

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Castor Oil*

Castor oil adalah minyak nabati yang diekstraksi dari biji tanaman jarak (*Ricinus communis*). Minyak ini memiliki sifat yang unik karena mengandung asam ricinoleat, suatu jenis asam lemak tak jenuh tunggal dengan rantai panjang yang jarang ditemukan pada minyak nabati lainnya. Asam ricinoleat memberikan sifat viskositas dan stabilitas pada minyak jarak (*castor oil*), sehingga membuatnya cocok untuk digunakan pada berbagai aplikasi industri, termasuk dalam pembuatan produk polimer seperti poliuretan. Dalam industri poliuretan, *castor oil* digunakan sebagai bahan baku untuk memproduksi polioliol, yaitu senyawa kimia dengan gugus hidroksil (-OH) yang digunakan sebagai prekursor untuk membuat poliuretan. *Castor oil* dapat diubah menjadi polioliol melalui proses oksidasi atau epoksidasi. Polioliol yang dihasilkan dari *castor oil* memiliki sifat-sifat yang unggul seperti kekuatan tekan, kekuatan tarik yang tinggi, elastisitas, dan ketahanan terhadap abrasi dan korosi. Polioliol adalah senyawa organik dengan banyak gugus hidroksil (OH) dan merupakan bahan baku penting dalam industri polimer, khususnya untuk produksi poliuretan. Proses oksidasi dan epoksidasi adalah dua metode yang dapat digunakan untuk mengubah *castor oil* menjadi polioliol [10]. Poliuretan adalah jenis polimer yang dihasilkan melalui reaksi polioliol dengan isosianat (seperti MDI atau TDI). Reaksi ini menghasilkan ikatan uretan yang membentuk jaringan polimer. Ketika produksi poliuretan busa, polioliol dari

castor oil digunakan sebagai salah satu komponen untuk menghasilkan busa dengan sifat-sifat unggul, seperti elastisitas dan kekuatan tarik tinggi. Sifat fisik dan kimia minyak jarak (*castor oil*) ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik *Castor Oil* [11]

Properties Minyak Jarak (<i>Castor Oil</i>)	Properties Minyak Jarak (<i>Castor Oil</i>)
Asam lemak bebas (%)	0,24
Densitas (kg/m ³)	962,8
Titik nyala (°C)	298
Nilai kalor (kJ/kg)	35684,5
Viskositas kinematik (mm ²)	109,53

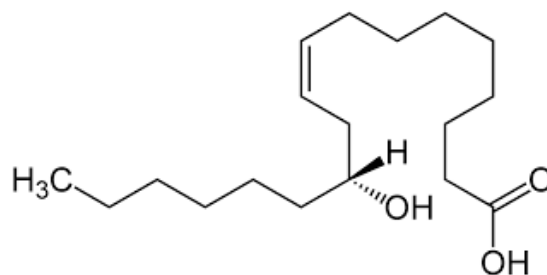
Penelitian yang dilakukan oleh (Yusuf, et al., 2016) [12] bertujuan untuk menggunakan minyak jarak (*castor oil*) yang dimodifikasi sebagai bahan dasar dalam pembuatan poliuretan *foam*. Minyak jarak (*castor oil*) dimodifikasi melalui reaksi transesterifikasi dengan polietilen glikol, menghasilkan polioli modifikasi. Penelitian ini menggantikan sebagian besar polioli konvensional dengan polioli modifikasi *castor oil* dalam formulasi poliuretan *foam*. Peneliti menganalisis pengaruh persentase polioli modifikasi terhadap sifat-sifat *foam* yang dihasilkan, termasuk densitas, kekuatan tekan, modulus elastisitas, dan kemampuan isolasi termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan polioli modifikasi *castor oil* menghasilkan *foam* dengan sifat yang baik, termasuk peningkatan kekuatan tekan dan modulus elastisitas dibandingkan dengan *foam* yang menggunakan polioli konvensional. Selain itu, *foam* dengan polioli modifikasi juga menunjukkan

kemampuan isolasi termal yang baik. Penelitian ini memberikan wawasan tentang potensi penggunaan minyak jarak (*castor oil*) yang dimodifikasi sebagai bahan pembuatan poliuretan *foam*, yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan *foam* serta mengurangi ketergantungan pada polioli konvensional.

Penelitian yang dilakukan oleh (Wang, et al., 2008) [13] bertujuan untuk menggantikan sebagian besar atau seluruh polioli konvensional dengan *castor oil* dalam formulasi poliuretan *foam*. *Castor oil* digunakan sebagai sumber polioli alami yang ramah lingkungan dan berpotensi untuk meningkatkan sifat mekanik dan *foam*. Peneliti melakukan serangkaian eksperimen untuk mempelajari pengaruh penggunaan *castor oil* pada karakteristik *foam*, termasuk densitas, kekuatan tekan, modulus elastisitas, ketahanan panas, dan stabilitas dimensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *castor oil* dalam formulasi poliuretan *foam* dapat menghasilkan *foam* dengan sifat yang baik, termasuk peningkatan kekuatan tekan, modulus elastisitas, dan stabilitas dimensi dibandingkan dengan *foam* yang menggunakan polioli konvensional. Selain itu, *foam* dengan *castor oil* juga menunjukkan ketahanan panas yang lebih baik. Penelitian ini memberikan wawasan tentang potensi penggunaan *castor oil* sebagai bahan pembuatan poliuretan *foam* yang ramah lingkungan, mendukung pengembangan bahan alternatif yang berkelanjutan dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil.

Penelitian yang dilakukan oleh (Li, et al., 2016) [14] berjudul bertujuan untuk menggunakan polioli yang berasal dari *castor oil* yang telah dimodifikasi secara kimia sebagai salah satu komponen utama dalam pembuatan poliuretan

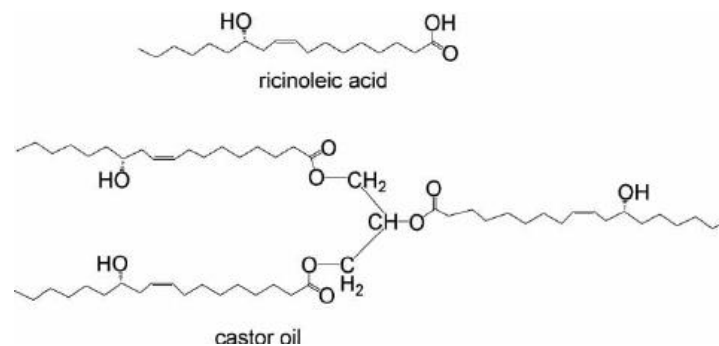
foam. *Castor oil* mengalami modifikasi kimia melalui reaksi tertentu untuk menghasilkan polioliol yang kemudian digunakan dalam formulasi poliuretan *foam*. Peneliti melakukan serangkaian eksperimen untuk mempelajari pengaruh penggunaan polioliol berbasis *castor oil* pada sifat dan kinerja poliuretan *foam* yang dihasilkan, termasuk densitas, kekuatan tekan, modulus elastisitas, kekuatan tarik, dan stabilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan polioliol berbasis *castor oil* dapat mempengaruhi sifat fisik dan mekanis poliuretan *foam*. Beberapa kasus menunjukkan peningkatan kekuatan tekan dan modulus elastisitas *foam*, sementara kasus lain menunjukkan *foam* dengan densitas yang lebih rendah. Selain itu, *foam* yang menggunakan polioliol berbasis *castor oil* juga menunjukkan stabilitas yang baik. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang potensi penggunaan *castor oil* sebagai polioliol alternatif yang ramah lingkungan dalam pembuatan poliuretan *foam*, serta memperluas aplikasi minyak nabati



Gambar 2.1 Monomer Minyak Jarak (*Castor Oil*) [15]

Monomer utama yang terkandung dalam minyak jarak (*castor oil*) adalah asam *ricinoleat* dengan rumus kimia (C₁₈H₃₄O₃). Rumus tersebut menggambarkan bahwa asam *ricinoleat* terdiri dari 18 atom karbon (C₁₈), 34 atom hidrogen (H₃₄),

dan 3 atom oksigen (O₃). Asam ricinoleat adalah asam lemak tak jenuh tunggal yang memiliki struktur kimia khusus, yaitu asam 12-hidroksi-9-octadecenoat. Asam ricinoleat merupakan komponen utama dalam minyak jarak (*castor oil*), dengan konsentrasi sekitar 85-90% dari total asam lemak dalam minyak tersebut. Asam *ricinoleat* memiliki rantai karbon panjang (18 karbon) dengan gugus hidroksil (OH) pada posisi 12, yang memberikan sifat unik pada minyak jarak (*castor oil*). Sifat ini mempengaruhi reaktivitas asam ricinoleat dan memungkinkannya untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk produksi poliuretan, surfaktan, resin, pelumas, dan produk kimia lainnya.



