

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Plastik

Plastik adalah salah satu jenis makromolekul yang dibentuk dengan proses polimerisasi. Polimerisasi adalah proses penggabungan beberapa molekul sederhana (monomer) melalui proses kimia menjadi molekul besar (makromolekul atau polimer). Plastik merupakan senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah karbon dan hidrogen. Untuk membuat plastik, salah satu bahan yang sering digunakan adalah naphta, yaitu bahan yang dihasilkan dari penyulingan minyak bumi atau gas alam. Sebagai gambaran, untuk membuat 1 kg plastik memerlukan 1,75 kg minyak bumi, untuk memenuhi kebutuhan bahan bakunya maupun kebutuhan energi prosesnya (Kumar dkk, 2011).

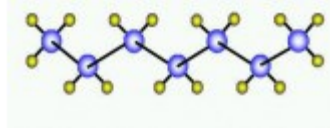
Plastik dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu *thermoplastic* dan *thermosetting*. *Thermoplastic* adalah bahan plastik yang jika dipanaskan sampai temperatur tertentu akan mencair dan dapat dibentuk kembali menjadi bentuk yang diinginkan. Sedangkan *thermosetting* adalah plastik yang jika telah dibuat dalam bentuk padat, tidak dapat dicairkan kembali dengan dipanaskan. Berdasarkan sifat kedua kelompok plastik di atas, *thermoplastic* adalah jenis yang memungkinkan untuk didaur ulang. Jenis plastik yang dapat didaur ulang diberi kode berupa nomor untuk memudahkan dalam mengidentifikasi dan penggunaannya, pengelompokan jenis plastik. Sedangkan *thermosetting* plastik yang melunak bila dipanaskan dan dapat dibentuk, tapi mengeras secara permanen, mereka hangus/hancur bila dipanaskan. Kebanyakan material komposit modern menggunakan plastik *thermosetting*, yang biasanya disebut resin. Plastik termosetting berwujud cair. Kelebihan dari plastik jenis ini adalah ketahanan zat kimia yang baik meskipun berada dalam lingkungan yang ekstrim.

2.1.1 Polimer Termoplastik

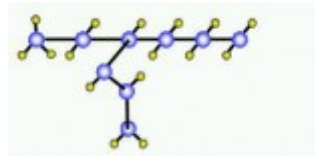
Polimer termoplastik adalah polimer yang mempunyai sifat tidak tahan terhadap panas. Jika polimer jenis ini dipanaskan, maka akan menjadi lunak dan didinginkan akan mengeras. Proses tersebut dapat terjadi berulang kali, sehingga

dapat dibentuk ulang dalam berbagai bentuk melalui cetakan yang berbeda untuk mendapatkan produk polimer yang baru.

Polimer yang termasuk polimer termoplastik adalah jenis polimer plastik. Jenis plastik ini tidak memiliki ikatan silang antar rantai polimernya, melainkan dengan struktur molekul linear atau bercabang. Menurut Beltrame dkk. (2015) bentuk struktur termoplastik sebagai berikut :



Gambar 2.1 Struktur Termoplastik-1



Gambar 2.2 Struktur Termo Plastik-2

Polimer termoplastik memiliki sifat – sifat khusus sebagai berikut :

- a. Berat molekul kecil
- b. Tidak tahan terhadap panas.
- c. Jika dipanaskan akan melunak
- d. Jika didinginkan akan mengeras.
- e. Mudah untuk diregangkan
- f. Fleksibel.
- g. Titik leleh rendah.
- h. Dapat dibentuk ulang (daur ulang).
- i. Mudah larut dalam pelarut yang sesuai.
- j. Memiliki struktur molekul linear/bercabang

Contoh plastik termoplastik sebagai berikut (Huang dkk, 2010).

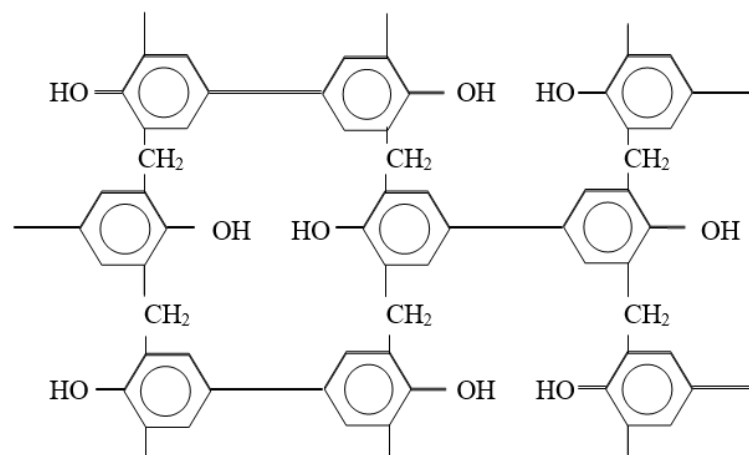
- Polietilena (PE) = Botol plastik, mainan, bahan cetakan, ember, drum, pipa saluran, isolasi kawat dan kabel, kantong plastik dan jas hujan.

- Polivinilklorida (PVC) = Pipa air, pipa plastik, pipa kabel listrik, kulit sintetis, ubin plastik, piringan hitam, bungkus makanan, sol sepatu, sarung tangan dan botol detergen.
- Polipropena (PP) = Karung, tali, botol minuman, serat, bak air, insulator, kursi plastik, alat-alat rumah sakit, komponen mesin cuci, pembungkus tekstil, dan permadani.
- Polistirena (PS) = Insulator, sol sepatu, penggaris, gantungan baju.

2.1.2 Polimer *Thermosetting*

Polimer *thermosetting* adalah polimer yang mempunyai sifat tahan terhadap panas. Jika polimer ini dipanaskan, maka tidak dapat meleleh. Sehingga tidak dapat dibentuk ulang kembali. Susunan polimer ini bersifat permanen pada bentuk cetak pertama kali (pada saat pembuatan). Bila polimer ini rusak/pecah, maka tidak dapat disambung atau diperbaiki lagi.

Polimer *thermosetting* memiliki ikatan – ikatan silang yang mudah dibentuk pada waktu dipanaskan. Hal ini membuat polimer menjadi kaku dan keras. Semakin banyak ikatan silang pada polimer ini, maka semakin kaku dan mudah patah. Bila polimer ini dipanaskan untuk kedua kalinya, maka akan menyebabkan rusak atau lepasnya ikatan silang antar rantai polimer. Bentuk struktur ikatan silang sebagai berikut.



