

**PENGARUH AKUADES DAN POLIOL TERHADAP MORFOLOGI,
DENSITAS, KUAT TEKAN, DAN MODULUS ELASTISITAS
BUSA POLIURETAN DENGAN PEMANFAATAN
CAMPURAN LIMBAH PLASTIK BERBASIS
*POLYETHYLENE DAN POLYPROPYLENE***

SKRIPSI

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



Oleh:

JAMES CANTIARA
3334190002

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

LEMBAR PENGESAHAN

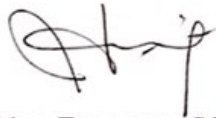
**PENGARUH AKUADES DAN POLIOL TERHADAP MORFOLOGI,
DENSITAS, KUAT TEKAN, DAN MODULUS ELASTISITAS
BUSA POLIURETAN DENGAN PEMANFAATAN
CAMPURAN LIMBAH PLASTIK BERBASIS
POLYETHYLENE DAN *POLYPROPYLENE***

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 AKUADES DAN POLIOL TERHADAP MORFOLOGI,
DENSITAS, KUAT TEKAN, DAN MODULUS ELASTISITAS
BUSA POLIURETAN DENGAN PEMANFAATAN
CAMPURAN LIMBAH PLASTIK BERBASIS
*POLYETHYLENE DAN POLYPROPYLENE***

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

James Cantiara

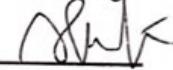
3334190002

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 7 Mei 2024

Susunan Dewan Penguji

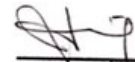
Tanda Tangan

Penguji I : **Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T., Ph.D**

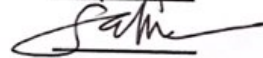


(Ketua Sidang)

Penguji II : **Adhitva Trenggono, S.T., M.Sc**



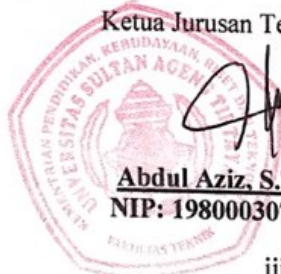
Penguji III : **Dr. Satrio Herbirowo, S.T., M.T**



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 AKUADES DAN POLIOL TERHADAP MORFOLOGI, DENSITAS, KUAT TEKAN, DAN MODULUS ELASTISITAS BUSA POLIURETAN DENGAN PEMANFAATAN CAMPURAN LIMBAH PLASTIK BERBASIS *POLYETHYLENE* DAN *POLYPROPYLENE*

Nama Mahasiswa : James Cantiera

NIM : 3334190002

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, 7 Mei 2024



JAMES CANTIARA
NIM. 3334190002

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membuat *polyurethane foam* yang dibuat dengan memanfaatkan botol plastik dari PET (*Polyethylene terephthalate*), plastik kresek HDPE (*High-Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), dan sedotan dari PP (*Polypropylene*) sebagai pengganti polioli. Botol limbah PET didaur ulang untuk membuat busa poliuretan dengan menggunakan metode glikolisis menghasilkan BHET (*bis(hydroxyethyl) terephthalate*) yang bisa digunakan sebagai pengganti polioli dalam pembuatan busa poliuretan. Proses pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan mereaksikan polioli dan isosianat berupa *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI) dengan tambahan variasi komposisi aquades sebagai *blowing agent* dan variasi komposisi surfaktan silikon sebagai surfaktan. Dari 6 sampel busa poliuretan yang di uji di dapatkan 4 busa jenis *rigid*. Hal ini dapat dilihat dari nilai kuat tekan serta nilai densitas yang didapat, busa poliuretan dari sampel PUR-11, PUR-21, PUR-22, dan PUR-23 memiliki nilai kuat tekan secara berturut-turut sebesar 0,32 MPa, 0,32 MPa, 0,49 MPa dan 0,39 MPa. Serta nilai densitas dengan rata-rata dihasilkan secara berturut-turut sebesar 0,05 gram/cm³, 0,07gram/cm³, 0,08 gram/cm³, dan 0,06 gram/cm³. Busa yang memiliki nilai kuat tekan dan densitas tertinggi didapatkan pada sampel PUR-22 yaitu sebesar 0,49 MPa dan 0,08 gram/cm³ karena dari kuat tekan berada di pertengahan untuk densitas adalah yang terendah, karena di perlukan busa yang kuat dan memiliki fleksibilitas yang cukup dimana menjadi suatu material yang banyak di cari oleh pasar busa.

Kata Kunci: Busa Poliuretan, PET, HDPE, LDPE, LLDPE, PP, Glikolisis

ABSTRACT

This research aims to make polyurethane foam which is made by using plastic bottles from PET (Polyethylene terephthalate), plastic bottles HDPE (High-Density Polyethylene), LDPE (Low Density Polyethylene), LLDPE (Linear Low Density Polyethylene), and straws from PP (Polypropylene) as a substitute for polyol. Waste PET bottles are recycled to make polyurethane foam using the glycolysis method to produce BHET (bis(hydroxyethyl) terephthalate) which can be used as a substitute for polyol in making polyurethane foam. The process of making polyurethane foam is carried out by reacting polyol and isocyanate in the form of Methylene Diphenyl Diisocyanate (MDI) with additional variations in the composition of distilled water as a blowing agent and variations in the composition of silicone surfactant as a surfactant. Of the 6 polyurethane foam samples tested, 4 types of rigid foam were obtained. This can be seen from the compressive strength values and density values obtained, polyurethane foam from samples PUR-11, PUR-21, PUR-22, and PUR-23 have compressive strength values respectively of 0.32 MPa, 0, 32 MPa, 0.49 MPa and 0.39 MPa. And the resulting average density values were 0.05 gram/cm³, 0.07gram/cm³, 0.08 gram/cm³, and 0.06 gram/cm³, respectively. The foam with the highest compressive strength and density values was found in the PUR-22 sample, namely 0.49 MPa and 0.08 gram/cm³ because the compressive strength is in the middle for the density is the lowest, because foam is needed that is strong and has flexibility. which is enough to become a material that is much sought after by the foam market.

Keywords: Polyurethane Foam, PET, HDPE, LDPE, LLDPE, PP, Glycolysis

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, 7 Mei 2024

James Cantiarra

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 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
Bab II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Polimer	8
2.2 <i>Polyethylene Terephthalate (PET)</i>	11
2.3 Proses Glikolisis.....	14
2.4 <i>High Density Polyethylene (HDPE)</i>	18

2.5	<i>Low Density Polyethylene (LDPE)</i>	20
2.6	<i>Linier Low Density Polyethylene (LLDPE)</i>	22
2.7	<i>Polypropilene</i>	23
2.8	<i>Polyurethane Foam (PUF)</i>	25
2.9	<i>Isosianat</i>	28
2.10	<i>Blowing Agent</i>	30
2.11	<i>Surfaktan Silikon</i>	31
2.12	<i>Dietilen Glikol (DEG)</i>	33
2.13	<i>Zinc Acetate</i>	35
2.14	<i>Proses Foaming</i>	35
	2.14.1 <i>Mixing</i>	35
	2.14.2 <i>Nucleation</i>	36
	2.14.3 <i>Expansion</i>	37
	2.14.4 <i>Curing</i>	37

Bab III METODE PENELITIAN

3.1	<i>Diagram Alir</i>	39
3.2	<i>Alat dan Bahan</i>	41
	3.2.1 <i>Alat-alat</i>	41
	3.2.2 <i>Bahan-bahan</i>	41
3.3	<i>Prosedur Percobaan</i>	42
	3.3.1 <i>Pembuatan Polyurethane Foam (PUF)</i>	42
3.4	<i>Pengujian Material</i>	43
	3.4.1 <i>Pengujian Visual</i>	43

3.4.2	Pengujian Densitas	43
3.4.3	Pengujian Kuat Tekan	45
3.4.4	Pengujian SEM.....	46

Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Proses Pembuatan Busa Poliuretan	49
4.2	Pembahasan Hasil Busa Poliuretan	51
4.2.1	Pengaruh Kualitas Poliol Terhadap Busa Poliuretan	51
4.2.2	Pengaruh Kualitas Aquades Terhadap Busa Poliuretan	53
4.2.3	Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan	54
4.2.4	Analisis Hasil Pengujian Densitas	60
4.2.5	Analisis Pengujian SEM	63

Bab V KESIMPULAN

5.1	Kesimpulan.....	68
5.2	Saran	69

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Contoh Perhitungan	73
LAMPIRAN B. Data Penelitian	83
LAMPIRAN C. Gambar Alat & Bahan	93

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Penggunaan Jenis Plastik Dalam Kehidupan Sehari-hari	9
Tabel 2.2 Konsentrasi Monomer BHET Pada Efek Katalis Seleksi	17
Tabel 2.3 Klasifikasi <i>Polyurethane Foams</i>	27
Tabel 4.1 Komposisi Busa Poliuretan	50
Tabel 4.2 Komposisi Polioliol Busa Poliuretan	52
Tabel 4.3 Hasil Busa Poliuretan dengan Variasi Aquades	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Struktur Kimia PET.....	12
Gambar 2.2 Reaksi Kimia Asam Tereftalat dan Etilen Glikol dalam Pembentukan PET plastik	13
Gambar 2.3 Reaksi Depolimerisasi PET dengan Berbagai Pelarut yang Berbeda Struktur Kimia PET.....	14
Gambar 2.4 Mekanisme Depolimerisasi PET oleh DEG.....	14
Gambar 2.5 Reaksi PET Dengan DEG dan Penambahan Katalis.....	16
Gambar 2.6 HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>).....	18
Gambar 2.7 Struktur Kimia HDPE	19
Gambar 2.8 Struktur Kimia LDPE.....	21
Gambar 2.9 Struktur Kimia LDPE.....	22
Gambar 2.10 Struktur Kimia PP	24
Gambar 2.11 Struktur Sel (a) Terbuka (b) Tertutup.....	26
Gambar 2.12 Reaksi Pembuatan Poliuretan.....	28
Gambar 2.13 Struktur Toluena Diisosianat (TDI)	29
Gambar 2.14 Struktur Metilen Difenil Diisosianat (MDI).....	29
Gambar 2.15 Reaksi Isonianat dengan Air	31
Gambar 2.16 Struktur Surfaktan Silikon pada Busa Poliuretan.....	32
Gambar 2.17 Struktur Kimia Dietilen Glikol (DEG).....	34
Gambar 2.18 Struktur <i>Zinc Acetate</i>	35

Gambar 2.19 Gelembung Udara Pada Proses <i>Nucleation</i>	36
Gambar 2.20 Proses <i>Expansion</i>	37
Gambar 2.21 Proses Curing	38
Gambar 3.1 Diagram Alir Pembuatan Busa Poliuretan	40
Gambar 4.1 Larutan Glikolisis.....	49
Gambar 4.2 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Aquades (a) 1,32% Sampel PUR-11 Percobaan 1 dan Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-22 Percobaan 1 dan Percobaan 2	55
Gambar 4.3 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Aquades (a) 1,32% Sampel PUR-11 Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-22 Percobaan 2	56
Gambar 4.4 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Aquades (a) 4,6% Sampel PUR-21 Percobaan 1 dan Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-23 Percobaan 1 dan Percobaan 2	57
Gambar 4.5 Grafik <i>Stress-Strain</i> Variasi Komposisi Aquades (a) 4,6% Sampel PUR-21 Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-23 Percobaan 2	59
Grafik Nilai Densitas Dengan Komposisi Aquades (a) 1,32% Sampel PUR-11 %Error dan (b) 1,5% Sampel PUR-22 %Error	61
Gambar 4.7 Grafik Nilai Densitas Dengan Komposisi Aquades (a) 4,6% Sampel PUR-21 %Error dan (b) 1,5% Sampel PUR-23 %Error	62
Gambar 4.8 Hasil SEM Busa Poliuretan (a) Sampel PUR-11 (b) Sampel PUR-21 (c) Sampel PUR-22 (d) Sampel PUR-23	64
Gambar 4.9 Histogram SEM PUR-11.....	65
Gambar 4.10 Histogram SEM PUR-21.....	65

Gambar 4.11 Histogram SEM PUR-22.....	65
Gambar 4.12 Histogram SEM PUR-23.....	65
Gambar 4.13 Hasil Perbesaran Ukuran 100x SEM Busa Poliuretan (a) Sampel PUR-11 (b) Sampel PUR-21 (c) Sampel PUR-22 dan (d) Sampel PUR-23.....	66
Gambar 4.14 Histogram SEM PUR-11.....	67
Gambar 4.15 Histogram SEM PUR-21.....	67
Gambar 4.16 Histogram SEM PUR-22.....	67
Gambar 4.17 Histogram SEM PUR-23.....	67
Gambar B.18 Data Uji Densitas.....	85
Gambar B.19 Data Uji Tekan PUR-11	86
Gambar B.20 Data Uji Tekan PUR-21	87
Gambar B.21 Data Uji Tekan PUR-22	88
Gambar B.22 Data Uji Tekan PUR-23	89
Gambar C.1 Cetakan	94
Gambar C.2 <i>Cutter</i>	94
Gambar C.3 Gunting	94
Gambar C.4 Gelas Beker.....	94
Gambar C.5 Mata Gergaji	94
Gambar C.6 Pipet Tetes	94
Gambar C.7 Plastik Sampel	95
Gambar C.8 Spatula <i>Metal</i>	95
Gambar C.9 Alat Pengujian Kuat Tekan	95
Gambar C.10 Alat Pengujian Densitas.....	95

Gambar C.11 Timbangan Digital.....	95
Gambar C.12 Aquades	96
Gambar C.13 MDI	96
Gambar C.14 Dietilen Glikol	96
Gambar C.15 Surfaktan Silikon	96
Gambar C.16 Botol Plastik PET	97
Gambar C.17 Plastik LDPE	97
Gambar C.18 Plastik HDPE.....	97
Gambar C.19 Plastik LLDPE.....	97
Gambar C.20 Plastik Sedotan PP.....	97
Gambar C.21 Zinc Asetat.....	97
Gambar C.22 Plastik Glikolisis HDPE	98
Gambar C.23 Plastik Glikolisis PP	98
Gambar C.24 Plastik Glikolisis LDPE.....	98
Gambar C.25 Plastik Glikolisis LLDPE	98
Gambar C.26 Larutan Glikolisis	99
Gambar C.27 Larutan Glikolisis	99

Bab I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sampah merupakan suatu benda yang dibuang karena sudah tidak terpakai lagi seperti kertas, daun dan lain sebagainya. Pertambahan jumlah penduduk Indonesia semakin meningkat, dengan meningkatnya jumlah populasi akan berbanding lurus dengan meningkatnya jumlah sampah yang ada. Pada tahun 2020 jumlah penduduk Indonesia sebesar 275,77 juta jiwa [1], dengan jumlah tersebut dapat menghasilkan sekitar 20 hingga 33 juta ton sampah. Sampah yang berasal dari sampah padat dibagi menjadi 2 jenis yaitu sampah organik dan sampah anorganik.

Sepanjang tahun 2022 Indonesia menghasilkan 19,45 juta ton timbunan sampah. Berdasarkan angka tersebut, sumbangan sampah didominasi oleh rumah tangga yaitu sebesar 39,63%, diikuti oleh sampah yang berasal dari perniagaan sebesar 21,07%, dan pasar sebesar 16,08%. Berdasarkan jenisnya, mayoritas timbunan sampah nasional berupa sampah sisa makanan dengan proporsi 41,55%, sampah plastik dengan proporsi 18,55%, sampah berupa kayu/ranting (13,27%), kertas/karton (11,04%), logam (2,86%), kain (2,54%), kaca (1,96%), karet/kulit (1,68%), dan sampah jenis lainnya (6,55%) [2].

Sampah memiliki dampak yang negatif terhadap manusia diantaranya dapat menurunkan kualitas kesehatan masyarakat, menurunnya kenyamanan bertempat tinggal akibat penumpukan sampah yang tidak terkelola dengan baik, penurunan

kualitas infrastruktur seperti saluran drainase, irigasi dan jalan akibat masuknya sampah ke dalam saluran, terganggunya aktivitas ekonomi akibat gangguan polusi udara berupa bau yang tidak sedap akibat pengelolaan sampah yang kurang baik. Sebagian besar sampah yang dihasilkan oleh masyarakat ialah sampah anorganik berjenis sampah plastik sebesar 18,55% [2].

Pengolahan sampah dapat dilakukan dengan cara 3R yaitu menggunakan kembali (*Reuse*), mengurangi (*Reduce*), dan mendaur ulang (*Recycle*). Metode untuk mendaur ulang limbah plastik terutama PET ini terbagi menjadi 5 cara yaitu glikolisis, metanolisis, hidrolisis, ammonolisis, dan aminolisis [3]. Glikolisis PET pertama kali ditemukan pada pertengahan tahun 1960-an, glikolisis itu sendiri merupakan proses depolimerisasi. Metoda glikolisis merupakan metoda yang paling banyak digunakan. Metode ini dianggap paling menguntungkan diantara metode-metode yang lain dengan beberapa alasan. Pertama, prosesnya lebih sederhana dan dapat dilakukan secara konvensional. Kedua, proses pemisahan glikol dari pelarut dalam proses depolimerisasi tidak diperlukan. Meskipun demikian, cara glikolisis ini memiliki kelemahan yaitu metoda ini memerlukan katalis dalam prosesnya.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya proses glikolisis dari sampah PET dilakukan menggunakan katalis berupa metal asetat (zink, timah, kobalt, and mangan asetat). Berdasarkan penelitian tersebut katalis yang dapat menghasilkan BHET (*bis hydroxyethyl terephthalate*) terbaik ialah zink asetat dengan komposisi 0,5% dari berat PET yang digunakan. Selain katalis terdapat juga bahan kimia pelarut glikol yang digunakan untuk mendepolimerisasi PET, bahan

kimia yang digunakan diantaranya etilen glikol, dietilen glikol, propilen glikol dan larutan glikol lainnya.