Gambar 2.2 Struktur Kimia *Castor Oil* dan Asam *Ricinoleat* [15]

Struktur kimia *castor oil* terdiri dari trigliserida, yang terbentuk oleh esterifikasi tiga molekul asam lemak dengan satu molekul gliserol. Struktur *castor oil* terdiri dari tiga rantai asam lemak yang terikat pada satu molekul gliserol melalui ikatan ester. Asam lemak yang paling dominan dalam *castor oil* adalah asam ricinoleat, yang umumnya ada dalam konsentrasi tinggi sekitar 85-95% dalam *castor oil*. Struktur kimia asam ricinoleat sendiri memiliki ciri khas. Rantai karbon asam ricinoleat terdiri dari 18 atom karbon dan memiliki satu ikatan

rangkap ganda (C=C) pada posisi ke-9. Di samping itu, asam ricinoleat juga memiliki gugus hidroksil (OH) pada posisi ke-12 dalam rantai karbonnya. Kedua struktur ini menunjukkan karakteristik asam lemak tak jenuh dengan adanya ikatan rangkap ganda dalam rantai karbon. Struktur ini memiliki peran penting dalam sifat dan aplikasi dari *castor oil* dan asam ricinoleat, termasuk dalam pembentukan poliuretan *foam*. Dalam sintesis poliuretan, asam ricinoleat dapat direaksikan dengan isosianat (seperti *toluena diisosianat* atau *metilendifenil diisosianat*) untuk membentuk rantai polimer poliuretan. Reaksi ini melibatkan pembentukan ikatan uretan antara gugus hidroksil pada asam ricinoleat dan gugus isosianat pada isosianat, menghasilkan struktur polimer poliuretan yang kuat dan elastis. Asam *ricinoleat* juga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam sintesis berbagai senyawa kimia lainnya, seperti ester, amida, dan produk turunan lainnya. Sifat-sifat asam ricinoleat yang unik, termasuk kelarutan, keasaman, dan stabilitas menjadikannya bahan baku yang menarik dalam berbagai industri [17].

2.2 Polyurethane Foams (PUF)

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 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 [17]. Bahan baku penting untuk *polyurethane foams* adalah poliisosianat, polioliol, *blowing agent*, katalis, dan surfaktan. Klasifikasi *polyurethane foams* ditunjukkan pada tabel 2.7 [17].

Tabel 2.2 Klasifikasi *Polyurethane Foams* [17]

<i>Poliol</i>	<i>Rigid Foam</i>	<i>Semirigid Foam</i>	<i>Flexible Foam</i>
<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
lb/in ²	>100.000	100.000-10.000	<10.000

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*. *Polyurethane foam* ialah golongan polimer selular, dimana fase gas terdistribusi ke dalam kantong-kantong yang disebut sebagai sel. Struktur sel sendiri dibedakan menjadi dua yaitu sel tertutup dan sel terbuka. Sel tertutup merupakan sel yang terpisah, sehingga

dapat membuat fase gas suatu sel tidak dapat berikatan dengan fase gas sel lain. Apabila gas suatu sel dapat berhubungan dengan dengan gas pada sel lain maka disebut sebagai 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*. Flexible PUF umumnya diaplikasikan untuk tempat tidur, furnitur, interior otomotif, *sealant*, dan lain sebagainya. Salah satu perusahaan yang memproduksi *flexible PUF* ialah Junbom group. Perusahaan tersebut memproduksi sealant untuk konstruksi bangunan dan otomotif.

2.2.1 Flexible Foam

Flexible PUF atau busa uretana fleksibel dapat diklasifikasikan berdasarkan polioliol polyester menjadi dua jenis, yaitu busa polieter dan busa polyester. Selain itu, busa ini juga dapat diklasifikasikan berdasarkan proses pembuatannya menjadi busa slabstock dan busa cetakan. Busa *slabstock* adalah jenis busa polieter konvensional yang biasa digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan fleksibilitas dan keawetan yang baik. Busa polyester sifat ketahanan tinggi (HR) memiliki kekuatan dan daya tahan yang lebih tinggi, sedangkan busa viskoelastik umumnya digunakan dalam produk-produk yang memerlukan penyerapan energi yang baik. Ada juga jenis busa super lembut

yang memberikan kenyamanan ekstra, serta busa semifleksibel dan polyester fleksibel. Di sisi lain, busa cetakan dibagi menjadi dua jenis, yaitu busa cetakan panas dan busa cetakan dingin. Busa cetakan panas diproduksi melalui proses pemanasan bahan baku busa uretana dalam cetakan, sementara busa cetakan dingin dibuat dengan proses kimia yang tidak memerlukan pemanasan eksternal. Dengan berbagai jenis dan klasifikasi ini, *flexible* PUF atau busa uretana fleksibel dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti industri otomotif, perabotan, peralatan olahraga, dan banyak lagi, tergantung pada kebutuhan dan sifat-sifat spesifik yang diperlukan.

Tabel 2.3 Data Teknis *Sealant* [18]

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>CuttingTime (hour)</i>	$\geq 0,8$
<i>Temperature Resistance</i>	$-40^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$
<i>Colour</i>	Putih
<i>Compressive Strength (kPa)</i>	> 180
<i>Adhesive Strength (kPa)</i>	> 120
<i>Tensile Strength (kPa)</i>	> 30

Tabel 2.4 Sifat Mekanik dari *Flexible* PUF [18]

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Density (kg/m³)</i>	49–52
<i>25% Indentation hardness (kPa)</i>	2,7–3
<i>65% Indentation hardness (kPa)</i>	5,3–5,9

<i>Tensile Strength</i> (kPa)	95–105,3
<i>Tensile Strength</i> (N/cm)	6–7

Junbom Group adalah salah satu perusahaan yang memproduksi *flexible* PUF atau busa uretana fleksibel. Perusahaan ini terkenal karena menghasilkan berbagai jenis sealant yang digunakan dalam industri konstruksi bangunan dan otomotif. Sealant yang diproduksi oleh Junbom Group digunakan untuk berbagai tujuan, termasuk mengisi celah, melindungi dari kebocoran, dan memberikan isolasi suara. Dalam industri konstruksi bangunan, *sealant flexible* PUF dapat digunakan untuk mengisi celah antara material yang berbeda, seperti kaca dan logam, beton dan kayu, serta dinding dan atap. *Sealant* ini membantu mencegah kebocoran air, udara, dan debu, serta memberikan isolasi termal yang baik untuk mengurangi transfer panas dan suara antara ruangan. Di industri otomotif, *sealant flexible* PUF digunakan untuk memperbaiki, melindungi, dan mengisolasi bagian-bagian kendaraan. Mereka membantu mencegah kebocoran air, angin, dan debu, serta memberikan perlindungan terhadap getaran dan kebisingan. *Sealant* juga digunakan dalam proses manufaktur otomotif untuk menyatukan dan mengisi celah antara komponen-komponen kendaraan. Junbom Group sebagai produsen *flexible* PUF dan *sealant* telah berkomitmen untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi yang memenuhi standar industri. Dengan aplikasi yang luas dalam tempat tidur, furnitur, interior otomotif, serta konstruksi bangunan, *flexible* PUF dan *sealant* dari Junbom Group memberikan solusi

yang efektif dalam menciptakan kualitas, kenyamanan, dan keamanan dalam berbagai produk dan aplikasi [18].

