biodiesel minyak jelantah menunjukkan efek hasil senyawa aromatik. Biodiesel minyak jelantah mempengaruhi hasil senyawa aromatik yang menyebabkan penurunan dan memunculkan senyawa metil ester. Senyawa metil ester pada PS/BMJ/Kat60 sebanyak 47,42% mengalami penurunan pada PS/BMJ/Kat120 menjadi 39,31%. Penurunan senyawa metil ester disebabkan karena pemutusan ikatan C-C pada metil ester yang memiliki rantai panjang menjadi senyawa alifatik yang memiliki rantai lebih pendek.

Pada PS/BMJ/Kat120, selain senyawa aromatik dan metil ester terdapat senyawa alifatik dengan jumlah 21,56%. Hal tersebut dikarenakan adanya pemutusan ikatan C-C yang terdapat pada senyawa metil ester. Senyawa metil ester memiliki fraksi hidrokarbon besar yaitu C₁₉ dengan adanya katalis serta pemanasan suhu 300°C dan lama waktu 120 menit terdapat pemotongan rantai akhir pada ikatan C-C sehingga membentuk senyawa alifatik (alkana, alkena, dan alkuna).

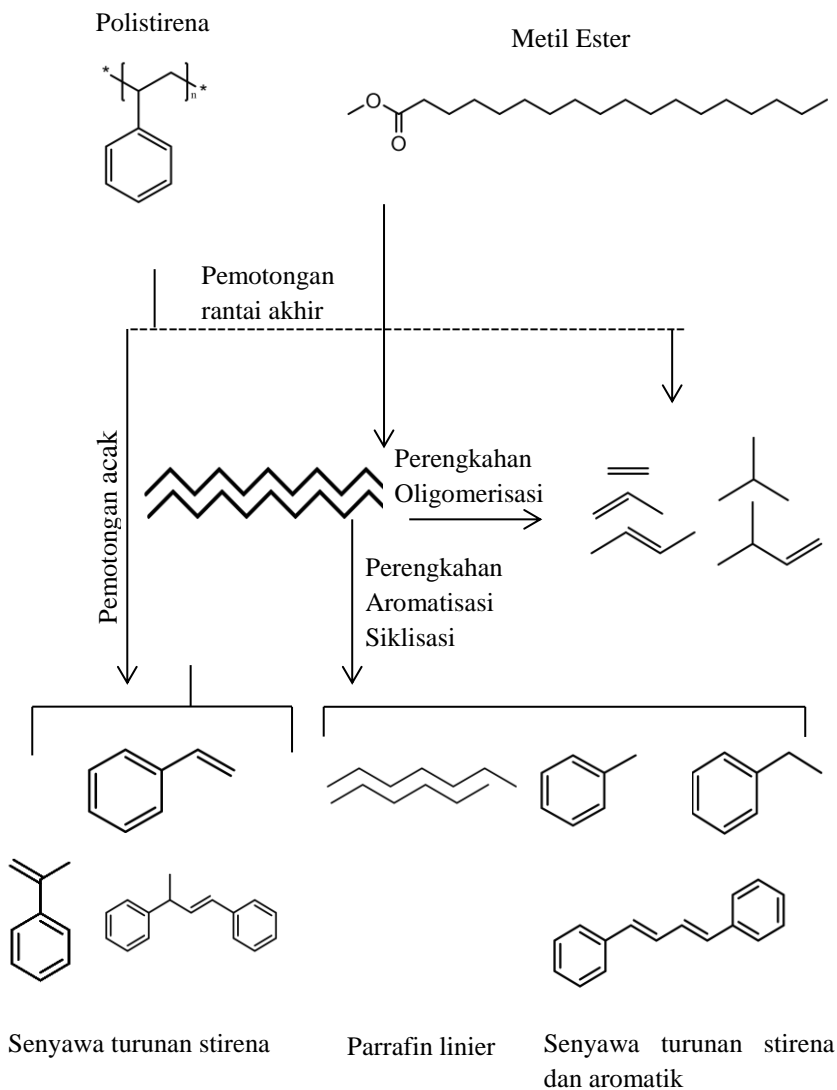


Gambar 4.14 Hasil perengkahan dari PS, PS/Kat60, PS/Kat120, PS/BMJ/Kat60, dan PS/BMJ/Kat120

4.7 Mekanisme Pembentukan Senyawa Kimia dari Produk Perengkahan

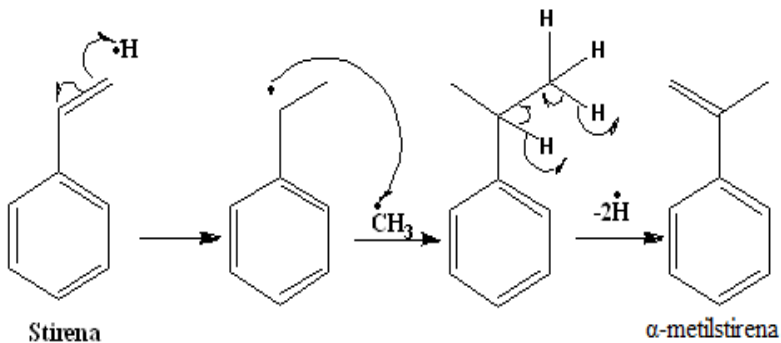
Sehubungan dengan penambahan biodiesel minyak jelantah, metil ester menunjukkan senyawa dari biodiesel minyak jelantah yang diubah menjadi hidrokarbon rantai panjang melalui reaksi dehidrasi, dekarbonilasi dan dekarboksilasi (Parejo dkk. 2018). Gambar 4.15 menunjukkan reaksi perengkahan polistirena dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah.

Berdasarkan penelitian (Hassan dkk., 2016), mekanisme degradasi termal polistirena pada suhu tinggi menghasilkan radikal rantai akhir dengan pemutusan rantai utama yang diikuti depolimerisasi. Monomer stirena adalah senyawa utama yang terbentuk dari produk perengkahan. Monomer stirena yang terbentuk melalui pemutusan β dari ikatan C-C PS dalam rantai utama.



Gambar 4.15 Reaksi perengkahan polistirena dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah (Parejo dkk. 2018)

Senyawa turunan stirena yang paling banyak terbentuk pada produk perengkahan adalah α -metilstirena. α -metilstirena dapat dibentuk dari reaksi antara monomer stirena dan radikal metil (Hassan dkk., 2016). Mekanisme pembentukan senyawa α -metilstirena ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Mekanisme pembentukan senyawa α -metilstirena (Hassan dkk., 2016)

4.8 Karakterisasi Bahan Bakar Cair

Karakteristik pada bahan bakar cair sangat penting dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan hasil perengkahan pada bahan bakar premium dan metil tersier butil eter (MTBE). Apabila dengan penambahan hasil perengkahan dapat meningkatkan karakteristik dari bahan bakar dan sesuai dengan standar bahan bakar gasolin, maka produksi campuran bahan bakar cair dapat dimanfaatkan sebagai alternatif bahan bakar gasolin. Standar bahan bakar gasolin berdasarkan standar ASTM dan SNI 06-3506-1994 dapat ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Terdapat beberapa parameter karakterisasi bahan bakar cair yang dilakukan pada penelitian ini yaitu densitas, titik nyala, nilai kalor, dan performa pada mesin gasolin.

Tabel 4.4 Spesifikasi bahan bakar jenis gasolin (Ahmad dkk., 2017)

Sifat	SNI 06-3506-1994 Gasolin	Hasil Produksi Bahan Bakar Cair					
		PS/ Kat	PS/ BMJ/ Kat	CPS/ Kat	CPS/ BMJ/ Kat1	CPS/ BMJ/ Kat2	CPS/ BMJ/ Kat1
Densitas pada 15°C (g/cm ³)	0,71-0,77	0,91	0,89	0,74	0,73	0,75	0,76
Viskositas Kinematik pada 40°C (mm ² /s)	<1,17	1,50	1,36	0,34	0,34	0,36	0,41
Nilai kalor (kkal/kg)	10.150	13.045	18.523	9.743	12.472	15.169	19.234
Titik nyala (°C)	<42	20	25	-49,4	-49,1	-48,8	-48,3

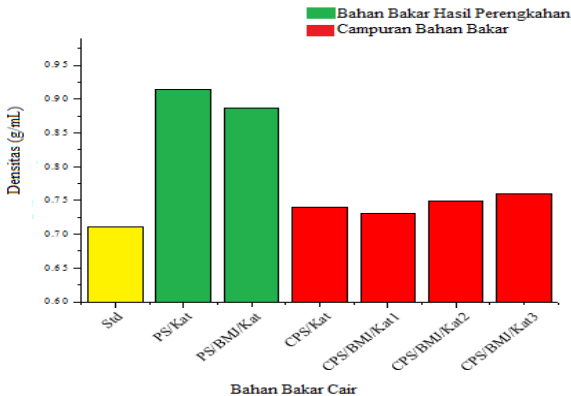
Hasil karakterisasi setiap produk bahan bakar cair sesuai SNI 06-3506-1994 dibahas pada sub bab berikut ini.

4.8.1 Densitas Bahan Bakar Cair

Campuran bahan bakar cair dilakukan pengujian densitas. Tujuan pengujian densitas adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan bahan bakar komersial terhadap karakteristik pembakaran. Penentuan densitas dilakukan menggunakan piknometer. Piknometer yang telah diketahui massa dan volume diisi dengan bahan bakar cair hingga penuh kemudian ditimbang kembali massanya. Densitas sampel bahan bakar cair diperoleh dari perbandingan massa sampel (didapat dari selisih antara massa piknometer terisi dan piknometer kosong) terhadap volume piknometer. Pengujian densitas bahan bakar cair dilakukan pada temperatur 15°C sesuai dengan SNI 06-3506-1994.

Hasil uji densitas untuk campuran bahan bakar cair dapat ditunjukkan dalam Gambar 4.17. Data tersebut dapat diketahui bahwa pada variasi *feedstock*, semakin banyak penambahan hasil perengkahan PS/BMJ/Kat dalam campuran premium dan MTBE maka nilai densitas yang dihasilkan semakin besar. Kenaikan

densitas pada CPS/BMJ/Kat dikarenakan nilai densitas dari PS/BMJ ($0,8868 \text{ g/cm}^3$) lebih besar dibandingkan dengan nilai densitas dari campuran premium dan MTBE ($0,7110 \text{ g/cm}^3$). Selain itu, pada penambahan *feedstock* PS/Kat dalam campuran premium dan MTBE nilai densitas CPS/Kat ($0,7405 \text{ g/cm}^3$) yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan densitas CPS/BMJ/Kat1 ($0,7304 \text{ g/cm}^3$) yang sama-sama jumlah penambahan hasil perengkahan sebanyak 75 mL pada campuran bahan bakar. Seluruh data densitas dari campuran bahan bakar cair telah memenuhi SNI 06-3506-1994 mengenai bahan bakar gasolin dengan nilai densitas yang diizinkan sekitar $0,71\text{-}0,77 \text{ g/cm}^3$ pada pengukuran temperatur 15°C .

