

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Plastik

Plastik merupakan polimer yang terdiri dari molekul rantai panjang yang dibentuk dengan proses polimerisasi, yaitu penggabungan beberapa molekul sederhana (monomer) melalui proses kimia menjadi molekul besar (makromolekul atau polimer). Untuk membuat plastik, salah satu bahan yang sering digunakan adalah naphta, yaitu bahan yang dihasilkan dari penyulingan minyak bumi atau gas alam. Plastik terdiri dari ikatan molekul yang mengandung hidrogen, karbon dan beberapa elemen lain yang membuat plastik sangat tahan lama dan sulit terurai (Anuar Sharuddin dkk., 2016).

Plastik digolongkan menjadi beberapa golongan berdasarkan sifatnya.

a) Berdasarkan Sifat fisiknya:

- Termoplastik

Merupakan jenis plastik yang bisa didaur-ulang/dicetak lagi dengan proses pemanasan ulang. Plastik jenis ini dapat melunak bila dipanaskan dan dapat dibentuk, tapi mengeras secara permanen, mereka hangus/hancur bila dipanaskan. Proses pelunakan dan pengerasan termoplastik dapat berlangsung berulang kali. Penamaan termoplastik diperoleh dari pembentukan ulang sifat plastik dengan proses pemanasan.

Contoh: polietilen (PE), polistiren (PS), ABS, polikarbonat (PC).

- Termosetting

Merupakan jenis plastik yang tidak bisa didaur-ulang/dicetak lagi. Hal ini dikarenakan bahan termosetting memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi, sehingga tidak mudah meleleh saat terkena panas yang berlebih. Sifat tersebut membuat termoset cocok digunakan untuk komponen yang membutuhkan toleransi yang tinggi, terutama saat terkena suhu tinggi. Polimer termoseting memiliki sifat keras dan kaku (tidak fleksibel), jika dipanaskan akan mengeras dan tidak dapat dibentuk ulang (sukar didaur ulang).

Contoh: resin epoksi, bakelit, resin melamin, urea-formaldehida.

Tabel 2.1 Perbedaan Polimer Termoplastik dan Termosetting

Polimer Termoplastik	Polimer Termosetting
Mudah diregangkan	Keras dan Rigid
Fleksibel	Tidak fleksibel
Titik leleh rendah	Tidak meleleh jika dipanaskan
Dapat dibentuk ulang	Tidak dapat dibentuk ulang

(Sumber: *Budyantoro, 2010*)

b) Berdasarkan kinerja dan penggunaannya:

- Plastik komoditas: sifat mekanik tidak terlalu bagus, tidak tahan panas.
Contohnya: PE, PS, ABS, PMMA, SAN.
Aplikasi: barang-barang elektronik, pembungkus makanan, botol minuman.
- Plastik teknik: tahan panas, temperatur operasi di atas 100 °C, sifat mekanik bagus.
Contohnya: PA, POM, PC, PBT.
Aplikasi: komponen otomotif dan elektronik.
- Plastik teknik khusus: temperatur operasi di atas 150 °C, sifat mekanik sangat bagus (kekuatan tarik di atas 500 Kgf/cm²).
Contohnya: PSF, PES, PAI, PAR.
Aplikasi: komponen pesawat.

c) Berdasarkan sumbernya:

- Polimer alami : kayu, kulit binatang, kapas, kardam, rambut.
- Polimer sintesis yang tidak terdapat secara alami: nylon, poliester, polipropilen, polistiren.
- Polimer sintesis terdapat di alam tetapi dibuat oleh proses buatan: karet sintesis.
- Polimer alami yang dimodifikasi: seluloid, cellophane (bahan dasarnya dari selulosa tetapi telah mengalami modifikasi secara radikal sehingga kehilangan sifat-sifat kimia dan fisika asalnya).

Terdapat kode yang berbeda-beda untuk setiap bahan dari plastik. Kode tersebut menunjukkan simbol yang umum digunakan untuk setiap jenis produk plastik, singkatan nama polimer tiap plastik, dan beberapa penggunaan umum

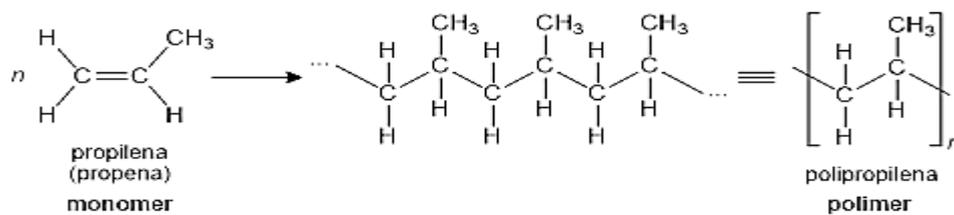
untuk setiap jenis plastik. Penjelasan mengenai macam-macam plastik berdasarkan kodenya dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Jenis Plastik Berdasarkan Kode dan Contoh Penggunaannya

