

LAPORAN PENELITIAN

**PIROLISIS CAMPURAN LIMBAH PLASTIK PP DAN PE
MENGUNAKAN KATALIS FCC JENIS SPENT (*SPENT CAT*)**



Disusun oleh :

JOAN ADHEISA NUARI (3335200018)

M. AKBAR DWIRAHARJA (3335200034)

JURUSAN TEKNIK KIMIA-FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA

CILEGON-BANTEN

2024

LEMBAR PENGESAHAN

LAPORAN PENELITIAN
PIROLISIS CAMPURAN LIMBAH PLASTIK PP DAN PE
MENGUNAKAN KATALIS FCC JENIS SPENT (*SPENT CAT*)

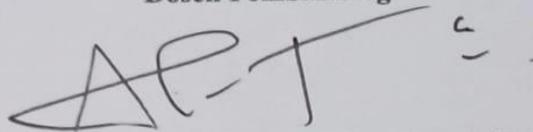
Disusun oleh:

JOAN ADHEISA NUARI (3335200018)
M. AKBAR DWIRAHARJA (3335200034)

Telah Disetujui Oleh Dosen Pembimbing dan Telah dipertahankan di hadapan Dewan Penguji

Pada tanggal 04 Oktober 2024

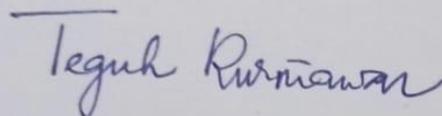
Dosen Pembimbing



Prof. Dr. Ir. Ing Anton Irawan, S.T., M.T., ASEAN Eng.
NIP: 197510012008011007

Dosen Penguji I

Dosen Penguji I



Prof. Dr. Teguh Kurniawan, S. T.,
M.T., Phd
NIP: 198305062006041002



Endang Suhendi, ST., M. Eng.
NIP: 197707052003121001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Kimia



Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng.
NIP: 197510222005011002

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

NAMA : M. Akbar Dwiraharja

Joan Adheisa Nuari

NIM : 3335200034

3335200018

JURUSAN : Teknik Kimia

JUDUL : Pirolisis Campuran Limbah Plastik PP dan PE Menggunakan Katalis FCC Jenis Spent (*Spent Cat*)

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian dengan judul tersebut adalah benar karya penulis sendiri dengan arahan dari dosen pembimbing dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain kecuali yang telah disebutkan sumbernya.

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiasi dalam penelitian ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Cilegon, 31 Januari 2025



M. Akbar Dwiraharja

NIM.3335200034



Joan Adheisa Nuari

NIM.3335200018

ABSTRAK

PIROLISIS CAMPURAN LIMBAH PLASTIK PP DAN PE MENGGUNAKAN KATALIS FCC JENIS SPENT (*SPENT CAT*)

Oleh :

Joan Adheisa Nuari (3335200018)

M. Akbar Dwiraharja (3335200034)

Pirolisis merupakan salah satu metode dalam pengolahan sampah plastik yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar minyak. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui pengaruh rasio campuran plastik PP dan PE serta rasio katalis terhadap kualitas dan kuantitas produk minyak pirolisis. Setelah itu, produk minyak pirolisis yang dihasilkan dianalisa kelayakan keekonomiannya. Metode pirolisis pada penelitian ini dilakukan pada suhu 350°C selama 60 menit dengan variasi campuran plastik PP dan PE dalam 500 gram yaitu 1:1, 2:1, dan 3:1 serta memvariasikan rasio penambahan *spent catalyst FCC* sebanyak 5%, 10%, dan 15% wt terhadap campuran plastik PP dan PE. Produk minyak pirolisis dilakukan uji viskositas, densitas, dan GC-MS. Penelitian ini dilakukan di Gedung 5 Pertamina Technology Innovation (TI). Hasil yang didapatkan pada penelitian ini ialah pada variasi campuran plastik PP dan PE terbaik dengan menghasilkan banyak produk minyak pirolisis terdapat pada rasio 3:1 sebesar 81,56%wt sedangkan pada variasi rasio penambahan *spent catalyst FCC* dengan campuran plastik PP dan PE 3:1 kualitas produk minyak terbaik terdapat pada penambahan katalis 15%wt sedangkan kuantitas minyak terbanyak pada penambahan katalis 10%wt yaitu sebesar 81,56%wt. Nilai viskositas dan densitas berturut-turut yang didapatkan tidak jauh berbeda yaitu sebesar 1,27 – 1,31 cSt dan 0,769 – 0,770 g/cm³. Berdasarkan analisa ekonomi bahwa produk minyak pirolisis yang dihasilkan tidak ekonomis karena biaya operasional lebih mahal daripada harga jual produknya.

Kata Kunci : Pirolisis, Spent Catalyst FCC, PP, PE

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya kami dapat menyelesaikan Penelitian yang berjudul Pirolisis Campuran Plastik PP dan PE Menggunakan Katalis FCC Jenis Spent (*Spent Cat*). Laporan ini disusun sebagai syarat menyelesaikan salah satu mata kuliah di jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Kami menyadari keterbatasan pengetahuan, pengalaman dan kemampuan menulis, sehingga laporan ini tidak luput dari kekurangan. Oleh karena itu, penelitian laporan ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dalam kesempatan ini kami ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang ikut terlibat dalam setiap proses pembuatan tugas akhir ini sampai dengan selesai, yaitu :

1. Prof. Dr. Ir. H. Fatah Sulaiman, S.T., M.T. Selaku Rektor Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
2. Prof. Dr. Jayanudin, S.T., M.Eng. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
3. Dr. Heri Heriyanto, S.T., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Program Studi Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
4. Prof. Dr. Ir. Ing Anton Irawan, S.T., M.T., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan dan pengarahan, memotivasi dan penuh kesabaran serta dukungan yang berlimpah hingga laporan ini terselesaikan.
5. Fuqan Aulia, M.Sc. dan Dwi Widianoro S.T Selaku pembimbing lapangan yang telah memberikan motivasi sebagai perbaikan diri, memberikan ilmu dan arahan serta bimbingannya semasa melakukan penelitian di Pertamina TI Pulogadung
6. Segenap dosen dan staff Program Studi Teknik Kimia Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah mendidik serta memberikan ilmunya kepada kami.

7. Rekan-rekan mahasiswa utamanya dari Program Studi Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa atas dukungan dan kerjasamanya selama menempuh pendidikan.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu memberikan pemikiran demi kelancaran dan keberhasilan penyusunan ini.

Semoga segala kebaikan yang dihadirkan dalam segala bentuk selalu dibalas oleh Allah SWT. Kami menyadari banyak sekali segala kekurangan dalam menyusun laporan penelitian karena keterbatasan pengetahuan, namun kami berharap laporan penelitian ini memiliki kebermanfaatan bagi semua pembaca.

Jakarta, 20 Agustus 2024

Penulis 1,



Joan Adheisa Nuari

NIM: 3335200018

Penulis 2,



M. Akbar Dwiraharja

NIM: 3335200034

DAFTAR ISI

LAPORAN PENELITIAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pirolisis.....	5
2.2 Jenis - Jenis Plastik.....	5
2.4 Pengaruh Katalis Pada Pirolisis Plastik.....	6
2.5 Mekanisme Pirolisis Katalitik	9
2.6 Spent Cat FCC.....	9
BAB III METODE PENELITIAN	11
3.1 Tahapan Penelitian.....	11
3.1.1 Preparasi bahan.....	11
3.1.2 Proses Pirolisis	11
3.1.3 Pengujian Densitas	12
3.1.4 Pengujian Viscositas	13
3.1.5 Pengujian GC-MS.....	15
3.2 Prosedur Penelitian.....	16
3.2.1 Preparasi Bahan.....	16
3.2.2 Proses Pirolisis	16
3.2.3 Pengujian Densitas	16

3.2.4	Pengujian Viskositas	17
3.2.5	Pengujian GC-MS.....	17
3.3	Alat dan Bahan	18
3.3.1	Alat	18
3.3.2	Bahan.....	19
3.4	Variabel Penelitian.....	19
3.5	Metode Pengumpulan dan Analisis Data.....	19
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1	Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Hasil Pirolisis .	20
4.2	Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Hasil Pirolisis	21
4.3	Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Komposisi Produk Minyak Pirolisis.....	22
4.4	Pengaruh Rasio Katalis terhadap Sifat Fisik Minyak Pirolisis.....	26
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	29
5.1	Kesimpulan.....	29
5.2	Saran	29
	DAFTAR PUSTAKA.....	30
	LAMPIRAN.....	33

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan pirolisis termal dan katalitik.....	5
Tabel 2. 2 Analisis proksimat plastik	5
Tabel 2. 3 Pengaruh jenis katalis terhadap hasil pirolisis.....	7
Tabel 4. 1 Komposisi Minyak Pirolisis GC-MS	24
Tabel 4. 2 Sifat Fisik Minyak Pirolisis tiap Variasi Rasio Katalis	26
Tabel 4. 3 Rentang Nilai Viskositas dan Densitas pada Minyak Bumi.....	26
Tabel 4. 4 Biaya operasional pirolisis	27

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Diagram Alir Preparasi Plastik	11
Gambar 3. 2 Diagram Alir Proses Pirolisis.....	12
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengujian Densitas	13
Gambar 3. 4 Diagram Alir Pengujian Viskositas.....	14
Gambar 3. 5 Diagram Alir Pengujian GC-MS	15
Gambar 3. 6 Rancangan Alat Pirolisis.....	19
Gambar 4. 1 Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Distribusi Produk	20
Gambar 4. 2 Pengaruh Spent Katalis FCC terhadap Hasil Produk	22
Gambar 4. 3 Efek variasi %katalis terhadap minyak cair pirolisis katalitik dalam analisa GC-MS	25

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan konsumsi bahan bakar minyak dan sampah plastik merupakan dua permasalahan besar yang muncul seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan peningkatan jumlah penduduk (Adoe dkk., 2016). Menurut data Energy Institute (Energyinst.org, 2024), dalam Statistical Review World Energy 2024, konsumsi minyak Indonesia pada tahun 2023 sebesar 1,6 juta barel per hari atau meningkat sebesar 0,4% dari tahun sebelumnya. Sedangkan produksinya hanya 0,6 juta barel per hari menurun sebesar 1,4% dari tahun sebelumnya. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Indonesia masih mengandalkan impor minyak dari negara-negara penghasil minyak.

