

Bab II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polimer

Polimer merupakan molekul raksasa atau makromolekul yang terbentuk dari susunan ulang molekul kecil yang saling terikat melalui ikatan kimia, yang disebut sebagai polimer (*poly* = banyak; *mer* = bagian). Pembentukan suatu polimer terjadi ketika seratus atau seribu unit molekul kecil, yang disebut monomer, saling berikatan membentuk suatu rantai. Monomer dalam suatu polimer dapat memiliki jenis yang sama atau berbeda. Sifat-sifat polimer berbeda dari monomer-monomer yang membentuknya. Polimer adalah molekul besar yang terbentuk dari unit-unit berulang sederhana, yang ekuivalen atau hampir ekuivalen dengan monomer. Proses pembentukan polimer dari monomer disebut polimerisasi [6]. Polimer memiliki sifat unik yang membuatnya penting dalam berbagai aplikasi industri dan bahan konstruksi.

Polimer memiliki massa molekul relatif yang sangat besar, sekitar 500 hingga 10.000 kali berat molekul unit ulangnya. Unit ulang ini pada polimer biasanya setara dengan monomer, yaitu bahan dasar pembentuk polimer tersebut. Apabila polimer yang dihasilkan berasal dari lebih dari satu jenis monomer, maka produknya disebut kopolimer, dan proses pembentukannya dinamakan kopolimerisasi.

Material plastik telah mengalami perkembangan pesat dan memegang peranan yang sangat penting di berbagai sektor seperti elektronika, pertanian,

tekstil, transportasi, furniture, konstruksi, kemasan kosmetik, mainan anak-anak, dan berbagai produk industri lainnya. Tabel 2.1 mencantumkan berbagai jenis plastik yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari [7]. Perkembangan material plastik memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan efisiensi, daya tahan, dan fleksibilitas dalam berbagai aplikasi, sehingga menjadikannya salah satu bahan paling serbaguna dan berdampak luas dalam berbagai sektor industri.

Tabel 2.1 Penggunaan Jenis Plastik Dalam Kehidupan Sehari-hari

Jenis Plastik	Contoh Penggunaan
PET (<i>Polyethylene Terephthalate</i>)	PET yang umum digunakan untuk membuat Botol kemasan air mineral, botol minyak goreng, jus, botol sambal, botol obat, dan botol kosmetik karena kekuatannya dan kemampuannya yang baik untuk membentuk. Botol kemasan air mineral, botol minyak goreng, jus, botol sambal, botol obat, dan botol kosmetik adalah contoh produk PET yang umum.
LDPE (<i>Low-Density Polyethylene</i>)	LDPE sering digunakan untuk membuat kantong plastik, wadah makanan, dan kemasan lainnya karena kelembutannya dan kemampuannya yang baik untuk membentuk. Kantong belanja, botol susu, dan wadah makanan adalah contoh produk LDPE yang umum.

HDPE (*High-Density Polyethylene*) HDPE dikenal karena kekuatannya yang tinggi dan ketahanannya terhadap bocor, sehingga sering digunakan untuk membuat botol plastik daur ulang, pipa air, dan produk berkekuatan tinggi lainnya

LLDPE (*Linear Low-Density Polyethylene*) LLDPE memiliki struktur molekul yang lebih linier dan lebih elastis daripada LDPE. Ini membuatnya cocok untuk digunakan dalam pembuatan film stretch yang digunakan untuk membungkus palet atau barang-barang lain yang perlu dijaga agar tetap tertutup.

PP (*Polypropylene*) PP sering digunakan dalam pembuatan wadah makanan, botol minuman, dan karpet karena sifatnya yang tahan panas, kokoh, dan tahan terhadap berbagai zat kimia. Keberlanjutan dan daya tahan PP membuatnya menjadi pilihan populer dalam berbagai aplikasi.

Polimer buatan dapat dibagi menjadi polimer regenerasi dan polimer sintetis. Polimer regenerasi adalah modifikasi dari polimer alam. Sebagai contoh, rayon merupakan serat sintetis yang dihasilkan dari kayu, khususnya selulosa. Di sisi lain, polimer sintetis adalah polimer yang dibuat secara langsung dari molekul sederhana (monomer) dalam pabrik. Beberapa contoh polimer sintetis meliputi

polyetena, polypropylena, polyvinyl chloride (PVC), dan nylon. Banyak polimer sintetis digunakan sebagai bahan dasar plastik untuk berbagai keperluan, baik dalam kehidupan sehari-hari, industri, maupun pembuatan mainan anak-anak. Plastik yang terbuat dari polimer sintetis menawarkan fleksibilitas, kekuatan, dan kemampuan untuk dibentuk menjadi berbagai bentuk yang membuatnya sangat serbaguna dalam berbagai aplikasi. Perkembangan dan penerapan polimer sintetis telah membawa dampak besar pada industri dan gaya hidup modern.

Polimer sintetis pertama yang dikenal adalah bakelit, hasil dari kondensasi fenol dengan formaldehida, yang ditemukan oleh kimiawan kelahiran Belgia Leo Baekeland pada tahun 1907. Bakelit merupakan salah satu jenis produk konsumsi yang digunakan secara luas. Pabrik memproduksi berbagai contoh polimer, termasuk nylon, *polyester*, kantong plastik, botol, pita karet, dan berbagai produk lain yang mendominasi kehidupan sehari-hari. Dalam konteks respons terhadap panas, polimer dapat dibagi menjadi dua kategori utama: polimer termoplastik (tidak tahan panas, seperti plastik) dan polimer *thermosetting* (tahan panas, seperti melamin).

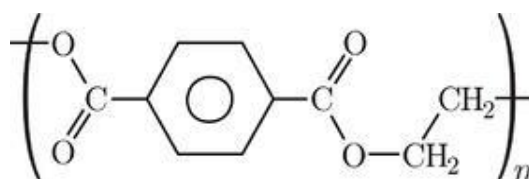
2.2 *Polyethylene Terephthalate (PET)*

Polyethylene Terephthalate (PET) merupakan polimer termoplastik dari keluarga poliester yang banyak diproduksi karena keunggulan sifat mekanik dan kimianya. PET memiliki titik leleh kristalin yang tinggi (260°C) dan rantai polimer yang kaku dalam PET mengakibatkan PET mempunyai sifat mekanik yang kuat, ketahanan terhadap bahan kimia dan pelarut yang baik. Polimer ini banyak digunakan untuk membuat botol untuk minuman ringan, bir, alkohol, produk