Nomor Kode	Jenis Plastik	Sifat Umum	Kegunaan
	PET (<i>Polyethylene terephthalate</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Jernih dan transparan Kuat dan tahan pelarut Kedap gas dan air Melunak pada suhu 80°C 	<ul style="list-style-type: none"> Biasa digunakan untuk botol minuman, minyak goreng, kecap, sambal, obat
	HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Keras hingga semifleksibel Tahan terhadap bahan kimia dan kelembaban Dapat ditembus gas Permukaan berkilin dan buram Melunak pada suhu 75°C Sulit didaur ulang Bersifat lebih tahan terhadap senyawa kimia 	<ul style="list-style-type: none"> Biasanya digunakan untuk botol susu cair, jus, minuman, wadah es krim, tutup plastik
	PVC (<i>Polyvinyl chloride</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Mudah diproses Kuat, fleksibel, kedap air dan tembus cahaya Melunak pada suhu 70°C 	<ul style="list-style-type: none"> Digunakan untuk botol kecap, baki, plastik pembungkus
	LDPE (<i>Low Density Polyethylene</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Transparan tetapi tidak jernih Keras dan kuat tetapi tidak fleksibel 	<ul style="list-style-type: none"> Digunakan untuk botol madu, kantong kresek, plastik tipis
	PP (<i>Polypropylene</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Terdapat 2 macam PS, yaitu yang kaku dan yang lunak/<i>foam</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Untuk kemasan pangan, tempat obat, botol susu, sedotan
	PS (<i>Polystyrene</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Keras dan jernih Secara termal lebih stabil 	<ul style="list-style-type: none"> Biasa digunakan sebagai wadah CD, karton wadah telur, kemasan <i>styrofoam</i>
	Other (Digunakan untuk jenis plastik selain pada nomor 1-6 <i>Polycarbonat, bio-based plastic, campuran plastik</i>)		<ul style="list-style-type: none"> Digunakan untuk galon air minum, peralatan makan bayi

2.2 Polypropylene (PP)

Polypropylene (PP) merupakan polimer jenuh dengan rumus molekulnya adalah $(-\text{CHCH}_3-\text{CH}_2-)_n$ memiliki rantai hidrokarbon linier yang memiliki ketahanan kimia dan panas yang baik. Titik leleh kristal PP berkisar pada 160-165°C. PP memiliki kepadatan lebih rendah dari HDPE tetapi memiliki kekerasan dan kekakuan yang lebih tinggi yang membuatnya lebih disukai dalam industri plastik (Anuar Sharuddin dkk., 2016).



(Sumber: Kirk-Othmer, 2010)

Gambar 2.1 Rantai *Polypropylene*

Polipropilena merupakan jenis bahan baku plastik ringan yang banyak digunakan sebagai kemasan karena ketahanan yang baik terhadap lemak, stabil terhadap suhu tinggi, kuat dan ringan dengan daya tembus uap yang rendah. *Polypropylene* (PP) termasuk jenis polimer termoplastik yang dibuat oleh industri kimia dan digunakan dalam berbagai aplikasi, diantaranya adalah untuk kantong plastik, gelas plastik, ember dan botol (Yahaya dkk., 2019). Polimer yang memiliki konduktivitas panas rendah seperti polipropilena (konduktivitas = 0,12 W/m) kristalinitasnya sangat rentan terhadap laju pendinginan.

Polipropilena mempunyai tegangan (tensile) yang rendah, kekuatan benturan (impact strength) yang tinggi dan ketahan yang tinggi terhadap pelarut organik. Polipropilena juga mempunyai sifat isolator yang baik mudah diproses dan sangat tahan terhadap air karena sedikit menyerap air dan sifat kekakuan yang tinggi. Seperti polyolefin lain, polipropilena juga mempunyai ketahanan yang sangat baik terhadap bahan kimia anorganik non pengoksidasi, deterjen, alkohol dan sebagainya. Tetapi polipropilena dapat terdegradasi oleh zat pengoksidasi seperti asam nitrat dan hidrogen peroksida. Sifat kristalinitasnya yang tinggi menyebabkan daya tegangannya tinggi, kaku dan keras (Adeo Dominggus G.H. dkk., 2016).

2.3 Pirolisis

Pirolisis adalah salah satu metode untuk mendaur ulang limbah plastik menjadi bahan bakar yang melibatkan dekomposisi termokimia bahan organik dan sintetis pada suhu tinggi antara 500-800°C tanpa adanya oksigen (Aguado dkk., 1977). Secara singkat pirolisis dapat diartikan sebagai pembakaran tanpa oksigen (Yuliarti dan Widya, 2017). Produk yang dihasilkan dari pirolisis umumnya menghasilkan sekitar 70-80% cairan dan 5-10% gas. Produk cair mengandung nafta dan komponen lain yang potensial untuk diolah kembali menjadi fraksi yang lebih bernilai ekonomi tinggi seperti bensin. Menurut (Syamsiro dkk., 2014). Proses pirolisis dapat disebut juga dengan proses perengkahan atau *cracking*. Hasil dari proses *cracking plastic* ini dapat digunakan sebagai bahan kimia atau bahan bakar.