Poliuretan merupakan polimer gugus fungsional uretan (N-C=O) yang ditemukan oleh Otto Bayer. Poliuretan ini dapat dijadikan sebagai busa yang dikenal dengan *polyurethane foam*. *Polyurethane foam* merupakan salah satu polimer *foam* rekayasa yang telah banyak diproduksi dalam industri dan telah menjadi produk komersil. Saat ini *polyurethane foam* telah banyak digunakan sebagai bahan insulasi panas, insulasi listrik, *sealant*, busa untuk manufaktur otomotif, dan lain sebagainya [4].

Pada pembuatan *polyurethane foam* terdapat bahan baku penting diantaranya isosianat (MDI), *blowing agent* (aquades), dan surfaktan silikon. Pada umumnya *blowing agent* yang digunakan ialah *hydrochlorofluorocarbon* (HCFC), dan *clorofluorocarbon* (CFC), akan tetapi bahan tersebut sudah tidak digunakan lagi karena menghasilkan polusi. Formulasi masing-masing bahan dapat mempengaruhi hasil akhir dari busa poliuretan.

Penggunaan surfaktan silikon dalam pembuatan busa poliuretan dapat memiliki dampak signifikan terhadap sifat fisik, termasuk kuat tekan dan densitas. Berikut adalah beberapa pengaruh potensial dari surfaktan silikon. Surfaktan silikon dapat berperan dalam stabilisasi busa poliuretan selama pembentukan sel. Ini dapat menghasilkan struktur sel yang lebih seragam dan mencegah koalesensi (penggabungan) sel selama pembentukan busa. Penggunaan surfaktan silikon tertentu dapat meningkatkan kekuatan mekanik busa poliuretan, termasuk kuat tekan. Surfaktan silikon dapat mempengaruhi ukuran sel busa. Dengan mengontrol

pembentukan sel, surfaktan dapat memengaruhi densitas dan tekstur busa poliuretan.

Plastik yang secara teknis canggih, ringan, dan murah cocok untuk berbagai macam aplikasi. Masalah dengan plastik adalah bagaimana menangani akhir masa pakai barang yang terbuat dari plastik. Plastik digunakan untuk membuat kendaraan yang ringan dan ekonomis. Sarung jok untuk industri otomotif yang merupakan sarung pelindung jok adalah penutup plastik sementara yang dipasang diatas jok kendaraan untuk melindungi jok dari kotoran pada saat proses perakitan. Sarung jok berbahan plastik berkontur dibandingkan dengan sarung jok plastik yang elastis. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan sarung jok berkontur menghasilkan penghematan biaya [5].

Selain komposisi surfaktan silicon terdapat juga komposisi *blowing agent*, *Blowing agent* sangat penting dalam produksi busa poliuretan, hal ini dikarenakan *blowing agent* merupakan bahan yang dapat bereaksi dengan *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI) membentuk gas CO₂, dari gas tersebut terbentuk gelembung-gelembung udara yang dapat mengembang dan membentuk pori-pori (Roland Kim, 2014). Oleh karena itu, diharapkan pada penelitian ini menghasilkan *polyurethane foam* jenis *rigid foam*, *semirigid foam* dan *flexible foam* dengan memiliki kemampuan kuat tekan, densitas, serta morfologi yang baik dari daur ulang limbah plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*), HDPE (*High-Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), dan PP (*Polypropylene*). Dalam penelitian ini, studi daur ulang busa poliuretan untuk aplikasi penutup jok otomotif.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian kali ini, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh limbah jenis plastik lain terhadap proses pembuatan *polyurethane foam* dengan memanfaatkan limbah plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) digabung dengan limbah plastik jenis HDPE (*High-Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), dan PP (*Polypropylene*) sebagai polioliol?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi *aquades* terhadap kuat tekan dan densitas dari *polyurethane foam* yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini secara khusus, yaitu:

1. Mengetahui pengaruh limbah jenis plastik lain terhadap proses pembuatan *polyurethane foam* dengan memanfaatkan limbah plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) digabung dengan limbah plastik jenis HDPE (*High-Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), dan PP (*Polypropylene*) sebagai polioliol.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi *aquades* terhadap kuat tekan dan densitas dari *polyurethane foam* yang dihasilkan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian kali ini adalah, sebagai berikut:

1. Limbah plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) digabung dengan limbah plastik jenis lain seperti HDPE (*High-Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), dan PP (*Polypropylene*) yang digunakan berasal dari kantong plastik dan sedotan.
2. Pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan memvariasikan 100% polioliol PET, konsentrasi aquades 1,32%, konsentrasi surfaktan silikon 4%, dan Konsentrasi 1% DEG (dietilen glikol). Serta variasi 10%, 20%, dan 30% dari limbah plastik jenis lain HDPE.
3. Parameter penelitian berupa nilai kuat tekan, densitas, ukuran pori, dan gugus kimia yang terbentuk.
4. Pembuatan busa poliuretan dilakukan di Laboratorium Material Fungsional, Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
5. Pengujian densitas dilakukan di laboratorium Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Serpong Tangerang Selatan, Banten.
6. Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Kampus Sindangsari Serang, Banten.
7. Pengujian kekuatan tekan dilakukan di Laboratorium PT Dirgantara Indonesia, Bandung, Jawa Barat.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima bab yang dilengkapi dengan daftar pustaka serta lampiran pendukung. Bab I pendahuluan menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan penelitian. Bab II tinjauan pustaka menjelaskan mengenai dasar fundamental teori yang mendukung penelitian ini sebagai acuan dalam analisis dan pengolahan data serta pembahasan. Bab III metodologi penelitian menjelaskan mengenai metode yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini, prosedur, dan diagram alir. Bab IV hasil dan pembahasan menjelaskan mengenai hasil yang didapat dari penelitian serta analisis lanjut terkait data yang didapatkan. Bab V kesimpulan dan saran 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 menjelaskan data hasil penelitian dan gambar alat serta bahan yang digunakan merupakan beberapa data sekunder pendukung dalam penelitian dan penulisan laporan penelitian ini.

Bab II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polimer

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

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

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

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

Tabel 2.1 Penggunaan Jenis Plastik Dalam Kehidupan Sehari-hari

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

HDPE (<i>High-Density Polyethylene</i>)	HDPE dikenal karena kekuatannya yang tinggi dan ketahanannya terhadap bocor, sehingga sering digunakan untuk membuat botol plastik daur ulang, pipa air, dan produk berkekuatan tinggi lainnya
LLDPE (<i>Linear Low-Density Polyethylene</i>)	LLDPE memiliki struktur molekul yang lebih linier dan lebih elastis daripada LDPE. Ini membuatnya cocok untuk digunakan dalam pembuatan film stretch yang digunakan untuk membungkus palet atau barang-barang lain yang perlu dijaga agar tetap tertutup.
PP (<i>Polypropylene</i>)	PP sering digunakan dalam pembuatan wadah makanan, botol minuman, dan karpet karena sifatnya yang tahan panas, kokoh, dan tahan terhadap berbagai zat kimia. Keberlanjutan dan daya tahan PP membuatnya menjadi pilihan populer dalam berbagai aplikasi.

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

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

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

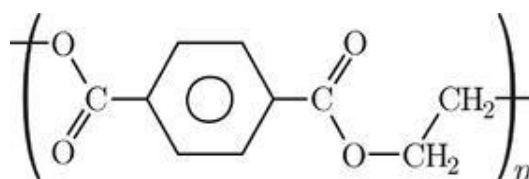
2.2 *Polyethylene Terephthalate (PET)*

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

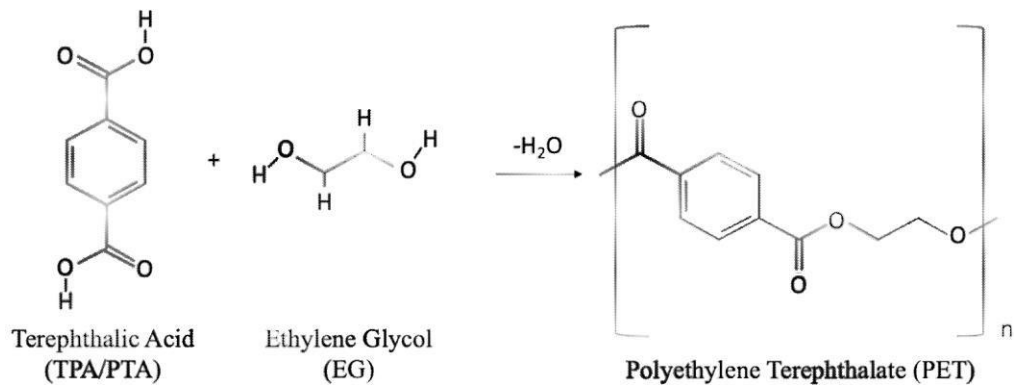
makanan, dan obat-obatan. PET juga dapat digunakan sebagai rekayasa plastik yang menggantikan baja, aluminium dan logam lainnya untuk peralatan elektronik, rumah tangga, maupun suku cadang kendaraan [8]. Kebanyakan (sekitar 60%) dari produksi PET dunia digunakan dalam serat sintetis, dan produksi botol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

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

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



Gambar 2.1 Struktur Kimia PET [8]

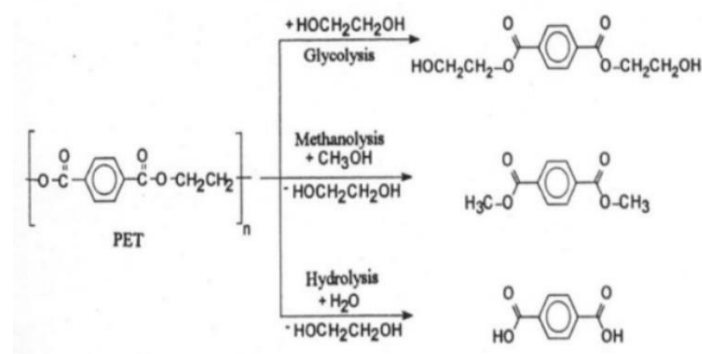


Gambar 2.2 Reaksi Kimia Asam Tereftalat dan Etilen Glikol dalam Pembentukan PET [11]

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

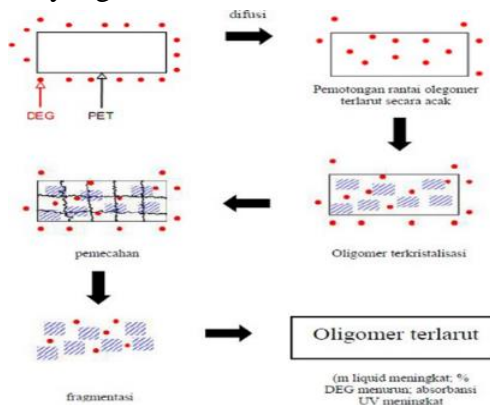
2.3 Proses Glikolisis

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



Gambar 2.3 Reaksi Depolimerisasi PET dengan Berbagai Pelarut

yang Berbeda [13]

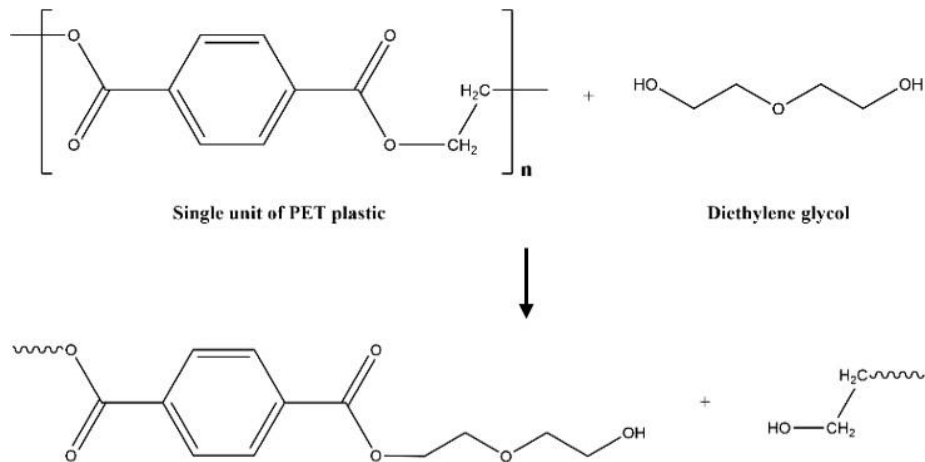


Gambar 2.4 Mekanisme Depolimerisasi PET oleh DEG [14]

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

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

metal oxide, metal chloride [14].



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

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

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

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

2.4 *High Density Polyethylene (HDPE)*

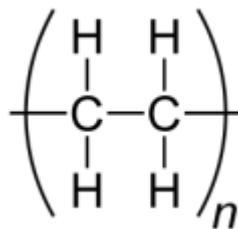
High Density Polyethylene (HDPE) merupakan salah satu bahan plastik yang aman digunakan karena kemampuan untuk mencegah reaksi kimia antara kemasan plastik HDPE dan makanan atau minuman kemasan. Dibandingkan dengan plastik dengan kode PET, HDPE memiliki sifat material yang lebih kuat, lebih keras, buram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



Gambar 2.6 HDPE (*High Density Polyethylene*)

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

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



Gambar 2.7 Struktur Kimia HDPE

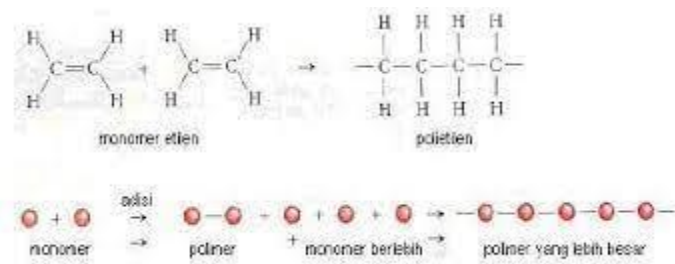
HDPE, atau *high-density polyethylene*, merupakan jenis plastik yang digunakan secara luas karena sifatnya yang tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan. Struktur kimia HDPE melibatkan rantai polimer yang panjang dan terdiri dari unit monomer etilena. Etilena adalah molekul dasar yang terdiri dari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

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

2.5 *Low Density Polyethylene (LDPE)*

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

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

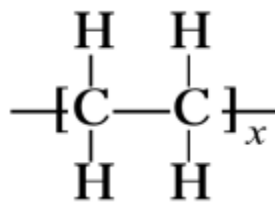


Gambar 2.8 Struktur Kimia LDPE [16]

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

2.6 *Linier Low Density Polyethylene (LLDPE)*

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



Gambar 2.9 Struktur Kimia LLPE

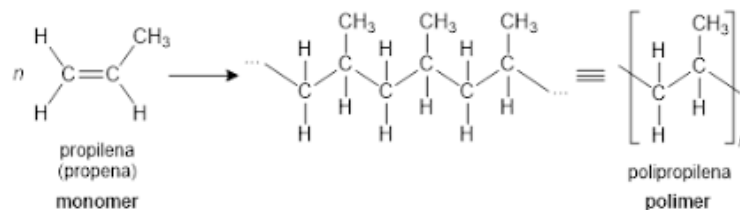
Seperti LDPE, LLDPE juga dibuat dari monomer etilena, yang terdiri dari dua atom karbon dan empat atom hidrogen (CH₂=CH₂). Proses polimerisasi menggabungkan molekul-molekul etilena ini untuk membentuk rantai polimer. Ikatan Karbon-Karbon: Selama proses polimerisasi, ikatan rangkap ganda di antara

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

2.7 Polypropylene (PP)

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

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



Gambar 2.10 Struktur Kimia PP

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

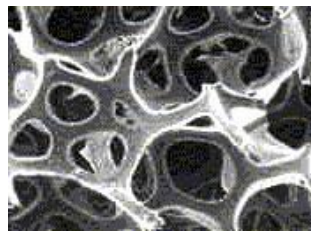
tertentu pada plastik PP. PP memiliki tingkat kristalinitas yang tinggi, yang berarti bahwa molekul-molekulnya memiliki urutan teratur dan membentuk kristal dalam struktur plastik tersebut. Kristalinitas yang tinggi memberikan kekuatan dan kekerasan yang baik. PP memiliki ketahanan panas yang baik dan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

2.8 *Polyurethane Foam* (PUF)

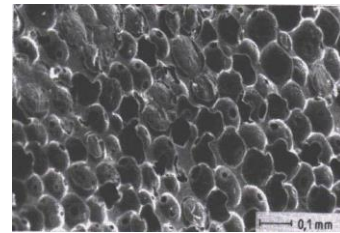
Polyurethane Foam adalah busa sintetik yang dihasilkan melalui proses reaksi kimia antara *polyalkohol* dengan *isocyanate* dan material aditif membentuk sebuah benda dengan struktur berongga dengan dinding sel yang memiliki daya berat (*density*) dan daya lentur serta karakter fisik tertentu. Bentuk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

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

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



(a)



(b)

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

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

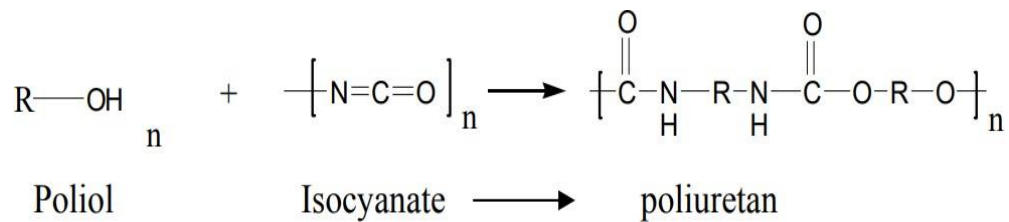
Sebaliknya, *semirigid foam*, yang memiliki *recovery* tidak lengkap, diklasifikasikan sebagai *flexible foams*. Pembuatan PUF ini terdiri dari polioliol dan poliisosianat, dimana polioliol dapat dianggap sebagai *building blocks*, dan poliisosianat dapat dianggap sebagai agen penyambung. Klasifikasi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

Tabel 2.3 Klasifikasi *Polyurethane Foams* [18]

