

LAPORAN PENELITIAN

**INOVASI SINTESIS BAHAN BAKAR CAIR BERBAHAN DASAR
LIMBAH PLASTIK HDPE DAN PP DENGAN TEKNOLOGI *CATALYTIC*
PYROLYSIS MENGGUNAKAN KATALIS ZEOLIT ALAM BAYAH**



Disusun oleh:

MUHAMMAD YUSRIL NASHEH (3335200029)

MUHAMMAD FATHI RIZQILLAH (3335200108)

JURUSAN TEKNIK KIMIA-FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA

CILEGON-BANTEN

2023

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

NAMA : Muhammad Fathi Rizqillah

NIM :3335200108

JURUSAN :Teknik Kimia

JUDUL : Pengaruh Zeolite Alam Bayah Pada Proses *Pyrolysis* Bahan bakar Cair Berbahan Dasar Campuran Limbah Plastik HDPE dan PP

Menyatakan bahwa penelitian dengan judul tersebut adalah benar karya saya dengan arahan pembimbing dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain kecuali telah disebutkan sumbernya.

Apabila dikemudian hari saya terbukti melakukan plagiasi dalam penelitian ini, saya bersedia menerima konsekuensi sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Cilegon, 11 November 2024



Muhammad Fathi Rizqillah

LAPORAN PENELITIAN

PENGARUH ZEOLITE ALAM BAYAH PADA PROSES PYROLYSIS BAHAN BAKAR CAIR BERBAHAN DASAR CAMPURAN LIMBAH PLASTIK HDPE DAN PP

disusun oleh:

Muhammad Yusril Nasheh 3335200029

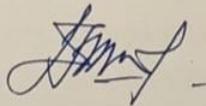
Muhammad Fathi Rizqillah 3335200108

Telah Disetujui Oleh Dosen Pembimbing dan Telah dipertahankan di hadapan

Dewan Penguji

Pada Tanggal 22 Desember 2023

Dosen Pembimbing



Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng.

NIP. 197510222005011002

Dosen Penguji I



Prof. Dr. Ing Anton Irawan, S.T., M.T.,

IPM, Ascan Eng.

NIP. 197510012008011007

Dosen Penguji II



Hafid Alwan, S.T., M.T.

NIP. 199012132019031011

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Kimia**



Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng.

NIP. 197510222005011002

ABSTRAK
PYROLYSIS PLASTIC

Oleh:

Muhammad Yusril Nasheh (3335200108)

Muhammad Fathi Rizqillah (3335200108)

Pirolisis merupakan salah satu metode dalam mengkonversi plastik menjadi bahan bakar cair. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk memanfaatkan limbah plastik untuk produksi bahan bakar cair, mendapatkan kondisi optimal untuk menghasilkan bahan bakar cair yang paling besar, memperoleh data dalam skala laboratorium untuk proses *scaling-up* ke skala pilot, serta mendapatkan data kelayakan dan teknoekonominya. Pada penelitian kali ini, menggunakan metode pirolisis dengan suhu 350°C selama 300 menit menggunakan bahan baku plastik jenis HDPE dan PP dengan variasi komposisi 7:3, 5:5, dan 3:7 serta katalis zeolit alam bayah yang telah diaktivasi dan divariasikan jumlahnya sebanyak 0%, 3%, dan 5%. Selanjutnya dilakukan analisa uji yield, uji densitas, uji viskositas, dan uji nilai kalor, serta uji komposisi rendemen cair yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan di laboratorium Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa dan IPST Asari. Hasil dari penelitian ini yaitu Yield rendemen cair yang tertinggi didapat pada variasi komposisi HDPE 30%, PP 70%, dan katalis 0% yaitu 66,4%. Nilai densitas dan viskositas tertinggi didapat pada variasi HDPE 70%, PP 30%, dan katalis 0% yaitu 0,764 g/cm³ dan 0,789 cP. Nilai kalor tertinggi didapat pada variasi komposisi HDPE 50% PP 50% yaitu 10978,8 Cal/g. Hasil komposisi rendemen cair pada variasi komposisi HDPE 70% 30% yaitu bensin 42% dan minyak tanah 58%. Sedangkan pada variasi komposisi HDPE 30% 70% yaitu bensin 30%, minyak tanah 62%, dan solar 8%.

Kata Kunci : Bahan Bakar Cair, HDPE, Pirolisis, PP, Zeolit

KATA PENGANTAR

Puji syukur diucapkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan segala nikmat dan karunia-Nya kepada kita, sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian yang berjudul “Inovasi Sintesis Bahan Bakar Cair Berbahan Dasar Limbah Plastik HDPE dan PP Dengan Teknologi Catalitic Pyrolysis Menggunakan Katalis Zeolite Alam Bayah”. Adapun tujuan dari penulisan laporan penelitian ini untuk menjadi salah satu syarat meraih gelar sarjana di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam penyusunan laporan ini tentu banyak pihak yang terlibat dan membantu. Oleh karena itu, disini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya dan sebesar-besarnya kepada:

Orang tua dan Keluarga penulis yang sudah memberikan dukungan dan doa selama ini baik secara moril dan materil

1. Orang tua yang senantiasa memberikan doa dan dukungan selama penyusunan proposal penelitian
2. Bapak Dr. Jayanudin, S.T., M.Eng. sebagai Ketua Jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Ibu Rahmayetty S.T., M.T. sebagai Koordinator Penelitian Jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
4. Bapak Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng. sebagai Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan dalam pelaksanaan penelitian sampai dengan penyusunan laporan penelitian.
5. Seluruh teman-teman angkatan 2020 Jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang memberikan segala dukungan dan motivasi.
6. Penghuni basecamp Ikakon yang memberikan segala dukungan dan motivasi serta materi
7. Semua pihak yang telah terlibat dan membantu dalam penyusunan proposal penelitian ini yang tidak bisa penulis sebutkan semuanya

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR SIMBOL.....	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Ruang Lingkup	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Plastik.....	4
2.2. Pirolisis.....	7
2.3. Katalis.....	14
BAB III METODE PERCOBAAN.....	16
3.1. Tahapan Penelitian	16
3.2. Prosedur Penelitian	17
3.2.1 Preparasi Bahan	17
3.2.2 Preprasi dan Aktivasi Katalis Zeolite Alam Bayah	17
3.2.3 Proses Pirolisis.....	17
3.3. Bahan dan Alat	18

3.3.1 Bahan-bahan	18
3.3.2 Alat-alat	18
3.4. Variabel Penelitian	19
3.4.1 Variabel Bebas	19
3.4.2 Variabel terikat	20
3.4.3 Varabel Kontrol	20
3.5. Metode Pengumpulan dan Analisis Data.....	20
3.5.1 Uji Yield	21
3.5.2 Uji Densitas	21
3.5.3 Uji Viskositas.....	21
3.5.4 Uji Nilai Kalor	22
3.5.6 Uji Nilai GCMS	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1. Pengaruh aktivasi Katalis Zeolit Alam Bayah Terhadap Morfologi	23
4.2. Pengaruh Jumlah Katalis Terhadap Yield Rendemen Cair	25
4.3. Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Yield Rendemen Cair.....	26
4.4. Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Densitas Rendemen Cair.....	27
4.5. Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Viskositas Rendemen Cair.....	28
4.6. Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Nilai Kalor Rendemen Cair.....	29
4.7. Komposisi Senyawa Rendemen Cair Pada Hasil Pirolisis Plastik.....	30
4.8. Analisa Ekonomi Pirolisis Pada Produk Rendemen Cair.....	31
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	36
5.1. Kesimpulan.....	36
5.2. Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA	38

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Jenis plastik, kode dan penggunaan secara umum.....	5
Tabel 2. 2. Nilai kalor plastik dan bahan lainnya.....	6
Tabel 2. 3. Temperatur transisi dan temperatur lebur plastik	7
Tabel 2. 4. Jenis-jenis pirolisis dan produknya	9
Tabel 2. 5. Tipe-Tipe Reaktor Pirolisis.....	10
Tabel 2. 6. Perbandingan pada penelitian terdahulu	14
Tabel 4. 1 Nilai Kalor Rendemen Cair.....	31
Tabel 4. 2 Komposisi Rendemen Cair	32
Tabel 4. 3 Analisa Ekonomi Pirolisis Plastik.....	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Nomor kode plastik(Ibrahim et al., 2022).....	5
Gambar 2. 2. Skema Pirolisis(Aini et al., 2022)	8
Gambar 2. 3. Desain reaktor pirolisis(Khairil et al., 2020).....	10
Gambar 3. 1. Diagram alir Penelitian.....	16
Gambar 3. 2. Skema Alat Pirolisis.....	22
Gambar 4. 1 Permukaan Katalis Sebelum Aktivasi (a) dan Sesudah Aktivasi (b)	23
Gambar 4. 2 Hasil Uji XRD Sebelum Aktivasi (a) dan Sesudah Aktivasi (b).....	25
Gambar 4. 3 Pengaruh Jumlah Katalis Terhadap Yield Rendemen Cair.....	26
Gambar 4. 4 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Yield Rendemen Cair.....	27
Gambar 4. 5 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Densitas Rendemen Cair....	29
Gambar 4. 6 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Viskositas Rendemen Cair.	30

DAFTAR SIMBOL

Y = Yield.....	24
$M1$ = Massa Sampel.....	24
$M2$ = Massa Produk Cair.....	24
$M3$ = Massa Residu.....	24
D = Densitas minyak pirolisis (gr/ml).....	25
m = Massa minyak pirolisis (gr).....	25
v = Volume minyak pirolisis (ml).....	25

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Plastik menjadi salah satu jenis material yang sering digunakan dalam setiap kebutuhan industri maupun komersil. Sifat plastik yang ringan, tahan air, tahan karat, tidak mudah pecah, kuat dan relatif ekonomis menjadi daya tarik bagi produsen maupun konsumen. Akibat penggunaan plastik yang masif, plastik menjadi limbah terbanyak kedua setelah limbah sisa makanan dengan persentase 18,68% limbah masyarakat di Indonesia (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan., 2022).

Upaya pemerintah dalam menekan limbah plastik yang dihasilkan dengan menerapkan peraturan pelarangan penggunaan kantong plastik di gerai modern. Hasilnya pada tahun 2020, sebanyak 41 Pemerintahan Daerah yang menerapkan, khususnya di Banjarmasin telah mengurangi limbah plastic (Khairunisa, 2020). Namun, hasil ini belum cukup mengurangi total limbah plastik yang mencemari lingkungan. Sekitar 60-80% sampah yang ada di laut merupakan sampah plastic (Leahy, 2004).

Pada tahun 2022 dalam upaya untuk mengolah limbah plastik, Tahdid, dkk melakukan penelitian mengenai pengolahan limbah plastik dengan metode pirolisis. Hasilnya, rendemen bahan bakar cair 19,01% dengan plastik jenis LDPE, katalis zeolit dengan perbandingan 1:15, dengan spesifikasi serupa bensin dan solar (Tahdid, Harlivia, et al., 2022). Berlian dkk melakukan penelitian serupa menghasilkan rendemen sebanyak 25,76% dengan komposisi bahan bakar cair berupa bensin, kerosin, diesel, dan minyak pelumas menggunakan bahan baku campuran plastik jenis PP dan PS (Berlian et al., 2022). Kartika melakukan penelitian yang sama menghasilkan kualitas minyak yang dihasilkan menggunakan bahan baku campuran plastik jenis HDPE dan PET dengan perbandingan katalis zeolit 2:5 (200 gram) sesuai dengan standar minyak diesel (Kartika, 2022). Berdasarkan hal tersebut, guna mendapatkan rendemen minyak yang lebih baik, perlu diadakannya penelitian lebih lanjut.

