

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

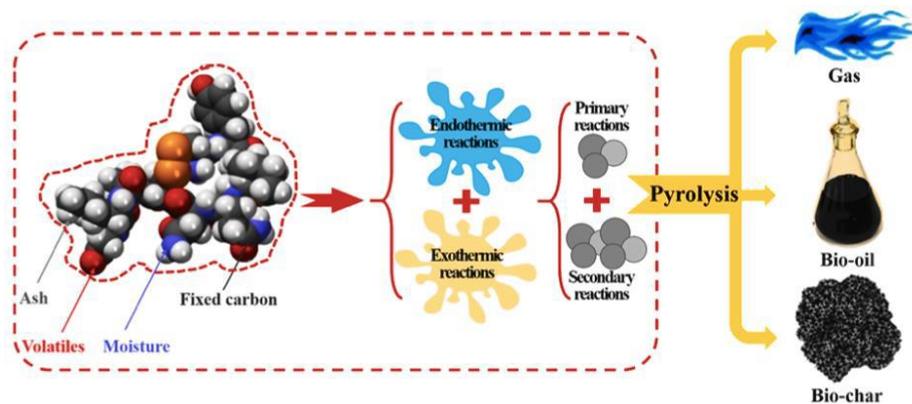
Jenis Bahan	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_{maks} ($^{\circ}\text{C}$)
PP	168	5	80
HDPE	134	-110	82
LDPE	330	-115	260
PA	260	50	100
PET	250	70	100
ABS		110	85
PS		90	70
PC		150	246
PVC		90	71

(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).

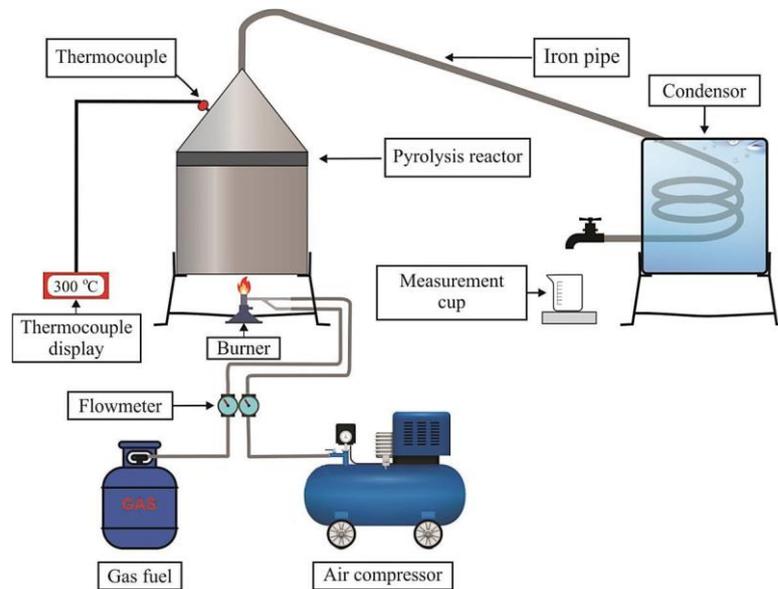
Pirolisis sebenarnya tidak hanya dibedakan menjadi pirolisis lambat dan pirolisis cepat saja. Pengaruh temperatur, *heating rate*, dan *residence time* menghasilkan konversi fasa yang berbeda-beda di tiap kondisinya. Jenis-jenis pirolisis berdasarkan temperatur, *heating rate*, dan *residence time* disajikan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