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

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

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

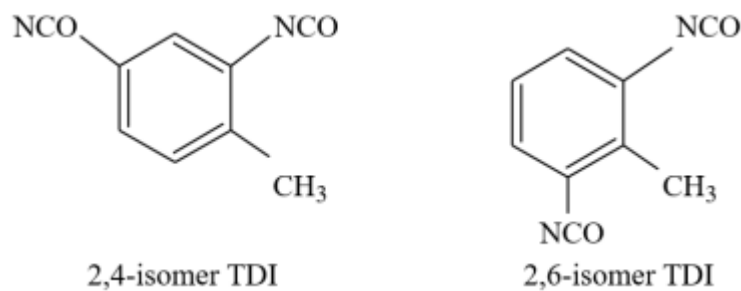


Gambar 2.12 Reaksi Pembuatan Poliuretan [19]

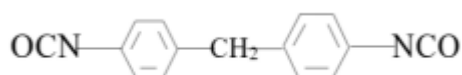
2.9 Isosianat

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

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



Gambar 2.13 Struktur Toluena Diisosianat (TDI)



Gambar 2.14 Struktur Metilen Difenil Diisosianat (MDI)

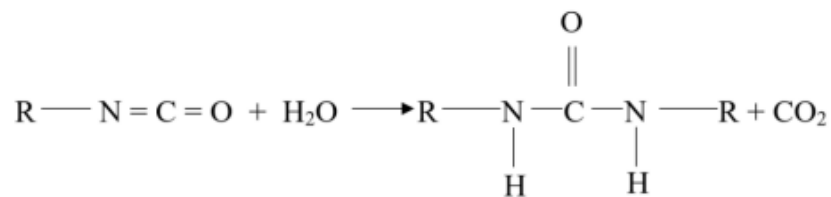
Metilen Difenil Diisosianat (MDI) adalah bahan utama yang digunakan dalam pembuatan busa poliuretan. Pengaruh MDI terhadap kuat tekan dan densitas busa poliuretan dapat dijelaskan sebagai berikut. MDI berperan sebagai agen isosianat yang bereaksi dengan polioliol untuk membentuk rantai poliuretan. Rasio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

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

2.10 *Blowing Agent*

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

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



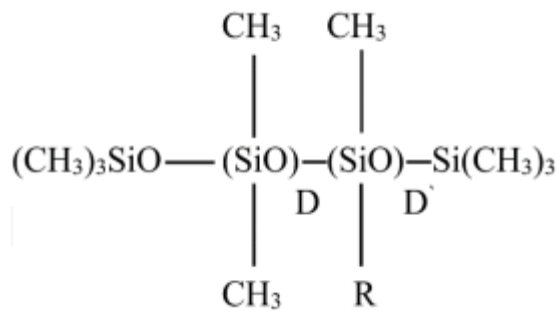
Gambar 2.15 Reaksi Isonianat dengan Air [20]

2.11 Surfaktan Silikon

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

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

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



Gambar 2.16 Struktur Surfaktan Silikon pada Busa Poliuretan [21]

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

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

2.12 Dietilen Glikol (DEG)

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

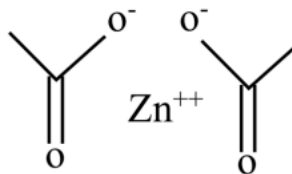
terhadap kuat tekan dan densitas dalam pembuatan busa poliuretan dapat bervariasi tergantung pada sejumlah faktor, termasuk konsentrasi DEG yang digunakan, formulasi bahan baku, dan kondisi proses produksi. Berikut adalah beberapa aspek yang dapat mempengaruhi kuat tekan dan densitas busa poliuretan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



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

2.13 Zinc Acetate

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



Gambar 2.18 Struktur *Zinc Acetate*

2.14 Proses *Foaming*

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

2.14.1 *Mixing*

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

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

2.14.2 Nucleation

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



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

2.14.3 *Expansion*

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



Gambar 2.20 Proses *Expansion* [24]

2.14.4 *Curing*

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

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



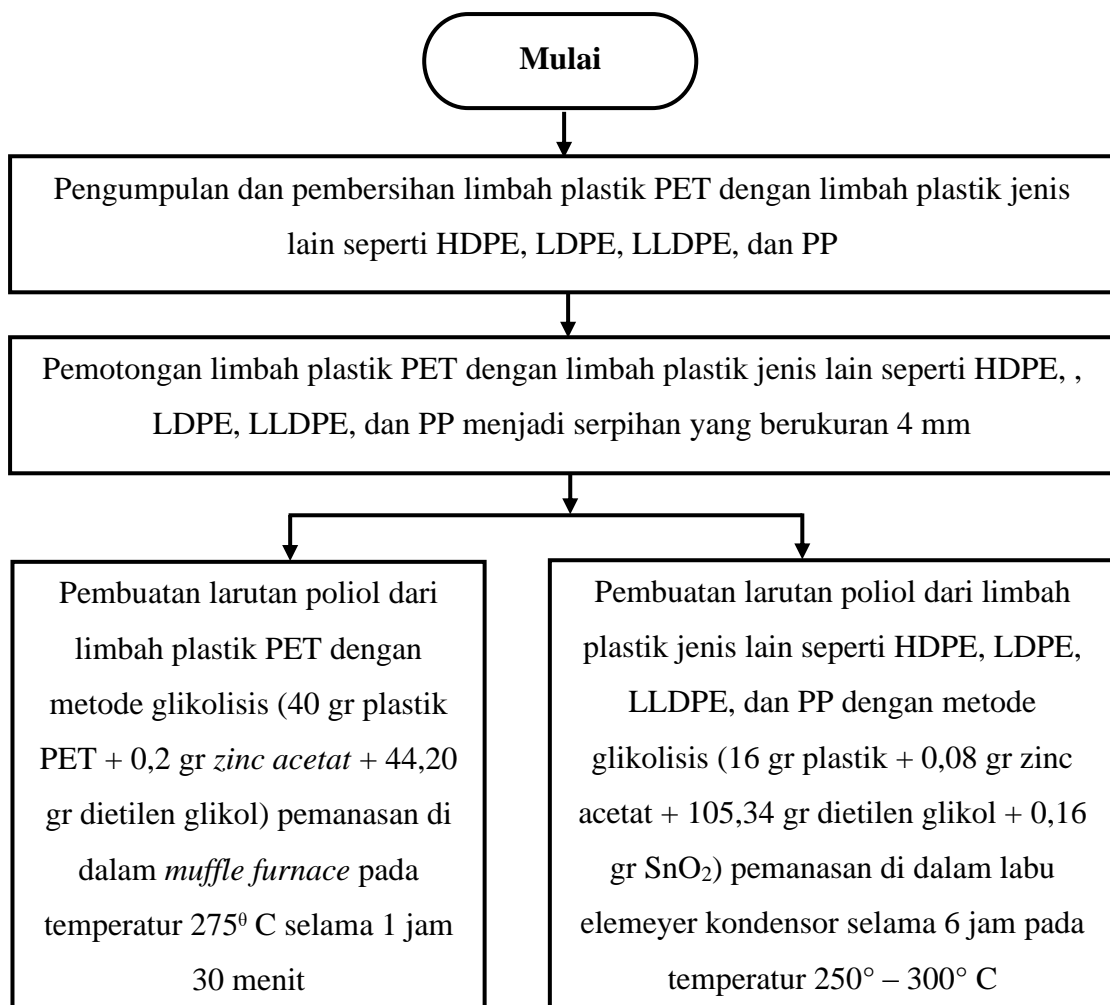
Gambar 2.21 Proses *Curing* [24]

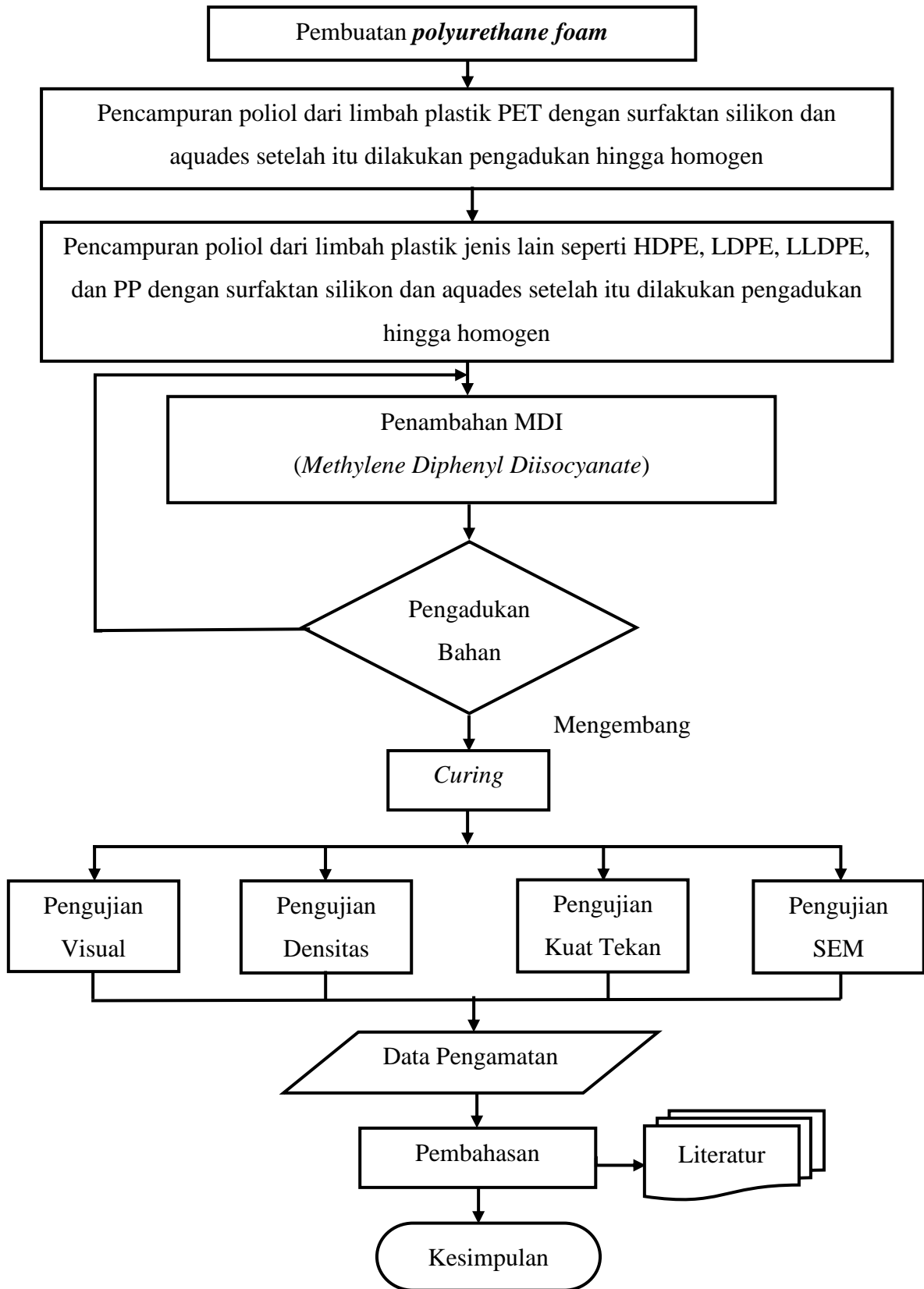
Bab III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut dibawah ini terdapat 2 proses yang perlu dilewati. Proses pertama, yaitu proses pembuatan polioliol dari limbah plastik PET dan limbah plastik jenis lain seperti HDPE dengan metode glikolisis. Sedangkan proses kedua, yaitu proses pembuatan *polyurethane foam* yang dapat di lihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 di bawah ini. berikan penjelasan.





Gambar 3.1 Diagram Alir Pembuatan Busa Poliuretanan

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat

Berikut adalah alat-alat yang digunakan dalam proses penelitian berlangsung yaitu :

1. Cetakan
2. Gunting
3. Gelas *Beaker*
4. Mata Gergaji
5. Labu Elemeyer dan Kondensornya
6. *Muffle Furnace*
7. Pipet Tetes
8. Plastik Sampel
9. Spatula Metal
10. Timbangan Digital

3.2.2 Bahan-bahan

Berikut bahan-bahan yang digunakan pada penelitian kali ini, yaitu:

1. Aquades
2. *Diethylene glycol*
3. MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*)
4. Sampah Plastik PET, HDPE, LDPE, LLDPE, dan PP
5. Surfaktan Silikon
6. Zink Asetat

3.3 **Prosedur Percobaan**

3.3.1 **Pembuatan *Polyurethane Foam* (PUF)**

Limbah plastik kantong kresek dan sedotan dipotong menjadi ukuran kecil-kecil, lalu digunakan untuk membuat material polioliol. Proses pembuatan polioliol dari limbah plastik PET dimulai dengan mencampurkan potongan botol plastik dengan zink asetat dalam proporsi 0,5% dari jumlah limbah plastik PET yang digunakan. Selanjutnya, *diethylene glycol* ditambahkan 1% dari berat 100% polioliol PET. Campuran bahan dipanaskan hingga mencapai suhu 275°C dalam *muffle furnace* selama 1 jam 30 menit, kemudian didiamkan pada temperatur ruang.

Proses pembuatan polioliol dari limbah plastik jenis lain seperti HDPE dimulai dengan mencampurkan potongan botol plastik dengan zink asetat dalam proporsi 0,5% dari jumlah limbah plastik jenis lain seperti LDPE, HDPE, LLDPE dan PP yang digunakan. Selanjutnya, *diethylene glycol* ditambahkan 1% dari berat 10%, 20%, dan 30% polioliol HDPE. Campuran bahan dipanaskan hingga mencapai suhu 250° - 300°C dalam *muffle furnace* selama 6 jam. Setelah pemanasan, material didiamkan pada suhu ruangan.

Langkah berikutnya melibatkan pembuatan *Polyurethane Foam* (PUF) *rigid* dengan mencampurkan 100% dari berat polioliol PET, untuk pembuatan *Polyurethane Foam* (PUF) *semirigid* dengan mencampurkan polioliol dari plastik jenis lain HDPE dengan aquades 1,32% dari berat polioliol, lalu ditambahkan *surfactant silicon* 4% dari berat polioliol. Campuran ini diaduk hingga homogen dan dituangkan ke dalam cetakan. Proses

selanjutnya melibatkan penambahan *Methylene Diphenyl Diisocyanate* (MDI) dengan 1,7% dari berat pre-PU yang telah dihasilkan. Semua bahan kemudian diaduk menggunakan spatula hingga proses *curing* terjadi, dan hasilnya didiamkan hingga mengeras. Seluruh proses pembuatan dilakukan di Laboratorium Material Fungsional FT Untirta. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat memanfaatkan limbah plastik secara efektif untuk menghasilkan material polioliol dan busa poliuretan yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi.

3.4 Pengujian Material

3.4.1 Pengujian Visual

Pengujian visual terjadi secara langsung saat polioliol sudah selesai di buat. Di cek apakah polioliol nya viskos atau tidak, bila tidak maka polioliol nya kurang bagus, sedangkan bila viskos maka polioliol nya bagus, karena semakin viskos polioliol tersebut, maka semakin bagus juga poliuretan *foam* yang di hasilkan. Tapi bila terlalu viskos maka kurang bagus juga karena saat proses pengadukan terjadi akan sulit untuk di aduk.

3.4.2 Pengujian Densitas

Pengujian densitas menjadi langkah krusial sebagai acuan dasar untuk parameter lainnya. Hal ini disebabkan oleh hubungan langsung antara densitas *foam* dengan karakteristik lainnya. Semakin besar densitas *foam*, rongga-rongga di dalamnya akan menyusut, mengakibatkan peningkatan nilai kekuatan *foam*. Prosedur pengujian ini mengacu pada standar ASTM D1622, dengan ukuran sampel yang diuji sebesar 2 cm x 2 cm x 2 cm.

Pengujian dilakukan di BRIN Polimer Serpong. Berikut adalah tahapan pengujian densitas berdasarkan ASTM D1622:

1. Menyiapkan semua peralatan dan bahan yang diperlukan untuk pengujian, termasuk alat uji densitas, sampel material yang akan diuji, termometer, dan timbangan.
2. Memastikan kalibrasi alat uji densitas telah dilakukan sebelum memulai pengujian guna memastikan akurasi hasil pengukuran.
3. Mengambil sampel material.
4. Menimbang sampel menggunakan timbangan dengan tingkat ketepatan ± 0.1 %.
5. Menempatkan sampel secara hati-hati ke dalam alat uji densitas untuk menghindari kesalahan selama proses pengukuran.
6. Menuangkan air ke dalam wadah khusus pada alat uji densitas hingga mencapai batas.
7. Memasukkan probe atau instrumen lainnya ke dalam cairan pembanding untuk mengukur volume displasemen atau perubahan volume akibat penambahan sampel material tersebut.
8. Mengambil data dari hasil pengujian densitas.

Karakterisasi polimer dapat dilakukan melalui pengujian densitas, di mana densitas diukur dengan cara merendamnya dalam air. Dalam konteks ini, densitas tidak hanya menjadi parameter fisik semata, tetapi juga mencakup banyaknya volume ruang kosong. Volume ini direpresentasikan oleh jumlah massa atau volume air yang terserap oleh material saat

direndam. Untuk mengukur porositas, digunakan teknik perendaman dan dihitung dalam bentuk persentase, mengacu pada metode yang dijelaskan oleh [25].

3.4.3 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai kekuatan dari PU *foam* yang telah diproduksi. Metode pengujian yang digunakan mengacu pada standar ASTM D1621, di mana sampel dipotong dengan dimensi 2 cm x 2 cm x 2 cm dan kemudian diberi pembebanan sebesar 10-100 N atau laju regangan 2,5 mm/menit. Alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah *Universal Testing Machine* INSTRON 5982. Keseluruhan pengujian dilakukan di fasilitas PT. Dirgantara Indonesia, Bandung.

Untuk mengukur modulus young, hasil pengujian digunakan sebagai parameter input dalam persamaan 3.1. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai sifat mekanis dan daya tahan material PU *foam* yang dihasilkan.