Gambar 2.3 Struktur *Thermosetting*
(Kirk-Othmer, 2010)

Sifat polimer termoseting sebagai berikut.

- a. Keras dan kaku (tidak fleksibel)
- b. Jika dipanaskan akan mengeras
- c. Tidak dapat dibentuk ulang (sukar didaur ulang).
- d. Tidak dapat larut dalam pelarut apapun
- e. Jika dipanaskan akan meleleh.
- f. Tahan terhadap asam basa
- g. Mempunyai ikatan silang antarrantai molekul.

Dari klasifikasi polimer yang telah dijabarkan sebelumnya, dapat dilihat beberapa perbedaan dari polimer termoplastik dan polimer termoseting pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbedaan Termoplastik dan *Termosetting*

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

(Kumar dkk, 2011).

2.2 Jenis-Jenis Plastik

Plastik digolongkan menjadi beberapa golongan berdasarkan sifatnya.

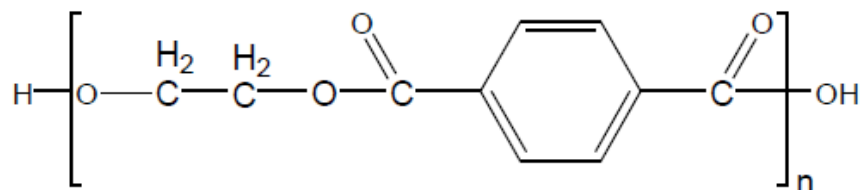
- a. Berdasarkan Sifat fisiknya:
 - Termoplastik merupakan jenis plastik yang bisa didaur-ulang/dicetak lagi dengan proses pemanasan ulang. Contoh: polietilen (PE), polistiren (PS), ABS, polikarbonat (PC).
 - Termoseting merupakan jenis plastik yang tidak bisa didaur-ulang/dicetak lagi. Pemanasan ulang akan menyebabkan kerusakan molekul-molekulnya. Contoh: resin epoksi, bakelit, resin melamin, urea-formaldehida
- 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.

2.3 Penggolongan Plastik pada Industri

2.3.1 Polyethylene Terephthalate (PET)

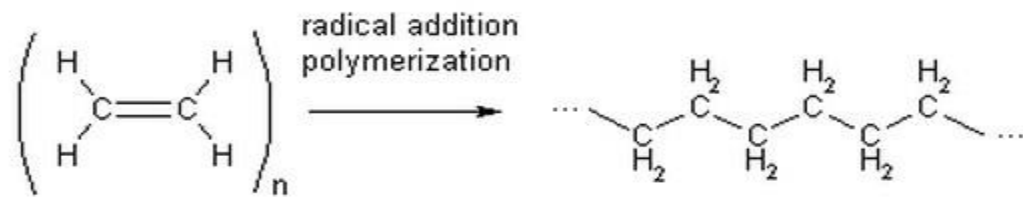
PET adalah singkatan dari *polyethylene terephthalate* merupakan resin polyesteryang tahan lama, kuat, ringan dan mudah dibentuk ketika panas. kepekatannya adalah sekitar 1,35 – 1,38 gram/cc, ini membuatnya kokoh, rumus molekulnya adalah (-CO-C₆H₄-CO-O-CH₂-CH₂-O-)n. PET dapat ditemukan pada botol air, botol soda, botol jus, botol minyak goreng, tempat pindakas, kemasan makanan dan botol dressing salad



Gambar 2.4 Rantai Polyethylene Terephthalate (PET)
(Kirk-Othmer, 2010)

2.3.2 High Density Polyethylene (HDPE)

HDPE adalah *High Density Polyethylene* – resin yang liat, kuat dan kaku yang berasal dari minyak bumi, yang sering dibentuk dengan cara meniupnya. Rumus molekulnya adalah (-CH₂-CH₂-)n. HDPE dapat ditemukan pada cerek susu, botol detergen, botol obat, botol oli mesin, botol shampo, kemasan jus, botol sabun cair, kemasan kopi dan botol sabun bayi.



Gambar 2.5 Rantai *Polyethylene* (HDPE)
(Kirk-Othmer, 2010)

2.3.3 *Polyvinyl Chloride* (PVC)

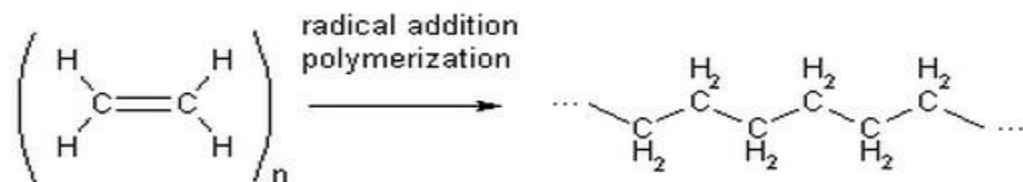
PVC adalah *Polyvinyl Chloride*, rumus molekulnya adalah $(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$. Ini merupakan resin yang liat dan keras yang tidak terpengaruh oleh zat kimia lain. PVC dapat dijumpai pada tanda lalu lintas, botol minyak goreng, kabel listrik, botol pembersih kaca, mainan, botol shampoo, pipa air, kemasan kerut, dan kemasan makanan cepat saji.



Gambar 2.6 Rantai *Polyvinyl Chlorida* (PVC)
(Kirk-Othmer, 2010)

2.3.4 *Low Density Polyethylene* (LDPE)

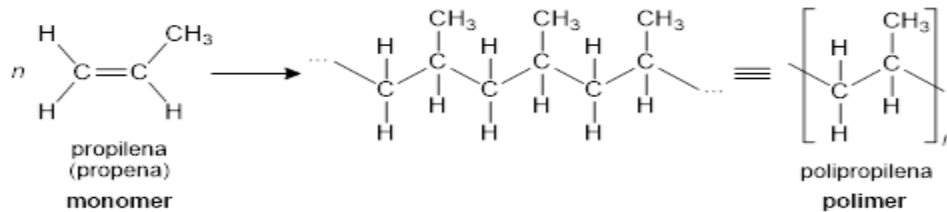
LDPE adalah plastik yang mudah dibentuk ketika panas, yang terbuat dari minyak bumi, dan rumus molekulnya adalah $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$. Dia adalah resin yang keras, kuat dan tidak bereaksi terhadap zat kimia lainnya, kemungkinan merupakan plastik yang paling tinggi mutunya. LDPE dapat dijumpai pada tas plastik, botol, kotak penyimpanan, mainan, perangkat komputer dan wadah yang dicetak.



