

**PENGARUH SURFAKTAN SILIKON DAN AQUADES TERHADAP
STRUKTUR, MORFOLOGI, DENSITAS, DAN KUAT TEKAN
BUSA POLIURETAN DENGAN PEMANFAATAN
MINYAK JARAK (*CASTOR OIL*)**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

ALGI MUHDAR SYAHIDAN
3334190075

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

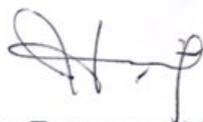
**PENGARUH SURFAKTAN SILIKON DAN AQUADES TERHADAP
STRUKTUR, MORFOLOGI, DENSITAS, DAN KUAT TEKAN
BUSA POLIURETAN DENGAN PEMANFAATAN
MINYAK JARAK (*CASTOR OIL*)**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Adhitva Trenggono, S.T., M.Sc
NIP. 197804102003121001

Pembimbing II



Dr. Satrio Herbirowo, S.T., M.T
NIP. 199109072015021002

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH SURFAKTAN SILIKON DAN AQUADES TERHADAP
STRUKTUR, MORFOLOGI, DENSITAS, DAN KUAT TEKAN
BUSA POLIURETAN DENGAN PEMANFAATAN
MINYAK JARAK (*CASTOR OIL*)**

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Algi Muhdar Syahidan

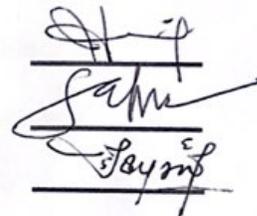
3334190075

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 20 Juli 2023

Susunan Dewan Penguji

Penguji I : Adhitva Trenggono, S.T., M.Sc
Penguji II : Dr. Satrio Herbirowo, S.T., M.T
Penguji III : Survana, S.T., M.Si

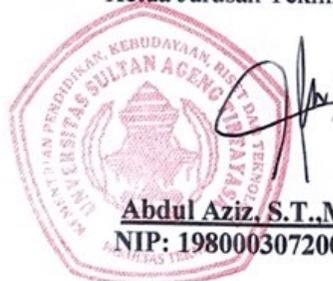
Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D
NIP: 19800030720050111002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : PENGARUH SURFAKTAN SILIKON DAN AQUADES
TERHADAP STRUKTUR, MORFOLOGI, DENSITAS,
DAN KUAT TEKAN BUSA POLIURETAN DENGAN
PEMANFAATAN MINYAK JARAK (*CASTOR OIL*)

Nama Mahasiswa : Algi Muhdar Syahidan

NIM : 3334190075

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 20 Juli 2023



ALGI MUHDAR SYAHIDAN
NIM. 3334190075

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membuat *polyurethane foam* yang dibuat dengan memanfaatkan minyak jarak (*castor oil*) sebagai pengganti poliol. Proses pembuatan busa poliuretan dengan menggunakan *castor oil* sebagai poliol. Pada proses pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan mereaksikan poliol dengan aquades, surfaktan silikon, dan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*). Aquades berperan sebagai *blowing agent* yang berfungsi untuk mengembangkan busa, surfaktan silikon berperan sebagai surfaktan yang berfungsi untuk mengurangi tegangan permukaan serta untuk melarutkan aquades dengan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*) berperan sebagai isosianat yang berfungsi sebagai agen penghubung yang mengikat poliol dan membentuk struktur jaringan polimer. Proses pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan mereaksikan poliol dan isosianat berupa MDI dengan tambahan variasi komposisi aquades sebagai *blowing agent* sebesar 1%, 10%, dan 20% dan variasi komposisi surfaktan silikon sebagai surfaktan sebesar 2%, 10%, dan 18% dari berat poliol. Berdasarkan variasi yang telah dilakukan didapatkan 3 jenis busa poliuretan diantaranya *rigid*, *semi-rigid* dan *flexible* untuk mendapatkan busa *rigid* dapat menggunakan komposisi 1% aquades dan 18% surfaktan, busa *semi-rigid* didapatkan melalui komposisi 10% aquades dan 2% surfaktan, busa *flexible* didapatkan melalui komposisi 20% aquades dan 10% surfaktan. Hal ini dapat dilihat dari nilai kuat tekan serta nilai densitas yang didapat, busa poliuretan *rigid*, *semi-rigid*, dan *flexible* memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,59 MPa, 0,21 MPa, dan 0,13 MPa serta nilai densitas dengan rata-rata dihasilkan secara berturut-turut sebesar 0,112617 gram/cm³, 0,055929 gram/cm³, dan 0,053263 gram/cm³

Kata Kunci: Busa Poliuretan, Minyak Jarak (*Castor Oil*), Kuat Tekan, Densitas

ABSTRACT

This research aims to make polyurethane foam made by using castor oil as a substitute for polyol. The process of making polyurethane foam using castor oil as a polyol. The process of making polyurethane foam is carried out by reacting polyol with distilled water, silicone surfactant, and MDI (Methylene Diphenyl Diisocyanate). Aquades acts as a blowing agent which functions to develop foam, silicone surfactant acts as a surfactant which functions to reduce surface tension and to dissolve distilled water with MDI (Methylene Diphenyl Diisocyanate) acting as an isocyanate which functions as a bridging agent which binds polyols and forms a polymer network structure. The process of making polyurethane foam is carried out by reacting polyol and isocyanate in the form of MDI with additional variations in the composition of distilled water as a blowing agent of 1%, 10%, and 20% and variations in the composition of silicone surfactant as a surfactant of 2%, 10%, and 18% of the weight of the polyol. . Based on the variations that have been carried out, 3 types of polyurethane foam are obtained including rigid, semi-rigid and flexible. To obtain rigid foam you can use a composition of 1% distilled water and 18% surfactant, semi-rigid foam is obtained using a composition of 10% distilled water and 2% surfactant, flexible foam obtained through a composition of 20% distilled water and 10% surfactant. This can be seen from the compressive strength values and density values obtained, rigid, semi-rigid and flexible polyurethane foams have compressive strength values of 0.59 MPa, 0.21 MPa and 0.13 MPa respectively and the values density with an average resulting respectively of 0.112617 gram/cm³, 0.055929 gram/cm³, and 0.053263 gram/cm³

Keywords: Polyurethane Foam, Castor Oil, Compressive Strength, Density

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala limpahan kebaikan dan kemurahan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan laporan Skripsi ini yang merupakan salah satu syarat kelulusan sebagai sarjana teknik metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T.,M.T.,Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta.
2. Bapak Rahman Faiz Suwandana S.T., M.S. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta.
3. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc. selaku pembimbing pertama yang membimbing penulis dalam penelitian hingga penyelesaian Skripsi ini.
4. Bapak Dr. Satrio Herbirowo, ST., MT selaku pembimbing kedua yang membimbing penulis dalam penelitian hingga penyelesaian Skripsi ini.
5. Orang tua dan keluarga penulis yang selalu mencurahkan doa, semangat, serta dukungan kepada penulis selama waktu perkuliahan hingga hari ini.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak diharapkan. Penulis berharap agar Skripsi ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya.

Cilegon, 20 Juli 2023

Algi Muhdar Syahidan

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	5
1.3 Identifikasi Masalah	6
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Castor Oil</i>	8
2.2 <i>Polyurethane Foams</i>	13
2.2.1 <i>Flexible Foam</i>	15
2.2.2 <i>Rigid Foam</i>	18

2.3	Isosianat	23
2.4	<i>Blowing Agent</i>	25
2.5	Surfaktan Silikon	27
2.6	<i>Foaming</i>	29
2.6.1	<i>Mixing</i>	29
2.6.2	<i>Nucleation</i>	31
2.6.3	<i>Expansion</i>	33
2.6.4	<i>Curing</i>	36
2.7	Pengujian Tekan	38
2.8	Pengujian Densitas	40
2.9	Pengujian FTIR	42
2.10	Pengujian SEM	44

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir	47
3.2	Alat dan Bahan	48
3.2.1	Alat	48
3.2.2	Bahan	48
3.3	Prosedur Percobaan	49
3.3.1	Pembuatan PUF	49
3.3.2	Pengujian Densitas	49
3.3.3	Pengujian Tekan	50
3.3.4	Pengujian FITR	51
3.3.5	Pengujian SEM	52

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Pembuatan Busa Poliuretan	54
4.2 Pengaruh Komposisi Aquades Terhadap Busa Poliuretan	57
4.2.1 Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan	61
4.2.2 Analisis Hasil Pengujian Densitas	68
4.3 Pengaruh Komposisi Surfaktan Terhadap Busa Poliuretan.....	71
4.3.1 Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan	73
4.3.2 Analisis Hasil Pengujian Densitas	80

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran	87

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Contoh Perhitungan	94
LAMPIRAN B. Data Penelitian.....	103
LAMPIRAN C. Gambar Alat & Bahan.....	111

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Sifat Fisik dan Kimia <i>Castor Oil</i>	9
Tabel 2.2 Klasifikasi <i>Polyurethane Foams</i>	14
Tabel 2.3 Data Teknis <i>Sealant</i>	16
Tabel 2.4 Sifat Mekanik dari <i>Flexible PUF</i>	17
Tabel 2.5 Data Teknis <i>Insulated PUF Rigid</i>	20
Tabel 4.1 Komposisi Bahan Yang Digunakan	57
Tabel 4.2 Hasil Busa Poliuretan dengan Variasi Komposisi Aquades	59
Tabel 4.3 Data Hasil Standar Deviasi Pengujian Densitas	60
Tabel 4.4 Hasil Busa Poliuretan dengan Variasi Komposisi Aquades	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Monomer Minyak Jarak (<i>Castor Oil</i>).....	11
Gambar 2.2 Struktur Kimia <i>Castor Oil</i> dan Asam <i>Ricinoleat</i>	12
Gambar 2.3 Struktur Sel (a) Terbuka (b) Tertutup	20
Gambar 2.4 Poliuretan <i>Foam</i> Minyak Jarak (<i>Castor Oil</i>).....	22
Gambar 2.5 Struktur Kimia TDI	24
Gambar 2.6 Struktur Kimia MDI	24
Gambar 2.7 Reaksi Antara Isosianat Dengan Air	25
Gambar 2.8 Struktur Kimia Surfaktan Silikon.....	28
Gambar 2.9 Gelembung Udara Pada Proses <i>Nucleation</i>	33
Gambar 2.10 Proses <i>Expansion</i>	34
Gambar 2.11 Proses <i>Curing</i>	36
Gambar 2.12 Pengujian Tekan.....	40
Gambar 2.13 Pengujian Densitas	42
Gambar 2.14 Pengujian FTIR	44
Gambar 2.15 Pengujian SEM.....	46
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	48
Gambar 4.1 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Aquades 1%, 10%, dan 20% dengan Komposisi Surfaktan 2%	63
Gambar 4.2 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Aquades 1%, 10%, dan 20% dengan Komposisi Surfaktan 10%	65

Gambar 4.3 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Aquades 1%, 10%, dan 20% dengan Komposisi Surfaktan 18%	67
Gambar 4.4 Pengaruh Penambahan Variasi Komposisi Aquades Terhadap Densitas Busa Poliuretan	70
Gambar 4.5 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Surfaktan 2%, 10%, dan 18% Dengan Komposisi Aquades 1%	75
Gambar 4.6 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Surfaktan 2%, 10%, dan 18% Dengan Komposisi Aquades 10%	77
Gambar 4.7 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Surfaktan 2%, 10%, dan 18% Dengan Komposisi Aquades 20%	79
Gambar 4.8 Pengaruh Penambahan Variasi Komposisi Surfaktan Terhadap Densitas Busa Poliuretan.....	82
Gambar B.1 Sampel 1% 2%.....	104
Gambar B.2 Sampel 1% 2% setelah dipotong	104
Gambar B.3 Sampel 1% 10%.....	104
Gambar B.4 Sampel 1% 10% setelah dipotong	104
Gambar B.5 Sampel 1% 18%.....	105
Gambar B.6 Sampel 1% 18% setelah dipotong	105
Gambar B.7 Sampel 10% 2%.....	105
Gambar B.8 Sampel 10% 2% setelah dipotong	105
Gambar B.9 Sampel 10% 10%.....	106
Gambar B.10 Sampel 10% 10% setelah dipotong	106
Gambar B.11 Sampel 10% 18%	106

Gambar B.12 Sampel 10% 18% setelah dipotong	106
Gambar B.13 Sampel 20% 2%	107
Gambar B.14 Sampel 20% 2% setelah dipotong	107
Gambar B.15 Sampel 20% 10%	107
Gambar B.16 Sampel 20% 10% setelah dipotong	107
Gambar B.17 Sampel 20% 18%	108
Gambar B.18 Sampel 20% 18% setelah dipotong	108
Gambar B.19 Data Uji Densitas	109
Gambar B.20 Data Uji Tekan.....	110
Gambar C.1 Cetakan	112
Gambar C.2 <i>Cutter</i>	112
Gambar C.3 Gunting	112
Gambar C.4 Gelas Beker.....	112
Gambar C.5 Mata Gergaji	112
Gambar C.6 Pipet Tetes	112
Gambar C.7 Plastik Sampel	113
Gambar C.8 Spatula <i>Metal</i>	113
Gambar C.9 Alat Pengujian Kuat Tekan	113
Gambar C.10 Alat Pengujian Densitas.....	113
Gambar C.11 Timbangan Digital	113
Gambar C.12 Aquades	114
Gambar C.13 MDI	114
Gambar C.14 Minyak Jarak (<i>Castor Oil</i>).....	114

Gambar C.15 Surfaktan Silikon114

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Minyak nabati yang diekstraksi dari biji tanaman jarak atau yang sering disebut sebagai *castor oil* merupakan bahan penting dalam kehidupan sehari-hari. *Castor oil* digunakan dalam berbagai aspek kehidupan manusia karena memiliki karakteristik yang sangat baik, seperti ringan, tahan air, tahan karat, isolasi panas dan listrik serta terjangkau. Berkat sifat-sifat yang sangat baik tersebut, produksi *castor oil* global meningkat menjadi 1,7 juta ton per tahun [1]. Peningkatan volume produksi berkaitan langsung dengan peningkatan konsumsi. *Castor oil* yang paling banyak dikonsumsi adalah yang digunakan dalam produksi busa poliuretan, yang menyumbang sekitar 40% dari konsumsi *castor oil* dunia. Limbah *castor oil* dapat didaur ulang dan diolah melalui berbagai metode, seperti glikolisis, metanolisis, hidrolisis, ammonolisis, dan aminolisis, untuk menghasilkan berbagai produk yang berharga. Limbah *castor oil* dapat diolah secara ramah lingkungan dan berkontribusi pada pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil [2].

Castor oil merupakan bahan baku alami yang dapat digunakan sebagai pengganti polioliol yang biasanya berasal dari minyak bumi dalam produksi busa poliuretan (PUF). Pemanfaatan *castor oil* sebagai bahan baku busa PUF ini memiliki beberapa keuntungan, antara lain sumbernya yang terbarukan dan ramah lingkungan serta memiliki sifat mekanik yang baik pada busa PUF yang

dihasilkan [2]. Penelitian sebelumnya juga telah menunjukkan bahwa pemanfaatan *castor oil* dalam produksi busa PUF dapat memberikan hasil yang baik. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh (Seo, et al., 2014) [3] menunjukkan bahwa penggunaan *castor oil* dalam produksi busa PUF dapat meningkatkan sifat mekanik busa, seperti kuat tekan dan ketahanan aus. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh (Singh, et al., 2020) [4] juga menunjukkan bahwa pemanfaatan campuran *castor oil* dan polioliol dari minyak bumi dapat menghasilkan busa PUF yang memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan dengan busa PUF yang hanya menggunakan polioliol dari minyak bumi. Dengan demikian, penggunaan *castor oil* sebagai bahan baku alternatif dalam produksi busa PUF memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan pada minyak bumi serta memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi yang positif.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Lee, et al., 2021) [5] mengenai penggunaan *castor oil* sebagai bahan pembuatan poliuretan *foam* memiliki beberapa kelebihan yang signifikan. Salah satu kelebihannya adalah *castor oil* merupakan alternatif yang ramah lingkungan, karena bahan ini berasal dari biji tanaman jarak yang merupakan sumber alami. Dalam penelitian tersebut, *castor oil* digunakan sebagai pengganti sebagian atau seluruhnya dari polioliol konvensional yang umumnya berasal dari sumber minyak bumi. Penggunaan *castor oil* sebagai bahan baku poliuretan *foam* memberikan manfaat lingkungan dengan mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil dan juga mengurangi jejak karbon. Selain manfaat lingkungan, penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan *castor oil* dalam formulasi poliuretan *foam* dapat meningkatkan sifat

mekanis *foam*. Kelebihan ini terlihat pada peningkatan kekuatan tekan dan modulus elastisitas *foam*. Dengan kata lain, *foam* yang menggunakan *castor oil* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap tekanan dan deformasi, sehingga sangat cocok digunakan pada aplikasi yang membutuhkan kekuatan mekanis yang tinggi. Stabilitas yang baik juga menjadi salah satu hasil penelitian ini. Poliuretan *foam* yang menggunakan *castor oil* menunjukkan stabilitas yang baik, yang sangat penting dalam aplikasi di mana *foam* akan terpapar suhu tinggi atau perubahan suhu yang signifikan. Stabilitas yang baik memastikan bahwa *foam* tetap menjaga kinerjanya dengan konsisten dan tidak mengalami degradasi yang signifikan. Selain itu, penggunaan *castor oil* dalam poliuretan *foam* juga dapat menghasilkan *foam* dengan densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan *foam* yang menggunakan polioli konvensional. Pengurangan densitas ini bermanfaat dalam aplikasi di mana kebutuhan akan bobot yang ringan diperlukan, seperti pada industri otomotif atau penggunaan material yang lebih ringan secara umum. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *castor oil* sebagai bahan pembuatan poliuretan *foam* memiliki beberapa kelebihan, termasuk manfaat lingkungan, peningkatan sifat mekanis *foam*, stabilitas yang baik, dan pengurangan densitas. Hal ini membuat *castor oil* menjadi alternatif yang menarik dan lebih ramah lingkungan dalam industri pembuatan poliuretan *foam*.