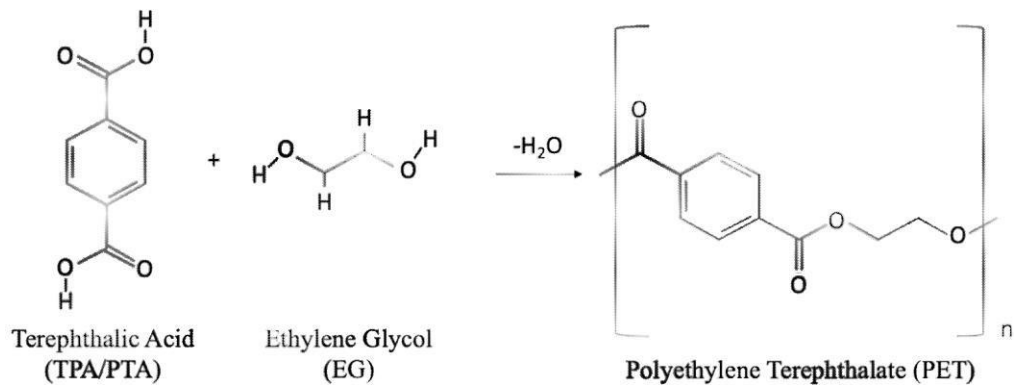
makanan, dan obat-obatan. PET juga dapat digunakan sebagai rekayasa plastik yang menggantikan baja, aluminium dan logam lainnya untuk peralatan elektronik, rumah tangga, maupun suku cadang kendaraan [8]. Kebanyakan (sekitar 60%) dari produksi PET dunia digunakan dalam serat sintetis, dan produksi botol mencapai 30% dari permintaan dunia. Dalam penggunaannya di bidang tekstil, PET biasanya disebut poliester saja [9].

PET secara umum didapatkan dari polimerisasi fase lelehnya untuk mendapatkan resin yang mempunyai viskositas pada rentang 0,5-0,7 dL/g. Untuk mendapatkan polimer dengan berat molekul yang lebih tinggi misalnya viskositasnya lebih besar dari 0,7 dL/g, dilakukan polimerisasi pada keadaan padat. Proses selanjutnya yaitu memanaskan polimer padatan yang berat molekularnya masih rendah dengan temperatur di bawah titik lelehnya tetapi di atas titik lelehnya [8].

PET dapat bersifat amorf (transparan) atau semikristal bergantung pada proses dan mekanisme termal pembuatannya. Polimer ini diturunkan dari reaksi antara asam *terephthalic* dan *ethyleneglycol*. Sifat PET bergantung pada berat molekul, struktur molekular, kristalinitas, dan adanya pengotor [10]. Struktur kimianya merupakan perulangan dari monomer ethylene terephthalate seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Masing-masing monomer mempunyai panjang fisik sekitar 1,09 nm dan berat molekul ~200



Gambar 2.1 Struktur Kimia PET [8]

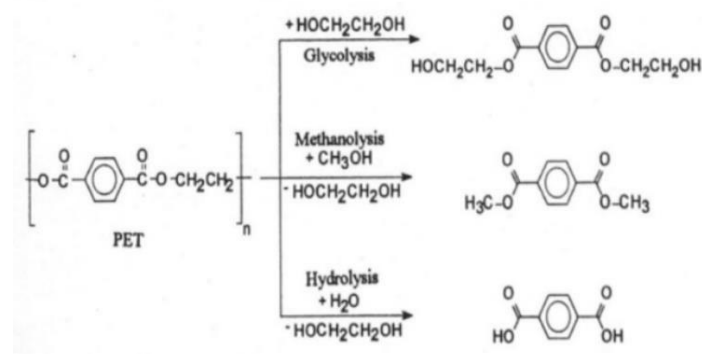


Gambar 2.2 Reaksi Kimia Asam Tereftalat dan Etilen Glikol dalam Pembentukan PET [11]

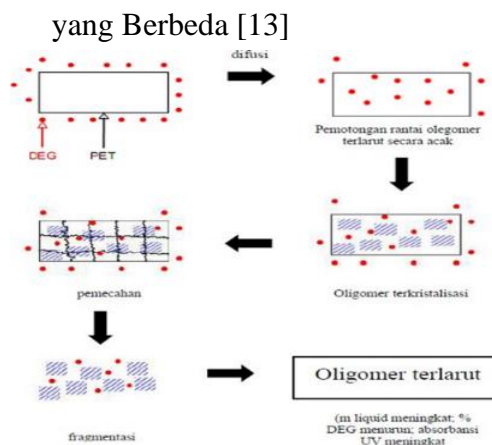
Reaksi pembentukan PET dapat dilihat pada Gambar 2.2. Plastik PET banyak digunakan untuk botol minuman, botol minyak goreng, gelas plastik, dan lain sebagainya. Kinerja plastik dapat dilihat dari sifat permeabilitas dan mekanis berdasarkan nilai laju transmisi uap air (*Water Vapor Transmission Rate (WVTR)*), laju transmisi gas oksigen (*Oxygen Transmission Rate (OTR)*), kekuatan tarik (*tensile strength*) dan aroma *barrier*. Aroma *barrier* itu sendiri adalah proteksi akan kehilangan aroma atau pencemaran aroma dari luar, jika semakin banyak jumlah bintang semakin tinggi sifat perlindungan terhadap aromanya [12].

2.3 Proses Glikolisis

Limbah plastik PET dapat didaur ulang dengan 5 metode diantaranya ialah glikolisis, metanolisis, hidrolisis, ammonolisis, dan aminolisis [3]. Metode glikolisis, metanolisis, hidrolisis merupakan metode yang telah dilakukan secara komersil, pada ketiga metode ini menggunakan pelarut yang berbeda. Pada metode glikolisis menggunakan pelarut etilen glikol dan sejenisnya. Pada metode metanolisis menggunakan pelarut berupa alkohol seperti methanol dan lain sebagainya. Pada metode hidrolisis menggunakan pelarut berupa air akan tetapi metode ini jarang digunakan karena prosesnya yang lambat [13].



Gambar 2.3 Reaksi Depolimerisasi PET dengan Berbagai Pelarut

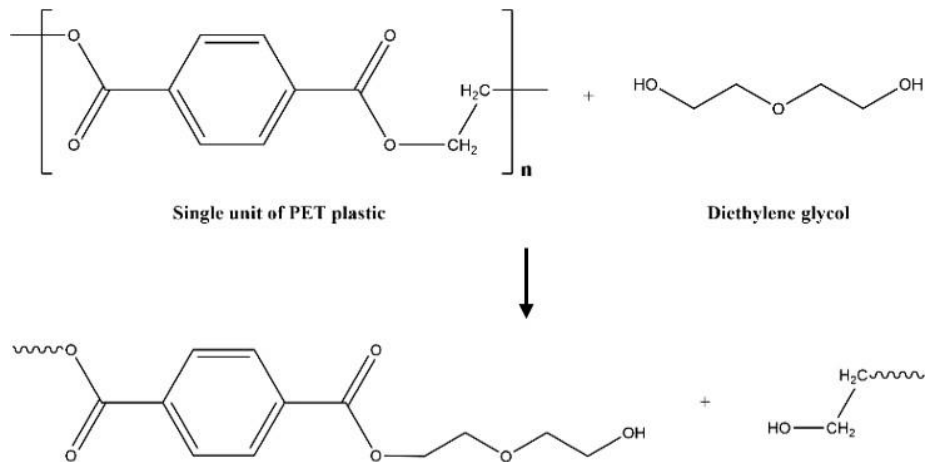


Gambar 2.4 Mekanisme Depolimerisasi PET oleh DEG [14]