Gambar 2.7 Rantai *Polyethylene* (LDPE)
(Kirk-Othmer, 2010)

2.3.5 Polypropylene

PP adalah *polypropylene* merupakan plastik polimer yang mudah dibentuk ketika panas, rumus molekulnya adalah $(-\text{CHCH}_3-\text{CH}_2-)_n$. Yang lentur, keras dan resisten terhadap lemak. *Polypropylene* dapat dijumpai pada wadah makanan, kemasan, pot tanaman, tutup botol obat, *tube* margarin, tutup lainnya, sedotan, mainan, tali, pakaian dan berbagai macam botol.

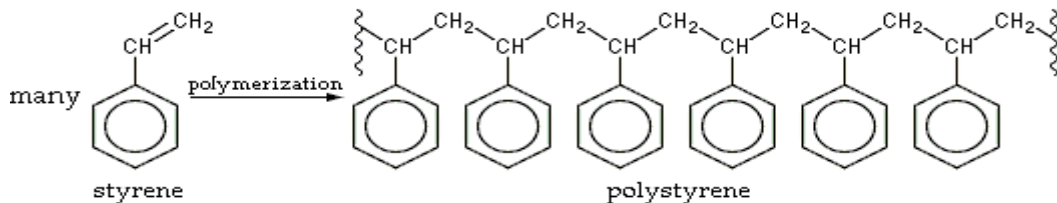


Gambar 2.8 Rantai *Polypropylene* (PP)

(Kirk-Othmer, 2010)

2.3.6 Polystyrene (PS)

Polystyrene adalah plastik polimer yang mudah dibentuk bila dipanaskan, rumus molekulnya adalah $(-\text{CHC}_6\text{H}_5-\text{CH}_2-)_n$. Sangat kaku dalam suhu ruangan. *Polystyrene* dapat dijumpai pada perkakas dari plastik, kotak CD, gelas plastik, wadah makanan dan nampan.



Gambar 2.9 Rantai *Polystyrene* (PS)

(Kirk-Othmer, 2010)

2.3.7 Jenis Lain

Paling sering, produk dengan label 7 terbuat dari campuran dua atau lebih jenis plastik (1 s.d. 6). Kadang kala label 7 mengindikasikan bahwa bahan baku resinnya tidak diketahui. Bisa jadi untuk segala macam benda, namun paling sering akan dijumpai plastik 7 digunakan dalam industri minuman ataupun makanan.

2.4 HDPE (*High Density Polyethylene*)

HDPE (High Density Polyethylene) adalah polimer termoplastik linear yang dibuat dari monomer etilen. Merupakan salah satu jenis polimer dengan kerapatan tinggi bersifat fleksibel, tahan benturan, tahan suhu rendah, bahkan tahan suhu air beku dan juga tahan terhadap bahan kimia dan harganya yang ekonomis (Giat, 2015) HDPE dengan sedikit cabang menghasilkan struktur yang lebih rapat/terjejal dengan densitas yang lebih tinggi dan mempunyai ketahanan kimia yang lebih tinggi.

2.4.1 Karakteristik HDPE

Karakteristik *High Density Polyethylene* (HDPE) dapat dilihat dari sifat fisik dan kimia. Berikut Tabel 2.2 tentang Karakteristik, sifat fisika dan kimia HDPE :

Tabel 2.2 Karakteristik, sifat fisika dan kimia HDPE

Parameter	Keterangan
Nama Kimia	High Density Polyethylene
Nama Dagang	HDPE
Rumus Molekul	(C ₂ H ₄) _n
Fisik	Padat
Titik Leleh	100-135 ⁰ C / 212-275 ⁰ F
Berat Jenis	0,95-0,96 gr/cm ³

(Glory, 2019)

2.4.2 Polimer Penyusun HDPE

Kebanyakan polimer adalah senyawa organik, dan tersusun atas molekul hidrokarbon. HDPE tersusun atas makromolekul-makromolekul dengan jumlah unit ulang (n) berkisar antara 10.000 sampai 100.000 (berat molekul antara 2×10^5 hingga 3×10^6) dengan rumus kimia (C₂H₄)_n. (Galuh, 2009)

2.5 Sifat Termal Bahan Plastik

Sifat termal plastik yang penting adalah, titik lebur (T_m), temperatur transisi (T_g) dan temperatur dekomposisi. Temperatur transisi adalah temperatur di mana plastik mengalami perenggangan struktur sehingga terjadi perubahan dari kondisi

kaku menjadi lebih fleksibel. Di atas titik lebur, plastik mengalami pembesaran volume sehingga molekul bergerak lebih bebas yang ditandai dengan peningkatan kelenturannya. Temperatur lebur adalah temperatur di mana plastik mulai melunak dan berubah menjadi cair. Temperatur dekomposisi merupakan batasan dari proses pencairan. Jika suhu dinaikkan di atas temperatur lebur, plastik akan mudah mengalir dan struktur akan mengalami dekomposisi. Dekomposisi terjadi karena energi thermal melampaui energi yang mengikat rantai molekul. Secara umum polimer akan mengalami dekomposisi pada suhu di atas 1,5 kali dari temperatur transisinya (Singh dkk. 2017). Data sifat termal yang penting pada proses daur ulang plastik bisa dilihat pada tabel berikut

Tabel 2.3 Temperatur Transisi dan Temperatur Lebur Plastik

Jenis Bahan	T _m (°C)	T _g (°C)	Temp. Kerja Maks. (°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
PMMA		100	85
PC		150	246
PVC		90	71

(Singh dkk., 2017)

2.6 Pirolisis

Pirolisis yaitu pemanasan dalam kondisi bebas oksigen, mengurai senyawa organik dari suatu bahan menjadi produk cair dan gas dengan melepaskan ikatan bahan-bahan anorganik yang terikat. Proses pirolisis dapat disebut juga dengan proses perengkahan atau *cracking*. *Cracking* adalah proses pemecahan rantai polimer menjadi senyawa dengan berat molekul yang lebih rendah. Hasil dari proses cracking plastik ini dapat digunakan sebagai bahan kimia atau bahan bakar. Ada tiga macam proses *cracking* yaitu *hidro cracking*, *thermal cracking* dan *catalytic cracking* (Chen dkk., 2014).