1.2. Rumusan Masalah

Pengolahan limbah plastik menjadi bahan bakar merupakan salah satu opsi dalam mengurangi limbah plastik yang kian meningkat sekaligus menjadi sumber energi alternatif dengan bahan baku yang mudah didapatkan. Sejauh ini, rendemen cair masih terhitung rendah, karena belum didapatkannya kondisi optimum dalam prosesnya. Salah satu faktor yang mempengaruhi kondisi optimum tersebut adalah jumlah katalis dan jenis plastik yang digunakan. Oleh karena itu, dapat dirumuskan perumusan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana proses produksi bahan bakar minyak dari sampah plastik?
2. Bagaimana kondisi yang optimal untuk mendapatkan bahan bakar cair dengan yield paling besar?
3. Bagaimana pengaruh katalis Zeolit Alam Bayah terhadap yield senyawa hidrokarbon yang dihasilkan?
4. Bagaimana kelayakan teknoekonomi produksi bahan bakar cair dari plastik dari sampah plastik industri dan domestik?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui proses pemanfaatan sampah plastik untuk produksi bahan bakar cair
2. Mendapatkan kondisi optimal untuk menghasilkan bahan bakar cair dengan yield yang paling besar
3. Mengetahui pengaruh katalis Zeolit Alam Bayah terhadap yield senyawa hidrokarbon yang dihasilkan
4. Mendapatkan data kelayakan dan teknoekonomi dari produksi senyawa olefin dan aromatic dari limbah plastik

1.4. Ruang Lingkup

Penelitian ini menggunakan metode pirolisis dalam pembuatan Bahan Bakar dengan bahan utama yaitu sampah plastik jenis HDPE dan PP yang didapat dari limbah di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa menggunakan

katalis Zeolit Alam Bayah melalui 5 uji yaitu uji yield, uji densitas, uji viskositas, dan uji nilai kalor, serta uji komposisi rendemen cair yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan di laboratorium Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa dan IPST Asari.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Plastik

Plastik merupakan salah satu dari jenis makromolekul yang dibentuk melalui proses polimerisasi. Polimerisasi sendiri merupakan suatu proses penggabungan monomer-monomer melalui suatu reaksi kimia yang menghasilkan suatu makromolekul yang disebut polimer. Plastik merupakan jenis polimer yang tersusun atas Hidrogen dan Karbon. Bahan baku plastik adalah salah satu hasil penyulingan dari minyak bumi atau gas alam, yaitu Naphta. Berdasarkan penelitian dalam pembentukan plastik sebesar 1 kg dibutuhkan sekitar 1,75 kg minyak bumi dalam sekali proses (Ibrahim et al., 2022).

Plastik menjadi salah satu jenis bahan yang sering digunakan dalam setiap kebutuhan industri maupun komersil. Maraknya penggunaan plastik membuat limbah plastik berada di urutan kedua terbanyak setelah limbah sisa makanan dengan persentase mencapai 18,68% limbah yang dihasilkan masyarakat di Indonesia (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan et al., 2022).

Metode pengolahan sampah plastik sudah cukup beragam dan bervariasi tetapi belum ada cara yang konsisten dalam mengatasi permasalahan limbah plastik yang kian menumpuk. Plastik menjadi permasalahan lingkungan karena sifatnya yang sulit terurai sehingga dapat mengganggu kesuburan tanah ketika dibuang secara sembarangan. Plastik juga menjadi permasalahan serius tidak hanya di darat, tetapi di laut-pun demikian. Sekitar 60-80% sampah yang ada di laut merupakan sampah plastik. Hal ini cukup mengganggu bagi makhluk hidup yang ada di laut dan juga merusak ekosistem yang ada di lautan (Leahy, 2004).

Plastik dapat dikelompokkan menjadi dua berdasarkan ketahanannya terhadap panas. Plastik yang akan mencair dan dapat dibentuk kembali ketika dipanaskan pada temperatur tertentu disebut dengan *thermoplastic*. Sedangkan plastik yang dibuat padat dan sulit untuk dicairkan serta dibentuk kembali ketika dipanaskan pada temperatur tertentu disebut dengan *thermosetting*. Berdasarkan hal tersebut, *thermoplastic* adalah jenis plastik yang memungkinkan untuk didaur ulang

dan umumnya diberi kode tertentu yang mengidentifikasi jenis dan penggunaannya dari tiap plastik(Ibrahim et al., 2022).

Kode tersebut berupa nomor yang menunjukkan jenis plastik tersebut. Hal ini dapat dilihat pada gambar dan juga Tabel berikut:



Gambar 2. 1. Nomor kode plastik(Ibrahim et al., 2022).

Tabel 2. 1. Jenis plastik, kode dan penggunaan secara umum

NO	Jenis Plastik	Penggunaan (Secara Umum)
1	PET (Polyethylene teraphthalate)	Botol kemasan air mineral, botol minyak goreng, botol sambal, botol obat, dan botol kosmetik
2	HDPE (High-density Polyethylene)	Botol obat, botol susu cair, jerigen pelumas, dan botol kosmetik
3	PVC (Polyvinyl Chloreide)	Pipa selang air, pipa bangunan, mainan, taplak meja plastik, botol shampo, dan botol sambal
4	LDPE (Low-density Polyethylene)	Kantong kresek, tutup plastik, plastik pembungkus daging beku, dan berbagai macam plastik tipis lainnya
5	PP (Polypropylene atau Polypropene)	Cup plastik, tutup botol plastik, mainan anak, dan wadah margarine
6	PS (Polystyrene)	Kotak CD, sendok dan garpu plastik, gelas plastik, tempat makan plastik transparan, serta styrofoam
7	Other (O), jenis plastik lainnya selain dari nomor 1 sampai 6	Botol susu bayi, plastik kemasan, galon air minum, suku cadang mobil, peralatan rumah tangga dari plastik, komputer, alat-alat elektronik, sikat gigi, dan mainan lego

(Ibrahim et al., 2022)

Daur ulang merupakan proses pengolahan kembali dari suatu zat yang dianggap tidak lagi memiliki nilai ekonomis. Daur ulang sendiri terbagi menjadi daur ulang primer, sekunder, tersier, dan quarter. Daur ulang primer adalah daur ulang yang mengolah kembali suatu zat menjadi produk yang dianggap memiliki nilai setara dengan zat sebelumnya. Daur ulang sekunder adalah daur ulang yang produknya dianggap memiliki kualitas di bawah zat sebelumnya. Daur ulang tersier adalah daur ulang yang menghasilkan jenis lain yang memiliki fungsi berbeda dari zat sebelumnya seperti daur ulang plastik menjadi bahan bakar. Daur ulang quarter adalah proses untuk mendapatkan produk lain yang merupakan hasil dari proses lanjutan daur ulang tersier seperti proses mendapatkan energi dari bahan bakar hasil daur ulang plastik (Ibrahim et al., 2022).

Hasil dari daur ulang secara quarter dari tiap jenis plastik memiliki hasil yang berbeda-beda. Nilai kalor yang didapat dari plastik di tiap jenisnya memiliki perbedaan. Nilai kalor sendiri menunjukkan sejumlah energi yang terkandung di dalam suatu zat. Perbandingan energi yang terkandung dalam plastik dan juga sumber-sumber energi lainnya disajikan dalam Tabel berikut:

Tabel 2. 2. Nilai kalor plastik dan bahan lainnya

Material	Nilai Kalor (MJ/kg)
Polyethylene	46,3
Polypropylene	46,4
Polyvinyl Chloride	18,0
Polystyrene	41,4
Coal	24,3
Petrol	44,0
Diesel	43,0
Heavy Fuel Oil	41,1
Light Fuel Oil	41,9
LPG	46,1
Kerosene	43,4

(Ibrahim et al., 2022)

Plastik merupakan polimer sintesis yang didapatkan dari hasil polimerisasi memiliki beberapa sifat yang tidak dapat ditemukan dari polimer alami. Salah satunya adalah ketahanannya terhadap panas. Plastik jenis *thermoplastic* mengalami ekspansi volume ketika dipanaskan di atas titik leburnya. Hal ini mengakibatkan molekul yang terkandung didalamnya bergerak lebih bebas yang ditandai dengan peningkatan kemampuan untuk meregang dari plastik tersebut. Secara umum, polimer dalam hal ini adalah plastik akan terdekomposisi ketika dipanaskan dengan temperatur 1,5 kali dari temperatur transisinya (Berlian et al., 2022). Suhu transisi sendiri merupakan temperatur dimana plastik mengalami peregangan struktur akibat pemanasan yang dapat dilihat dari kekakuannya yang berubah menjadi lebih fleksibel. Berdasarkan jenisnya temperatur transisi tiap jenis plastik disajikan dalam Tabel berikut:

Tabel 2. 3. Temperatur transisi dan temperatur lebur plastik

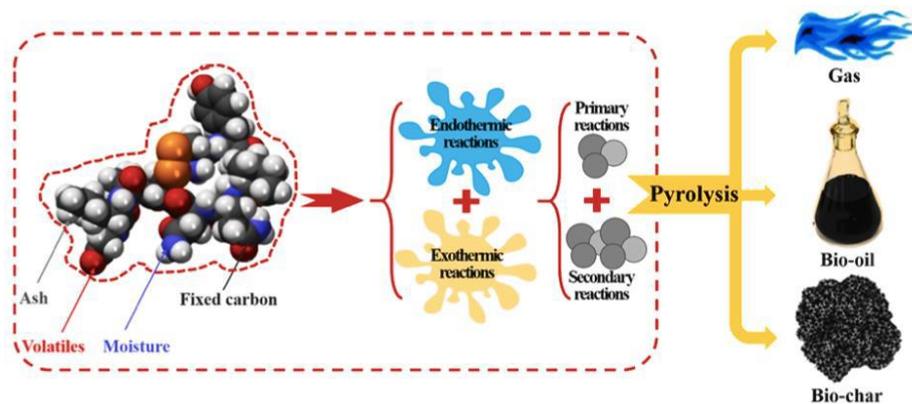
Jenis Bahan	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_{maks} ($^{\circ}\text{C}$)
PP	168	5	80
HDPE	134	-110	82
LDPE	330	-115	260
PA	260	50	100
PET	250	70	100
ABS		110	85
PS		90	70
PC		150	246
PVC		90	71

(Berlian et al., 2022)

2.2. Pirolisis

Pirolisis merupakan salah satu metode dalam reaksi dekomposisi dengan cara memanaskan suatu bahan yang dipirolisis dengan sedikit atau tanpa oksigen. Pirolisis memiliki kondisi temperatur di rentang 250 sampai 600 derajat celsius (Ibrahim et al., 2022). Pada temperatur tersebut, bahan yang dipirolisis

khususnya plastik akan terdekomposisi atau dapat dikatakan senyawa organik yang terkandung di dalam plastik akan pecah kemudian berubah menjadi uap dan juga gas. Untuk menghasilkan fasa cair dari hasil pirolisis, tahap lanjutan setelah reaksi adalah mengalirkan hasil pirolisis ke dalam kondensor. Tujuan dari pengaliran hasil gas pirolisis ke dalam kondensor ini adalah untuk mendinginkan temperatur gas hasil pirolisis, sehingga terkondensasi dan menghasilkan cairan yang diinginkan (Al-Rumaihi et al., 2022). Berikut merupakan salah satu contoh skema pirolisis secara umum.