Selain isu energi, masalah sampah plastik menjadi perhatian besar akhir-akhir ini karena jumlahnya yang sangat banyak. Menurut data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) (Sipsn.menlhk.go.id, t.t.), pada tahun 2023 jumlah sampah yang tidak terkelola kurang lebih sebesar 8,8 juta ton per tahun dengan komposisi sampah plastik sebesar 18,7% atau sebesar 1,6 juta ton per tahun. Jumlah sampah plastik ini, apabila tidak dikelola dengan baik akan merusak lingkungan, mengancam kehidupan hewan, serta kesehatan manusia.

Salah satu metode pengelolaan sampah plastik adalah pirolisis. Pirolisis dapat mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak alternatif. Metode ini dapat menjawab isu krisis energi serta kelestarian lingkungan. Pirolisis adalah metode untuk mengubah struktur molekul-molekul polimer menjadi komponen kimia lain melalui proses termal tanpa oksigen (O₂) (Irawan dkk., 2023).

Selain menawarkan berbagai keuntungan, teknologi pirolisis termal mempunyai kelemahan, seperti beroperasi pada suhu tinggi, konsumsi energi yang tinggi, dan kualitas minyak yang rendah (Irawan dkk., 2023). Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan pirolisis katalitik. Katalis dapat menurunkan

reaksi suhu karena menyediakan situs aktif di permukaan untuk meningkatkan reaksi pirolisis dengan menurunkan energi aktivasi serta dapat mendorong selektivitas produk akhir (Rahman dkk., 2017). Teknologi pirolisis katalitik ini akan dijadikan metode riset untuk melihat seberapa optimal penambahan *Spent FCC Catalyst* dalam proses pengolahan sampah plastik untuk menghasilkan minyak yang bernilai jual.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Irawan dkk., 2023), pirolisis katalitik plastik PP (Limbah kemasan air mineral gelas) dan PE (Limbah tutup botol plastic) dengan penambahan zeolit alam Bayah menghasilkan minyak pirolisis sebesar 67% dan 70% pada suhu optimum 400°C. Hasil tersebut akan dibandingkan dengan penelitian ini, dengan memvariasikan campuran sampah plastik PE dan PP serta penambahan *Spent FCC Catalyst*, untuk melihat seberapa optimal minyak pirolisis yang dihasilkan. Oleh karena itu, dapat dirumuskan perumusan masalah seperti berikut ini:

1. Bagaimana pengaruh rasio campuran sampah plastik PE dan PP dengan penambahan *Spent FCC Catalyst* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh rasio penambahan *Spent Catalyst FCC* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan?
3. Bagaimana kelayakan keekonomisan produksi minyak pirolisis yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini diantaranya sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh campuran sampah plastik dengan penambahan *Spent FCC Catalyst* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan.
2. Mengetahui pengaruh rasio penambahan *spent catalyst FCC* terhadap kualitas dan kuantitas minyak pirolisis yang dihasilkan.
3. Mengetahui kelayakan ekonomi terhadap minyak pirolisis yang dihasilkan.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode pirolisis katalitik dalam menghasilkan bahan bakar minyak. Bahan baku yang digunakan berupa sampah plastik PP dan PE yang didapatkan dari lingkungan sekitar Pertamina Technology Innovation (TI) Pulogadung. Katalis yang digunakan adalah *Spent FCC Catalyst* didapatkan dari Pertamina TI. Penelitian ini dilakukan di Gedung 5 Pertamina TI.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pirolisis

Pirolisis adalah suatu proses dekomposisi suatu bahan menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana dengan menggunakan pemanas tanpa adanya oksigen. Tiga produk utama yang dihasilkan adalah minyak, gas, dan residue padat (Pertamina, 2021). Proses pirolisis merupakan proses yang paling fleksibel karena parameter proses dapat dimanipulasi untuk mengoptimalkan hasil produk berdasarkan preferensi (Anuar Sharuddin dkk., 2016).

Pirolisis dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu pirolisis termal dan pirolisis katalitik. Perbedaan utamanya terdapat pada katalis. Pada pirolisis termal tidak menambahkan katalis dalam prosesnya sedangkan pirolisis katalitik menambahkan katalis. Perbandingan hasil dari pirolisis termal dan katalitik dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Perbandingan pirolisis termal dan katalitik

Pirolisis Termal	Pirolisis Katalistik
Membutuhkan energi pemanasan yang besar	Mengurangi kebutuhan energi pemanasan
Suhu operasi tinggi	Mengurangi suhu operasi
Terdapat pengotor dalam minyak pirolisis pirolisis	Mengurangi pengotor dalam minyak pirolisis pirolisis
Menghasilkan banyak fraksi berat hidrokarbon dalam minyak pirolisis pirolisis	Menurunkan fraksi berat hidrokarbon dalam minyak pirolisis pirolisis
Menghasilkan minyak pirolisis pirolisis dengan angka oktan rendah	Menghasilkan minyak pirolisis pirolisis dengan angka oktan tinggi
Jumlah residue padat banyak	Jumlah residue padar sedikit

Banyak para peneliti memfokuskan penelitiannya untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas minyak yang dihasilkan. Salah satunya adalah pirolisis

katalitik. Katalis dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas minyak yang dihasilkan karena memiliki sifat selektivitas dan aktifitas dengan cara menurunkan energi aktivasinya dan berefek pada suhu operasi yang rendah daripada proses pirolisis termal (Irawan dkk., 2023; Rahman dkk., 2017).

2.2 Jenis - Jenis Plastik

Pada dasarnya, plastik memiliki berbagai jenis karena perbedaan kebutuhan aplikasinya yang sangat beragam. Perbedaan ini didasarkan atas komposisi kimia dan struktur penyusunnya, yang semuanya akan mempengaruhi sifat kimia, fisik, dan termal.

Pada pirolisis plastik ini, salah satu sifat yang perlu diketahui ini adalah sifat kimianya. Sifat kimia ini berguna untuk mengetahui seberapa besar potensi minyak pirolisis yang dihasilkan pada proses pirolisis. Analisis proksimat dapat diartikan sebagai metode untuk mengukur sifat kimia plastik berdasarkan empat elemen utama, yaitu kadar air, karbon tetap, zat yang mudah menguap, dan kadar abu (Anuar Sharuddin dkk., 2016). Berikut adalah Tabel yang berisikan sifat kimia dari berbagai jenis plastik.

Tabel 2. 2 Analisis proksimat plastik

Jenis Plastik	Mark Plastik	Kelembapan (wt%)	Karbon tetap (wt%)	Mudah menguap (wt%)	Abu (wt%)	Ref.
PET		0,61	13,17	86,83	0,00	(Heikkinen dkk., 2004)
HDPE		0,00	0,03	98,57	1,40	(Heikkinen dkk., 2004)

PVC		0,74	5,19	94,82	0,00	(Heikkinen dkk., 2004)
LDPE		0,30	0,00	99,70	0,00	(Park dkk., 2012)
PP		0,18	0,16	97,85	1,99	(Heikkinen dkk., 2004)
PS		0,30	0,20	99,50	0,00	(Park dkk., 2012)
Other (PE)		0,10	0,04	98,87	0,99	(Jung dkk., 2010)

Berdasarkan Tabel 2. Berbagai jenis plastik memiliki bahan yang mudah menguap tinggi yang dapat memproduksi minyak pirolisis yang banyak. Tetapi pada umumnya pirolisis plastik menggunakan plastik jenis olefin dan PS sedangkan plastik jenis PET dan PVC jarang digunakan. Hal itu disebabkan karena minyak pirolisis hasil dari PET mengandung asam benzoate yang besar (Anuar Sharuddin dkk., 2016)(Ozdemir dkk., t.t.). Hal itu dapat menurunkan kualitas minyak pirolisis yang dihasilkan. Sedangkan plastik PVC dapat menghasilkan pelepasan produk berbahaya seperti HCl yang dapat menyebabkan kerusakan pada alat proses serta berbahaya untuk lingkungan (Anuar Sharuddin dkk., 2016)(Miranda dkk., t.t.).

2.4 Pengaruh Katalis Pada Pirolisis Plastik

Penggunaan katalis pada pirolisis plastik dapat mempengaruhi kinetika, mekanisme reaksi serta distribusi produk. Pada dasarnya, katalis memiliki beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan sifat selektivitas dan aktivitas yang dapat dilihat

dari struktur dan dimensi kristal, ukuran pori dan porositas, keasaman, luas permukaan, volume pori, stabilitas termal, dan rasio Si/Al (Oyeleke dkk., 2021). Berikut ini adalah Tabel pengaruh jenis katalis terhadap distribusi produk.

Tabel 2. 3 Pengaruh jenis katalis terhadap hasil pirolisis

Jenis Katalis	Ukuran pori (Å°)	Jenis pori	Hasil	Keterangan
ZSM-5	5,4 – 5,6	Mikropori	Menghasilkan persentase produk gas yang lebih besar daripada minyak.	Hasil ini disebabkan karena sifat asam yang kuat dan struktur saluran pori intrakristalin yang lebih besar. Pori-pori yang kecil dapat mengarahkan ke hidrokarbon rendah berupa gas.
Mordenite	48,4 – 78,6	Mesopori	Menghasilkan fraksi C11-C13 parafin yang jauh lebih besar dan jumlah kokas yang lebih banyak	Hasil ini disebabkan karena ukuran pori yang relative besar sehingga pori katalis akan memproduksi ke arah hidrokarbon berat dan sejumlah kokas yang lebih banyak.
REY	7,8	Mikropori	Menghasilkan banyak minyak dengan angka	Hasil ini disebabkan karena stabilitas, keasaman yang

			oktan tinggi serta menjadi yang terbaik dalam hal konversi menjadi minyak	memadai, dan pori-pori yang relative besar di mana molekul minyak dapat menembus.
Zeolit-Y	7,4	Mikropori	Menghasilkan banyak fraksi C3-C15	Mayoritas produk adalah isoparafin, yang menunjukkan angka oktan tinggi, menunjukkan bahan bakar berkualitas tinggi sebagai produk dari proses degradasi katalitik.
Silika mesopori (FSM)	27	Mesopori	FSM tidak hanya mempercepat laju degradasi polimer tetapi juga mendegradasi senyawa lilin yang lebih berat menjadi hidrokarbon cair yang lebih ringan .	Hasil ini disebabkan karena pori-pori yang relative besar.
Aluminosilikat mesopore	30,5	Mesopori	Menghasilkan banyak minyak dan gas lebih kecil	Hasil ini disebabkan karena dimensi pori yang besar.
FCC	7,4	Mikropori	Memproduksi cairan hidrokarbon ringan dengan	Hasil ini disebabkan karena ukuran pori yang kecil sehingga

			nomor karbon C6 - C15.	katalis akan memproduksi ke arah hidrokarbon ringan.
--	--	--	---------------------------	---