2.6.1 *Thermal Cracking*

Pirolisis disebut juga thermolisis (Yunani: pur = api, termos = hangat; luo = melonggarkan), adalah proses dekomposisi kimia dan termal, umumnya mengarah ke molekul yang lebih kecil. Thermolisis adalah istilah yang lebih tepat daripada pirolisis karena api menunjukkan adanya oksigen. Di sebagian besar proses pirolisis, udara dihilangkan untuk alasan keamanan, kualitas produk, dan yield. Pirolisis dapat dilakukan pada berbagai suhu, waktu reaksi, tekanan, dan dengan adanya atau tidak adanya gas atau cairan, dan katalis reaktif. Proses pirolisis termal berlangsung pada temperatur antara 500-800°C dan umumnya dilakukan pada tekanan atmosfer (Aguado dkk., 2007). Keuntungan dari proses pirolisis thermal cracking adalah :

1. Volume sampah berkurang secara signifikan (<50-90%).
2. Produk padat, cair, dan bahan bakar gas dapat diproduksi dari limbah.
3. Bahan bakar atau bahan kimia yang diperoleh dapat disimpan / diangkut.
4. Masalah lingkungan berkurang.
5. Energi bersumber dari sumber-sumber terbarukan seperti sampah kota.
6. Biaya modal rendah.

Dari proses *thermal cracking* akan dihasilkan arang, minyak dari kondensasi gas seperti parafin, isoparafin, olefin, naphthene dan aromatik, serta gas yang memang tidak bisa terkondensasi. Sebagai aturan umum semakin tinggi suhu pirolisis, semakin tinggi hasil produk gas yang tidak dapat terkondensasi dan menurunkan yield bahan bakar cair.

2.6.2 *Hydro Cracking*

Hydro cracking adalah proses cracking dengan mereaksikan bahan dengan hidrogen di dalam wadah tertutup yang dilengkapi dengan pengaduk pada tekanan hidrogen 3-10 MPa. Dalam proses hydro cracking ini dibantu dengan katalis. Hidro cracking sampah polimer biasanya melibatkan reaksi dengan hidrogen katalis yang berlebih dalam autoclave batch yang diaduk pada suhu tinggi dan bertekanan. Pekejaan tersebut, terutama berfokus untuk memperoleh kualitas bensin tinggi mulai dari berbagai feed. Feed khas termasuk polietilena, polietilena tereftalat, polistirena, polivinil klorida dan polimer campuran, polimer limbah dari sampah kota dan sumber- sumber lain telah dievaluasi dan termasuk logam transisi

(misalnya, Pt, Ni, Mo, Fe) didukung oleh padatan asam (seperti alumina, amorf silika-alumina, zeolit dan zirkonia sulfat). Katalis ini menggabungkan kedua kegiatan hidrogenasi dan *cracking*.

2.6.3 *Catalytic Cracking*

Cara ini menggunakan katalis untuk melakukan reaksi pemecahan molekul. Dengan adanya katalis, dapat mengurangi temperatur dan waktu reaksi. Perengkahan katalitik merupakan proses perengkahan yang menggunakan katalis untuk melakukan reaksi perengkahan, dimana dengan adanya katalis dapat mengurangi temperatur dan waktu reaksi. Biaya harus dikurangi untuk membuat proses lebih menarik dari segi perspektif ekonomi. Penggunaan kembali katalis dan penggunaan katalis yang efektif dalam jumlah yang lebih kecil dapat mengoptimalkan pilihan ini. Proses ini dapat dikembangkan dengan biaya yang efisien dengan menggunakan proses daur ulang polimer komersial untuk memecahkan masalah lingkungan dari pembuangan limbah ban bekas. Daurlang katalitik telah terbukti secara signifikan lebih efisien daripada perengkahan termal. Osueke dan Ofundu (2011) melakukan penelitian konversi plastik *Low Density Polyethylene* (LDPE) menjadi minyak. Proses konversi dilakukan dengan dua metode, yaitu dengan *thermal cracking* dan *catalytic cracking*. Pyrolisis dilakukan di dalam tabung stainless steel yang dipanaskan dengan elemen pemanas listrik dengan temperatur bervariasi antara 475 – 600 °C. Dari penelitian ini diketahui bahwa dengan temperatur pirolisis 550 °C dan perbandingan katalis/sampah plastik 1:4 dihasilkan minyak dengan jumlah paling banyak.

Keberadaan katalis dapat memperbesar puncak selektivitas dan menggesernya ke atom karbon yang lebih kecil. Hal ini berarti bahwa penggunaan katalis dapat meningkatkan fraksi bensin (C₅-C₁₂) dan menurunkan fraksi solar (C₁₃-C₂₀) dan minyak berat (> C₂₀). Katalis juga dapat digunakan untuk memecah rantai wax yang biasanya muncul pada proses degradasi termal (Syamsiro, 2015)

Efek utama penambahan katalis dalam pirolisis ban bekas adalah sebagai berikut:

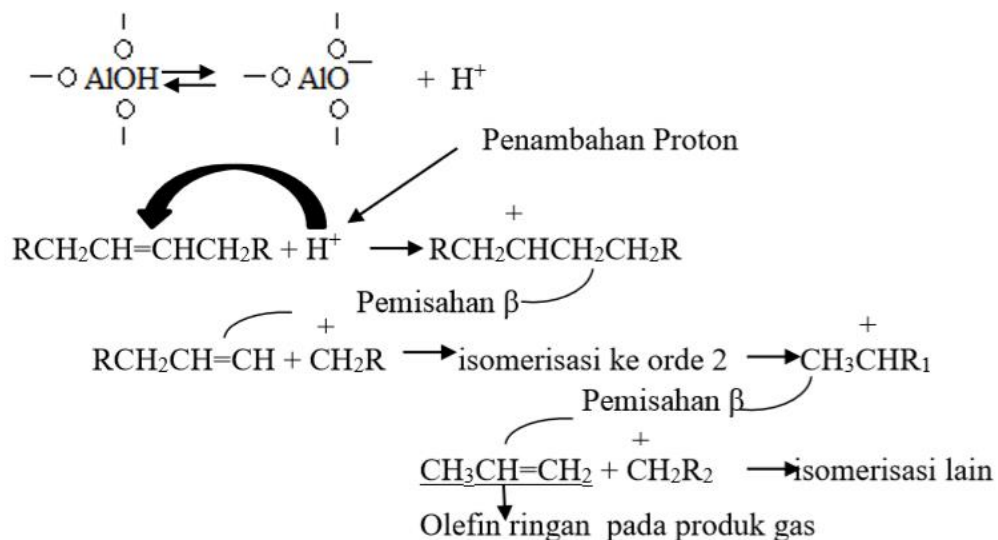
- a. Suhu pirolisis untuk mencapai konversi tertentu berkurang drastis dan jika rasio katalis / ban meningkat, suhu pirolisis dapat lebih diturunkan.
- b. Lebih banyak iso-alkana dan aromatik di kisaran C₅-C₈ dapat diproduksi.