Dengan persamaan tegangan dan regangan sebagai berikut:

$$E_c = \frac{WH}{AD} \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana

E_c = *Modulus Young* (Pa)

W = Beban Penekanan (N)

H = Tinggi Sampel (m)

A = Luas Penampang Sampel (m²)

D = Deformasi Sampel (m)

Destructive test adalah jenis pengujian yang dilakukan pada suatu material atau sampel hingga mengalami kerusakan. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk memahami performa material yang bersangkutan, khususnya dalam menghadapi beban eksternal dengan berbagai besar gaya. Dalam pelaksanaan pengujian ini, penggunaan sampel uji menjadi penting, dimana sampel uji merupakan duplikat dari benda kerja yang terbuat dari bahan yang sama. Pengujian merusak diarahkan untuk memahami sifat-sifat mekanik dari material dengan memberikan beban mekanik hingga sampel mengalami perubahan bentuk atau deformasi plastis, yang merusak bentuk sampel dari bentuk awalnya [26].

Uji tekan merupakan metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan atau material dengan memberikan beban gaya sepanjang sumbu tertentu. Pengujian uji tekan berguna untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara perlahan. Kekuatan tekan dapat diukur dengan memasukkan data pengujian ke dalam kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari mesin uji. Beberapa material dapat patah pada batas tekan, sementara yang lain mengalami deformasi yang tidak dapat dikembalikan. Deformasi tertentu dapat dianggap sebagai batas kekuatan tekan, terutama pada bahan yang mengalami perubahan tidak dapat dikembalikan ke kondisi semula (*irreversible*) [27].

3.4.4 Pengujian SEM

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) memiliki peran penting dalam mengetahui morfologi, ukuran partikel, pori, serta bentuk

partikel material. Standar yang digunakan dalam pengujian ini adalah ASTM E986, dan proses pengujian dilakukan di Laboratorium Terpadu Sindang Sari. Metode analisis yang sangat relevan dalam karakterisasi morfologi polimer adalah *Scanning Electron Microscopy* (SEM). SEM adalah jenis mikroskop elektron yang berfungsi untuk menganalisis morfologi atau menggambarkan permukaan suatu objek atau material. Pada dasarnya, SEM menggunakan elektron berenergi tinggi yang ditembakkan ke permukaan material. Permukaan material yang terkena berkas elektron berenergi tinggi tersebut akan memantulkan kembali elektron, menghasilkan elektron sekunder yang tersebar ke segala arah. Intensitas pantulan dengan tingkat energi tertinggi kemudian ditangkap oleh detektor, memberikan informasi mengenai morfologi material, seperti kelandaian, permukaan, dan arah kemiringan. Untuk memperoleh citra yang optimal, permukaan material harus dilapisi dengan logam sehingga menghasilkan elektron sekunder saat terkena berkas elektron berenergi tinggi. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah instrumen yang menghasilkan seberkas elektron pada permukaan spesimen target dan mengumpulkan serta menampilkan sinyal-sinyal yang dihasilkan oleh material target. Penggunaan SEM dalam karakterisasi morfologi kopolimer telah berkembang luas. Prinsip dasar SEM melibatkan kolom elektron (*electron column*), ruang sampel (*specimen chamber*), dan sistem vakum (*vacuum system*). Analisis SEM dilakukan dengan menggunakan sinyal elektron sekunder. Berkas elektron diarahkan ke permukaan spesimen yang telah

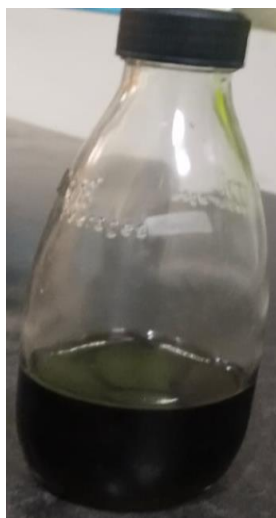
dilapisi film konduktor. Pelapisan ini bertujuan agar polimer dapat menghasilkan arus listrik dan berinteraksi dengan berkas elektron. Hasil interaksi tersebut dikumpulkan untuk menghasilkan sinyal, yang kemudian digunakan untuk mengatur intensitas elektron pada suatu tabung televisi yang diarahkan sejalan dengan sinar dari mikroskop. Interaksi berkas elektron dengan spesimen menghasilkan pola difraksi elektron yang memberikan informasi tentang kristalografi, jenis unsur, distribusi, dan morfologi permukaan bahan [28].

Bab IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Pembuatan Busa Poliuretan Dengan Metode Glikolisis

Proses pembuatan busa poliuretan dengan menggunakan PET sebagai polioliol, dilakukan dengan dengan metode glikolisis. Pada metode glikolisis, PET yang telah dipotong-potong hingga ukuran 4 mm dilarutkan dengan bahan *diethylene glycol* ($C_4H_{10}O_3$) dan seng asetat ($Zn(CH_3CO_2)_2$) dengan pemanasan $275^\circ C$ di dalam muffle furnace dengan waktu 1,5 jam. $C_4H_{10}O_3$ berperan sebagai pelarut glikol, sedangkan $Zn(CH_3CO_2)_2$ berperan sebagai katalis yang berfungsi untuk mempercepat laju reaksi glikolisis, selain itu seng asetat dapat menghasilkan produk depolimerisasi dengan rendemen sebesar 78% [29]. Dari 2 sampel yang telah dibuat volume polioliol yang dihasilkan semuanya konstan dengan berat yang sama sebesar 63,7 gram untuk PET, sedangkan untuk HDPE memiliki berat 97,62 gram.



Gambar 4.1 Polioliol Hasil Glikolisis

Pada proses pembuatan busa poliuretan dilakukan dengan mereaksikan polioliol dengan aquades, surfaktan silikon, *diethylene glycol* dan MDI (*Methylene Diphenyl Diisocyanate*). Aquades berperan sebagai *blowing agent* yang berfungsi untuk mengembangkan busa [18], *diethylene glycol* digunakan sebagai anti *foaming*, surfaktan silikon berperan sebagai surfaktan yang berfungsi untuk mengurangi tegangan permukaan serta untuk melarutkan aquades dengan MDI [24], dan *Methylene Diphenyl Diisocyanate* berperan sebagai isosianat yang berfungsi sebagai agen penghubung yang mengikat polioliol dan membentuk struktur jaringan polimer [18]. 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. Berikut ini komposisi yang digunakan pada pembuatan busa poliuretan, yaitu :

Tabel 4.1 Komposisi Polioliol Busa Poliuretan

Jenis Plastik	Berat Plastik	DEG	Zinc Asetat (A)	SnO ₂ (B)	Berat Polioliol	Berat sisa plastik
PET	40 gram	44,20 gram	0,5 %	-	43,63 gram	-
HDPE	16 gram	105,34 gram	0,5 %	1 %	102,73 gram	18,21 gram
LDPE	16 gram	105,34 gram	0,5 %	1 %	97,96 gram	22,82 gram
LLDPE	16 gram	105,34 gram	0,5 %	1 %	101,55 gram	17,10 gram
PP	16 gram	105,34 gram	0,5 %	1 %	93,71 gram	16,48 gram

Diaduk agar homogen semua senyawa tersebut kemudian menunggu mengembang sekitar 30 detik dan menutup cetakan tersebut dengan cetakan lainnya agar busa saat mengembang tidak meluap. Pada pembuatan busa menghasilkan busa poliuretan yang menghasilkan busa *rigid*, *semi rigid*, dan fleksibel dari teksturnya. Kemudian di potong potong 2 cm menggunakan mata gergaji untuk di uji densitas, kuat tekan, dan SEM.

4.2 Pembahasan Hasil Busa Poliuretan

4.2.1 Pengaruh Kualitas Polioliol Terhadap Busa Poliuretan

Pada pembuatan busa poliuretan, penambahan jenis plastik lain dalam komposisi busa sangat mempengaruhi dalam pembuatan busa poliuretan. Hal ini dikarenakan glikolisis busa yang belum sepenuhnya melarutkan plastik jenis lain yaitu HDPE (*High-Density Polyethylene*), LDPE (*Low Density Polyethylene*), LLDPE (*Linear Low Density Polyethylene*), dan PP (*Polypropylene*). Setelah banyak melakukan percobaan dan berulang kali gagal menentukan komposisi yang sesuai akhirnya di temukan untuk polioliol dari jenis plastik lain hanya di gunakan sekitar 3-3,5 persen sisanya memakai polioliol PET karena untuk polioliol jenis plastik lain tidak melarutkan 100% sehingga masih menyisahkan sebagian sampah plastik jadi kualitas polioliol dari jenis sampah plastik lain kurang bagus untuk pembuatan busa poliuretan sehingga masih membutuhkan polioliol PET sebagai *base* polioliol nya.

Tabel 4.2 Komposisi Busa Poliuretan

Sampel	PET	Poliol Lain	H ₂ O	SURF	DEG	MDI
	(A)	(B)	(pphp) (C)	(pphp) (D)	(pphp) (E)	(pphp) (F)
PUR-11 (10,55 gr)	97,1 %	2,9 % (HDPE)	1,32%	4%	4%	1,4
PUR-22 (11,31 gr)	96,55 %	3,45 % (LLDPE)	1,5%	3,9%	3,9%	1,4
PUR-21 (11,16 gr)	96,6 %	3,4 % (LDPE)	4,6%	3,9%	3,9%	1,4
PUR-23 (11,18 gr)	96,5 %	3,5 % (PP)	1,5%	3,9%	3,9%	1,4

(A) = Total persen polioliol PET yang digunakan dari total 100% polioliol untuk sampel tersebut.

(B) = Total persen polioliol lain yang digunakan dari total 100% polioliol untuk sampel tersebut.

(C) = Total persen H₂O yang digunakan dari total 100% polioliol untuk sampel tersebut.

(D) = Total persen surfaktan yang digunakan dari total 100% polioliol untuk sampel tersebut.

(E) = Total persen DEG yang digunakan dari total 100% polioliol untuk sampel tersebut.

(F) = 1,4 kali lipat dari total 100% polioliol untuk sampel tersebut.

Pada tabel di atas merupakan komposisi dari glikolisis polioliol. Untuk polioliol PET memiliki 100% polioliol yang Tingkat kekentalan nya viskos sehingga berhasil dalam pembuatan busa poliuretan. Untuk polioliol jenis plastik lain masih memiliki sisa plastik berkisar 16-22 gram dengan berat polioliol nya 93-102 gram dan memiliki Tingkat kekentalan yang tidak viskos. Pada gambar 4.1 merupakan salah satu hasil glikolisis plastik jenis lain dan pada gambar 4.1 merupakan salah satu contoh sisa plastik jenis lain yang tidak terlarutkan. Pengaruh polioliol sangat mempengaruhi dalam pembuatan busa poliuretan karena semakin viskos polioliol tersebut maka kualitas busa yang dihasilkan juga semakin baik, sebaliknya bila kualitas polioliol nya tidak viskos maka kualitas busa akan semakin berkurang.

4.2.2 Pengaruh Kualitas Aquades Terhadap Busa Poliuretan

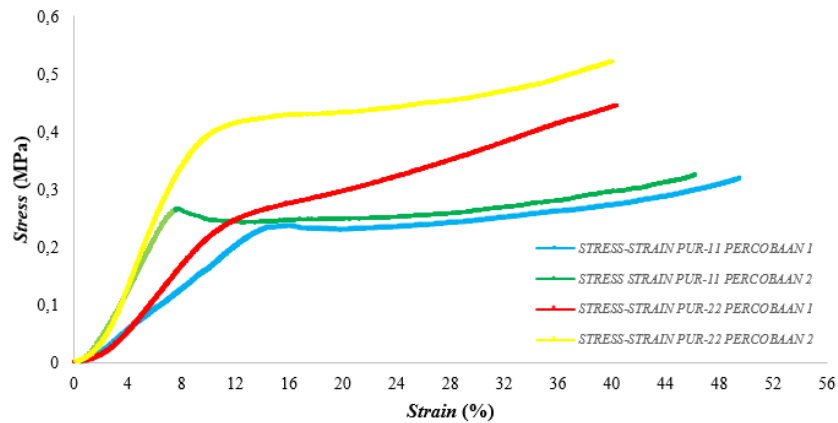
Pada pembuatan busa poliuretan, penambahan aquades digunakan sebagai *blowing agent* atau pendorong pembentukan busa. *Blowing agent* digunakan untuk menghasilkan gelembung udara dalam sistem poliuretan yang mengarah pada pembentukan busa dengan struktur terkontrol dan sifat fisik yang diinginkan. Aquades dapat mempengaruhi jenis busa yang akan terbentuk, sifat mekanik dan sifat fisik busa yang terbentuk, semakin besar komposisi aquades yang digunakan maka kekuatan dan densitas busa akan semakin besar, akan tetapi sifat tersebut juga dipengaruhi oleh komposisi surfaktan yang digunakan [30]. Hasil dari pengaruh komposisi aquades dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Busa Poliuretan dengan Variasi Aquades

Sampel	H ₂ O (pphp)	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Young (MPa)	<i>Yield</i> <i>Strength</i> (MPa)	Densitas (gram/cm ³)	Densitas (% Error)	Jenis Busa
PUR-11	1,32%	0,32	0,0256	0,2495	0,05	0,5%	<i>Rigid</i>
PUR-21	1,5%	0,32	0,0347	0,2766	0,07	1,5%	<i>Rigid</i>
PUR-22	4,6%	0,49	0,0301	0,3382	0,08	2%	<i>Rigid</i>
PUR-23	1,5%	0,39	0,0321	0,3046	0,06	1%	<i>Rigid</i>

4.2.3 Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan

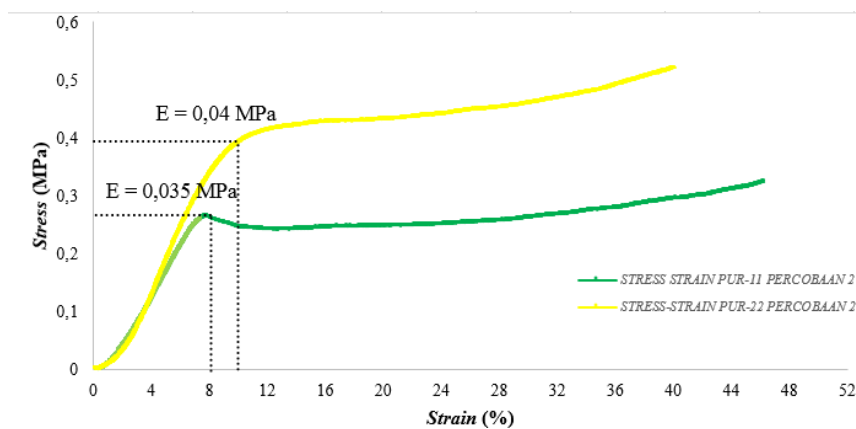
Pada pengujian kuat ini, bertujuan untuk menganalisis kekuatan dari busa yang telah dibuat. Berdasarkan Tabel 4.3 terdapat nilai modulus *young* dari masing-masing komposisi, dimana nilai modulus *young* ini bisa didapatkan dengan mencari *slope* dari grafik tegangan-regangan yang dihasilkan. Berdasarkan ASTM D1621 nilai *yield strength* dapat diperoleh dari grafik tegangan-regangan dengan menentukan titik puncak lengkungan, apabila titik puncak lengkungan kurang terlihat metode *offset* dapat digunakan dengan menentukan titik pada grafik tegangan-regangan yang berjarak *offset* tertentu (misalnya 10%) dari sumbu tegangan. Grafik tegangan regangan dengan komposisi aquades sampel PUR-11 percobaan 1 dan sampel PUR-11 percobaan 2 adalah 1,32%. Sedangkan komposisi aquades pada sampel PUR-22 percobaan 1 dan sampel PUR-22 percobaan 2 adalah 1,5% yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Aquades (a) 1,32% Sampel PUR-11 Percobaan 1 dan Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-22 Percobaan 1 dan Percobaan 2

Pada Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa pada sampel PUR-11 dan PUR-22 dengan variasi komposisi aquades 1,32% dan 1,5%, memiliki nilai kuat tekan, modulus young, *yield strength* yang berbeda-beda. Berdasarkan literatur semakin besar nilai modulus young suatu benda maka benda akan semakin kaku, sehingga nilai kuat tekan suatu benda akan semakin besar. Pada Gambar 4.2 memperlihatkan grafik tegangan regangan dan nilai modulus young dari masing-masing sampel. Nilai modulus young didapatkan dari kemiringan garis regresi linear (*slope*). Nilai kuat tekan pada sampel PUR-11 percobaan 1 dan sampel PUR-11 percobaan 2 adalah 0,32 MPa dan 0,32 MPa rata-rata yang didapatkan 0,32 MPa. Nilai kuat tekan pada sampel PUR-22 percobaan 1 dan sampel PUR-22 percobaan 2 adalah 0,44 MPa dan 0,54 MPa rata-rata yang didapatkan 0,49 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-11 percobaan 1 dan sampel PUR-11 percobaan 2

adalah 0,0163 MPa dan 0,035 MPa rata-rata yang didapatkan 0,0256 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-22 percobaan 1 dan sampel PUR-22 percobaan 2 adalah 0,0202 MPa dan 0,04 MPa rata-rata yang didapatkan 0,0301 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-11 percobaan 1 dan sampel PUR-11 percobaan 2 adalah 0,2360 MPa dan 0,2631 MPa didapatkan rata-rata 0,2495 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-22 percobaan 1 dan sampel PUR-22 percobaan 2 adalah 0,2639 MPa dan 0,4125 MPa didapatkan rata-rata 0,3382 MPa. Apabila data modulus young dan nilai kuat tekan dibandingkan, maka nilainya sesuai dengan literatur yang telah disebutkan dikarenakan semakin besar modulus young dari busa maka busa akan memiliki nilai kuat tekan yang semakin besar [30].