Gambar 2. 2. Skema Pirolisis (Aini et al., 2022)

Persentase hasil konversi produk dari pirolisis sangat bergantung pada temperatur, *heating rate*, dan *residence time*. Namun, terdapat faktor lain yang mempengaruhi hasil konversi produk dari pirolisis. Faktor-faktor tersebut meliputi desain reaktor, jenis bahan, karakteristik fisik (mencakup ukuran, bentuk, struktur), dan juga jenis katalis yang digunakan (Aini et al., 2022). Pirolisis secara umum dapat dibedakan menjadi pirolisis lambat dan pirolisis cepat. Pirolisis lambat memiliki *heating rate* sekitar 0,1-1 °C/detik pada temperatur 400-600 °C dengan *residence time* sekitar 1 jam. Pirolisis lambat dengan *residence time* yang cukup lama mengakibatkan uap hasil pirolisis saling berkumpul dan bereaksi membentuk *char* atau residu padat menjadi hasil konversi yang paling tinggi dibandingkan dengan fasa cair ataupun fasa gasnya. Sedangkan pada pirolisis yang dilangsungkan dengan cepat pada temperatur yang sama dengan *heating rate* 10-1000 °C/detik yang dilangsungkan selama 2 detik waktu tinggalnya diiringi dengan tahap lanjutan

kondensasi yang cepat pula, menghasilkan produk hasil pirolisis dengan konversi tertingginya dalam fasa cair(Aini et al., 2022).

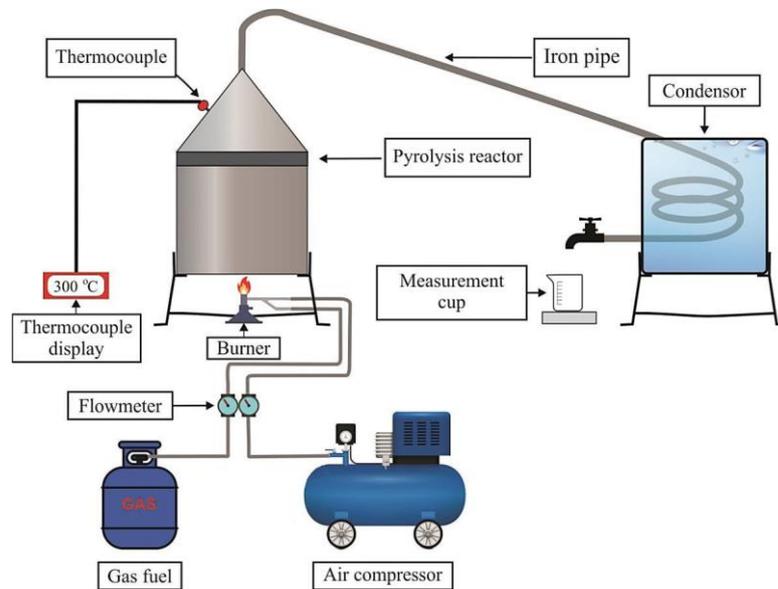
Pirolisis sebenarnya tidak hanya dibedakan menjadi pirolisis lambat dan pirolisis cepat saja. Pengaruh temperatur, *heating rate*, dan *residence time* menghasilkan konversi fasa yang berbeda-beda di tiap kondisinya. Jenis-jenis pirolisis berdasarkan temperatur, *heating rate*, dan *residence time* disajikan dalam Tabel berikut:

Tabel 2. 4. Jenis-jenis pirolisis dan produknya

Jenis Pirolisis	Kondisi	Cairan	Padatan	Gas
Cepat	Temperatur 500 °C, <i>heating rate</i> >1000 °C/detik, <i>short hot vapour residence</i> ≈ 1 detik.	75 %	12 %	13 %
<i>Intermediate</i>	Temperatur berkisar 400-500 °C, <i>heating rate</i> 1-1000 °C/detik, <i>hot vapour residence</i> ≈ 10-30 detik.	50 %	25 %	25 %
Lambat- <i>Torrefaction</i>	Temperatur ≈ 290 °C, <i>heating rate</i> 1 °C/detik, <i>solids residence time</i> ≈ 30 menit.	0-5 %	77 %	23 %
Lambat- <i>Carbonisation</i>	Temperatur berkisar 400-500 °C, <i>heating rate</i> > 1 °C/detik, <i>long solids residence</i> sampai berjam- jam ataupun berhari-hari.	30 %	33 %	35 %

(Aini et al., 2022)

Reaktor pirolisis umumnya terdiri atas *thermocouple*, burner, sumber energi burner, serta pipa yang dialirkan menuju kondensor. Reaktor pirolisis dapat didesain dengan menyesuaikan kebutuhan dengan elemen wajib ada di tiap reaktornya sesuai dengan yang disebutkan sebelumnya. Rancangan reaktor pirolisis secara umum dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 2. 3. Desain reaktor pirolisis (Khairil et al., 2020)

Dikutip dari *Agroindustrial Technology Journal* volume 06 nomor 01 tahun 2022 halaman 89 sampai 101, terdapat beberapa tipe reaktor pirolisis yang mempengaruhi beberapa aspek. Tipe reaktor sebenarnya disesuaikan dengan desain yang dibutuhkan dalam produksi pirolisis. Setiap kondisi operasi memiliki desain reaktor pirolisis yang disesuaikan. Tipe reaktor pirolisis dari beberapa reaktor yang telah didesain dapat dilihat dalam Tabel berikut.

Tabel 2. 5. Tipe-Tipe Reaktor Pirolisis

NO	Tipe Pirolisis	Tipe Reaktor Pirolisis	Desain Reaktor dan Laboratorium	Lokasi	Jumlah Umpan	Yield Produk
1	<i>Non-Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Conical spouted bed</i>	<i>University of the Basque Country UPV/EHU</i>	Spain	25 kg/h	Minyak (65,8 wt%), gas (18,8 wt%), dan

						<i>chart</i> (15,4 wt%)
2	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Circulation fluidized bed</i>	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>	United States	30 kg/h	Minyak, gas, dan <i>chart</i>
3	<i>Non-Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Fluidized bed</i>	<i>Sardar Patel Renewable Energy Research Institute</i>	India	3 kg/h	Minyak (38 wt%), gas (50 wt%), dan <i>chart</i> (12 wt%)
4	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Fluidized bed</i>	<i>Sardar Patel Renewable Energy Research Institute</i>	India	3 kg/h	Minyak (44 wt%), gas (52 wt%), dan <i>chart</i> (4 wt%)
5	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	<i>Circulation fluidized bed</i>	<i>Research Institute of Petroleum Technology</i>	Republic of Korea	42 kg/h	Minyak (60 wt%)
6	<i>Non-Catalytic</i>	Fixed bed	<i>Sardar Patel Renewable</i>	India	15 kg/h	Minyak (34,9

	<i>fast pyrolysis</i>		<i>Energy Research Institute</i>			wt%), gas (26,5 wt%), dan <i>chart</i> (38,6 wt%)
7	<i>Catalytic fast pyrolysis</i>	Fixed bed	<i>Sardar Patel Renewable Energy Research Institute</i>	India	15 kg/h	Minyak (41,05 wt%), gas (31,6 wt%), dan <i>chart</i> (27,9 wt%)

(Aini et al., 2022)

Selain dari metode *cracking* yang telah dijelaskan sebelumnya, terdapat beberapa metode yang memiliki hasil konversi produk berbeda. Seperti pada gasifikasi yang memiliki kondisi temperatur reaksi $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan sedikit atau tanpa oksigen yang memiliki *residence time* yang cukup singkat. Produk utama dari proses gasifikasi adalah gas, dimana 80% hasil konversinya adalah dalam fasa gas. Selain metode gasifikasi, metode liquifaksi juga merupakan metode yang dapat dilakukan untuk mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar. Liquifaksi merupakan metode *cracking* dengan mereaksikan plastik bersama hidrogen pada wadah tertutup berpengaduk dengan temperatur operasi berkisar pada $150\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ serta tekanan hidrogen 3-10 Mpa (Ibrahim et al., 2022).

Metode lain pada proses *cracking* yang dapat mengkonversi plastik menjadi bahan bakar adalah *catalytic cracking*. Metode ini sama halnya dengan metode *thermal cracking* yang dijelaskan sebelumnya pada jenis-jenis pirolisis maupun pada gasifikasi. Metode ini dilakukan dengan memanaskan plastik pada temperatur yang tinggi untuk mendekomposisi senyawa organik yang terkandung di dalam plastik untuk kemudian dikonversi menjadi bahan bakar melalui beberapa tahap lanjutan. Hal yang membedakan dari *catalytic crackink* adalah penggunaan katalis pada proses *cracking* tersebut. Katalis ini sangat berpengaruh pada penggunaan energi selama operasi. Penggunaan katalis dapat mengurangi konsumsi energi yang dibutuhkan selama operasi berlangsung(Ibrahim et al., 2022).

Pengaruh temperatur terhadap hasil konsentrasi senyawa karbon yang didapatkan baik berupa cairan maupun gas pada proses pirolisis adalah berbanding lurus. Semakin tinggi temperatur, maka konsentrasi senyawa karbon seperti CO, CO₂, CH₄, dan lainnya akan semakin meningkat(Khairil et al., 2020). Namun, hal ini tidak berarti semakin tinggi temperatur yang digunakan akan semakin baik hasil yang didapat. Pada beberapa kondisi juga ditemukan hasil yang didapat dengan menggunakan temperatur yang lebih tinggi menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi temperatur yang lebih rendah.

Pada tahun 2022, Berlian, dkk menganalisa pengaruh temperatur terhadap yield pirolisis plastik jenis PS dengan campuran PS dan PP. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur, maka yield yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.

Perbandingan pada penelitian terdahulu lainnya dengan metode dan jenis katalis yang sama dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 2. 6. Perbandingan pada penelitian terdahulu

Bahan Baku	Kondisi Operasi	Produk Utama	Yield (%)	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (mm ² /s)	⁰ API	Referensi
HDPE	T=480 ⁰ C, t=60menit	Gasolin 39,75% Kerosin 37,57%	23,6	794,1	2,7687	43,68	Marwan, dkk (2020)
LDPE	T=400 ⁰ C, t=60menit	Gasolin 53,15% Kerosin 30,49%	11,0	768,8	2,9228	45,78	Rizky, dkk (2020)
PP+PS	T=450 ⁰ C, t=60menit	Gasolin 61,01% Kerosin 28,27%	25,76	771,4	2,1217	51,39	Berlian, dkk (2020)
PS	T=400 ⁰ C, t=60menit	Gasolin 75,24% Kerosin 6,26%	13,81	714,44	2,3950	50,76	Berlian, dkk (2020)

(Berlian et al., 2022)

Penelitian lain yang membahas metode dan jenis katalis yang serupa yaitu metode pirolisis plastik dengan katalis zeolit dilakukan oleh Tahdid, dkk (2020) dengan menggunakan variasi jenis plastik dan jumlah katalis yang digunakan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan hal yang serupa, dimana hubungan antara temperatur dan hasil rendemen berbanding lurus.