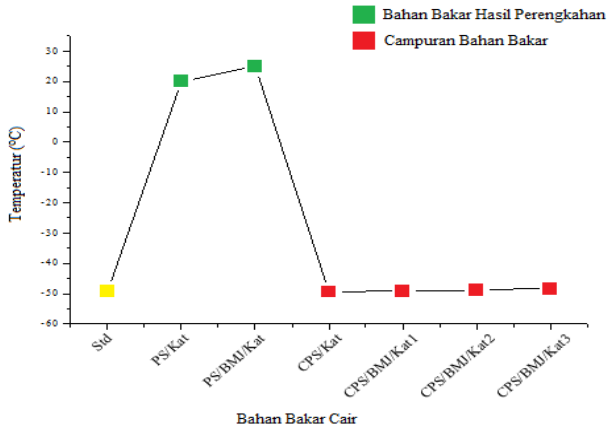


Gambar 4.17 Densitas bahan bakar cair

4.8.2 Titik Nyala Bahan Bakar Cair

Gambar 4.18 menunjukkan data titik nyala dari bahan bakar cair. Terjadi penurunan titik nyala bahan bakar hasil perengkahan terhadap campuran bahan bakar cair. Hal ini disebabkan adanya premium yang menjadi komponen utama dengan titik nyala -43°C (Pertamina, 2007) dan penambahan MTBE yang juga mempengaruhi rendahnya titik nyala campuran bahan bakar cair. Titik nyala bahan bakar hasil perengkahan PS/BMJ/Kat lebih tinggi dibanding dengan

PS/Kat dikarenakan terdapat komponen biodiesel yang memiliki titik nyala tinggi. Hasil pengujian titik nyala bahan bakar cair ditunjukkan pada Gambar 4.18.



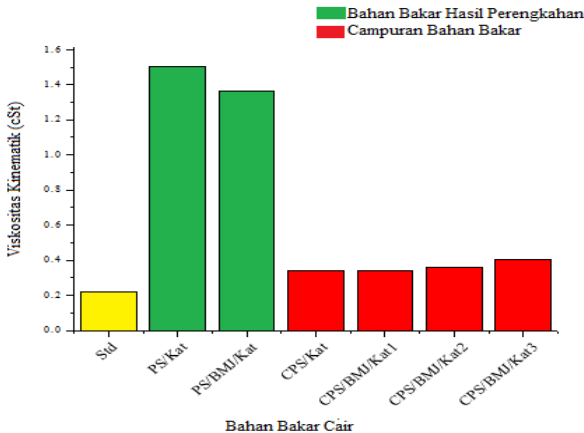
Gambar 4.18 Titik nyala bahan bakar cair

4.8.3 Viskositas Bahan Bakar Cair

Viskositas dari bahan bakar berkaitan dengan kekentalan suatu bahan bakar. Viskositas yang terlalu rendah menyebabkan kebocoran pada jalur injeksi, sedangkan viskositas yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan injeksi tersumbat dan mempersulit pengabutan bahan bakar (Hardjono, 2001). Viskositas merupakan salah satu karakterisasi fisik bahan bakar yang sangat penting. Nilai viskositas yang diperbolehkan menurut ASTM D445 adalah <math>< 1,17 \text{ cSt}</math>. Hasil pengujian viskositas dapat ditunjukkan pada Gambar 4.19.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, nilai viskositas dari hasil perengkahan PS/Kat dan PS/BMJ/Kat masing-masing adalah 1,5010 dan 1,3611 cSt. Nilai viskositas dari standar (Premium+MTBE) adalah 0,2233 cSt. Nilai viskositas dari hasil perengkahan CPS/BMJ/Kat mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan volume PS/BMJ/Kat. Nilai viskositas tertinggi pada variasi volume PS/BMJ/Kat 225 mL atau CPS/BMJ/Kat3 yaitu 0,4067 cSt. Nilai viskositas dari CPS/Kat

adalah 0,3436 cSt lebih besar dibandingkan dengan CPS/BMJ/Kat1 yaitu 0,3389 cSt yang sama-sama volume penambahan hasil perengkahan yaitu 75 mL. Nilai viskositas campuran bahan bakar cair memenuhi standar SNI 06-3506-1994 yaitu <1,17 cSt.



Gambar 4.19 Viskositas Bahan Bakar Cair

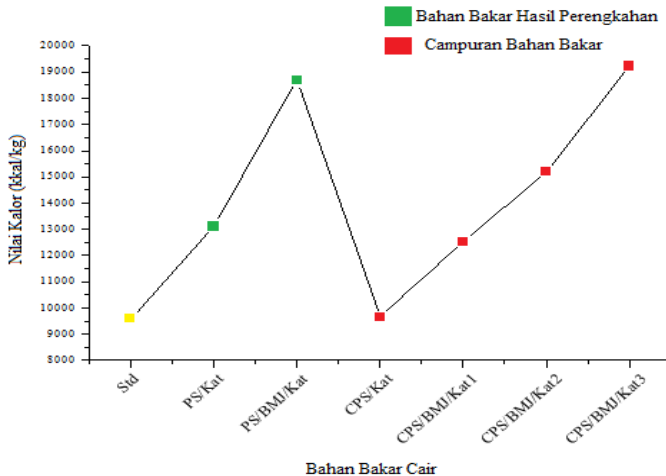
4.8.4 Nilai Kalor Bahan Bakar Cair

Energi yang dihasilkan dari bahan bakar saat terbakar dapat disebut sebagai nilai kalor bahan bakar. Hasil nilai kalor bahan bakar cair hasil perengkahan atau perengkahan dan campuran bahan bakar cair ditunjukkan pada Gambar 4.20.

Penentuan nilai kalor bahan bakar cair dilakukan dengan instrumen bom kalorimeter. Bahan bakar hasil perengkahan PS/BMJ/Kat memiliki nilai kalor yaitu 18.523 kkal/kg. Hasil tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar hasil perengkahan PS/Kat yaitu 13.045 kkal/kg.

Nilai kalor campuran bahan bakar CPS/Kat lebih rendah dibandingkan dengan CPS/BMJ/Kat1. Hal tersebut dapat terjadi karena perbedaan komposisi fraksi hidrokarbon campuran bahan bakar. Nilai kalor campuran bahan bakar pada variasi volume penambahan PS/BMJ/Kat dari Gambar 4.20 dapat diketahui bahwa semakin banyak volume yang ditambahkan maka nilai

kalor dari campuran bahan bakar semakin meningkat. Hal tersebut dapat terjadi karena komposisi bahan bakar memiliki fraksi hidrokarbon panjang ($>C_{12}$) yang lebih banyak yang menimbulkan energi yang dihasilkan saat terbakar lebih besar.



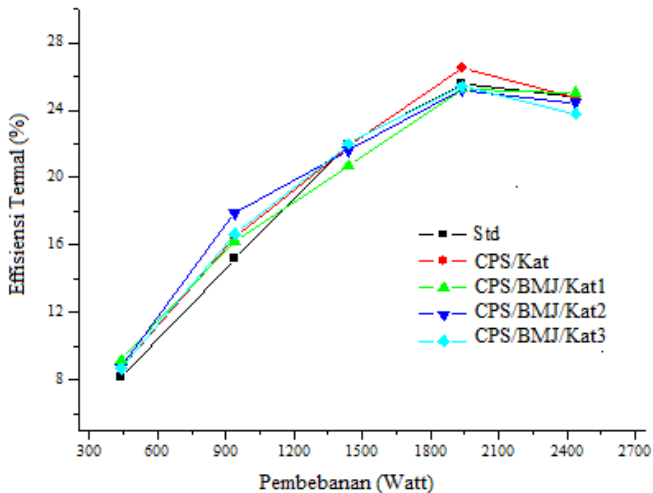
Gambar 4.20 Nilai kalor bahan bakar cair

4.9 Performa Bahan Bakar Cair pada Mesin Gasolin

Campuran bahan bakar cair dilakukan uji performa pada mesin genarot set gasolin untuk mengukur parameter *Brake Thermal Eficiency* (BTE). BTE menyatakan perengkahan energi panas menjadi energi mekanik pada mesin gasolin. Karakteristik fisik yang telah diuji seperti densitas, viskositas, dan nilai kalor sangat berpengaruh terhadap kinerja atau performa bahan bakar.

Gambar 4.21 menunjukkan pembebanan (Watt) yang diberikan semakin besar maka persen efisiensi termal campuran bahan bakar cair juga semakin meningkat. Persen efisiensi termal Std (Premium+MTBE) pada pembebanan 1938 watt sebesar 25,55%. Jenis campuran bahan bakar cair CPS/Kat pada pembebanan yang sama memiliki persen efisiensi termal yang lebih tinggi yaitu 26,47%. Peningkatan persen efisiensi termal pada CPS/Kat disebabkan komponen senyawa kimia pada PS/Kat

yang memiliki fraksi hidrokarbon pendek yaitu C₇-C₉ yang termasuk dalam fraksi hidrokarbon gasolin. Akan tetapi, pada CPS/BMJ/Kat1 yang memiliki volume penambahan yang sama dengan CPS/Kat sebanyak 75 mL pada campuran bahan bakar cair didapatkan efisiensi termal pada pembebanan yang sama lebih rendah yaitu 25,27%.



Gambar 4.21 *Brake Thermal Efficiency* (BTE) bahan akar cair

Variasi CPS/BMJ/Kat1, CPS/BMJ/Kat2, dan CPS/BMJ/Kat3 masing-masing memiliki efisiensi termal yang semakin menurun. Penurunan efisiensi termal dapat disebabkan pada peningkatan fraksi hidrokarbon (>C₁₂) yang berpengaruh pada nilai kalor bahan bakar cair yang semakin meningkat. Efisiensi termal bahan bakar cair dipengaruhi oleh viskositas, densitas, dan nilai kalor. Selain faktor tersebut, jenis mesin yang digunakan juga dapat mempengaruhi efisiensi termal (Senthur dkk. 2017).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini telah diproduksi bahan bakar cair dari limbah plastik polistirena dan ko-reaktan biodiesel minyak jelantah yang sesuai dengan SNI 06-3506-1994 dimana nilai-nilai densitas 0,71-0,77 g/cm³, viskositas <1,17 cSt, titik nyala <42°C, dan nilai kalor 10.150 kkal/kg. Karakteristik komponen kimia bahan bakar cair hasil perengkahan PS, PS/Kat60, dan PS/Kat120 tersusun hidrokarbon aromatik. Senyawa hidrokarbon aromatik maksimum sebesar 99,87% pada PS/Kat120. Komponen kimia untuk hasil perengkahan PS/BMJ/Kat60 dan PS/BMJ/Kat120 terdapat senyawa metil ester. Hasil PS/BMJ/Kat60 berupa metil ester sebesar 47,42% menurun pada PS/BMJ/Kat120 menjadi 39,31% serta terbentuk hidrokarbon alifatik sebesar 22,16%. Performa campuran bahan bakar cair jenis CPS/Kat memiliki efisiensi termal tertinggi sebesar 26,49%, dengan nilai densitas 0,7405 g/cm³, titik nyala -49,4 °C, viskositas 0,3436 cSt, dan nilai kalor 9.743 kkal/kg.