Metode yang paling umum digunakan ialah metode glikolisis, hal ini dikarenakan prosesnya yang cukup cepat dibandingkan yang lainnya, dan cukup ekonomis. Dalam metode glikolisis, plastik PET dan glikol dipanaskan didalam reactor, sehingga berat molekul polimer tersebut tereduksi dan menghasilkan monomer. Mekanisme depolimerisasi PET dengan menggunakan metode depolimerisasi diawali dengan penambahan dietilen glikol, kemudian dietilen glikol (DEG) mengalami difusi terhadap PET. Setelah mengalami difusi, dietilen glikol memotong rantai oligomer terlarut secara acak, kemudian oligomer mengalami rekristalisasi, kemudian terjadi pemecahan dan fragmentasi (pelepasan molekul netral dari ion molekul tersebut), setelah itu terbentuk oligomer terlarut terbentuk fasa liquid. Untuk gambaran mekanisme tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut ini [14]. Reaksi dari masing-masing metode memiliki reaksi depolimerisasi yang berbeda- beda yang dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.

Pada proses glikolisis plastik PET dengan menggunakan DEG dengan tambahan katalis dan juga panas dapat membentuk reaksi yang dapat dilihat pada Gambar 2.5. Pada PET ikatan atau reaksi asam tereftalat dengan dietilen glikol memiliki ikatan ester. Penambahan dietilen glikol digunakan untuk memecah PET menjadi monomer-monomer, sehingga dapat membuat ikatan ester baru antara asam tereftalat dengan dietilen glikol. Penambahan katalis bertujuan untuk mempercepat laju reaksi kimia pada temperatur tertentu. Katalis yang umumnya digunakan merupakan logam asetat seperti zink asetat, selain itu katalis yang digunakan juga dapat berupa *alkali catalyst*,

metal oxide, metal chloride [14].



Gambar 2.5 Reaksi PET Dengan DEG dan Penambahan Katalis [14]

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Syariffuddeen, dkk (2012) [15] menjelaskan bahwa penggunaan katalis yang berbeda dapat mempengaruhi reaksi glikolisis. Katalis yang digunakan pada penelitian ini ialah seng asetat (logam asetat), natrium bikarbonat (katalis alkali), seng klorida (logam klorida) dan titanium (IV) oksida (oksida logam) dengan berat 0,5% dari berat PET yang digunakan serta perbandingan PET dengan larutan glikol ialah 1:4. Katalis terbaik yang digunakan untuk proses glikolisis PET ialah zink asetat. Hal ini dikarenakan seng asetat juga menunjukkan jumlah total monomer BHET (*Bis(2-Hydroxyethyl) terephthalate*) tertinggi, dimana pemulihan BHET mencapai 52% di GP1 dengan masing-masing 80% dan 92% di GP2 dan GP3, hal ini dapat dilihat pada Tabel 2.2. Hasil ini menunjukkan bahwa seng asetat menunjukkan efek katalitik tertinggi dan menjadi katalis yang paling cocok dalam glikolisis PET [15].

Tabel 2.2 Konsentrasi Monomer BHET Pada Efek Katalis Seleksi [15]

<i>Type of catalyst</i>	<i>Glycolysis Product, GP1</i>		<i>Glycolysis Product, GP2</i>		<i>Glycolysis Product, GP3</i>		<i>Average BHET Recovery (%)</i>
	<i>BHET (ppm)</i>	<i>BHET (%)</i>	<i>BHET (ppm)</i>	<i>BHET (%)</i>	<i>BHET (ppm)</i>	<i>BHET (%)</i>	
<i>Sodium</i>	12	15	16	20	29	36	24
<i>Bicarbonat</i>							
<i>Zinc Chloride</i>	22	28	38	47	-	-	25
<i>Zinc Acetate</i>	42	52	64	80	73	92	75
<i>Titanium (IV) Okside</i>	8	11	13	16	-	-	9

2.4 *High Density Polyethylene (HDPE)*

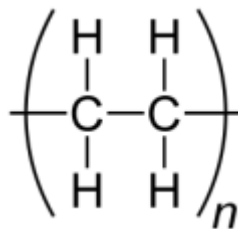
High Density Polyethylene (HDPE) merupakan salah satu bahan plastik yang aman digunakan karena kemampuan untuk mencegah reaksi kimia antara kemasan plastik HDPE dan makanan atau minuman kemasan. Dibandingkan dengan plastik dengan kode PET, HDPE memiliki sifat material yang lebih kuat, lebih keras, buram dan lebih tahan terhadap suhu tinggi. HDPE merupakan salah satu bahan plastik yang aman untuk digunakan karena kemampuan untuk mencegah reaksi kimia antara kemasan *plastic* berbahan HDPE dengan makanan/minuman yang dikemasnya. HDPE memiliki sifat bahan yang lebih kuat, keras, buram dan lebih tahan terhadap suhu tinggi. Sama seperti PET, HDPE juga direkomendasikan hanya untuk sekali pemakaian, karena pelepasan senyawa antimoni trioksida terus meningkat seiring waktu. HDPE (*High Density Polyethylene*) memiliki rantai polimer tunggal yang cukup panjang yang membuat jenis plastik ini cukup padat, kuat, dan lebih tebal jika dibandingkan PET.



Gambar 2.6 HDPE (*High Density Polyethylene*)

High-density polyethylene terbuat dari minyak bumi dan bahan ini bisa digunakan untuk membuat berbagai jenis kemasan plastik. HDPE memiliki ketahanan kimia yang baik, oleh karena itu, plastik jenis ini digunakan untuk

pembuatan botol sampo, deterjen dan oli motor. HDPE merupakan salah satu bahan plastik yang aman untuk digunakan karena kemampuan untuk mencegah reaksi kimia antara kemasan *plastic* berbahan HDPE dengan makanan/minuman yang dikemasnya. HDPE memiliki sifat bahan yang lebih kuat, keras, buram dan lebih tahan terhadap suhu tinggi. Sama seperti PET, HDPE juga direkomendasikan hanya untuk sekali pemakaian, karena pelepasan senyawa antimon trioksida terus meningkat seiring waktu.