Pada pembuatan poliuretan, rasio molar antara *castor oil* dan larutan glikol yang digunakan dapat bervariasi tergantung pada sifat dan aplikasi akhir dari produk poliuretan tersebut. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan *castor oil* dapat meningkatkan kekuatan tekan dan stabilitas poliuretan, sementara

penambahan larutan glikol dapat meningkatkan elastisitas dan sifat mekaniknya. Dalam penelitian lain oleh (Ionescu, et al., 2016) [6] rasio molar antara *castor oil* dan MDI dalam pembuatan poliuretan dipelajari untuk meningkatkan sifat mekanik dan poliuretan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio molar terbaik adalah 1:1, 1:1,6, 1:2 yang menghasilkan poliuretan dengan sifat mekanik dan yang paling optimal.

Polyurethane adalah polimer dari gugus fungsi uretan (-NHCOO) yang ditemukan oleh Otto Bayer. Poliuretan ini dapat digunakan sebagai busa yang dikenal dengan busa poliuretan. Busa poliuretan merupakan salah satu polimer busa rekayasa yang banyak digunakan dalam industri dan telah menjadi produk komersial. Saat ini, PUF banyak digunakan sebagai bahan insulasi, insulasi listrik, sealant, busa di industri otomotif, dll [7]. Pembuatan PUF biasanya menggunakan polioliol yang terbuat dari minyak bumi, yang dapat menyebabkan masalah lingkungan seperti semakin menipisnya sumber energi tak terbarukan [7]. Oleh karena itu, untuk mengurangi masalah lingkungan dengan mengurangi limbah lingkungan, salah satu alternatif bahan baku yang dapat digunakan adalah minyak jarak (*castor oil*). *Castor oil* 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*). Penggunaan *castor oil* dalam produksi busa poliuretan dapat meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan keuletan PUF sehingga membuatnya cocok untuk digunakan dalam pembuatan PUF. Penggunaan *castor oil* dalam produksi busa poliuretan dapat meningkatkan sifat

mekanik dan dari busa poliuretan, serta mengurangi penggunaan bahan kimia yang berbahaya bagi lingkungan dan Kesehatan [8].

Pada pembuatan *polyurethane foam* terdapat bahan baku penting diantaranya isosianat (MDI), *blowing agent*, dan surfaktan. Pada umumnya *blowing agent* yang digunakan ialah *hydrochlorofluorocarbon* (HCFC), dan *clorofluorocarbon* (CFC), akan tetapi bahan tersebut sudah tidak digunakan lagi karena menghasilkan polusi, sementara itu penelitian yang dilakukan oleh (Choe, et al., 2004) [9] telah mengembangkan *blowing agent* dengan menggunakan air yang lebih ramah lingkungan. Formulasi masing-masing bahan dapat mempengaruhi hasil akhir dari busa, sehingga dalam penelitian ini dilakukan variasi komposisi aquades dan surfaktan silikon untuk melihat pengaruhnya terhadap *polyurethane foam* yang dihasilkan.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui proses pembuatan *polyurethane foam* dengan memanfaatkan *castor oil* sebagai bahan utama.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi aquades terhadap *polyurethane foam* yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh variasi komposisi surfaktan silikon terhadap *polyurethane foam* yang dihasilkan.

1.3 Identifikasi Masalah

Berikut ini adalah rumusan masalah yang akan dijadikan bahasan:

1. Bagaimana pembuatan *polyurethane foam* menggunakan *castor oil*?
2. Bagaimana pengaruh komposisi aquades terhadap karakteristik *polyurethane foam* yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh komposisi surfaktan silikon terhadap *polyurethane foam* yang dihasilkan?

1.4 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang didapat pada penelitian ini.

Batasan tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Minyak jarak (*castor oil*) digunakan sebagai bahan baku busa poliuretan.
2. Preparasi dan pembuatan busa poliuretan dilakukan di laboratorium Material Fungsional FT Untirta.
3. Pengujian tekan ASTM DI621 dilakukan di PT. Dirgantara Indonesia Bandung.
4. Pengujian densitas ASTM D1622 dengan *Analytical Balance AS 220.R2* dilakukan BRIN Polimer Serpong.
5. Pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi aquades 1%, 10%, 20%, dan memvariasikan konsentrasi surfaktan 2%, 10%, 18%.

6. Parameter penelitian berupa nilai kuat tekan, densitas, ukuran pori, dan struktur kimia busa

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima bab yang dilengkapi dengan daftar pustaka serta lampiran pendukung. Bab I menjelaskan mengenai latar belakang, identifikasi masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan penelitian. Bab II menjelaskan mengenai dasar fundamental teori yang mendukung penelitian ini sebagai acuan dalam analisis dan pengolahan data serta pembahasan. Bab III menjelaskan mengenai metode yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini, prosedur, dan diagram alir. Bab IV menjelaskan mengenai hasil yang didapat dari penelitian serta analisis lanjut terkait data yang didapatkan. Bab V menjelaskan mengenai kesimpulan dari hasil yang didapat serta saran-saran untuk perbaikan dan aspek lainnya yang perlu ditingkatkan untuk penelitian selanjutnya. Daftar pustaka memuat mengenai referensi yang digunakan selama penelitian dan menjadi acuan dalam melakukan penelitian. Lampiran merupakan beberapa data sekunder pendukung dalam penelitian dan penulisan laporan penelitian ini.

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

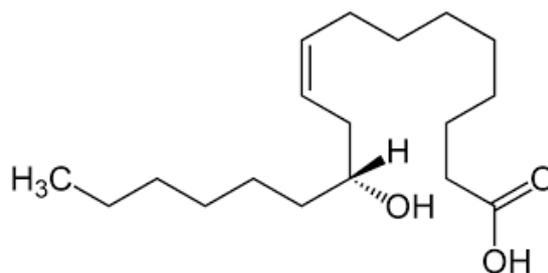
Penelitian yang dilakukan oleh (Yusuf, et al., 2016) [12] bertujuan untuk menggunakan minyak jarak (*castor oil*) yang dimodifikasi sebagai bahan dasar dalam pembuatan poliuretan *foam*. Minyak jarak (*castor oil*) dimodifikasi melalui reaksi transesterifikasi dengan polietilen glikol, menghasilkan polioli 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

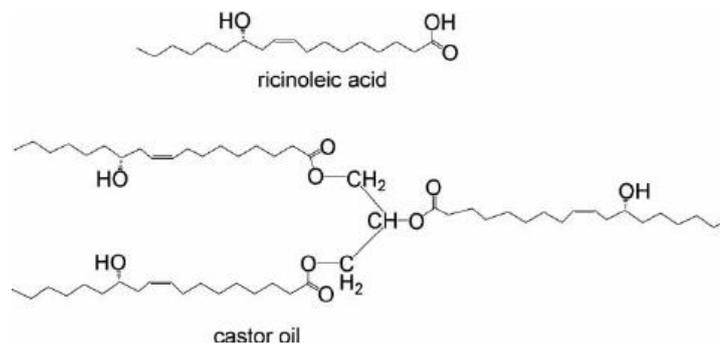
foam. *Castor oil* mengalami modifikasi kimia melalui reaksi tertentu untuk menghasilkan polioliol yang kemudian digunakan dalam formulasi poliuretan *foam*. Peneliti melakukan serangkaian eksperimen untuk mempelajari pengaruh penggunaan polioliol berbasis *castor oil* pada sifat dan kinerja poliuretan *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 ($C_{18}H_{34}O_3$). Rumus tersebut menggambarkan bahwa asam *ricinoleat* terdiri dari 18 atom karbon (C_{18}), 34 atom hidrogen (H_{34}),

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*

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>Polioliol</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.

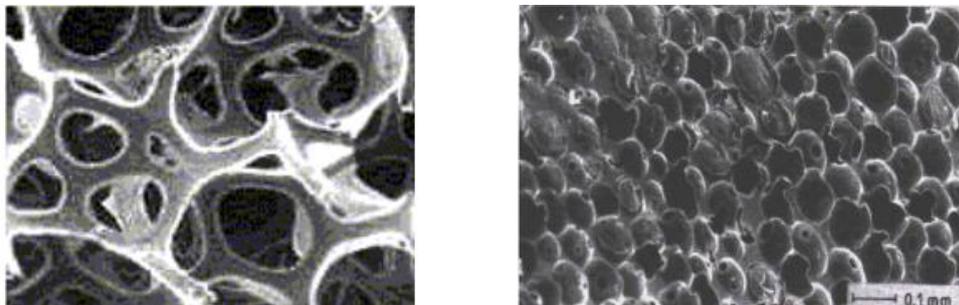
Rigid PUF atau busa poliuretan kaku umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi isolasi. Beberapa contoh penggunaan *rigid* PUF meliputi lemari es, freezer, gudang berpendingin, bangunan dan konstruksi, pabrik kimia dan petrokimia, serta kotak es portabel. Salah satu perusahaan yang terkenal dalam memproduksi *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)

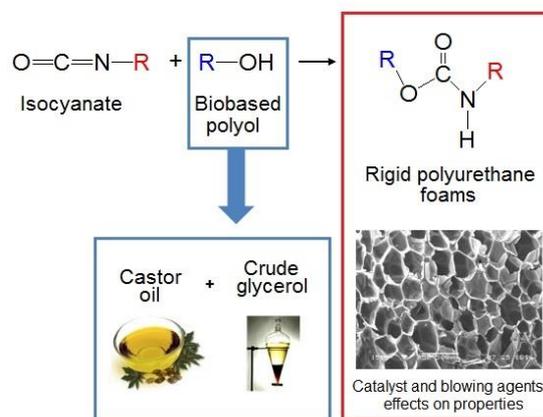
Gambar 2.3 Struktur Sel (a) Terbuka (b) Tertutup [20]

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]

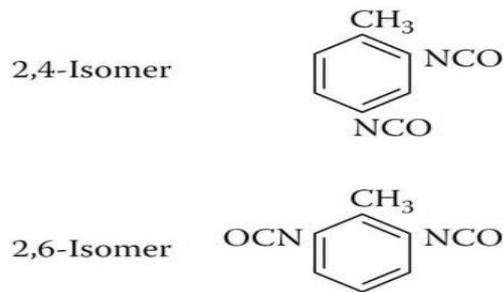
Tahap reaksi busa, prepolymer yang dihasilkan kemudian dicampur dengan polioliol, seperti polioliol yang berasal dari minyak nabati lainnya atau polioliol terbarukan lainnya, yang berfungsi sebagai *crosslinker*. Gugus isosianat pada

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].

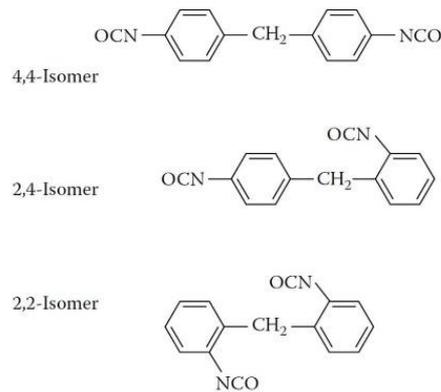
2.3 Isosianat

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]



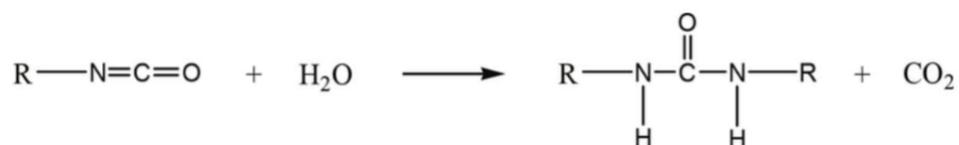
Gambar 2.6 Struktur Kimia MDI [17]

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

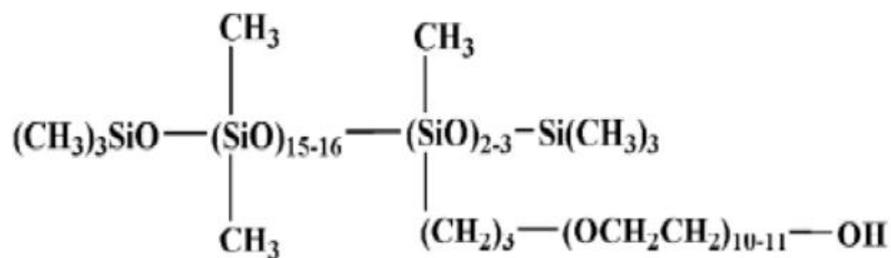
mempengaruhi sifat-sifat *foam*, termasuk peningkatan densitas, penurunan kekuatan mekanik, dan perubahan konduktivitas termal. Penelitian yang dilakukan oleh (Liu, et al., 2023) [27] bertujuan untuk menganalisis pengaruh kandungan air terhadap sifat-sifat mekanik *foam* poliuretan kaku. Penelitian ini 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

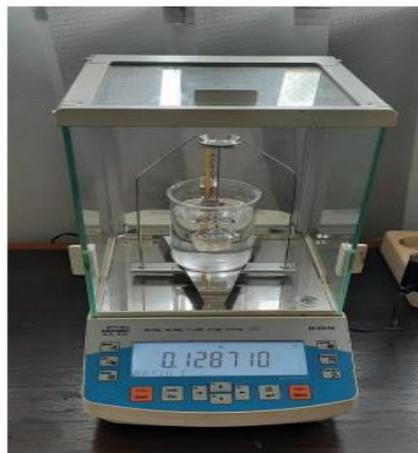
Pengujian densitas menggunakan ASTM D1621 adalah metode standar yang diterbitkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) yang menggambarkan prosedur untuk menentukan densitas atau berat jenis dari bahan plastik seluler yang kaku, seperti busa polimer atau bahan isolasi. Metode pengujian 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 elektrok 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].