Terdapat tiga jenis proses *cracking* yaitu *hydro cracking*, *thermal cracking* dan *catalytic thermal cracking* (Panda, 2011).

a. *Hydrocracking*

Hydro cracking merupakan proses perengkahan dengan cara mereaksikan plastik dengan hidrogen di dalam wadah tertutup yang dilengkapi dengan pengaduk pada temperatur antara 423-673 K dan tekanan hidrogen 3-10 MPa. Proses *hydrocracking* berlangsung dengan bantuan katalis. Untuk membantu proses pencampuran dan reaksi biasanya digunakan bahan pelarut *1-methyl naphthalene*, tetralin dan decalin. Beberapa katalis yang sudah diteliti antara lain alumina, *amorphous silica alumina*, *zeolite* dan *sulphate zirconia*.

b. *Thermal Cracking*

Thermal cracking termasuk proses pirolisis, yaitu dengan cara memanaskan bahan polimer tanpa oksigen. Proses ini biasanya dilakukan pada temperatur antara 348-900 °C. Sebagai aturan umum semakin tinggi suhu pirolisis, semakin tinggi hasil produk gas *noncondensable* dan menurunkan *yield* bahan bakar cair seperti diesel. Dari proses ini akan dihasilkan arang, minyak dari kondensasi gas seperti parafin, isoparafin, olefin, *naphthene* dan aromatik serta gas yang tidak bisa terkondensasi.

c. *Catalytic Thermal Cracking*

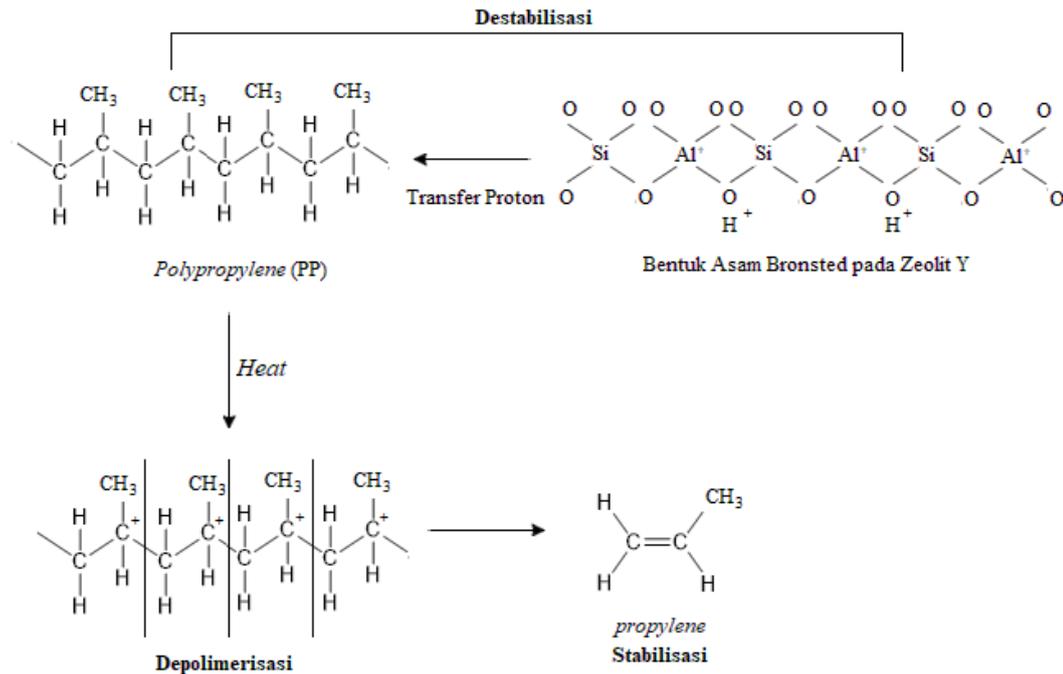
Cracking cara ini menggunakan katalis untuk melakukan reaksi perengkahan. Dengan adanya katalis, dapat mengurangi temperatur dan waktu reaksi. Proses katalitik dapat mempercepat reaksi, proses penguraian molekul besar menjadi molekul kecil dilakukan dengan suhu tinggi.

2.4 Catalytic Thermal Cracking

Menurut Trisunaryanti (2014) dikutip dari Sihombing, J.L., dkk (2017), reaksi *catalytic cracking* atau perengkahan katalitik adalah reaksi perengkahan menggunakan katalis (katalis heterogen) sebagai material yang mampu mempercepat laju reaksi untuk mencapai kesetimbangan dan menghasilkan produk akhir reaksi melalui mekanisme pembentukan ion karbonium.

Thermal Cracking membutuhkan suhu tinggi karena konduktivitas termal polimer yang rendah, solusi yang mungkin untuk mengurangi kondisi reaksi ini adalah penggunaan katalis. Dengan adanya katalis, dapat mengurangi temperatur dan waktu reaksi. Dengan demikian, *Catalytic Thermal Cracking* menghadirkan sejumlah keunggulan dibandingkan termal, seperti konsumsi energi yang lebih rendah dan pembentukan produk dengan distribusi jumlah atom karbon yang lebih sempit, yang dapat diarahkan ke hidrokarbon aromatik dengan nilai pasar yang ringan dan tinggi (Riyadhi dan Syahrullah, 2016).