5.2 Saran

Pada proses perengkahan berlangsung perlu diperhatikan keselamatan kerja. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dilakukan variabel lain seperti temperatur, volume penambahan biodiesel minyak jelantah, dan dilakukan perengkahan berulang untuk mendapatkan kualitas yang lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Adamson. 1994. *Physical Chemistry of Surface*. New York: John Wiley & Sons.
- Ahmad, I., M.I. Khana, H. Khan, M. Ishaqa, R. Khana, dan K. Gula. 2017. "Influence of Waste Brick Kiln Dust on Pyrolytic Conversion of Polypropylene in to Potential Automotive Fuels." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 126: 247–56.
- Alfian, Riza. 2018. "Performa Bahan Bakar Cair Hasil Perengkahan Limbah Plastik Polipropilena dan Ko-reaktan Biodiesel Minyak Jelantah Pada Mesin Gasolin Dengan Aditif Metil Tersier Butil Eter." Skripsi, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Andarini, Novita, dan P. H. D. Setyawan. 2009. "Perengkahan Plastik Menjadi Senyawa Faksi Bahan Bakar Cair Melalui Reaksi Perengkahan Katalitik Dengan Katalis Ni(II)/H₅NZA." *Saintifika* 11 (2): 171–80.
- Antonakou, E., A. Lappas, M.H. Nilsen, A. Bouzga, dan M. Stocker. 2006. "Evaluation of Various Types of Al-MCM-41 Materials as Catalysts in Biomass Pyrolysis for the Production of Bio-fuels and Chemical." *Fuel* 85: 2202–12.
- Arita, Susila, Meta Berlian Dara, dan Jaya Irawan. 2008. "Pembuatan Metil Ester Asam Lemak Dari CPO OFF GRADE Dengan Metode Esterifikasi-Transesterifikasi." *Jurnal Teknik Kimia* 15 (2): 34–43.
- Billmeyer, Fred W. 1984. *Textbook of Polymer Science*. 3 ed. New York: John Wiley & Sons.
- Brennan, W.P. 1976. "Some applications of differential scanning calorimetry for the analysis of polymers." *Thermochimica Acta* 17 (3): 285–93. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(76\)80072-X](https://doi.org/10.1016/0040-6031(76)80072-X).
- Darmanto, Seno, dan Ireng Sigit. 2006. "Analisa Biodiesel Minyak Kelapa Sebagai Bahan Bakar Alternatif Minyak Diesel." *Traksi* 4 (2).

- Das, S., dan S. Pande. 2007. "Pyrolysis and Catalytic Cracking of Municipal Plastic Waste for Recovery of Gasoline Range Hydrocarbons." Thesis, Institute of Technology Rourkela.
- Effendi, M.S., dan Rabiatul Adawiyah. 2014. "Penurunan Nilai Kekentalan Akibat Pengaruh Kenaikan Temperatur Pada Beberapa Merek Minyak Pelumas." *Jurnal INTEKNA* 14 (1): 1–101.
- Erwin, R., M.K. Kaal, G. Margit, dan G.J. Hans. 2008. "Hyphenation of Aqueous Liquid Chromatography to Pyrolysis Gas Chromatography and Mass Spectrometry for the Comprehensive Characterization of Water Soluble Polymers." *Journal of Chromatography* 1186 (1–2): 222–27.
- Fatmawati, Dewi, dan Putri Diliyan Shakti. 2013. "Reaksi Metanolisis Limbah Minyak Ikan Menjadi Metil Ester Sebagai Bahan Bakar Biodiesel Dengan Menggunakan Katalis NaOH." *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri* 2 (2): 68–75.
- Gibson, L.T. 2014. "Mesosilica Materials and Organic Pollutant Adsorption: Part a Removal From Air." *Chemical Society Reviews* 43: 5163–72.
- Haber, J., J.H. Block, dan B. Delmon. 1995. "Manual of Methods and Procedures for Catalyst Characterization." *Pure and Applied Chemistry* 67: 1257–1306.
- Hajar, Erna Wati Ibnu, dan Sirril Mufidah. 2016. "Penurunan Asam Lemak Bebas Pada Minyak Goreng Bekas Menggunakan Ampas Tebu Untuk Pembuatan Sabun." *Jurnal Integrasi Proses* 6 (1): 22–27.
- Halket, J.M., dan V.G. Zaikin. 2001. "Derivatization in Mass Spectrometry-7 On-line Derivatisation/Degradation." *European Journal of Mass Spectrometry* 12 (1): 1–13.
- Handayani, Septi Puji. 2010. "Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Ikan Dengan Radiasi Gelombang Mikro." Skripsi, Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Hardjono, A. 2001. *Teknologi Minyak Bumi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

- Hasahatan, Dennis, Joko Sunaryo, dan Leily Nurul Komariah. 2012. "Pengaruh Ratio H₂SO₄ dan Waktu Reaksi Terhadap Kuantitas dan Kualitas Biodiesel dari Minyak Jarak Pagar." *Jurnal Teknik Kimia* 18 (2): 26–36.
- Hassan, El Barbary, Islam Elsayed, dan Anthonia Eseyin. 2016. "Production High Yields of Aromatic Hydrocarbons Through Catalytic Fast Pyrolysis of Torrefied Wood and Polystyrene." *Fuel* 174: 317–24.
- Irdoni, H.S., dan Ella Melyna. 2013. "Perengkahan Sampah Plastik (HDPE, PP, PS) Menjadi Precursor Bahan Bakar dengan Variasi Perbandingan Bahan Baku/Katalis H-Zeolit." *Prosiding SNTK TOPI*.
- Juwono, Hendro, Triyono, Sutarno, E.T. Wahyuni, I. Ulfin, dan F. Kurniawan. 2017. "Production of Biodiesel from Seed Oil of Nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) by Al-MCM-41 and Its Performance in Diesel Engine." *Indonesian Journal of Chemistry* 17: 316–21.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2009. "Handbook of Energy and Economic Statistic of Indonesia." *Center for Data and Information on Energy and Mineral Resources*.
- Kholidah, Nurul. 2018. "Pengaruh Temperatur Terhadap Persentase Yield Pada Proses Perengkahan Katalitik Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Cair." *ALKIMIA: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan* 2 (1): 28–33.
- Kimura, T., C. Liu, X. Li, T. Maekawa, dan S. Asaoka. 2012. "Conversion of Isoprenoid Oil by Catalytic Cracking and Hydrocracking Over Nanoporous Hybrid Catalyst." *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 1–9.
- Maneerung, T., S. Kawi, Y. Dai, dan C.H Wang. 2016. "Sustainable Biodiesel Production Via Transesterifikasi of Waste Cooking Oil by Using CaO Catalysts Prepared From Chicken Manure." *Energi Conversion and Management* 123: 487–97.
- Meng, J., J. Park, D. Tilotta, dan S. Park. 2012. "The Effect of Torrefaction on the Chemistry of Fast-Pyrolysis Bio-Oil." *Bioresour Technol* 111: 439–46.

- Naik, S.P., V. Bui, T. Ryu, J.D. Miller, dan W. Zmierczak. 2010. "Al-MCM-41 as Methanol Dehydration Catalyst." *Applied Catalysis A: General* 381: 183–90.
- Nugrahaningtyas, Khoirina Dwi, Eko Cahyono, dan Dian Maruto Widjonarko. 2015. "Reaksi Perengkahan Parafin Dengan Katalis NiMo/Zeolit Alam Aktif (ZAA): Efek Temperatur Pada Aktivitas Katalitik." *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia* 11 (2): 111–26.
- Ojha, D.K., dan R. Vinu. 2015. "Resource Recovery Via Catalytic Fast Pyrolysis of Polystyrene Using Zeolites." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 113: 340–59.
- Ordonez, E.G.F., J.A. Salbidegoitia, M.P.G. Marcos, dan J.R.G. Velasco. 2016. "Mechanism and Kinetics in Catalytic Hydrocracking of Polystyrene in Solution." *Polymer Degradation and Stability* 124: 51–59.
- Paendong, Jessy E, dan Herling D Tangkuman. 2010. "Optimasi Biodiesel Dengan Prekursor Minyak Kelapa." *Chem. Prog* 3 (1): 29–32.
- Paradela, F., F. Pinto, I. Gulyurtlu, I. Cabrita, dan N. Lapa. 2009. "Study of the co-pyrolysis of Biomass and Plastic Wastes." *Clean Techn Environ Policy* 11: 115–22.
- Parejo, O.S., A. Veses, M.V. Navarro, J.M. Lopez, R. Murillo, M.S. Callen, dan T. Garcia. 2018. "Drop-in Biofuels From The Co-pyrolysis of Grape Seeds and Polystyrene." *Chemical Engineering Journal*.
- Pavia, D.L., M.L. Gary, S.K. George, dan G.E. Randall. 2006. "Introduction to Organic Laboratory Techniques (4th Ed.)." *Thomson Brooks/Cole*, 797–817.
- Pecci, G., dan T. Floris. 1977. "Ether Up Antiknock of Gasoline." *Hydrocarbon Processing*.
- Prasetyoko, D., H. Fansuri, Y.L. Ni'mah, dan A. Fadlan. 2016. *Karakterisasi Struktur Padatan*. Yogyakarta: Deepublish.
- Rahayu, Lucia Hermawati, dan Sari Purnavita. 2014. "Pengaruh Suhu dan Waktu Adsorpsi Terhadap Sifat Kimia-Fisika Minyak Goreng Bekas Hasil Pemurnian Menggunakan Adsorben Ampas Pati Aren dan Bentonit." *Momentum* 10 (2): 35–41.

- Ramdja, A. F., LIsa Febrina, dan Daniel Krisdianto. 2010. "Pemurnian Minyak Jelantah Menggunakan Ampas Tebu Sebagai Adsorben." *Jurnal Teknik Kimia* 17 (1).
- Ratnasari, D.K., M.A. Nahil, dan P.T. Williams. 2017. "Catalytic Pyrolysis of Waste Plastics Using Staged Catalysis for Production of Gasoline Range Hydrocarbon Oils." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 124: 631–37.
- Reijnders, L. 2006. "Conditions for the Sustainability of Biomass Based Fuel Use." *Energy Policy* 34: 863–76.
- Rifaldi. 2018. "Produksi Bahan Bakar Cair Dari Limbah Plastik PP dan Ko-reaktan Biodiesel Minyak Jelantah Menggunakan Metode Perengkahan Katalitik." Skripsi, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sakthivela, R., K. Ramesh, R. Purnachandrana, dan P.M. Shameera. 2018. "A Review on the Properties, Performance, and Emission Aspects of the Third Generation Biodiesels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 2970–92.
- Santoso, Herry, Ivan Kristianto, dan Aris Setyadi. 2013. "Pembuatan Biodiesel Menggunakan Katalis Basa Heterogen Berbahan Dasar Kulit Telur." Universitas Katolik Prahayangan.
- Senthur, P. S., M. A. Asokan, R. Roy, Steff Francis, dan M. K. Sreelekh. 2017. "Performance, Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Waste Cooking Oil Bio-diesel/Diesel Blends with additives." *Energy* 122: 638–48.
- Setiabudi, A., R. Hardian, dan A. Mudzakir. 2012. *Karakterisasi Material: Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. Bandung: UPI PRESS.
- Setiawati, E., dan F. Edwar. 2012. "Teknologi Pengolahan Biodiesel dari Minyak Goreng Bekas dengan Teknik Mikrofiltrasi dan Transesterifikasi sebagai Alternatif Bahan Bakar Mesin Diesel." *Jurnal Riset Industri* 6 (2): 117–27.
- Sihombing, Junifa Layla, Ahmad Nasir Pulungan, Dewi Purnama Sari, Moondra Zubir, dan Rini Selly. 2017. "Perengkahan