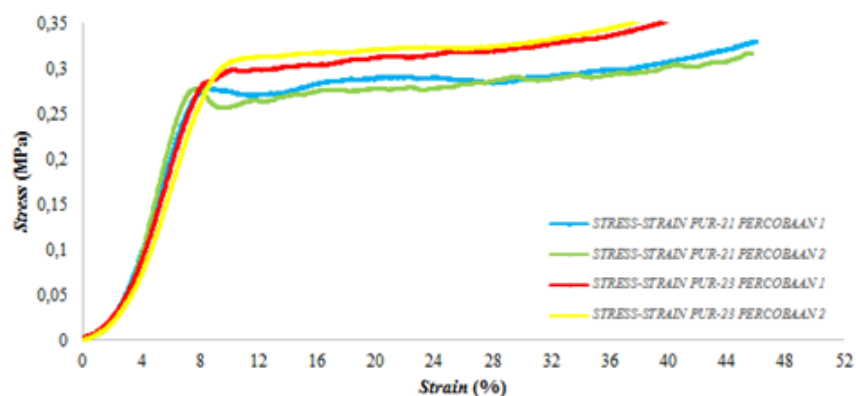


Gambar 4.3 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Aquades (a) 1,32% Sampel PUR-11 Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-22 Percobaan 2

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa pada sampel PUR-11 percobaan 2 dan PUR-22 percobaan 2 dengan variasi komposisi aquades 1,32% dan 1,5%, memiliki nilai kuat tekan, modulus young, *yield strength*

yang berbeda-beda. Sampel PUR-11 percobaan 2 dan PUR-22 percobaan 2 dengan variasi komposisi aquades 1,32% dan 1,5% merupakan hasil yang terbaik karena memiliki nilai kuat tekan, modulus young, *yield strength* serta bentuk grafik yang lebih signifikan.

Nilai kuat tekan pada sampel PUR-11 percobaan 2 adalah 32 MPa. Nilai kuat tekan pada sampel PUR-22 percobaan 2 adalah 0,54 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-11 percobaan 2 adalah 0,035 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-22 percobaan 2 adalah 0,04 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-11 percobaan 2 adalah 0,2631 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-22 percobaan 2 adalah 0,4125 MPa. Apabila data modulus young dan nilai kuat tekan dibandingkan, maka nilainya sesuai dengan literatur yang telah disebutkan dikarenakan semakin kecil modulus young dari busa maka busa akan memiliki nilai kuat tekan yang semakin kecil [30].

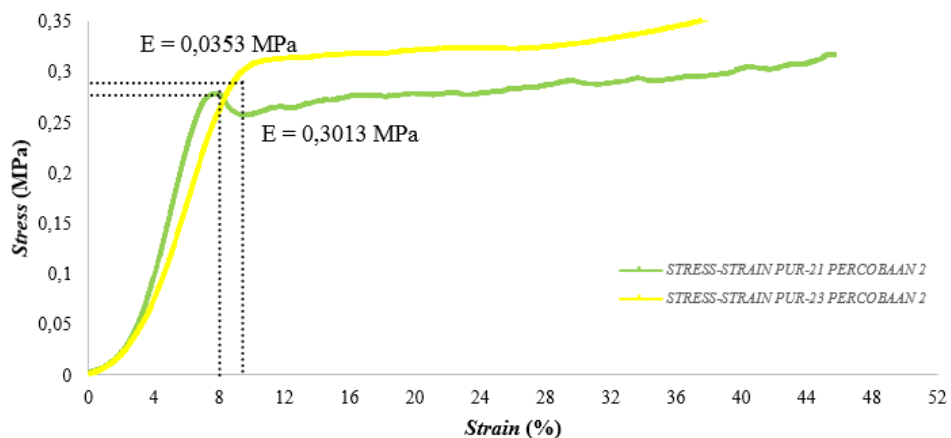


Gambar 4.4 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Aquades (a) 4,6% Sampel PUR-21 Percobaan 1 dan Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-23 Percobaan 1 dan Percobaan 2

Grafik tegangan regangan dengan komposisi aquades sampel PUR-21 percobaan 1 dan sampel PUR-21 percobaan 2 adalah 4,6%. Sedangkan komposisi aquades pada sampel PUR-23 percobaan 1 dan sampel PUR-23 percobaan 2 adalah 1,5% yang dapat dilihat pada Gambar 4.4. Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada sampel PUR-21 dan PUR-23 dengan variasi komposisi aquades 4,6% dan 1,5%, memiliki nilai kuat tekan, modulus young, yield strength yang berbeda-beda. Berdasarkan literatur semakin besar nilai modulus young suatu benda maka benda akan semakin kaku, sehingga nilai kuat tekan suatu benda akan semakin besar. Pada Gambar 4.4 memperlihatkan grafik tegangan regangan dan nilai modulus young dari masing-masing sampel. Nilai modulus Young didapatkan dari kemiringan garis regresi linear (*slope*) pada grafik tegangan-regangan, yang menggambarkan hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dalam suatu material elastis. Berdasarkan standar ASTM D1621, nilai *yield strength* (kekuatan luluh) dapat diperoleh dari grafik tegangan-regangan dengan menentukan titik puncak lengkungan, di mana material mulai mengalami deformasi plastis. Namun, apabila titik puncak lengkungan ini kurang jelas atau sulit diidentifikasi, metode *offset* dapat digunakan sebagai alternatif. Metode *offset* melibatkan penentuan titik pada grafik tegangan-regangan yang berjarak tertentu (misalnya, 10%) dari sumbu tegangan, untuk menentukan titik leleh material secara lebih akurat.

Nilai kuat tekan pada sampel PUR-21 percobaan 1 dan sampel PUR-21 percobaan 2 adalah 0,32 MPa dan 0,32 MPa rata-rata yang didapatkan

0,32 MPa. Nilai kuat tekan pada sampel PUR-23 percobaan 1 dan sampel PUR-23 percobaan 2 adalah 0,39 MPa dan 0,39 MPa rata-rata yang didapatkan 0,39 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-21 percobaan 1 dan sampel PUR-21 percobaan 2 adalah 0,0329 MPa dan 0,0313 MPa rata-rata yang didapatkan 0,0321 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-23 percobaan 1 dan sampel PUR-23 percobaan 2 adalah 0,0341 MPa dan 0,0353 MPa rata-rata yang didapatkan 0,0347 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-21 percobaan 1 dan sampel PUR-21 percobaan 2 adalah 0,2757 MPa dan 0,2774 MPa didapatkan rata-rata 0,2766 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-23 percobaan 1 dan sampel PUR-23 percobaan 2 adalah 0,2972 MPa dan 0,3118 MPa didapatkan rata-rata 0,3046 MPa. Apabila data modulus young dan nilai kuat tekan dibandingkan, maka nilainya sesuai dengan literatur yang telah disebutkan dikarenakan semakin besar modulus young dari busa maka busa akan memiliki nilai kuat tekan yang semakin besar [30].



Gambar 4.5 Grafik *Stress-Strain* Variasi Komposisi Aquades (a) 4,6% Sampel PUR-21 Percobaan 2 dan (b) 1,5% Sampel PUR-23 Percobaan 2

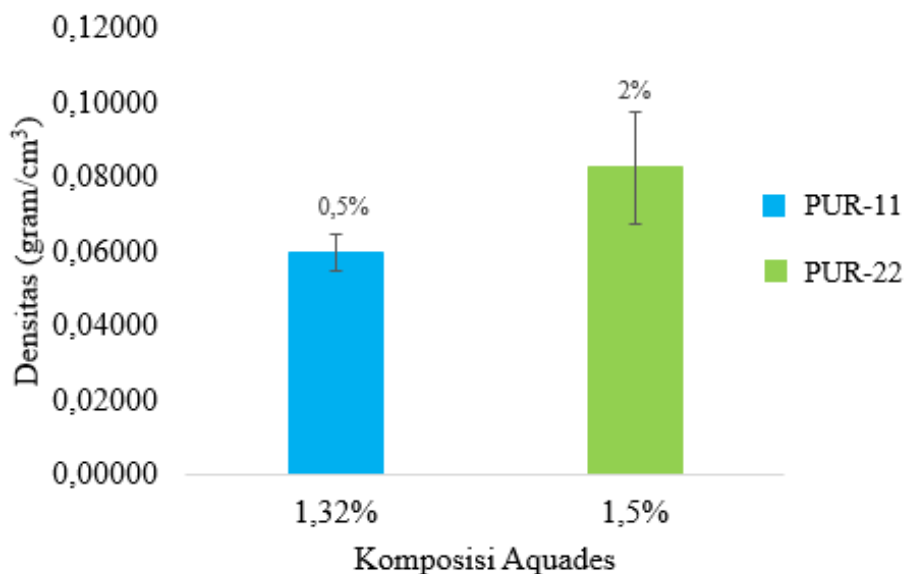
Pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa pada sampel PUR-21 percobaan 2 dan PUR-23 percobaan 2 dengan variasi komposisi aquades 4,6% dan 1,5%, memiliki nilai kuat tekan, modulus young, *yield strength* yang berbeda-beda. Sampel PUR-21 percobaan 2 dan PUR-23 percobaan 2 dengan variasi komposisi aquades 4,5% dan 1,5% merupakan hasil yang terbaik karena memiliki nilai kuat tekan, modulus young, *yield strength* serta bentuk grafik yang lebih signifikan.

Nilai kuat tekan pada sampel PUR-21 percobaan 2 adalah 32 MPa. Nilai kuat tekan pada sampel PUR-23 percobaan 2 adalah 0,39 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-21 percobaan 2 adalah 0,0321 MPa. Nilai modulus young pada sampel PUR-23 percobaan 2 adalah 0,0347 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-21 percobaan 2 adalah 0,2788 MPa. Nilai *yield strength* pada sampel PUR-23 percobaan 2 adalah 0,3032 MPa. Apabila data modulus young dan nilai kuat tekan dibandingkan, maka nilainya sesuai dengan literatur yang telah disebutkan dikarenakan semakin besar modulus young dari busa maka busa akan memiliki nilai kuat tekan yang semakin besar [30].

4.2.4 Analisis Hasil Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan dengan cara menghitung massa dan volume dari masing-masing spesimen dengan menggunakan prinsip Archimedes. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan standar ASTM D1622 dengan menggunakan alat *analytical balance* AS 220.R2. Komposisi aquades dapat mempengaruhi nilai densitas busa. Pada Tabel 4.3 dapat

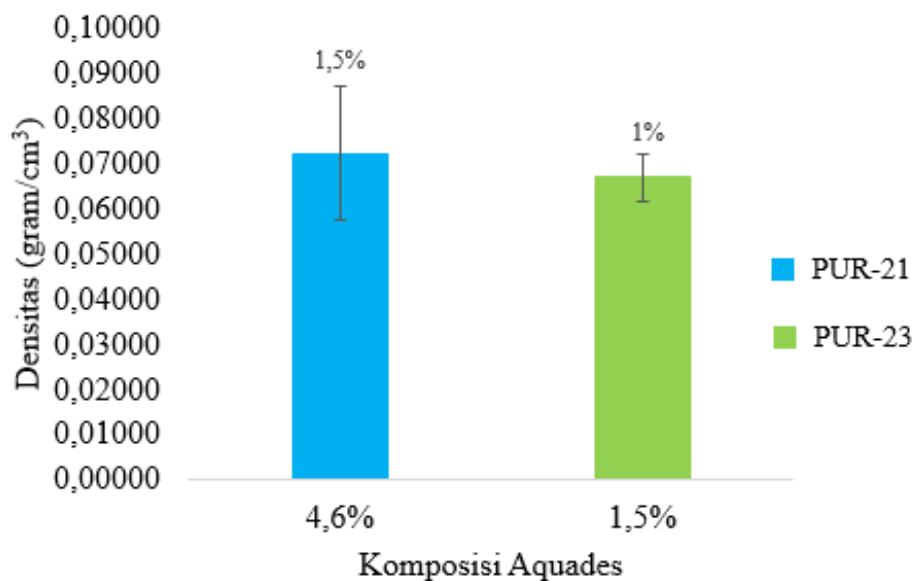
terlihat semakin besar komposisi aquades yang digunakan dan surfaktannya lebih kecil maka nilai densitas busa semakin besar, hal ini dikarenakan aquades yang bereaksi dengan MDI menghasilkan gas karbon dioksida (CO_2) sehingga membentuk pori, sehingga semakin banyak aquades yang digunakan, gas yang terbentuk semakin banyak dan membuat ukuran pori semakin besar.



Gambar 4.6 Grafik Nilai Densitas Dengan Komposisi Aquades (a) 1,32% Sampel PUR-11 %Error dan (b) 1,5% Sampel PUR-22 %Error

Pada Gambar 4.6 dapat terlihat bahwa semakin besar komposisi aquades yang digunakan dapat meningkatkan nilai densitas busa. Busa dengan komposisi aquades sebesar 1,32% pada sampel PUR-11 memiliki nilai rata-rata densitas sebesar $0,05 \text{ gram/cm}^3$ serta untuk hasil %error densitas yang didapatkan adalah sebesar 0,5%. Pada komposisi aquades

sebesar 1,5% pada sampel PUR-22 memiliki nilai rata-rata densitas sebesar 0,08 gram/cm³ serta untuk hasil %error densitas yang didapatkan adalah sebesar 2%. Data yang didapatkan ini sesuai dengan literatur yang ada, dimana semakin besar komposisi aquades yang digunakan maka nilai densitasnya meningkat [30].



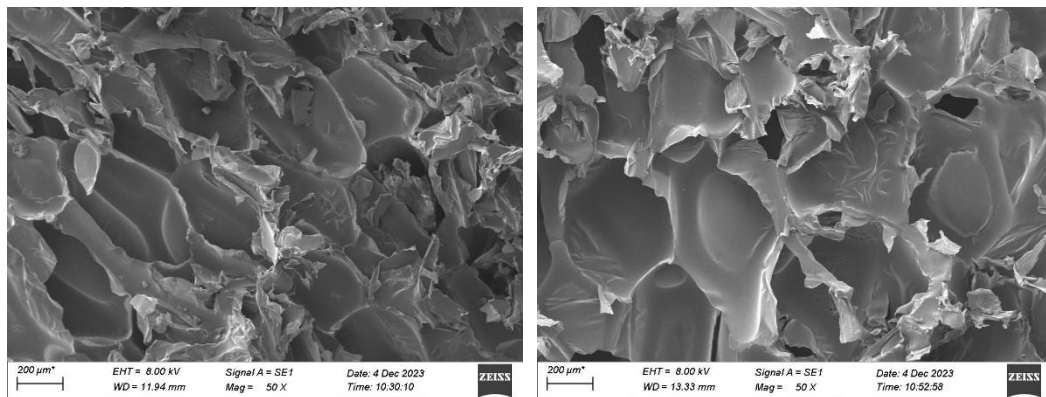
Gambar 4.7 Grafik Nilai Densitas Dengan Komposisi Aquades (a) 4,6% Sampel PUR-21 %Error dan (b) 1,5% Sampel PUR-23 %Error

Pada Gambar 4.7 dapat terlihat bahwa semakin besar komposisi aquades yang digunakan dapat meningkatkan nilai densitas busa. Busa dengan komposisi aquades sebesar 4,6% pada sampel PUR-21 memiliki nilai rata-rata densitas sebesar 0,07 gram/cm³ serta untuk hasil %error densitas yang didapatkan adalah sebesar 1,5%. Pada komposisi aquades sebesar 1,5% pada sampel PUR-23 memiliki nilai rata-rata densitas sebesar 0,06 gram/cm³ serta untuk hasil %error densitas yang didapatkan adalah

sebesar 1%. Data yang didapatkan ini sesuai dengan literatur yang ada, dimana semakin besar komposisi aquades yang digunakan maka nilai densitasnya meningkat [30].

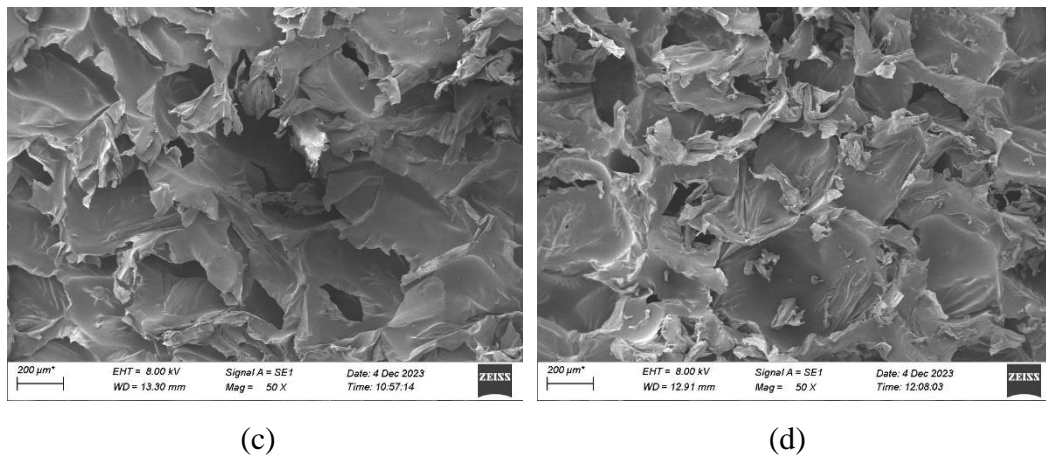
4.2.5 Analisis Pengujian SEM

Pada pengujian SEM ini dilakukan untuk mengetahui morfologi serta ukuran pori dari busa poliuretan. Pemilihan sampel untuk dilakukan pengujian SEM ini berdasarkan jenis busa yang didapatkan dari uji tekan, dimana pengujian ini bertujuan untuk membuktikan pengaruh dari ukuran pori terhadap jenis busa yang dihasilkan. Berdasarkan literatur busa dengan sifat kaku akan memiliki ukuran pori yang lebih kecil (*closed cell*) sedangkan busa dengan sifat flexible akan memiliki ukuran pori lebih besar (*open cell*) [17].