Catalytic cracking merupakan merupakan proses perengkahan dengan menggunakan katalis sebagai media yang dapat mempercepat laju reaksi, proses penguraian molekul besar menjadi molekul kecil dilakukan dengan suhu tinggi. Pada umumnya reaksi dari proses perengkahan katalitik menggunakan mekanisme perengkahan ion karbonium. Mekanisme *Catalytic Thermal Cracking* untuk *Polypropylene* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mekanisme reaksi *Catalytic Thermal Cracking Polypropylene*

Pada Gambar 2.2 terlihat mekanisme reaksi *Catalytic Thermal Cracking Polypropylene*, Awalnya Molekul *Polypropylene* akan mengalami proses Destabilisasi karena adanya katalis, katalis yang memiliki sifat asam akan menambahkan proton (H^+) ke dalam molekul *Polypropylene* dimana H^+ akan menyerang ikatan C-C yang memiliki energi ikatan terlemah sehingga akan menyebabkan terbentuknya ion karbonium (Risdiyanta, 2015). Menurut Arianto (2006) dalam Adlan, A (2009), Struktur ion karbonium adalah struktur yang tidak stabil dan memiliki kekuatan asam yang lebih besar, sehingga yang terjadi adalah pemutusan rantai karbon menjadi rantai yang lebih pendek.

Proses pemutusan rantai ini disebut dengan Depolimerisasi yaitu proses pemecahan polimer menjadi monomer atau campuran monomer dengan cara menggunakan perengkahan panas dan bantuan katalis yang akan menghasilkan suatu olefin, ion karbonium baru dan aromatik. Selanjutnya terjadi proses stabilisasi yang terjadi dalam proses perengkahan katalitik, Menurut Luis Norena, dkk (2012) dalam Nazif, R., dkk (2016), Ion yang dihasilkan dari proses perengkahan katalitik dapat distabilkan oleh β - *splitting*, isomerisasi atau mentransfer reaksi hidrogen. Dimana kestabilan karbokation ini dapat ditingkatkan dengan cara menyebarkan muatan positif. Karbokation yang paling stabil adalah karbokation dengan banyak gugus alkil yang terikat pada atom

karbon positif karena hal ini berarti ada lebih banyak atom yang dapat membantu membagi muatan positif itu dan menstabilkan karbokation dan akan menghasilkan produk dengan bilangan oktan yang lebih tinggi.

2.5 Parameter Pirolisis Sampah Plastik

Sampah plastik adalah campuran dari berbagai produk plastik yang sebagian besar terbuat dari polietilen densitas rendah (LDPE), polietilen densitas tinggi (HDPE), polipropilen (PP), polistirena (PS), polivinil klorida (PVC) dan polietilen-tereftalat (PET) (Kumaran & Sharma, 2020). Pirolisis sampah plastik dipengaruhi oleh beberapa parameter proses seperti Temperatur, waktu retensi, komposisi bahan baku, penggunaan katalis, kadar air, tingkat pemanasan dan ukuran partikel (Kumaran dan Sharma, 2020).

Parameter yang paling penting dibahas di bawah ini:

2.5.1 Temperatur

Temperatur adalah salah satu faktor yang dapat mempengaruhi proses pirolisis karena mempengaruhi reaksi perengkahan yang mengubah hasil gas dan minyak cair, semakin tinggi temperatur maka semakin banyak gas yang dihasilkan. Pada suhu rendah, hidrokarbon rantai panjang diproduksi, sedangkan peningkatan suhu menghasilkan senyawa rantai karbon pendek karena retaknya ikatan C–C. Temperatur pengoperasian yang diperlukan sangat bergantung pada preferensi produk. Jika produk gas atau arang lebih disukai, disarankan temperatur yang lebih tinggi lebih dari 500°C. Jika cairan lebih disukai, direkomendasikan temperatur yang lebih rendah di kisaran 300-500°C dan kondisi ini berlaku untuk semua plastik (Anuar Sharuddin dkk., 2016). Berdasarkan penelitian Aswan, A. Dkk., (2021), temperatur reaksi yang digunakan untuk metode *catalytic cracking* yaitu pada *range* 400-480°C menghasilkan produk bahan bakar cair optimum pada suhu 400°C. Oleh karena itu, terbukti bahwa suhu memiliki pengaruh terbesar pada laju reaksi yang dapat mempengaruhi komposisi produk cair, gas dan arang untuk semua plastik dari pembahasan sebelumnya.

2.5.2 Waktu retensi dan komposisi bahan baku

Waktu retensi telah menunjukkan sedikit efek pada kualitas produk pirolisis. Dalam kondisi vakum, waktu reaksi yang lama akan menyebabkan produk pirolisis menjadi gas karena semakin lama waktunya maka akan membuat

hidrokarbon rantai panjang menjadi hidrokarbon rantai pendek. Produk padatan juga akan semakin berkurang karena menguap jika waktunya reaksinya semakin lama. Bahan baku tertentu memerlukan suhu yang lebih tinggi untuk degradasi karena strukturnya yang berbeda. Berdasarkan penelitian Aswan, A. dkk., (2021) dilakukan penelitian selama 60 menit dengan komposisi bahan baku yang digunakan Plastik jenis PS dan PP dalam kondisi operasi yang sama menghasilkan nilai kalor PP yang lebih tinggi.