2.2.2 Rigid Foam

Rigid PUF atau busa poliuretan kaku adalah jenis busa dengan struktur sel tertutup yang memiliki karakteristik unik. Salah satu keunikan dari busa ini adalah dapat dibuat pada suhu ruang tanpa perlu pemanasan tambahan. *Rigid* PUF dapat melekat pada berbagai jenis bahan, termasuk baja, kayu, resin, busa termoset, dan serat. Kepadatan *rigid* PUF dapat bervariasi dalam rentang yang luas, mulai dari 20 hingga 3000 kg/m³. Busa dengan densitas rendah cenderung memiliki sifat insulasi yang tinggi. Proses pembuatan *rigid* PUF dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti pembusaan semprot, pembusaan di tempat, pembusaan dua komponen, dan pembusaan satu komponen menggunakan uap air di udara. Penting untuk diketahui bahwa busa poliuretan kaku berperan penting dalam penghematan energi di Bumi [17]. Dengan sifat insulasi yang tinggi, *rigid* PUF membantu mengurangi transfer panas dan energi, sehingga mendukung efisiensi energi dalam berbagai aplikasi. Hal ini berdampak positif pada pengurangan konsumsi energi dan perlindungan lingkungan. *Rigid* PUF dapat diproduksi secara kontinu maupun tidak kontinu, tergantung pada metode produksi yang digunakan [19]. Kemampuan busa poliuretan kaku untuk disesuaikan dengan kebutuhan dan kepadatan yang diinginkan menjadikannya sebagai bahan yang sangat serbaguna dalam industri, seperti konstruksi, otomotif, dan manufaktur lainnya.

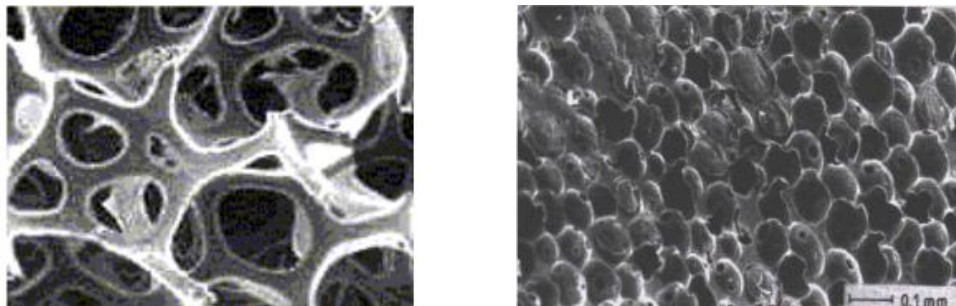
Rigid PUF atau busa poliuretan kaku umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi isolasi. Beberapa contoh penggunaan *rigid* PUF meliputi lemari es, freezer, gudang berpendingin, bangunan dan konstruksi, pabrik kimia dan petrokimia, serta kotak es portabel. Salah satu perusahaan yang terkenal dalam memproduksi *rigid* PUF adalah Alaska PUF Industri. Perusahaan ini mengkhususkan diri dalam pembuatan bagian pipa yang terbuat dari busa poliuretan kaku, seperti bagian *step cut* dan *quarter pipe*. Bagian-bagian ini digunakan dalam sistem pipa untuk memberikan isolasi termal yang efektif, mengurangi kebocoran panas, dan menjaga suhu yang diinginkan. Svarn Infratel Pvt. Ltd. juga merupakan perusahaan yang memproduksi *rigid* PUF, khususnya *Insulated PUF Slabs*. *Slab* PUF yang dihasilkan oleh perusahaan ini digunakan dalam berbagai aplikasi isolasi termal, termasuk dalam konstruksi bangunan dan industri lainnya. *Slab* PUF memberikan lapisan isolasi termal yang kuat dan efisien, membantu menjaga suhu yang stabil dan mengurangi transfer panas. Kedua perusahaan, Alaska PUF Industri dan Svarn Infratel Pvt. Ltd., berkontribusi dalam penyediaan solusi isolasi termal yang efektif dengan menggunakan *rigid* PUF. Dalam berbagai aplikasi, *rigid* PUF membantu mengurangi konsumsi energi, meningkatkan efisiensi, dan melindungi produk dan infrastruktur dari perubahan suhu yang ekstrem [20].

Tabel 2.5 Data Teknis *Insulated PUF Rigid* [20]

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Compressive Strength</i>	1,5 – 2 Kgs/cm ²

<i>Density</i>	36 – 40 Kgs/m ³
<i>Thermal Conductivity</i>	0,016 – 0,017 W/m°C
<i>Closed Cell Content</i>	92% – 95%
<i>Working Temperature</i>	-180°C – 140°C
<i>Permeability</i>	1,6 – 2 ms/inci

Rigid PUF umumnya diaplikasikan untuk produk isolasi termal seperti lemari es, freezer, gudang berpendingin, bangunan dan konstruksi, pabrik kimia dan petrokimia, kotak es portabel, dan lain sebagainya. Salah satu perusahaan yang memproduksi *rigid* PUF ialah Alaska PUF Industri, Svarn Infratel Pvt. Ltd., dan lain sebagainya. Perusahaan Alaska memproduksi bagian pipa seperti bagaian step cut, dan quarter pipe [20].



(a)

(b)

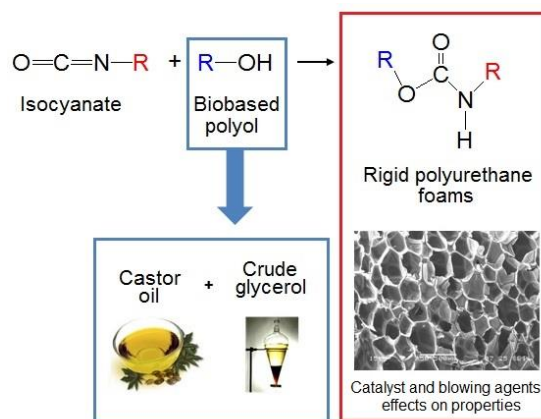
Gambar 2.3 Struktur Sel (a) Terbuka (b) Tertutup [20]

Busa poliuretan adalah bahan yang terbuat dari polimer poliuretan yang dapat dibedakan menjadi tiga jenis utama: busa poliuretan *rigid*, *semi-rigid*, dan *flexible*. Busa poliuretan *rigid* memiliki struktur yang kaku dan densitas tinggi, memberikan kekuatan mekanik yang tinggi serta stabilitas dimensional yang baik.