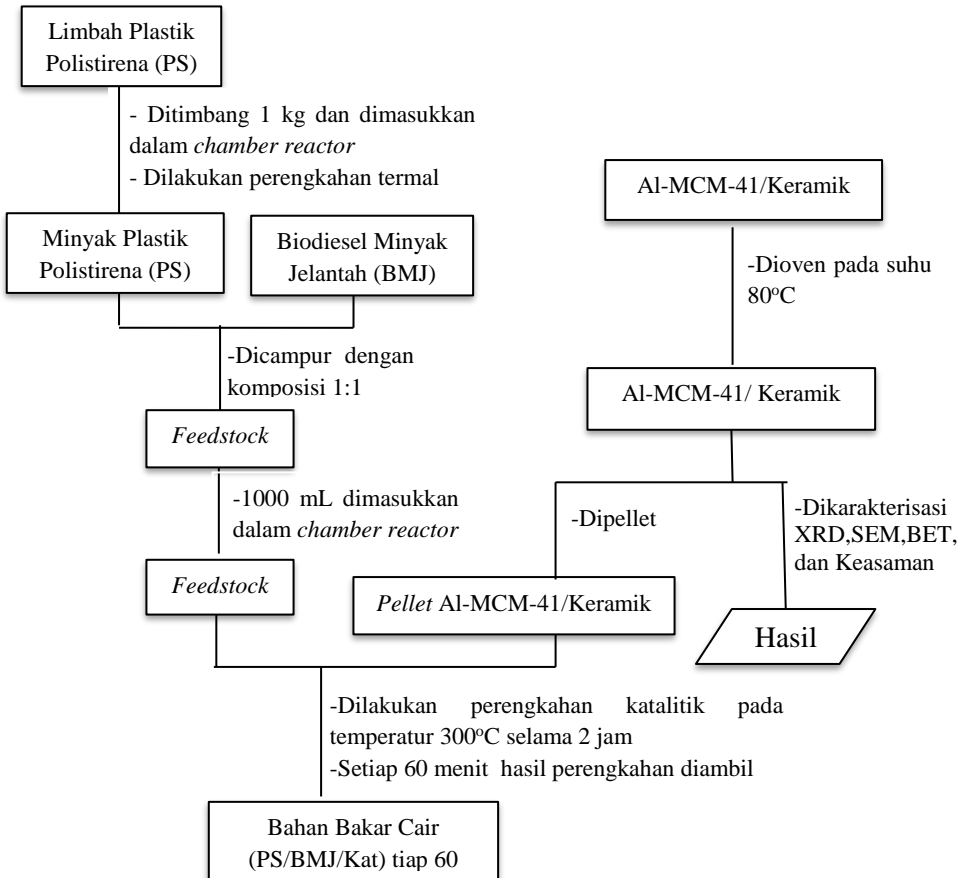
- Minyak Biji Alpukat Menjadi Fraksi Bahan Bakar Cair Melalui Proses Catalytic Cracking Menggunakan Katalis CuO/ZAA.” *Jurnal Pendidikan Kimia* 9 (2): 304–10.
- Soheil, B.S., S.S. Morteza, dan O. Fathollah. 2012. “Effect of Oxygenates Blending with Gasoline to Improve Fuel Properties.” *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 25: 792–97.
- Sudradjat, R, Endro Pawoko, D Hendra, dan D Setiawan. 2010. “Pembuatan Biodiesel dari Biji Kesambi (*Schleichera oleosa* L.)” *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 28 (4): 358–79.
- Sudradjat, R, S Yogie, D Hendra, dan D Setiawan. 2010. “Pembuatan Biodiesel Biji Kepuh dengan Proses Transesterifikasi.” *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* 28 (2): 145–55.
- Sundaryono, Agus, Arsela Eko Listiono, M. Lutfi Firdaus, dan Dewi Handayani. 2018. “Perengkahan Perengkahan Biogasolin Dari Residu Minyak Palm Oil Mills Effluent (POME) Dengan Bantuan Iradiasi Ultrasonik dan Perengkahan Katalitik.” *Jurnal Teknologi Industri Pertanian* 28 (3): 12–18.
- Supardan, Muhammad Dani. 2011. “Penggunaan Ultrasonik untuk Transesterifikasi Minyak Goreng Bekas.” *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan* 8 (1): 11–16.
- Surono, Untoro Budi. 2013. “Berbagai Metode Perengkahan Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak.” *Jurnal Teknik* 3 (1): 32–40.
- Sutanto, Rudy, Harisman Jaya, dan Arif Mulyanto. 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* 3 (2): 91–100.
- Taniguchi, B., dan R.T. Johnson. 1979. “MTBE for Octane Improvement.” *CHEM-TECH*.
- Topgul, T. 2015. “The Effects of MTBE Blends on Engine Performance and Exhaust Emissions in a Spark Ignition Engine.” *Fuel Processing Technology* 138: 483–89.

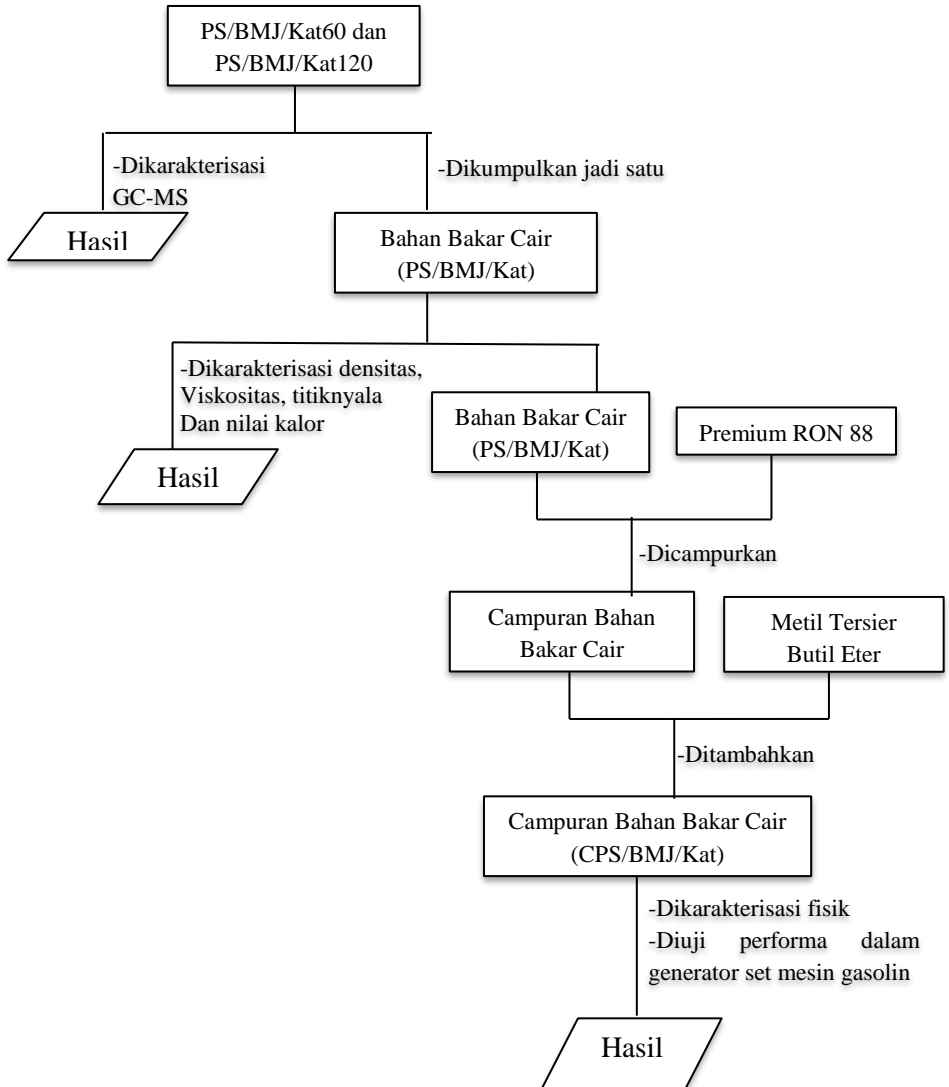
- Vaschetto, E.G., G.A. Pecchi, S.G. Casuscelli, dan G.A. Eimer. 2014. "Nature of the Active Sites in Al-MCM-41 Nano-Structured Catalysts for the Selective Rearrangement of Cyclohexanone Oxime Toward ϵ -Caprolactam." *Microporous and Mesoporous Materials* 200: 110–16.
- Widyawati, Y. 2007. "Desain proses dua tahap esterifikasi-transesterifikasi (estrans) pada pembuatan metil ester (biodiesel) dari minyak jarak pagar (*Jatropha curcas*.L)." Tesis, Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Wiratmaja, I Gede. 2010. "Pengujian Karakteristik Fisika Biogasoline Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pengganti Bensin Murni." *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 4 (2): 145–54.
- Zhang, Q., L. Shi, dan X. Meng. 2016. "Removal of Sulfur Compounds in LPG by Heteropoly Acid Modified Al-MCM-41 Mesoporous Molecular Sieve." *Royal Society of Chemistry Advances* 6: 112201–9.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