2.5.3 Katalis

Katalis merupakan zat yang ditambahkan dalam sistem reaksi untuk mempercepat reaksi. Katalis dapat menyediakan situs aktif yang berfungsi untuk mempertemukan reaktan dan menyumbangkan energi dalam bentuk panas sehingga molekul pereaktan mampu melewati energi aktivasi secara lebih mudah (Lestari, 2012). Katalis berperan penting dalam meningkatkan kualitas produk pirolisis serta menurunkan suhu proses dan waktu retensi. Penggunaan katalis meningkatkan laju reaksi perengkahan yang mengarah pada peningkatan hasil gas dengan pengurangan hasil minyak cair (Syamsiro dkk., 2014). Efek utama penambahan katalis pada pirolisis plastik adalah sebagai berikut (Buekens & Huang, 1998):

1. Suhu pirolisis untuk mencapai konversi tertentu berkurang secara drastis.
2. Lebih banyak iso-alkana dan aromatik kisaran C₅-C₁₂ dapat diproduksi yang merupakan hidrokarbon kisaran bensin yang sangat diinginkan.
3. Laju reaksi meningkat secara signifikan; misalnya tingkat awal degradasi polipropilena dilaporkan sekitar empat kali lebih cepat daripada degradasi termal non-katalitik.

Namun, perlu diperhatikan bahwa rasio katalis/polimer tidak boleh lebih dari 20% berat untuk menghindari dominasi produk kokas dan gas (Anuar Sharuddin dkk., 2016). Jenis katalis yang sering digunakan pada sistem pirolisis adalah katalis zeolite, silica alumina dan *fluid catalytic cracking* (FCC) (Trisunaryanti, 2018).

Tabel 2.3 Perbandingan Bahan Bakar Cair yang dihasilkan dari *Polypropylene* dari Katalis berbeda

Jenis Bahan Baku	Massa Bahan Baku (Kg)	Kondisi Operasi	Katalis	Yield (%)	Produk Utama	Referensi
<i>Polypropylene</i>	2	T = 400°C t = 60 Menit	Gamma Alumina 10%	8,16	Gasoline 49,87 %	Aswan, A., dkk (2021)
<i>Polypropylene</i>	2	T = 450°C t = 60 Menit	Zeolit Teraktivasi 10%	9,82	Gasoline 31,31 %	Aswan, A., dkk (2021)
<i>Polypropylene</i>	-	T = 450°C t = -	FCC 10%	92,3	Gasoline 77,90%	Abbas-Abadi dkk., (2014)

a. Zeolit

Katalis zeolit adalah saringan alumino-silikat kristal yang memiliki kerangka tiga dimensi dengan rongga dan saluran, di mana kation dapat berada. Kemampuan pertukaran ion dan pori-pori terbuka adalah karakteristik utama dari katalis ini. Katalis zeolit memiliki rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang berbeda yang menentukan reaktivitasnya dan juga mempengaruhi produk akhir dari proses pirolisis. Pengolahan limbah plastik jenis *polypropylene* pada penelitian Aswan, A., dkk (2021) menggunakan Katalis Zeolit Teraktivasi sebanyak 10% dengan waktu retensi proses *cracking* menjadi 60 menit pada temperatur 450°C menghasilkan %yield produk bahan bakar cair sebesar 9,82% dengan produk utama berupa gasoline sebesar 49,87%. Katalis zeolit yang memiliki keasaman tinggi lebih aktif dalam proses perengkahan, sehingga meningkatkan produksi olefin ringan dan mengurangi fraksi berat (Artetxe dkk., 2013). Katalis zeolit secara keseluruhan meningkatkan produksi hidrokarbon yang mudah menguap. Selain itu, penggunaan katalis ini meningkatkan produksi gas dan menurunkan hasil minyak cair.

b. Silica Alumina

Katalis silika-alumina adalah katalis amorf yang memiliki situs asam Lewis sebagai akseptor elektron dan situs asam Bronsted dengan atom hidrogen yang dapat terionisasi. Keasaman katalis ini ditentukan dengan menggunakan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{HAI}_3$. Salah satu jenis katalis ini adalah Gamma Alumina, Pengolahan limbah plastik jenis *polypropylene* pada penelitian Aswan, A., dkk (2021) menggunakan Katalis Gamma Alumina sebanyak 10% dengan waktu retensi proses *cracking* menjadi 60 menit pada temperatur 400°C menghasilkan %*yield* produk bahan bakar cair sebesar 8,16% dengan produk utama berupa gaoline sebesar 31,31%. Keasaman katalis ini mempengaruhi produksi minyak cair dari pirolisis limbah plastik. Semakin tinggi keasaman, semakin rendah produksi minyak cair (Nizami & Rehan, 2020).

c. Katalis FCC

Katalis FCC biasanya digunakan dalam industri penyulingan minyak bumi untuk memecahkan fraksi minyak berat dari minyak mentah menjadi fraksi bensin dan gas minyak cair (LPG) yang lebih ringan dan lebih diinginkan. Katalis FCC yang digunakan dalam proses pirolisis dikenal sebagai katalis FCC bekas, karena berasal dari industri pemurnian. Katalis ini berhasil digunakan dalam proses pirolisis meskipun mengandung beberapa pengotor (Nizami & Rehan, 2020). Abbas-Abadi dkk., (2014) melakukan pirolisis sampah plastik PP dengan menggunakan katalis FCC sebanyak 10% menghasilkan 92,3% produksi minyak cair dengan produk utama berupa gaoline sebesar 77,90%.