2.5 Mekanisme Pirolisis Katalitik

Mekanisme perengkahan katalitik sangat bervariasi yang dicirikan dengan reaksinya yang berbeda oleh setiap jenis katalis yang digunakan (Oyeleke dkk., 2021)(Lopez-Uribe dkk., 2012). Reaksi penguraian ini sangat bergantung pada situs asam Bronsted dan Lewis pada keasaman katalis. Perengkahan dibagi menjadi dua yaitu perengkahan primer dan sekunder. Pada perengkahan primer, diawali dengan degradasi molekul hidrokarbon fraksi berat pada permukaan luar katalis hingga membentuk molekul hidrokarbon yang ukurannya lebih kecil daripada pori-pori katalis. Molekul hidrokarbon ini akan bereaksi kembali pada struktur pori internal katalis untuk melanjutkan proses perengkahan menjadi molekul hidrokarbon fraksi ringan yang mendukung produksi gas dan minyak sesuai dengan ukuran pori katalis yang digunakan. (Oyeleke dkk., 2021)(Fermoso dkk., 2016)(Miandad dkk., 2016).

2.6 Spent Cat FCC

Katalis *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) adalah teknologi penting dalam industri pemrosesan minyak untuk meningkatkan produksi olefin ringan, seperti etilena dan propilena, dari minyak bumi berat (Vogt & Weckhuysen, 2015). FCC menggunakan katalis berbasis zeolit yang memiliki struktur mikro dengan luas permukaan besar untuk mengonversi hidrokarbon berat menjadi fraksi yang lebih ringan melalui reaksi perengkahan (*cracking*) pada suhu tinggi (Gholami dkk., 2021). Katalis FCC merupakan kombinasi dari kristal zeolit dan matriks asam non-zeolit yang dikenal sebagai silika-alumina dengan binder (Degnan, 2000).

Katalis FCC yang digunakan dalam pirolisis biasanya berjenis *Spent Cat FCC*, *Spent Catalyst FCC* merupakan katalis yang dipergunakan dalam proses *cracking* dari industri petroleum yang diklasifikasikan sudah jenuh dan tidak dapat dipergunakan kembali untuk proses produksi (Handoko, t.t.). Dari penelitian yang dilakukan oleh (E. T. Aisien dkk., 2021) didapatkan hasil pirolisis yang

menggunakan *spent cat FCC* bahwa pengaruh katalis tersebut pada pirolisis dapat mengurangi waktu tinggal atau waktu proses pirolisis dan dapat mengurangi dari pendapatan residu (*Char*).

Dalam hasil penelitian yang serupa (E. T. Aisien dkk., 2021) menunjukkan pula hasil dari minyak pirolisis yang menggunakan katalis *spent cat FCC* jika dibandingkan dengan minyak komersial seperti bensin, minyak tanah, dan diesel hasil pengujian sifat fisik seperti densitas, viscositas lebih mendekati ke produk minyak tanah komersial dan untuk pengujian kimianya menggunakan GC-MS minyak pirolisis yang dihasilkan menunjukkan pada kisaran fraksi gasoline dan diesel, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa minyak cair pirolisis yang menggunakan *Spent Cat FCC* merupakan campuran kompleks hidrokarbon dengan atom mulai dari C₄ hingga C₁₇.

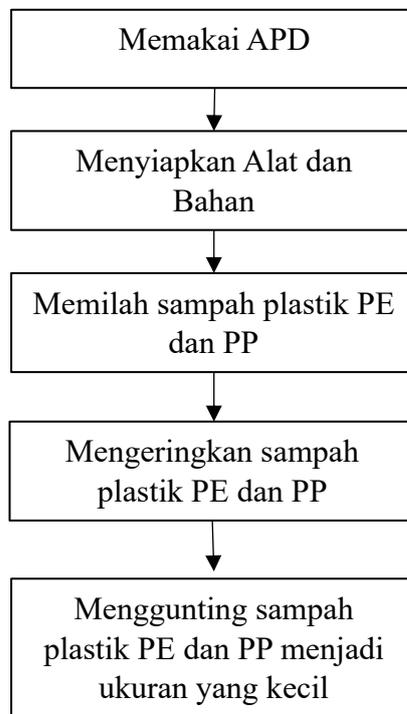
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

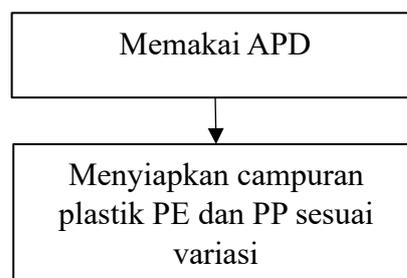
Penelitian ini dilakukan dengan dua tahapan, yaitu preparasi bahan dan proses pirolisis. Berikut adalah diagram alir tahapan penelitian yang akan dilakukan:

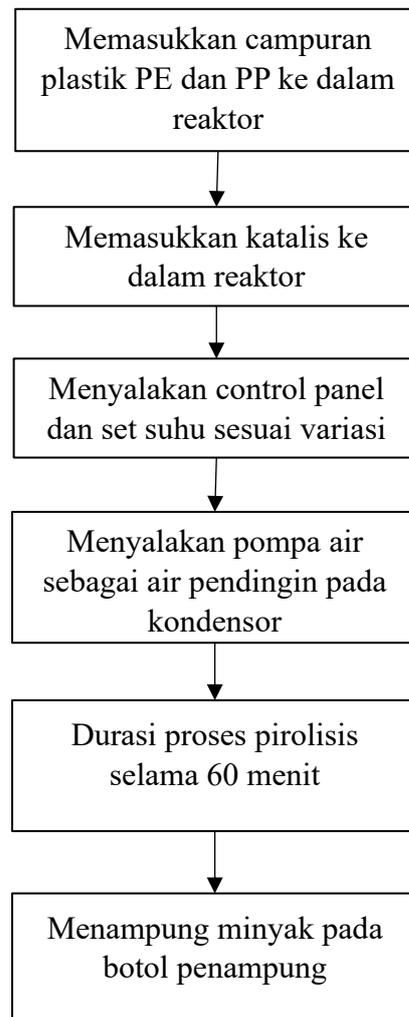
3.1.1 Preparasi bahan



Gambar 3. 1 Diagram Alir Preparasi Plastik

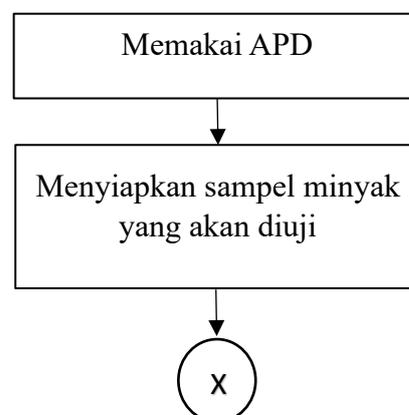
3.1.2 Proses Pirolisis

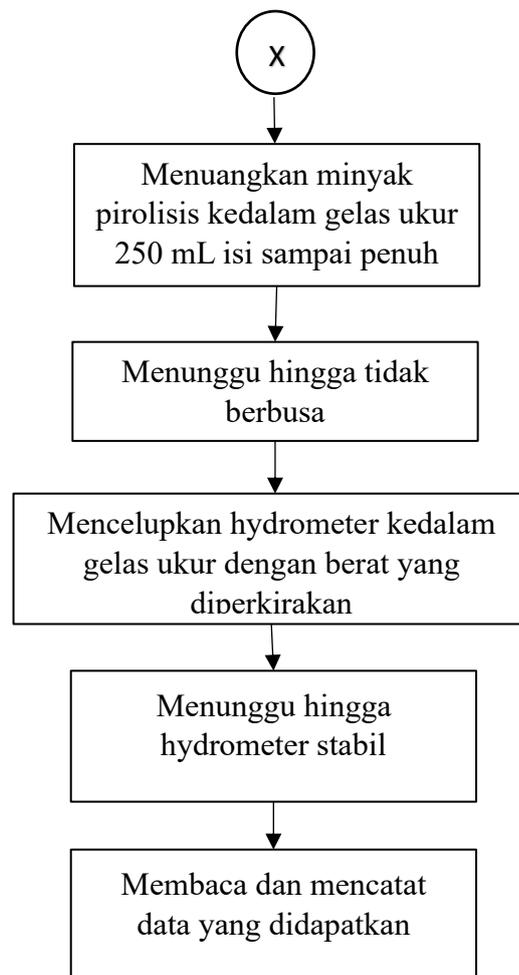




Gambar 3. 2 Diagram Alir Proses Pirolisis

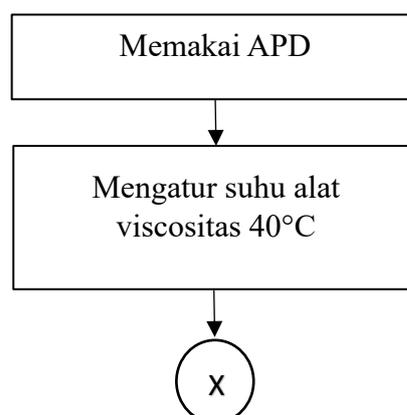
3.1.3 Pengujian Densitas

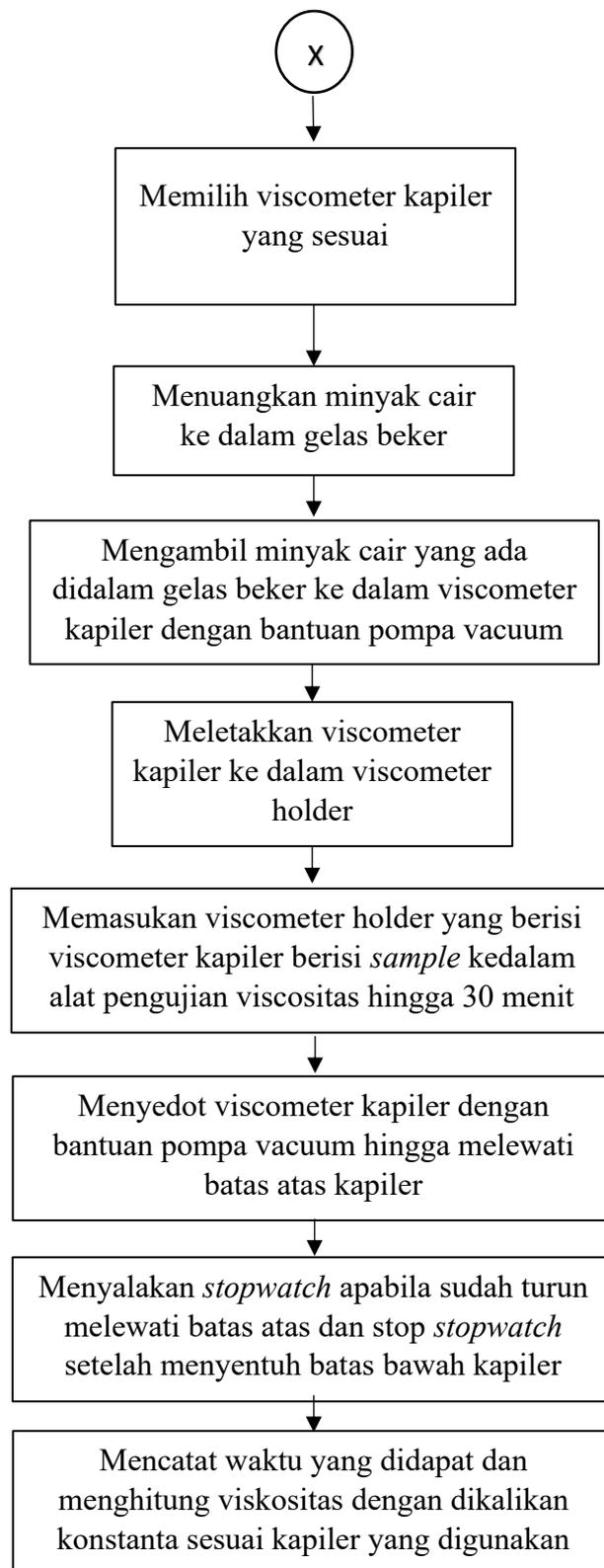




Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengujian Densitas

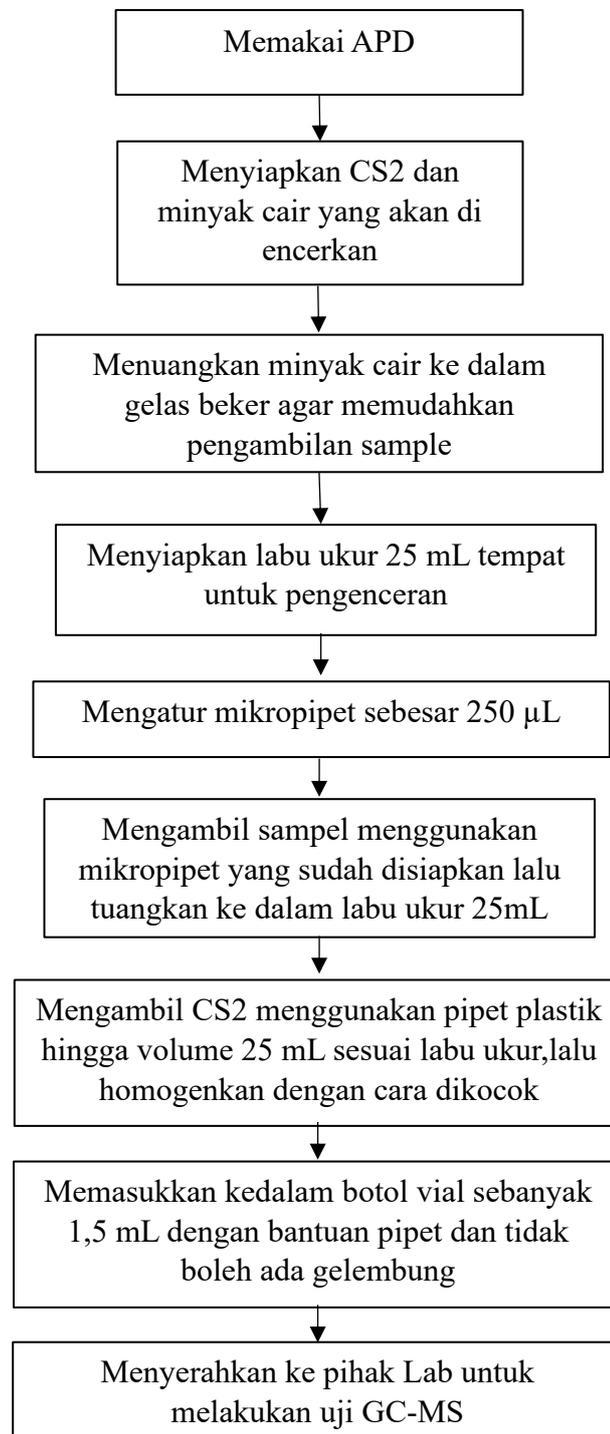
3.1.4 Pengujian Viscositas





Gambar 3. 4 Diagram Alir Pengujian Viskositas

3.1.5 Pengujian GC-MS



Gambar 3. 5 Diagram Alir Pengujian GC-MS

3.2 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan dua tahapan yaitu preparasi bahan baku dan proses pirolisis. Berikut adalah kedua prosedur penelitian yang akan dilakukan.

3.2.1 Preparasi Bahan

Pada persiapan bahan baku pertama-tama memilah dan memilih sampah plastik PP (Limbah kemasan air mineral gelas) dan PE (Limbah tutup botol plastic) lalu dikeringkan dengan metode penjemuran di bawah matahari kemudian dilakukan pemotongan hingga berukuran berukuran kecil. Setelah itu, lakukan penimbangan massa plastik sesuai dengan variasi yang ditentukan lalu dilakukan pencampuran antara plastik PP dan PE sesuai variasi.

3.2.2 Proses Pirolisis

Pada proses ini yang dilakukan pertama kali yaitu dengan mencampurkan sampah plastik PP dan PE dengan total berat 500 gram untuk masing-masing sampah plastik PP dan PE berturut-turut sebesar 250 gram PP dan 250 gram PE, 333 gram PP dan 167 gram PE, serta 375 gram PP dan 125 gram PE. Lalu setelah itu dimasukkan kedalam reaktor dan memasukkan katalis kedalam reaktor katalitik setelah itu ditutup rapat. Lalu mulai menyalakan *control panel* dan set temperature sesuai variasi yang sudah ditentukan setelah itu mulai menyalakan pompa air yang berfungsi sebagai *cooling water* di bagian kondensor setelah itu menunggu hingga proses pirolisis selesai yang dimana dilakukan selama 60 menit jangan lupa meletakkan botol penampung minyak pirolisis dikeluarkan produk minyak.

3.2.3 Pengujian Densitas

Pada proses ini yang dilakukan pertama kali yaitu memakai APD lalu menyiapkan sampel minyak cair yang akan diuji, dimana pada penelitian kali ini minyak cair yang akan diuji yaitu PP dan PE 3:1 dengan variasi katalis 5%wt, 10%wt, dan 15%wt. Setelah itu tuangkan kedalam gelas ukur 250 mL isi sampai penuh pas 250 mL dan tunggu hingga tidak berbusa, setelah itu celupkan hydrometer yang dirasa beratnya cocok dengan sample minyak cair dimana pada penelitian ini hydrometer yang

dipake dari rentang 0,76 – 0,8. Tunggu hingga hydrometer stabil setelah stabil dapat dilihat ambang mengambang hydrometer berada diangka berapa lalu catat data yang didapatkan.

3.2.4 Pengujian Viskositas

Pada proses ini yang dilakukan pertama kali yaitu menggunakan APD lalu menyalakan alat dan mengatur suhu sebesar 40°C. Setelah itu menyiapkan dan memilih viscometer yang sesuai yang dimana pada penelitian ini viscometer yang sesuai dengan sampel kami yaitu viscometer kapiler S 50 597A. Lalu menuangkan minyak cair kedalam gelas beker untuk masing-masing variasi katalis yaitu minyak cair PP dan PE 3:1 katalis 5%wt,10%wt, dan 15%wt agar memudahkan untuk pengambilan sampel yang nantinya akan dimasukkan kedalam viscometer kapiler dengan bantuan pompa vacuum. Meletakkan viscometer kapiler kedalam viscometer holder lalu masukkan viscometer holder kedalam alat uji viskositas yang sudah diatur sebelumnya lalu diamkan dan tunggu selama 30 menit. Setelah 30 menit nyalakan pompa vacuum untuk menyedot sampel hingga melewati batas atas kapiler lalu mulai menyalakan *stopwatch* setelah sampel turun melewati batas atas dan mengakhiri *stopwatch* setelah melewati batas bawah dari viscometer kapiler. Lalu catat waktu yang didapatkan dan mulai menghitung data viskositas dengan konstanta viscometer kapiler yang dipakai. Lakukan pengulangan prosedur untuk variasi 10%wt dan 15%wt.

3.2.5 Pengujian GC-MS

Pada proses ini yang pertama kali dilakukan menggunakan APD lalu menyiapkan CS₂ sebagai pengencer dan sampel minyak cair yang akan diencerkan yang dimana minyak cair PP dan PE 3:1 variasi katalis 5% wt,10%wt, dan 15%wt. Menuangkan sampel minyak cair masing-masing ke dalam gelas ukur agar memudahkan untuk pengambilan sampel lalu siapkan labu ukur berukuran total 25 mL. Pengenceran dilakukan dengan variasi 1:100 yang dimana sampel sample sebesar 0,25 mL dan sisanya adalah CS₂. Pengambilan *sample* dibantu dengan alat mikropipet yang sudah di atur

sebesar 250 μL untuk mengambil *sample* lalu dimasukkan kedalam labu ukur. Setelah itu mengambil CS_2 dengan pipet hingga labu ukur penuh 25 mL lalu homogenkan dengan cara dikocok. Setelah itu memasukkan sampel yang telah di encerkan dan dihomogenkan kedalam vial berukuran 1,5 mL dengan bantuan pipet plastik jangan sampai ada busa. Lalu menyerahkan sampel yang telah di encerkan ke pihak lab dengan menuliskan memo terlebih dahulu.