Hal ini membuatnya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan struktur yang kuat, seperti isolasi termal dan akustik, pelapisan pada dinding, panel dinding, dan bahan isolasi dalam industri konstruksi. Di sisi lain, busa poliuretan *semi-rigid* menawarkan kekakuan setengah kaku dengan daya tahan yang baik serta kemampuan untuk menyerap kejutan dan getaran. Ini menjadikannya pilihan yang baik untuk pelindung dampak pada kendaraan, bahan isolasi dalam industri konstruksi, dan komponen struktural pada peralatan olahraga. Sementara itu, busa poliuretan fleksibel sangat lentur dan memiliki densitas yang lebih rendah, memberikan kelembutan dan kenyamanan yang baik. Busa poliuretan fleksibel dapat menyesuaikan bentuk tubuh dan memberikan dukungan yang optimal. Kelebihan lainnya termasuk kemampuan penyerapan energi yang baik dan isolasi suara yang efektif. Oleh karena itu, busa poliuretan fleksibel sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kenyamanan dan penyerapan dampak, seperti bantal, kasur, perabotan, alas kaki, dan penyekat suara. Dalam menentukan jenis busa poliuretan berdasarkan kuat tekan, densitas, dan struktur mikro, beberapa faktor penting harus diperhatikan. Busa poliuretan *rigid* memiliki densitas yang lebih tinggi dan tingkat kekakuan yang besar, sedangkan busa poliuretan *semi-rigid* memiliki tingkat kekakuan yang lebih rendah. Sementara itu, busa poliuretan fleksibel memiliki densitas yang lebih rendah dan tingkat kelembutan yang besar. Dalam hal struktur mikro, busa poliuretan *rigid* memiliki sel-sel yang lebih besar dan teratur, sedangkan busa poliuretan fleksibel memiliki sel-sel yang lebih kecil dan tidak teratur. Dalam memilih jenis busa poliuretan yang tepat untuk aplikasi

tertentu, perlu mempertimbangkan sifat-sifat fisik yang diinginkan, termasuk kekakuan, densitas, dan kemampuan penyerapan.

Mekanisme pembentukan poliuretan dari monomer *castor oil* melibatkan reaksi antara monomer asam *ricinoleat* dengan isosianat untuk membentuk rantai polimer poliuretan. Proses ini melibatkan beberapa tahap reaksi yang melibatkan gugus isosianat (-NCO) pada isosianat dan gugus hidroksil (-OH) pada asam *ricinoleat*. Tahap prepolymerisasi, isosianat (misalnya, toluena diisosianat atau metilendifenil diisosianat) direaksikan dengan asam *ricinoleat* untuk membentuk prepolymer, yang memiliki gugus isosianat yang belum bereaksi. Prepolymer ini dibuat dengan mempertahankan kelebihan gugus isosianat dalam reaksi, sehingga prepolymer memiliki gugus isosianat yang dapat bereaksi lebih lanjut dengan polioliol.



Gambar 2.4 Poliuretan *Foam* Minyak Jarak (*Castor Oil*) [21]

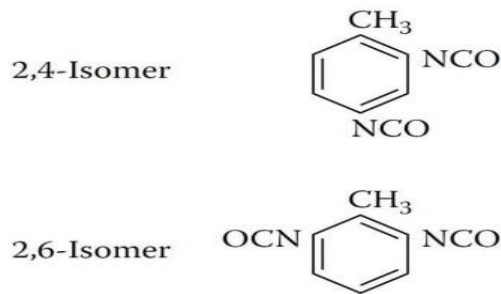
Tahap reaksi busa, prepolymer yang dihasilkan kemudian dicampur dengan polioliol, seperti polioliol yang berasal dari minyak nabati lainnya atau polioliol terbarukan lainnya, yang berfungsi sebagai *crosslinker*. Gugus isosianat pada

prepolimer bereaksi dengan gugus hidroksil pada poliol dalam reaksi uretan, membentuk ikatan polimer yang kuat dan elastis. Reaksi ini menghasilkan pembentukan rantai poliuretan yang panjang. Tahap pembentukan busa, selama reaksi uretan terjadi, juga ditambahkan agen pengembang busa seperti air atau bahan kimia pengembang fisik (seperti *cyclopentane* atau *n-pentane*). Agen pengembang ini menghasilkan gas (misalnya, karbon dioksida atau gas teruap), yang membentuk gelembung di dalam polimer. Gelembung ini menghasilkan struktur pori yang menghasilkan sifat busa pada poliuretan. Agen pengembang fisik menghasilkan gelembung yang lebih kecil dibandingkan dengan agen pengembang kimia, yang menghasilkan struktur sel yang lebih kecil dalam busa poliuretan. Dalam sintesis poliuretan busa dari monomer *castor oil*, kelebihan gugus isosianat dalam prepolimer dan penggunaan agen pengembang busa mempengaruhi ukuran sel, densitas, kekuatan, dan sifat isolasi termal busa poliuretan yang dihasilkan [21].

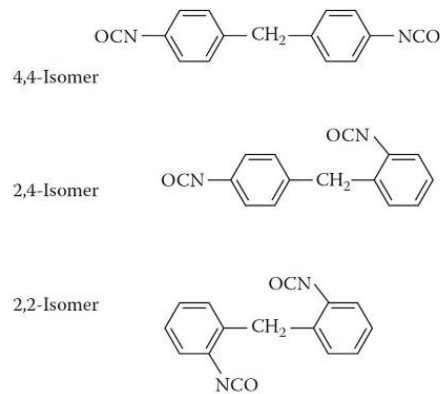
2.3 Isosianat

Isosianat alifatik tidak digunakan dalam pembuatan *foam* dikarenakan reaksi *foaming* memerlukan reaktivitas yang tinggi, dan poliisosianat alifatik bereaksi lambat dengan gugus OH, sehingga poliisosianat aromatik yang digunakan untuk pembuatan busa berbasis isosianat. Poliisosianat utama yang digunakan adalah toluena diisosianat (TDI) dan difenilmetana diisosianat (MDI) dalam tipe oligomer. TDI dengan rasio isomer 80/20 digunakan terutama untuk busa fleksibel. TDI yang dimodifikasi dan TDI yang tidak disuling sebagian besar

digunakan untuk busa uretana *flexible* dan sebagian untuk busa semi *flexible*. MDI polimer digunakan untuk busa uretana kaku dan semi kaku, serta busa poliisosianurat [17].



Gambar 2.5 Struktur Kimia TDI [17]



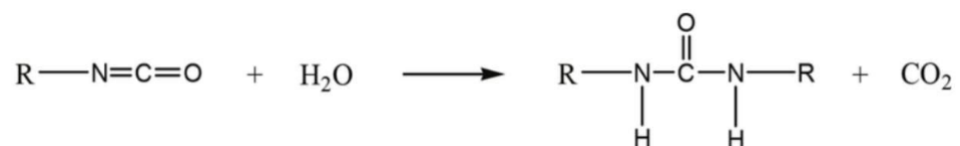
Gambar 2.6 Struktur Kimia MDI [17]

MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*) dan TDI (*Toluene Diisocyanate*) adalah dua jenis diisocyanate yang digunakan dalam produksi poliuretan. MDI terdiri dari dua unit *fenil diisocyanate* yang terhubung melalui gugus metilen, sementara TDI terdiri dari dua unit *toluene diisocyanate* yang terhubung melalui gugus metilen. MDI lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan tahan panas, kekuatan mekanik yang tinggi, dan ketahanan terhadap hidrolisis. Sementara itu, TDI lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan busa dengan sifat elastis yang

lebih baik dan memiliki reaktivitas yang tinggi untuk proses produksi yang cepat dan efisien. Kedua bahan ini digunakan dalam berbagai industri seperti busa, elastomer, cat, adhesive.

2.4 *Blowing Agent*

Blowing agent sangat penting dalam pembuatan *polyurethane foams* terdapat dua jenis *blowing agent* yaitu *chemical blowing agents* dan *physical blowing agents*. *Chemical blowing agents* merupakan reaksi senyawa kimia dengan gugus isosianat untuk menghasilkan gas karbon dioksida [17]. *Physical blowing agents* menggunakan cairan yang memiliki titik didih rendah dan tidak reaktif terhadap gugus isosianat. Pada *physical blowing agents* terdiri dari senyawa yang mengandung fluor seperti hidrokarbon C5, azeotrop dengan atau tanpa halogen, dan karbon dioksida cair [17]. Berdasarkan patent Kim Roland bahan khas yang digunakan ialah air, hal ini dikarenakan apabila air bereaksi dengan isosianat akan menghasilkan gas CO₂ sehingga membuat busa dapat mengembang dan membentuk pori [22]. Berikut ini merupakan reaksi antara air dengan isosianat [23].