2.6 Katalis FCC (*Fluid Catalytic Cracking*)

Katalis FCC merupakan jenis katalis yang terbuat dari kristal zeolit dan matriks asam non-zeolit yang dikenal sebagai silika-alumina dengan pengikatnya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kerangka tetrahedral dari zeolit tidak stabil terhadap asam atau panas. Selain itu diketahui bahwa zeolit mordenit yang mempunyai perbandingan $\text{Si}/\text{Al} = 5$ adalah sangat stabil. Maka diusahakan untuk membuat zeolit dengan kadar Si yang lebih tinggi dari satu yang kemudian diperoleh zeolit Y dengan perbandingan kadar Si/Al antara 1-3 (Lestari, D. Y., 2010). Komponen utama katalis FCC selama lebih dari 40 tahun adalah Zeolit-Y

karena selektivitas produk yang tinggi dan stabilitas termal (Nizami & Rehan, 2020).

Katalis FCC tersedia secara komersial dalam dua bentuk bubuk atau pelet. Katalis FCC modern berbentuk serbuk halus dengan kerapatan curah 0,80 hingga 0,96 g/cm³ dan memiliki distribusi ukuran partikel mulai dari 10 hingga 150 µm dan ukuran partikel rata-rata 60 hingga 100 µm. Menurut Kogel J.E (1976), sifat dari katalis FCC adalah sebagai berikut :

- a. Stabilitas yang baik terhadap suhu tinggi dan uap
- b. Aktivitas tinggi
- c. Ukuran pori besar
- d. Ketahanan yang baik terhadap gesekan
- e. Produksi kokas rendah

Katalis FCC yang telah digunakan sering disebut sebagai 'spent FCC katalis' atau katalis FCC bekas dan biasanya dapat diperoleh dari proses FCC komersial di kilang minyak bumi. Katalis FCC yang digunakan dalam proses pirolisis dikenal sebagai katalis FCC bekas, karena berasal dari industri pemurnian. Selain itu, katalis ini berhasil digunakan dalam proses pirolisis meskipun mengandung beberapa pengotor seperti karbon (Kumaran dan Sharma, 2020). Sebelum digunakan kembali, katalis bekas biasanya mengalami sejumlah *burn-off* di unit regenerasi pada suhu setinggi 700°C, Hal ini dilakukan untuk menghilangkan beberapa karbon yang terperangkap yang menyebabkan aktivitas katalitik berkurang (Park dkk., 1973).

Meskipun aktivitasnya berkurang, katalis FCC bekas masih efektif secara signifikan dalam poliolefin pirolisis dibandingkan dengan katalis asam lainnya. Penggunaan katalis FCC bekas dapat meningkatkan konversi plastik pada pirolisis dimana jumlah residu padat yang tersisa berkurang drastis dari 4,5 menjadi 0,9 wt% menunjukkan aktivitas perengkahan yang tinggi, menghasilkan produk bensin cair yang lebih baik dibandingkan dengan perengkahan termal murni (Lee dan Shin, 1973).

Selain itu, batasan rasio polimer terhadap katalis juga perlu diperhatikan untuk memaksimalkan konversi produk pirolisis. Rasio yang berbeda dari Limbah Plastik untuk katalis FCC juga diteliti oleh Abbas-Abadi dkk., (2014) dari kisaran

10 sampai 60 % berat pada suhu konstan 450°C menemukan dalam pirolisis PP dengan rasio katalis/polimer 10% berat, produk minyak cair yang dihasilkan sangat tinggi sekitar 92,3% berat. Dari studi tersebut, ditemukan bahwa rasio optimum terbaik untuk konversi yang lebih tinggi menjadi hasil cair adalah pada rasio katalis/polimer 20% berat. Karena saat rasio katalis/polimer ditingkatkan lebih dari 20% berat, lebih banyak kokas dan gas yang dihasilkan, sehingga produksi cairan diminimalkan. Hal ini menunjukkan bahwa ada batasan tertentu dari rasio katalis/polimer untuk meningkatkan konversi produk terutama hasil minyak cair dan mengurangi pembentukan kokas pada katalis.

2.7 Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair merupakan gabungan senyawa hidrokarbon yang diperoleh dari alam maupun secara buatan. Bahan bakar cair umumnya berasal dari minyak bumi. Secara teknis, bahan bakar cair merupakan sumber energi yang terbaik. Keuntungan dari bahan bakar cair secara teknis adalah mudah dalam penyimpanan, nilai kalor pembakarannya cenderung konstan, memiliki kebersihan dari hasil pembakaran, dapat menggunakan alat bakar yang lebih baik dan penanganannya lebih mudah (Wiratmaja, 2014).

2.7.1 Bahan Bakar Bensin (*Gasoline*)

Bensin adalah campuran kompleks yang terdiri dari senyawa-senyawa hidrokarbon yang digunakan sebagai bahan bakar mesin motor bakar (Rita, N., 2016). Menurut Permana (2010) dalam Kholidah, N (2014), Bensin didapat dari hasil proses distilasi minyak bumi menjadi fraksi-fraksi yang diinginkan. Jangkauan titik didih senyawa ini antara lain 40 °C sampai 220 °C yang terdiri dari senyawa karbon C₅-C₁₂. Jenis bensin yang diproduksi dan dipasarkan oleh Pertamina dengan nama premium saat ini memiliki angka oktan 88 dengan kandungan timbal maksimum 3 gram/liter. Berikut ini merupakan spesifikasi bahan bakar bensin 88 yang dipasarkan di dalam negeri berdasarkan surat keputusan Direktur Jendral Minyak dan Gas Bumi Nomor 933.K/10/DJM.S/2013.