Gambar 2.7 Struktur Kimia HDPE

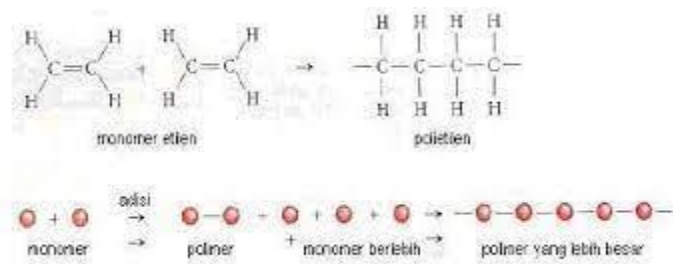
HDPE, atau *high-density polyethylene*, merupakan jenis plastik yang digunakan secara luas karena sifatnya yang tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan. Struktur kimia HDPE melibatkan rantai polimer yang panjang dan terdiri dari unit monomer etilena. Etilena adalah molekul dasar yang terdiri dari dua atom karbon dan empat atom hidrogen ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Proses polimerisasi menggabungkan molekul-molekul etilena ini menjadi rantai panjang dengan ikatan karbon-karbon yang kuat. Struktur kimia HDPE menunjukkan konfigurasi linier, di mana rantai polimer membentang lurus tanpa cabang. Ini memberikan kepadanya sifat-sifat seperti kepadatan tinggi dan kekuatan yang baik. Keberadaan ikatan tunggal antara atom karbon dalam rantai polimer membuatnya lebih tahan terhadap

tekanan dan memungkinkan untuk molekul yang lebih rapat, sehingga meningkatkan kepadatan plastik.

2.5 Low Density Polyethylene (LDPE)

Plastik jenis ini adalah plastik yang notabennya terbuat dari bahan yaitu minyak bumi dan memiliki sifat yang mudah untuk dibentuk saat kondisi temprature yang panas. LDPE memiliki resin yang sangar kuat dan tidak dapat bereaksi dengan zat kimia lain serta termasuk ke dalam golongan plastik yang paling tinggi standar mutunya. Plastik LDPE memiliki sifat mekanik yang kuat, sedikit tembus cahaya, elastis, dan memiliki permukaan yang sedikit berminyak. Sangat tahan terhadap senyawa kimia pada suhu di bawah 60°C Uap air baik, tetapi tidak begitu baik untuk gas lain seperti oksigen Plastik ini dapat didaur ulang, baik untuk barang-barang yang memerlukan fleksibilitas tetapi kuat, dan memiliki resistensi yang baik terhadap reaksi kimia.

Plastik jenis ini memiliki struktur kimia polimer yang simpel, membuatnya sangat mudah untuk diproduksi. Polimer LDPE memiliki rantai cabang yang cukup banyak membuatnya tidak terlalu padat sehingga bisa menghasilkan jenis *polyethylene* yang lebih lunak dan fleksibel. Kemasan plastik ini artinya sangat baik digunakan untuk minyak sayuran serta bahan bersifat asam dan basa. Rumus kimia dari LDPE adalah $(-CH_2-CH_2-)_n$. Plastik jenis ini relatif tangguh, fleksibel, dan berwarna transparan. Biasanya, plastik jenis ini digunakan untuk pembungkus roti, makanan beku, produk segar, koran, sampah rumah tangga, *cling wrap*, *stretch film*, tutup minuman, pelapis kertas karton susu, botol yang mudah diremas, dan mainan.

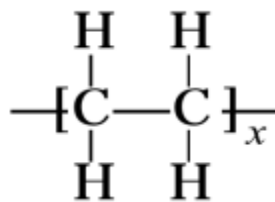


Gambar 2.8 Struktur Kimia LDPE [16]

LDPE dibuat dari monomer etilena, yang terdiri dari dua atom karbon dan empat atom hidrogen (CH₂=CH₂). Monomer ini mengalami proses polimerisasi untuk membentuk rantai panjang polietilena. Selama proses polimerisasi, ikatan rangkap ganda di antara atom karbon etilena dihilangkan, dan terbentuklah ikatan tunggal antara atom karbon. Ini menghasilkan rantai polimer yang panjang dan linier. Salah satu perbedaan utama antara LDPE dan HDPE terletak pada kepadatan molekulnya. LDPE memiliki struktur molekuler yang lebih terbuka dan cabang-cabang pendek, yang menyebabkan kepadatan molekulnya lebih rendah. Struktur yang lebih terbuka dan kurang padat membuat LDPE menjadi plastik yang lebih fleksibel dan elastis dibandingkan dengan HDPE. Oleh karena itu, LDPE sering digunakan dalam aplikasi yang memerlukan kelembutan dan elastisitas, seperti kantong plastik, film stretch, dan wadah fleksibel. LDPE cenderung lebih transparan dibandingkan dengan HDPE, membuatnya cocok untuk penggunaan di mana visibilitas produk atau isi kemasan merupakan faktor penting. LDPE digunakan dalam berbagai produk konsumen, termasuk kantong belanja plastik, wadah makanan, tutup botol, mainan anak-anak, dan produk kemasan fleksibel.

2.6 *Linier Low Density Polyethylene (LLDPE)*

LLDPE (*Linier Low Density Polyethylene*) merupakan salah satu jenis PE yang memiliki densitas pada rentang 0,90 – 0,94 kg/cm³. Nama *polyethylene* berasal dari monomer penyusunnya yaitu etana (*ethylene*). Polietilena merupakan salah satu polimer dengan struktur molekul paling sederhana, bersifat termoplastik dari polimerisasi etilen. LLDPE digunakan sebagai pembungkus kabel, mainan, tutup kemasan, ember, kontainer dan pipa. LLDPE terutama juga digunakan untuk aplikasi plastik film dikarenakan sifat toughness, fleksibilitas, dan transparansi. LLDPE adalah polimer linier dengan percabangan rantai pendek dengan jumlah yang cukup signifikan. Umumnya dibuat dengan kopolimerisasi etilena dengan rantai pendek alfa-olefin (1-butena, 1-heksena, 1-oktena, dan sebagainya). LLDPE memiliki kekuatan tensil yang lebih tinggi dari LDPE, dan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap tekanan. Sedangkan untuk sifat fisik LLDPE titik lelehnya berkisar 105°C hingga 115°C.