2.3. Katalis

Katalis merupakan senyawa yang berperan penting dalam industri kimia, dimana katalis mampu meningkatkan laju reaksi dalam proses kimia. Katalis ditambahkan pada suatu reaksi kimia untuk mempercepat reaksi tersebut. Katalis menjadi media yang mempertemukan reaktan sekaligus menyumbangkan energi dalam bentuk panas sehingga molekul-molekul reaktan dapat melewati energi

aktivasi dengan lebih mudah, Katalis menjadi salah satu faktor yang dipertimbangkan karena dapat memangkas biaya produksi sehingga lebih efisien(Ibrahim et al., 2022).

Pengaruh katalis zeolit alam pada hasil pirolisis plastik telah diuji oleh Harlivia, dkk pada November 2022 dengan memvariasikan persen katalis yang digunakan. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaruh jumlah katalis terhadap yield hasil pirolisis cenderung meningkat. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bahan baku plastik jenis PP menggunakan katalis zeolit alam.

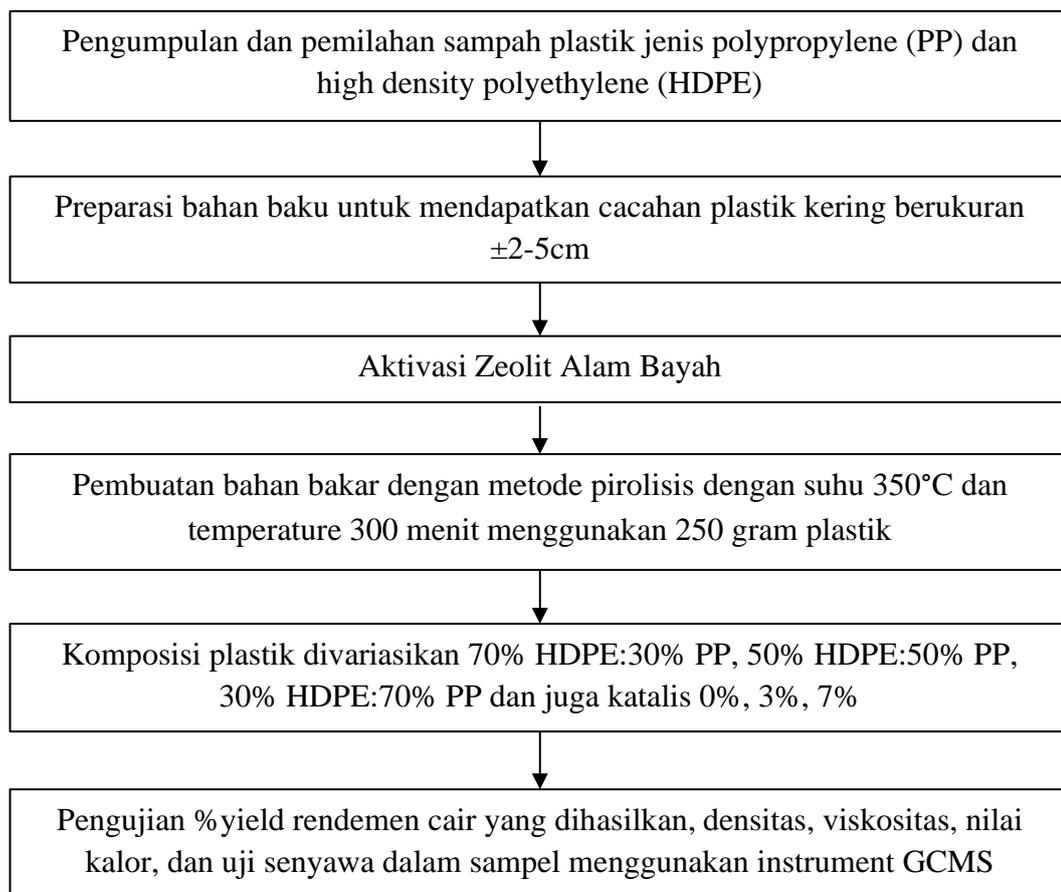
Pada Desember 2022, Hendrawati, dkk melakukan penelitian mengenai pengaruh konsentrasi zeolit sebagai katalis yang hasilnya disajikan pada Gambar 2.5 menunjukkan bahwa pengaruh jumlah katalis terhadap pirolisis plastik jenis PP cenderung berbanding lurus dengan yield yang dihasilkan. Namun pada variasi konsentrasi 9%, yieldnya mengalami penurunan(Hendrawati et al., 2022). Sedangkan pengaruh katalis zeolit alam pada pirolisis plastik jenis HDPE memiliki pengaruh yang sama, namun setelah melewati konsentrasi zeolit sebanyak 3% mengalami penurunan sampai variasi terakhir(Hendrawati et al., 2022).

Pada Desember 2022, Hendrawati, dkk melakukan penelitian mengenai pengaruh konsentrasi zeolit sebagai katalis dengan variasi temperatur menggunakan bahan baku plastik jenis HDPE dan PP. Hasil menunjukkan bahwa plastik jenis PP cenderung menghasilkan yield yang lebih banyak dan pengaruh katalis cenderung memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan jumlah yield yang didapat.

BAB III METODE PERCOBAAN

3.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di IPST (Industri Pengelolaan Sampah Terpadu) Asari. Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pirolisis. Pada penelitian ini bahan bakar dibuat dari sampah plastik dengan memvariasikan campuran jenis plastik berupa PP (*polypropylene*) dan HDPE (*high density polyethylene*) dengan penambahan Zeolit Alam Bayah yang telah diaktivasi. Hasil pirolisis di analisa dengan cara, yaitu uji yield, uji densitas, uji viskositas, uji nilai kalor, dan uji senyawa menggunakan instrument GCMS. Berikut ini adalah tahapan penelitian, yaitu:



Gambar 3. 1. Diagram alir Penelitian

3.2. Prosedur Penelitian

Berikut ini merupakan prosedur penelitian pada penelitian mengenai inovasi sintesis bahan bakar cair berbahan dasar Limbah Plastik HDPE dan PP dengan teknologi catalytic pyrolysis menggunakan katalis zeolite dari Alam Bayah:

3.2.1 Preparasi Bahan

Prosedur pertama pada penelitian pengaruh variasi katalis pada pirolisis plastik dalam pembuatan bahan bakar minyak, yaitu preparasi bahan. Dimana bahan tersebut berupa limbah sampah yang didapatkan dari daerah Cilegon. Tahap awal-nya, yaitu sampah plastik tersebut dipilah-pilah untuk mendapatkan plastik dengan jenis PP (polypropylene) dan HDPE (high density polyethylene). Selanjutnya sampah plastik dibersihkan dari kotoran kemudian dikeringkan dengan cara dipanaskan menggunakan energi panas matahari selama 2 hari. Lalu, sampah yang sudah dikeringkan dicacah hingga ukurannya $\pm 2-5\text{cm}$.

3.2.2 Preprasi dan Aktivasi Katalis Zeolite Alam Bayah

Zeolite Alam Bayah diaktivasi dengan cara menggiling dan mengayak zeolite tersebut hingga ukurannya 60 mesh. Setelah itu, sampel direndam di dalam aquades dan diaduk pada suhu ruang selama 8 jam kemudian dibiarkan mengendap selama satu hari. Kemudian endapan yang terbentuk disaring, lalu dikeringkan menggunakan oven selama 2 jam pada suhu 120°C . Selanjutnya zeolite direndam selama 24 jam pada suhu ruang di dalam larutan NH_4Cl 1M (Hendrawati et al., 2022). Setelah itu, zeolite disaring dan dicuci dengan aquades. Selanjutnya, zeolite tadi dikeringkan menggunakan oven pada suhu 120°C . Jika zeolite sudah dingin, letakkan zeolite tersebut didalam cawan porselen dan dikalsinasi dengan suhu 450°C selama 8 jam didalam furnace.

3.2.3 Proses Pirolisis

Pada proses pirolisis limbah plastik yang digunakan adalah plastik campuran jenis PP (polypropylene) dan HDPE (high density polyethylene). Limbah plastik yang digunakan sebesar 250 gram. Pirolisis dilakukan secara tertutup (tidak ada udara yang masuk) dan menggunakan reactor batch dengan suhu

sebesar 350°C dengan lama proses, yaitu selama 300 menit. Setelah proses pirolisis, hasil pirolisis yang dihasilkan berupa gas, oleh karena-nya diperlukan kondensasi. Pada proses kondensasi, gas yang dihasilkan dirubah bentuknya menjadi cairan.

3.3. Bahan dan Alat

Berikut ini adalah bahan-bahan dan alat-alat yang akan digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

3.3.1 Bahan-bahan

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini, antara lain sebagai berikut:

- a. Aquades
- b. Katalis Zeolit Alam Bayah
- c. NH_4Cl
- d. Plastik jenis HDPE (High Density Polyethylene)
- e. Plastik jenis PP (polypropylene)

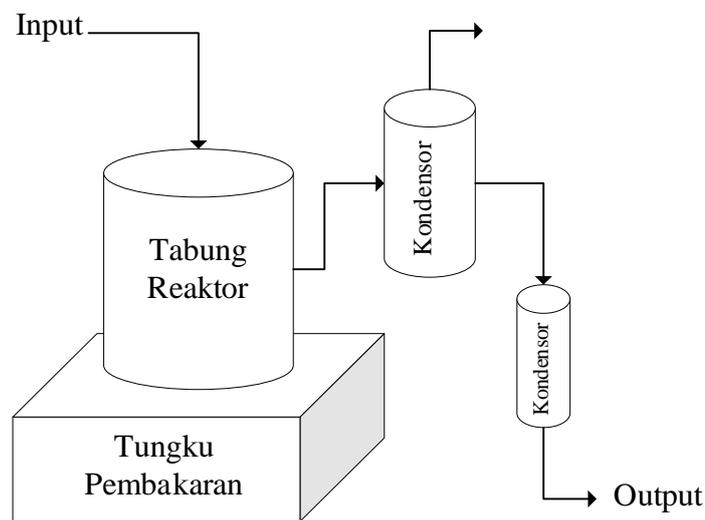
3.3.2 Alat-alat

Alat-alat yang akan digunakan dalam penelitian ini, antara lain sebagai berikut:

- a. Alat pencacah
- b. Bulb
- c. Cawan
- d. Corong
- e. Furnace
- f. GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)
- g. Gelas beaker
- h. Gelas ukur
- i. Kalorimeter
- j. Magnetic stirrer
- k. Mortar dan Alu
- l. Neraca digital

- m. Oven
- n. Penjepit
- o. Piknometer
- p. Pirolisator
- q. Saringan
- r. Thermometer
- s. Viskometer Ostwald

Berikut ini merupakan skema alat yang digunakan pada penelitian pirolisis:



Gambar 3.2 Skema Alat Pirolisis

3.4. Variabel Penelitian

Berikut ini adalah variabel penelitian pada penelitian pengaruh variasi katalis pada pirolisis plastik dalam pembuatan bahan bakar cair:

3.4.1 Variabel Bebas

Adapun variabel bebas dalam penelitian ini yaitu:

- Perbandingan bahan baku (3:7, 5:5, dan 7:3)
- Jumlah katalis (0%, 3%, dan 5% dari jumlah bahan baku)

3.4.2 Variabel terikat

Adapun variabel terikat dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

- Yield produk terhadap bahan baku
- Densitas pada produk
- Viskositas pada produk
- Nilai kalor pada produk
- Komposisi senyawa produk