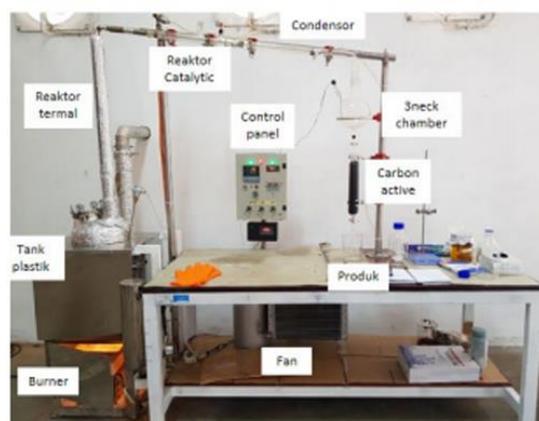
3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan diantaranya seperti berikut ini:

3.3.1 Alat

Alat yang digunakan pada percobaan ini adalah sebagai berikut:

- Botol penampung hasil pirolisis
- Botol vial
- Gelas beker
- Gelas ukur
- Gunting
- Hydrometer*
- Mikropipet
- Rancangan alat pirolisis
- Stopwatch*
- Viscometer kapiler
- Viscometer holder
- Wadah penampung plastik



Gambar 3. 6 Rancangan Alat Pirolisis

3.3.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan pada percobaan kali ini sebagai berikut:

- a. Campuran limbah plastik PP (Limbah kemasan air mineral gelas) dan PE (Limbah tutup botol plastic)
- b. CS₂
- c. *Spent Catalyst FCC* yang didapat dari kilang Pertamina.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel percobaan pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu variabel tetap dan variabel bebas. Variabel bebas penelitian ini yaitu variasi pengaruh persen penambahan *Spent Catalyst FCC* 5%, 10% dan 15%. Sedangkan variabel tetap yaitu ukuran dari plastik PP dan PE yang kecil, total berat campuran plastik PP dan PE 500 gram, durasi proses pirolisis katalitik selama 60 menit, dan suhu operasi 350°C.

3.5 Metode Pengumpulan dan Analisis Data

Pengumpulan Data :

1. Melakukan penimbangan dan pencatatan minyak dan padatan (jika ada) hasil pirolisis.
2. Menghitung gas hasil pirolisis dengan menggunakan neraca massa.

$$Gas = Berat\ bahan\ pirolisis - (minyak + padatan)$$

Analisa Data :

1. Mengitung persen yield minyak pirolisis

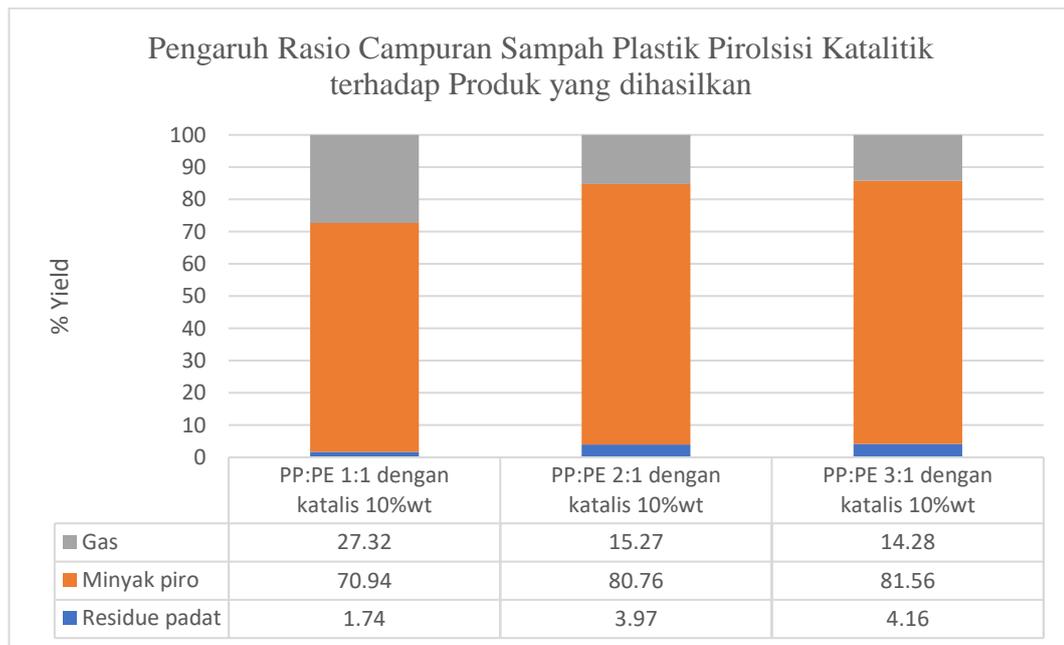
$$\% yield = \frac{massa\ minyak\ dihasilkan}{massa\ bahan\ input} \times 100\%$$

2. Analisis fisik berupa densitas dan viskositas.
3. Analisis komposisi minyak menggunakan GC-MS

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Hasil Pirolisis



Gambar 4. 1 Pengaruh Rasio Campuran Plastik PP dan PE terhadap Distribusi Produk

Degradasi termal setiap jenis plastik memiliki perbedaan suhu dalam degradasinya. Untuk memahami degradasi termal ini dapat dilakukan dengan analisis TGA (Thermogravimetric Analysis). Analisis TGA berguna untuk mengetahui tingkat kemudahan plastik untuk terdekomposisi. Menurut Miandad dkk, suhu degradasi PP dimulai pada suhu 240°C dan maksimum pada 425°C, sedangkan untuk PE dimulai pada suhu 270°C dan maksimum pada 485°C. Secara teoritis, PP terurai lebih cepat dibandingkan PE. Hal ini disebabkan oleh struktur molekul PP, di mana setengah dari atom karbon dalam rantai PP adalah karbon tersier. dan memudahkan pembentukan karbokation tersier selama proses degradasi, sehingga mempercepat pemutusan struktur kimianya (Anuar Sharuddin dkk., 2016). Pemutusan struktur kimia ini menghasilkan gas-gas yang lebih mudah terkondensasi dibandingkan dengan plastik PE (Irawan dkk., 2023). Oleh karena itu, penambahan plastik PP yang lebih banyak akan meningkatkan konversi

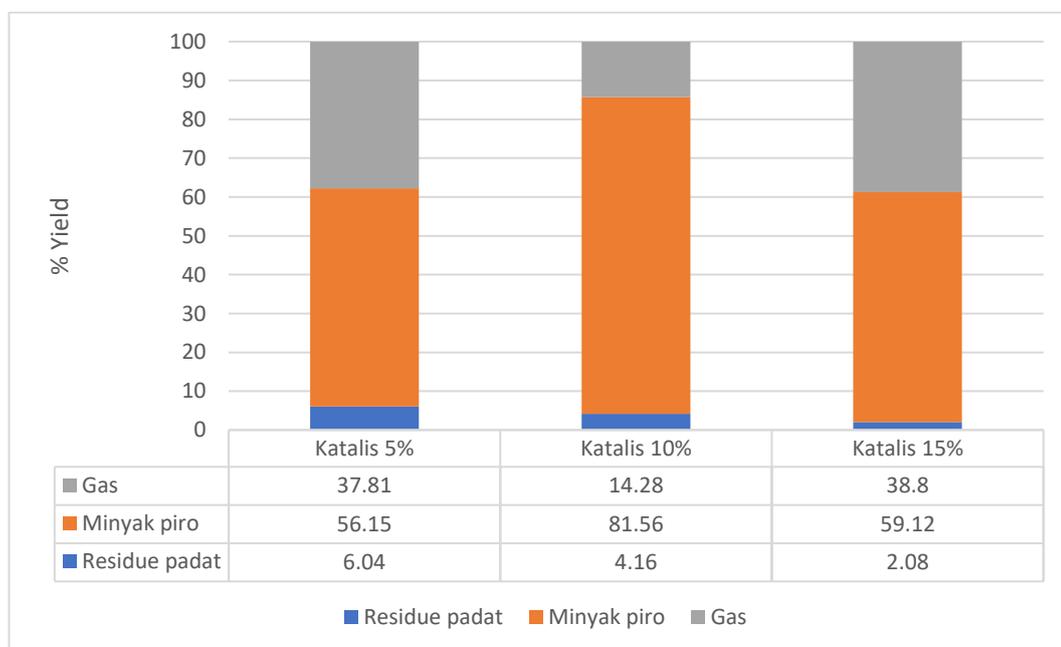
hidrokarbon menjadi cairan dan mengurangi kontribusi PE dalam menghasilkan gas (Aguado dkk., t.t.)(Al-Salem dkk., 2017)(Das & Tiwari, 2018). Hasil ini dapat dilihat pada Gambar 1, di mana pirolisis campuran plastik PP dan PE dengan rasio 3:1 menghasilkan lebih banyak minyak pirolisis dibandingkan dengan campuran plastik PP dan PE dengan rasio 2:1 dan 1:1. Hasil yang didapatkan ini selaras dengan penelitian (Heriyanto dkk., 2024) yang menyatakan bahwa semakin banyak penambahan plastik PP pada campuran plastik PP dan PE akan menghasilkan minyak pirolisis yang banyak pula.

4.2 Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Hasil Pirolisis

Gambar 4.2 menunjukkan bagaimana rasio katalis FCC pada pirolisis campuran plastik PP dan PE 3:1 pada suhu 350°C secara signifikan mempengaruhi distribusi produk minyak pirolisis, gas, dan residue padat. Pada peningkatan rasio katalis terhadap campuran plastik PP dan PE dari 5% wt hingga 15%wt, hasil residue padat mengalami penurunan dari 6,04% berat menjadi 2,08% berat. Hal ini disebabkan karena dengan peningkatan rasio katalis dapat meningkatkan konversi senyawa rantai panjang menjadi senyawa rantai pendek melalui degradasi katalitik (Oyeleke dkk., 2021)(Lee dkk., t.t.)(F. A. Aisien & Aisien, 2023). Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (F. A. Aisien & Aisien, 2023) yang menunjukkan tren penurunan residue padat pada peningkatan rasio katalis dari 0 - 20% wt terhadap plastik.