- c. Laju reaksi meningkat secara signifikan, 2-4 kali lebih cepat daripada *noncatalytic thermal cracking*.

1. Mekanisme Reaksi *Catalytic Cracking*

Mekanisme reaksi *catalytic cracking* dari rantai polimer sama dengan jalur dari *catalytic cracking* hidrokarbon di pabrik penyulingan minyak bumi. Mekanisme ini telah dipelajari selama beberapa tahun. Proses *catalytic cracking* berlangsung pada suhu yang cukup tinggi untuk memiliki reaksi paralel *thermal cracking*. Mekanisme *catalytic cracking* hidrokarbon berupa reaksi ion, seperti pada katalis jenis zeolit memiliki pusat bronsted asam kuat, yang akan mentransfer ion hidrogen ke rantai polimer. Gambar 2.5 menunjukkan mekanisme *catalytic cracking* hidrokarbon.

Mekanisme ion



Gambar 2.5 Mekanisme *Catalytic Cracking Hidrokarbon*

(Buekens, 2008)

Ion yang dihasilkan dapat distabilkan oleh β - *splitting*, isomerisasi atau mentransfer reaksi hidrogen. Skema selanjutnya menunjukkan reaksi yang berbeda yang dapat terjadi, masing-masing terjadi yang bergantung pada suhu. Luas permukaan dan struktur katalis yang berpori juga berperan penting. Penguraian rantai polimer dimulai pada permukaan eksternal katalis dan fragmen yang cukup kecil mungkin masuk ke dalam pori-pori, di mana reaksi cracking tambahan

berlangsung, sehingga molekul gas terbentuk. Tidak seperti thermal cracking, katalis tertentu dapat membuat selektivitas terhadap produk tertentu.

Produk dari reaksi dapat diklasifikasikan sebagai produk gas (C₁-C₄) dan produk cair (C₅-C₄₄). Produk gas dianalisa dengan kromatografi gas. Identifikasi beberapa senyawa spesifik dapat dilakukan dengan kromatografi. Produk cair dianalisis dengan distilasi simulasi (ASTM metode D-2887), yang sesuai dengan bensin, turbosine (atau bahan bakar jet atau nafta), minyak tanah, minyak gas dan fraksi bahan bakar minyak. Tabel 2.4 menunjukkan produk cair yang sesuai dengan fraksi refinery.

Tabel 2.4 Produk Cair yang Sesuai dengan Fraksi Refineri

Fraksi Refineri	Nomor Karbon	Boiling Point (°C)
<i>Gasoline</i>	C ₅ -C ₁₂	39-220
<i>Jet Fuel, Naptha</i>	C ₁₃ -C ₁₄	221-254
<i>Kerosene</i>	C ₁₅ -C ₁₇	255-300
<i>Gas Oil</i>	C ₁₈ -C ₂₈	301-431
<i>Fuel Oil</i>	C ₂₉ -C ₄₄	432-545

(Kirk-Othmer, 2010)

2.6.4 Produk hasil pirolisis

Pirolisis adalah proses degradasi termal bahan-bahan polimer seperti plastik maupun material organik seperti biomassa dengan pemanasan tanpa melibatkan oksigen di dalamnya. Produk dari pirolisis ini terdiri dari fraksi gas, cair dan residu padatan. Pada suhu tertentu, plastik akan meleleh dan kemudian berubah menjadi gas. Pada saat proses tersebut, rantai panjang hidrokarbon akan terpotong menjadi rantai pendek. Selanjutnya proses pendinginan dilakukan pada gas tersebut sehingga akan mengalami kondensasi dan membentuk cairan. Cairan inilah yang nantinya menjadi bahan bakar, baik berupa bensin maupun bahan bakar diesel (Syamsiro, 2015)

Bahan bakar yang dihasilkan dari hasil pirolisis dapat diidentifikasi berdasarkan karakteristiknya. Adapun karakteristik yang perlu diperhatikan dalam menentukan jenis bahan bakar yang dihasilkan yaitu massa jenis, viskositas dan nilai kalor bahan bakar tersebut.

1. Massa jenis

Massa jenis atau densitas adalah kerapatan suatu zat, yaitu perbandingan massa dengan volume zat tersebut. Densitas suatu zat dapat ditentukan dengan menimbang

massa zat dalam volume tertentu. Semakin besar massa zat tersebut maka massa jenisnya akan semakin besar juga. Semakin tinggi berat jenis suatu zat, maka semakin tinggi titik didih zat tersebut, dan semakin sulit menjadi uap. Tentunya menjadi semakin sulit bereaksi dengan oksigen, dalam arti memerlukan suhu lingkungan yang tinggi untuk terjadi campuran gas dengan oksigen.

2. Nilai kalor

Nilai kalor bahan bakar merupakan jumlah energi maksimum yang dibebaskan oleh suatu bahan bakar melalui reaksi pembakaran sempurna persatuan massa atau volume bahan bakar. Nilai kalor merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan kualitas bahan bakar. Semakin tinggi nilai kalor, maka panas yang dihasilkan oleh bahan bakar semakin tinggi pula, yang artinya semakin baik bahan bakar tersebut. Nilai kalor yang tinggi juga menyebabkan kecepatan pembakaran semakin lambat.

Nilai kalor bahan bakar dapat dianalisa dengan menggunakan kalorimeter. Bahan bakar yang akan diuji nilai kalornya dibakar menggunakan kumparan kawat yang dialiri arus listrik dalam bilik yang disebut bom dan dibenamkan di dalam air. Bahan bakar yang bereaksi dengan oksigen akan menghasilkan kalor, hal ini menyebabkan suhu kalorimeter naik.