3.4.3 Varabel Kontrol

Adapun variabel kontrol dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

- Jenis plastik yang digunakan, yaitu PP (polypropylene) dan HDPE (high density polyethylene)
- Temperatur reaksi sebesar 350⁰C
- Waktu reaksi selama 300 menit
- Jumlah bahan baku digunakan, yaitu sebanyak 250 gram
- Jenis katalis yang digunakan, yaitu katalis Zeolit alam Bayah

3.5. Metode Pengumpulan dan Analisis Data

Dalam penelitian pirolisis ini menggunakan teknik pengumpulan data dengan metode kuantitatif, metode ini didukung dengan studi literatur terkait data-data yang diperlukan pada penelitian. Selain itu, penelitian ini dianalisis, analisis ini bertujuan untuk mengubah data-data mentah dari hasil percobaan. Setelah hasil percobaan didapatkan, data-data tersebut diaplikasikan dengan cara pengujian yang dilakukan pada sampel. Pengujian ini berupa uji yield, uji densitas, uji viskositas, dan uji nilai kalor, serta uji komposisi senyawa produk yang disajikan pada penjelasan berikut ini:

3.5.1 Uji Yield

Uji yield digunakan untuk mengetahui persentase jumlah produk yang dihasilkan dari bahan yang digunakan. Persentase produk hasil pirolisis ini dapat dihitung menggunakan persamaan, yaitu sebagai berikut (Azubuike A. *et al.*, 2018):

$$Y_{liquid} = \frac{M2}{M1} \times 100\% \dots \dots \dots (3.1)$$

$$Y_{residu} = \frac{M3}{M1} \times 100\% \dots \dots \dots (3.2)$$

$$Y_{gas} = 100\% - (Y_{liquid} + Y_{residu}) \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana,

M1: Masa sampel,

M2: Masa produk cair,

M3: Masa residu.

3.5.2 Uji Densitas

Dalam pengujian densitas, hal pertama yang dilakukan, yaitu menimbang massa minyak hasil pirolisis menggunakan neraca dan mengukur volume-nya. Densitas dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Badrul W., 2020):

$$D = \frac{m}{v} \dots \dots \dots (3.4)$$

Dimana,

D = Densitas minyak pirolisis (gr/ml)

m = Massa minyak pirolisis (gr)

v = Volume minyak pirolisis (ml)

3.5.3 Uji Viskositas

Dalam pengujian viskositas, hal pertama yang dilakukan, yaitu memasukan larutan sampel ke dalam viskometer ostwald. Lalu, sampel ditarik menggunakan bulb hingga batas atas. Kemudian melepaskan bulb secara perlahan dan menutup lubang lain pada viskometer ostwald. Selanjutnya lubang dibuka dan menghitung lama sampel turun dari batas atas ke batas bawah, dan mencatat lama waktu sampel turun. Viskositas dapat dihitung menggunakan persamaan: (Cantika R., *et al.* 2022)

$$\text{Viskositas Kinematik (cSt)} = C \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{sec}^2} \right) \times t(\text{sec}) \dots\dots\dots(3.5)$$

$$\text{Viskositas Dinamik (cP)} = \text{Viskositas Kinematik (cSt)} \times \text{densitas} \dots\dots(3.6)$$

3.5.4 Uji Nilai Kalor

Nilai kalor bahan bakar merujuk pada total energi panas yang dapat dibebaskan oleh suatu bahan bakar melalui reaksi pembakaran sempurna per-unit massa atau volume bahan bakar tersebut (Elwina, et al., 2022). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kalor yang dihasilkan dari proses pirolisis. Karakteristik hasil pirolisis ini diuji menggunakan alat berupa bom kalorimeter dalam mengukur-nya. Dalam pengujian nilai kalor, kami memberikan sampel pada pihak ketiga untuk menguji berapa nilai kalor dari sampel yang diuji.

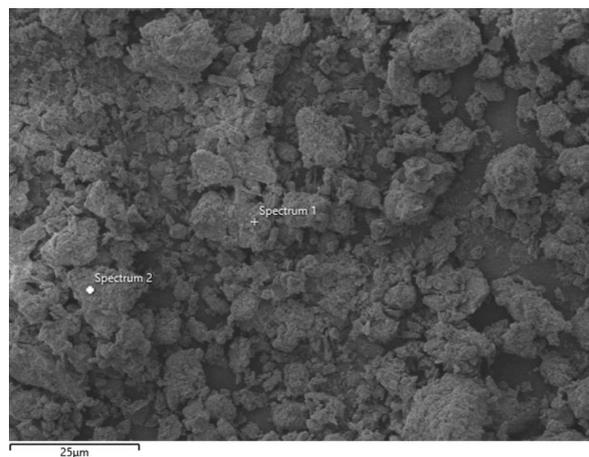
3.5.6 Uji Nilai GCMS

Analisis kandungan dari minyak hasil pirolisis menggunakan instrument GC-MS (Gas Cromatografy Mass Spektroskopy). Metode yang digunakan untuk GC (Gas Cromatografy) berupa pemisahan dari suatu campuran menjadi komponen-komponen berdasarkan interaksi fasa gerak dan fasa diam. Selanjutnya, cuplikan dalam bentuk uap akan dibawa oleh aliran gas ke dalam kolom pemisah. Hasil dari pemisahan akan dianalisis dengan kromatogram (Mues L., 2019). Dalam pengujian GCMS, kami memberikan sampel pada pihak ketiga untuk menguji berapa nilai kalor dari sampel yang diuji.

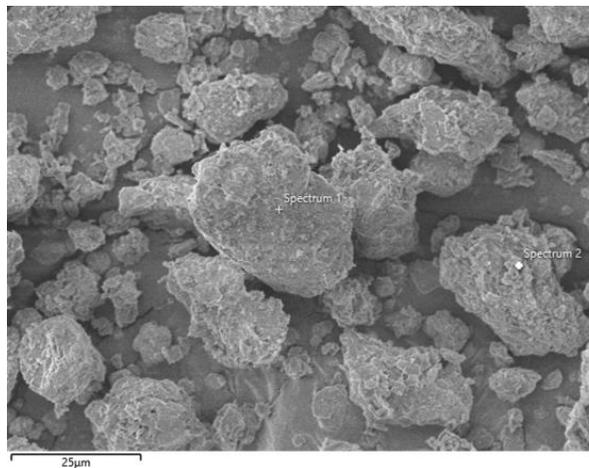
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh aktivasi Katalis Zeolit Alam Bayah Terhadap Morfologi

Berikut merupakan perbandingan permukaan katalis sebelum dan sesudah aktivasi.



(a)



(b)

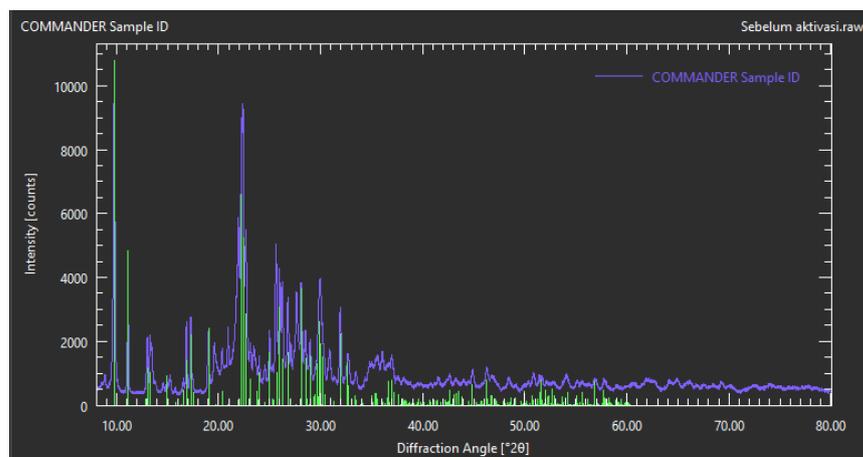
Gambar 4. 1 Permukaan Katalis Sebelum Aktivasi (a) dan Sesudah Aktivasi (b)

Katalis adalah suatu senyawa yang dimasukkan ke dalam suatu reaksi kimia untuk mempercepat laju reaksi tanpa mengalami perubahan

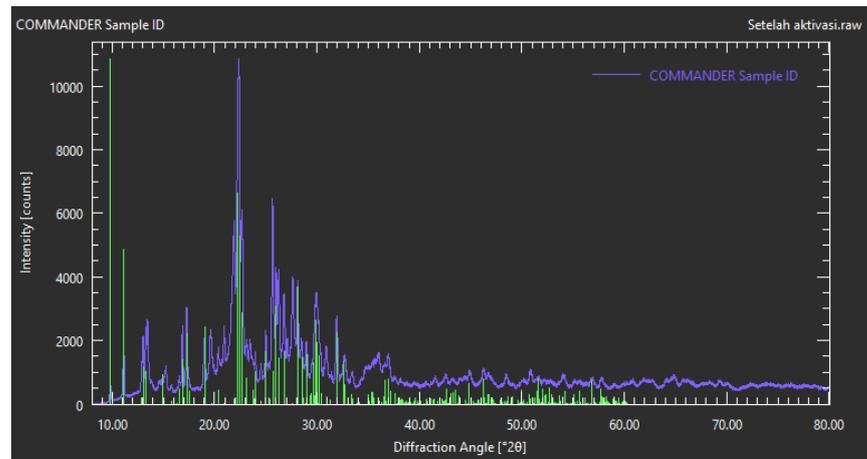
kimia pada akhir reaksi. Katalis menyediakan mekanisme reaksi alternatif dengan energi aktivasi yang lebih rendah dibandingkan dengan reaksi tanpa katalis (Agustina R., et al. 2020). Pada proses pirolisis yang dilakukan, digunakan katalis Zeolit Alam Bayah yang telah diaktivasi. Pengaruh dari aktivasi yang dilakukan dapat dilihat dari luas pori-pori pada permukaan katalis yang semakin besar.

Pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa katalis sebelum aktivasi memiliki permukaan yang lebih rapat dibandingkan dengan katalis setelah aktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa metode aktivasi yang dilakukan sudah sesuai dengan tujuan dari adanya aktivasi katalis yaitu untuk memperbesar luas pori-pori katalis.

