



TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS PENGARUH *PROPERTIES ADHESIVE* DAN PANJANG *OVERLAP* TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN *ADHESIVE* TIPE *SINGLE LAP* YANG DIBEKANI *IMPACT* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**RAHMAD TRY SUSETYO**  
NRP 0211184000043

Dosen Pembimbing  
**Dr. Eng. YOHANES, S.T., M.Sc.**  
NIP 198006272012121003

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022





TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS PENGARUH *PROPERTIES ADHESIVE* DAN PANJANG *OVERLAP* TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN *ADHESIVE* TIPE *SINGLE LAP* YANG DIBEKANI *IMPACT* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**RAHMAD TRY SUSETYO**  
NRP 0211184000043

Dosen Pembimbing  
**Dr. Eng. YOHANES, S.T., M.Sc.**  
NIP 198006272012121003

**Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin**  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022





**FINAL PROJECT - TM184835**

**ADHESIVE PROPERTIES AND OVERLAP LENGTH  
EFFECT ANALYSIS TO MECHANICAL PROPERTIES OF  
SINGLE LAP ADHESIVE JOINTS LOADED WITH IMPACT  
USING FINITE ELEMENT METHOD**

**RAHMAD TRY SUSETYO**  
NRP 0211184000043

Advisor

**Dr. Eng. YOHANES, S.T., M.Sc.**  
NIP 198006272012121003

**Study Program S-1 Mechanical Engineering Department**  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022



## LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH *PROPERTIES ADHESIVE* DAN PANJANG *OVERLAP* TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN *ADHESIVE* TIPE *SINGLE LAP* YANG DIBEKANI *IMPACT* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:



**Rahmad Try Susetvo**  
NRP. 02111840000043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M. Sc. ..... (Pembimbing)  
NIP. 198006272012121003
2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA ..... (Penguji 1)  
NIP. 196508101991021001
3. Dr.Eng. Sutikno, S.T., M.T. ..... (Penguji II)  
NIP. 197407032000031001

**SURABAYA**  
**JULI, 2022**



**APPROVAL SHEET**

**ADHESIVE PROPERTIES AND OVERLAP LENGTH EFFECT ANALYSIS TO  
MECHANICAL PROPERTIES OF SINGLE LAP ADHESIVE JOINTS LOADED WITH  
IMPACT USING FINITE ELEMENT METHOD**

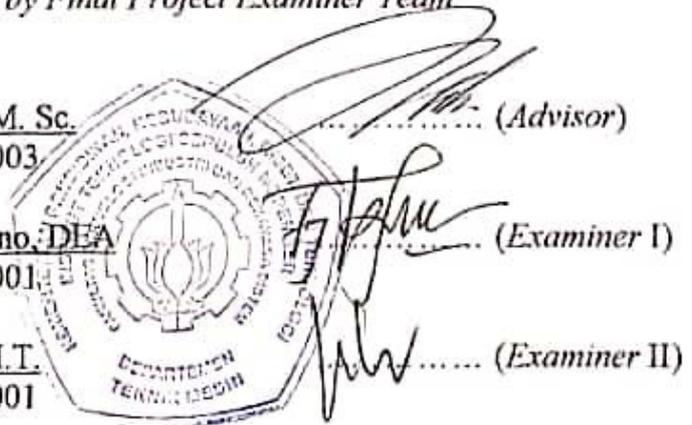
**FINAL PROJECT**

*Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Sepuluh Nopember Institute of Technology*

By:  


**Rahmad Try Susetvo**  
NRP. 02111840000043

*Approved by Final Project Examiner Team*

1. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M. Sc. ..... (Advisor)  
NIP. 198006272012121003
  2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA ..... (Examiner I)  
NIP. 196508101991021001
  3. Dr.Eng. Sutikno, S.T., M.T. ..... (Examiner II)  
NIP. 197407032000031001
- 

**SURABAYA  
JULY, 2022**



## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Rahmad Try Susetyo / 0211184000043  
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS  
Dosen Pembimbing/NIP : Dr.Eng. Yohanes, S.T., M. Sc. / 198006272012121003

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh *Properties Adhesive* dan Panjang *Overlap* Terhadap Sifat Mekanik Sambungan *Adhesive* Tipe *Single Lap* yang Dibebani *Impact* Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 7 Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



(Dr.Eng. Yohanes, S.T., M. Sc.)  
NIP. 198006272012121003

Mahasiswa,



(Rahmad Try Susetyo)  
NRP. 0211184000043



## STATEMENT OF ORIGINALITY

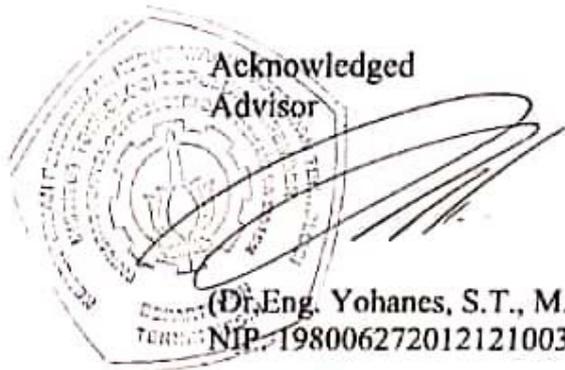
The undersigned below:

Name of Student / NRP : Rahmad Try Susetyo / 02111840000043  
Department : Mechanical Engineering FT-IRS ITS  
Advisor / NIP : Dr.Eng. Yohanes, S.T., M. Sc. / 198006272012121003

Hereby declare that the Final Project with the title of “Adhesive Properties and Overlap Length Effect Analysis to Mechanical Properties of Single Lap Adhesive Joints Loaded with Impact using Finite Element Method” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 7 July 2022

  
**Acknowledged  
Advisor**  
(Dr.Eng. Yohanes, S.T., M. Sc.)  
NIP. 198006272012121003

Student,

  
(Rahmad Try Susetyo)  
NRP. 02111840000043



# ANALISIS PENGARUH *PROPERTIES ADHESIVE* DAN PANJANG *OVERLAP* TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN *ADHESIVE* TIPE *SINGLE LAP* YANG DIBEKANI *IMPACT* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Rahmad Try Susetyo  
NRP : 0211184000043  
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Yohanes, S.T. MSc

## ABSTRAK

Penggunaan sambungan *adhesive* pada struktur ringan untuk kendaraan semakin berkembang serta melengkapi sambungan mekanis konvensional. Berkembangnya penerapan sambungan *adhesive* disebabkan oleh keuntungan yang didapatkan dibanding dengan jenis sambungan konvensional. Sambungan *adhesive* mampu mendapatkan kekuatan yang diinginkan, meminimalkan konsentrasi tegangan saat diberi beban, dan menyesuaikan dengan bentuk geometri yang diharapkan. Hal ini berkaitan dengan sifat mekanik yaitu kekuatan dan elastisitas sambungan pada suatu material. Alat yang dapat mengetahui sifat mekanik dari sambungan pada suatu material yaitu *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB).

SHPB digunakan untuk mengetahui respons material pada laju deformasi tinggi. Respons tersebut dihitung dari sinyal regangan yang diukur pada *input bar* dan *output bar*. Hasil tersebut merepresentasikan *stress-strain curve* dari kombinasi *adherend* dan *adhesive* dalam satu kesatuan. Akan tetapi, dalam hal ini distribusi tegangan pada lapisan *adhesive* tidak nampak. Simulasi numerik dengan metode elemen hingga dapat digunakan untuk menjelaskan distribusi tegangan tersebut. Penelitian ini menganalisis pengaruh *properties adhesive* dan panjang *overlap* terhadap sifat mekanik berupa *strength*, *elasticity*, Modulus Young, dan *energy density* pada sambungan *adhesive lap joint*. Variasi yang diberikan adalah *properties adhesive* yakni *prony series* beserta *Young's Modulus* dari *epoxy resin* dan *polyurethane* serta panjang *overlap* sebesar 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm.

Hasil yang didapatkan dari pengujian ini menunjukkan bahwa *properties adhesive* beserta panjang *overlap* berpengaruh terhadap sifat mekanik pada sambungan *adhesive*. *Prony series* yang memodelkan material viskoelastik yang semakin sulit untuk terdeformasi dan semakin tinggi nilai *Young's Modulus* maka semakin tinggi pula *strength*, Modulus Young, dan *energy density* pada sambungan *adhesive*. Dan, *prony series* yang memodelkan material viskoelastik yang semakin mudah untuk terdeformasi dan semakin rendah nilai *Young's Modulus* maka semakin tinggi *elasticity* pada sambungan *adhesive*. Selain itu, semakin panjang *overlap* yang digunakan pada sambungan *adhesive* maka semakin sulit sambungan *adhesive* untuk terdeformasi sehingga kemampuan fleksibilitas juga semakin berkurang akibatnya *strength*, Modulus Young, dan *energy density* mengalami peningkatan sementara *elasticity* mengalami penurunan. Distribusi tegangan dari *peel stress* dan *shear stress* dengan kegagalan terkecil terjadi pada *epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm. Hal ini dikarenakan pengaruh dari *prony series* yang sulit untuk terdeformasi dan nilai *Young's Modulus* yang tinggi sehingga kekuatan *adhesive* juga semakin tinggi pula disertai dengan panjang *overlap* 25 mm yang berpengaruh dalam meningkatkan kekuatan *adhesive*. *Epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm mengalami kegagalan yang melebihi batas aman, yakni ketika menerima *impact* dengan *initial velocity* dari *striker bar* sebesar 20 m/s untuk *peel stress* dan 30 m/s untuk *shear stress*.