Namun pada penelitian ini, hasil minyak pirolisis dan gas trennya mengalami peningkatan dan penurunan. Pada peningkatan rasio katalis 5% wt hingga 10% wt, yield minyak mengalami peningkatan yang signifikan dari 56,15% menjadi 81,56% sedangkan gas mengalami penurunan dari 37,81% menjadi 14,28%. Tetapi pada peningkatan rasio katalis 15% wt, hasil minyak mengalami penurunan hingga 59,12% sedangkan gas mengalami kenaikan hingga 38,8%. Kemungkinan besar dengan meningkatkan rasio katalis menjadi 15%wt dapat memperbanyak situs-situs asam dan memperluas permukaan katalis sehingga luas kontak antara katalis dengan campuran plastik PP dan PE dalam perengkahan semakin banyak. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *over cracking* sehingga memungkinkan menghasilkan senyawa hidrokarbon rantai pendek seperti gas-gas

(Al-Salem dkk., 2017). Selain itu, mungkin dengan peningkatan rasio katalis dapat memperbanyak mikropori sehingga molekul-molekul tersebut tidak hanya bereaksi pada permukaan luar katalis dan mesopori tetapi juga pada mikropori katalis (Irawan dkk., 2023). Oleh sebab itu, dengan penambahan katalis 15%wt akan menghasilkan gas dan *gasoline* yang lebih banyak daripada penambahan katalis 5 dan 10%wt. Hal itu dapat dilihat seperti pada gambar 4.2. Tren peningkatan dan penurunan pada minyak cair yang dihasilkan serupa dengan penelitian (F. A. Aisien & Aisien, 2023) yang menunjukkan tren peningkatan minyak cair pada penambahan katalis 0-20% wt sedangkan tren penurunan terjadi pada penambahan katalis 25%wt.



Gambar 4. 2 Pengaruh Spent Katalis FCC terhadap Hasil Produk

4.3 Pengaruh Rasio Spent Katalis FCC terhadap Komposisi Produk Minyak Pirolisis

Tabel 4.1 dan Gambar 4.3(b) menampilkan hasil GC-MS berupa kandungan komposisi kimia yang terdapat pada minyak pirolisis katalitik campuran PP dan PE 3:1 pada suhu 350°C dengan berbagai rasio katalis 5, 10, dan 15% wt. Komposisi penyusun utama produk minyak cair pirolisis terdiri dari olefin, paraffin, aromatik, dan alkohol. Pada setiap rasio katalis memiliki kesamaan yaitu menghasilkan olefin

diatas 60%. Hal ini dapat dijelaskan oleh mekanisme reaksi perengkahan katalitik yang terdiri dari 3 tahap yaitu tahap inisiasi, propagasi dan terminasi.

1. Tahap inisiasi, meliputi pembentukan dua spesies ionic, karbokation, berupa karbenium dan karbonium melalui pemutusan ikatan C-C. Mekanisme pembentukan ion karbenium dapat terjadi melalui sumbangan proton oleh situs asam Bronsted kepada senyawa olefin atau terjadi melalui abstraksi ion hidrida senyawa alkana oleh situs asam Lewis. Sedangkan pembentukan ion karbonium terjadi melalui sumbangan proton oleh situs asam Bronsted kepada senyawa alkana.
2. Tahap propagasi, ion karbonium mengalami perengkahan untuk menghasilkan produk alkana dan ion karbenium, sedangkan ion karbenium yang dihasilkan di situs asam Lewis melalui pemotongan β untuk menghasilkan produk olefin dan ion karbenium lainnya.
3. Tahap terminasi, ion karbenium menyumbangkan proton untuk memulihkan situs asam Bronsted dan menghasilkan olefin sebagai produk akhir, atau mereka mengabstraksi ion hidrida untuk memulihkan situs asam Lewis menghasilkan produk i-alkana, dan reaksi berantai ionik berlanjut.

Degradasi katalitik campuran PP dan PE berlangsung melalui mekanisme ion karbenium sehingga menghasilkan kandungan olefin yang lebih banyak. Selain itu, hasil olefin yang banyak ini mengartikan bahwa proses perengkahan primer pada polyolefin (plastik PP dan PE) tidak mudah diubah menjadi paraffin dengan reaksi hidrogenasi dan aromatic dengan reaksi siklisasi (Lee dkk., t.t.).

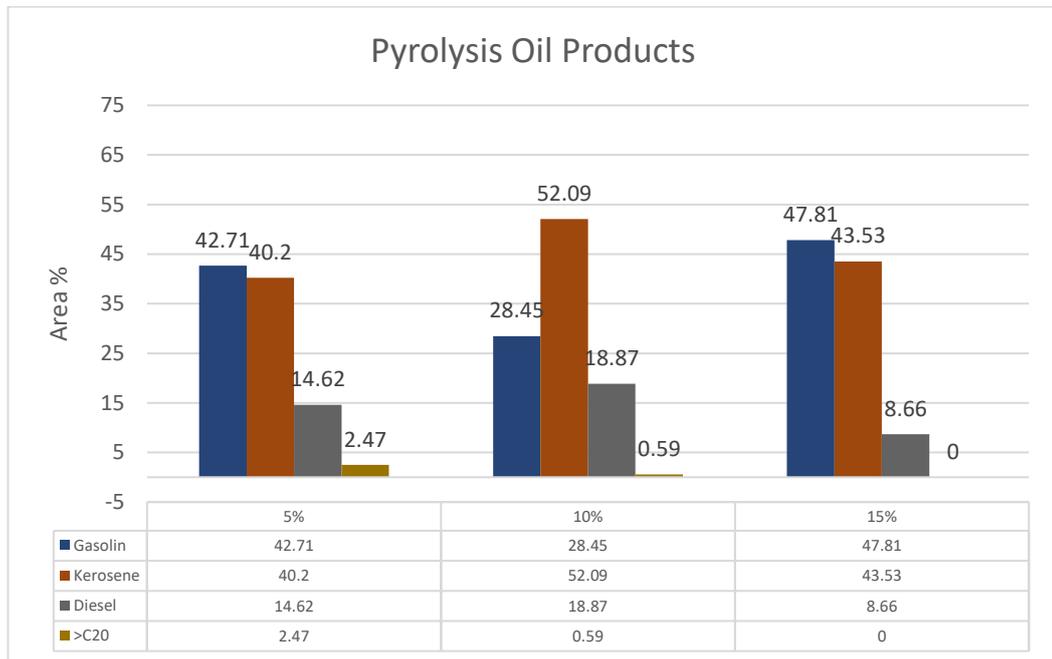
Peningkatan rasio katalis dapat mempengaruhi berat molekul yang dihasilkan seperti yang tertera pada Tabel 4.1. Pada rasio katalis 5%wt, 10%wt, dan 15%wt menghasilkan rentang berat molekul berturut-turut sebesar 84 – 382, 84 – 336, dan 78 – 268. Hasil tersebut mengartikan dengan meningkatkan rasio katalis dapat menurunkan rentang berat molekul rendah sehingga kualitas minyak cair yang dihasilkan semakin baik.

Pada penelitian ini untuk mengetahui kualitas terbaik dapat dilihat pada presentase gasoline terbesar. Gambar 4.3(a) menampilkan persentase jenis-jenis minyak yang terdapat pada minyak pirolisis. Hasil yang didapatkan bahwa pada

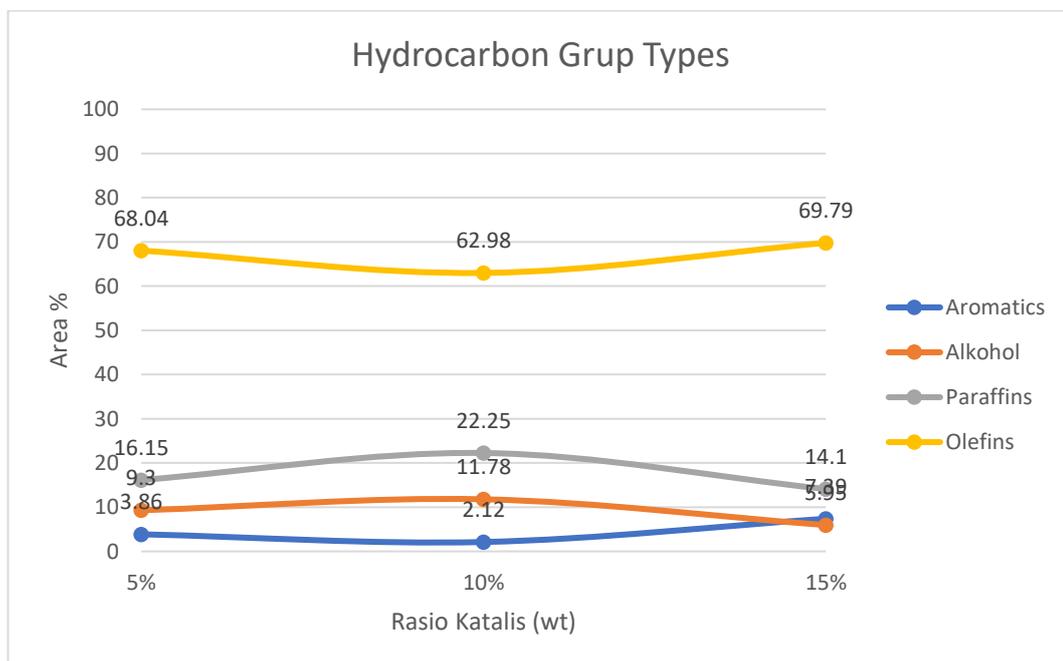
penambahan katalis 15% wt menghasilkan persentase gasoline terbanyak yaitu sebesar 47,81%wt.