Tabel 2.4 Spesifikasi Bensin 88

No	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji	
			Min.	Maks.	ASTM	Lain-Lain
	Bilangan Oktana					
1	RON	RON	88	-	D 2699	
	MON		Dilaporkan			
2	Stabilitas Oksidasi	Menit	360	-	D 525	
3	Kandungan Sulfur	%m/m	-	0,05	D 2622	
4	Kandungan Timbal	gr/l	-	0,013	D 3237	
5	Kandungan Logam	mg/l	Tidak Terlacak		D 3831	UOP 391
6	Kandungan Oksigen	%m/m	-	2,7	D 4815	
7	Kandungan Olefin	%v/v	Dilaporkan		D 1319	
8	Kandungan Aromatik	%v/v	Dilaporkan		D 1319	
9	Kandungan Benzena	%v/v	Dilaporkan		D 5580	
10	Distilasi:					
	10% vol. Penguapan	°C	-	74		
	50% vol. penguapan	°C	75	125	D 86	
	90% vol. Penguapan	°C	-	180		
	Titik Didih Akhir	°C	-	215		
	Residu	%vol	-	2,0		
11	Sedimen	Mg/l	-	1	D 5452	
12	Unwashed Gum	Mg/100 ml	-	70	D 381	
13	Tekanan Uap	kPa	45	69	D 5191	
14	Berat Jenis (15 °C)	Kg/m ³	715	770	D 4052	
15	Korosi Bilah Tembaga	Menit	Kelas I		D 130	
16	Sulfur Mercaptan	%m	-	0,002	D 3227	
17	Penampilan Visual		Jernih dan Terang			
18	Warna		Kuning			
19	Kandungan Pewarna	gr/100 l	0,13			
20	Bau		Dapat Dipasarkan			

(Sumber: Kepdirgen Migas, 2013)

2.7.2 Bahan Bakar Kerosene

Kerosin merupakan produk minyak bumi yang mempunyai rantai atom karbon C₁₂-C₁₅ dan memiliki titik didih sekitar 302-554°F. Kerosin atau minyak tanah biasanya digunakan sebagai bahan bakar kompor atau minyak lampu didalam rumah tangga. Kerosin ini memiliki sifat diantaranya mudah terbakar,

uapnya dalam udara akan mudah menguap pada suhu diatas 37°C, dan warnanya kuning pucat dengan mempunyai bau yang khas (Pratiwi, dkk., 2016). Berikut ini merupakan spesifikasi bahan bakar minyak tanah yang dipasarkan di dalam negeri berdasarkan surat keputusan Direktur Jendral Minyak dan Gas Bumi Nomor 119.K/18/DJM/2020.

Tabel 2.5 Spesifikasi Minyak Tanah

No	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji	
			Min.	Maks.	ASTM	Lain-Lain
1	Berat Jenis (15 °C)	Kg/m ³	-	835	D 1298/ D 4052	-
2	Titik Asap	mm	15	-	D 1322	-
3	Nilai Jelaga	gr/l	-	0,004		IP 10
4	Distilasi:					
5	Perolehan Vol (200 °C)	%vol	18	-	-	-
6	Titik Akhir	°C	-	310	-	-
7	Titik Nyala Abel	°C	38	-	-	IP 170
8	Kandungan Sulfur	%m/m	-	0,20	D 1266/ D 2622/ D 4294/ D 5453	-
9	Korosi Bilah Tembaga	Menit		Kelas I	D 130	-
10	Bau dan Warna	-		Dapat dipasarkan	-	-

(Sumber: Kepdirgen Migas, 2020)

2.7.3 Bahan Bakar Solar

Menurut Susilo (2014) dalam Rafmiwati, T (2018), Bahan bakar solar adalah fraksi minyak bumi dengan warna solar komersial kuning coklat yang jernih dan mendidih sekitar temperatur 175-370°C. Penggunaan solar pada umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (didas 1000 rpm). Bahan bakar minyak solar untuk kendaraan bermotor yang beredar dipasaran baik di Indonesia, salah satunya adalah biosolar/solar 48. Bahan bakar biosolar/solar 48 adalah bahan bakar yang mempunyai bilangan setana CN (*Cetane Number*) minimal 48 (Rafmiwati, T., 2018). Berikut ini merupakan spesifikasi bahan bakar solar 48 yang dipasarkan di dalam negeri berdasarkan surat keputusan Direktur Jendral Minyak dan Gas Bumi Nomor 28.K/10/DJM.T/2016.