Gambar 2.9 Struktur Kimia LLPE

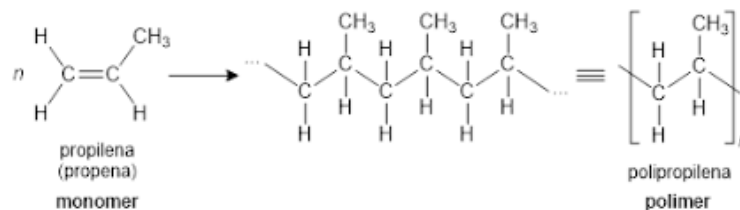
Seperti LDPE, LLDPE juga dibuat dari monomer etilena, yang terdiri dari dua atom karbon dan empat atom hidrogen (CH₂=CH₂). Proses polimerisasi menggabungkan molekul-molekul etilena ini untuk membentuk rantai polimer. Ikatan Karbon-Karbon: Selama proses polimerisasi, ikatan rangkap ganda di antara

atom karbon etilena dihilangkan, dan terbentuklah ikatan tunggal antara atom karbon. Namun, struktur molekuler LLDPE memiliki sedikit cabang atau bentuk rantai samping yang lebih panjang daripada LDPE, yang memberikan sifat linear lebih jelas. Linearitas yang Ditingkatkan: Perbedaan utama antara LLDPE dan LDPE terletak pada linearitas molekulnya. LLDPE memiliki struktur yang lebih linear dan kurang cabang, yang memberikan kepadatan molekul yang sedikit lebih tinggi dibandingkan LDPE. Kepadatan molekul yang lebih tinggi membuat LLDPE memiliki sifat mekanis yang lebih baik, seperti kekuatan tarik yang lebih tinggi dan ketahanan terhadap tekanan yang lebih baik dibandingkan dengan LDPE. Meskipun lebih linear, LLDPE masih mempertahankan fleksibilitas yang baik, menjadikannya pilihan yang baik untuk produk yang memerlukan elastisitas dan kelembutan, seperti kantong plastik, film, dan wadah fleksibel. Aplikasi Umum: LLDPE digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk kemasan fleksibel, kantong belanja plastik, lapisan film, dan produk plastik lainnya yang memerlukan kombinasi kekuatan dan fleksibilitas.

2.7 Polypropylene (PP)

Polypropylene (PP) merupakan polimer hidrokarbon yang termasuk ke dalam polimer termoplastik yang dapat diolah pada suhu tinggi. *Polypropylene* berasal dari monomer propilena yang diperoleh dari pemurnian minyak bumi. Secara industri, polimerisasi *polypropylene* dilakukan dengan menggunakan katalis koordinasi. *Polypropylene* memiliki sifat tahan terhadap pelarut kimia, asam, dan basa, selain itu bahan *polypropylene* juga dapat di daur- ulang.

Karakteristik PP adalah botol transparan yang jernih atau berwarna. *Polypropylene* (PP) lebih kuat, lebih ringan, memiliki permeabilitas uap yang rendah, dan memiliki ketahanan minyak yang baik. Titik lelehnya sekitar 165 derajat Celcius. *Polypropylene* biasanya digunakan untuk menyimpan makanan, botol minuman dan yang paling penting botol minum bayi, kantong plastik, film, mobil, mobil, mainan dan ember. PP (*Polypropylene*) Pada bahan ini termasuk jenis yang tahan lemak atau minyak, tahan terhadap temperatur tinggi, tahan terhadap alkali dan asam dan memiliki bentuk yang lebih kaku dibandingkan jenis PE. Terkenal dengan keunggulannya dalam *impact strength* dan permukaan yang mengkilap.



Gambar 2.10 Struktur Kimia PP

PP dibuat dari monomer propilena, yang terdiri dari tiga atom karbon dan enam atom hidrogen ($\text{CH}_3\text{-CH}=\text{CH}_2$). Monomer ini mengalami proses polimerisasi untuk membentuk rantai panjang *polypropylene*. Selama proses polimerisasi, ikatan rangkap tiga antara atom karbon propilena dihilangkan, dan terbentuklah ikatan tunggal antara atom karbon. Ini menghasilkan rantai polimer panjang dengan struktur yang linier. Salah satu ciri khas PP adalah sifat isotaktik, yang berarti bahwa kelompok metil pada setiap unit monomer cenderung berada pada sisi yang sama dari rantai polimer. Hal ini memberikan kestabilan dan sifat-sifat termal

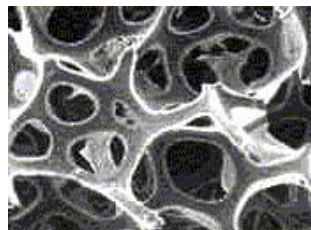
tertentu pada plastik PP. PP memiliki tingkat kristalinitas yang tinggi, yang berarti bahwa molekul-molekulnya memiliki urutan teratur dan membentuk kristal dalam struktur plastik tersebut. Kristalinitas yang tinggi memberikan kekuatan dan kekerasan yang baik. PP memiliki ketahanan panas yang baik dan tahan terhadap banyak bahan kimia, membuatnya cocok untuk penggunaan dalam wadah tahan panas dan produk kimia. Meskipun tidak sefleksibel seperti polietilena, PP tetap memiliki tingkat fleksibilitas yang baik, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan. PP adalah plastik yang ringan dan tahan terhadap keretakan, menjadikannya pilihan yang baik untuk produk-produk seperti wadah makanan, peralatan rumah tangga, dan kemasan.

2.8 Polyurethane Foam (PUF)

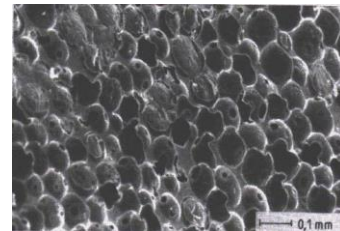
Polyurethane Foam adalah busa sintetik yang dihasilkan melalui proses reaksi kimia antara *polyalkohol* dengan *isocyanate* dan material aditif membentuk sebuah benda dengan struktur berongga dengan dinding sel yang memiliki daya berat (*density*) dan daya lentur serta karakter fisik tertentu. Bentuk dari *polyurethane* terdapat dalam berbagai bentuk, seperti busa lentur, busa keras, pelapis anti bahan kimia, bahan perekat, dan penyekat, serta elastomers. *Foam* didefinisikan sebagai substansi yang dibentuk dengan menjebak gelembung gas di dalam cairan atau padatan.

Polyurethane foam diklasifikasikan ke dalam 3 tipe, yaitu *flexible foam*, *rigid foam*, dan *semi-rigid foam*. Perbedaan sifat fisik dari 3 tipe *polyurethane foam* tersebut berdasarkan pada perbedaan berat molekul, fungsionalitas polioliol, dan

fungsionalitas *isocyanate*. Berdasarkan struktur selnya, *foam* dibedakan menjadi dua, yaitu *closed cell* (sel tertutup) dan *opened cell* (sel terbuka). *Polyurethane foam* secara umum dapat dibuat baik dengan sel tertutup maupun terbuka, bahkan dapat juga dibuat dengan sel campuran. Pada sel tertutup menghasilkan *foam* yang memiliki sifat isolasi panas baik, sedangkan pada sel terbuka akan menghasilkan *foam* yang sangat baik dan memiliki daya penyerapan air yang tinggi. Umumnya *foam* yang terbuat dari sel tertutup ialah *foam* berjenis *rigid foam*, sedangkan *foam* yang terbuat dari sel terbuka ialah *foam* berjenis *flexible foam*. Untuk melihat perbedaan struktur sel terbuka dan tertutup secara visual dapat dilihat pada Gambar 2.7 [17].