Tabel 4. 1 Komposisi Minyak Pirolysis GC-MS

No	Compound	Area %			Molecular Formula	Molecular Weight
		Katalis 5%	Katalis 10%	Katalis 15%		
1	Benzene	0	0	1.82	C6H6	78
2	1-Pentene, 2-methyl	2.42	1.56	3.29	C6H12	84
3	2-Butene, 2,3-dimethyl	1.16	0	0	C6H12	84
4	Toluene	1.64	0	2.95	C7H8	92
5	1,3,5,7-Cyclooctatetraene	0	2.39	0	C8H8	104
6	1,3,7-Octatrien-5-yne	2.24	0	2.18	C8H8	104
7	1-Cyclohexene, 1-ethyl	2.5	0	3.04	C8H10	106
8	2-Hexene, 2,3-dimethyl	3.31	1.84	3.55	C8H16	112
9	Heptane, 4-methyl	1.49	0	1.74	C8H18	114
10	1-Pentanol, 2-ethyl	2.35	0	0	C7H16O	116
11	Benzene, 1,2,3-trimethyl	1.52	0	1.76	C9H12	120
12	2,4-Dimethyl-1-heptene	20.98	17.04	21.88	C9H12	126
13	1-Decene	1.38	1.31	1.59	C10H20	140
14	Decane	0	0.75	0	C10H22	142
15	Nitroxide, bis[1,1-dimethylethyl]	0.54	0	0	C8H18NO	144
16	1-Undecene	3.1	2.87	2.98	C11H22	154
17	Decane, 4-methyl	0.79	0.61	1.77	C11H24	156
18	Cyclopentaneethanol, beta, 2,3-trimethyl	1.18	1.53	1.21	C10H20O	156
19	Undecane	0	1.9	0	C11H24	156
20	Nonane, 2,6-dimethyl	0.79	0	0	C11H24	156
21	Ether, 6-methylheptyl vinyl	0	0	1.38	C10H20O	156
22	Pentane, 2-bromo-2-methyl	0	2.03	0	C6H13Br	164
23	1-Dodecene	1.99	4.01	1.22	C12H24	168
24	3-Decene, 2,2-dimethyl-[E]-	0	0.8	0	C12H24	168
25	1-Undecene, 7-methyl	17.66	16.26	15.08	C12H24	168
26	1-Nonene, 4,6,8-trimethyl	0	0	2.6	C12H24	168
27	4-Undecene, 7-methyl	0	0	2.28	C12H24	168
28	Cyclohexane, 3-ethyl-5-methyl-1-propyl	0	0	0.79	C12H24	168
29	Dodecane	1.82	0	0.88	C12H26	170
30	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	0	1.73	0	C11H24O	172
31	Benzene, (3,3-dimethyl-4-pentenyl)-	0	1.01	0	C13H18	174
32	2-Tridecene, (Z)-	2.32	0	0	C13H26	182
33	Undecane, 4,8-dimethyl	0	0.61	0	C13H28	184
34	Tridecane	1.75	5.42	3.41	C13H28	184
35	n-Hexanesulphonylacetonitrile	0	0	1.42	C8H15NO2S	189
36	4-Tetradecene, [E]-	3.11	3.03	2.29	C14H28	196
37	1-Tetradecene	2.1	7.64	5.55	C14H28	196
38	Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis-	0.7	1.11	0.86	C15H16	196
39	Cyclotetradecane	0	0	0.71	C14H28	196
40	Tetradecane	1.47	0	1.17	C14H30	198
41	n-Tridecan-1-ol	0	1.5	0	C13H28O	200
42	2-Hexyl-1-octanol	3.3	4.7	2.8	C14H30O	214
43	Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,2-ethanediy)l	0	0.92	0	C16H30	222
44	Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-1,2-ethanediy)l(bis-	0.76	0	0	C16H30	222
45	Cetene	2.99	2.08	2.26	C16H32	224
46	Cyclohexane, decyl	0	0.71	0	C16H32	224
47	Hexadecane	2.4	2.14	0	C16H34	226
48	1-Heptadecene	0.78	1.55	0	C17H34	238
49	1-Decanol, 2-hexyl	2.05	2.32	1.94	C16H40	242
50	Nonadecane	2.43	4.01	3.63	C16H40	268
51	7-Heptadecene, 17-chloro-	0	0.6	0	C17H33Cl	272
52	Nonadecane, 2-methyl	1.75	2.56	0	C20H42	282
53	Oxalic acid, allyl dodecyl ester	0	0.87	0	C17H30O4	298
54	Cyclohexane, octadecyl	0	0.59	0	C24H48	336
55	Oxalic acid, cyclohexyl dodecyl ester	0.76	0	0	C20H36O4	340
56	Cyclohexane, eicosyl	0.7	0	0	C26H52	364
57	Sulfurous acid, octadecyl-2-propyl ester	1.34	0	0	C22H44O2S	376
58	1-Hexacosanol	0.42	0	0	C26H54O	382



(a)



(b)

Gambar 4. 3 Efek variasi %katalis terhadap (a) Jenis minyak cair pirolisis katalitik, dan (b) Jenis hidrokarbon pada minyak cair pirolisis

4.4 Pengaruh Rasio Katalis terhadap Sifat Fisik Minyak Pirolisis

Tabel 4.2 dan 4.3 menunjukkan perbandingan viskositas dan densitas minyak pirolisis campuran plastik PP & PE 3:1 pada suhu 350°C dengan bahan bakar konvensional. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa pada penambahan katalis 5% wt, 10% wt, dan 15% wt berturut-turut menghasilkan minyak pirolisis dengan nilai viskositas dan densitas sebesar 1,31 cSt dan 0,769 g/cm³, 1,27 cSt dan 0,770 g/cm³, dan 1,30 cSt dan 0,769 g/cm³. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan rasio katalis tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap nilai viskositas dan densitas minyak pirolisis yang dihasilkan dan cenderung konstan. Hasil tersebut serupa dengan tren nilai yang cenderung konstan pada penelitian lain (Heriyanto dkk., 2024)(F. A. Aisien & Aisien, 2023). Selain itu, minyak pirolisis yang dihasilkan secara sifat fisik viskositas dan densitas menyerupai dengan minyak tanah (kerosene) seperti yang tertera pada tabel 4.3.

Tabel 4. 2 Sifat Fisik Minyak Pirolisis tiap Variasi Rasio Katalis

Rasio katalis terhadap campuran plastik PP dan PE 3:1 (wt,%)	Viskositas 40°C (cSt) ASTM D445	Densitas (g/cm ³) ASTM D1298
5	1,31	0.769
10	1,27	0,770
15	1,30	0.769

Tabel 4. 3 Rentang Nilai Viskositas dan Densitas pada Minyak Bumi

Jenis Minyak Bumi	Viskositas 40°C (cSt) ASTM D445	Densitas (g/cm ³) ASTM D1298	Ref.
Gasoline	0,775 – 1,03	0,72 – 0,74	(F. A. Aisien & Aisien, 2023)
Kerosene	0,9 – 2,2	0,78 – 0,82	(F. A. Aisien & Aisien, 2023)
Diesel	2,0 – 4,5	0.815 – 0.870	(Ditjen Migas, t.t.)

4.5 Analisa Ekonomi Produk Minyak Pirolisis

Tahap akhir dari penelitian ini adalah menganalisa ekonomi produk minyak pirolisis untuk melihat apakah hasil dari penelitian ini ekonomis atau tidak. Dalam menganalisa ekonomi perlu mempertimbangkan biaya bahan baku dan operasional. Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini berupa sampah plastik PP dan PE serta *spent catalyst FCC*. Biaya bahan baku ini gratis atau Rp. 0. Sedangkan biaya operasional yang digunakan ialah penggunaan solar untuk bahan bakar pada proses pirolisis dan listrik untuk menghidupkan pompa air, pengaliran air pada kondensor, dan *temperature controller*. Berikut adalah tabel biaya operasional yang dibutuhkan :

Tabel 4. 4 Biaya operasional pirolisis

Jenis biaya operasional	Kuantitas (/jam)	Biaya satuan	Biaya operasional
Solar	1,3 L	Rp. 15.650/ L	Rp. 20.345
Pompa	33 Watt	Rp. 1.352/ kWh	Rp. 44,616
<i>Temperature controller</i>	50 watt	Rp. 1.352/ kWh	Rp. 67,600
Total			Rp. 20.457,216

Produk minyak pirolisis diambil yang terbanyak secara kuantitas sebagai biaya penjualan minyak pirolisis. Produk yang terbanyak terdapat pada rasio katalis 10%wt yaitu sebesar 529 ml. Minyak pirolisis diasumsikan sebagai minyak mentah dengan harga US\$79,78 per barel atau Rp. 7,733 per ml. Sehingga biaya penjualan minyak pirolisis sebesar Rp. 4090,757. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa minyak pirolisis katalitik tidak ekonomis tetapi dari segi lingkungan menguntungkan karena dapat mengurangi limbah sampah plastik campuran PP dan PE sebesar 500 gram. Secara ekonomis hasil ini memungkinkan dapat ditingkatkan dengan penambahan campuran plastik PP dan PE sebanyak 3 kg. Karena kapasitas reaktor dapat menampung hingga 3 kg serta dapat pula mensubstitusikan bahan bakarnya dari LPG atau dilakukan modifikasi alat pirolisis dengan berbahan bakar listrik dengan diintegrasikan pemberdayaan gas hasil pirolisis dengan penambahan

turbin dan generator sehingga gas hasil pirolisis dapat memutar turbin dan listrik yang dihasilkan dapat disimpan di generator.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut ini :

1. Pengaruh campuran rasio sampah plastik PP dan PE pada suhu 350°C dengan penambahan rasio *spent catalyst FCC* 10% wt terhadap kuantitas minyak pirolisis terbanyak terdapat pada rasio komposisi 3 : 1 plastik PP dan PE yaitu sebesar 81,56%wt.
2. Pengaruh penambahan rasio *spent catalyst FCC* pada campuran plastik PP dan PE 3:1 terhadap kualitas minyak pirolisis terbaik terdapat pada penambahan rasio *spent catalyst FCC* 15%wt karena menghasilkan banyak hidrokarbon fraksi rendah sedangkan dari segi kuantitas minyak pirolisis terbanyak terdapat pada penambahan rasio *spent catalyst FCC* 10%wt yaitu sebesar 81,56%wt.
3. Analisa ekonomi pada pirolisis katalitik yang telah dilakukan didapatkan bahwa proses ini tidak ekonomis disebabkan karena mahalnya biaya operasional daripada harga jual dari minyak pirolisis tersebut.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa saran sebagai berikut ini :

1. Lakukan uji variasi seperti ukuran plastik, temperature, durasi waktu pirolisis, penambahan (banyak, sedang, sedikit) dan tanpa penambahan karbon aktif pada keluaran kondensor untuk mengetahui kualitas dan kuantitas terbaik pada minyak pirolisis yang dihasilkan.
2. Lakukan proses lanjutan pada minyak pirolisis berupa fraksinasi untuk memisahkan bahan bakar jenis bensin, kerosin, dan solar atau blending minyak pirolisis dengan minyak komersial.