Katalis memiliki sifat yang spesifik, sehingga jumlah dan jenis katalis juga berpengaruh dalam penggunaannya. Katalis yang tidak cocok dengan reaksi yang terjadi dapat menjadi katalis beracun yang dapat menghambat terjadinya reaksi (Herizal, 2020). Pada penelitian ini zeolit yang digunakan adalah Zeolit Alam Bayah. Uji XRD dilakukan untuk mengetahui tipe dari zeolit yang digunakan. Hasil dari uji XRD yang kemudian diolah dengan menggunakan *software profex 5.0* dapat dilihat pada Gambar 4.2



(a)



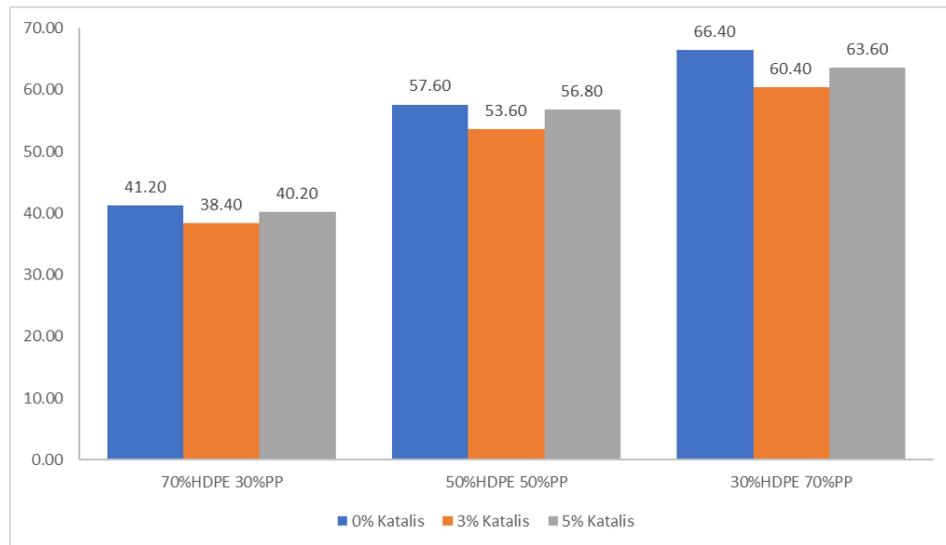
(b)

Gambar 4. 2 Hasil Uji XRD Sebelum Aktivasi (a) dan Sesudah Aktivasi (b)

Berdasarkan Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa Zeolit alam bayah memiliki kristalinasi yang hampir serupa dengan tipe klinoptolilit. Hal ini menunjukkan bahwa Zeolit alam bayah merupakan zeolit yang masuk ke dalam kategori Zeolit Klinoptilolit.

4.2 Pengaruh Jumlah Katalis Terhadap Yield Rendemen Cair

Hasil yield rendemen cair dengan variasi jumlah Katalis Zeolit Alam Bayah menjadi 0%, 3%, dan 5% disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Pengaruh Jumlah Katalis Terhadap Yield Rendemen Cair

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa setiap kondisi komposisi plastik menunjukkan yield terbanyak pada variasi 0% katalis, 5% katalis, dan 3% katalis. Hal ini menunjukkan Katalis Zeolit alam Bayah dengan jumlah 3% dan 5% tidak cukup efisien jika digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis. Hal ini ditunjukkan dengan penggunaan 0% katalis masih menghasilkan rendemen cair yang lebih banyak. Namun peningkatan jumlah rendemen cair dari variasi 3% katalis menuju variasi 5% katalis menunjukkan bahwa peningkatan yield rendemen cair dengan jumlah katalis yang lebih banyak memungkinkan untuk terjadi.

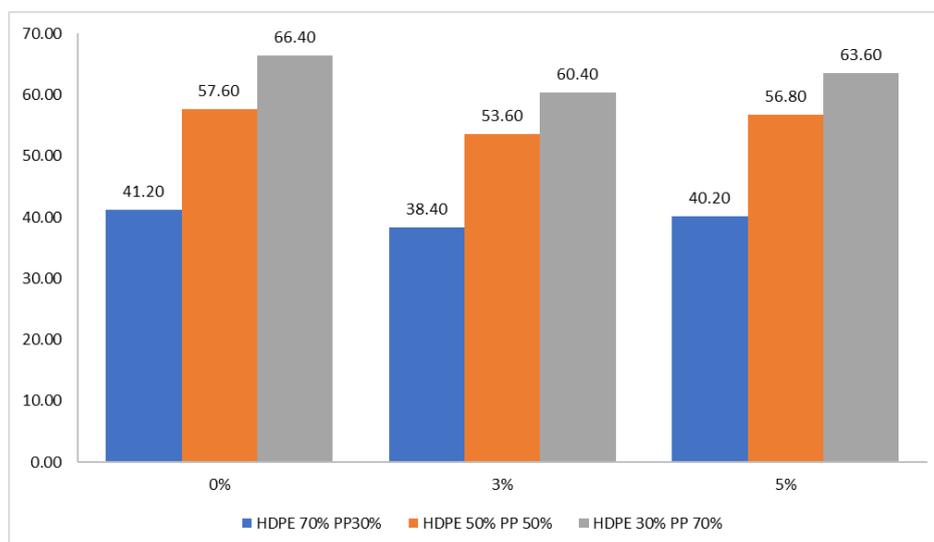
Katalis secara umum merupakan suatu zat yang dapat mempercepat proses laju reaksi kimia pada kondisi tertentu tanpa mengalami perubahan atau terpakai oleh reaksi itu sendiri (Purnami, 2015). Sehingga secara teori, pembentukan produk berupa cairan dari hasil pirolisis dipengaruhi oleh jumlah katalis yang digunakan, dimana semakin banyak katalis yang digunakan maka semakin banyak cairan yang terbentuk. Hal ini dikarenakan katalis berperan dalam menentukan mekanisme pembentukan produk (Siti, 2017).

Katalis memiliki sifat yang spesifik, sehingga jumlah dan jenis katalis juga berpengaruh dalam penggunaannya. Katalis yang tidak cocok dengan reaksi yang terjadi dapat menjadi katalis beracun yang dapat menghambat terjadinya reaksi (Herizal, 2020).

Penurunan yield rendemen cair setelah penggunaan katalis pada reaksi disebabkan oleh ketidaksesuaian jenis dan jumlah katalis pada proses pirolisis yang dilakukan, dimana katalis memiliki sifat yang spesifik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah katalis Zeolit Alam Bayah yang divariasikan belum sesuai dengan reaksi pirolisis.

4.3 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Yield Rendemen Cair

Hasil yield rendemen cair dengan variasi komposisi plastik disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Yield Rendemen Cair

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa pada setiap variasi jumlah katalis menunjukkan hal yang serupa, dimana komposisi plastik dengan jumlah HDPE lebih banyak menghasilkan yield rendemen cair yang lebih sedikit dibandingkan dengan yield rendemen cair yang dihasilkan dari hasil pirolisis dengan komposisi plastik PP lebih banyak.

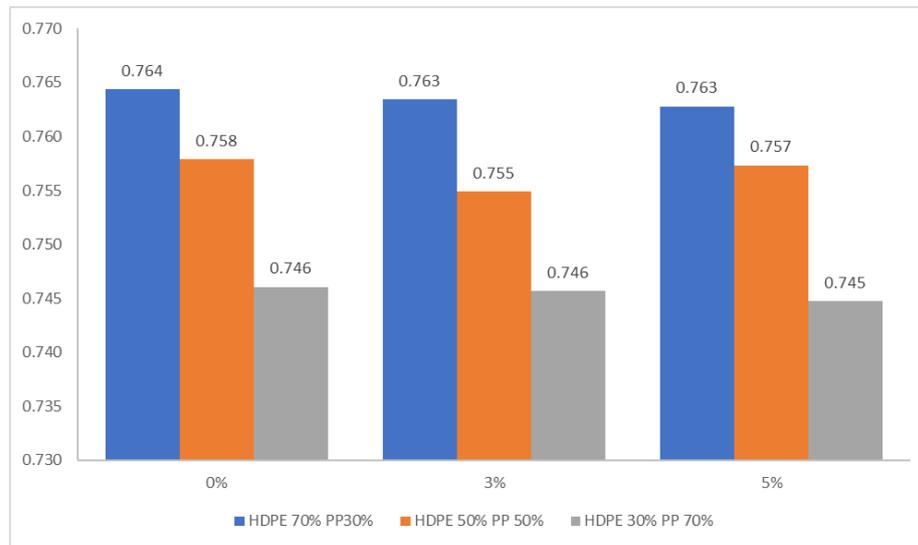
Hal ini disebabkan oleh melting point yang berbeda dari kedua bahan tersebut. Menurut artikel Xometry (2022), HDPE memiliki melting point 180-205°C dan PP memiliki melting point 160-168°C. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa plastik jenis HDPE memiliki melting point yang lebih besar dari pada plastik jenis PP. Plastik dengan melting point yang lebih rendah akan meleleh lebih awal daripada plastik dengan melting point yang lebih tinggi saat dipanaskan bersama-sama. Pada hal ini, berarti plastik PP akan mulai meleleh sebelum plastik HDPE mencapai melting point, sehingga jumlah rendeman cair lebih banyak dihasilkan pada komposisi campuran plastik PP 70% dan HDPE 30%.

Selain itu, yield rendeman cair dapat dipengaruhi oleh ketebalan dari kedua jenis plastik tersebut. Pada plastik HDPE memiliki ketebalan yang lebih tebal dari pada plastik PP (Lanang dkk, 2020). Ketebalan bahan memengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu pelelehan yang diinginkan, hal ini dikarenakan bahan yang lebih tebal cenderung memiliki distribusi panas yang tidak merata. Bahan yang lebih tebal memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai suhu pelelehan karena butuh energi panas yang lebih besar untuk memanaskan bahan yang lebih tebal (Anwar dkk, 2020).

Plastik memiliki komposisi senyawa penyusun yang berbeda di tiap jenisnya. Perbedaan penyusun senyawa dari tiap jenis plastik ini mempengaruhi titik leleh dan titik didih fasa cair dari plastik yang direaksikan (Lanang dkk, 2020). Hal ini mempengaruhi seberapa cepat plastik mengalami reaksi menjadi rendemen cair. Pada waktu reaksi dan temperatur yang sama, komposisi plastik akan mempengaruhi rendemen cair yang dihasilkan dari proses pirolisis.

4.4 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Densitas Rendemen Cair

Nilai densitas yang didapat pada setiap variasi komposisi plastik dapat dilihat pada Gambar 4.5.



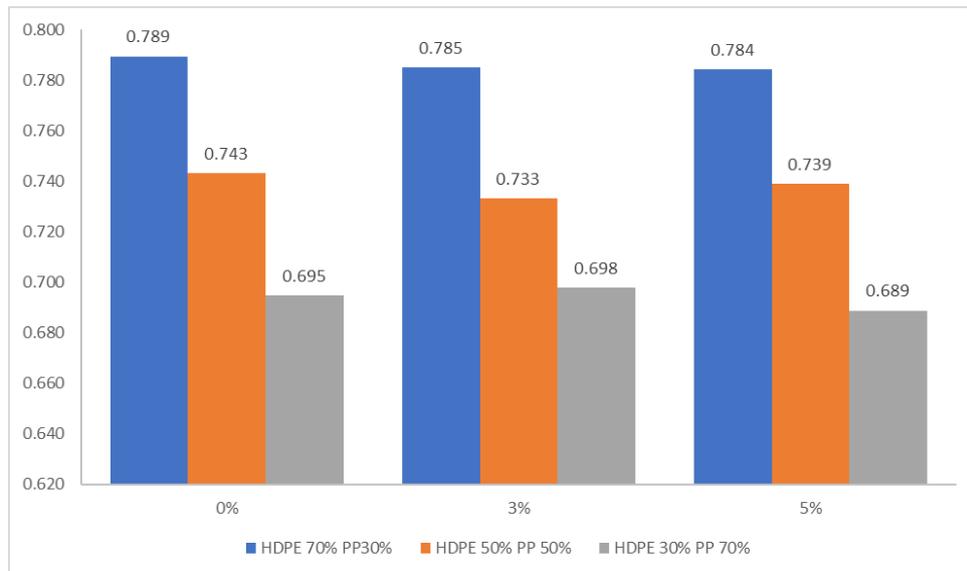
Gambar 4. 5 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Densitas Rendemen Cair

Berdasarkan Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa nilai densitas yang didapat pada setiap variasi jumlah katalis menunjukkan hal yang serupa, dimana komposisi plastik ketika HDPE lebih banyak dibandingkan dengan PP memiliki nilai densitas yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan sifat dasar dari HDPE dan PP, dimana plastik jenis HDPE ($0,94 \text{ g/cm}^3$) (memiliki nilai densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan plastik jenis PP ($0,90 \text{ g/cm}^3$) (Deglas, 2023).