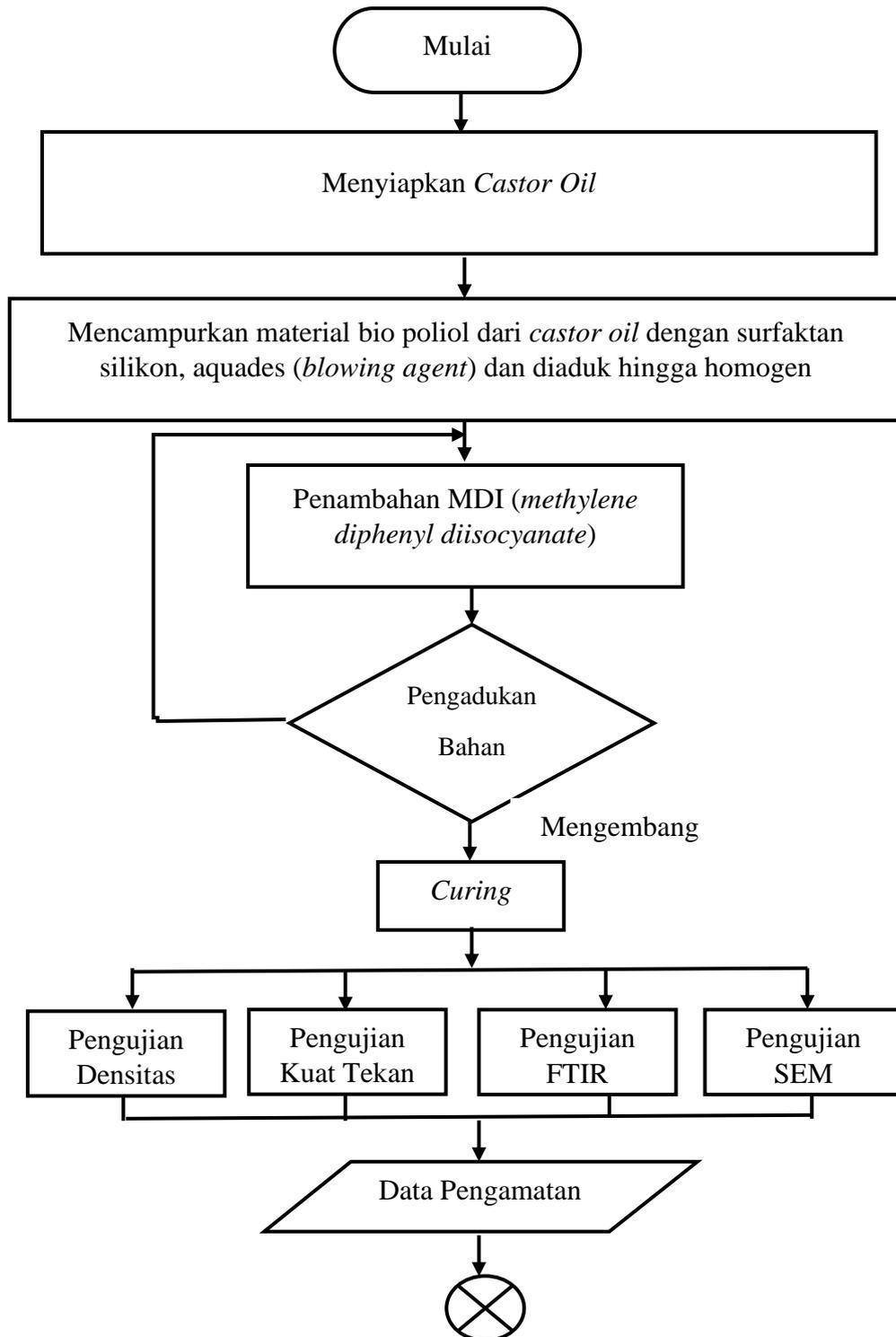


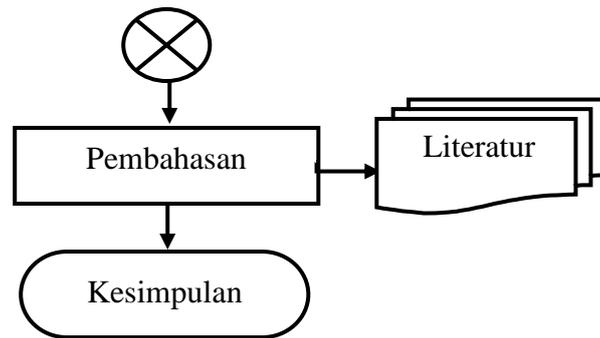
Gambar 2.15 Pengujian SEM [40]

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut merupakan diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Cetakan
2. *Cutter*
3. Gunting
4. Gelas Beaker
5. Mata Gergaji
6. Pipet Tetes
7. Plastik Sampel
8. Spatula *Metal*
9. Timbangan Digital

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Aquades
2. MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*)

3. *Castor Oil*
4. Surfaktan Silikon

3.3 Prosedur Percobaan

Prosedur percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1 Pembuatan PUF

Membuat PU *foam* dengan menggunakan bio polioliol dari *castor oil* dengan *blowing agent* 1%, 10%, dan 20% dari berat polioliol, lalu ditambahkan *surfactant silicon* 2%, 10%, dan 18% dari berat polioliol dan diaduk hingga homogen, kemudian menambahkan MDI dengan variasi 1:1 dari pre-poliuretan yang telah dihasilkan lalu diaduk dengan menggunakan spatula hingga proses curing terjadi dan dituangkan kedalam cetakan silikon lalu didiamkan hingga mengeras. Proses pembuatan ini dilakukan di Laboratorium Material Fungsional FT Untirta

3.3.2 Pengujian Densitas

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 x 20 x 20 mm³. Pengujian ini dilakukan di BRIN Polimer Serpong. 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 $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, 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 yang sama seperti yang digunakan pada langkah sebelumnya dan dicatat sebagai w (massa kawat dalam cairan). Kemudian dilakukan perhitungan dengan cara berikut [35].

$$Sp_{gr\ 23/23^{\circ}\text{C}} = a / (a + w - b) \dots\dots\dots(2)$$

3.3.3 Pengujian Tekan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan dari poliuretan *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. Pengujian ini dilakukan di PT. Dirgantara Indonesia, Bandung. 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]. Lakukan analisis data hasil pengujian, termasuk kekuatan tekan, deformasi, dan karakteristik mekanik sesuai dengan standar ASTM D1621. Laporkan hasil pengujian tekan poliuretan *foam* sesuai standar yang ditentukan.

3.3.4 Pengujian FTIR

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 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 (ASTM, 2021). Menyiapkan kaca penahan yang bersih dan bebas kontaminan. Meletakkan sampel poliuretan *foam* dengan hati-hati di atas kaca penahan. Memasang kaca penahan dengan sampel ke dalam alat FTIR IR Prestige-21 sesuai instruksi penggunaan. Mengatur parameter pengujian pada alat FTIR

IR Prestige-21, seperti rentang gelombang, resolusi, dan jumlah scan. Memulai pengujian dengan menjalankan alat FTIR IR Prestige-21 untuk mengirimkan sinar inframerah ke sampel dan mendeteksi interaksi sinar dengan molekul poliuretan *foam*. Mengamati spektrum FTIR yang dihasilkan oleh sampel poliuretan *foam*, perhatikan pola puncak dan garis-garis karakteristik dalam spektrum. Menganalisis spektrum FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi atau ikatan kimia dalam poliuretan *foam* dengan membandingkannya dengan referensi atau database FTIR yang tersedia. Mencatat dan dokumentasikan hasil analisis FTIR beserta interpretasi terhadap sampel poliuretan *foam*.

3.3.5 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]. Menyiapkan sampel poliuretan *foam* yang sesuai dengan persyaratan standar dan ukuran yang memadai. Persiapkan dan periksa kondisi teknis SEM agar beroperasi dengan baik. Memotong sampel poliuretan *foam* sesuai persyaratan, pastikan permukaan rata dan

bebas kontaminan. Pastikan sampel dalam keadaan kering sebelum dimasukkan ke dalam SEM. Lakukan pengeringan jika diperlukan. Siapkan pemegang yang sesuai dan bersih untuk memasukkan sampel ke dalam SEM. Pasang sampel poliuretan *foam* di pemegang dengan hati-hati dan pastikan posisi yang tepat untuk pengamatan SEM. Buka chamber SEM dan masukkan pemegang sampel dengan rapat. Mengatur parameter pengujian pada SEM, termasuk tegangan akselerasi elektron, tingkat pembesaran, dan mode deteksi. Melakukan pengujian SEM dengan mengamati permukaan sampel poliuretan *foam* dan dapatkan gambar-gambar SEM yang diperlukan. Menganalisis gambar-gambar SEM untuk memperoleh informasi mengenai struktur permukaan, morfologi, dan karakteristik poliuretan *foam*. Melakukan pengukuran yang diperlukan dan identifikasi fitur-fitur penting dari sampel. Mendokumentasikan hasil pengujian SEM, termasuk gambar-gambar dan analisis yang dilakukan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Pembuatan Busa Poliuretan

Proses pembuatan busa poliuretan dengan menggunakan *castor oil* sebagai polioliol. Pada proses pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan mereaksikan polioliol dengan aquades, surfaktan silikon, dan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*). Aquades berperan sebagai *blowing agent* yang berfungsi untuk mengembangkan busa [17], surfaktan silikon berperan sebagai surfaktan yang berfungsi untuk mengurangi tegangan permukaan serta untuk melarutkan aquades dengan MDI [28], dan *Methylene Diphenyl Diisocyanate* berperan sebagai isosianat yang berfungsi sebagai agen penghubung yang mengikat polioliol dan membentuk struktur jaringan polimer [17]. Pada proses pembuatan busa poliuretan terdapat beberapa fenomena diantaranya terbentuknya asap dan panas saat proses expansion, hal ini disebabkan oleh reaksi eksoterm dari aquades dengan MDI yang menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂) dan amida sebagai produk sampingan. Pada reaksi tersebut melepaskan energi yang tersimpan, energi ini dilepaskan dalam bentuk panas berupa gas CO₂.

Proses pembuatan busa poliuretan menggunakan bahan-bahan seperti *castor oil*, surfaktan silikon, aquades, dan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*) melibatkan beberapa langkah. Berikut adalah penjelasan tentang setiap langkah dalam proses tersebut. Bahan-bahan yang akan digunakan, yaitu *castor oil*, surfaktan silikon, aquades, dan MDI, disiapkan dan diukur sesuai

dengan perbandingan yang ditentukan. *Castor oil* adalah bahan dasar yang akan memberikan elastisitas pada busa poliuretan, surfaktan silikon digunakan untuk mengatur struktur busa, aquades berfungsi sebagai pelarut dan mengaktifkan reaksi kimia, sedangkan MDI berperan sebagai agen pengeras. Pembuatan prekursor poliuretan, pada langkah ini, *castor oil* dicampur dengan MDI dalam jumlah yang sesuai dan diaduk hingga terbentuk prekursor poliuretan. Reaksi kimia terjadi antara gugus hidroksil pada *castor oil* dan gugus isosianat pada MDI, membentuk ikatan uretan. Surfaktan silikon ditambahkan ke dalam campuran prekursor poliuretan. Surfaktan ini berfungsi untuk mengontrol pembentukan gelembung udara dan mengatur struktur busa yang dihasilkan. Aquades ditambahkan ke dalam campuran sebagai pelarut dan untuk mengaktifkan reaksi kimia yang menghasilkan busa. Aquades juga membantu mengatur waktu reaksi dan viskositas campuran. Setelah penambahan aquades, reaksi kimia antara prekursor poliuretan dan air dalam aquades terjadi. Ini menghasilkan pembentukan gas karbon dioksida yang mengembang dan membentuk busa. Waktu pengembangan busa tergantung pada komposisi dan sifat bahan yang digunakan. Setelah busa terbentuk, busa poliuretan perlu menjalani proses curing atau pengerasan. Proses ini memungkinkan busa untuk mengeras dan memperoleh kekuatan yang diperlukan untuk aplikasi tertentu [8].

Pada proses pembuatan busa poliuretan dengan bahan-bahan seperti *castor oil*, surfaktan silikon, aquades, dan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*), terjadi beberapa reaksi kimia yang penting. Reaksi antara *castor oil* dan MDI *Castor oil*, yang mengandung gugus hidroksil (-OH), bereaksi dengan MDI yang

mengandung gugus isosianat (-NCO). Dalam reaksi ini, gugus hidroksil pada castor oil bereaksi dengan gugus isosianat pada MDI membentuk ikatan uretan. Reaksi ini dikenal sebagai reaksi uretanisasi. Hasilnya adalah terbentuknya prekursor poliuretan yang merupakan campuran dari molekul poliol (*castor oil*) yang terhubung oleh ikatan uretan. Reaksi antara prekursor poliuretan dan air: Pada tahap ini, aquades (air) ditambahkan ke dalam campuran prekursor poliuretan. Air bereaksi dengan gugus isosianat yang tersisa pada MDI membentuk ikatan urea. Reaksi ini dikenal sebagai reaksi urea-formaldehida. Reaksi ini menghasilkan pembentukan gas karbon dioksida (CO₂) sebagai produk sampingan, yang berperan penting dalam pembentukan busa. Pembentukan gas CO₂ menyebabkan pengembangan. Selama proses pembentukan busa, surfaktan silikon ditambahkan ke dalam campuran untuk mengatur struktur busa. Surfaktan silikon berinteraksi dengan fase gas dan cair dalam campuran, membantu mengontrol pembentukan dan distribusi gelembung udara dalam busa. Interaksi ini membantu menghasilkan busa poliuretan dengan struktur yang lebih homogen dan kontrol yang lebih baik terhadap ukuran dan distribusi sel-sel busa. Reaksi-reaksi ini terjadi secara simultan dan kompleks dalam proses pembuatan busa poliuretan. Interaksi antara *castor oil*, MDI, air, dan surfaktan silikon mempengaruhi pembentukan busa, kekuatan mekanik, dan struktur mikro busa yang dihasilkan [41].

Pada penelitian pembuatan busa poliuretan ini dilakukan dengan komposisi surfaktan dan aquades berbeda-beda yang berguna untuk mencari sifat

dari busa poliuretan. Berikut merupakan tabel dari komposisi bahan yang digunakan pada penelitian.

Tabel 4.1 Komposisi Bahan yang Digunakan

Sampel	Biopoliol:MDI (wt)	Tambahan MDI (pphp)	Surfaktan (pphp)	Aquades (pphp)
1	1:1	10%	2%	1%
2	1:1	10%	10%	1%
3	1:1	10%	18%	1%
4	1:1	10%	2%	10%
5	1:1	10%	10%	10%
6	1:1	10%	18%	10%
7	1:1	10%	2%	20%
8	1:1	10%	10%	20%
9	1:1	10%	18%	20%

4.2 Pengaruh Komposisi Aquades Terhadap Busa Poliuretan

Dalam pembuatan busa poliuretan, penambahan aquades (air destilasi) digunakan sebagai *blowing agent* atau pendorong pembentukan busa. *Blowing agent* berperan penting dalam membentuk gelembung udara dalam sistem poliuretan yang akhirnya menghasilkan busa dengan struktur terkontrol dan sifat fisik yang diinginkan. Ketika aquades ditambahkan ke dalam campuran bahan poliuretan, air tersebut menguap akibat panas yang dihasilkan dalam reaksi kimia antara *castor oil* dan *isocyanate* (dalam hal ini, MDI). Proses penguapan air

menghasilkan gelembung udara dalam campuran, yang menyebabkan pembentukan struktur pori-pori dalam busa poliuretan. Komposisi aquades yang digunakan dalam pembuatan busa poliuretan akan mempengaruhi jenis busa yang terbentuk serta sifat mekanik dan fisik busa yang dihasilkan. Umumnya, semakin besar komposisi aquades yang digunakan, densitas busa akan semakin rendah. Ini karena penguapan air menghasilkan volume udara yang lebih besar dalam busa, sehingga mengurangi kepadatan relatifnya. Selain itu, dengan adanya lebih banyak udara dalam busa, kekuatan tekan busa cenderung menurun. Namun, perlu diingat bahwa sifat fisik dan mekanik busa yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh komposisi surfaktan yang digunakan. *Surfactant* bertanggung jawab untuk mengontrol pembentukan gelembung udara, penyebaran dan stabilisasi gelembung tersebut, serta meningkatkan kualitas busa secara keseluruhan.

Untuk mengetahui pengaruh komposisi aquades terhadap busa poliuretan yang dihasilkan, dapat dirujuk pada tabel 4.2 yang disebutkan dalam penelitian yang dilakukan oleh [42]. Tabel tersebut mungkin memberikan informasi tentang berbagai parameter seperti densitas busa, kekuatan tekan, dan jenis busa dalam kaitannya dengan variasi komposisi aquades yang digunakan. Dalam kesimpulannya, penambahan aquades sebagai *blowing agent* dalam pembuatan busa poliuretan memainkan peran penting dalam menghasilkan struktur dan sifat fisik busa yang diinginkan. Penggunaan aquades dengan komposisi yang berbeda dapat menghasilkan perubahan pada densitas, kekuatan tekan, dan jenis busa yang terbentuk.

Tabel 4.2 Hasil Busa Poliuretan dengan Variasi Komposisi Aquades

Komposisi Aquades (pphp)	Komposisi Surfaktan (pphp)	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Young (MPa)	Densitas (gram/cm³)	Jenis Busa
1%	2%	0,81	2,6012	0,139370	<i>Rigid</i>
1%	10%	0,21	0,5227	0,055929	<i>Semi Rigid</i>
1%	18%	0,12	0,3733	0,090007	<i>Flexible</i>
10%	2%	0,53	1,5391	0,116657	<i>Rigid</i>
10%	10%	0,23	0,6451	0,060683	<i>Rigid</i>
10%	18%	0,13	0,3295	0,053263	<i>Flexible</i>
20%	2%	0,59	0,3733	0,112617	<i>Rigid</i>
20%	10%	0,16	0,3789	0,051448	<i>Semi Rigid</i>
20%	18%	0,16	0,3529	0,050458	<i>Flexible</i>

Pada Tabel 4.2 terlihat variasi nilai densitas yang berbeda-beda sesuai dengan komposisi aquades sebesar 1%, 10%, dan 20%, serta komposisi bahan surfaktan sebesar 2%, 10%, dan 18%. Berdasarkan informasi dalam literatur, konsep yang berlaku adalah semakin besar nilai densitas suatu benda, maka benda tersebut cenderung lebih kaku. Dengan demikian, semakin besar nilai densitas suatu benda, semakin kaku pula benda tersebut. Dari data hasil pengujian densitas yang diperoleh, dapat ditarik kesimpulan bahwa jenis foam yang terbentuk adalah *rigid* (kaku), *semi rigid* (setengah kaku), dan fleksibel sejalan dengan temuan dari

penelitian [43]. ntuk menganalisis data ini, dilakukan perhitungan standar deviasi dengan menggunakan persamaan 4.1.

$$s = \sqrt{(\sum x^2 - nX^2)/(n - 1)} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana :

s = Standar Deviasi

x = Nilai satu pengamatan

n = Banyaknya pengamatan

X = Rata – rata aritmatika dari total pengamatan

Didapatkan hasil perhitungan standar deviasi pada pengujian densitas pada sampel busa poliuretan pada seluruh variasi sampel. Tabel 4.3 Data hasil standar deviasi pengujian densitas.