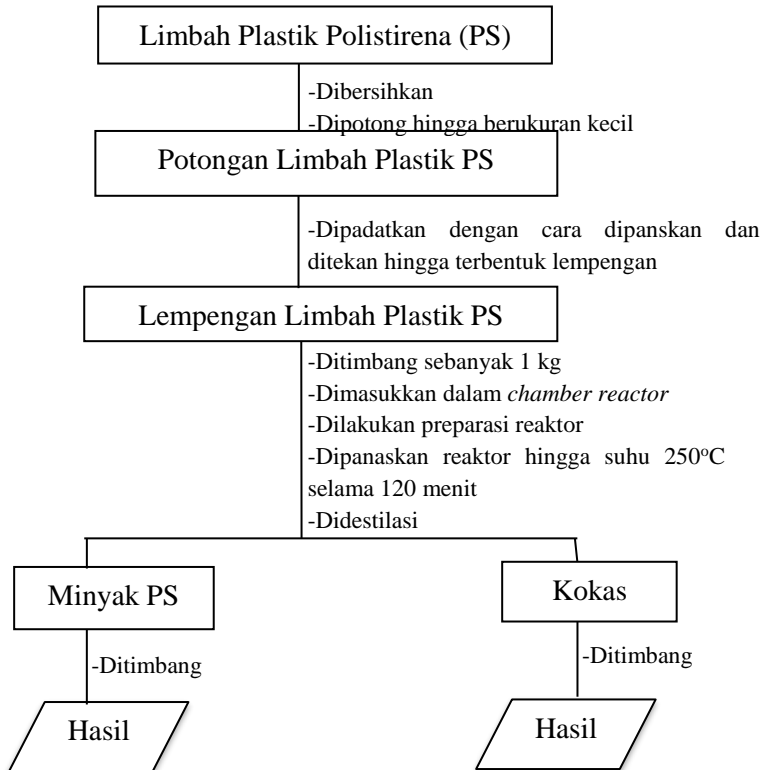
Lampiran A A.1 Skema Kerja



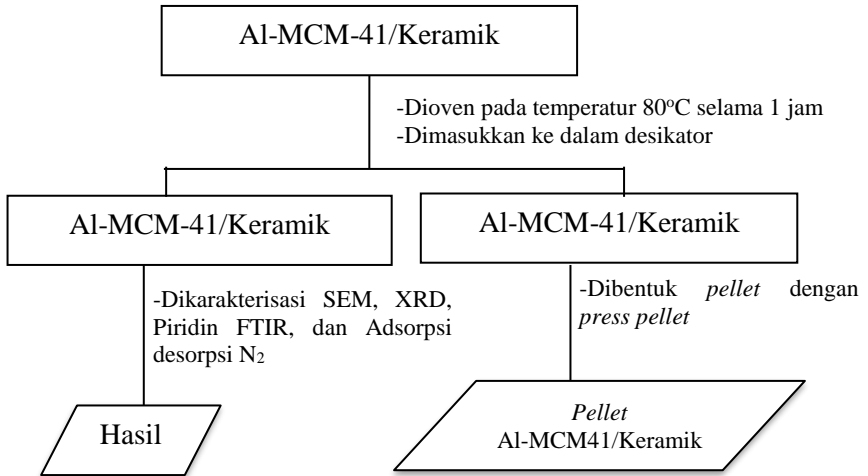


A.2 Prosedur Kerja

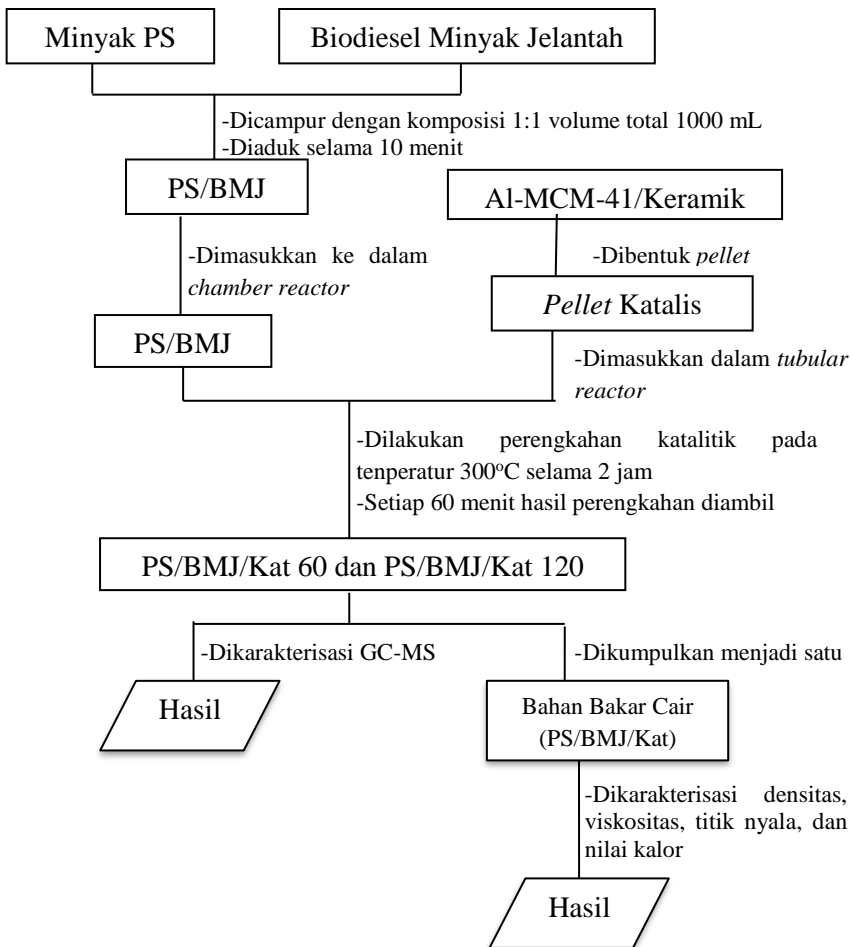
A.2.1 Sintesis Minyak Polistirena (PS) dari Limbah Plastik Polistirena



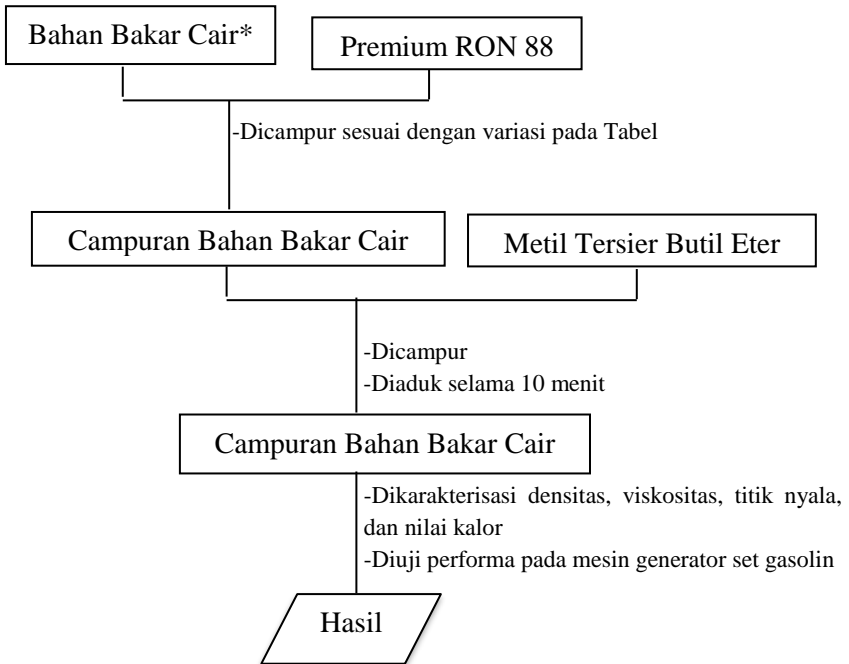
A.2.2 Preparasi Katalis



A.2.3 Sintesis dan Karakterisasi Bahan Bakar Cair



A.2.4 Karakterisasi Campuran Bahan Bakar Cair



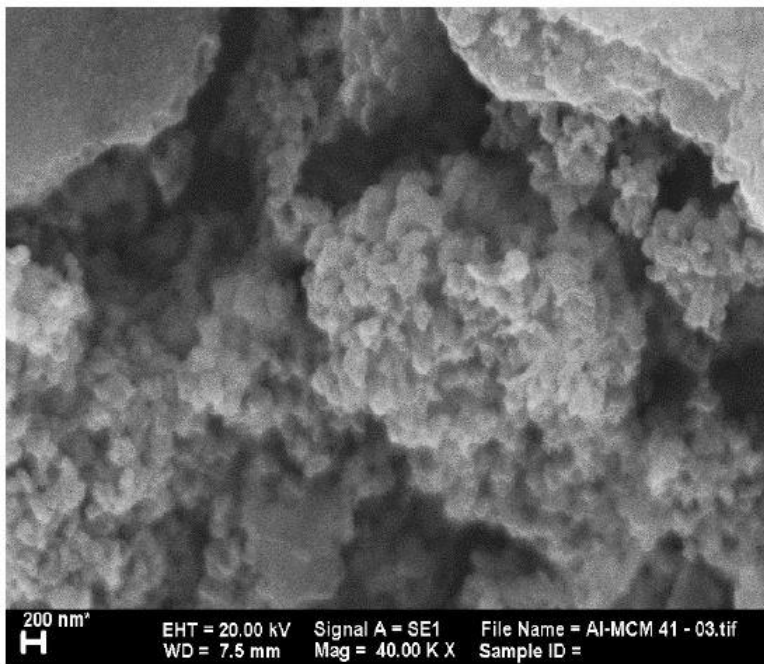
*Komposisi campuran bahan bakar cair

Variasi <i>Feedstock</i>	Volume <i>Feedstock</i> (mL)	Volume Premium (mL)	Volume MTBE (mL)	Campuran Bahan Bakar Cair (CPN)
PS/Kat	75	750	18,4	CPS/Kat
PS/BMJ/Kat	75	750	18,4	CPS/BMJ/Kat1
	150	750	18,4	CPS/BMJ/Kat2
	225	750	18,4	CPS/BMJ/Kat3

LAMPIRAN B

B.1 Karakterisasi Katalis Al-MCM-41/Keramik

B.1.1 Hasil Karakterisasi SEM

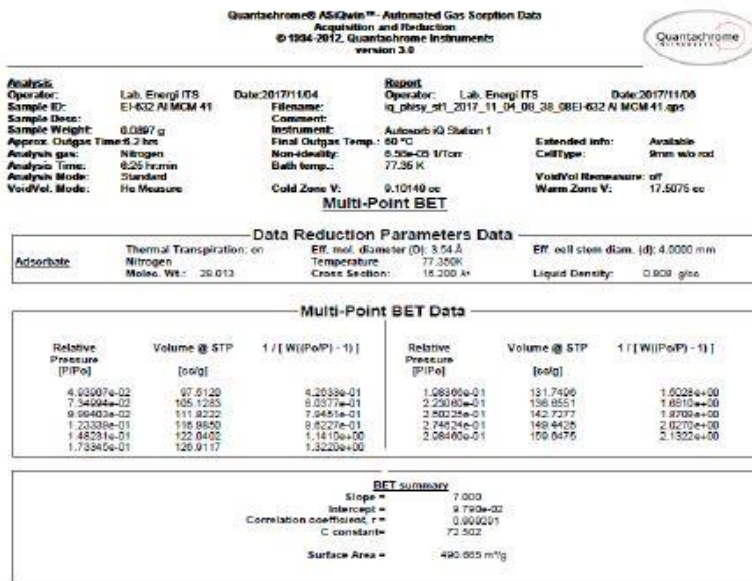


Gambar B.1 Hasil Karakterisasi SEM Katalis Al-MCM-41/Keramik

B.1.2 Hasil Karakterisasi Adsorpsi-Desorpsi N₂

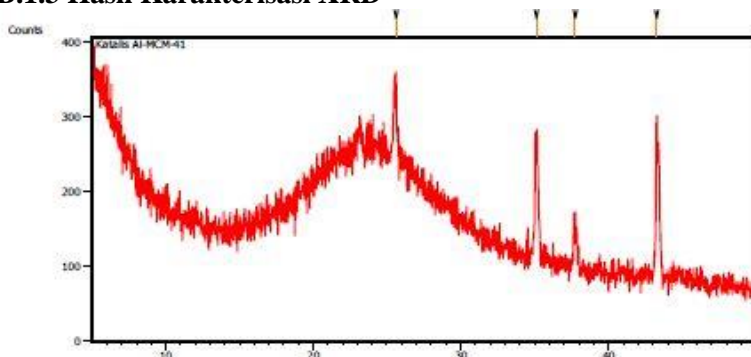


Gambar B.2 Hasil karakterisasi adsorpsi-desorpsi N₂ Katalis Al-MCM-41/Keramik



Gambar B.3 Data luas permukaan, pori dan radii katalis Al-MCM-41/Keramik

B.1.3 Hasil Karakterisasi XRD

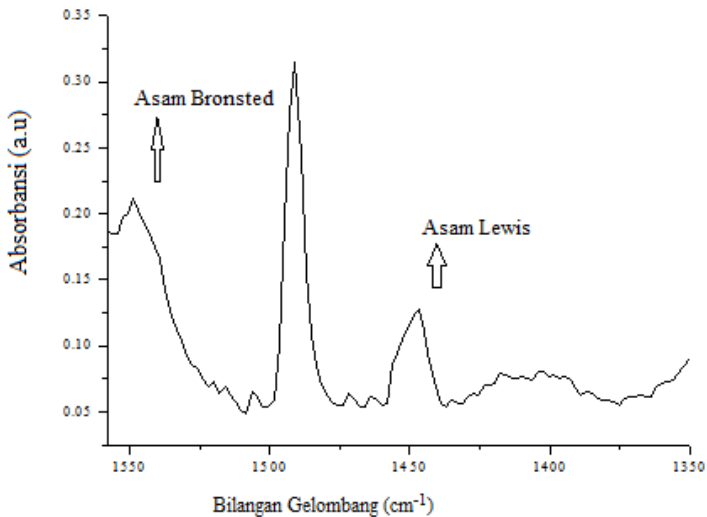


Gambar B.4 Hasil karakterisasi XRD katalis Al-MCM-41/Keramik

Tabel B.1 Hasil karakterisasi XRD katalis Al-MCM-41/Keramik

Pos. [°2Th.]	Height [a.u]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25,58	100,27	0,20	3,48	48,71
35,09	152,26	0,23	2,56	73,97
37,75	63,37	0,2	2,38	30,78
43,26	205,84	0,06	2,09	100