Densitas merupakan berat jenis dari suatu senyawa dan dalam konteks bahan bakar memiliki standar nilai densitas yang dapat dikategorikan sebagai bahan bakar cair. Berdasarkan keputusan Direktur Jendral Minyak dan Gas Bumi Nomor 0177-K/10/DJM.T.2018 nilai densitas untuk bahan bakar bensin berkisar pada $0,715 - 0,770 \text{ g/cm}^3$. Berdasarkan hasil yang didapat, nilai densitas yang dimiliki oleh hasil pirolisis sudah sesuai standar.

4.5 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Viskositas Rendemen Cair

Nilai viskositas yang didapat pada setiap variasi komposisi plastik dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Viskositas Rendemen Cair

Berdasarkan Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa nilai viskositas yang didapat menunjukkan bahwa bahan baku dengan komposisi HDPE lebih banyak memiliki nilai viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposisi PP yang lebih banyak. Dimana, viskositas tertinggi didapat pada variasi HDPE 70%,PP 30% dengan katalis 0% yaitu sebesar 0,789 cP. Sedangkan viskositas terendah didapat pada variasi HDPE 30%,PP 70% dengan katalis 5% yaitu sebesar 0,689 cP. Berdasarkan literatur bahan bakar alami berupa bensin memiliki viskositas $0,65 \pm cP$ dan minyak tanah memiliki viskositas sebesar $0,79 \pm cP$ (Purwanti L., 2015). Dari data tersebut dapat diketahui bahwa minyak hasil pirolisis berada pada rentang viskositas bensin dan minyak tanah.

Viskositas merupakan ukuran kekentalan suatu fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan pada fluida. Kekentalan sendiri merupakan sifat cairan yang berhubungan dengan hambatan fluida untuk mengalir. Ketika viskositas fluida besar, maka semakin sulit suatu fluida untuk mengalir dan juga menunjukkan semakin sulit suatu benda bergerak dalam fluida tersebut.

Jadi viskositas menentukan kecepatan mengalirnya cairan (Lumbantoruan P., 2016).

Viskositas menurut Dominggus G.H., et al (2016) juga dipengaruhi oleh massa jenis atau densitas, dimana semakin berat massa jenis suatu cairan maka viskositasnya akan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena semakin berat massa jenis maka semakin banyak partikel yang terkandung di dalam suatu fluida yang menghambat aliran-nya dikarenakan gesekan antar partikelnya. Berdasarkan Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 dapat dilihat juga bahwa densitas dan viskositas berbanding lurus. Hal ini sesuai dengan teori dimana viskositas dipengaruhi oleh massa jenis atau densitas, dimana semakin berat massa jenis suatu cairan maka viskositasnya akan semakin tinggi (Dominggus G.H., et al. 2016).

4.6 Pengaruh Komposisi Plastik Terhadap Nilai Kalor Rendemen Cair

Nilai kalor yang didapat pada variasi komposisi plastik dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai Kalor Rendemen Cair

Variasi	Nilai Kalor (Cal/g)
HDPE 70% PP 30%	10863,9
HDPE 50% PP 50%	10978,8
HDPE 30% PP 70%	10961,4

Berdasarkan Tabel 4.1 nilai kalor yang didapat tidak terlalu berbeda, dimana nilai kalor untuk bahan bakar bensin berkisar pada 10050,1 – 11441,5 Cal/g (Novandi, 2018). Dapat disimpulkan untuk nilai kalor dari hasil pirolisis masih memenuhi rentang dari nilai kalor bahan bakar bensin.

Nilai kalor bahan bakar bensin adalah jumlah energi yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar bensin. Semakin tinggi nilai kalor bahan bakar bensin, semakin banyak energi yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar bensin (Novandi 2018). Oleh karena itu, bahan bakar bensin

dengan nilai kalor yang lebih tinggi dapat menghasilkan performa mesin yang lebih baik dan efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi.

Uji nilai kalor dari hasil pirolisis dianalisis oleh Unit Pelaksana Teknis (UPT) Laboratorium Uji Departemen Teknik Universitas Indonesia dengan metode kualitatif menggunakan alat berupa Parr Bomb Calorimeter 6400. Berikut adalah nilai kalor yang didapat pada produk pirolisis berbahan baku plastik.

4.7 Komposisi Senyawa Rendemen Cair Pada Hasil Pirolisis Plastik

Komposisi senyawa pada rendemen cair yang didapat pada variasi komposisi plastik dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Komposisi Rendemen Cair

Sampel	Rantai Carbon	Jenis	Jumlah
HDPE 70% PP 30%	C9-11	Bensin	30%
	C12-C20	Minyak Tanah	62%
	C21-C24	Solar	8%
HDPE 30% PP 70%	C9-C11	Bensin	42%
	C12-C20	Minyak Tanah	58%
	C21-C24	Solar	0%

Pada penelitian ini, kandungan dari produk cair yang dihasilkan pada proses pirolisis diidentifikasi menggunakan metode GC-MS. Identifikasi ini dilakukan untuk mengetahui distribusi komponen dari senyawa yang ada pada produk cair hasil pirolisis. Hasil pirolisis yang diuji menggunakan GC-MS adalah sampel dengan komposisi HDPE 70% dan PP 30% tanpa katalis dan HDPE 30% dan PP 70% tanpa katalis.

Uji nilai kalor dari hasil pirolisis dilakukan oleh Unit Pelaksana Teknis (UPT) Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro menggunakan alat berupa GC-MS (Gas Cromatografy Mass Spektroskopy). Berikut ini adalah hasil dari pemecahan spectra pada GC-MS terhadap produk cair pirolisis.

Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa komponen utama cairan produk pirolisis adalah minyak tanah. Pada sampel HDPE 70% dan PP 30% diketahui memiliki kandungan minyak tanah yang lebih banyak dari pada sampel HDPE 30% dan PP 70%. Sedangkan kandungan bensin terbanyak ada pada sampel HDPE 30% dan PP 70%, yaitu sebanyak 42%. Menurut Artikel Proxsis East (2015), bensin adalah hasil distilasi minyak bumi pada suhu antara 35-75 °C, Nafta (bensin berat) pada suhu antara 70 sampai 140 °C, Kerosin (minyak tanah) dan avtur pada suhu antara 170 °C sampai 250 °C, Solar adalah hasil distilasi minyak bumi pada suhu antara 200 °C sampai 350 °C. Suhu yang digunakan pada penelitian ini adalah 300 °C, dimana hal ini selaras dengan hasil dari pirolisis yang dilakukan yaitu komposisi rendemen cair yang mencakup bensin, minyak tanah, dan solar.

4.8 Analisa Ekonomi Pirolisis Plastik Pada Produk Rendemen Cair Yang Dihasilkan

Total biaya modal yang dibutuhkan untuk produksi bahan bakar cair dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Analisa Ekonomi Pirolisis Plastik

Variabel	HDPE	175	gr	HDPE	125	gr	HDPE	75	gr	HDPE	175	gr	HDPE	125	gr	HDPE	75	gr	HDPE	175	gr	HDPE	125	gr	HDPE	75	gr
	PP	75	gr	PP	125	gr	PP	175	gr	PP	75	gr	PP	125	gr	PP	175	gr	PP	75	gr	PP	125	gr	PP	175	gr
	Jumlah			Jumlah			Jumlah			Jumlah			Jumlah			Jumlah			Jumlah			Jumlah			Jumlah		
	Katalis	0%		Katalis	0%		Katalis	0%		Katalis	3%		Katalis	3%		Katalis	5%										
Harga Bahan Baku	IDR	-																									
Biaya Aktivasi Katalis	IDR	-		IDR	-		IDR	4,232		IDR	4,232		IDR	4,232		IDR	4,257										
Biaya Preparasi Bahan	IDR	1,111																									
Biaya Produksi	IDR	5,556																									
Total	IDR	6,667		IDR	6,667		IDR	10,899		IDR	10,899		IDR	10,899		IDR	10,924										
Produk (ml)		134.75			190.00			222.50			125.75			177.50			202.50			131.75			187.50			213.50	

Proses pembuatan bahan bakar cair dengan bahan baku berupa sampah plastik terlihat sangat menguntungkan. Namun, perlu dianalisa juga terkait

biaya produksi yang dikeluarkan. Biaya produksi diasumsikan hanya melibatkan kebutuhan bahan bakar pada reaktor, biaya preparasi bahan, dan biaya aktivasi katalis. Bahan bakar reaktor menggunakan LPG dengan harga 25.000 Rupiah setiap pengisian tabung 3 kg. Kebutuhan pada proses yang dilakukan adalah sebanyak 2 kali isi ulang atau jika dijumlah menjadi 50.000 Rupiah untuk 9 kali produksi. Sehingga biaya untuk kebutuhan bahan bakar dalam sekali produksi adalah 5.556 Rupiah.

Biaya preparasi bahan untuk kebutuhan akomodasi dan lainnya diasumsikan sebesar 10.000 Rupiah untuk 9 kali produksi. Sehingga dalam sekali produksi membutuhkan 1.111 Rupiah. Biaya untuk aktivasi katalis untuk bahan – bahan aquades, NH_4Cl dan kebutuhan listrik dengan jumlah biaya 37.250 Rupiah untuk 9 kali produksi. Sehingga biaya aktivasi katalis dalam sekali produksi adalah 0 Rupiah untuk variasi 0% katalis, 375 Rupiah untuk penggunaan 3% katalis, dan 625 Rupiah untuk penggunaan 5% katalis.

Harga jual yang umum di pasaran adalah 10.000 Rupiah per liter. Sedangkan modal yang dibutuhkan untuk memproduksi 130 – 225 ml adalah 6.000 – 11.000 Rupiah. Hal ini menunjukkan bahwa modal yang dibutuhkan jauh lebih besar dibandingkan dengan harga pasar yang sudah ada. Sehingga analisa teknoekonomi pada inovasi sintesis bahan bakar cair berbahan dasar limbah plastik HDPE dan PP dengan teknologi catalytic pyrolysis menggunakan katalis dari bahan alam tidak cukup layak. Penyebab utamanya ada di biaya produksi yang cukup tinggi.