Gambar 2.7 Reaksi Antara Isosianat Dengan Air [23].

Penelitian yang dilakukan oleh (Thirumal, et al., 2018) bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh kandungan air (*water content*) terhadap sifat-sifat *foam*

poliuretan kaku. Penelitian ini melibatkan analisis sifat-sifat *foam* seperti densitas, kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan stabilitas dimensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kandungan air dapat mempengaruhi sifat-sifat *foam*, termasuk penurunan densitas, peningkatan kekuatan tarik, dan perubahan stabilitas dimensi. Penelitian yang dilakukan oleh (Singh, et al., 2007) [24] bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kandungan air terhadap struktur dan sifat-sifat *foam* poliuretan. Penelitian ini melibatkan analisis mikroskopis dan sifat-sifat *foam* seperti densitas, kekuatan mekanik, dan konduktivitas termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kandungan air dapat mempengaruhi struktur sel dan sifat-sifat termal *foam*, serta dapat menghasilkan *foam* dengan kepadatan yang lebih rendah dan konduktivitas termal yang lebih baik. Penelitian yang dilakukan oleh (Prociak, et al., 2018) [25] fokus pada pengaruh kandungan air terhadap sifat-sifat *foam* poliuretan kaku yang disiapkan dari *polyol* dengan berat molekul yang berbeda. Penelitian ini melibatkan analisis sifat-sifat *foam* seperti densitas, kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan stabilitas dimensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kandungan air dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanik dan termal *foam*, dan pengaruhnya juga tergantung pada berat molekul *polyol* yang digunakan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Yuan, et al., 2009) [26] menginvestigasi pengaruh kandungan air terhadap sifat-sifat *foam* poliuretan kaku berdasarkan *polyol* dengan nilai hidroksil yang berbeda. Penelitian ini melibatkan analisis sifat-sifat *foam* seperti densitas, kekuatan mekanik, stabilitas dimensi, dan konduktivitas termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan air dapat

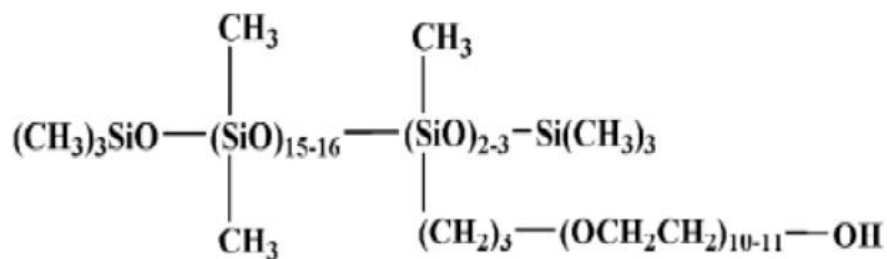
mempengaruhi sifat-sifat *foam*, termasuk peningkatan densitas, penurunan kekuatan mekanik, dan perubahan konduktivitas termal. Penelitian yang dilakukan oleh (Liu, et al., 2023) [27] bertujuan untuk menganalisis pengaruh kandungan air terhadap sifat-sifat mekanik *foam* poliuretan kaku. Penelitian ini melibatkan analisis sifat-sifat *foam* seperti kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan modulus elastisitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kandungan air dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanik *foam* dan dapat meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitasnya.

2.5 Surfaktan Silikon

Surfaktan yang umumnya digunakan merupakan surfaktan silikon, dikarenakan pada tahun 1958 surfaktan silikon sudah menjadi produk komersial [17]. Berikut ini merupakan fungsi dari surfaktan silikon diantaranya ialah untuk mengurangi tegangan permukaan agar afinitas kimia dengan polioliol dapat meningkat. Mencampur komponen-komponen yang saling tidak larut. Memberikan kontrol ukuran sel melalui sel-sel halus yang homogen. Memperbaiki penampilan struktur sel. Memberikan kerusakan gelembung pada saat busa mengembang penuh, apabila tindakan ini tidak terjadi, busa akan menyusut selama proses curing. Melawan efek deformasi dari setiap padatan yang ditambahkan ke sistem reaksi. Menghasilkan tipe struktur sel yang diinginkan baik sel terbuka maupun tertutup [28].

Surfaktan merupakan bahan aktif permukaan, dimana pada bahan tersebut terdapat molekul yang mengandung gugus hidrofilik (suka air) dan

lipofilik (suka minyak/lemak) dalam molekul yang sama, oleh karena itu surfaktan ini dapat menyatukan campuran air dan minyak. Struktur surfaktan silikon dapat dilihat pada gambar 2.8. Molekul surfaktan yang hidrofilik bersifat polar dan molekul lipofilik bersifat *non-polar*. Bagian *non-polar* merupakan rantai alkil yang panjang, sedangkan bagian polar mengandung gugus hidroksil. Adanya gugus hidrofobik dan hidrofilik yang terdapat dalam suatu molekul menyebabkan distribusi surfaktan cenderung ada pada antarmuka antara fasa dengan derajat kepolaran yang berbeda dan ikatan hidrogen seperti minyak dengan air atau udara dengan air. Terbentuknya film ini pada antar muka dapat mengurangi energi antar muka dan menyebabkan sifat karakteristik dari molekul surfaktan. Berdasarkan muatannya, surfaktan dibagi menjadi empat kelompok diantaranya surfaktan anionik, surfaktan kationik, surfaktan nonionik, dan surfaktan amfoter [29].



Gambar 2.8 Struktur Kimia Surfaktan Silikon [30]

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Lim, et al., 2008) [31], berbagai jenis surfaktan silikon ditambahkan ke dalam formulasi poliuretan *foam*, dan sifat-sifat *foam* tersebut dievaluasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan surfaktan silikon dapat meningkatkan stabilitas busa, mencegah koalesensi sel, dan menghasilkan *foam* dengan distribusi sel yang lebih merata. Selain itu,

penambahan surfaktan silikon juga dapat meningkatkan kekuatan tekan dan modulus elastisitas *foam*, sehingga meningkatkan sifat mekanis *foam* secara keseluruhan. Penelitian yang dilakukan oleh (Han, et al, 2009) [32] juga menyelidiki efek surfaktan silikon pada sifat-sifat poliuretan *foam* kaku. Penelitian ini menemukan bahwa penambahan surfaktan silikon dapat meningkatkan stabilitas busa dan menghasilkan *foam* dengan densitas yang lebih rendah. *Surfactan* silikon juga dapat mengoptimalkan distribusi sel, mengurangi ukuran sel rata-rata, dan menghasilkan *foam* dengan morfologi sel yang lebih homogen. Selain itu, penambahan surfaktan silikon juga dapat meningkatkan kekuatan tekan dan modulus elastisitas *foam*.