Tabel 4.3 Data Hasil Standar Deviasi Pengujian Densitas

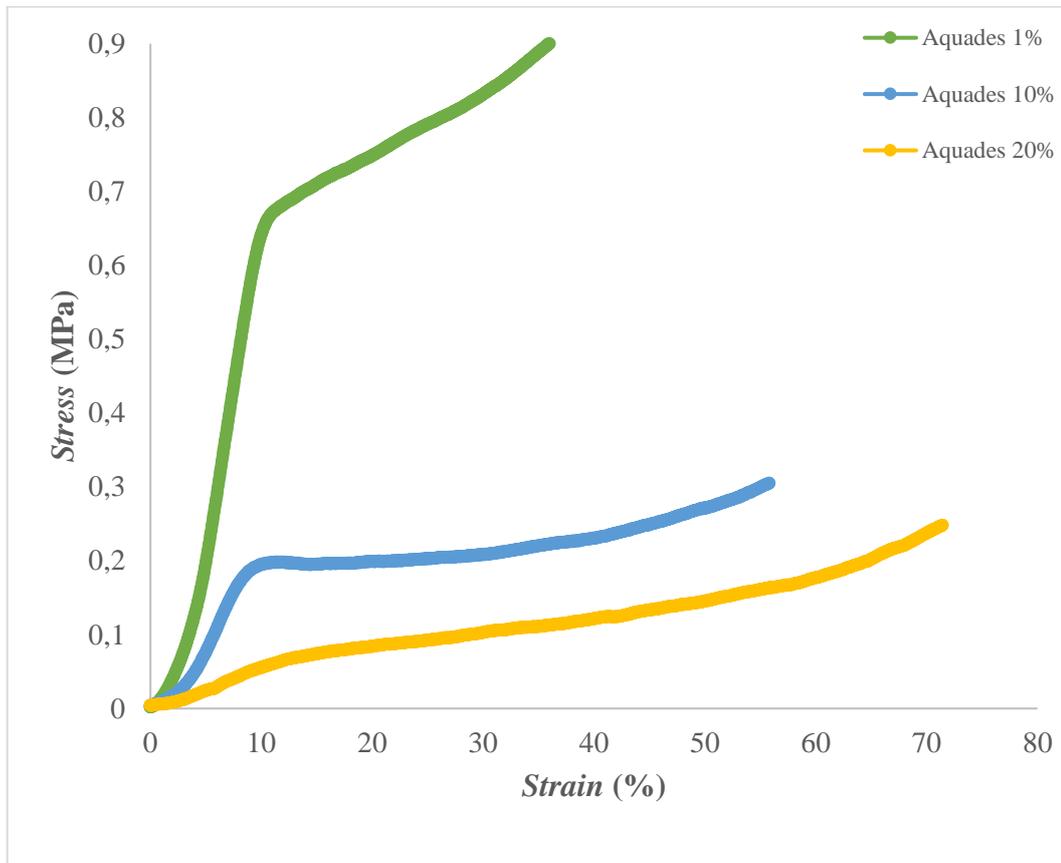
Komposisi Aquades (pphp)	Komposisi Surfaktan (pphp)	Standar Deviasi
	2%	0,070584
1%	10%	0,075558
	18%	0,076321
	2%	0,083780
10%	10%	0,083366
	18%	0,084139
	2%	0,079984
18%	10%	0,083997

4.2.1 Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pada pengujian kekuatan busa poliuretan, salah satu analisis yang dilakukan adalah dengan membangun grafik tegangan dan regangan (*stress-strain*) untuk setiap komposisi yang diuji. Hal ini bertujuan untuk memperoleh informasi tentang respons mekanik busa terhadap beban yang diterapkan, serta untuk menentukan nilai modulus *Young* dari masing-masing komposisi. Berdasarkan tabel 4.2, dapat membuat grafik tegangan dan regangan untuk komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18% dengan variasi komposisi aquades 1%, 10%, dan 20%. Grafik ini akan menunjukkan hubungan antara tegangan (*stress*) yang diterapkan pada busa poliuretan dengan regangan (*strain*) yang terjadi sebagai respons terhadap tegangan tersebut. Gambar 4.1 akan memperlihatkan grafik tegangan dan regangan dari masing-masing komposisi tersebut. Pada sumbu x akan direpresentasikan regangan yang diukur dalam persentase, sedangkan pada sumbu y akan direpresentasikan tegangan yang diukur dalam *megapascal* (MPa). Grafik ini akan menunjukkan bagaimana busa poliuretan merespons tegangan yang diterapkan, apakah bersifat elastis (kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan) atau plastis (mengalami deformasi permanen).

Dalam grafik tegangan-regangan, fase *linear* pada awal kurva akan digunakan untuk menghitung modulus *Young* (*Young's modulus*). Modulus

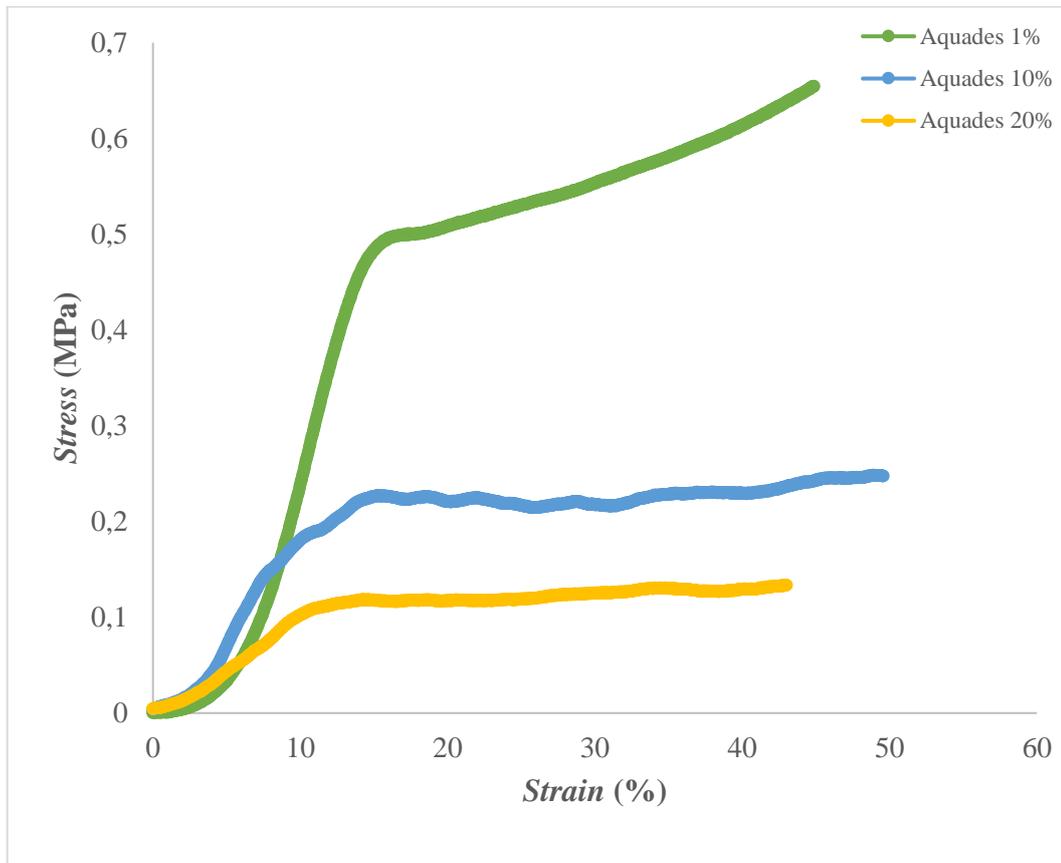
Young adalah ukuran kekakuan atau rigiditas suatu material dan dinyatakan dalam satuan tekanan. Nilai modulus *Young* dapat dihitung sebagai *gradien* atau kemiringan dari kurva *linear* pada fase elastis dari grafik tegangan-regangan. Semakin tinggi nilai modulus *Young*, semakin kaku atau kaku material tersebut. Dengan membandingkan grafik tegangan-regangan dari berbagai komposisi aquades yang diuji, kita dapat melihat perbedaan dalam respons mekanik busa poliuretan terhadap variasi komposisi aquades. Dengan demikian, melalui analisis grafik tegangan-regangan dan perhitungan modulus *Young*, dapat memperoleh informasi penting tentang respons mekanik busa poliuretan terhadap beban dan perubahan sifat mekaniknya dengan variasi komposisi aquades.



Gambar 4.1 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Aquades 1%, 10%, dan 20% dengan Komposisi Surfaktan 2%

Pada tabel 4.1, terlihat bahwa komposisi surfaktan 2% dengan variasi komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% memberikan nilai kuat tekan dan modulus *Young* yang berbeda-beda. Dalam literatur, diketahui bahwa semakin besar nilai modulus *Young* suatu benda, maka benda tersebut akan semakin kaku. Oleh karena itu, nilai kuat tekan suatu benda juga cenderung meningkat seiring dengan peningkatan nilai modulus *Young*. Gambar 4.1 menunjukkan grafik tegangan-regangan dan nilai modulus *Young* dari masing-masing sampel. Nilai modulus *Young*

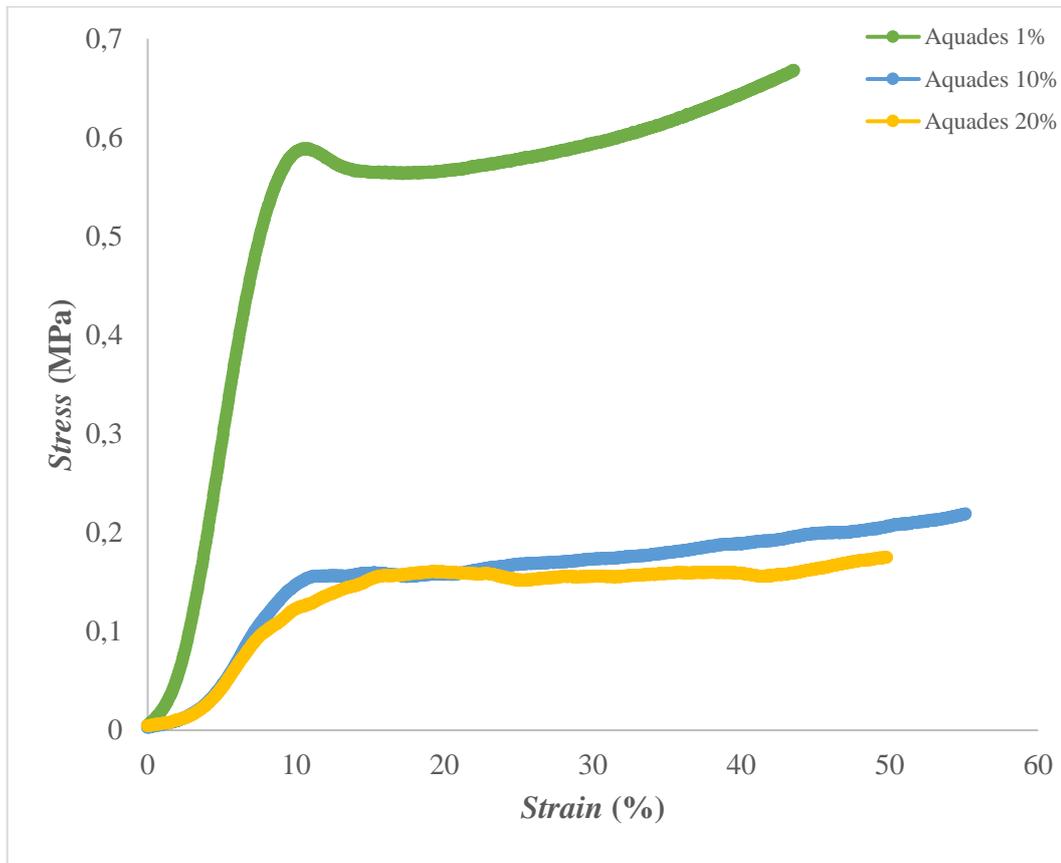
diperoleh dari kemiringan garis regresi *linear (slope)* pada grafik tegangan-regangan. Sementara itu, nilai kuat tekan untuk komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% secara berturut-turut adalah 0,81 MPa, 0,21 MPa, dan 0,12 MPa. Berdasarkan grafik nilai modulus *Young* pada komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% secara berturut-turut adalah 2,6012 MPa, 0,5227 MPa, dan 0,3733 MPa. Apabila data nilai modulus *Young* dan nilai kuat tekan dibandingkan, dapat dilihat bahwa hasilnya sesuai dengan apa yang telah disebutkan dalam literatur [42]. Hal ini dikarenakan semakin kecil nilai modulus *Young* dari busa, maka busa tersebut akan memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Dalam konteks ini, komposisi dengan konsentrasi aquades yang lebih tinggi, seperti 20%, memiliki nilai modulus *Young* yang lebih rendah, sehingga busa tersebut lebih fleksibel dan memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan aquades dalam formulasi busa poliuretan dapat mengubah sifat mekanik busa, seperti kekakuan dan kekuatan. Dalam penelitian ini, semakin tinggi konsentrasi aquades yang digunakan, semakin rendah nilai modulus *Young* dan nilai kuat tekan busa poliuretan.



Gambar 4.2 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Aquades 1%, 10%, dan 20% dengan Komposisi Surfaktan 10%

Data yang diberikan mengenai hasil pengujian kuat tekan menggunakan komposisi surfaktan 10% dengan variasi komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% menunjukkan nilai kuat tekan dan modulus *Young* yang berbeda-beda. Nilai kuat tekan dapat ditemukan pada tabel 4.2, di mana untuk komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% secara berturut-turut memiliki nilai kuat tekan sebesar 0,53 MPa, 0,23 MPa, dan 0,13 MPa. Berdasarkan grafik nilai modulus *Young* pada komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% secara berturut-turut adalah 1,5391 MPa, 0,6451 MPa, dan

0,3295 MPa. Apabila data ini tentang modulus *Young* dan nilai kuat tekan dibandingkan, dapat dilihat bahwa hasilnya sesuai dengan apa yang telah disebutkan dalam literatur [42]. Hal ini sesuai dengan konsep bahwa semakin kecil nilai modulus *Young* dari suatu bahan, maka bahan tersebut akan memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Dalam konteks ini, komposisi dengan konsentrasi aquades yang lebih tinggi, seperti 20%, memiliki nilai modulus *Young* yang lebih kecil, sehingga busa tersebut lebih fleksibel dan memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Penjelasan ini sesuai dengan konsep umum bahwa modulus *Young* adalah ukuran kekakuan atau kekakuan bahan, sedangkan kuat tekan menggambarkan kemampuan bahan untuk menahan tekanan atau beban tertentu sebelum mengalami kegagalan. Oleh karena itu, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa penambahan aquades dalam formulasi busa poliuretan dengan komposisi surfaktan 10% dapat mempengaruhi sifat mekanik busa, termasuk kekakuan dan kekuatan. Informasi ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan formulasi busa poliuretan dengan tujuan untuk mencapai sifat fisik dan mekanik yang diinginkan dalam aplikasi tertentu. Dalam hal ini, pemilihan komposisi aquades yang tepat dapat mempengaruhi kekakuan dan kekuatan busa poliuretan, serta dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi yang diinginkan.