B.1.4 Hasil FTIR-Piridin Al-MCM-41/Keramik



Gambar B.5 Hasil karakterisasi FTIR-Piridin katalis Al-MCM-41/Keramik

Tabel B.2 Sifat keasaman dari 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

LAMPIRAN C

C.1 Produksi Minyak Polistirena (PS) dari Limbah Plastik Polistirena

Penentuan *yield* minyak PS dan kokas ditentukan berdasarkan rasio berat dengan massa jenis minyak PS sebesar 0,9176 g/mL. Adapun perhitungan *yield* dapat dilihat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Yield minyak PS} &= \frac{\text{massa minyak PS}}{\text{massa limbah PS}} \times 100\% \\ &= \frac{958,76 \text{ g}}{999,69 \text{ g}} \times 100\% \\ &= 95,9057\% \end{aligned}$$

Tabel C.1 Data produksi minyak PS dari limbah plastik PS

No.	Massa PS (g)	Minyak PS (mL)	Densitas minyak PS (g/mL)	Kokas (g)	% Minyak PS	% Kokas
1	999,69	950	0,9176	87,04	87,199	8,707
2	1131,38	1100	0,9176	86,99	89,215	7,689

C.2 Karakterisasi Bahan Bakar Cair (PS dan PS:ko-reaktan biodiesel minyak jelantah)

C.2.1 Hasil Perengkahan Bahan Bakar Cair

Penentuan *yield* bahan bakar cair dan kokas ditentukan berdasarkan rasio volume produk atau kokas dengan volume awal. Adapun perhitungan *yield* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Yield BBC} &= \frac{\text{Volume BBC}}{\text{Volume awal}} \times 100\% \\ &= \frac{911 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} \times 100\% \\ &= 91,1\% \end{aligned}$$

Perhitungan di atas adalah perhitungan *yield* BBC untuk variasi *feedstock* PS/Kat. Dengan cara yang sama diperoleh *yield* masing-masing variasi pada Tabel C.2.

Tabel C.2 Data hasil perengkahan bahan bakar cair hasil perengkahan

Variasi <i>Feedstock</i>	Volume BBC (mL)	Volume Kokas (mL)	% BBC	% Kokas
PS	874	87	87,4	8,7
PS/Kat	911	76	91,1	7,6
PS/BMJ/Kat	646	234	64,6	23,4

C.2.2 Karakterisasi Densitas Bahan Bakar Cair

Perhitungan densitas bahan bakar cair variasi *feedstock* PS/Kat, sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Massa BBC} &= 9,3084 \text{ g} \\
 \text{Volume piknometer} &= 10,182 \text{ ml} \\
 \text{Densitas} &= \frac{\text{massa bahan bakar cair}}{\text{volume piknometer}} \\
 &= \frac{9,3084 \text{ g}}{10,182 \text{ mL}} \\
 &= 0,9142 \text{ g/mL}
 \end{aligned}$$

Perhitungan densitas pada masing-masing variasi ditunjukkan pada Tabel C.3.

Tabel C.3 Data pengukuran densitas bahan bakar cair

Jenis Bahan Bakar	Massa piknometer (g)	Massa piknometer + BBC (g)	Massa BBC (g)	Volume piknometer (mL)	Densitas (g/mL)
PS/Kat	16,8785	26,1869	9,3084	10,182	0,9142
PS/BMJ/Kat	16,8767	25,9057	9,0290	10,182	0,8868
CPS/Kat	17,2563	24,8055	7,5492	10,195	0,7405
CPSJ/B MJ/Kat1	17,2554	24,7016	7,4462	10,195	0,7304
CPSJ/B MJ/Kat2	16,8804	24,5089	7,6285	10,182	0,7492
CPSJ/B MJ/Kat3	17,2526	24,9971	7,7445	10,195	0,7596
Std	17,2515	24,5004	7,2489	10,195	0,7110

C.2.3 Karakterisasi Titik Nyala Bahan Bakar Cair

Tabel C.4 Data titik nyala bahan bakar cair

Jenis Bahan Bakar	Temperatur (°C)
Std	-49,2
PS/Kat	20
PS/BMJ/Kat	25
CPS/Kat	-49,4
CPS/BMJ/Kat1	-49,1
CPS/BMJ/Kat2	-48,8
CPS/BMJ/Kat3	-48,3

C.2.4 Karakterisasi Viskositas Bahan Bakar Cair

Perhitungan viskositas bahan bakar cair variasi *feedstock*

PS/Kat, sebagai berikut:

$$\eta_0 (40^\circ\text{C}) = 0,658 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 0,658 \text{ cSt}$$

$$t_0 = 3,7 \text{ s}$$

$$\rho_0 = 996,44 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{\text{BBC}} = 9,2 \text{ s}$$

$$\rho_{\text{BBC}} = 914,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{BBC}} &= \eta_0 \frac{t_{\text{BBC}} \times \rho_{\text{BBC}}}{t_0 \times \rho_0} \\ &= 0,658 \frac{9,2 \times 914,2}{3,7 \times 996,44} \\ &= 1,5010 \text{ cSt} \end{aligned}$$

Perhitungan viskositas pada masing-masing variasi ditunjukkan pada Tabel C.5.

Tabel C.5 Data pengukuran viskositas bahan bakar cair

Jenis Bahan Bakar	t_{BBC} (s)	ρ_{BBC} (kg/m ³)	η_0 (cSt)	t_0 (s)	ρ_0 (kg/m ³)	η_{BBC} (cSt)
PS/Kat	9,2	914,2	0,658	3,7	996,44	1,5010
PS/BMJ	8,6	886,8	0,658	3,7	996,44	1,3611
CPS/Kat	2,6	740,5	0,658	3,7	996,44	0,3436
CPSJ/BMJ/Kat1	2,6	730,4	0,658	3,7	996,44	0,3389
CPS/BMJ/Kat2	2,7	749,2	0,658	3,7	996,44	0,3610
CPS/BMJ/Kat3	3,0	759,6	0,658	3,7	996,44	0,4067
Std	1,76	711,0	0,658	3,7	996,44	0,2233

C.2.5 Karakterisasi Nilai Kalor Bahan Bakar Cair

Perhitungan nilai kalor bahan bakar cair CPS/Kat, sebagai berikut:

Cv asam benzoat : 1.974,375 (kal/°C)

Faktor koreksi sisa kawat : 2,3 kal

$$\begin{aligned} \text{Nilai kalor} &= \frac{(\text{Cv asam benzoat} \times (\text{T2} - \text{T1})) + \text{Qv sisa kawat}}{\text{berat sampel}} \\ &= \frac{(1.974,375 \times (35,9 - 30,3)) + 0}{1,0384} \\ &= 9595,99 \text{ kal/g} \end{aligned}$$

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

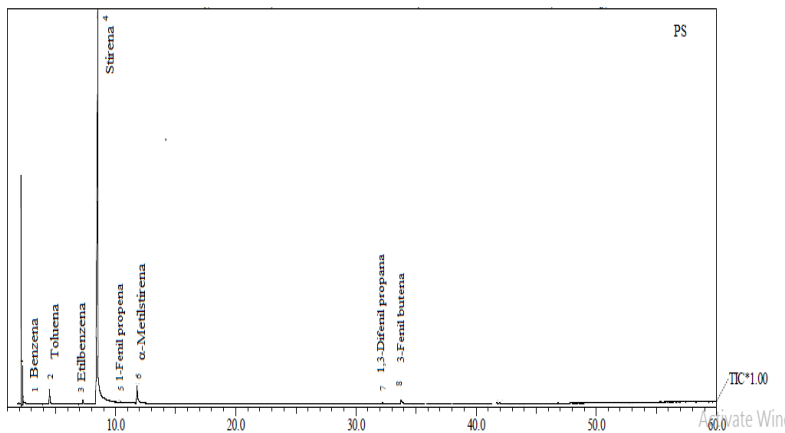
Tabel C.6 Data nilai kalor bahan bakar cair

Jenis Bahan Bakar	Berat sampel (g)	T1 (°C)	T2 (°C)	Sisa kawat	Qv sisa kawat (kal)	Nilai Kalor (kal/g)
Std	1,0384	30,3	35,9	0	0	9595,99
PS/Kat	1,0144	30,3	37,0	2,4	5,52	13045,52
PS/BMJ/Kat	1,0659	30,4	40,4	0	0	18523,08
CPS/Kat	1,0334	29,8	34,9	0	0	9743,87
CPS/BMJ/Kat1	1,0606	30,3	37,0	0	0	12472,48
CPS/BMJ/Kat2	1,0933	30,2	38,6	0	0	15169,44
CPS/BMJ/Kat3	1,0370	29,9	40,0	2,3	5,29	19234,98

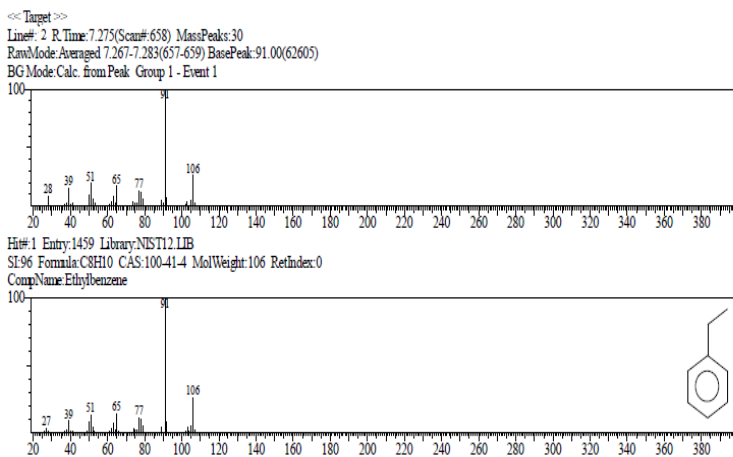
LAMPIRAN D

D.1 Hasil Karakterisasi GC-MS Fraksi Rantai Hidrokarbon dalam Bahan Bakar Cair

D.1.1 Perengkahan PS



Gambar D.1 Kromatogram GC dari PS

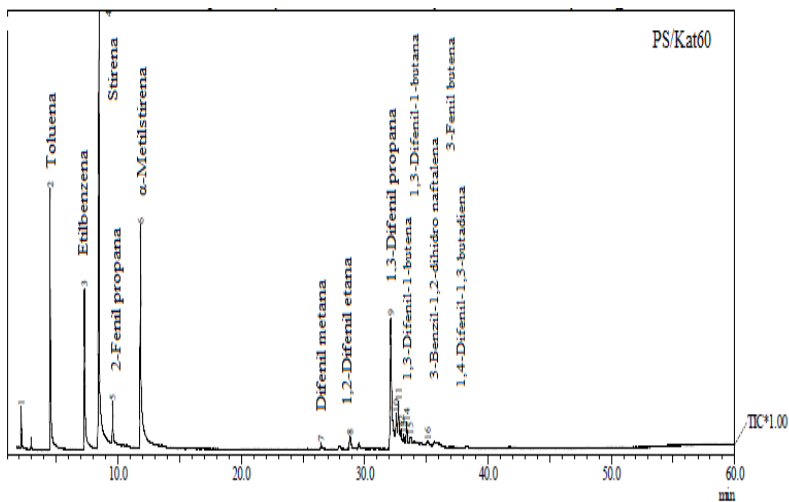


Gambar D.2 Kromatogram MS PS

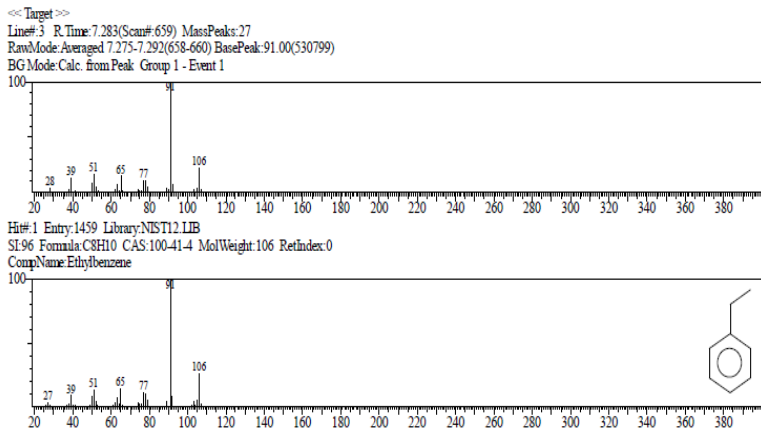
Tabel D.1 Data luas bahan bakar cair (BBC) hasil perengkahan termal polistirena