2.6 Proses *Foaming*

2.6.1 *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. [28]. Dalam proses produksi busa poliuretan, pencampuran bahan-bahan menjadi tahap yang sangat penting. Pencampuran yang baik dan homogen dari bahan-bahan merupakan kunci untuk menghasilkan busa

berkualitas tinggi dengan struktur sel yang halus dan konsisten. Proses pencampuran dimulai dengan menggabungkan bahan-bahan utama, yaitu polioliol dan *diisocyanate*, menggunakan sebuah *mixing head*. *Mixing head* ini berperan dalam mencampurkan bahan-bahan secara berurutan dan merata sehingga terbentuk campuran yang homogen. Homogenitas campuran ini sangat penting karena akan mempengaruhi sifat fisik dan kualitas akhir dari busa poliuretan yang dihasilkan. Untuk mencapai campuran yang homogen, penggunaan surfaktan silikon menjadi sangat penting. Surfaktan silikon adalah bahan tambahan yang ditambahkan ke dalam campuran untuk menurunkan tegangan permukaan polioliol. Dengan menurunkan tegangan permukaan, surfaktan silikon memungkinkan cairan polioliol dan *diisocyanate* untuk mencampur dengan lebih baik, merata, dan homogen. Ini penting karena perbedaan tegangan permukaan antara polioliol dan *diisocyanate* dapat menyebabkan kebocoran udara, retaknya sel-sel busa, dan ketidaksempurnaan struktur sel. Dengan adanya surfaktan silikon, campuran cairan polioliol dan *diisocyanate* dapat merespon dengan baik terhadap pengocokan dan perluasan yang terjadi selama proses pembentukan busa. Surfaktan silikon membantu menghasilkan busa dengan struktur sel yang halus, seragam, dan konsisten. Selain itu, surfaktan silikon juga dapat memberikan sifat tambahan seperti peningkatan kekuatan, ketahanan terhadap kelembaban, dan stabilitas dimensional. Dalam kesimpulannya, proses pencampuran yang baik dan homogen sangat penting dalam produksi busa poliuretan. Penggunaan surfaktan silikon memainkan peran penting

dalam mencapai campuran yang homogen dan menghasilkan busa berkualitas tinggi dengan struktur sel yang halus dan seragam.

2.6.2 Nucleation

Selama proses *mixing* terdapat gelembung udara, hal ini dapat bertindak sebagai titik nukleasi untuk gas yang mengembang. 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* [28].

Selama proses pencampuran bahan-bahan dalam produksi busa poliuretan, gelembung udara seringkali terbentuk dalam campuran cairan. Gelembung udara ini dapat berperan sebagai titik nukleasi untuk pembentukan gas yang akan mengembang dan membentuk struktur sel dalam busa poliuretan. Pada metode pencetakan menggunakan *box* dan peralatan sederhana, kontrol terhadap jumlah gelembung udara atau ukuran sel yang diinginkan mungkin tidak selalu dapat dilakukan secara presisi.

Namun, dalam metode produksi busa poliuretan dengan menggunakan mesin slabstock kontinu, ada beberapa langkah yang dapat diambil untuk memastikan bahwa ada titik awal pembentukan busa yang cukup untuk mencapai ukuran sel yang terkontrol dan seragam sesuai yang diinginkan. Setelah campuran cairan polioliol dan *diisocyanate* dikombinasikan dalam proses *mixing*, waktu yang diperlukan hingga perubahan penampilan campuran tersebut disebut sebagai *cream time*. Pada awalnya, campuran cairan akan memiliki penampilan yang disebut sebagai "*creamy*". Setelah sekitar 10 detik, gas peniup seperti karbon dioksida dan bahan peniup tambahan akan mulai berdifusi ke dalam gelembung udara kecil yang terbentuk selama proses *mixing*. Gas-gas ini kemudian akan memperbesar gelembung tersebut, yang pada gilirannya akan membentuk struktur sel dalam busa poliuretan. Dengan mengontrol waktu *cream time*, operator dapat memastikan bahwa ada jumlah gas peniup yang cukup dan distribusinya merata dalam campuran cairan. Hal ini memungkinkan pembentukan struktur sel yang seragam dan terkontrol saat busa mengembang. Proses ini mempengaruhi ukuran, kepadatan, dan sifat fisik lainnya dari busa poliuretan yang dihasilkan.



Gambar 2.9 Gelembung Udara Pada Proses *Nucleation* [28]

Dalam penelitian dan pengembangan busa poliuretan, faktor-faktor seperti komposisi bahan, proporsi bahan, kondisi pencampuran, dan waktu *cream time* dapat disesuaikan untuk mencapai ukuran sel yang diinginkan dan sifat fisik yang optimal. Tujuan akhirnya adalah menghasilkan busa poliuretan dengan struktur sel yang halus, seragam, dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Dalam kesimpulannya, kontrol terhadap pembentukan gelembung udara dan waktu *cream time* memainkan peran penting dalam mencapai ukuran sel yang terkontrol dan seragam dalam produksi busa poliuretan. Dengan penggunaan teknik dan parameter yang tepat, hasil akhir busa poliuretan dapat memenuhi persyaratan kualitas yang diinginkan untuk aplikasi yang berbeda.

2.6.3 *Expansion*

Semakin banyak gas yang dihasilkan, gelembung mengembang dan busa mulai mengembang. 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 (Defonseka, 2013).



Gambar 2.10 Proses *Expansion* [28]

Proses pembentukan busa poliuretan dimulai dengan pencampuran bahan-bahan yang menghasilkan gas-gas peniup. Saat reaksi polimerisasi terjadi setelah pencampuran, gas-gas ini mulai menghasilkan gelembung udara yang menyebabkan busa mulai mengembang. Semakin banyak gas yang dihasilkan, semakin banyak gelembung yang terbentuk. Pada tahap ini, surfaktan silikon memainkan peran penting. Surfaktan ini digunakan untuk menstabilkan gelembung dan mencegahnya menyatu. Jika tidak menggunakan surfaktan, gelembung dapat menggabungkan dan menyebabkan runtuhnya struktur busa. Dengan adanya surfaktan silikon, gelembung tetap terpisah dan mempertahankan kestabilannya. Selama proses pengembangan busa, gelembung terus mengembang hingga mencapai ukuran yang diinginkan. Pada saat ini, reaksi gas berhenti dan massa busa mencapai sekitar 30-50 kali volume cairan asli. Bagian polimer dari busa mulai membentuk gel dalam bentuk sel berisi gas. Sel-sel ini memiliki dinding yang terdiri dari polimer dengan ketebalan yang bervariasi. Dinding sel yang tipis disebut sebagai struts, sedangkan bagian tepi sel yang lebih tebal disebut sebagai strut junctions. Struts dan strut

junctions ini membentuk struktur mikro busa poliuretan dengan sel-sel yang teratur. Struktur mikro busa, termasuk ukuran dan distribusi sel, memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat fisik busa poliuretan. Ukuran sel yang lebih kecil dan distribusi yang seragam cenderung menghasilkan busa dengan kepadatan yang lebih tinggi dan sifat mekanik yang lebih baik. Selain itu, struktur mikro yang baik dengan struts dan strut junctions yang terbentuk dengan baik juga memberikan kekuatan dan stabilitas yang lebih baik pada busa. Dalam aplikasi industri, busa poliuretan dengan struktur mikro yang berbeda digunakan untuk berbagai tujuan. Busa poliuretan *rigid* dengan struktur sel yang padat digunakan untuk isolasi termal dan akustik, serta dalam pembuatan komponen struktural. Busa poliuretan *semi-rigid* dengan struktur sel yang lebih terbuka digunakan sebagai bahan pelindung dampak pada kendaraan dan peralatan olahraga. Sementara itu, busa poliuretan fleksibel dengan struktur sel yang sangat terbuka digunakan dalam pembuatan bantal, kasur, dan perabotan yang membutuhkan kenyamanan dan penyerapan dampak. Dalam produksi busa poliuretan, pemilihan jenis surfaktan, pengendalian reaksi, dan pengaturan waktu *cream time* menjadi faktor penting untuk mencapai struktur mikro yang diinginkan. Proses ini memastikan bahwa busa poliuretan yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik, sifat fisik yang sesuai, dan performa yang memenuhi kebutuhan aplikasi yang berbeda.

2.6.4 *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 [28].