DAFTAR PUSTAKA

- Adoe, D. G. H., Bunganaen, W., Krisnawi, I. F., & Soekwanto, F. A. (2016). *Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer*. <http://ejournal-fst-unc.com/index.php/LJTMU>
- Aguado, J., Serrano, D. P., Escola, J. M., Garagorri, E., & Fernã Ndez, J. A. (t.t.). *Catalytic conversion of polyolefins into fuels over zeolite beta*.
- Aisien, E. T., Otuya, I. C., & Aisien, F. A. (2021). Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst. *Environmental Technology and Innovation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101455>
- Aisien, F. A., & Aisien, E. T. (2023). Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100020>
- Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). Dalam *Journal of Environmental Management* (Vol. 197, hlm. 177–198). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. Dalam *Energy Conversion and Management* (Vol. 115, hlm. 308–326). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Das, P., & Tiwari, P. (2018). The effect of slow pyrolysis on the conversion of packaging waste plastics (PE and PP) into fuel. *Waste Management*, 79, 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.021>
- Degnan, T. F. (2000). Applications of zeolites in petroleum refining. Dalam *Topics in Catalysis* (Vol. 13).
- Ditjen Migas. (t.t.). *Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Solar yang Dipasarkan di Dalam Negeri*.
- Energyinst.org. (2024). *Statistical Review of World Energy 2024* (73 ed.). https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0006/1542714/EI_Stats_Review_2024.pdf
- Fermoso, J., Hernando, H., Jana, P., Moreno, I., Přech, J., Ochoa-Hernández, C., Pizarro, P., Coronado, J. M., Čejka, J., & Serrano, D. P. (2016). Lamellar and pillared ZSM-5 zeolites modified with MgO and ZnO for catalytic fast-pyrolysis of eucalyptus woodchips. *Catalysis Today*, 277, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.12.009>

- Gholami, Z., Gholami, F., Tišler, Z., Tomas, M., & Vakili, M. (2021). A review on production of light olefins via fluid catalytic cracking. *Energies*, *14*(4). <https://doi.org/10.3390/en14041089>
- Handoko, T. (t.t.). *PEMURNIAN ALUMINA DARI SPENT CATALYST MENGGUNAKAN BATCH PRECIPITATOR PADA TAHAP PRESIPITASI*.
- Heikkinen, J. M., Hordijk, J. C., De Jong, W., & Spliethoff, H. (2004). Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *71*(2), 883–900. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.001>
- Heriyanto, H., Suhendi, E., Yusril Nasheh, M., Fathi Rizqillah, M., & Pujiastuti, H. (2024). The Influence of Natural Bayah Zeolite on the Pyrolysis Process of Liquid Fuel Based on HDPE and PP Plastic Waste WORLD CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. Dalam *World Chemical Engineering Journal* (Vol. 8, Nomor 1). <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ>
- Irawan, A., Kurniawan, T., Nurkholifah, N., Melina, M., Nandiyanto, A. B. D., Firdaus, M. A., Alwan, H., & Bindar, Y. (2023). Pyrolysis of Polyolefins into Chemicals Using Low-Cost Natural Zeolites. *Waste and Biomass Valorization*, *14*(5), 1705–1719. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01942-3>
- Jung, S. H., Cho, M. H., Kang, B. S., & Kim, J. S. (2010). Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, *91*(3), 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.009>
- Lee, K.-H., Noh, N.-S., Shin, D.-H., & Seo, Y. (t.t.). *Comparison of plastic types for catalytic degradation of waste plastics into liquid product with spent FCC catalyst*. www.elsevier.com/locate/polydegstab
- Lopez-Urienabarrenechea, A., De Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., & Adrados, A. (2012). Catalytic stepwise pyrolysis of packaging plastic waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *96*, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.004>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. Dalam *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 102, hlm. 822–838). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Miranda, R., Yang, J., Roy, C., & Vasile, C. (t.t.). *Vacuum pyrolysis of PVC I. Kinetic study*.
- Oyeleke, O. O., Ohunakin, O. S., & Adelekan, D. S. (2021). Catalytic Pyrolysis in Waste to Energy Recovery Applications: A Review. *IOP Conference Series*:

Materials Science and Engineering, 1107(1), 012226.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1107/1/012226>

- Ozdemir, C., Şahinkaya, S., Kalıpcı, E., Oden, M. K., Çepelioğullar, Ö., & Pütün, A. E. (t.t.). *Digital Proceeding Of THE ICOEST'2013-, Cappadocia Utilization of Two Different Types of Plastic Wastes from Daily and Industrial Life*.
- Park, S. S., Seo, D. K., Lee, S. H., Yu, T. U., & Hwang, J. (2012). Study on pyrolysis characteristics of refuse plastic fuel using lab-scale tube furnace and thermogravimetric analysis reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.06.009>
- Pertamina. (2021, Januari 29). *Apa Itu Pirolisis? Bisa Ubah Sampah Plastik Jadi BBM*. <https://www.pertamina.com/id/news-room/energia-news/apa-itu-pirolisis-bisa-ubah-sampah-plastik-jadi-bbm>
- Rahman, M. T. A., Daud, S., Muhammad, R., Lingkungan, M. T., Dosen,), & Lingkungan, T. (2017). Pengaruh Suhu Dan Porsen Katalis Zeolit Terhadap Yield Pirolisis Limbah Plastik Polypropylene (PP). Dalam *Jom FTEKNIK* (Vol. 4, Nomor 2).
- Sipsn.menlhk.go.id. (t.t.). *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. 2024. Diambil 5 Juli 2024, dari <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- Vogt, E. T. C., & Weckhuysen, B. M. (2015). Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis. Dalam *Chemical Society Reviews* (Vol. 44, Nomor 20, hlm. 7342–7370). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c5cs00376h>

LAMPIRAN

A. Perhitungan

1. Perhitungan persen yield minyak, padatan, dan gas

Contoh perhitungan persen yield pada campuran plastik PP dan PE 3:1 dengan menggunakan katalis 10%wt pada suhu 350°C:

Massa feedstock = 500 gram

Massa botol = 370 gram

Massa total minyak pada botol = 722,45 gram

Massa plastik penampung padatan = 4,6 gram

Massa katalis = 50 gram

a. % Yield minyak

$$\% \text{ yield minyak} = \frac{\text{massa minyak dihasilkan}}{\text{massa feedstock}} \times 100$$

$$\% \text{ yield minyak} = \frac{777,8 - 370}{500} \times 100$$

$$\% \text{ yield minyak} = 81,56$$

b. % Yield padatan

$$\% \text{ yield padatan} = \frac{\text{massa padatan dihasilkan}}{\text{massa feedstock}} \times 100$$

$$\% \text{ yield padatan} = \frac{75,4 - (4,6 + 50)}{500} \times 100$$

$$\% \text{ yield padatan} = 4,16$$

c. % Yield gas

$$\% \text{ yield gas} = \frac{\text{massa feedstock} - (\text{massa minyak} + \text{padatan})}{\text{massa feedstock}} \times 100$$

$$\% \text{ yield gas} = \frac{500 - (407,8 + 20,8)}{500} \times 100$$

$$\% \text{ yield gas} = 14,28$$

2. Perhitungan volume minyak dalam ml

Berdasarkan analisa densitas dengan standar ASTM D1298 didapatkan densitas sebesar $0,770 \text{ g/cm}^3$ maka didapatkan volume minyak seperti berikut:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{407,8 \text{ gr}}{0,770 \text{ gr/cm}^3}$$

$$V = 529,61 \text{ cm}^3 \text{ atau ml}$$

3. Perhitungan keekonomisan produk riset

Volume minyak yang dihasilkan : 529 ml

Harga minyak pirolisis = Rp. 7,733/ ml

Harga bahan bakar solar = Rp. 15,650/ L

Harga Listrik = Rp. 1,352/ kWh

a. Perhitungan penjualan

Penjualan = Volume minyak yang dihasilkan x Harga minyak

$$\text{Penjualan} = \text{Rp.} \frac{7,733}{\text{ml}} \times 529 \text{ ml}$$

$$\text{Penjualan} = \text{Rp.} 4090,7$$

b. Perhitungan biaya operasional

Biaya Operasional = Solar x biaya solar + (daya pompa + controller) x biaya listrik

$$\text{Biaya operasional} = 1,3\text{L} \times \text{Rp.} \frac{15,650}{\text{L}} + (33 + 50)\text{watt} \times \text{Rp.} \frac{1,352}{\text{kWh}}$$

$$\text{Biaya operasional} = \text{Rp.} 20.457,21$$

c. Analisa keekonomisan

$$\text{Keuntungan} = \text{Penjualan} - \text{Biaya operasional}$$

$$\text{Keuntungan} = \text{Rp.} 4090,7 - \text{Rp.} 20.457,21$$

$$\text{Keuntungan} = -\text{Rp.} 16.366,51 \text{ (rugi)}$$

B. Analisa Produk

1. Densitas

Pengujian densitas menggunakan hydrometer dengan mencelupkannya kedalam gelas ukur yang diisi oleh minyak seperti gambar di bawah ini:



Rasio katalis terhadap campuran plastik PP dan PE 3:1 (wt,%)	Densitas (g/cm ³) ASTM D1298
5	0.769
10	0,770
15	0.769

2. Viskositas

Pengujian viskositas menggunakan viscometer bath sesuai dengan standar ASTM D445 yang suhunya diatur pada 40°C. Viskometer kapiler yang digunakan ialah S 50 597A dengan konstanta viskometer kapiler sebesar 0,00351 mm²/s².

$$v = C \times s$$

Berikut data-data hasil uji viskositas :

	Katalis 5%	Katalis 10%	Katalis 15%
t1 (s)	372,48	360,69	370,11
t2 (s)	376	361,59	369,72

	Katalis 5%	Katalis 10%	Katalis 15%
v1 (cSs)	1,31	1,27	1,30
v2 (cSs)	1,32	1,27	1,30
v rata ²	1,315	1,27	1,30