3. Viskositas

Viskositas adalah sebuah tingkatan kepekatan fluida yang bisa menjelaskan besar kecilnya suatu gesekan dalam fluida karena adanya gaya kohesi maupun adhesi. Gesekan internal di dalam fluida dinyatakan dengan besaran viskositas atau kekentalan dengan satuan *poise*. Jika semakin besar viskositas dalam fluida maka akan bertambah sulit untuk bergerak dan juga akan bertambah sulit benda dapat bergerak di dalam fluida. Viskositas bahan bakar mempunyai pengaruh yang besar terhadap bentuk dari semprotan bahan bakar. Di mana untuk bahan bakar dengan viskositas yang tinggi akan memberikan atomisasi yang rendah sehingga memberikan hasil mesin sulit *distart* dan gas buang yang berasap. Jika viskositas bahan bakar rendah akan terjadi kebocoran pada pompa bahan bakarnya dan mempercepat keausan pada komponen pompa dan injektor bahan bakar

2.6.5 Faktor yang Mempengaruhi Pirolisis

Menurut (Udyani, 2018) faktor-faktor atau kondisi yang mempengaruhi proses pirolisis adalah:

1. Kadar Air

Adanya air dalam bahan yang dipirolisis mempengaruhi proses pirolisis karena kadar air dalam bahan akan menggunakan energi untuk menghilangkan kandungan air. Energi dari luar yang seharusnya digunakan untuk proses pirolisis digunakan sebagian untuk proses pengeringan kadar air bahan. Akibatnya bahan dengan kandungan air yang tinggi membutuhkan energi yang tinggi untuk proses pirolisis.

2. Ukuran partikel

Apabila ukuran partikel meningkat maka hasil dari padatan akan meningkat pula sedangkan hasil dari volatil dan gas akan menurun. Konsentrasi dari volatil dan gas meningkat sampai dengan nilai tertentu dan kemudian menurun sesuai dengan kenaikan ukuran partikel. Seiring dengan kenaikan ukuran partikel maka waktu yang dibutuhkan untuk proses pirolisis pada temperatur tertentu juga akan meningkat.

3. Laju pemanasan

Ketika laju pemanasan dinaikkan maka padatan pada proses pirolisis akan menurun. Produk gas yang dihasilkan pada temperatur antara 200°C dan 400°C adalah CO dan CO₂. Ketika laju pemanasan meningkat maka gas CO, CO₂, CH₄, CH₃ akan meningkat. Hal tersebut menunjukkan bahwa laju pemanasan yang lebih tinggi akan melepaskan gas hidrokarbon, begitupula dengan minyak akan meningkat seiring dengan kenaikan laju pemanasan.

4. Temperatur

Temperatur merupakan faktor yang penting dalam menghasilkan produk pada proses pirolisis. Pada temperatur yang lebih tinggi maka hasil gas yang dihasilkan semakin banyak. Hasil minyak akan meningkat sampai batas tertentu kemudian menurun, sedangkan hasil padatan cenderung rendah. Semakin tinggi temperatur nilai kalor untuk hasil gas akan meningkat. Hal ini dikarenakan bahan baku padatan akan menguap dan berubah menjadi gas sehingga berat dari padatan bahan baku akan berkurang. Namun, semakin tinggi temperatur akan

membuat produk oil yang dihasilkan semakin berkurang. Hal ini dikarenakan temperatur yang tinggi dapat merubah hidrokarbon rantai yang panjang dan sedang menjadi hidrokarbon dengan rantai yang pendek. Jika rantai hidrokarbon sangat pendek, maka diperoleh hasil gas yang tidak dapat dikondensasi.

5. Bahan

Jenis plastik bahan baku juga mempengaruhi distribusi produk. Pada jenis termoplastik pada umumnya, hasil produk cairan adalah 80 % atau lebih, dimana $PS > PP > PE$. Plastik dengan struktur polisiklik mempunyai hasil cairan dan padatan yang lebih banyak dibandingkan plastik yang mempunyai struktur poliolefinik

6. Komposisi bahan uji

Pada setiap penambahan material plastik didalam proses pirolisis menghasilkan suatu peningkatan kandungan hidrogen didalam hasil minyaknya dibandingkan pada proses pirolisis tanpa bahan plastik. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi yang berbeda dari bahan yang diperlukan untuk proses pirolisis menghasilkan hasil kandungan minyak yang berbeda.

2.7 Bahan Bakar Minyak

Bahan bakar minyak merupakan jenis bahan bakar cair yang strukturnya tidak rapat. Bahan bakar minyak yang biasa dipakai dalam industri, transportasi, dan rumah tangga adalah jenis bahan bakar yang berasal dari fraksi minyak bumi. Minyak bumi merupakan campuran alami hidrokarbon cair dengan sedikit belerang, nitrogen, oksigen, sedikit sekali metal, dan mineral. Dengan kemudahan penggunaan, ditambah dengan efisiensi thermis yang lebih tinggi, serta penanganan dan pengangkutan yang lebih mudah, menyebabkan penggunaan minyak bumi sebagai sumber utama penyedia energi semakin meningkat. Secara teknis, bahan bakar cair merupakan sumber energi yang terbaik, mudah ditangani, mudah dalam penyimpanan dan nilai kalor pembakarannya cenderung konstan.

Beberapa jenis bahan bakar minyak adalah sebagai berikut :

- a. Bahan Bakar Bensin
- b. Bahan Bakar Solar

c. Kerosin

2.7.1 Bahan Bakar Bensin

Bensin atau *gasoline* (Amerika) atau *petrol* (Inggris) merupakan jenis bahan bakar minyak yang biasanya digunakan pada kendaraan bermotor roda dua, tiga, dan empat. Bensin dibuat dari minyak mentah, cairan berwarna hitam yang dipompa dari perut bumi dan biasa disebut dengan *petroleum*. Cairan ini mengandung hidrokarbon, atom-atom karbon dalam minyak mentah ini berhubungan satu dengan yang lainnya dengan cara membentuk rantai yang panjang. Secara sederhana, bensin tersusun dari hidrokarbon rantai lurus, mulai dari C₇ (heptana) sampai dengan C₁₁. Dengan kata lain, bensin terbuat dari molekul yang hanya terdiri dari hidrogen dan karbon yang terikat antara satu dengan yang lainnya sehingga membentuk rantai.