Gambar 2.11 Proses *Curing* [28]

Dalam proses pembuatan busa poliuretan fleksibel, proses curing atau pengerasan terjadi dalam dua tahap. Tahap pertama adalah ketika reaksi gas berhenti, dan ini dapat diindikasikan oleh busa yang tidak lagi lengket saat disentuh. Lamanya tahap ini tergantung pada bahan yang digunakan dan dapat bervariasi antara 8 hingga 10 menit, tergantung pada

formulasi dan kondisi proses produksi. Dalam proses *foaming* secara terus-menerus, waktu yang diperlukan untuk tahap ini biasanya lebih singkat. Setelah tahap pertama selesai, busa dalam bentuk balok atau bentuk lainnya dikeluarkan dari mesin dan dibiarkan diam selama 24 jam untuk tahap kedua, yaitu pengawetan. Pada tahap ini, berbagai reaksi pengikatan silang lambat terjadi dalam busa. Reaksi ini membutuhkan waktu lebih lama dan berlangsung secara alami. Selama tahap pengawetan, juga terjadi emisi panas akibat reaksi eksotermik, yaitu reaksi kimia yang menghasilkan panas sebagai produk sampingan. Emisi panas ini membantu dalam proses pengerasan dan memberikan busa kekuatan fisik akhir. Selama periode pengawetan selama 24 jam, busa mengalami berbagai perubahan struktural dan kimia yang menyebabkan pengerasan dan pengembangan kekuatannya. Reaksi pengikatan silang terjadi antara rantai polimer poliuretan, yang menghasilkan jaringan yang lebih kuat dan lebih stabil. Selama proses ini, panas yang dihasilkan oleh reaksi eksotermik membantu dalam pengerasan busa dan memungkinkan busa mencapai kekuatan dan kestabilan yang dibutuhkan untuk aplikasi yang diinginkan. Proses *curing* dalam dua tahap ini sangat penting dalam pembuatan busa poliuretan fleksibel. Tahap pertama memungkinkan reaksi gas berhenti dan busa mencapai keadaan yang tidak lengket. Tahap kedua, yaitu pengawetan, memungkinkan reaksi pengikatan silang lambat terjadi dan memberikan busa kekuatan fisik akhirnya. Waktu yang diperlukan dalam proses pengawetan dapat bervariasi tergantung pada ukuran dan

ketebalan busa, serta formulasi bahan yang digunakan. Setelah tahap *curing* selesai, busa poliuretan fleksibel siap digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pembuatan bantal, kasur, perabotan, dan produk-produk yang membutuhkan kenyamanan dan penyerapan dampak. Proses *curing* yang tepat adalah kunci untuk menghasilkan busa poliuretan fleksibel dengan sifat fisik yang diinginkan, termasuk kekuatan, elastisitas, dan stabilitas yang baik.

2.7 Pengujian Tekan

Pengujian kuat tekan menggunakan ASTM D1621 adalah sebuah metode standar yang diterbitkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) yang menggambarkan prosedur untuk menentukan sifat-sifat mekanis kompresi atau kuat tekan (*compressive properties*) dari bahan plastik seluler yang kaku. Metode pengujian ini umumnya digunakan untuk karakterisasi dan evaluasi material busa polimer atau bahan isolasi lainnya yang memiliki sifat-sifat mekanis penting dalam berbagai aplikasi industri. ASTM D1621 memberikan panduan tentang bagaimana melakukan pengujian kuat tekan dengan cara yang konsisten dan dapat diandalkan, sehingga hasilnya dapat dibandingkan di berbagai laboratorium dan industri yang berbeda. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi daya tahan suatu material terhadap gaya tekan atau kompresi dan memperoleh parameter-parameter penting seperti kuat tekan maksimum, modulus elastisitas, dan deformasi patah.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan dari PU *foam* yang telah dibuat. Pengujian ini menggunakan ASTM D1621 yang mana sampel dipotong dengan dimensi 20 mm x 20 mm x 20 mm. Alat yang digunakan pada pengujian ini ialah *Universal Testing Machine* INSTRON 5982. Berdasarkan ASTM D1621 pengujian ini diawali dengan mengukur sampel yang akan diuji, dimana ukuran minimal sampel ialah 0,5 inci, kemudian mengatur alat uji dengan kuat tekan sebesar $0,17 \pm 0,03$ Kpa, kemudian sampel ditaruh di alat uji, lalu dilakukan pengujian dan dicatat hasil pengujian berupa kekuatan kompresi, regangan pada kekuatan tekan [33].

Prosedur pengujian tekan umumnya melibatkan penerapan beban secara perlahan atau bertahap pada sampel material. Sampel material ditempatkan di antara dua plat uji yang datar atau cembung. Beban diterapkan dengan menggunakan mesin uji tekan, yang menghasilkan gaya yang bekerja pada sampel. Selama pengujian, data seperti gaya dan deformasi diukur dan direkam. Pengujian tekan dapat dilakukan dalam berbagai kondisi, termasuk pengujian statis (tekanan konstan diterapkan pada kecepatan yang lambat) atau pengujian dinamis (tekanan yang berfluktuasi diterapkan pada kecepatan tinggi). Metode pengujian juga dapat bervariasi tergantung pada jenis material yang diuji dan tujuan pengujian. Hasil dari pengujian tekan dapat memberikan informasi penting tentang sifat mekanis material, seperti kekuatan material, kekakuan (modulus elastisitas), karakteristik deformasi (seperti perubahan dimensi, regangan, atau *strain*), serta perilaku material di bawah beban aksial. Data ini dapat digunakan untuk membandingkan material, memvalidasi kualitas produksi, mengembangkan

model peramalan, atau untuk tujuan desain dan penggunaan material yang optimal. Pengujian tekan digunakan secara luas dalam berbagai industri, termasuk manufaktur, konstruksi, otomotif, dan rekayasa material. Standar pengujian yang diakui secara internasional telah dikembangkan untuk berbagai jenis material dan pengujian tekan, dan peralatan pengujian tekan yang sesuai harus digunakan untuk memastikan konsistensi dan akurasi hasil pengujian [34].



Gambar 2.12 Pengujian Tekan [34].

2.8 Pengujian Densitas

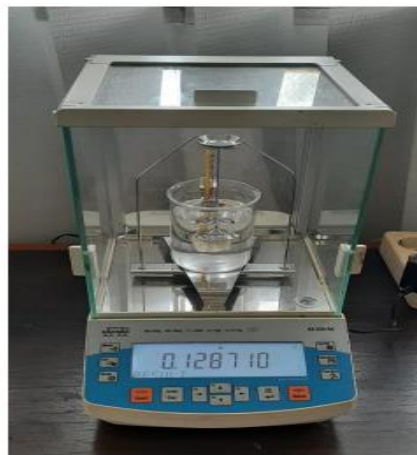
Pengujian densitas menggunakan ASTM D1621 adalah metode standar yang diterbitkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) yang menggambarkan prosedur untuk menentukan densitas atau berat jenis dari bahan plastik seluler yang kaku, seperti busa polimer atau bahan isolasi. Metode pengujian ini dirancang untuk memberikan hasil yang konsisten dan dapat diandalkan dalam menentukan densitas material. Dalam ASTM D1621, densitas didefinisikan sebagai massa per unit volume (massa dibagi oleh volume) dan biasanya dinyatakan dalam satuan gram per sentimeter kubik (g/cm^3) atau

kilogram per meter kubik (kg/m³). Pengujian ini dilakukan karena densitas digunakan sebagai acuan dasar untuk parameter lain, hal ini dikarenakan jika densitas *foam* semakin besar maka rongga yang dimiliki *foam* akan semakin mengecil, dan jika rongga semakin kecil maka *foam* akan memiliki nilai kekuatan yang tinggi. Pengujian densitas ini menggunakan standar ASTM D1622 dengan ukuran sampel yang akan diuji sebesar 20 mm x 20 mm x 20 mm. Berdasarkan ASTM D1622 pengujian ini diawali dengan mengukur temperatur air, menimbang berat sampel di udara tanpa air, kawat, maupun pemberat, dan dicatat nilainya sebagai a. Kemudian memasang bejana pencelupan pada penyangga, dan merendam sampel secara keseluruhan didalam air dengan temperatur 23 ± 2°C, kemudian menghilangkan semua gelembung yang menempel pada sampel, kawat, atau pemberat, biasanya gelembung ini bisa dihilangkan dengan menggosoknya dengan kawat lain. Kemudian mencatat massa semu ini sebagai b (massa benda uji, pemberat jika digunakan, dan kawat yang terendam sebagian dalam cairan), lalu menimbang kawat dan pemberat (jika digunakan) di dalam air dengan kedalaman 37 yang sama seperti yang digunakan pada langkah sebelumnya dan dicatat sebagai w (massa kawat dalam cairan). Kemudian dilakukan perhitungan dengan cara berikut [35].