(a)



(b)

Gambar 2.11 Struktur Sel (a) Terbuka (b) Tertutup [17]

Polyurethane foams dapat disebut sebagai busa uretana, busa ini dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu *flexible foams*, *semirigid foam*, dan *rigid foams*. Sebenarnya PUF ini diklasifikasikan menjadi dua yaitu *flexible foams* dan *rigid foams*, hal ini dikarenakan *semirigid foam*, yang memiliki kekakuan tinggi, ketahanan rendah, dan *recovery* sempurna setelah dilakukan *deep compression*, dapat diklasifikasikan sebagai *rigid foams*.

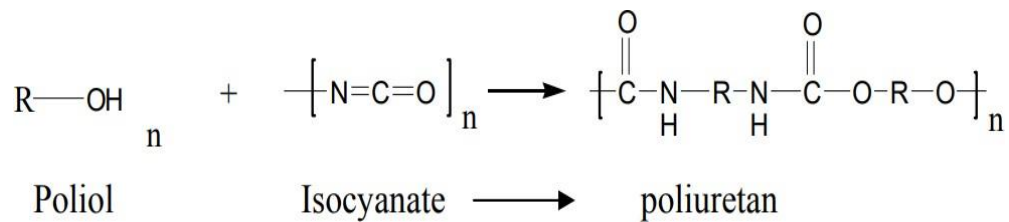
Sebaliknya, *semirigid foam*, yang memiliki *recovery* tidak lengkap, diklasifikasikan sebagai *flexible foams*. Pembuatan PUF ini terdiri dari polioliol dan poliisosianat, dimana polioliol dapat dianggap sebagai *building blocks*, dan poliisosianat dapat dianggap sebagai agen penyambung. Klasifikasi *polyurethane foams* ditunjukkan pada Tabel 2.3 [18]. Bahan baku penting untuk *polyurethane foams* adalah poliisosianat, polioliol, *blowing agent*, katalis, dan surfaktan.

Tabel 2.3 Klasifikasi *Polyurethane Foams* [18]

Polioliol	Rigid Foam	Semirigid Foam	Flexible Foam
<i>OH No.</i>	356-560	100-200	5,6-7
<i>OH Equivalent No.</i>	160-100	560-280	10.000-800
<i>Functionality</i>	3-8	3-3,5	2-3,1
<i>Elastic Modulus at 23°C</i>			
Mpa	>700	700-70	<70
<i>Compressive Strength</i>			
(MPa)	0,08-1,2	0,08-0,15	0,005-0,08

Dalam pembuatan *polyurethane foams* terdapat dua sistem yaitu sistem *one-step* dan sistem *two-step*. Sistem *one-step* merupakan sistem yang dilakukan dengan cara mencampurkan semua bahan baku. Sistem *two-step* merupakan sistem yang dilakukan dengan mereaksikan polioliol dengan

poliisosianat yang bertujuan untuk membentuk *prepolymer*. Pada pembuatan *polyurethane foams* sistem yang paling umum digunakan ialah sistem *one-step* [19]. Reaksi pembuatan *polyurethane foams* dapat dilihat pada Gambar 2.12.

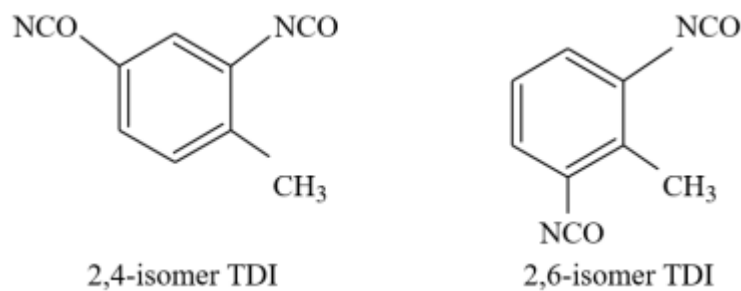


Gambar 2.12 Reaksi Pembuatan Poliuretan [19]

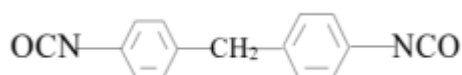
2.9 Isosianat

Isosianat adalah bahan kimia yang sangat reaktif yang digunakan dalam pembuatan produk poliuretan, misalnya busa yang fleksibel dan kaku, serat, pelapis, cat, pernis dan pernis, busa yang mengembang dan lem. Isosianat tersedia dalam berbagai bentuk kimia, yang paling umum digunakan adalah metilen difenil diisosianat (MDI), toluena diisosianat (TDI), dan heksametilena diisosianat (HDI); TDI lebih berbahaya karena lebih mudah menguap dan uapnya dapat terhirup. Senyawa isosianat merupakan salah satu bahan baku dalam reaksi kondensasi membentuk poliuretan, suatu termoplastik polimer. Jenis isosianat yang sering digunakan dalam sintesis poliuretan adalah toluen diisosianat (TDI), dan metilen difenil diisosianat (MDI) (Dieterich, 1994). Isosianat akan bereaksi dengan hidrogen aktif, isosianat akan bereaksi dengan air menghasilkan urea dan gas CO₂ yang juga akan bereaksi dengan polietilamin membentuk poliurea. Isosianat aromatik lebih reaktif dibanding Polietilen Tereftalat (PET) Benzil Alkohol

Dibenzil Tereftalat (DBT) isosianat alifatik. Struktur kedua jenis ini menentukan kekakuan (rigiditas) dari molekul poliuretan. Isosianat alifatik membuat poliuretan lebih fleksibel, sedangkan isosianat aromatik membuat poliuretan lebih *rigid*. Isosianat alifatik biasanya digunakan untuk produk akhir, misalnya untuk elastomer. TDI biasanya merupakan campuran 80% isomer 2,4 dan 20% isomer 2,6, TDI biasanya dipilih untuk busa *flexibel*, sedangkan busa *rigid* biasanya dipakai metilen difenil diisosianat (MDI). *Rigid foam* dengan menggunakan MDI memberikan stabilitas termal dan resisten terhadap pembakaran yang lebih baik dibandingkan dengan TDI.