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	Area %	Rumus Kimia	Nama Senyawa
1	2,944	2,908	3,042	0,07	C ₆ H ₆	Benzena
2	4,490	4,408	4,725	2,33	C ₇ H ₈	Toluena
3	7,275	7,192	7,433	0,57	C ₈ H ₁₀	Etilbenzena
4	8,513	8,300	9,367	88,08	C ₈ H ₈	Stirena
5	10,418	10,333	10,483	0,08	C ₉ H ₁₀	1-Fenil propena
6	11,793	11,708	12,092	3,43	C ₉ H ₁₀	α -metil stirena
7	32,208	32,108	32,358	0,32	C ₁₅ H ₁₆	1,3-difenil propana
8	33,743	33,642	34,025	1,12	C ₁₀ H ₁₂	3-Fenil butena

D.2 Perengkahan PS/Kat60



Gambar D.3 Kromatogram GC dari PS/Kat60

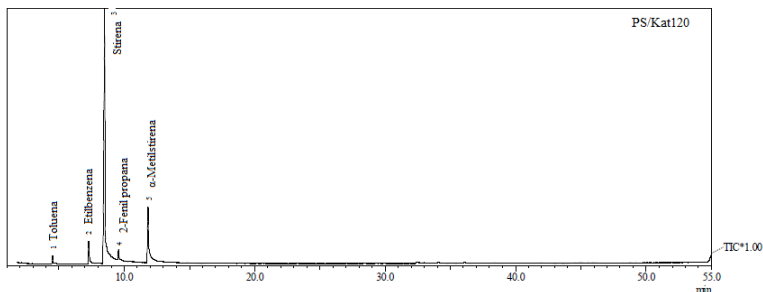


Gambar D.4 Kromatogram MS dari PS/60

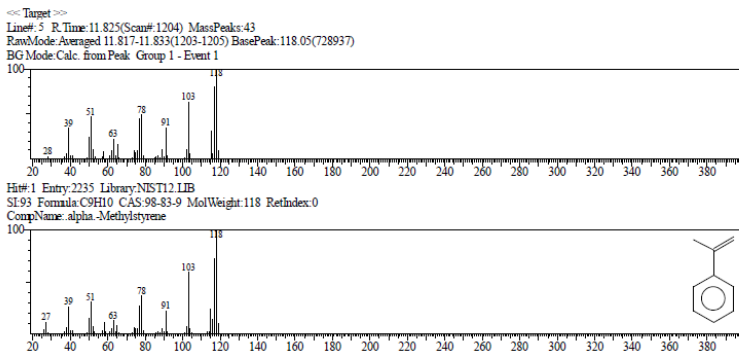
Tabel D.2 Data luas bahan bakar cair (BBC) hasil perengkahan katalitik polistirena (60 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	Area %	Rumus Kimia	Nama Senyawa
1	4,498	4,425	4,492	11,76	C ₇ H ₈	Toluena
2	7,280	7,192	7,742	9,23	C ₈ H ₁₀	Etil benzena
3	8,463	8,317	9,183	30,63	C ₈ H ₈	Stirena
4	9,558	9,467	9,883	2,24	C ₉ H ₁₂	2-fenil propana
5	11,825	11,692	12,567	17,59	C ₉ H ₁₀	α -metil stirena
6	26,457	26,375	26,675	0,51	C ₁₃ H ₁₂	Difenil metana
7	28,803	28,717	29,017	0,96	C ₁₄ H ₁₄	Difenil etana
8	32,115	31,933	32,450	13,52	C ₁₅ H ₁₆	1,3-difenil propana
9	32,549	32,450	32,650	3,05	C ₁₆ H ₁₆	1,3-difenil-1-butena
10	32,736	32,650	32,875	4,00	C ₁₆ H ₁₈	1,3-difenil-1-butana
11	32,960	32,875	33,067	1,48	C ₁₇ H ₁₆	3-benzil-1,2-dihidro naftalena
12	33,143	33,067	33,317	0,98	C ₁₆ H ₁₆	1,3-dipenil-1-butena
13	33,403	33,317	33,558	1,46	C ₁₇ H ₁₆	3-benzil-1,2-dihidronaft alena
14	33,678	33,558	33,917	0,89	C ₁₀ H ₁₂	3-fenil-butena
15	35,101	34,925	35,317	0,55	C ₁₆ H ₁₄	1,4-difenil-1,3-butadiena

D.3 Perengkahan PS/Kat120



Gambar D.5 Kromatogram GC dari PS/Kat120

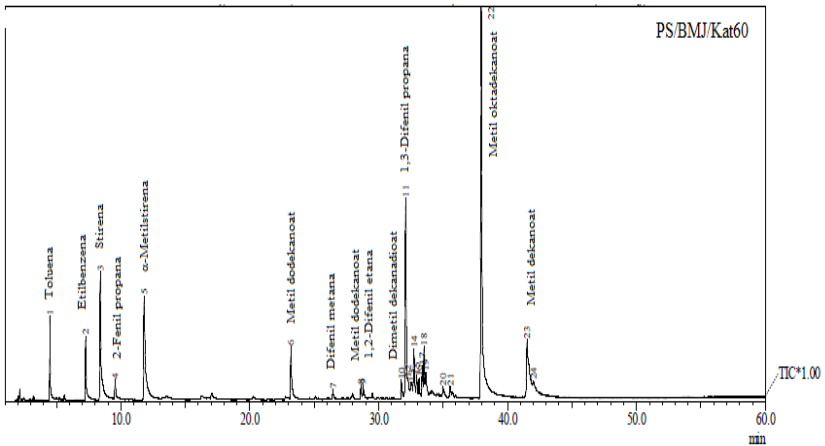


Gambar D.6 Kromatogram MS dari PS/Kat120

Tabel D.3 Data luas bahan bakar cair (BBC) hasil perengkahan katalitik polistirena (120 menit)

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	Area %	Rumus Kimia	Nama Senyawa
1	4,501	4,433	4,692	1,52	C ₇ H ₈	Toluena
2	7,280	7,200	7,533	5,27	C ₈ H ₁₀	Etilbenzena
3	8,507	8,325	9,167	73,38	C ₈ H ₈	Stirena
4	9,567	9,483	9,858	2,34	C ₉ H ₁₂	2-Fenilpropana
5	11,824	11,717	12,333	17,36	C ₉ H ₁₀	α-metil stirena

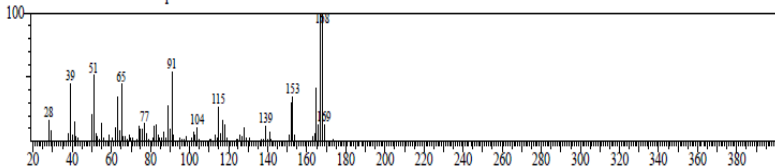
D.4 Perengkan PS/BMJ/Kat60



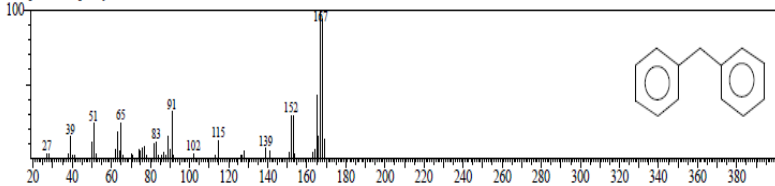
Gambar D.7 Kromatogram GC dari PS/BMJ/Kat60

<< Target >>

Line# 7 R.Time:26.442(Scan#:2958) MassPeaks: 89
 RawMode:Averaged 26.433-26.450(2957-2959) BasePeak:167.95(20725)
 BGMode:Calc. from Peak Group 1 - Event 1



Hit# 1 Entry:5899 Library:NIST12.LIB
 SI:86 Formula:C13H12 CAS:101-81-5 MolWeight:168 RetIndex:0
 CompName:Diphenylmethane



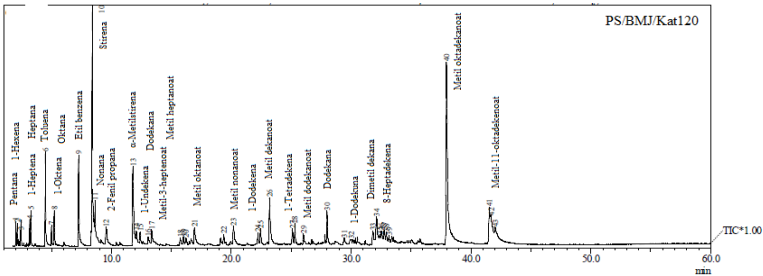
Gambar D.8 Kromatogram MS dari PS/BMJ/Kat60