Gambar 4.3 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Aquades 1%, 10%, dan 20% dengan Komposisi Surfaktan 18%

Pada tabel 4.2, terlihat bahwa komposisi surfaktan 18% dengan variasi komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% memberikan nilai kuat tekan dan modulus *Young* yang berbeda-beda. Dalam literatur, diketahui bahwa semakin besar nilai modulus *Young* suatu benda, maka benda tersebut akan semakin kaku. Oleh karena itu, nilai kuat tekan suatu benda juga cenderung meningkat seiring dengan peningkatan nilai modulus *Young*. Gambar 4.3 menunjukkan grafik tegangan-regangan dan nilai modulus *Young* dari masing-masing sampel. Nilai modulus *Young* diperoleh dari kemiringan garis regresi *linear (slope)* pada grafik

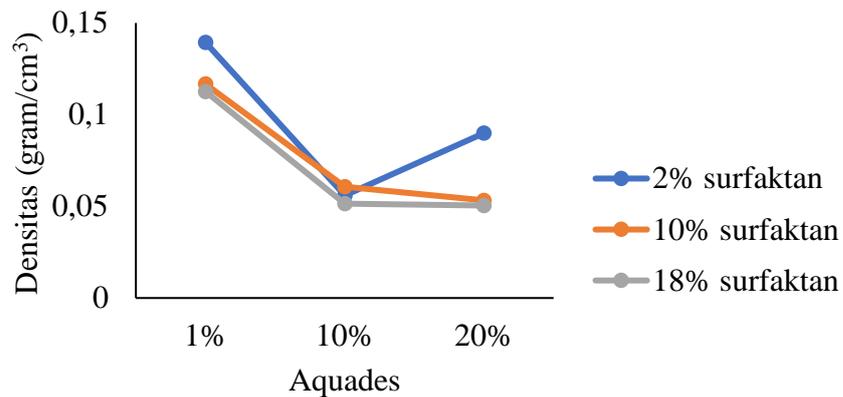
tegangan-regangan. Sementara itu, nilai kuat tekan untuk komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% secara berturut-turut adalah 0,59 MPa, 0,16 MPa, dan 0,16 MPa. Berdasarkan grafik nilai modulus *Young* pada komposisi aquades 1%, 10%, dan 20% secara berturut-turut adalah 1,5979 MPa, 0,3789 MPa, dan 0,3529 MPa. Apabila data nilai modulus *Young* dan nilai kuat tekan dibandingkan, dapat dilihat bahwa hasilnya sesuai dengan apa yang telah disebutkan dalam literatur [42]. Hal ini dikarenakan semakin kecil nilai modulus *Young* dari busa, maka busa tersebut akan memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Dalam konteks ini, komposisi dengan konsentrasi aquades yang lebih tinggi, seperti 20%, memiliki nilai modulus *Young* yang lebih rendah, sehingga busa tersebut lebih fleksibel dan memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan aquades dalam formulasi busa poliuretan dapat mengubah sifat mekanik busa, seperti kekakuan dan kekuatan. Dalam penelitian ini, semakin tinggi konsentrasi aquades yang digunakan, semakin rendah nilai modulus *Young* dan nilai kuat tekan busa poliuretan. Informasi ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan formulasi busa poliuretan sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu, di mana kekakuan dan kekuatan yang berbeda-beda diperlukan.

4.2.2 Analisis Hasil Pengujian Densitas

Pengujian densitas pada busa poliuretan dilakukan dengan tujuan untuk mengukur massa dan volume dari masing-masing spesimen busa. Metode yang umum digunakan adalah metode Archimedes, yang

didasarkan pada prinsip bahwa massa benda yang terendam dalam fluida akan mengalami perubahan akibat gaya apung yang diberikan oleh fluida tersebut. Pada pengujian ini, standar yang digunakan adalah ASTM D1622, yang memberikan pedoman untuk pengujian densitas busa poliuretan. Alat yang digunakan adalah *analytical balance* AS 220.R2, yang memiliki tingkat akurasi dan ketelitian yang memadai untuk mengukur massa dengan tepat. Dalam pengujian densitas, komposisi aquades dalam formulasi busa poliuretan memainkan peran penting dalam menentukan nilai densitas busa yang dihasilkan. Pada tabel 4.2, terlihat bahwa semakin besar komposisi aquades yang digunakan, nilai densitas busa cenderung semakin kecil. Hal ini dapat dijelaskan dengan cara berikut, saat aquades bereaksi dengan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*), gas karbon dioksida (CO₂) dihasilkan sebagai produk sampingan. Gas ini berperan sebagai *blowing agent* atau pendorong pembentukan pori dalam busa poliuretan. Semakin banyak aquades yang digunakan, semakin banyak gas CO₂ yang terbentuk, dan ini akan menyebabkan pembentukan pori-pori yang lebih banyak dalam busa. Pori-pori ini mengurangi kepadatan keseluruhan busa poliuretan karena meningkatkan volume busa tanpa menambahkan massa secara signifikan. Oleh karena itu, semakin besar komposisi aquades yang digunakan, semakin kecil nilai densitas busa poliuretan yang dihasilkan. Informasi ini penting dalam pengembangan busa poliuretan karena densitas busa dapat mempengaruhi sifat mekanik dan akustik busa. Dengan mengatur

komposisi aquades, para peneliti dan produsen dapat mengoptimalkan sifat fisik dan mekanik busa poliuretan sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang diinginkan.



Gambar 4.4 Pengaruh Penambahan Variasi Komposisi Aquades Terhadap Densitas Busa Poliuretan

Pada gambar 4.4 dapat terlihat bahwa semakin besar komposisi aquades yang digunakan dapat menurunkan nilai densitas busa.. Busa dengan komposisi Aquades sebesar 1% dengan penambahan Surfaktan 2% memiliki nilai densitas sebesar 0,139370 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Aquades 10% dengan penambahan Surfaktan 2% busa memiliki nilai densitas sebesar 0,055929 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Aquades 20% dengan penambahan Surfaktan 2% memiliki nilai densitas sebesar 0,090007 gram/cm³. Busa dengan komposisi Aquades sebesar 1% dengan penambahan Surfaktan 10% memiliki nilai densitas sebesar 0,116657 gram/cm³. Pada komposisi penambahan

Aquades sebesar 10% dengan penambahan Surfaktan 10% memiliki nilai densitas sebesar 0,060683 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Aquades sebesar 20% dengan penambahan Surfaktan 10% memiliki nilai densitas sebesar 0,053263 gram/cm³. Busa dengan komposisi Aquades sebesar 1% dengan penambahan Surfaktan 18% memiliki nilai densitas sebesar 0,112617 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Aquades sebesar 10% dengan penambahan Surfaktan 18% memiliki nilai densitas sebesar 0,051448 gram/cm³. Pada komposisi penambahan penambahan Aquades sebesar 20% dengan penambahan Surfaktan 18% memiliki nilai densitas sebesar 0.050458 gram/cm³. Data yang didapatkan ini kurang sesuai dengan literatur yang ada, karena pada komposisi aquades sebesar 10% busa memiliki nilai densitas lebih rendah jika dibandingkan dengan komposisi aquades sebesar 20% berdasarkan grafik, seharusnya dimana semakin besar komposisi aquades yang digunakan maka nilai densitasnya menurun [42].

4.3 Pengaruh Komposisi Surfaktan Terhadap Busa Poliuretan

Penambahan surfaktan silikon dalam pembuatan busa poliuretan memiliki beberapa fungsi penting. Salah satu fungsi utama surfaktan silikon adalah sebagai stabilizer. Surfaktan membantu mencapai keseragaman dan struktur sel yang baik pada busa poliuretan yang terbentuk. Dalam konteks ini, surfaktan silikon membantu mencegah terbentuknya sel-sel yang terlalu besar atau terlalu kecil, sehingga menciptakan struktur sel yang seragam dan konsisten. Selain itu,

surfaktan juga berperan sebagai agen pengemulsi atau emulsifier yang membantu mencampurkan komponen yang tidak saling larut dalam sistem poliuretan. Surfaktan memiliki sifat amfifilik, yang berarti memiliki dua bagian yang berbeda: hidrofilik (suka air) dan hidrofobik (tidak suka air) [29]. Bagian hidrofilik surfaktan berinteraksi dengan fase air atau aquades yang ditambahkan sebagai *blowing agent*, sementara bagian hidrofobik surfaktan berinteraksi dengan fase poliuretan yang terdiri dari *castor oil* dan MDI. Dengan adanya surfaktan, molekul-molekul yang seharusnya tidak saling larut dapat terdispersi dengan baik dalam sistem poliuretan, sehingga membantu mencapai homogenitas dan stabilitas yang baik. Data mengenai pengaruh komposisi surfaktan silikon terhadap pembentukan busa poliuretan dapat ditemukan pada Tabel 4.4. Tabel ini memberikan informasi tentang komposisi surfaktan silikon yang berbeda dan dampaknya terhadap sifat-sifat busa yang terbentuk, seperti densitas, kekuatan tekan, atau modulus *young*. Dengan mempelajari tabel tersebut, kita dapat memahami bagaimana variasi komposisi surfaktan silikon mempengaruhi karakteristik busa poliuretan yang dihasilkan, dan hal ini dapat membantu dalam memilih komposisi yang sesuai untuk aplikasi tertentu. Penggunaan surfaktan silikon dalam pembuatan busa poliuretan memberikan keuntungan dalam mencapai keseragaman, struktur sel yang baik, dan kompatibilitas bahan yang lebih baik. Namun, penting untuk dicatat bahwa pemilihan komposisi surfaktan silikon harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi dan harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti sifat fisik dan mekanik yang diinginkan dari busa poliuretan yang akan dibuat.

Tabel 4.4 Hasil Busa Poliuretan dengan Variasi Komposisi Surfaktan

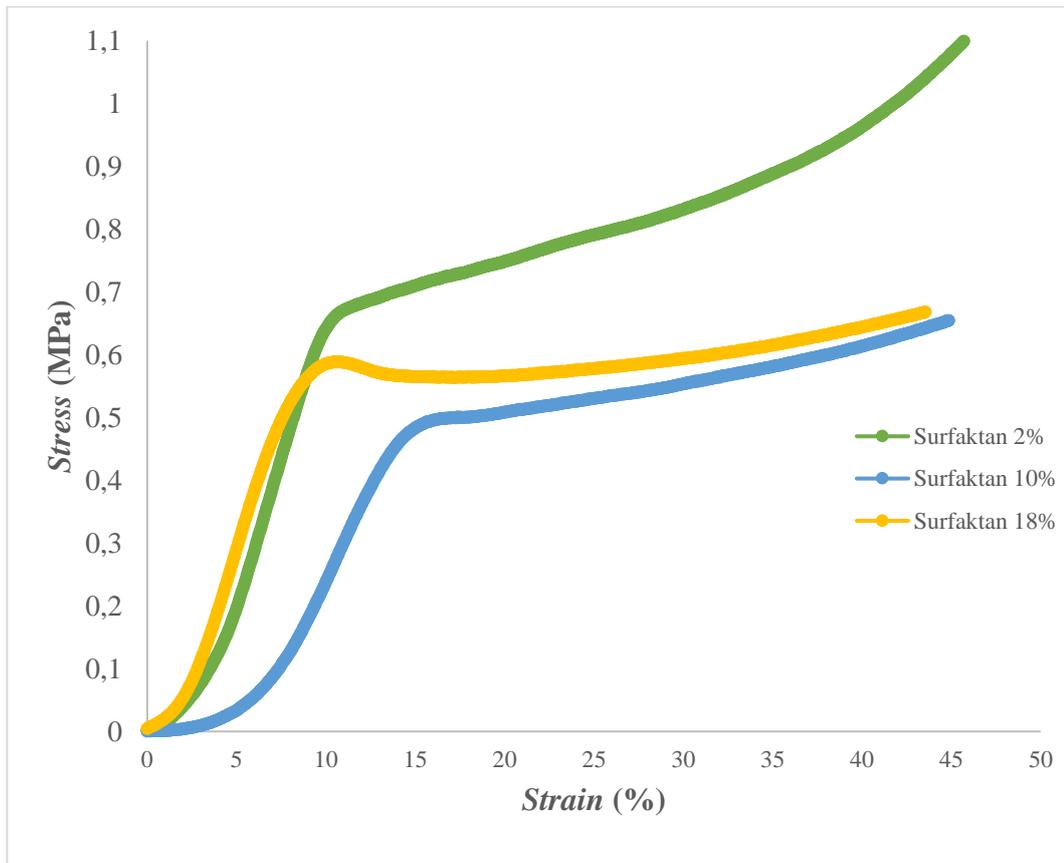
Komposisi Aquades (pphp)	Komposisi Surfaktan (pphp)	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Young (MPa)	Densitas (gram/cm³)	Jenis Busa
1%	2%	0,81	2,6012	0,139370	<i>Rigid</i>
1%	10%	0,53	1,5391	0,116657	<i>Rigid</i>
1%	18%	0,59	1,5979	0,112617	<i>Rigid</i>
10%	2%	0,21	0,5227	0,055929	<i>Semi Rigid</i>
10%	10%	0,23	0,6451	0,060683	<i>Rigid</i>
10%	18%	0,16	0,3789	0,051448	<i>Semi Rigid</i>
20%	2%	0,12	0,3733	0,090007	<i>Flexible</i>
20%	10%	0,13	0,3295	0,053263	<i>Flexible</i>
20%	18%	0,16	0,3529	0,050458	<i>Flexible</i>

4.3.1 Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pada pengujian kuat ini, tujuannya adalah untuk menganalisis pengaruh surfaktan silikon terhadap kekuatan busa poliuretan yang telah dibuat. Berdasarkan literatur yang ada [44], apabila komposisi surfaktan silikon yang digunakan lebih besar dibandingkan dengan komposisi *blowing agent* yang digunakan (aquades), maka busa yang terbentuk cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan komposisi surfaktan yang lebih kecil daripada komposisi *blowing agent*. Dalam pengujian ini, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.4 yang

memberikan informasi mengenai kekuatan busa poliuretan yang terbentuk dengan variasi komposisi surfaktan silikon. Tabel ini mencantumkan nilai kuat tekan untuk komposisi surfaktan silikon 2%, 10%, dan 18% dengan komposisi aquades 1%, 10% dan 20%. Selanjutnya, grafik tegangan dan regangan dapat digunakan untuk memvisualisasikan hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dari masing-masing sampel busa poliuretan. Grafik ini menunjukkan perubahan tegangan terhadap regangan yang diberikan pada sampel busa, dan dari grafik ini dapat diperoleh nilai modulus *Young* yang merupakan ukuran kekakuan materi.

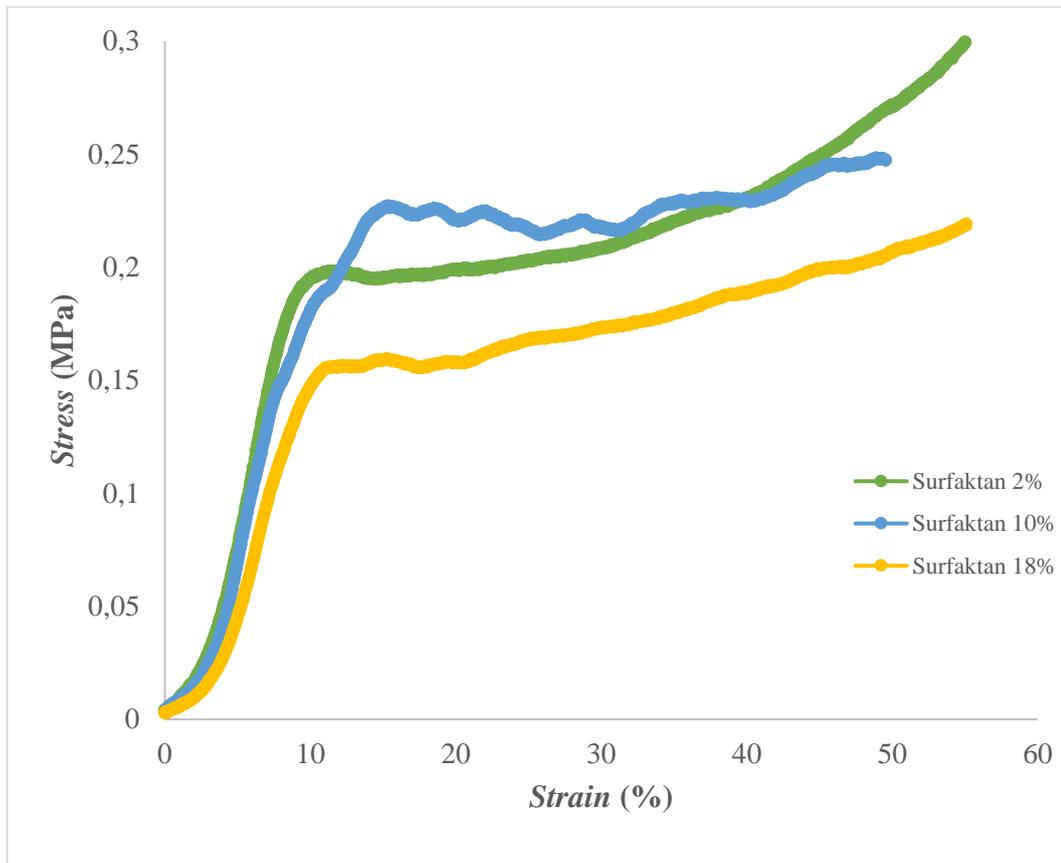
Dalam gambar 4.5, dapat dilihat grafik tegangan-regangan untuk komposisi aquades 1% dengan komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18%. Dari grafik tersebut, kita dapat menentukan nilai modulus *Young* dengan menghitung kemiringan garis regresi *linear* yang mewakili perilaku elastis material. Nilai modulus *Young* kemudian dapat digunakan untuk mengevaluasi kekakuan dan sifat mekanik dari busa poliuretan yang terbentuk. Dalam konteks ini, jika komposisi surfaktan silikon meningkat, maka busa poliuretan cenderung memiliki kekuatan yang lebih tinggi. Namun, perlu dicatat bahwa selain komposisi surfaktan silikon, faktor-faktor lain seperti komposisi *blowing agent* (aquades) dan parameter pembuatan busa juga dapat memengaruhi kekuatan dan sifat mekanik busa poliuretan yang terbentuk.