Gambar 2.13 Struktur Toluena Diisosianat (TDI)



Gambar 2.14 Struktur Metilen Difenil Diisosianat (MDI)

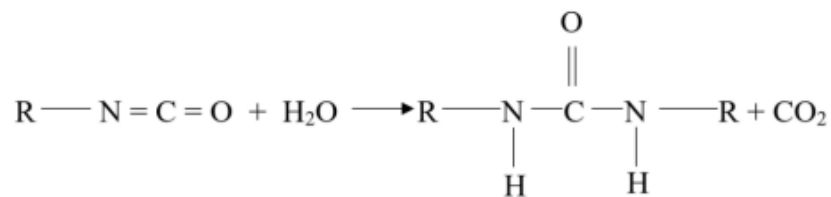
Metilen Difenil Diisosianat (MDI) adalah bahan utama yang digunakan dalam pembuatan busa poliuretan. Pengaruh MDI terhadap kuat tekan dan densitas busa poliuretan dapat dijelaskan sebagai berikut. MDI berperan sebagai agen isosianat yang bereaksi dengan polioliol untuk membentuk rantai poliuretan. Rasio antara isosianat (MDI) dan polioliol dapat mempengaruhi tingkat pengerasan dan

pembentukan busa. Jumlah MDI yang digunakan dapat memengaruhi kekuatan mekanik busa poliuretan, termasuk kuat tekan. Peningkatan konsentrasi MDI biasanya dapat meningkatkan kekuatan mekanik busa, terutama kekuatan tekan. Rasio antara MDI dan polioliol juga dapat mempengaruhi densitas busa poliuretan. Dalam beberapa kasus, peningkatan konsentrasi MDI dapat menghasilkan busa dengan densitas yang lebih tinggi karena pembentukan struktur sel yang lebih rapat. MDI memiliki reaktivitas yang tinggi, yang dapat mempengaruhi waktu reaksi dan pembentukan busa. Pengendalian reaktivitas dapat menjadi kunci untuk mencapai sifat-sifat mekanik dan densitas yang diinginkan. Pada umumnya, peningkatan konsentrasi MDI cenderung meningkatkan kekuatan tekan dan kekakuan busa poliuretan. Namun, perlu dicatat bahwa terlalu banyak MDI dapat menghasilkan busa yang sangat rapuh. Rasio MDI terhadap polioliol juga dapat mempengaruhi ukuran sel busa. Beberapa formulasi mungkin menghasilkan busa dengan struktur sel yang lebih kecil atau lebih besar tergantung pada jumlah dan jenis MDI yang digunakan.

2.10 *Blowing Agent*

Blowing agent sangat penting dalam produksi busa poliuretan ada dua jenis *blowing agent*, yaitu *chemical blowing agent* dan *physical blowing agent*. *Chemical blowing agent* adalah reaksi senyawa kimia dengan gugus isosianat untuk menghasilkan gas karbon dioksida. Agen pembusa fisik menggunakan cairan dengan titik didih rendah yang tidak bereaksi dengan gugus isosianat. *Physical blowing agent* terdiri dari senyawa yang mengandung fluor seperti hidrokarbon C5,

azeotrop dengan atau tanpa halogen, dan karbon dioksida cair. Berdasarkan paten Kim Roland, bahan yang biasa digunakan adalah air karena air bereaksi dengan isosianat menghasilkan gas CO₂, yang memungkinkan busa mengembang dan membentuk pori-pori. Berikutnya adalah reaksi antara air dan isosianat [20].



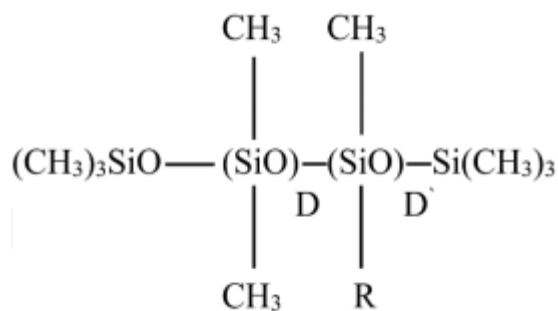
Gambar 2.15 Reaksi Isonianat dengan Air [20]

2.11 Surfaktan Silikon

Surfaktan silikon digunakan sebagai *foam stabilizer* untuk menstabilkan struktur gelembung-gelembung (*bubbles*) yang terbentuk dengan menjadikan sedikit viscous sampai *rigidity* (kekakuan) sel mengatur struktur *foam* fungsi surfaktan, diantaranya [18]:

1. Untuk menurunkan tegangan permukaan antara *liquid – liquid* atau *liquid – solid*.
2. Mencampur komponen – komponen yang tidak saling larut.
3. Memperbaiki penampilan struktur sel.
4. Untuk stabilisasi ekspansi *foam* saat mengembang.
5. Pengontrol ukuran sel.
6. Menghasilkan tipe struktur sel yang diinginkan seperti sel terbuka (*opened cell*) atau sel tertutup (*closed cell*)

Jenis surfaktan yang biasa dipakai adalah tipe *silicone glycol*. Dengan variasi tipe dan banyaknya material yang digunakan, maka dapat mempengaruhi properti seperti *density*, kandungan dari sel terbuka atau sel tertutup. Surfaktan adalah senyawa yang molekul-molekulnya mempunyai dua ujung yang berbeda interaksinya. Aktifitas surfaktan diperoleh karena sifat ganda dari molekulnya. Molekul surfaktan memiliki bagian polar yang suka air (hidrofilik) dan bagian non polar yang suka akan minyak (lipofilik/hidrofobik). Bagian polar molekul surfaktan dibagi atas surfaktan anionik, kationik, dan non ionik. Dalam pembuatan *polyurethane foam*, surfaktan silikon digunakan untuk mencampurkan komponen-komponen yang tidak saling larut, mengurangi tegangan permukaan pada fase fluida, memicu terbentuknya bubble dan menstabilkan dinding sel. Pada pembentukan emulsi, surfaktan mengurangi difusi pada antar muka [18].



Gambar 2.16 Struktur Surfaktan Silikon pada Busa Poliuretan [21]

Penggunaan surfaktan silikon dalam pembuatan busa poliuretan dapat memiliki dampak signifikan terhadap sifat fisik, termasuk kuat tekan dan densitas. Berikut adalah beberapa pengaruh potensial dari surfaktan silikon. Surfaktan silikon dapat berperan dalam stabilisasi busa poliuretan selama pembentukan sel.

Ini dapat menghasilkan struktur sel yang lebih seragam dan mencegah koalesensi (penggabungan) sel selama pembentukan busa. Penggunaan surfaktan silikon tertentu dapat meningkatkan kekuatan mekanik busa poliuretan, termasuk kuat tekan. Ini terkait dengan efek stabilisasi dan pengaruh surfaktan terhadap struktur sel. Surfaktan silikon dapat mempengaruhi ukuran sel busa. Dengan mengontrol pembentukan sel, surfaktan dapat memengaruhi densitas dan tekstur busa poliuretan. Pada beberapa kasus, surfaktan silikon dapat menghasilkan busa dengan densitas yang lebih rendah karena kemampuannya untuk meningkatkan pengembangan sel dan mencegah koalesensi yang dapat meningkatkan kerapatan busa. Beberapa surfaktan silikon dapat meningkatkan ketahanan busa poliuretan terhadap kelembaban. Hal ini dapat menghasilkan busa yang lebih tahan lama dan stabil dalam lingkungan yang lembab. Surfaktan silikon dapat memengaruhi proses pembuatan busa, termasuk waktu reaksi, kecepatan pengembangan, dan kemudahan pengolahan. Faktor-faktor ini juga dapat memengaruhi sifat mekanik dan densitas akhir dari busa. Beberapa surfaktan silikon dapat memberikan busa poliuretan sifat ketahanan terhadap api yang lebih baik. Ini dapat menjadi faktor penting dalam aplikasi yang memerlukan tingkat keamanan tertentu terhadap kebakaran.