Bahan bakar bensin memiliki jenis yang berbeda dan tentunya memiliki mutu atau perilaku (performance) yang berbeda. Mutu bensin dipergunakan dengan istilah bilangan oktan (*Octane Number*). Nama oktan berasal dari oktana (C₈), karena dari seluruh molekul penyusun bensin, oktana yang memiliki sifat kompresi paling bagus. Bilangan Oktan adalah angka yang menunjukkan seberapa besar tekanan yang bisa diberikan sebelum bensin terbakar secara spontan. Di dalam mesin, campuran udara dan bensin (dalam bentuk gas) ditekan oleh piston sampai dengan volume yang sangat kecil dan kemudian dibakar oleh percikan api yang dihasilkan busi. Karena besarnya tekanan ini, campuran udara dan bensin juga bisa terbakar secara spontan sebelum percikan api dari busi keluar. Jika campuran gas ini terbakar karena tekanan yang tinggi (dan bukan karena percikan api dari busi), maka akan terjadi *knocking* atau ketukan di dalam mesin. *Knocking* ini akan menyebabkan mesin cepat rusak, sehingga sebisa mungkin harus dihindari.

Berikut ini merupakan beberapa jenis bensin berdasarkan perbedaan bilangan oktan :

a. Bahan Bakar Bensin Jenis 88 (Premium)

Bahan bakar premium adalah bahan bakar minyak jenis distilat berwarna kekuningan jernih yang didalamnya terdapat kandungan oktan 88 dan

menggunakan pewarna dye serta menghasilkan NO_x dan CO_x dalam jumlah banyak. Spesifikasi bahan bakar premium dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Bahan Bakar Bensin RON 88 (Premium)

Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji (ASTM)
		Min	Max	
Angka Oktana Riset	RON	88	-	D 269
Stabilitas Oksidasi	menit	360	-	D 525
Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05	D 2622/D 4294/D 7039
Kandungan Timbal (Pb)	gr/l	-	0,013	D 3237
Injeksi imbal tidak diizinkan				
Kandungan Logam (Mn,Fe)	mg/l	tidak terlacak		D 3831/D 5185
Kandungan Oksigen	%m/m	-	2,7	D 4815/D 6839/D 5599
Kandungan Olefin	% v/v	Dilaporkan		D 1319/D 6839/D 6730
Kandungan Aromatik	% v/v	Dilaporkan		D 1319/ D 6839/ D 6730
Kandungan Benzene	% v/v	Dilaporkan		D 5580 / D 6839 / D 6730 / D 3606
Distilasi :				D 86
10% vol.Penguapan	°C	-	74	
50% vol.Penguapan	°C	75	125	
90% vol.Penguapan	°C	-	180	
Titik didih akhir	°C	-	215	
Residu	% vol		2	
Sedimen	mg/l	-	1	D 5452
Unwashed Gum	mg/100 ml	-	70	D 381
Washed Gum	mg/100 ml	-	5	D 381
Tekanan Uap	kPa	45	69	D 5191/ D 323
Berat Jenis (pada suhu 15°C)	kg/m ³	715	770	D 4052/D 1298
Korosi bilah tembaga	Merit	Kelas 1tif		D 130
Sulfur Merkaptan	% massa	-	0,002	D 3227
Penampilan Visual		Jernih dan terang		
Bau		Dapat dipasarkan		
Warna		Kuning		
Kandungan pewarna	gr/100 l	-	0,13	

(Keputusan Direktorat Jendral Minyak dan Gas Bumi No: 933.K/10/DJM.S/2013)

b. Bahan Bakar Bensin Jenis 90 (Pertalite)

Pertalite diluncurkan pada tanggal 24 Juli 2015, merupakan bahan bakar gasoline yang memiliki angka oktan 90 serta berwarna hijau terang dan

jernih. Bahan bakar Pertalite memiliki kualitas yang lebih baik daripada bahan bakar Premium karena angka oktan pertalite yang lebih tinggi sehingga mampu menstabilkan knocking mesin kendaraan menjadi lebih optimal. Spesifikasi bahan bakar pertalite dapat dilihat pada tabel 2.6

Tabel 2.6 Spesifikasi Bahan Bakar Bensin Jenis 90 (Pertalite)

Karakteristik	Satuan	Batasan	
		Min	Max
Angka Oktana Riset	RON	90	-
Stabilitas Oksidasi	Menit	360	-
Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05
Kandungan Timbal (Pb)	gr/l	-	0,013
Kandungan Logam (Mangan (Mn), Besi (Fe))	mg/l	tidak terdeteksi	
Kandungan Oksigen	% m/m	-	2,7
Kandungan Olefin	% v/v	Dilaporkan	
Kandungan Aromatik	% v/v	Dilaporkan	
Kandungan Benzene	% v/v	Dilaporkan	
Distilasi :			
10% vol.Penguapan	°C	-	74
50% vol.Penguapan	°C	88	125
90% vol.Penguapan	°C	-	180
Titik didih akhir	°C	-	215
Residu	% vol		2
Sedimen	mg/l	-	1
Unwashed Gum	mg/100 ml	-	70
Washed Gum	mg/100 ml	-	5
Tekanan Uap	kPa	45	60
Berat Jenis (pada suhu 15°C)	kg/m ³	715	770
Korosi bilah tembaga	Menit	Kelas 1	
Sulfur Merkaptan	% massa	-	0,002
Penampilan Visual		Jernih dan terang	
Bau		Dapat dipasarkan	
Warna		Hijau	
Kandungan pewarna	gr/100 l	-	0,13

(Keputusan Direktora Jendral Minyak dan Gas Bumi No: 0486.K/10/DJM.S/2017)

c. Bahan Bakar Bensin Jenis 98 (Pertamax Turbo)

Pertamax Turbo merupakan bahan bakar bensin yang memiliki angka oktan 98 dan berwarna merah. Pertamax Turbo didesain untuk mesin berteknologi tinggi dengan minimum kompresi rasio 12:1 atau mesin kendaraan dengan *supercharger technology* dan *turbocharger technology*. Pertamax Turbo

diformulasikan dengan *Ignition Boost Formula* yang membuat mesin lebih responsif pada pembakaran mesin dan membuat performa kendaraan menjadi sempurna. Spesifikasi pertamax turbo dapat dilihat pada tabel 2.7.