Gambar 4.5 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Surfaktan 2%, 10%, dan 18% dengan Komposisi Aquades 1%

Data tersebut merupakan hasil dari pengujian kuat tekan menggunakan komposisi aquades 1% dengan variasi komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18%. Dalam grafik tegangan regangan (gambar 4.5), dapat dilihat hubungan antara tegangan dan regangan dari masing-masing sampel busa poliuretan, serta nilai modulus *Young* yang diperoleh dari grafik tersebut. Berdasarkan data yang disajikan dalam tabel 4.4, nilai kuat tekan untuk komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18% secara berturut-turut adalah 0,81 MPa, 0,53 MPa, dan 0,59 MPa. Berdasarkan grafik nilai

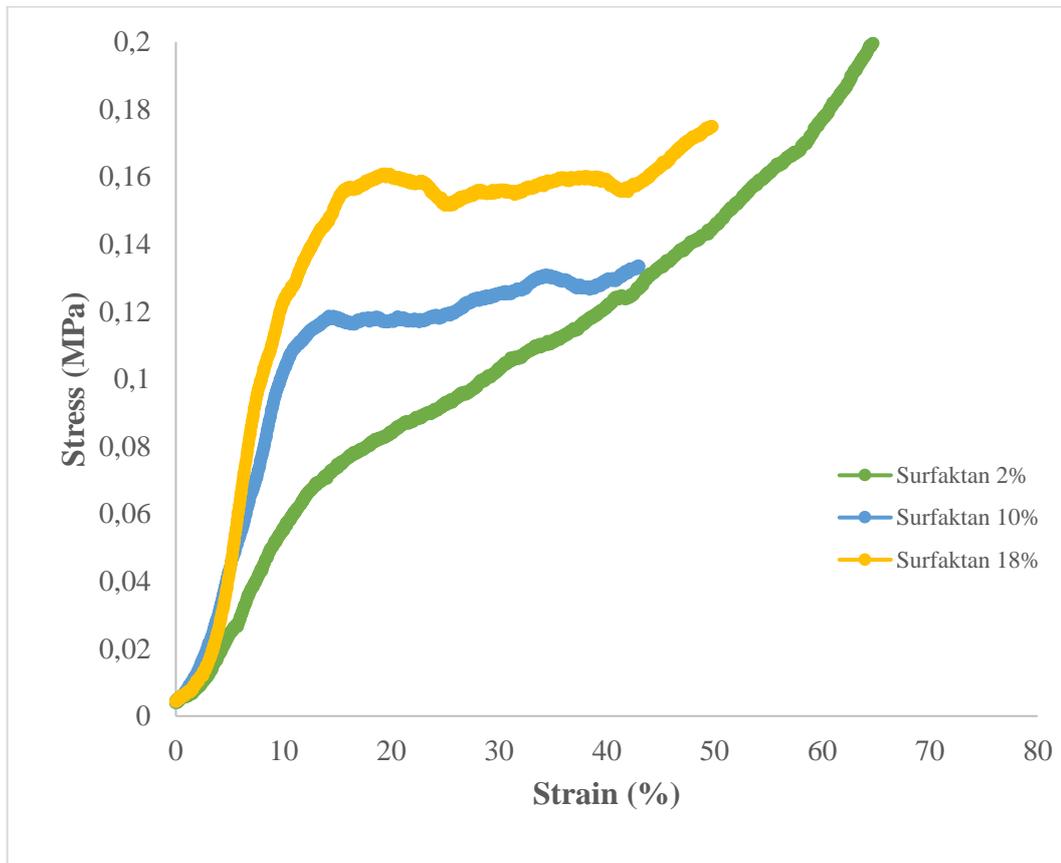
modulus *Young* pada komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18% adalah 2,6012 MPa, 1,5391 MPa, dan 1,5979 MPa. Dalam hal ini, terdapat ketidaksesuaian antara nilai kuat tekan pada busa dengan komposisi surfaktan 2% dengan literatur yang disebutkan sebelumnya. Biasanya, nilai kuat tekan pada komposisi surfaktan yang lebih rendah seharusnya lebih kecil dibandingkan dengan komposisi surfaktan yang lebih tinggi. Penyebab ketidaksesuaian tersebut dapat disebabkan oleh proses pengadukan yang tidak homogen selama pembuatan busa, sehingga saat proses *curing*, busa yang dihasilkan memiliki kekerasan yang tidak merata. Hal ini dapat mengakibatkan variasi dalam nilai kuat tekan busa. Namun, pada busa dengan komposisi surfaktan 10% dan 18%, data tersebut sesuai dengan literatur yang disebutkan sebelumnya [44]. Ini mengindikasikan bahwa semakin kecil nilai modulus *Young* dari busa, maka busa cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah, dan sebaliknya, semakin besar nilai modulus *Young*, busa cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi.



Gambar 4.6 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Surfaktan 2%, 10%, dan 18% dengan Komposisi Aquades 10%

Data tersebut merupakan hasil dari pengujian kuat tekan menggunakan komposisi aquades 10% dengan variasi komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18%. Dalam grafik tegangan regangan (gambar 4.6), dapat dilihat hubungan antara tegangan dan regangan dari masing-masing sampel busa poliuretan, serta nilai modulus *Young* yang diperoleh dari grafik tersebut. Berdasarkan data yang disajikan dalam tabel 4.4, nilai kuat tekan untuk komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18% secara berturut-turut adalah 0,21 MPa, 0,23 MPa, dan 0,16 MPa. Berdasarkan grafik nilai modulus *Young* pada komposisi surfaktan 2%, 10%, dan

18% adalah 0,5227 MPa, 0,6451 MPa, dan 0,3789 MPa. Dalam hal ini, terdapat ketidaksesuaian antara nilai kuat tekan pada busa dengan komposisi surfaktan 18% dengan literatur yang disebutkan sebelumnya. Biasanya, nilai kuat tekan pada komposisi surfaktan yang lebih tinggi seharusnya lebih besar dibandingkan dengan komposisi surfaktan yang lebih rendah. Penyebab ketidaksesuaian tersebut dapat disebabkan oleh proses pengadukan yang tidak homogen selama pembuatan busa, sehingga saat proses *curing*, busa yang dihasilkan memiliki kekerasan yang tidak merata. Hal ini dapat mengakibatkan variasi dalam nilai kuat tekan busa. Namun, pada busa dengan komposisi surfaktan 2% dan 10%, data tersebut sesuai dengan literatur yang disebutkan sebelumnya [44]. Ini mengindikasikan bahwa semakin kecil nilai modulus *Young* dari busa, maka busa cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah, dan sebaliknya, semakin besar nilai modulus *Young*, busa cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi.



Gambar 4.7 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Surfaktan 2%, 10%, dan 18% dengan Komposisi Aquades 20%

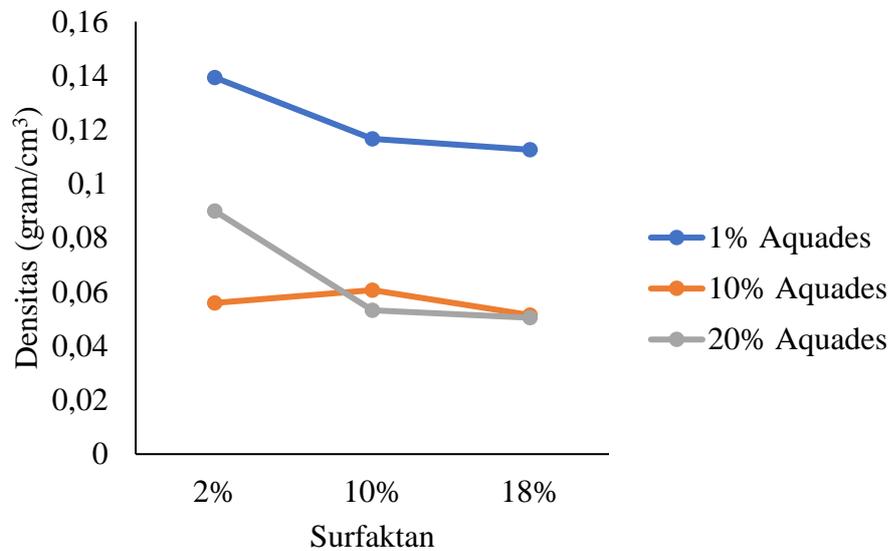
Data tersebut merupakan hasil pengujian kuat tekan menggunakan komposisi aquades 20% dengan variasi komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18%. Dalam gambar 4.7, terdapat grafik tegangan regangan yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan dari masing-masing sampel busa poliuretan, serta nilai modulus *Young* yang diperoleh dari grafik tersebut. Berdasarkan grafik nilai modulus *Young* pada komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18% secara berturut-turut adalah 0,12 MPa, 0,13 MPa, dan 0,16 MPa. Sedangkan data yang terdapat dalam tabel

4.4 nilai modulus *Young* untuk komposisi surfaktan 2%, 10%, dan 18% adalah 0,3733 MPa, 0,3295 MPa, dan 0,3529 MPa. Apabila nilai modulus *Young* dan nilai kuat tekan dibandingkan, data tersebut sesuai dengan literatur yang telah disebutkan sebelumnya [44]. Prinsip yang dijelaskan sebelumnya menyatakan bahwa semakin kecil nilai modulus *Young* dari busa, maka busa cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Sebaliknya, jika nilai modulus *Young* busa semakin besar, maka busa cenderung memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi. Hal ini dapat dijelaskan oleh karakteristik mekanik busa poliuretan. Modulus *Young* merupakan ukuran kekakuan atau kekakuan relatif dari suatu bahan, sedangkan kuat tekan adalah kemampuan bahan untuk menahan gaya terhadap deformasi. Ketika nilai modulus *Young* semakin kecil, busa poliuretan menjadi lebih elastis dan mudah terdeformasi, sehingga nilai kuat tekannya cenderung lebih rendah. Sebaliknya, jika nilai modulus *Young* semakin besar, busa poliuretan menjadi lebih kaku dan kurang terdeformasi, sehingga nilai kuat tekannya cenderung lebih tinggi.

4.3.2 Analisis Hasil Pengujian Densitas

Dalam penelitian yang dilakukan oleh [45], bahwa semakin besar komposisi surfaktan dapat menurunkan nilai densitas busa poliuretan. Dalam konteks ini, surfaktan berfungsi sebagai bahan tambahan dalam pembuatan busa poliuretan untuk mempengaruhi sifat fisik busa, termasuk densitas. Surfaktan merupakan senyawa yang memiliki dua bagian, yaitu hidrofilik (suka air) dan hidrofobik (tidak suka air). Dalam proses

pembuatan busa poliuretan, surfaktan silikon digunakan sebagai stabilizer yang berpengaruh terhadap keseragaman dan struktur sel busa. Selain itu, surfaktan juga dapat digunakan untuk mencampurkan komponen yang tidak saling larut. Dalam konteks densitas, penggunaan surfaktan silikon dalam komposisi busa poliuretan dapat menghasilkan efek pengurangan densitas busa. Hal ini terjadi karena surfaktan, melalui sifat hidrofilik dan hidrofobiknya, mempengaruhi reaksi dan distribusi gas *blowing agent* (agen pembentuk pori) dalam busa. Penggunaan surfaktan silikon dalam jumlah yang lebih besar dapat menyebabkan peningkatan pembentukan pori dan dispersi yang lebih baik dari gas *blowing agent* dalam busa poliuretan. Hal ini menghasilkan peningkatan jumlah dan ukuran pori dalam struktur busa, sehingga densitas busa menjadi lebih rendah. Berdasarkan buku "*Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams*" surfaktan berfungsi sebagai stabilisasi dinding sel, sehingga apabila komposisi surfaktan yang digunakan lebih besar maka dinding sel akan semakin stabil sehingga membentuk *closed cell* atau dinding sel tertutup [28].



Gambar 4.8 Pengaruh Penambahan Variasi Komposisi Surfaktan Terhadap Densitas Busa Poliuretan

Pada gambar 4.8, terlihat bahwa semakin besar komposisi surfaktan yang digunakan dalam pembuatan busa poliuretan, nilai densitas busa tersebut menurun. Busa dengan komposisi Surfaktan sebesar 2% dengan penambahan Aquades 1% memiliki nilai densitas sebesar 0,139370 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Surfaktan sebesar 10% dengan penambahan Aquades 1% busa memiliki nilai densitas sebesar 0,116657 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Surfaktan sebesar 18% dengan penambahan Aquades 1% memiliki nilai densitas sebesar 0,112617 gram/cm³. Busa dengan komposisi Surfaktan sebesar 2% dengan penambahan Aquades 10% memiliki nilai densitas sebesar 0,055929 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Surfaktan sebesar 10% dengan penambahan Aquades 10% memiliki nilai densitas sebesar 0,060683

gram/cm³. Pada komposisi penambahan Surfaktan sebesar 18% dengan penambahan Aquades 10% memiliki nilai densitas sebesar 0,051448 gram/cm³. Busa dengan komposisi Surfaktan sebesar 2% dengan penambahan Aquades 20% memiliki nilai densitas sebesar 0,090007 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Surfaktan sebesar 10% dengan penambahan Aquades 20% memiliki nilai densitas sebesar 0,053263 gram/cm³. Pada komposisi penambahan Surfaktan sebesar 18% dengan penambahan Aquades 20% memiliki nilai densitas sebesar 0,050458 gram/cm³. Data ini sesuai dengan literatur penelitian yang telah dilakukan oleh [45], bahwa semakin besar komposisi surfaktan dapat menurunkan nilai densitas busa poliuretan. Surfaktan silikon, yang digunakan sebagai bahan tambahan dalam pembuatan busa poliuretan, memiliki peran penting dalam mempengaruhi sifat fisik busa, termasuk densitas. Selain itu, surfaktan juga memiliki kemampuan untuk mencampurkan komponen yang tidak saling larut dalam sistem poliuretan. Dalam konteks densitas, penggunaan surfaktan silikon dalam komposisi busa poliuretan menghasilkan efek pengurangan densitas busa. Mekanisme di balik pengurangan densitas busa oleh surfaktan dapat dijelaskan saat surfaktan ditambahkan ke dalam campuran poliuretan, bagian hidrofilik dari molekul surfaktan akan berinteraksi dengan fase air atau fase air-dalam-udara dalam sistem. Sementara itu, bagian hidrofobik dari surfaktan akan berinteraksi dengan fase poliuretan. Interaksi ini membantu memperbaiki dispersi bahan-bahan dalam sistem dan memfasilitasi

pembentukan pori yang lebih homogen dan terdistribusi dengan baik. Pengurangan densitas busa yang dihasilkan oleh surfaktan silikon berkaitan dengan pengaturan pembentukan pori. Semakin besar komposisi surfaktan yang digunakan, semakin efektif proses dispersi dan pembentukan pori dalam busa poliuretan. Sebagai akibatnya, ukuran dan distribusi pori dalam busa menjadi lebih konsisten, yang mengarah pada penurunan densitas keseluruhan busa.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu sebagai berikut.

- a. Proses pembuatan busa poliuretan dengan menggunakan *castor oil* sebagai polioliol. Pada proses pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan mereaksikan polioliol dengan aquades, surfaktan silikon, dan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*). Aquades berperan sebagai *blowing agent* yang berfungsi untuk mengembangkan busa, surfaktan silikon berperan sebagai surfaktan yang berfungsi untuk mengurangi tegangan permukaan serta untuk melarutkan aquades dengan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*) sehingga dapat menghasilkan 3 jenis busa poliuretan diantaranya yaitu *rigid*, *semi-rigid*, dan *flexible*.
- b. Semakin besar komposisi aquades yang diberikan, semakin banyak gas CO₂ yang terbentuk. Penambahan gas CO₂ yang lebih banyak mengakibatkan busa poliuretan mengembang lebih besar. Penambahan yang berlebihan dari aquades dapat mengakibatkan penurunan kekuatan mekanik busa poliuretan. Penambahan yang berlebihan dari aquades dapat menurunkan densitas busa poliuretan. Dengan demikian, peningkatan komposisi aquades dapat menurunkan kekuatan dan densitas dari busa poliuretan.