Tabel D.4 Data luas bahan bakar cair (BBC) hasil perengkahan PS/BMJ/Kat60

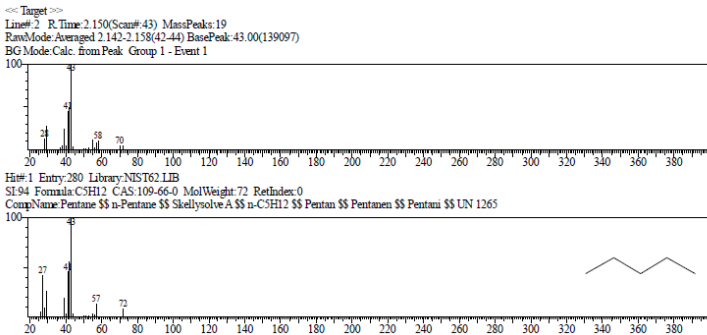
Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	Area %	Rumus Kimia	Nama Senyawa
1	4,488	4,425	4,717	3,25	C ₇ H ₈	Toluena
2	7,267	7,192	7,542	3,18	C ₈ H ₁₀	Etilbenzena
3	8,401	8,283	8,833	8,33	C ₈ H ₈	Stirena
4	9,547	9,475	9,742	0,96	C ₉ H ₁₂	2-Fenil propana
5	11,803	11,708	12,308	9,21	C ₉ H ₁₀	α -Metilstirena
6	23,188	23,092	23,500	3,66	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	Metil dekanat
7	26,441	26,350	26,592	0,59	C ₁₃ H ₁₂	Difenil metana
8	28,632	28,525	28,717	0,69	C ₁₂ H ₂₆ O ₂	Metil dodekanat
9	28,791	28,717	28,983	0,89	C ₁₄ H ₁₄	1,2-Difenil etana
10	31,751	31,667	31,925	1,30	C ₁₂ H ₂₂ O ₄	Dimetil dekanat
11	32,096	31,925	32,233	12,52	C ₁₅ H ₁₆	1,3-Difenil propana
12	32,275	32,233	32,350	1,14	C ₁₁ H ₁₂	,2-Benzo-1,3-siklo heptadiena
13	32,562	32,350	32,633	1,88	C ₁₆ H ₁₆	1,3-Difenil-1-butena
14	32,727	32,633	32,858	3,46	C ₁₆ H ₁₆	Dimerstirena
15	32,945	32,858	33,042	1,28	C ₁₇ H ₁₆	3-Benzil-1,2-dihidro naftalena
16	33,133	33,042	33,275	1,03	C ₁₆ H ₁₆	1,3-Difenil-1-butena
17	33,391	33,275	33,442	1,41	C ₁₇ H ₁₆	3-Benzil-1,2-dihidro naftalena
18	33,507	33,442	33,575	2,30	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	Metil tetradekanat

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	Area %	Rumus Kimia	Nama Senyawa
19	33,638	33,575	33,892	1,81	C ₁₀ H ₁₂	3-Fenil butena
20	34,971	34,875	35,250	0,90	C ₁₆ H ₁₆	1,3-Difenil-1-butena
21	35,544	35,417	35,658	0,72	C ₁₆ H ₁₆	1,3-Difenil-1-butena
22	37,959	37,808	38,533	30,02	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	Metil oktadekanoat
23	41,507	41,375	41,925	8,05	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Metil-11-Oktadekanoat
24	41,999	41,925	42,292	1,40	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	Metil oktadekanoat

D.5 Perengkahan PS/BMJ/Kat120



Gambar D.9 Kromatogram PS/BMJ/Kat120



Gambar D.10 Kromatogram MS dari PS/BMJ/Kat120

Tabel D.6 Data luas bahan bakar cair (BBC) hasil perengkahan PS/BMJ/Kat120

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	Area %	Rumus Kimia	Nama Senyawa
1	2,148	2,100	2,200	0,61	C ₅ H ₁₂	Pentana
2	2,450	2,375	2,550	1,04	C ₆ H ₁₂	1-Hexena
3	3,186	3,150	3,242	0,68	C ₇ H ₁₄	1-Heptena
4	3,282	3,242	3,350	0,89	C ₇ H ₁₆	Heptana
5	4,487	4,408	4,742	4,32	C ₇ H ₈	Toluena
6	5,000	4,917	5,117	0,84	C ₈ H ₁₆	1-Oktena
7	5,236	5,117	5,383	1,40	C ₈ H ₁₈	Oktana
8	7,265	7,183	7,500	4,92	C ₈ H ₁₀	Etilbenzena
9	8,410	8,250	8,575	15,26	C ₈ H ₈	Stirena
10	8,628	8,575	8,800	2,40	C ₉ H ₂₀	Nonana
11	9,551	9,475	9,758	1,49	C ₉ H ₁₂	2-Fenil propana
12	11,797	11,717	12,025	6,45	C ₉ H ₁₀	α -Metilstirena
13	12,090	12,025	12,258	1,18	C ₁₁ H ₂₂	1-Undekena
14	12,408	12,258	12,558	0,80	C ₁₂ H ₂₆	Dodekana
15	13,067	12,975	13,217	0,55	C ₈ H ₁₄ O ₂	Metil-3-heptenoat
16	13,365	13,217	13,525	0,90	C ₈ H ₁₆ O ₂	Metil heptanoat
17	15,743	15,667	15,850	0,53	C ₁₁ H ₂₂	1-Undekena
18	16,021	15,850	16,142	0,64	C ₁₂ H ₂₆	Dodekana
19	16,218	16,142	16,383	0,53	C ₁₁ H ₂₂	2-Undekena
20	16,921	16,850	17,167	1,53	C ₉ H ₁₈ O ₂	Metil oktanoat
21	19,363	19,192	19,492	0,67	C ₁₂ H ₂₆	Dodekana
22	20,177	20,108	20,508	1,98	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	Metil nonanoat
23	22,212	22,125	22,350	0,73	C ₁₂ H ₂₄	1-Dodekena
24	22,441	22,350	22,592	0,91	C ₁₂ H ₂₆	1-Tetradekena
25	23,192	23,092	23,517	4,37	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	Metil dekanat
26	25,095	25,008	25,225	0,99	C ₁₄ H ₂₈	1-Tetradekena

Peak	Waktu Retensi	Waktu Awal	Waktu Akhir	Area %	Rumus Kimia	Nama Senyawa
27	25,303	25,225	25,450	1,13	C ₁₂ H ₂₆	Dodekana
28	26,016	25,933	26,133	0,60	C ₁₂ H ₂₆ O ₂	Metil dodekanoat
29	27,994	27,908	28,200	1,96	C ₁₂ H ₂₆	Dodekana
30	29,436	29,283	29,592	0,60	C ₁₄ H ₂₈	Oktil sikloheksana
31	29,998	29,817	30,100	0,64	C ₁₂ H ₂₂	1-Dodekuna
32	31,806	31,700	31,950	1,40	C ₁₂ H ₂₂ O ₄	Dimetil dekanadioat
33	32,122	31,950	32,342	3,61	C ₁₅ H ₁₆	1,3-Difenil propana
34	32,403	32,342	32,467	0,72	C ₁₇ H ₃₄	8-Heptadekena
35	32,537	32,467	32,675	1,36	C ₁₇ H ₃₄	8-Heptadekena
36	32,765	32,675	32,875	1,24	C ₁₆ H ₁₆	Dimerstirena
37	32,926	32,875	33,075	0,91	C ₁₃ H ₂₈	Tridekana
38	33,156	33,075	33,292	0,58	C ₁₆ H ₁₆	1,3-Difenil-1-butena
39	37,959	37,825	38,375	18,86	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	Metil oktadekanoat
40	41,527	41,400	41,617	3,39	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Metil-11-Oktadekanoat
41	41,675	41,617	41,933	3,93	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Metil-11-Oktadekanoat
42	42,010	41,933	42,308	1,80	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	Metil oktadekanoat

LAMPIRAN E

E.1 Data Performa Jenis Bahan Bakar Cair dalam Generator Set Gasolin

Perhitungan efisiensi termal campuran bahan bakar jenis

CPS/Kat

$$\text{Daya Power} = 2.438 \text{ watt} = 8776,8 \text{ kJ/jam}$$

$$\text{LHV} = 40.000 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Laju bahan bakar (M}_{\text{bbc}}) = 0,89 \text{ kg/jam}$$

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{\text{BHP}}{\text{M}_{\text{bbc}} \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$= \frac{8776,8}{0,85 \times 40.000} \times 100\%$$

$$= 24,72\%$$

Tabel F.1 Performa campuran bahan bakar cair pada mesin gasolin

Beban	Tegangan (V)	Arus (A)	t/20cc bb (sc)	Daya G (Watt)	Daya P (Watt)	Torsi (N-m)	mbb (kg/jam)	Bmep (Pa)	BSFC (kg/w-jam)	Eff (%)
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
CPS/Kat										
4	220	1,40	106	385	438	1,23	0,45	11515	0,0010	8,71
8	220	3,00	92	825	938	2,63	0,51	24675	0,0005	16,46
12	220	4,60	87	1265	1438	4,03	0,59	37835	0,0004	21,84
16	220	6,20	75	1705	1938	5,43	0,66	50995	0,0003	26,49
20	220	7,80	60,08	2145	2438	6,83	0,89	64155	0,0004	24,72
CPS/BMJ/Kat1										
4	220	1,50	120,02	413	438	1,31	0,46	12337	0,0010	9,15
8	220	3,10	101	853	938	2,71	0,54	25497	0,0006	16,25
12	220	4,60	89	1265	1438	4,03	0,63	37835	0,0004	20,67
16	220	6,30	82	1733	1938	5,52	0,70	51817	0,0004	25,27
20	220	7,80	60,02	2145	2438	6,83	0,88	64155	0,0004	25,05

Beban	Tegangan (V)	Arus (A)	t/20cc bb (sc)	Daya G (Watt)	Daya P (Watt)	Torsi (N-m)	mbb (kg/jam)	Bmep (Pa)	BSFC (kg/w-jam)	Eff (%)
CPS/BMJ/Kat2										
4	220	1,40	120,05	385	438	1,23	0,45	11515	0,0010	8,76
8	220	3,40	101	935	938	2,98	0,53	27965	0,0005	17,9
12	220	4,60	86	1265	1438	4,03	0,63	37835	0,0004	21,63
16	220	6,20	78	1705	1938	5,43	0,69	50995	0,0004	25,21
20	220	7,80	60,08	2145	2438	6,83	0,90	64155	0,0004	24,43
CPS/BMJ/Kat3										
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	1938	5,34	0,68	50172	0,0004	25,41
20	220	7,70	60,09	2118	2438	6,74	0,91	63332	0,0004	23,79

F. Standar Baku Mutu Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin

Karakteristik	Metode	Nilai
Sifat Fisik		
Densitas pada 15°C (g/cm ³)	ASTM D 1480	0,71-0,77
Kadar Abu (% berat)	ASTM D 86	-
Kadar Residu Karbon (% berat)	ASTM D189-05	0,14
Sifat Alir		
Viskositas pada 40°C (mm ² /s)	ASTM D 445	1,17
Sifat Pembakaran		
Nilai Kalor (kkal/kg)	ASTM D 4809-13	10.150
Titi Nyala (°C)	ASTM D 93	42
Sifat Anti-Knock		
Angka Oktan (RON)	ASTM D 2885	88
Angka <i>Cetane</i>	ASTM D 613	-

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Anas Assari yang lahir di Surabaya pada tanggal 22 Mei 1996. Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Penulis pernah menempuh pendidikan di SDN Rangkah IX/171 Surabaya, SMPN 37 Surabaya, dan SMKN 5 Jurusan Kimia Analis Surabaya. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Kimia Fakultas Sains (FS) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui jalur SBMPTN pada tahun 2015 dan terdaftar sebagai mahasiswa Kimia ITS dengan NRP 0121154000086. Penulis pernah melakukan kerja praktik di PT. SUCOFINDO Surabaya ditempatkan di Laboratorium Mineral dan Batubara. Penulis pernah menjabat sebagai Kepala Departemen Sosial Pendidikan KSE ITS tahun 2018/2019 dan Staf Ahli Riset, Teknologi, dan Profesi HIMKA ITS tahun 2017/2018. Penulis menyelesaikan pendidikannya di Departemen Kimia FS ITS dengan mengambil tugas akhir yang berjudul **“PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR HASIL PERENKAHAN KATALITIK LIMBAH PLASTIK POLISTIRENA (PS) DAN KO-REAKTAN BODIESEL MINYAK JELANTAH MENGGUNAKAN KATALIS Al-MCM-41/KERAMIK”** yang dibimbing oleh Dr. Hendro Juwono, M.Si. Penulis dapat diajak berdiskusi mengenai tugas akhir dan dihubungi melalui email anasassari96@gmail.com