Tabel 2.7 Bahan Bakar Bensin Jenis 98 (Pertamax Turbo)

Karakteristik	Satuan	Batasan	
		Min	Max
Angka Oktana Riset	RON	98	-
Stabilitas Oksidasi	Menit	480	-
Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05
Kandungan Timbal (Pb)	gr/l	-	0,013
		Injeksi timbal tidak diizinkan	
Kandungan Fosfor	mg/l	tidak terdeteksi	
Kandungan Logam (Mn, Fe)	mg/l	tidak terdeteksi	
Kandungan Silikon	mg/kg	tidak terdeteksi	
Kandungan Oksigen	%m/m	-	2,7
Kandungan Olefin	% v/v	-	-
Kandungan Aromatik	% v/v		40
Kandungan Benzene	% v/v		5
Distilasi :			
10% vol.Penguapan	°C	-	70
50% vol.Penguapan	°C	77	110
90% vol.Penguapan	°C	130	180
Titik didih akhir	°C	-	205
Residu	% vol		2
Sedimen	mg/l	-	1
Unwashed Gum	mg/100 ml	-	70
Washed Gum	mg/100 ml	-	5
Tekanan Uap	kPa	45	60
Berat Jenis (pada suhu 15°C)	kg/m ³	715	770
Korosi bilah tembaga	Merit		Kelas 1
Uji Doctor			Negatif
Sulfur Merkaptan	% massa	-	0,002
Penampilan Visual		Jernih dan terang	

(Keputusan Direktora Jendral Minyak dan Gas Bumi No: 0177.K/10/DJM.T/2018)

2.7.2 Bahan Bakar Solar

Minyak solar adalah suatu produk destilasi minyak bumi dengan titik didih antara 250°C sampai 350°C atau disebut juga middle destilat. Minyak solar digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel, misalnya digunakan pada kendaraan bermotor seperti bus, truk, kereta api, dan traktor. Angka setana merupakan tolak ukur kemudahan menyala atau terbakarnya suatu bahan bakar di dalam mesin

diesel. Angka setana produk solar yang ada di pasaran adalah 48. Spesifikasi bahan bakar solar dapat dilihat pada tabel 2.8.

Tabel 2.8 Spesifikasi Bahan Bakar Solar

Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji (ASTM)
		Min.	Maks.	
Bilangan Cetana	-	48	-	D 613
Indeks Setana	-	45	-	D 4737
Berat Jenis, 15 C	kg/m ³	815	860	D 4052
Viskositas, 40 C	mm ² /sec	2	4,5	D 445
		-	0,35	
		-	0,3	
Kandungan Sulfur	%m/m	-	0,25	D2622/D 5453
		-	0,05	
		-	0,005	
Distilasi 90 % vol.penguapan	°C	-	370	D 86
Titik Nyala	°C	52	-	D 93
Titik Tuang	°C	-	18	D 97
Residu Karbon	%m/m	-	0,1	D 4530/ D 189
Kandungan Air	mg/kg	-	500	D 6304
Biological Growth	-	Nihil		
Kandungan FAME	% v/v	-	-	
Kandungan metanol	% v/v	Tak Terdeteksi		D 4815
Korosi Bilah Tembaga	Merit	-	Kelas 1	D 130
Kandungan Abu	% v/v	-	0,01	D 482
Kandungan Sedimen	% m/m	-	0,01	D 473
Bilangan Kuat Asam	mgKOH/gr	-	0	D 664
Partikulat	mg/l	-	-	D 2276
Penampilan Visual	-	Jernih & Terang		
Warna	No.ASTM	-	3	D 1500
Lubcity	Micron	-	460	D 6079

(Keputusan Direktora Jendral Minyak dan Gas Bumi No: 28.K/10/DJM.T/2016)

2.8 Aluminium Oksida

Aluminium Oksida merupakan material yang memiliki banyak kegunaan. Aluminium Oksida telah banyak diaplikasikan sebagai adsorben, penukar ion, dan sebagai katalis. Aluminium Oksida adalah mineral kristal alumina silika tetrahidrat berpori yang mempunyai struktur kerangka tiga dimensi, terbentuk oleh tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ yang saling terhubung oleh atom-atom oksigen sedemikian rupa, sehingga membentuk kerangka tiga dimensi terbuka yang mengandung kanal-

kanal dan rongga-rongga, yang didalamnya terisi oleh ion-ion logam, biasanya adalah logam-logam alkali atau alkali tanah dan molekul air yang dapat bergerak bebas (Chetam, 1992). Aluminium Oksida sangat cocok digunakan untuk kondisi operasi yang sangat tinggi karena mempunyai sifat kekerasan, relatif stabil pada suhu tinggi, luas permukaan yang sangat besar dan titik leleh yang tinggi. (Kholidah dkk., 2018)

2.8.1 Sifat-Sifat Kimia dan Fisika Aluminium Oksida

Aluminium oksida (alumina) adalah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen, dengan rumus kimia Al_2O_3 . Secara alami, alumina terdiri dari mineral korondum, dan memiliki bentuk kristal heksagonal. (Hudson dkk., 2002). Halimantun Hamdan (1992) mengemukakan Secara umum, alumina sering dijumpai dalam bentuk kristal. Struktur kristalnya yaitu trigonal. Oksigen pada aluminium oksida struktur heksagonal ion aluminium yang mengisi $2/3$ celah oktahedral. Alumina juga sering dijumpai dalam bentuk lain misalnya η , χ , γ , δ and θ theta alumina.

2.8.2 Gamma Alumina ($\gamma-Al_2O_3$)

Gamma Alumina ($\gamma-Al_2O_3$) merupakan salah satu bentuk dari alumina metastabil atau alumina transisi yang didapat dari pemanasan boehmite dengan temperature di bawah $600^\circ C$ (Harfani, 2009). Di antara alumina transisi, gamma alumina ($\gamma-Al_2O_3$) merupakan suatu bahan yang penting digunakan dalam berbagai bidang, misalnya sebagai katalis katalisator substrat di dalam industri otomotif dan petroleum, komposisi struktural untuk pesawat ruang angkasa dan pakaian pelindung dari gesekan dan panas atau abrasi dan thermal). Gamma alumina ($\gamma-Al_2O_3$) dalam ukuran nano (1-100 nm) merupakan terobosan baru untuk memperoleh material dengan sifat yang berbeda dengan material dalam fase *bulk* terutama dari segi peningkatan kekuatan mekanik dan termal serta luas permukaan yang sangat besar.