(a)

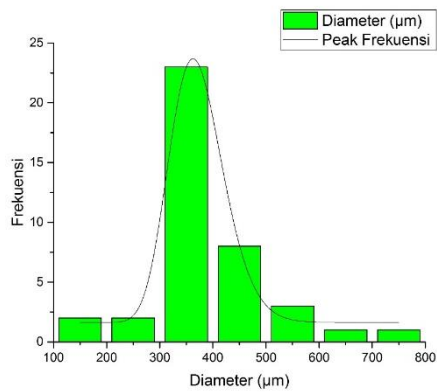
(b)



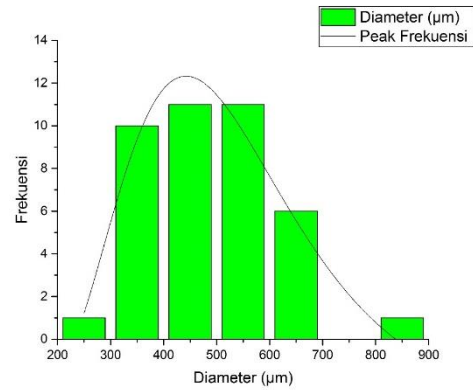
Gambar 4.8 Hasil Perbesaran Ukuran 50x SEM Busa Poliuretan (a) Sampel PUR-11 (b) Sampel PUR-21 (c) Sampel PUR-22 dan (d) Sampel PUR-23

Pada Gambar 4.8 dapat terlihat bentuk dan ukuran pori dari sampel PUR-11, PUR-21, PUR-22, dan PUR-23. Pada sampel PUR-22 merupakan busa yang memiliki nilai kekuatan paling tinggi sebesar 0,49 MPa, busa ini memiliki pori berbentuk bulat dan tertutup dengan ukuran paling kecil 245,663 μm serta ukuran terbesar 563,690 μm dengan rata-rata ukuran pori sebesar 396,964 μm . Pada sampel PUR-23 merupakan busa yang memiliki nilai kekuatan yang paling tinggi kedua sebesar 0,39 MPa, busa ini memiliki pori berbentuk bulat tidak teratur dan terbuka serta dengan ukuran paling kecil 143,838 μm serta ukuran terbesar 489,095 mm dengan rata-rata ukuran pori sebesar 282,561 μm . Pada sampel PUR-21 merupakan busa yang memiliki nilai kekuatan yang berada di Tengah-tengah sebesar 0,32 MPa, busa ini memiliki pori berbentuk bulat serta oval dan tertutup serta dengan ukuran yang paling kecil sebesar 229,224 μm serta ukuran terbesar 824,793 mm dengan rata-rata ukuran pori sebesar 489,056 μm . Pada sampel PUR-

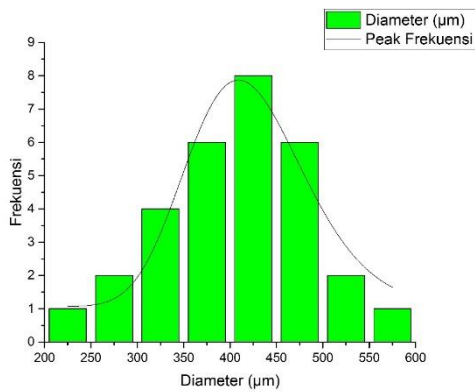
11 merupakan busa yang memiliki nilai kekuatan yang paling rendah sebesar 0,32 MPa, busa ini memiliki pori berbentuk oval dan tertutup serta dengan ukuran paling kecil 190,532 μm serta ukuran terbesar 723,718 mm dengan rata-rata ukuran pori sebesar 386,942 μm .



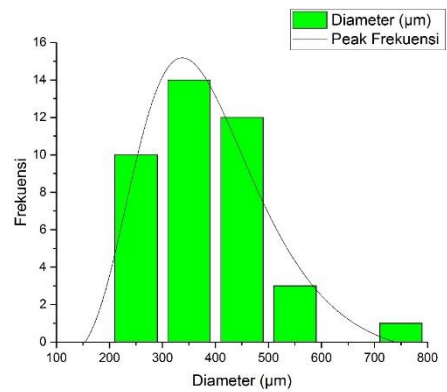
Gambar 4.9 Histogram SEM PUR-11



Gambar 4.10 Histogram SEM PUR-21



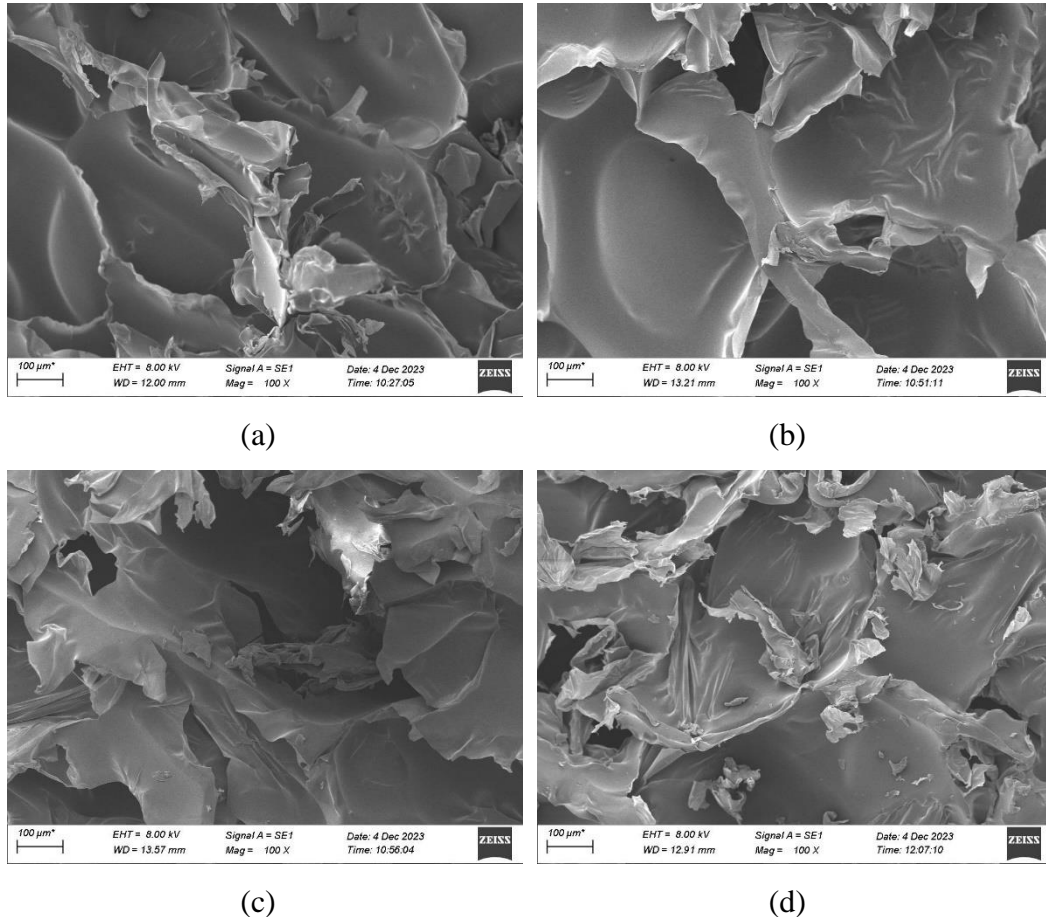
Gambar 4.11 Histogram SEM PUR-22



Gambar 4.12 Histogram SEM PUR-23

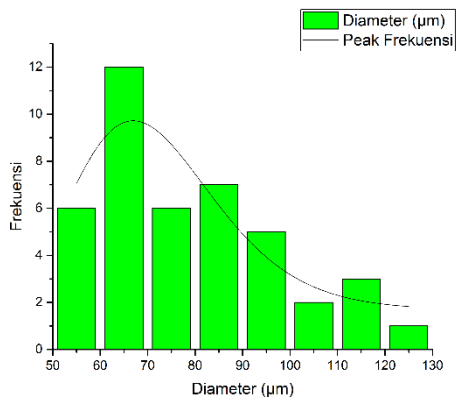
Pada Gambar 4.9 sampai Gambar 4.12 dapat dilihat terdapat histogram dari masing masing hasil dari SEM. Bisa di liat pada PUR-11 terdapat persebaran pori paling banyak antara 350 dan 400. Untuk PUR-21 terdapat persebaran pori paling banyak antara 400 dan 450. Untuk PUR-22 terdapat persebaran pori paling banyak antara 400 dan 450. Untuk PUR-23 terdapat persebaran pori paling banyak antara 300 dan 400.

terdapat persebaran pori paling banyak di antara 400 dan 425, sedangkan untuk PUR-23 terdapat persebaran pori paling banyak antara 300 dan 350.

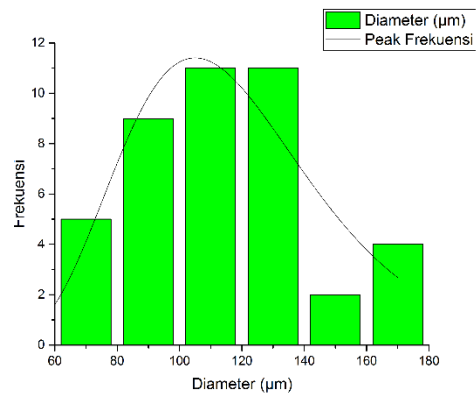


Gambar 4.13 Hasil Perbesaran Ukuran 100x SEM Busa Poliuretan (a) Sampel PUR-11 (b) Sampel PUR-21 (c) Sampel PUR-22 dan (d) Sampel PUR-23

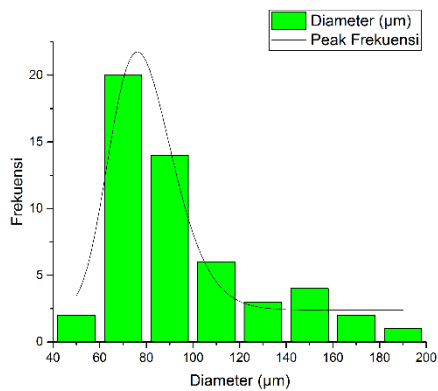
Untuk jenis bentuk busa dari masing masing sampel bisa di liat pada gambar bahwa rata-rata memiliki bentuk *close cell*, tapi ada bagian busa yang menunjukkan bentuk busa *reticulated*, hal ini menjadikan busa tersebut yaitu mix atau campur antara bentuk *close cell* dan bentuk *reticulated*. Untuk bagian dinding busa memiliki ketebalan yang bervariasi, bisa di liat pada gambar 4.13.



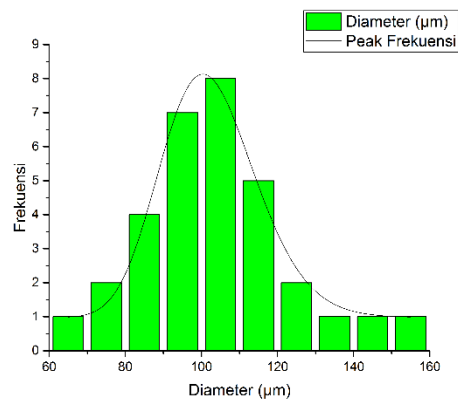
Gambar 4.14 Histogram SEM PUR-11



Gambar 4.15 Histogram SEM PUR-21



Gambar 4.16 Histogram SEM PUR-22



Gambar 4.17 Histogram SEM PUR-23

Pada Gambar 4.14 sampai Gambar 4.17 dapat dilihat terdapat histogram ketebalan dinding dari masing masing sampel. Pada PUR-11 terdapat ketebalan paling banyak antara 60 dan 70. Untuk PUR-21 terdapat ketebalan paling banyak antara 100 dan 140. Untuk PUR-22 terdapat ketebalan paling banyak di antara 60 dan 80, sedangkan untuk PUR-23 terdapat ketebalan paling banyak antara 100 dan 110.

Bab V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

- a. Limbah PET, HDPE, LDPE, LLDPE, dan PP dapat didaur ulang dengan menggunakan proses glikolisis dengan penambahan dietilen glikol dan zink asetat. Kemudian dilakukan pembuatan busa poliuretan dengan penambahan dietilen glikol dan MDI serta variasi aquades dan limbah jenis plastik lain. Didapat hasil 4 jenis busa *rigid* untuk poliol PET di gabung dengan HDPE, LDPE, LLDPE, dan PP.
- b. Semakin besar komposisi aquades yang diberikan maka gas CO₂ yang terbentuk akan semakin banyak, sehingga dapat menurunkan kekuatan dan densitas dari busa. Busa yang memiliki nilai kuat tekan, modulus young, dan *yield strength* tertinggi didapatkan pada sampel PUR-22 yaitu sebesar 0,49 MPa; 0,0301 MPa; 0,3382 MPa. Sedangkan untuk densitas tertinggi dimiliki sampel PUR-22 yaitu sebesar 0,08 gram/cm³ serta %error densitas sebesar 2%. Untuk busa yang memiliki nilai kuat tekan, modulus young, *yield strength*, terendah didapatkan pada sampel PUR-11 yaitu sebesar 0,32 MPa; 0,0256 MPa; 0,2495 MPa untuk densitas terendah dimiliki sampel PUR-11 yaitu sebesar 0,05 gram/cm³ serta %error densitas sebesar 0,5%.

- c. Busa Poliuretan yang memiliki ukuran pori terbesar yaitu pada sampel PUR-21 yang memiliki ukuran pori paling besar sebesar 824,793 μm dan ukuran paling kecil sebesar 229,224 μm . Sedangkan untuk busa poliuretan yang memiliki ukuran pori terkecil dimiliki oleh sampel PUR-23 yang memiliki ukuran pori paling besar sebesar 489,095 μm dengan ukuran paling kecil 143,838 μm .

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa saran, yaitu sebagai berikut:

- a. Disarankan melakukan pengujian tahan api untuk aplikasi sarung jok mobil agar mengetahui ketahanan dari busa poliuretan terhadap panas dan api.
- b. Pada saat ingin mengirimkan sampel untuk diuji, diukur kembali agar dimensi sampel sama satu dengan yang lainnya. Hal ini akan memastikan bahwa semua sampel memiliki dimensi yang sama dan meminimalkan variabilitas yang mungkin terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik, "Jumlah Penduduk Indonesia 2020," BPS. Accessed: May 21, 2024. [Online]. Available: <https://sensus.bps.go.id/main/index/sp2020#:~:text=Jumlah%20dan%20Distribusi%20Penduduk,adalah%20sebanyak%20270.203.917%20jiwa>
- [2] Cindy Mutia Annur, "Timbulan Sampah Indonesia Mayoritas Berasal dari Rumah Tangga," Katadata Media Network. Accessed: Jun. 12, 2023. [Online]. Available: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/03/09/timbulan-sampah-indonesia-mayoritas-berasal-dari-rumah-tangga>
- [3] P. Benyathiar, P. Kumar, G. Carpenter, J. Brace, and D. K. Mishra, "Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 12, p. 2366, 2022.
- [4] A. Ivdre, A. Abolins, I. Sevastyanova, M. Kirpluks, U. Cabulis, and R. Merijs-Meri, "Rigid polyurethane foams with various isocyanate indices based on polyols from rapeseed oil and waste PET," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 738, 2020.
- [5] S. Agyeman, N. K. Obeng-Ahenkora, S. Assiamah, and G. Twumasi, "Exploiting recycled plastic waste as an alternative binder for paving blocks production," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, p. e00246, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00246.
- [6] U. B. Surono, "Berbagai metode konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak," *Jurnal teknik*, vol. 3, no. 1, 2013.
- [7] P. Siahaan and T. Windarti, *Kimia Polimer*. Semarang: Universitas Diponegoro, 2007.
- [8] S. Venkatachalam, S. G. Nayak, J. V Labde, P. R. Gharal, K. Rao, and A. K. Kelkar, *Degradation and recyclability of poly (ethylene terephthalate)*. InTech Rijeka, Croatia, 2012.

- [9] B. Ismail, F. B. Sc, and E. E. Yassin, "Management of PET Plastic Bottles Waste Through Recycling In Khartoum State," *Sudan Acad. Sci. Eng. Res. Industrial Technol. Counc*, p. 90, 2010.
- [10] M. Sarker and M. M. Rashid, "Thermal degradation of poly (ethylene terephthalate) waste soft drinks bottles and low density polyethylene grocery bags," *International Journal of Sustainable Energy and Environment*, vol. 1, no. 3, pp. 78–86, 2013.
- [11] M. J. Forrest, *Recycling of polyethylene terephthalate*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019.
- [12] R. Coles, D. McDowell, and M. J. Kirwan, *Food packaging technology*, vol. 5. CRC press, 2003.
- [13] Y. C. Danarto, M. K. AM, and Y. R. Siwi, "Pengolahan Sampah Botol Plastik Menjadi Monomer Bhet Sebagai Bahan Baku Plastik dengan Proses Solvolysis," 2012.
- [14] A. Rahmayanti, "DEPOLIMERISASI PET PASCA KONSUMSI MELALUI GLIKOLISIS DENGAN KATALIS," *Journal of Research and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 16–22, 2015.
- [15] A. Syariffuddeen, A. Norhafizah, and A. Salmiaton, "Glycolysis of poly (ethylene terephthalate)(PET) waste under conventional convection-conductive glycolysis," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 1, no. 10, pp. 1–8, 2012.
- [16] C. T. Pham *et al.*, "Comprehensive investigation of the behavior of polyurethane foams based on conventional polyol and oligo-ester-ether-diol from waste poly (ethylene terephthalate): fireproof performances, thermal stabilities, and physicomechanical properties," *ACS Omega*, vol. 5, no. 51, pp. 33053–33063, 2020.
- [17] I. La Ifa, *Pembuatan Bahan Polimer dari Minyak sawit*. Nas Media Pustaka, 2018.
- [18] K. Ashida, *Polyurethane and related foams: chemistry and technology*. CRC press, 2006.