- c. Pada komposisi surfaktan 2% dan variasi aquades 1%, 10% dan 20% memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,81 MPa, 0,21 MPa, dan 0,12 MPa dengan nilai densitas rata-rata sebesar 0,139370 gram/cm³, 0,055929 gram/cm³, 0,090007 gram/cm³. Pada komposisi surfaktan 10% dan variasi aquades 1%, 10% dan 20% memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,53 MPa, 0,23 MPa, dan 0,13 MPa dengan nilai densitas rata-rata sebesar 0,116657 gram/cm³, 0,060683 gram/cm³, 0,053263 gram/cm³. Pada komposisi surfaktan 18% dan variasi aquades 1%, 10% dan 20% memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,59 MPa, 0,16 MPa, dan 0,16 MPa dengan nilai densitas rata-rata sebesar 0,112617 gram/cm³, 0,051448 gram/cm³, 0,050458 gram/cm³
- d. Semakin besar komposisi surfaktan silikon yang diberikan, semakin seragam ukuran sel pori pada busa poliuretan. Struktur *close cell* pada busa poliuretan menghasilkan pori-pori yang lebih kecil dan teratur. Ukuran sel pori yang seragam dapat meningkatkan kekuatan busa poliuretan. Ukuran sel pori yang seragam juga dapat menurunkan densitas busa poliuretan. Dengan demikian, peningkatan komposisi surfaktan silikon dapat meningkatkan kekuatan busa poliuretan dan pada saat yang sama menurunkan densitasnya.
- e. Pada komposisi aquades 1% dan variasi surfaktan 2%, 10% dan 18% memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,81 MPa, 0,53 MPa, dan 0,59 MPa dengan nilai densitas rata-rata sebesar 0,139370

gram/cm³, 0,116657 gram/cm³, 0,112617 gram/cm³. Pada komposisi aquades 10% dan variasi surfaktan 2%, 10% dan 18% memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,21 MPa, 0,23 MPa, dan 0,16 MPa dengan nilai densitas rata-rata sebesar 0,055929 gram/cm³, 0,060683 gram/cm³, 0,051448 gram/cm³. Pada komposisi aquades 20% dan variasi surfaktan 2%, 10% dan 18% memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,12 MPa, 0,13 MPa, dan 0,16 MPa dengan nilai densitas rata-rata sebesar 0,090007 gram/cm³, 0,053263 gram/cm³, 0,050458 gram/cm³.

5.2 Saran

Adapun saran yang direkomendasikan penulis untuk penelitian selanjutnya dengan topik serupa adalah sebagai berikut.

- a. Menggunakan cetakan yang tertutup untuk membandingkan hasil busa dari cetakan terbuka dan tertutup. Untuk memahami pengaruh udara luar pada proses ekspansi busa poliuretan, disarankan untuk melakukan perbandingan hasil busa antara cetakan terbuka dan tertutup.
- b. Menggunakan *magnetic stirrer* pada saat proses pengadukan, agar kecepatan dalam proses pengadukan lebih stabil, dan juga homogen. Untuk meningkatkan kestabilan dan homogenitas proses pengadukan, direkomendasikan untuk menggunakan *magnetic stirrer*.

- c. Pada saat ingin mengirimkan sampel untuk diuji, diukur kembali agar dimensi sampel sama satu dengan yang lainnya. Untuk menjaga keseragaman dimensi sampel yang dikirimkan untuk pengujian, sebaiknya dilakukan pengukuran ulang sebelum pengiriman. Hal ini akan memastikan bahwa semua sampel memiliki dimensi yang sama dan meminimalkan variabilitas yang mungkin terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yeboah, A., Ying, S., Lu, J., Xie, Y., Amoanimaa-Dede, H., Boateng, K. G. A., & Yin, X., "Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the chemical composition and physicochemical properties," *Food Science and Technology*, vol. 41, pp. 399-413., 2020.
- [2] Carriço, C. S., Fraga, T., & Pasa, V. M., "Production And Characterization Of Polyurethane Foams From A Simple Mixture Of Castor Oil, Crude Glycerol And Untreated Lignin As Bio-Based Polyols.," *European Polymer Journal*, vol. 85, pp. 53–61, 2016.
- [3] Seo, W. J., Park, J. H., Sung, Y. T., Hwang, D. H., Kim, W. N., & Lee, H. S., "Properties of water-blown rigid polyurethane foams with reactivity of raw materials.," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 93, no. 5, pp. 2334–2342, 2004.
- [4] Singh, I., Samal, S. K., Mohanty, S., & Nayak, S. K., "Recent advancement in plant oil derived polyol-based polyurethane foam for future perspective: a review," *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 122, no. 3, p. 1900225, 2020.
- [5] Lee, J. H., Kim, S. H., & Oh, K. W., "Bio-based polyurethane foams with castor oil based multifunctional polyols for improved compressive properties," *Polymers*, vol. 13, no. 4, p. 576, 2021.
- [6] Ionescu, M., Radojčić, D., Wan, X., Shrestha, M. L., Petrović, Z. S., & Upshaw, T. A. ., "Highly functional polyols from castor oil for rigid polyurethanes," *European Polymer Journal*, vol. 84, pp. 736–749, 2016.
- [7] Liao, Y. H., Su, Y. L., & Chen, Y. C., "The influence of neem oil and its glyceride on the structure and characterization of castor oil-based polyurethane foam," *Polymers*, vol. 13, no. 12, p. 2020, 2021.
- [8] Zhang, L., Zhang, M., Hu, L., & Zhou, Y. ., "Synthesis of rigid polyurethane foams with castor oil-based flame retardant polyols," *Industrial Crops and Products*, vol. 52, pp. 380–388, 2014.
- [9] Choe, K. H., Lee, D. S., Seo, W. J., & Kim, W. N. ., "Properties of rigid polyurethane foams with blowing agents and catalysts," *Polymer Journal*, vol. 5, no. 36, pp. 368–373, 2004.
- [10] Gurgel, D., Bresolin, D., Sayer, C., Cardozo Filho, L., & de Araújo, P. H. H., "Flexible Polyurethane Foams Produced From Industrial Residues And Castor Oil," *Industrial Crops and Products*, vol. 164, p. 113377, 2021.

- [11] Patel, V. R., Dumancas, G. G., Viswanath, L. C. K., Maples, R., & Subong, B. J. J. ., “Castor oil: properties, uses, and optimization of processing parameters in commercial production,” *Lipid Insights*, vol. 9, p. LPI-S40233, 2016.
- [12] Yusuf, A. K., Mamza, P. A. P., Ahmed, A. S., & Agunwa, U., “Physico-mechanical properties of rigid polyurethane foams synthesized from modified castor oil polyols,” *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 67, pp. 548–556, 2016.
- [13] Wang, H. J., Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Hu, J., Chen, H. W., & Czigány, T., “Biodegradable foam plastics based on castor oil,” *Biomacromolecules*, vol. 9, no. 2, pp. 615–623, 2008.
- [14] Li, Q. F., Feng, Y. L., Wang, J. W., Yin, N., Zhao, Y. H., Kang, M. Q., & Wang, X. W., “Preparation and properties of rigid polyurethane foam based on modified castor oil,” *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 45, no. 1, pp. 16–21, 2016.
- [15] Mutlu, H., & Meier, M. A., “Castor oil as a renewable resource for the chemical industry,” *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 112, no. 1, pp. 10–30, 2010.
- [16] Nekhavhambe, E., Mukaya, H. E., & Nkazi, D. B., “Development of castor oil-based polymers: A review,” *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, vol. 1, no. 4, Art. no. e10030, 2019.
- [17] K. Ashida, *Polyurethane and Related Foams*. CRC Press, 2006. [Online]. Available:http://books.google.ie/books?id=okvLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Ashida,+K.,+2007.+Polyurethane+And+Related+Foams.+London:+CRC+Press.&hl=&cd=1&source=gbs_api [Accessed 18 Mei 2023].
- [18] Lumcharoen, D. & Saravar, O., “Preparation And Characterization Of Flexible Polyurethane Foams From Palm Oil-Based Polyol,” *Trans Tech Publications*, vol. 911, pp. 352–356, 2014.
- [19] Grünbauer, H. J. M. et al., 2021. RIGID POLYURETHANE FOAMS. [Online] Availableat:https://www.researchgate.net/publication/300443114_Rigid_Polyurethane_Foams [Accessed 18 Mei 2023].
- [20] Svarn, 2010. Polyurethane Foam Slab Manufacturers in Delhi. [Online] Available at:<https://www.justdial.com/Delhi/Polyurethane-Foam-Slab-Manufacturers/nct11737277> [Accessed 18 Mei 2023].

- [21] Carriço, C. S., Fraga, T., Carvalho, V. E., & Pasa, V. M., “Polyurethane Foams For Thermal Insulation Uses Produced From Castor Oil And Crude Glycerol Biopolyols,” *Molecules*, vol. 22, no. 7, p. 1091, 2017.
- [22] Kim, R. Y., *Blowing Agent Introduction Systems and Methods*. Wilmington, Patent No. 20070141188. 2002.
- [23] Triwulandari, Astrini, N. & Haryono, A., Pembuatan Polioliol Berbasis Komponen Minyak Sawit Sebagai Bahan Baku Busa Poliuretana. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 16, Pp. 43-48. 2014.
- [24] Singh, H., Sharma, T. P., & Jain, A. K., “Reactivity of the raw materials and their effects on the structure and properties of rigid polyurethane foams,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 106, no. 2, pp. 1014–1023, 2007.
- [25] Prociak, A., Kurańska, M., Cabulis, U., Ryszkowska, J., Leszczyńska, M., Uram, K., & Kirpluks, M., “Effect of bio-polyols with different chemical structures on foaming of polyurethane systems and foam properties,” *Industrial Crops and Products*, vol. 120, pp. 262–272, 2018.
- [26] Yuan, J., & Shi, S. Q., “Effect of the addition of wood flours on the properties of rigid polyurethane foam,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 113, no. 5, pp. 2902–2909, 2009.
- [27] Liu, K., Huang, M., Wang, F., Liang, W., & Zhang, H., “Quantitative Analysis of Mechanical Strength of Three-Phase Rigid Polyurethane Foam Composites Immersed with Water,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 35, no. 2, p. 04022423, 2023.
- [28] C. Defonseka, *Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams*. Smithers Rapra Technology, 2013. [Online]. Available: http://books.google.ie/books?id=wh4ImwEACAAJ&dq=Defonseka,+C.,+2013.+Practical+Guide+To+Flexible+Polyurethane+Foams.+1st+Ed.+Shawbury:+Smithers+Rapra+Technology+Ltd.&hl=&cd=2&source=gbs_api [Accessed 18 Mei 2023].
- [29] Supriningsih, D., *Pembuatan Metil Ester Sulfonat (MES) sebagai Surfaktan untuk Enhanced Oil Recovery (EOR)*, Jakarta: Universitas Indonesia. 2010.
- [30] Xiangming, H. et al., “Effects of surfactants on the mechanical properties, microstructure, and flame resistance of phenol–urea–formaldehyde foam,” *Polymer Bulletin*, vol. 1, no. 73, pp. 1–20, 2015.
- [31] Lim, H. S. H. K., Kim, S. H., & Kim, B. K., “Effects of silicon surfactant in rigid polyurethane foams,” *Express Polym*, vol. 2, no. 3, pp. 194–200, 2008.

- [32] Han, M. S., Choi, S. J., Kim, J. M., Kim, Y. H., Kim, W. N., Lee, H. S., & Sung, J. Y. ., “Effects of silicone surfactant on the cell size and thermal conductivity of rigid polyurethane foams by environmentally friendly blowing agents,” *Macromolecular Research*, vol. 17, pp. 44–50, 2009.
- [33] ASTM, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. 2023.[Online] Available at: <https://www.astm.org/d1621-16.html> [Accessed 4 July 2023].
- [34] Linul, E., Marsavina, L., Voiconi, T., & Sadowski, T. Study of factors influencing the mechanical properties of polyurethane foams under dynamic compression. In *Journal of Physics: Conference Series*. vol. 451, no. 1, p. 012002). IOP Publishing. 2013, July.
- [35] ASTM, Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics. 2020. [Online] Available at: <https://www.astm.org/d1622-20.html> [Accessed 4 July 2023].
- [36] Bocz, K., Ronkay, F., Molnár, B., Vadas, D., Gyürkés, M., Gere, D., ... & Czigany, T., “Recycled PET foaming: Supercritical carbon dioxide assisted extrusion with real-time quality monitoring,” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, no. 3, pp. 178–186, 2021.
- [37] ASTM, Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis. 2021. [Online] Available at: <https://www.astm.org/e1252-98r21.html> [Accessed 4 July 2023].
- [38] Wang, Z., Li, J., & Zhang, M. FTIR Analysis Of The Isocyanate Reaction *Mechanisms In Polyurethane Foam Formation*. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 132, no. 12, p. 41697. 2015.
- [39] ASTM, Standard Practice for Scanning Electron Microscope Beam Size Characterization. 2017. [Online] Available at: <https://www.astm.org/e0986-04r17.html> [Accessed 4 July 2023].
- [40] Zhang, J., Liu, X., Song, Y., Li, J., & Li, D. *Morphology And Mechanical Properties Of Polyurethane Foams: Effects of foam density and isocyanate index*. *Materials*, vol. 11, no. 2, p. 254. 2018.
- [41] Lee, Y. J., Park, C. K., & Kim, S. H. Fabrication of castor-oil/polycaprolactone based bio-polyurethane foam reinforced with nanocellulose. *Polymer Composites*, vol. 39, no. 6, pp. 2004-2011. 2018.
- [42] Seo, W. J., Jung, H. C., Hyun, J. C., Kim, W. N., Lee, Y. B., Choe, K. H., & Kim, S. B. Mechanical, morphological, and thermal properties of rigid

polyurethane foams blown by distilled water. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 90, no. 1, pp. 12-21. 2003.

- [43] Jiulong Xie, Xianglin Zhai. 2015. Polyols from Microwave Liquefied Bagasse and Its Application to Rigid Polyurethane Foam. *Materials*, vol. 8, pp. 8496–8509. 2015.
- [44] Kaur, R., & Kumar, M. Function of silicon oil in the castor oil based rigid polyurethane foams. *Journal of Polymer Engineering*, vol. 33, no. 9, pp. 875-880. 2013.
- [45] Dhaliwal, G. S., Anandan, S., Bose, M., Chandrashekhara, K., & Nam, P. Effects Of Surfactants On Mechanical And Thermal Properties Of Soy-Based Polyurethane Foams. *Journal of Cellular Plastics*, vol. 56, no. 6, pp. 611-629. 2020.

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN

Lampiran A. Perhitungan

A.1 Volume MDI

- **Massa Poliuretan**

Massa Poliuretan = Volume Poliuretan x Massa Jenis Poliuretan

Massa Poliuretan = 100 ml x 1,45 gram/ml

Massa Poliuretan = 145 gram

- **Massa MDI**

$$\text{Massa MDI} = \frac{\text{Massa Poliuretan}}{2}$$

$$\text{Massa MDI} = \frac{145 \text{ gram}}{2} = 72,5 \text{ gram}$$

- **Volume MDI**

$$\text{Volume MDI} = \frac{\text{Massa MDI}}{\text{Densitas MDI}}$$

$$\text{Volume MDI} = \frac{72,5 \text{ gram}}{1,23 \text{ gram/ml}}$$

Volume MDI = 58,9 ml \approx 59 ml

- **Massa 10% MDI**

Massa 10% MDI = Massa MDI x 10%

Massa 10% MDI = 72,5 gram x 10% = 7,25 gram

- **Volume 10% MDI**

$$\text{Volume MDI} = \frac{\text{Massa MDI}}{\text{Densitas MDI}}$$

$$\text{Volume MDI} = \frac{7,25 \text{ gram}}{1,23 \text{ gram/ml}}$$

Volume MDI = 5,89 ml \approx 5,9 ml

- **Total Massa MDI**

$$\text{Total Massa MDI} = \text{Massa MDI} + \text{Massa 10\% MDI}$$

$$\text{Total Massa MDI} = 72,5 \text{ gram} + 7,25 \text{ gram} = 79,75 \text{ gram}$$

- **Volume Total MDI**

$$\text{Volume MDI} = \frac{\text{Massa MDI}}{\text{Densitas MDI}}$$

$$\text{Volume MDI} = \frac{79,75 \text{ gram}}{1,23 \text{ gram/ml}}$$

$$\text{Volume MDI} = 64,8 \text{ ml} \approx 64 \text{ ml}$$

A.2 Volume Poliol

$$\text{Volume Poliol} = 100 \text{ ml} - \text{volume MDI}$$

$$\text{Volume Poliol} = 100 \text{ ml} - 59 \text{ ml}$$

$$\text{Volume Poliol} = 41 \text{ ml}$$

A.3 Massa Aquades dan Surfaktan

- **Sampel 1 (1% Aquades 2% Surfaktan)**

$$\text{Massa Gelas Beaker kosong} = 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} + \text{Gelas Beaker} = 70,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} = 70,6 \text{ gram} - 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} = 35,6 \text{ gram}$$

Massa Aquades

$$\text{Massa Aquades} = 1\% \times \text{Massa Poliol}$$

$$\text{Massa Aquades} = 1\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Aquades} = 0,356 \text{ gram}$$

Massa Surfaktan

$$\text{Massa Surfaktan} = 2\% \times \text{Massa Poliol}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 2\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 0,712 \text{ gram}$$

- **Sampel 2 (1% Aquades 10% Surfaktan)**

$$\text{Massa Gelas Beaker kosong} = 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} + \text{Gelas Beaker} = 70,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} = 70,6 \text{ gram} - 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} = 35,6 \text{ gram}$$

Massa Aquades

$$\text{Massa Aquades} = 1\% \times \text{Massa Poliol}$$

$$\text{Massa Aquades} = 1\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Aquades} = 0,356 \text{ gram}$$