$$Sp_{gr\ 23/23^{\circ}C} = a / (a + w - b) \dots \dots \dots (1)$$

Prosedur pengujian densitas dapat bervariasi tergantung pada jenis material yang diuji. Pengujian densitas dapat dilakukan pada berbagai jenis material, termasuk padatan, cairan, atau gas. Hasil pengujian densitas dapat digunakan untuk membandingkan material, memverifikasi keaslian atau kualitas suatu

produk, mengontrol kualitas produksi, atau dalam perhitungan dan analisis teknik lainnya. Penting untuk mengikuti metode dan standar pengujian yang relevan, seperti yang diterbitkan oleh organisasi seperti ASTM International atau ISO, untuk memastikan keakuratan dan konsistensi hasil pengujian densitas. Pengujian densitas pada poliuretan *foam* adalah metode yang digunakan untuk mengukur massa per unit volume dari busa poliuretan. Densitas busa poliuretan adalah faktor penting dalam menentukan sifat mekanis, termal, dan akustiknya [36].



Gambar 2.13 Pengujian Densitas [36]

2.9 Pengujian FTIR

Pengujian FTIR (*Fourier Transform Infrared*) menggunakan ASTM E1252 adalah metode standar yang diterbitkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) yang menggambarkan prosedur untuk melakukan analisis spektroskopi inframerah *Fourier Transform* pada material padat. Metode ini dikenal sebagai *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan sering digunakan untuk mengidentifikasi komponen kimia dari suatu sampel berdasarkan pola pita gelombang inframerah yang dihasilkan oleh sampel tersebut. Analisa

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) dilakukan untuk mengetahui keberadaan gugus molekul yang terdapat dalam sampel. Pada pengujian ini sampel dapat berupa bahan padat ataupun cairan dengan kondisi siap uji. Pada pengujian ini menggunakan standar ASTM E1252 yang mana sampel dipotong dengan dimensi 0,5 cm x 0,5 cm x 0,5 cm. Alat yang digunakan dalam 38 pengujian ini ialah IR Prestige-21, shimadzu. Berdasarkan ASTM E1252 pengujian ini diawali dengan menembakkan Cahaya, kemudian masuk ke interferometer yang bertujuan membawa sinar ke sampel, kemudian berkas sinar memasuki bagian sampel, dimana berkas ditransmisikan dari permukaan sampel lalu, berkas cahaya akhirnya menuju ke detektor untuk pengukuran akhir dengan interferogram. Sinyal interferogram yang diukur menggunakan komputer tempat Fourier transformasi terjadi, dan didapatkan spektrum untuk dianalisis [37].

Pengujian FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) pada poliuretan *foam* adalah metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi komposisi kimia dan karakteristik molekuler dari busa poliuretan. FTIR dapat memberikan informasi tentang ikatan kimia, grup fungsional, dan komponen kimia yang terkandung dalam busa poliuretan. Melalui pengujian FTIR pada poliuretan *foam*, dapat diketahui komposisi kimia, seperti jenis poliol, isosianat, atau aditif yang digunakan dalam pembuatan busa poliuretan. Selain itu, pengujian FTIR juga dapat membantu dalam mendeteksi adanya kontaminasi atau degradasi kimia yang mungkin terjadi dalam busa poliuretan. Dalam pengujian FTIR pada poliuretan *foam*, perlu diperhatikan bahwa interpretasi spektrum FTIR membutuhkan pengetahuan kimia yang baik dan menggunakan database referensi

yang sesuai. Hal ini membantu dalam mengidentifikasi komponen kimia secara akurat dan menginterpretasikan informasi molekuler dari busa poliuretan. Pengujian FTIR pada poliuretan *foam* dapat mengacu pada metode standar yang ditetapkan oleh organisasi seperti ASTM International atau ISO. Mengikuti prosedur pengujian yang sesuai dan menggunakan peralatan FTIR yang terkalibrasi dengan baik akan memastikan keakuratan dan keandalan hasil pengujian FTIR pada poliuretan *foam* [38].



Gambar 2.14 Pengujian FTIR [38]

2.10 Pengujian SEM

Pengujian SEM (Scanning Electron Microscope) memiliki fungsi untuk mengetahui morfologi, ukuran partikel, pori serta bentuk partikel material. Standar yang digunakan adalah ASTM E986. Berdasarkan ASTM E986 pengujian ini diawali dengan menembakkan electron yang berasal dari electron gun, kemudian dipercepat dengan anoda. Selanjutnya masuk ke lensa magnetik yang bertujuan untuk memfokuskan elektrode ke sampel, lalu pantulan elektron

mengenai permukaan sampel dan diterima oleh *backscattered electron detector* dan *secondary electron detector* kemudian diterjemahkan oleh display [39].

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) adalah metode analisis yang digunakan untuk mengamati dan menganalisis struktur permukaan suatu bahan dengan tingkat resolusi yang tinggi. SEM menggunakan serangkaian elektron yang diarahkan ke permukaan sampel untuk menghasilkan gambar yang sangat rinci tentang morfologi, topografi, dan komposisi bahan. Pengujian SEM memiliki kelebihan dalam menghasilkan gambar dengan resolusi tinggi dan kemampuan melihat detail permukaan sampel yang sangat halus. Ini memungkinkan pengamatan struktur mikro dan nanoskala yang tidak dapat dilihat dengan mikroskop optik biasa. Pengujian SEM sering digunakan dalam berbagai bidang, seperti ilmu material, ilmu hayati, ilmu lingkungan, rekayasa, dan banyak lagi. Penting untuk dicatat bahwa pengujian SEM biasanya memerlukan persiapan sampel yang cermat dan pengoperasian yang benar. Selain itu, hasil pengujian SEM harus diinterpretasikan dengan pengetahuan yang baik tentang sifat dan karakteristik bahan yang sedang diamati. Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) pada poliuretan *foam* digunakan untuk mengamati struktur permukaan dan morfologi busa poliuretan dengan tingkat resolusi tinggi. Metode ini memanfaatkan serangkaian elektron yang diarahkan ke permukaan sampel untuk menghasilkan gambar yang mendetail. Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) pada poliuretan *foam* digunakan untuk mengamati struktur permukaan dan morfologi busa poliuretan dengan tingkat resolusi tinggi. Metode ini memanfaatkan serangkaian elektron yang diarahkan ke permukaan sampel

untuk menghasilkan gambar yang mendetail. Dalam pengujian SEM pada poliuretan *foam*, berikut adalah penjelasan tentang prosesnya. Pengujian SEM pada poliuretan *foam* dapat memberikan wawasan yang berharga tentang struktur mikroskopis dan morfologi material tersebut. Ini dapat membantu dalam memahami kualitas dan performa busa poliuretan, serta memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara struktur dan sifat mekanisnya. Penting untuk dicatat bahwa pengujian SEM pada poliuretan *foam* memerlukan persiapan sampel yang cermat dan pemahaman yang baik tentang karakteristik poliuretan *foam*. Hasil pengujian SEM perlu diinterpretasikan dengan pengetahuan tentang sifat dan perilaku material yang sedang diamati [40].



Gambar 2.15 Pengujian SEM [40]