Tabel 2.6 Spesifikasi Solar

No	Karakteristik	Satuan	Batas SNI Minyak Solar 48		Metode Uji	
			Min.	Maks.	ASTM	Lain-Lain
1	Bilangan Setana		48	-	D613	
	Indeks Setana		45	-	D4737	
2	Densitas (15 °C)	Kg/m ³	815	870	D4052/D1298	
3	Viskositas (40 °C)	mm ² /s	2,0	4,5	D445	
4	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,35 0,30 0,25 0,05 0,05	D4294/D5453	
5	Distilasi: 90% vol. Penguapan	°C	-	370	D86	
6	Titik Nyala	°C	52	-	D93	
7	Titik Kabut	°C	-	18	D2500	
8	Titik Tuang	°C	-	18	D97	
9	Residu Karbon	% m/m	-	0,14	D189	
10	Kandungan Air	mm/kg	-	500	D6304	
11	Kandungan FAME	% v/v	-	20	D7806/D7371	
12	Korosi Bilah Tembaga			Kelas 1	D130	
13	Kandungan Abu	% m/m	-	0,01	D482	
14	Kandungan Sedimen	% m/m	-	0,01	D473	
15	Bilangan Asam Kuat	mg KOH/g	-	0	D664	
16	Bilangan Asam Total	mg KOH/g	-	0,6	D664	
17	Penampilan Visual		Jernih dan Terang			
18	Warna	No. ASTM	-	3,0	D1500	
19	Lubricity (HFRR wear scar dia. @60 °C)	Micron	-	460	D6079	
20	Kestabilan Oksidasi Metode Rancimat	Jam	35	-		EN15751

(Sumber: Kepdirjen Migas, 2016)

2.8 Sifat-sifat Fisik Bahan Bakar Cair

Secara umum, sifat - sifat fisik bahan bakar minyak yang perlu diketahui adalah berikut :

2.8.1 Densitas, Specific Gravity dan API Gravity

Densitas dan *API Gravity* menyatakan densitas atau berat persatuan volume suatu zat. *API Gravity* dapat diukur dengan hidrometer (ASTM 1298), sedangkan berat jenis dapat ditentukan dengan piknometer (ASTM D 941 dan D 1217). Pengukuran *API Gravity* dengan hidrometer dinyatakan dengan angka 0-100, sedangkan *specific gravity* merupakan harga relatif dari densitas suatu bahan terhadap air.

Tujuan dilaksanakan pemeriksaan terhadap *API Gravity* dan berat jenis adalah untuk indikasi mutu minyak dimana semakin tinggi *API Gravity* atau makin rendah berat jenis maka minyak tersebut makin berharga karena banyak mengandung bensin. Sebaliknya semakin rendah *API Gravity* maka semakin banyak lilin. Minyak yang mempunyai berat jenis tinggi berarti minyak tersebut mempunyai kandungan panas (*heating value*) yang rendah (Qurratul'uyun, 2017).

2.8.2 Viskositas

Viskositas adalah penilaian dari kekebalan fluida yang disalin baik dengan tuntutan maupun tegangan. Lebih jelasnya, definisi viskositas adalah sebuah tingkatan kepekatan fluida yang bisa menjelaskan besar kecilnya suatu sentuhan dalam fluida. Kemudian, jika semakin besar viskositas dalam fluida maka akan bertambah sulit untuk bergerak dan juga akan bertambah sulit benda dapat bergerak di dalam fluida. Pengujian viskositas menggunakan viskometer dengan mengukur waktu yang dibutuhkan untuk melewati batas yang telah ditentukan, sesuai dengan ketentuan ASTM D-445. Viskositas Kinematik dapatdihitung melalui persamaan berikut:

$$\text{Viskositas Kinematik (cSt)} = C (\text{mm}^2/\text{sec}^2) \times \text{waktu (s)}$$

2.8.3 Nilai Kalor (*Calorific Value*)

Nilai kalor adalah suatu angka yang menyatakan jumlah panas atau kalori yang dihasilkan dari proses pembakaran sejumlah tertentu bahan bakar dengan udara atau oksigen. Nilai kalor atas untuk bahan bakar cair ditentukan dengan pembakaran dengan oksigen bertekanan *pada bomb calorimeter* sesuai dengan

ASTM D240. Nilai kalori diperlukan karena dapat digunakan untuk menghitung jumlah konsumsi bahan bakar minyak yang dibutuhkan untuk suatu mesin dalam suatu periode (Wiratmaja, 2014).

Nilai kalori umumnya dinyatakan dalam satuan Kcal/kg atau Btu/lb (satuan *british*). Berdasarkan buku *Handbook of Refinery Desulfurization* (2015), nilai kalor bahan bakar cair dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\text{GCV} = 12399 + 2100 d^2$$

Dimana d = Merupakan Spgr bahan bakar cair pada 60/60°F.

2.8.4 Cetane Index

Cetane index adalah *index* penyalaan yang berkorelasi dengan *cetane number* atau sebagai waktu yang diperlukan untuk menyala diruang pembakaran. *Cetane index* sebagai informasi mengenai kerapatan dan komposisi senyawa aromatik (Purwandono, 2016). Semua bahan bakar bermesin diesel diklasifikasikan berdasarkan bilangan setana ini karena kemampuannya dalam pembakaran. Semakin tinggi nilai *cetane index* semakin baik mutu pembakaran pada mesin diesel (Naimah dkk, 2016). Karena pada dasarnya mesin diesel membutuhkan reaksi cepat pembakaran untuk membuatnya bekerja untuk menghasilkan tenaga yang besar.

Perhitungan *cetane index* menggunakan persamaan ASTM D-4737 memerlukan nilai densitas dan temperatur destilat.

Rumus menghitung angka setana:

$$\text{CCI} = 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0,131 + 0,901 B] T_{50N} + [0,0523 + 0,420 B] T_{90N} + 0,00049 [T^2 T_{90N}] + 107 B + 60 B^2$$