Bahan bakar yang digunakan pada reaktor sangat mahal pada penelitian ini. Hal ini mengakibatkan membengkaknya biaya produksi. 100% biaya modal pada variasi tanpa katalis ada di biaya produksi, sedangkan pada variasi dengan katalis, sekitar 60% biaya modalnya adalah biaya produksi dan 40% nya harga untuk aktivasi katalis. Tingginya biaya produksi ini menunjukkan tidak efektifnya proses yang dilakukan. Tidak efektifnya

proses yang dilakukan, jika ditinjau dari kelayakan ekonomi permasalahannya menitik beratkan pada pemilihan sumber bahan bakar. Penggunaan LPG sebagai bahan bakar utama pada reaktor membuat biaya produksi menjadi tinggi. Analisa sederhana dilakukan dengan asumsi penggunaan listrik sebagai sumber bahan bakar pada reaktor.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

- a. Pemanfaatan sampah plastik sebagai bahan baku dalam pembuatan bahan bakar cair dapat dilakukan dengan menggunakan reaksi pirolisis yaitu proses cracking pada reaktor dengan suhu 300⁰C menggunakan katalis Zeolit Alam Bayah.
- b. Kondisi optimal yang dapat menghasilkan yield terbanyak dengan kualitas sesuai dengan standar nasional Indonesia bahan bakar cair dari variasi yang ada, yaitu pada kondisi operasi temperatur 350⁰C, tekanan di bawah 1 atm, dengan komposisi plastik 70% PP dan 30% HDPE tanpa menggunakan katalis Zeolit Alam Bayah.
- c. Pengaruh Katalis Zeolit alam Bayah terhadap rendemen cair tidak cukup efisien. Namun peningkatan jumlah rendemen cair dari variasi 3% katalis menuju variasi 5% katalis menunjukkan bahwa peningkatan yield rendemen cair dengan jumlah katalis yang lebih banyak memungkinkan untuk terjadi.
- d. Kelayakan analisa ekonomi terhadap produksi bahan bakar cair dengan bahan baku sampah plastik menunjukkan ketidaklayakan, dimana biaya untuk memproduksi 130 – 225 ml adalah 6.000 – 11.000 Rupiah, sedangkan harga jual bensin jenis pertalit adalah 10.000 Rupiah per 1 liter.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk peneliti selanjutnya, diantaranya adalah sebagai berikut :

- a. Melakukan proses pirolisis dengan variasi jumlah Katalis Zeolit Alam yang ditingkatkan di atas 5%
- b. Menaikkan temperatur reaksi untuk memaksimalkan proses cracking pada proses pembuatan bahan bakar cair dengan bahan baku sampah plastik
- c. Melakukan proses pirolisis dengan menggunakan listrik sebagai sumber energi pada reaktor untuk mengefisienkan kebutuhan biaya produksi.
- d. Meningkatkan kapasitas produksi untuk meningkatkan efisiensi biaya produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustian E., Sulaswatty A. (2015). PRODUKSI MINYAK NILAM UNTUK "FIXATIVE AROMATHERAPY": STUDI KASUS DESAIN KONDENSOR DISTILASI UAP. BIOPROPAL INDUSTRI Vol. 6 No.1 : 19-17.
- Agustina R., Zahrina I., Sunarno, (2020). APLIKASI KATALIS HOMOGEN PADA SINTESIS EMULSIFIER. Jom FTEKNIK Volume 7 Edisi 2.
- Aini, N., Jamilatun, S., & Pitoyo, J. (2022). PENGARUH TIPE BIOMASSA PADA PRODUK PIROLISSI: A REVIEW. AGROINDUSTRIAL TECHNOLOGY JOURNAL, 6(1), 89–101.
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz Muhammad, Mckay, G., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Amany, M. D. (2023). Pengolahan Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Proses Pirolisis. Jurnal Sains dan Teknologi Vol.2 No.1.
- Anene, A. F., Frediksen, S. B., Arne K., Tokheim L. (2018). Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components. Jurnal Sustainability, 10, 3979.
- Anwar A., Rhohman F., Nadliroh K. (2020) Pengaruh Perbedaan Ketebalan Semen Alumina 4 cm dan 5 cm Terhadap Kemampuan Menahan Panas. Seminar Nasional Inovasi Teknologi UN PGRI Kediri.
- Berlian, S., Kusuma, A. T., Aswan, A., Zikri, A., & Hajar, I. (2022). PYROLISIS OF PLASTIC TO LIQUID FUEL USING ACTIVATED ZEOLITE CATALYST. PUBLIKASI PENELITIAN TERAPAN DAN KEBIJAKAN, 5(1), 9–18.

- Cantika R., Akbar H. A., Aswan A., Ridwan K. A., Syakdani A., Effendy S., Taufik M. (2022). Pengolahan Limbah Plastik Jenis Polypropylene (PP) dan Low Density Polyethylene (LDPE) Menjadi Bahan Bakar Cair Melalui Proses Catalytic Thermal Cracking Menggunakan Katalis FCC. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia (JPTI)*, Vol. 2, No. 10, Hal. 437-445.
- Deglas W. (2023). PENGARUH JENIS PLASTIK POLYETHYLENE (PE), POLYPROPYLENE (PP), HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE), DAN OVERHEATED POLYPROPYLENE (OPP) TERHADAP KUALITAS BUAH PISANG MAS. *Jurnal Pertanian dan Pangan Volume. 5, No. 1.*
- Dominggus G.H. Adoe, Wenseslaus Bunganaen, Ika F. Krisnawi, Ferdyan A. Soekwanto. (2016). Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer. *Jurnal Teknik Mesin Undana*, Vol. 03, No. 01.
- Elwina, Dewi R., Syafruddin, Amalia Z., Fadhil M. (2022). Analisa Nilai Kalor dan Laju Pembakaran Biobriket Berbasis Ampas Kopi Arabica dan Robusta dengan Metode Densifikasi. *Jurnal Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, Vol.6 No.1.
- Fatimura M. (2014). TINJAUAN TEORITIS FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI OPERASI PADA KOLOM DESTILASI. *JURNAL MEDIA TEKNIK VOL. 11, NO.1.*
- Fatimura M., Masriatini R., Sepriyanti R., Yunita R. (2019). PENGOLAHAN LIMBAH PLASTIK JENIS KANTONG KRESEK DAN GELAS MINUMAN MENGGUNAKAN PROSES PIROLISIS MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK. *Universitas PGRI Palembang Volume 4, Nomor 2.*
- Harlivia, R., Tahdid, & Effendy, S. (2022). Pengaruh Persen Katalis Zeolit Alam Terhadap Yield Bahan Bakar Cair Proses Pirolisis dari Limbah Plastik Polypropylene. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia (JPTI)*, 2(11), 453–459.

- Hartina F, Jannah A., Maunatin A. (2014). FERMENTASI TETES TEBU DARI PABRIK GULA PAGOTAN MADIUN MENGGUNAKAN *Saccharomyces cerevisiae* UNTUK MENGHASILKAN BIOETANOL DENGAN VARIASI pH DAN LAMA FERMENTASI. *ALCHEMY*, Vol. 3 No.1, hal 93 – 100.
- Hendrawati, Liandi, A. R., Solehah, M., Setyono, M. H., Aziz, I., & Siregar, Y. D. I. (2022). Pyrolysis of PP and HDPE from plastic packaging waste into liquid hydrocarbons using natural zeolite Lampung as a catalyst. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*.
- Herizal. (2020). Sintesis Katalis Zeolit H-ZSM-5 dari Zeolit Alam Wonosari untuk Konversi Etanol Menjadi Olefin. *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi* Vol. 54 No. 3: 159 – 167.
- Ibrahim, M., Machmud, M. N., & Aki, M. (2022). Bahan Bakar Minyak Dari Berbagai Metode Konversi Sampah Plastik. *JOURNAL OF ENGINEERING AND SCIENCE*, 1(1), 20–30.
- Jamilatun S., Pitoyo J., Puspitasari A., Sarah D. (2022). PIROLISIS TANDAN KELAPA SAWIT UNTUK MENGHASILKAN BAHAN BAKAR CAIR, GAS, WATER FASE DAN CHARCOAL. <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit>
- Kartika, W. (2022). PEMANFAATAN SAMPAH PLASTIK JENIS HDPE DAN PET SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN BAHAN BAKAR MINYAK ALTERNATIF MENGGUNAKAN METODE PIROLISIS DENGAN KATALIS ZEOLIT ALAM. *AGROINDUSTRIAL TECHNOLOGY JOURNAL*, 6(2), 106–117.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah Limbah dan B3, & Direktorat Penanganan Sampah. (2022). Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. <https://Sipsn.Menlhk.Go.Id/Sipsn/Public/Data/Komposisi>.

- Khairil, Riayatsyah, T. M. I., Bahri, S., Sofyan, S. E., Jalaluddin, J., Kusumo, F., Silitonga, A. S., Padli, Y., Jihad, M., & Shamsuddin, A. H. (2020). Experimental Study on the Performance of an SI Engine Fueled by Waste Plastic Pyrolysis Oil–Gasoline Blends. *Energies*, 10(13).
- Khairunisa, I. (2020, December 7). Upaya Pemerintah dalam Mengurangi Pemakaian Plastik. *Ketikunpad.Ac.Id*.
- Lanang Y. A., Nuryosuwito, Rhohman F. (2020). Perbandingan Pemakaian Hasil Pirolisis Plastik HDPE dengan Premium Terhadap Kerja Mesin Menggunakan ANSYS. Seminar Nasional Inovasi Teknologi UN PGRI Kediri.
- Leahy, S. (2004, June 5). DROWNING IN AN OCEAN OF PLASTIC. *Wired News*.
- Lumbantoruan P., Yulianti E. (2016). PENGARUH SUHU TERHADAP VISKOSITAS MINYAK PELUMAS (OLI). Universitas PGRI Palembang Volume 13, No.2.
- Muis, L., Prabarsari, I. G., Suyana, N. (2019). Pengaruh Berat Katalis Zeolit Alam terhadap Pencairan Limbah Ban dalam Bekas Kendaraan Bermotor Roda Dua Menjadi Bahan Bakar Cair. *Jurnal Daur Lingkungan*, 2(2): 63-67.
- Ningsih E., Udyani K., Budianto A., Hamidah N., Afifa S. (2020). Pengaruh ukuran partikel arang dari limbah tutup botol plastik terhadap kualitas briket. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 36(2), 101-108.
- Purnami, Wardana, Veronika K., (2015). Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Laju Dan Efisiensi Pembentukan Hidrogen. *Jurnal Rekayasa Mesin Vol.6, No.1*: 51-59.
- Purwanti L., (2015). Uji Viskositas Bahan Bakar Cair Alami dengan Menggunakan Viskosimeter Ostwald. <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

- Subiyanto. (2006). Spesifikasi dan Standar Spesifikasi Minyak Lumas Motor Bensin untuk Kendaraan. LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS SUBIYANTO VOL. 40. NO. 3: 37 – 44.
- Syakti A.D. (2017). Microplastics Monitoring in Marine Environment. Marine Science and Fisheries Faculty.
- Tahdid, Harlivia, R., & Effendy, S. (2022). Pengaruh Persen Katalis Zeolit Alam Terhadap Yield Bahan Bakar Cair Proses Pirolisis dari Limbah Plastik Polypropylene. Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia (JPTI), 2(11), 453–459.
- Tahdid, Manggala, A., Wasiran, Y., Nurryama, I., Ramadhani, P. S., & Kobar, A. A. (2022). PENGARUH JUMLAH ZEOLIT DAN TEMPERATUR TERHADAP RENDEMEN BAHAN BAKAR CAIR MENGGUNAKAN LIMBAH PLASTIK DI UNIT THERMAL CATALYTIC CRACKING REACTOR. Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, 7(2).
- Wahyudi N.T., Ilham F. F., Kurniawan I., Sanjaya A.S. (2017). RANCANGAN ALAT DISTILASI UNTUK MENGHASILKAN KONDENSAT DENGAN METODE DISTILASI SATU TINGKAT. Jurnal Chemurgy, Vol. 01, No.2.