2.12 Dietilen Glikol (DEG)

Dietilen Glikol (DEG) adalah senyawa kimia yang termasuk dalam kelompok glikol. Glikol-glikol seperti DEG memiliki dua gugus hidroksi (-OH) dalam molekulnya. DEG adalah glikol dengan dua gugus hidroksi yang terletak pada rantai karbon dengan panjang dua atom. Pengaruh Dietilen Glikol (DEG)

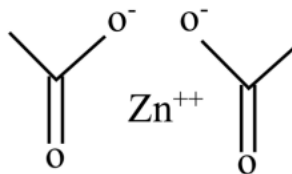
terhadap kuat tekan dan densitas dalam pembuatan busa poliuretan dapat bervariasi tergantung pada sejumlah faktor, termasuk konsentrasi DEG yang digunakan, formulasi bahan baku, dan kondisi proses produksi. Berikut adalah beberapa aspek yang dapat mempengaruhi kuat tekan dan densitas busa poliuretan ketika DEG digunakan. DEG dapat digunakan sebagai pelarut atau agen pengembang busa dalam produksi poliuretan. Penggunaan DEG sebagai pelarut dapat mempengaruhi kekakuan dan sifat mekanik busa. Konsentrasi DEG dalam formulasi busa poliuretan dapat mempengaruhi sifat fisik busa. Konsentrasi yang lebih tinggi mungkin menghasilkan busa yang lebih lembut atau elastis dengan densitas yang lebih rendah. DEG dapat berinteraksi dengan bahan-bahan lain dalam formulasi, seperti polioliol dan isosianat, yang dapat mempengaruhi struktur dan kekakuan busa. DEG mungkin memengaruhi proses reaksi polimerisasi poliuretan. Beberapa senyawa glikol dapat mempengaruhi kecepatan atau tingkat pembentukan rantai polimer, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi sifat mekanik busa. DEG dapat berperan sebagai agen pengembang busa dengan melepaskan gas selama reaksi polimerisasi. Ini dapat mempengaruhi kepadatan dan struktur sel busa [22].



Gambar 2.17 Struktur Kimia Dietilen Glikol (DEG) [22]

2.13 Zinc Acetate

Seng asetat (*zinc acetate*) adalah garam dengan rumus $Zn(CH_3CO_2)_2$, yang biasanya muncul sebagai dihidrat $Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O$. *Zinc acetate hydrate* 28 ($Zn_5(OH)_8(CH_3COO)_2$) termasuk ke dalam golongan layered basic zinc salts (LBZSs) yang memiliki formula umum $Zn_5(OH)_8X_2$ ($X = Cl, Br, I, NO_3, CH_3COO,$ dll). *Zinc acetate hydrate* memiliki struktur kristal dengan bentuk heksagonal [23]. Puncak difraksi *zinc acetate hydrate* berada pada rentang $2\theta < 20^\circ$ pada hasil XRD. Pertumbuhan kristal *zinc acetate hydrate* menghasilkan partikel dengan bentuk seperti plat atau lembaran, sehingga dapat dikategorikan sebagai material dua dimensi.



Gambar 2.18 Struktur *Zinc Acetate*

2.14 Proses *Foaming*

Proses *foaming* dalam pembuatan busa poliuretan merupakan tahapan krusial yang bertujuan untuk membentuk struktur busa pada bahan poliuretan. Berikut adalah penjelasan tentang proses *foaming* dalam pembuatan busa poliuretan:

2.14.1 *Mixing*

Pada proses ini bahan-bahan yang digunakan dicampur secara berurutan dengan menggunakan *mixing head*. Campuran cairan yang homogen merupakan hasil yang sangat penting pada proses ini. campuran

yang homogen ini dapat menghasilkan busa berkualitas baik dengan struktur sel yang halus. Proses *mixing* yang baik sangat membutuhkan surfaktan silikon, hal ini dikarenakan surfaktan silikon dapat menurunkan tegangan permukaan polioliol, sehingga membuat cairan dapat tercampur dengan homogen [24].

2.14.2 Nucleation

Selama proses *mixing* terdapat gelembung udara, hal ini dapat bertindak sebagai titik nukleasi untuk gas yang mengembang seperti pada Gambar 2.19. Saat membuat busa menggunakan metode pencetakan menggunakan box dan dengan peralatan sederhana, tidak selalu mungkin untuk mengontrol jumlah gelembung atau ukuran sel yang diinginkan. Namun, pada metode dengan menggunakan mesin slabstock kontinu, ada beberapa cara untuk memastikan bahwa ada titik awal pembentukan busa yang cukup untuk mencapai ukuran sel yang terkontrol dan seragam seperti yang diinginkan. Setelah 10 detik, gas peniup karbon dioksida dan bahan peniup tambahan berdifusi ke dalam gelembung udara kecil dan kemudian memperbesarnya, memberikan campuran cairan penampilan yang disebut sebagai *creamy*. Waktu dari pencampuran awal hingga perubahan penampilan ini disebut sebagai *cream time* [24].



Gambar 2.19 Gelembung Udara Pada Proses *Nucleation* [24]

2.14.3 *Expansion*

Semakin banyak gas yang dihasilkan, gelembung mengembang dan busa mulai mengembang yang dapat dilihat pada Gambar 2.20. Ketika busa naik dengan jumlah gelembung yang konstan, surfaktan silikon dapat menstabilkan gelembung dan mencegahnya menyatu, apabila tidak menggunakan surfaktan, maka busa runtuh. Pada saat gelembung mengembang, reaksi polimerisasi terjadi setelah pencampuran dan reaksi gas berhenti. Pada tahap ini, massa busa akan menempati sekitar 30-50 kali volume cairan asli. Bagian polimer dari busa sudah mulai membentuk gel dalam bentuk sel berisi gas dengan dinding tipis dan tebal yang disebut sebagai *struts* pada bagian tepinya [24].



Gambar 2.20 Proses *Expansion* [24]

2.14.4 *Curing*

Dalam busa fleksibel, proses *curing* berlangsung dalam dua tahap. Tahap pertama adalah ketika reaksi gas telah berhenti dengan indikasi ketika bagian atas busa menjadi bebas tack. Tergantung pada bahan yang digunakan, dimana pada setiap periode ini dapat terjadi selama waktu yang

berbeda-beda sekitar 8–10 menit. Dalam proses *foaming* secara terus-menerus, waktu yang diperlukan bisa lebih singkat. Busa dalam bentuk balok, balok bundar dikeluarkan dan didiamkan selama 24 jam untuk tahap kedua yaitu pengawetan, selama waktu tersebut terjadi berbagai reaksi pengikatan silang lambat berlangsung dengan emisi panas karena reaksi eksotermik untuk memberikan busa kekuatan fisik terakhirnya [24]. Proses *Curing* yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Proses *Curing* [24]