- [19] H. Prihastuti, “Studi Sintesis Foam Polyurethane dari Gliserol Monooleate,” Universitas Indonesia, Depok, 2007.
- [20] E. Triwulandari, N. Astrini, and A. Haryono, “Pembuatan polioliol berbasis komponen minyak sawit sebagai bahan baku busa poliuretan,” *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 16, no. 1, pp. 43–48, 2018.
- [21] H. Lim, S. H. Kim, and B. K. Kim, “Effects of silicon surfactant in rigid polyurethane foams,” *Express Polym. Lett*, vol. 2, no. 3, pp. 194–200, 2008.
- [22] G. Kiss, G. Rusu, G. Bandur, I. Hulka, D. Romecki, and F. Péter, “Advances in Low-Density Flexible Polyurethane Foams by Optimized Incorporation of High Amount of Recycled Polyol,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 11, p. 1736, 2021.
- [23] L. Poul, N. Jouini, and F. Fiévet, “Layered hydroxide metal acetates (metal= zinc, cobalt, and nickel): elaboration via hydrolysis in polyol medium and comparative study,” *Chemistry of Materials*, vol. 12, no. 10, pp. 3123–3132, 2000.
- [24] C. Defonseka, *Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams*. Smithers Information Limited, 2013. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=ffwIDwAAQBAJ>
- [25] D. Ridayani, M. B. Malino, and A. Asifa, “Analisis Porositas dan Susut Bakar keramik Berpori Berbasis Clay dan Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit,” *Prisma Fisika*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [26] W. Hidayat, “Klasifikasi dan Sifat Material Teknik Serta Pengujian Material,” 2019.
- [27] A. B. D. M. D. Bisioni, M. S. Hamzah, and A. Sam, “Sifat Kuat Tekan Dan Impak Komposit Abu Sekam Padi/Alumina,” *Jurnal Mekanikal*, vol. 10, no. 1, 2019.
- [28] M. Martinez, “Sebuah Pemahaman Dasar Scanning Electron Microscopy (SEM) and Mikroskop Elektron (SEM) dan Energy Dispersive X-ray Detection (EDX).” 2010.
- [29] K. Warni and I. Dewata, “Penentuan Limbah Mikroplastik Polyethylene Terephthalate (PET) dengan Metoda Glikolisis dalam Air Laut di Kota

Padang,” *Jurnal Periodic Jurusan Kimia UNP*, vol. 10, no. 1, p. 21, Feb. 2021, doi: 10.24036/p.v10i1.109582.

- [30] W. J. Seo *et al.*, “Mechanical, morphological, and thermal properties of rigid polyurethane foams blown by distilled water,” *J Appl Polym Sci*, vol. 90, no. 1, pp. 12–21, 2003.

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN

Lampiran A. Perhitungan

A.1 Volume MDI

- Massa Poliuretan

$$\text{Massa Poliuretan} = \text{Volume Poliuretan} \times \text{Massa Jenis Poliuretan}$$

$$\text{Massa Poliuretan} = 100 \text{ ml} \times 1,45 \text{ gram/ml}$$

$$\text{Massa Poliuretan} = 145 \text{ gram}$$

- Massa MDI

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

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

- Volume MDI

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

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

$$\text{Volume MDI} = 58,9 \text{ ml} \approx 59 \text{ ml}$$

- Massa 10% MDI

$$\text{Massa 10\% MDI} = \text{Massa MDI} \times 10\%$$

$$\text{Massa 10\% MDI} = 72,5 \text{ gram} \times 10\% = 7,25 \text{ gram}$$

- Volume 10% MDI

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

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

$$\text{Volume MDI} = 5,89 \text{ ml} \approx 5,9 \text{ ml}$$

- Total Massa MDI

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

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

- 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 Polioliol

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

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

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

A.3 Massa Bahan Proses Glikolisis

- Massa LDPE 16 gram

$$\text{➤ Mol LDPE} = \frac{\text{Massa LDPE}}{\text{Berat Molekul LDPE}}$$

$$\text{Mol LDPE} = \frac{16 \text{ gram}}{60.000 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Mol LDPE} = 0,00027 \text{ mol}$$

- Zink Asetat

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \text{ LDPE}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \times 16 \text{ gram}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,08 \text{ gram}$$

- Mol DEG (Mol LDPE : Mol DEG = 1 : 4)

$$\text{Mol DEG} = 4 \times \text{Mol LDPE}$$

$$\text{Mol DEG} = 4 \times 0,00027 \text{ mol}$$

$$\text{Mol DEG} = 0,000108 \text{ mol}$$

- Massa DEG

$$\text{Massa DEG} = \text{Mol DEG} \times \text{Berat Molekul DEG}$$

$$\text{Massa DEG} = 0,000108 \text{ mol} \times 106,12 \text{ gram/mol}$$

$$\text{Massa DEG} = 0,115 \text{ gram}$$

➤ Volume DEG

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

$$\text{Volume DEG} = \frac{0,115 \text{ gram}}{1,118 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Volume DEG} = 0,103 \text{ ml}$$

• Massa LLDPE 16 gram

➤ $\text{Mol LLDPE} = \frac{\text{Massa LLDPE}}{\text{Berat Molekul LLDPE}}$

$$\text{Mol LLDPE} = \frac{16 \text{ gram}}{300.000 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Mol LLDPE} = 0,000053 \text{ mol}$$

➤ Zink Asetat

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \text{ LLDPE}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \times 16 \text{ gram}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,08 \text{ gram}$$

➤ Mol DEG (Mol LLDPE : Mol DEG = 1 : 4)

$$\text{Mol DEG} = 4 \times \text{Mol LLDPE}$$

$$\text{Mol DEG} = 4 \times 0,000053 \text{ mol}$$

$$\text{Mol DEG} = 0,0002132 \text{ mol}$$

➤ Massa DEG

$$\text{Massa DEG} = \text{Mol DEG} \times \text{Berat Molekul DEG}$$

$$\text{Massa DEG} = 0,0002132 \text{ mol} \times 106,12 \text{ gram/mol}$$

$$\text{Massa DEG} = 0,0226 \text{ gram}$$

➤ Volume DEG

$$\text{Volume DEG} = \frac{\text{Massa DEG}}{\text{Berat Molekul DEG}}$$

$$\text{Volume DEG} = \frac{0,0226 \text{ gram}}{1,118 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Volume DEG} = 0,0202 \text{ ml}$$

- Massa HDPE 16 gram

➤ $\text{Mol HDPE} = \frac{\text{Massa HDPE}}{\text{Berat Molekul HDPE}}$

$$\text{Mol HDPE} = \frac{16 \text{ gram}}{200 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Mol HDPE} = 0,08 \text{ mol}$$

- Zink Asetat

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \text{ HDPE}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \times 16 \text{ gram}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,08 \text{ gram}$$

- Mol DEG (Mol HDPE : Mol DEG = 1 : 4)

$$\text{Mol DEG} = 4 \times \text{Mol HDPE}$$

$$\text{Mol DEG} = 4 \times 0,08 \text{ mol}$$

$$\text{Mol DEG} = 0,32 \text{ mol}$$

- Massa DEG

$$\text{Massa DEG} = \text{Mol DEG} \times \text{Berat Molekul DEG}$$

$$\text{Massa DEG} = 0,32 \text{ mol} \times 106,12 \text{ gram/mol}$$

$$\text{Massa DEG} = 33,96 \text{ gram}$$

- Volume DEG

$$\text{Volume DEG} = \frac{\text{Massa DEG}}{\text{Berat Molekul DEG}}$$

$$\text{Volume DEG} = \frac{33,96 \text{ gram}}{1,118 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Volume DEG} = 30,376 \text{ ml}$$

- Massa PP 16 gram

$$\text{➤ Mol PP} = \frac{\text{Massa PP}}{\text{Berat Molekul PP}}$$

$$\text{Mol PP} = \frac{16 \text{ gram}}{525.000 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Mol PP} = 0,0000305 \text{ mol}$$

➤ Zink Asetat

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \text{ PP}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,5\% \times 16 \text{ gram}$$

$$\text{Zink Asetat} = 0,08 \text{ gram}$$

➤ Mol DEG (Mol PP : Mol DEG = 1 : 4)

$$\text{Mol DEG} = 4 \times \text{Mol PP}$$

$$\text{Mol DEG} = 4 \times 0,0000305 \text{ mol}$$

$$\text{Mol DEG} = 0,000122 \text{ mol}$$

➤ Massa DEG

$$\text{Massa DEG} = \text{Mol DEG} \times \text{Berat Molekul DEG}$$

$$\text{Massa DEG} = 0,000122 \text{ mol} \times 106,12 \text{ gram/mol}$$

$$\text{Massa DEG} = 0,0129 \text{ gram}$$

➤ Volume DEG

$$\text{Volume DEG} = \frac{\text{Massa DEG}}{\text{Berat Molekul DEG}}$$

$$\text{Volume DEG} = \frac{0,0129 \text{ gram}}{1,118 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Volume DEG} = 0,0115 \text{ ml}$$

• Massa PET 40 gram

$$\text{➤ Mol PET} = \frac{\text{Massa PET}}{\text{Berat Molekul PET}}$$

$$\text{Mol PET} = \frac{16 \text{ gram}}{192 \text{ gram/mol}}$$

$$\text{Mol PET} = 0,083 \text{ mol}$$

- Zink Asetat
 Zink Asetat = 0,5% PET
 Zink Asetat = 0,5% x 40 gram
 Zink Asetat = 0,2 gram

- Mol DEG (Mol PET : Mol DEG = 1 : 4)
 Mol DEG = 4 x Mol PET
 Mol DEG = 4 x 0,083 mol
 Mol DEG = 0,332 mol

- Massa DEG
 Massa DEG = Mol DEG x Berat Molekul DEG
 Massa DEG = 0,332 mol x 106,12 gram/mol
 Massa DEG = 35,232 gram

- Volume DEG

$$\text{Volume DEG} = \frac{\text{Massa DEG}}{\text{Berat Molekul DEG}}$$

$$\text{Volume DEG} = \frac{35,232 \text{ gram}}{1,118 \text{ gram/mol}}$$
 Volume DEG = 31,513 ml

A.4 Massa Aquades dan Surfaktan

- Sampel PUR-11
 - Massa poliol PET = 10,24 g
 Massa poliol HDPE = 10,24 x 3% = 0,31 g
 Massa poliol PET+HDPE = 10,55 g

 - Massa Aquades
 Massa Aquades = 1,32% x massa poliol
 Massa Aquades = 1,32% x 10,55 g
 Massa Aquades = 1,14 g

- Massa Surfaktan
 - Massa Surfaktan = 4% x massa poliol
 - Massa Surfaktan = 4% x 10,55 g
 - Massa Surfaktan = 0,42 g

- Sampel PUR-21
 - Massa poliol PET = 10,78 g
 - Massa poliol LDPE = 10,78 x 3,5% = 0,38 g
 - Massa poliol PET+LDPE = 11,16 g

 - Massa Aquades
 - Massa Aquades = 4,6% x massa poliol
 - Massa Aquades = 4,6% x 11,16 g
 - Massa Aquades = 0,51 g

 - Massa Surfaktan
 - Massa Surfaktan = 3,9% x massa poliol
 - Massa Surfaktan = 3,9% x 11,16 g
 - Massa Surfaktan = 0,44 g

- Sampel PUR-22
 - Massa poliol PET = 10,92 g
 - Massa poliol LLDPE = 10,92 x 3,6% = 0,39 g
 - Massa poliol PET+LLDPE = 11,31 g

 - Massa Aquades
 - Massa Aquades = 1,5% x massa poliol
 - Massa Aquades = 1,5% x 11,31 g
 - Massa Aquades = 0,17 g

 - Massa Surfaktan

$$\text{Massa Surfaktan} = 3,9\% \times \text{massa poliol}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 3,9\% \times 11,31 \text{ g}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 0,44 \text{ g}$$

- Sampel PUR-23

- Massa poliol PET = 10,79 g

$$\text{Massa poliol PP} = 10,79 \times 3,6\% = 0,39 \text{ g}$$

$$\text{Massa poliol PET+PP} = 11,18 \text{ g}$$

- Massa Aquades

$$\text{Massa Aquades} = 1,5\% \times \text{massa poliol}$$

$$\text{Massa Aquades} = 1,5\% \times 11,18 \text{ g}$$

$$\text{Massa Aquades} = 0,17 \text{ g}$$

- Massa Surfaktan

$$\text{Massa Surfaktan} = 3,9\% \times \text{massa poliol}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 3,9\% \times 11,18 \text{ g}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 0,44 \text{ g}$$

- Massa Surfaktan

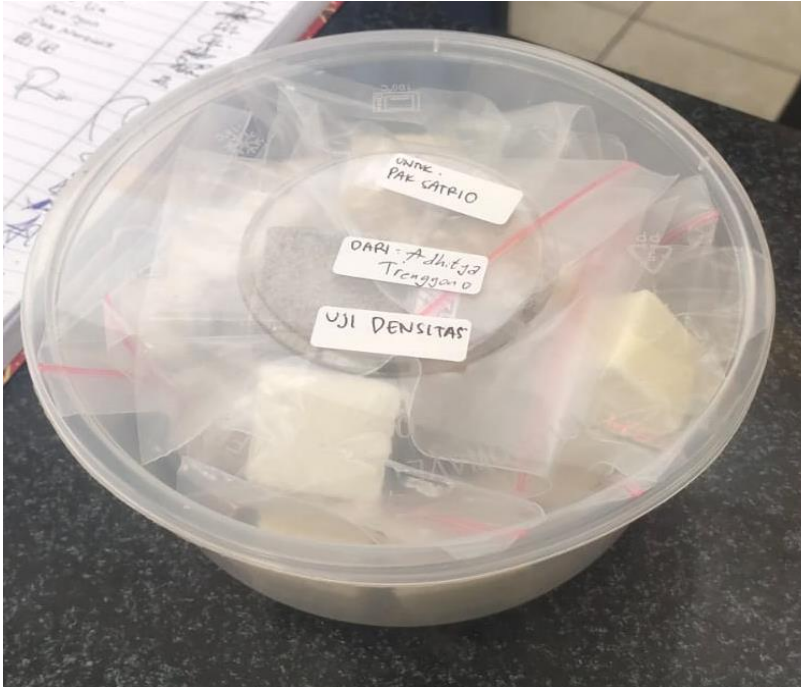
$$\text{Massa Surfaktan} = 3,9\% \times \text{massa poliol}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 3,9\% \times 11,18 \text{ g}$$

$$\text{Massa Surfaktan} = 0,44 \text{ g}$$

LAMPIRAN B
DATA DAN HASIL PENELITIAN

Lampiran B.1. Data Hasil Penelitian



Gambar B1. Sampel yang Dikirim Untuk Pengujian



Gambar B2. Sampel yang Dihasilkan

B.2 Data Uji 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 : Sponge Polymer
Deskripsi : -
Tgl. Terima sampel : 06/11/2023
Tgl. Pengujian : 06/11/2023 - 08/11/2023
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)	
PUR-8	0.071724	0.064255	0.064196	0.066725
PUR-11	0.058900	0.061035	0.059286	0.059740
PUR-21	0.072552	0.073250	0.071283	0.072361
PUR-22	0.082962	0.081213	0.083667	0.082614
PUR-23	0.066638	0.066957	0.067259	0.066951
PUR-7	0.118174	0.107221	0.115970	0.113788
PUR-14	0.067083	0.067249	0.069192	0.067841
PUR-15	0.096901	0.094206	0.097988	0.096365
PUR-17	0.048484	0.045496	0.044001	0.045993
PUR-18	0.052353	0.055226	0.055438	0.054339

*) Hasil pengujian hanya merepresentasikan kondisi sampel yang diuji.

Dilaksanakan oleh:	Made Subekti Dwijaya, M.T.
Diperiksa oleh:	Made Subekti Dwijaya, M.T.

Tgl. Terbit Laporan: 14/11/2023

Halaman 1/1

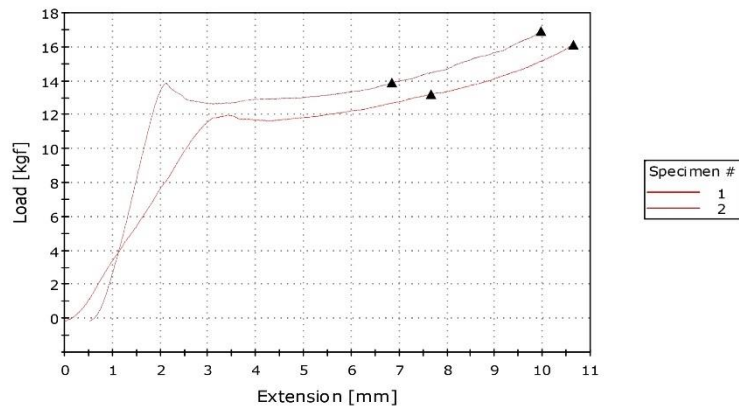
B.3 Data Uji Kuat Tekan

TEST REPORT



No. Report	073/EXT/JNT/MT/11/2023
Test Method	ASTM D1621
Rate 1	5.00000 mm/min

Specimen 1 to 2



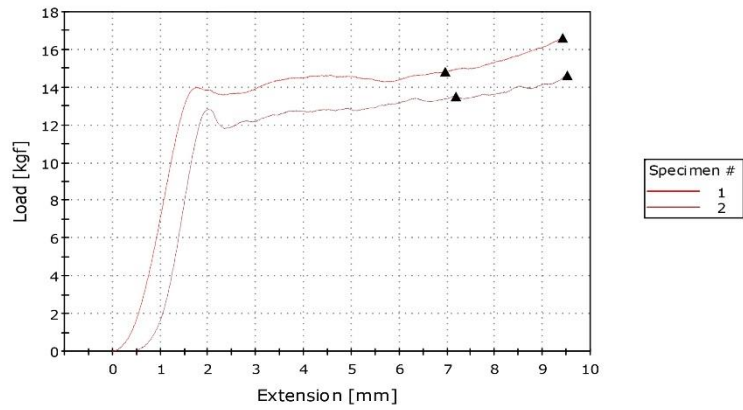
	Description	Width [mm]	Thickness [mm]	Load at yield [N]	Compressive stress at yield [MPa]	Maximum Load [N]	Compressive stress at Maximum Load [MPa]
1	PUR-11 1	23.20	21.44	130.06	0.26	158.07	0.32
2	PUR-11 2	25.14	20.38	142.75	0.28	166.01	0.32

TEST REPORT



No. Report	078/EXT/UNT/MT/11/2023
Test Method	ASTM D1621
Rate 1	5.00000 mm/min

Specimen 1 to 2



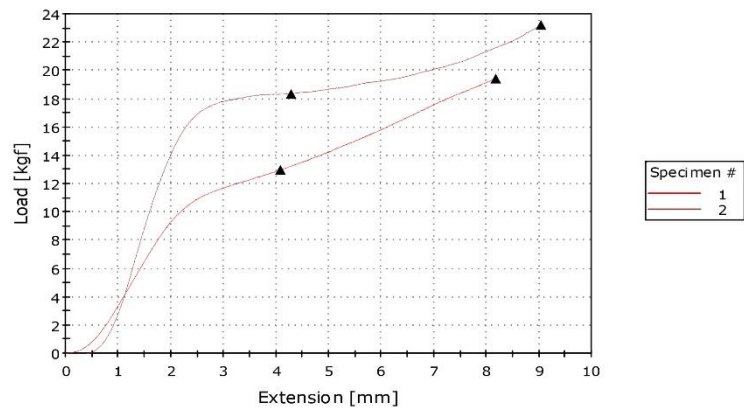
	Description	Width [mm]	Thickness [mm]	Load at yield [N]	Compressive stress at yield [MPa]	Maximum Load [N]	Compressive stress at Maximum Load [MPa]
1	PUR-21 1	24.15	20.85	150.50	0.30	162.93	0.32
2	PUR-21 2	22.86	19.82	135.33	0.30	143.65	0.32