Massa Surfaktan

$$\text{Massa Surfaktan} = 10\% \times \text{Massa Poliol}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 10\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 3,56 \text{ gram}$$

- **Sampel 3 (1% Aquades 18% Surfaktan)**

$$\text{Massa Gelas Beaker kosong} = 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} + \text{Gelas Beaker} = 70,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} = 70,6 \text{ gram} - 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Poliol} = 35,6 \text{ gram}$$

Massa Aquades

$$\text{Massa Aquades} = 1\% \times \text{Massa Poliol}$$

$$\text{Massa Aquades} = 1\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Aquades} = 0,356 \text{ gram}$$

Massa Surfaktan

$$\text{Massa Surfaktan} = 18\% \times \text{Massa Polioliol}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 18\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 6,4 \text{ gram}$$

- **Sampel 4 (10% Aquades 2% Surfaktan)**

$$\text{Massa Gelas Beaker kosong} = 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Polioliol} + \text{Gelas Beaker} = 70,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Polioliol} = 70,6 \text{ gram} - 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Polioliol} = 35,6 \text{ gram}$$

Massa Aquades

$$\text{Massa Aquades} = 10\% \times \text{Massa Polioliol}$$

$$\text{Massa Aquades} = 10\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Aquades} = 3,56 \text{ gram}$$

Massa Surfaktan

$$\text{Massa Surfaktan} = 2\% \times \text{Massa Polioliol}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 2\% \times 35,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 0,712 \text{ gram}$$

- **Sampel 5 (10% Aquades 10% Surfaktan)**

$$\text{Massa Gelas Beaker kosong} = 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Polioliol} + \text{Gelas Beaker} = 70,6 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Polioliol} = 70,6 \text{ gram} - 35 \text{ gram}$$

$$\text{Massa Polioliol} = 35,6 \text{ gram}$$

Massa Aquades

$$\text{Massa Aquades} = 10\% \times \text{Massa Polioliol}$$

Massa Aquades = $10\% \times 35,6 \text{ gram}$

Massa Aquades = 3,56 gram

Massa Surfaktan

Massa Surfaktan = $10\% \times \text{Massa Polioliol}$

Massa Surfaktan = $10\% \times 35,6 \text{ gram}$

Massa Surfaktan = 3,56 gram

- **Sampel 6 (10% Aquades 18% Surfaktan)**

Massa Gelas Beaker kosong = 35 gram

Massa Polioliol + Gelas Beaker = 70,6 gram

Massa Polioliol = $70,6 \text{ gram} - 35 \text{ gram}$

Massa Polioliol = 35,6 gram

Massa Aquades

Massa Aquades = $10\% \times \text{Massa Polioliol}$

Massa Aquades = $10\% \times 35,6 \text{ gram}$

Massa Aquades = 3,56 gram

Massa Surfaktan

Massa Surfaktan = $18\% \times \text{Massa Polioliol}$

Massa Surfaktan = $18\% \times 35,6 \text{ gram}$

Massa Surfaktan = 6,4 gram

- **Sampel 7 (20% Aquades 2% Surfaktan)**

Massa Gelas Beaker kosong = 35 gram

Massa Polioliol + Gelas Beaker = 70,6 gram

Massa Polioliol = $70,6 \text{ gram} - 35 \text{ gram}$

Massa Polioliol = 35,6 gram

Massa Aquades

Massa Aquades = 20% x Massa Polioliol

Massa Aquades = 20% x 35,6 gram

Massa Aquades = 7,12 gram

Massa Surfaktan

Massa Surfaktan = 2% x Massa Polioliol

Massa Surfaktan = 2% x 35,6 gram

Massa Surfaktan = 0,712 gram

- **Sampel 8 (20% Aquades 10% Surfaktan)**

Massa Gelas Beaker kosong = 35 gram

Massa Polioliol + Gelas Beaker = 70,6 gram

Massa Polioliol = 70,6 gram – 35 gram

Massa Polioliol = 35,6 gram

Massa Aquades

Massa Aquades = 20% x Massa Polioliol

Massa Aquades = 20% x 35,6 gram

Massa Aquades = 7,12 gram

Massa Surfaktan

Massa Surfaktan = 10% x Massa Polioliol

Massa Surfaktan = 10% x 35,6 gram

Massa Surfaktan = 3,56 gram

- **Sampel 9 (20% Aquades 18% Surfaktan)**

Massa Gelas Beaker kosong = 35 gram

Massa Polioliol + Gelas Beaker = 70,6 gram

Massa Polioliol = 70,6 gram – 35 gram

Massa Polioliol = 35,6 gram

Massa Aquades

Massa Aquades = 20% x Massa Poliol

Massa Aquades = 20% x 35,6 gram

Massa Aquades = 7,12 gram

Massa Surfaktan

Massa Surfaktan = 18% x Massa Poliol

Massa Surfaktan = 18% x 35,6 gram

Massa Surfaktan = 6,4 gram

LAMPIRAN B
DATA DAN HASIL PENELITIAN

Lampiran B. Data Hasil Penelitian

B.1 Foam Yang Dihasilkan



Gambar B.1 Sampel 1% 2%



Gambar B.2 Sampel 1% 2% setelah dipotong



Gambar B.3 Sampel 1% 10%



Gambar B.4 Sampel 1% 10% setelah dipotong



Gambar B.5 Sampel 1% 18%



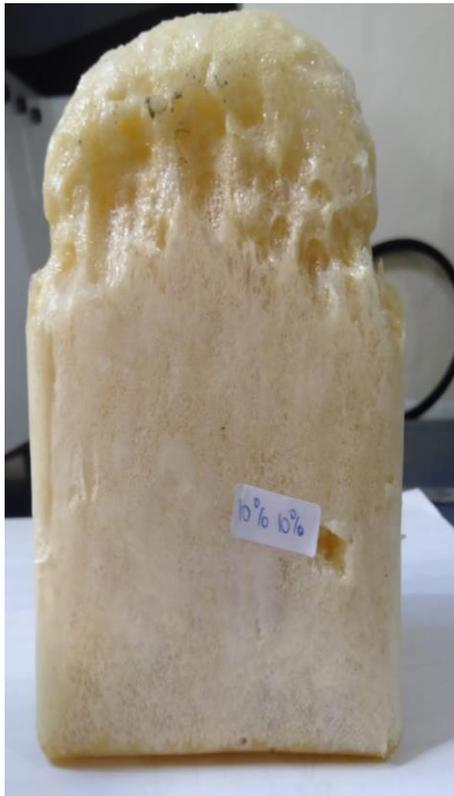
Gambar B.6 Sampel 1% 18% setelah dipotong



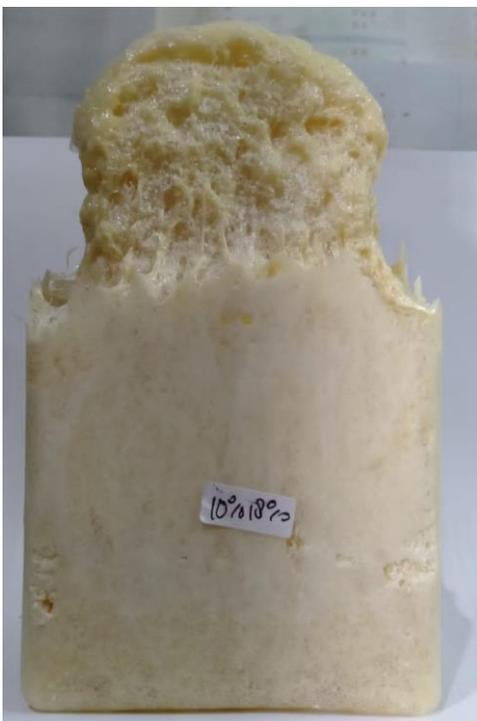
Gambar B.7 Sampel 10% 2%



Gambar B.8 Sampel 10% 2% setelah dipotong



Gambar B.9 Smpel 10% 10% **Gambar B.10** Sampel 10% 10% setelah dipotong



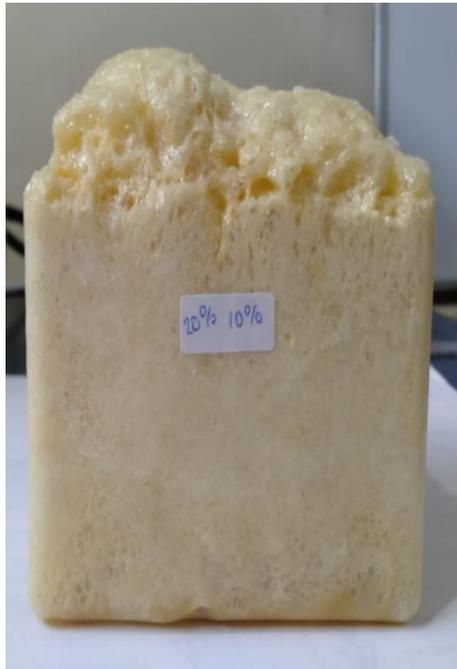
Gambar B.11 Sampel 10% 18% **Gambar B.12** Sampel 10% 18% setelah dipotong



Gambar B.13 Sampel 20% 2%



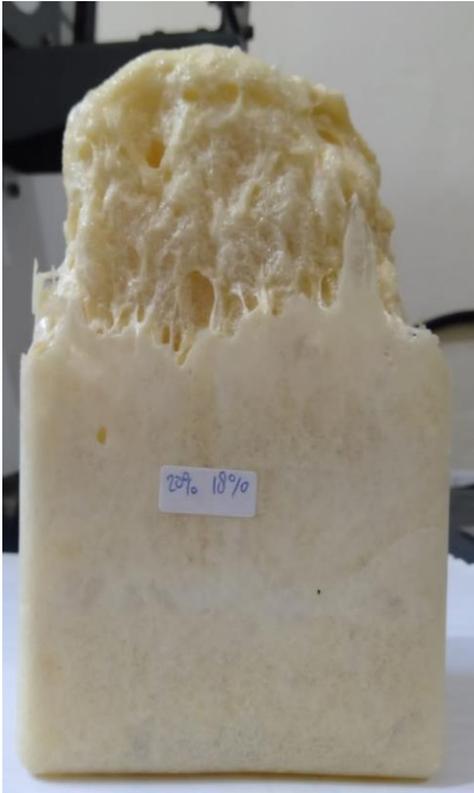
Gambar B.14 Sampel 20% 2% setelah dipotong



Gambar B.15 Sampel 20% 10%



Gambar B.16 Sampel 20% 10% setelah dipotong



Gambar B.17 Sampel 20% 18% **Gambar B.18** Sampel 20% 18% setelah dipotong

B.2 Data Densitas



PUSAT RISET METALURGI
Gedung Manajemen 720, Kawasan Sains dan Teknologi, B.J. Habibie
Setu, Tangerang Selatan, Banten, 15314
Surel: prm@brin.go.id, Laman: www.brin.go.id

LAPORAN PENGUJIAN

Penentuan Nilai Densitas Padatan Non Serbuk

Kode Sampel : Castor Oil-2 (Algi)
Deskripsi : -
Tgl. Terima sampel : 23/05/2023
Tgl. Pengujian : 05/06/2023
Alat Uji : Density Determination KIT 85 dengan Analytical Balance AS 220.R2

Data Hasil Pengujian

Jenis cairan : Aquadest Suhu cairan : 27 °C

Kode Sampel	Pengujian ke-			Nilai densitas (gram/cm ³)
	x-(1)	x-(2)	x-(3)	
1% 2%	0,147876	0,156231	0,114003	0,139370
1% 10%	0,122821	0,117195	0,109955	0,116657
1% 18%	0,116622	0,104867	0,116361	0,112617
10% 2%	0,060570	0,055000	0,052217	0,055929
10% 10%	0,069299	0,060007	0,052742	0,060683
10% 18%	0,052734	0,049022	0,052589	0,051448
20% 2%	0,086721	0,089481	0,093818	0,090007
20% 10%	0,059458	0,051228	0,049103	0,053263
20% 18%	0,054191	0,048374	0,048810	0,050458

*) Hasil pengujian hanya merepresentasikan kondisi sampel yang diuji.

Dilaksanakan oleh:	Bunga Rani Elvira, S.T.
Diperiksa oleh:	Aprilia Erryani, M.Si

Tgl. Terbit Laporan: 08/06/2023

Halaman 2/2

Gambar B.19 Data Uji Densitas

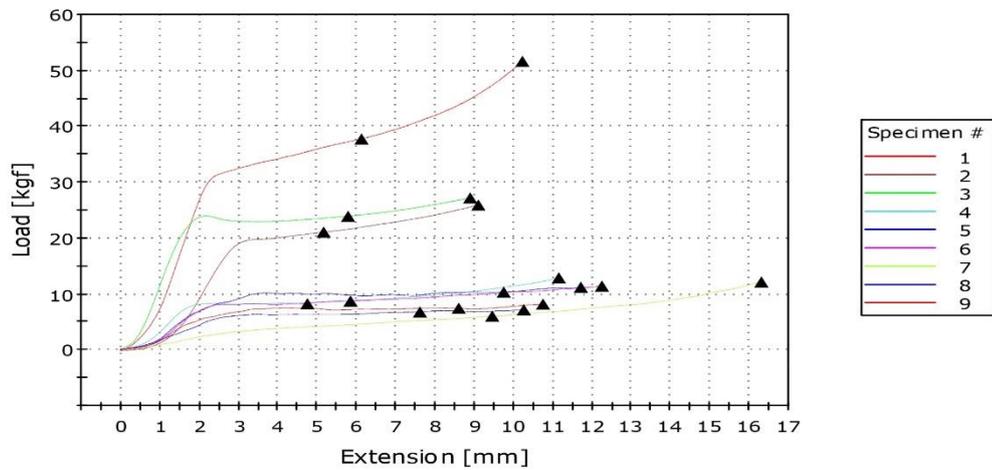
B.3 Kuat Tekan

TEST REPORT



No. Report	069/EXT/UNT/06/23
Test Method	ASTM D1621

Specimen 1 to 9



	Description	Width [mm]	Thickness [mm]	Maximum Load [kgf]	Load at Compressive Yield [N]	Compressive stress at Compressive Yield [MPa]
1	I	20.58	22.24	51.61	370.34	0.81
2	II	19.21	20.27	25.99	207.07	0.53
3	III	19.60	20.42	27.27	235.03	0.59
4	IV	20.86	19.95	12.95	86.28	0.21
5	V	18.59	23.92	11.27	102.21	0.23
6	VI	23.26	22.19	11.53	82.24	0.16
7	VII	21.21	22.78	12.24	60.10	0.12
8	VIII	22.45	23.85	7.29	67.76	0.13
9	IX	21.51	21.63	8.30	73.90	0.16

Gambar B.20 Data Uji Kuat Tekan

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan

C.1 Alat



Gambar C.1 Cetakan



Gambar C.2 *Cutter*



Gambar C.3 Gunting



Gambar C.4 Gelas Beker



Gambar C.5 Mata Gergaji



Gambar C.6 Pipet Tetes



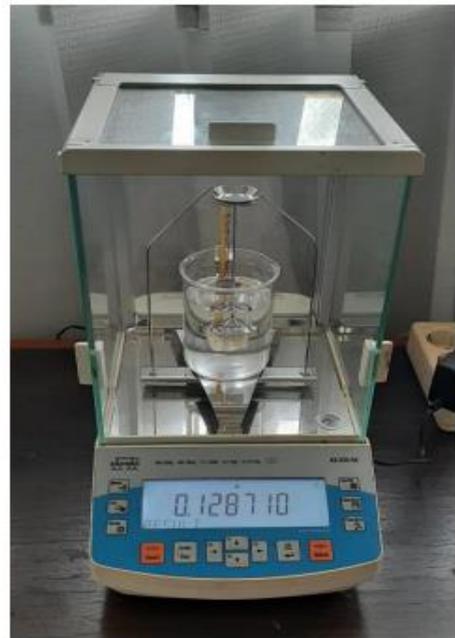
Gambar C.7 Plastik Sampel



Gambar C.8 Spatula *Metal*



Gambar C.9 Alat Pengujian Uji Tekan

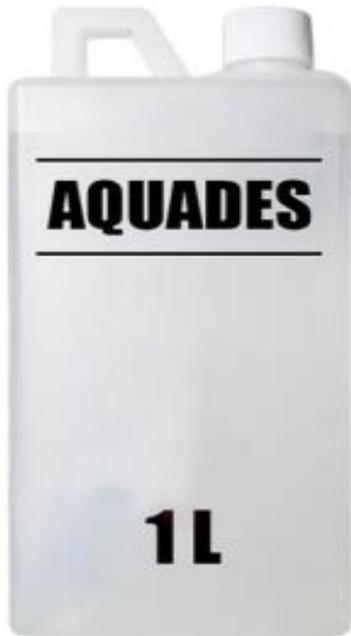


Gambar C.10 Alat Pengujian Densitas



Gambar C.11 Timbangan Digital

C.2 Bahan



Gambar C.12 Aquades



Gambar C.13 MDI



Gambar C.14 Castor Oil



Gambar C.15 Surfaktan Silikon