TEST REPORT



No. Report	079/EXT/UNT/MT/11/2023
Test Method	ASTM D1621
Rate 1	5.00000 mm/min

Specimen 1 to 2



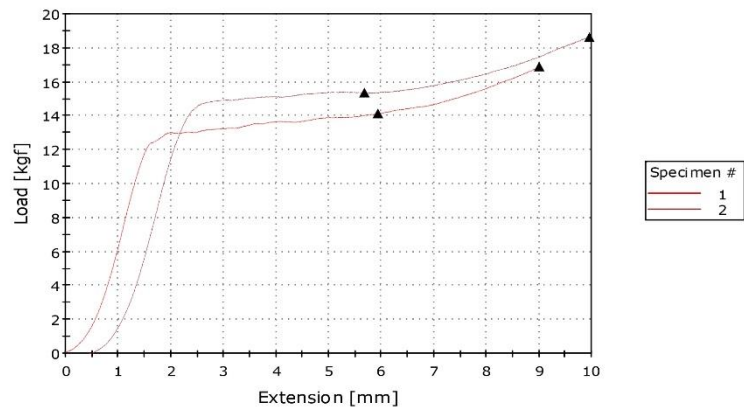
	Description	Width [mm]	Thickness [mm]	Load at yield [N]	Compressive stress at yield [MPa]	Maximum Load [N]	Compressive stress at Maximum Load [MPa]
1	PUR-22 1	21.20	20.20	135.99	0.32	190.49	0.44
2	PUR-22 2	20.53	20.38	185.26	0.44	227.68	0.54

TEST REPORT



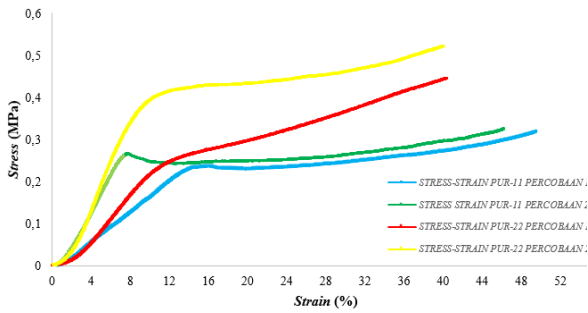
No. Report	080/EXT/UNT/MT/11/2023
Test Method	ASTM D1621
Rate 1	5.00000 mm/min

Specimen 1 to 2

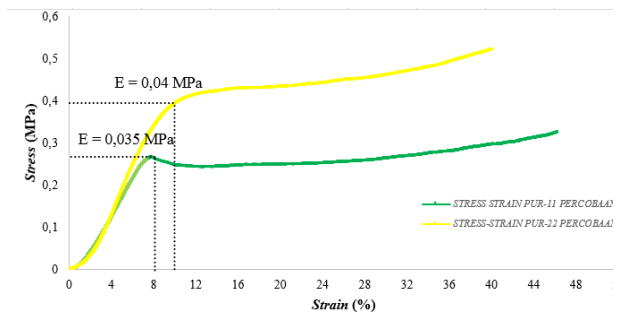


	Description	Width [mm]	Thickness [mm]	Load at yield [N]	Compressive stress at yield [MPa]	Maximum Load [N]	Compressive stress at Maximum Load [MPa]
1	PUR-23 1	22.07	19.39	142.93	0.33	165.65	0.39
2	PUR-23 2	22.61	20.66	154.34	0.33	182.71	0.39

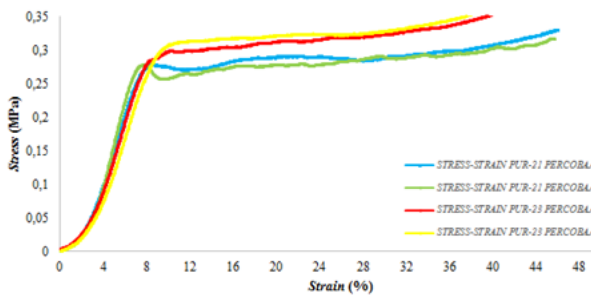
B.4 Data Kuat Tekan



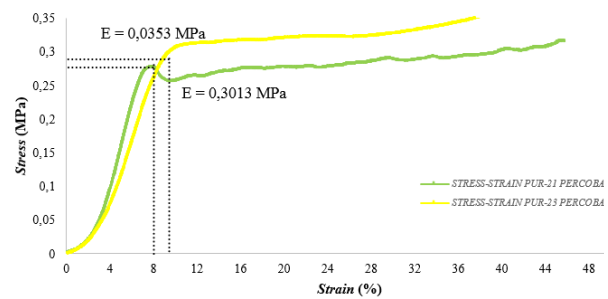
Gambar B.1 Kuat Tekan PUR-11 & PUR-22



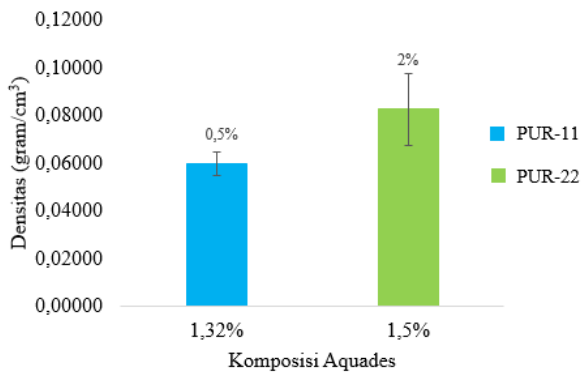
Gambar B.2 Kuat Tekan PUR-11 & PUR-22



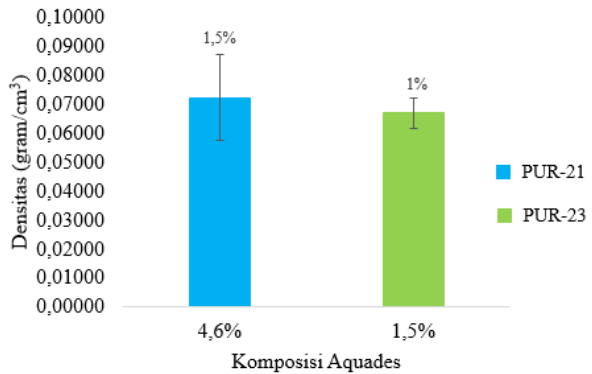
Gambar B.3 Kuat Tekan PUR-21 & 23



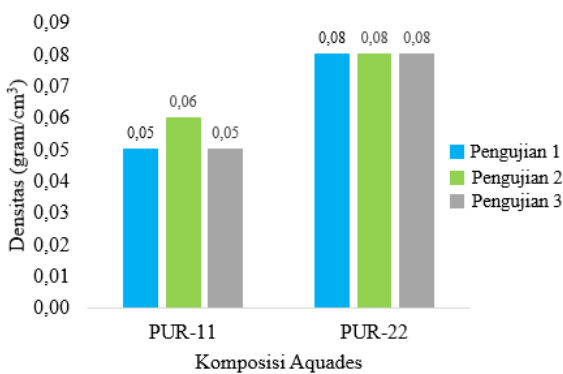
Gambar B.4 Kuat Tekan PUR-21 & 23



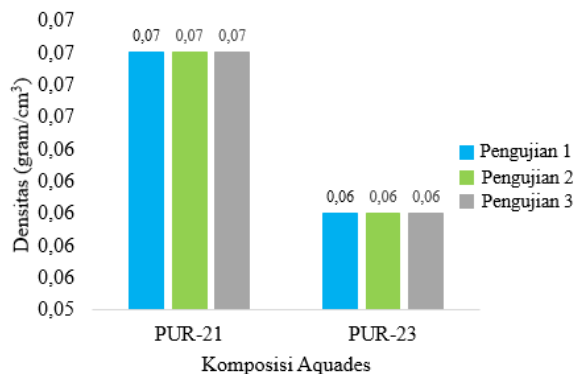
Gambar B.5 Densitas PUR-11 & PUR-22



Gambar B.6 Densitas PUR-21 & PUR-23

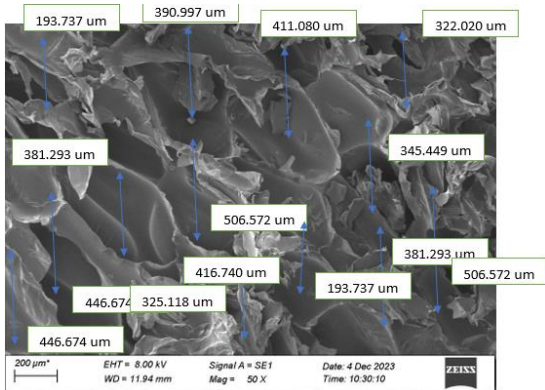


Gambar B.7 Densitas PUR-11 & PUR-22

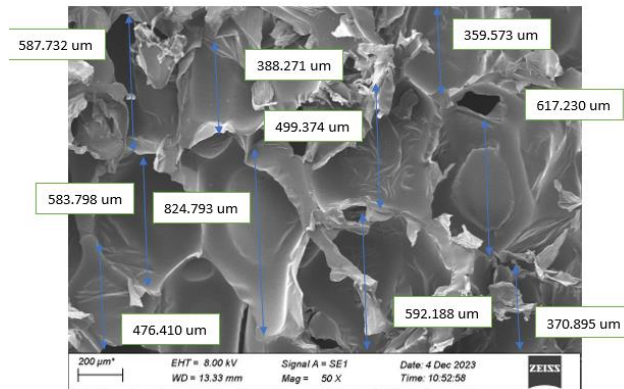


Gambar B.8 Densitas PUR-21 & PUR-23

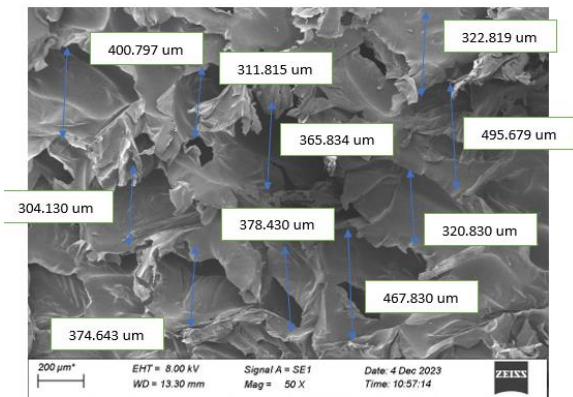
B.5 Data SEM



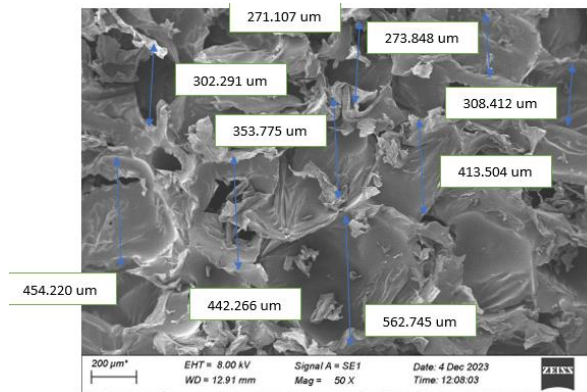
Gambar B.9 SEM PUR-11 Ukuran 50x



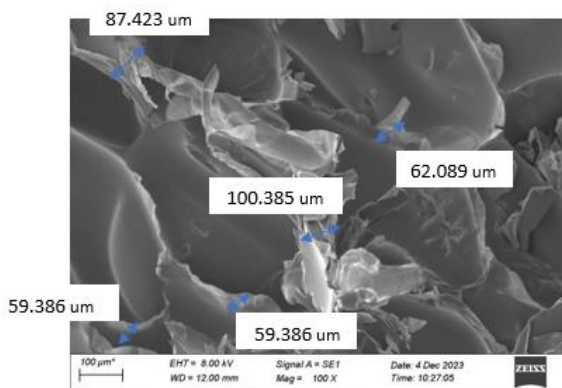
Gambar B.10 SEM PUR-21 Ukuran 50x



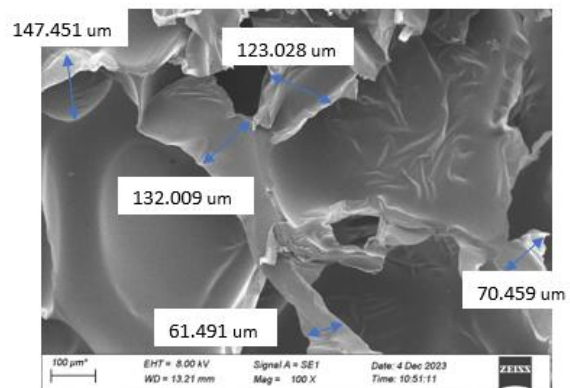
Gambar B.11 SEM PUR-22 Ukuran 50x



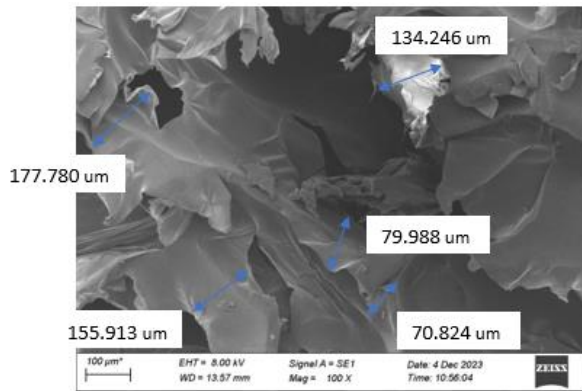
Gambar B.12 SEM PUR-23 Ukuran 50x



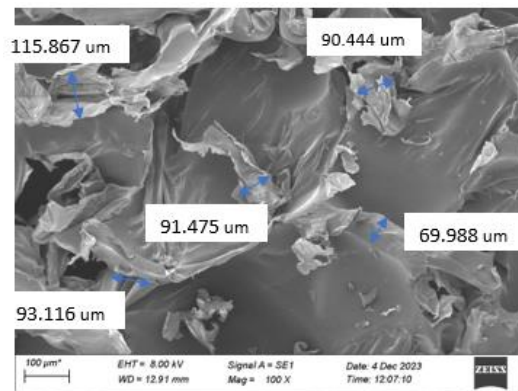
Gambar B.13 SEM PUR-11 Ukuran 100x



Gambar B.14 SEM PUR-21 Ukuran 100x



Gambar B.15 SEM PUR-22 Ukuran 50x



Gambar B.16 SEM PUR-23 Ukuran 50x

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



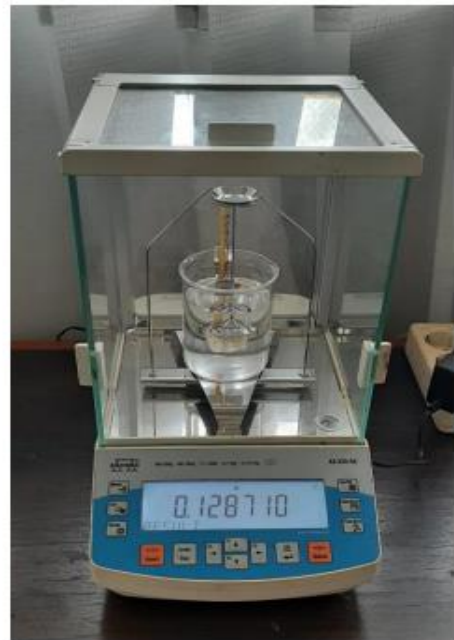
Gambar C.7 Plastik Sampel



Gambar C.8 Spatula *Metal*



Gambar C.9 Alat Pengujian Uji Tekan

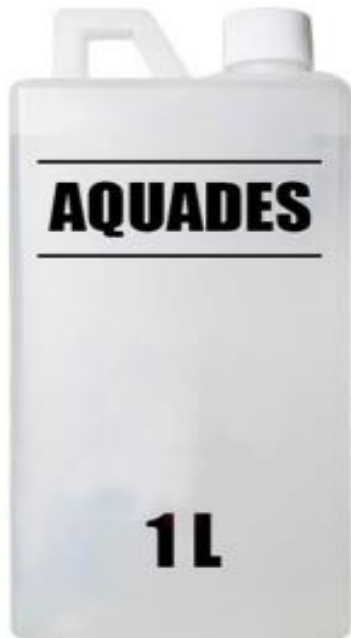


Gambar C.10 Alat Pengujian Densitas



Gambar C.11 Timbangan Digital

C.2 Bahan



Gambar C.12 Aquades



Gambar C.13 MDI



Gambar C.14 Dietilen Glikol



Gambar C.15 Surfaktan Silikon



Gambar C.16 Botol Plastik PET



Gambar C.17 Plastik LDPE



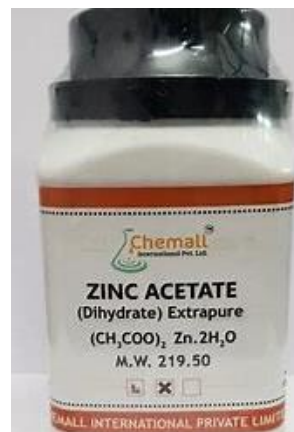
Gambar C.18 Plastik HDPE



Gambar C.19 Plastik LLDPE



Gambar C.20 Plastik Sedotan PP



Gambar C.21 Zinc Asetat



Gambar C.22 Plastik Glikolisis HDPE



Gambar C.23 Plastik Glikolisis PP



Gambar C.24 Plastik Glikolisis LDPE



Gambar C.25 Plastik Glikolisis LLDPE



Gambar C.26 Larutan Glikolisis



Gambar C.27 Larutan Glikolisis