**Kata kunci:** *Split Hopkinson Pressure Bar, Adhesive, Overlap, Single Lap Joint*

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

**ADHESIVE PROPERTIES AND OVERLAP LENGTH EFFECT ANALYSIS TO  
MECHANICAL PROPERTIES OF SINGLE LAP ADHESIVE JOINTS LOADED WITH  
IMPACT USING FINITE ELEMENT METHOD**

**Student Name** : Rahmad Try Susetyo  
**NRP** : 0211184000043  
**Department** : Mechanical Engineering FT-IRS ITS  
**Advisor** : Dr. Eng. Yohanes, S.T. MSc

**ABSTRACT**

*The use of adhesive joints in lightweight structures for vehicles is growing and complementing conventional mechanical joints. The development of the application of adhesive joints is due to the advantages obtained compared to conventional types of joints. Adhesive joints are able to obtain the desired strength, minimize stress concentrations when given a load, and conform to the desired geometric shape. This is related to the mechanical properties, namely the strength and elasticity of the connection in a material. A tool that can determine the mechanical properties of the connection on a material is the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB).*

*SHPB is used to determine the response of materials at high deformation rates. The response is calculated from the strain signal measured at the input bar and output bar. These results represent the stress-strain curve of the combination of adherend and adhesive in one unit. However, in this case the stress distribution on the adhesive layer is not visible. Numerical simulation using the finite element method can be used to explain the stress distribution. This study analyzes the effect of adhesive properties and overlap length on mechanical properties such as strength, elasticity, Young's modulus, and energy density at the adhesive lap joint. The variations given are adhesive properties, namely the prony series along with Young's Modulus of epoxy resin and polyurethane and overlapping lengths of 10 mm, 15 mm, 20 mm, and 25 mm.*

*The results obtained from this test indicate that the adhesive properties along with the overlap length affect the mechanical properties of the adhesive joint. Prony series which models viscoelastic materials that are increasingly difficult to deform and the higher the Young's Modulus value, the higher the strength, Young's modulus, and energy density at the adhesive joint. And, the prony series which models a viscoelastic material that is easier to deform and the lower the Young's Modulus value, the higher the elasticity of the adhesive joint. In addition, the longer the overlap used in the adhesive joint, the more difficult it is for the adhesive joint to deform so that the flexibility ability also decreases as a result of which the strength, Young's modulus, and energy density increase while the elasticity decreases. The stress distribution of peel stress and shear stress with the smallest failure occurred in the epoxy resin with an overlap length of 25 mm. This is due to the influence of the prony series which is difficult to deform and the high value of Young's Modulus so that the adhesive strength is also higher, accompanied by an overlap length of 25 mm which has an effect on increasing the adhesive strength. Epoxy resin with an overlap length of 25 mm failed to exceed the safe limit, namely when it received an impact with an initial velocity of the striker bar of 20 m/s for peel stress and 30 m/s for shear stress.*

**Keywords** : Split Hopkinson Pressure Bar, Adhesive, Overlap, Single Lap Joint

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

## KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala nikmat dan hidayah-Nya. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW. Semoga kita termasuk kedalam golongan orang-orang yang berada pada jalan yang benar. Karena atas rahmat yang telah diberikan-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Dalam rangka mempersiapkan dan menyelesaikan pengerjaan tugas akhir ini penulis telah banyak memperoleh bantuan baik berupa bimbingan, informasi maupun fasilitas yang sangat membantu kelancaran penulisan ini. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sedalam- dalamnya kepada berbagai pihak yang telah memberikan bantuan serta dorongan selama penulisan, khususnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang tidak pernah menyerah memberikan dukungan, doa, semangat, baik dalam bentuk moril dan materil. Serta kesabaran yang luar biasa dan hal baik lainnya yang tidak mungkin dapat disebutkan satu-persatu.
2. Bapak Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc., selaku kepala departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS.
3. Bapak Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan, ilmu, nasihat, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., selaku dosen wali yang telah memberikan banyak nasihat dan membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Seluruh dosen, karyawan, dan sivitas akademika Teknik Mesin, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
6. Himpunan Mahasiswa Mesin FT-IRS ITS sebagai wadah pengembangan diri bagi penulis.
7. Seluruh teman-teman M61 yang menemani, membantu, dan menolong selama perkuliahan.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Mesin khususnya, dan sivitas akademika ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa lain.

Surabaya, 7 Juli 2022

Penulis

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	v
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ix
ABSTRAK .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
<b>BAB II DASAR TEORI</b>	
2.1 <i>Adhesive</i> .....	3
2.2 <i>Single Lap Joint</i> .....	5
2.2.1 Aplikasi Sambungan <i>Adhesive Single Lap</i> .....	5
2.2.2 Kekuatan Sambungan <i>Adhesive Lap Joint</i> .....	6
2.2.3 Karakteristik Sambungan <i>Adhesive Lap Joint</i> terhadap Beban <i>Impact</i> .....	7
2.3 <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	8
2.4 Kurva Tegangan – Regangan .....	9
2.5 Modulus Elastisitas .....	10
2.6 <i>Viscoelastic</i> .....	11
2.7 Metode Elemen Hingga .....	16
2.7.1 Prosedur Analisis Metode Elemen Hingga .....	17
2.7.2 <i>Explicit Dynamics</i> .....	17
2.8 ASME V&V 10-2006 .....	18
2.8.1 Verifikasi .....	18
2.8.2 Validasi .....	18
2.9 Penelitian Terdahulu .....	19
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	23
3.2 Model Geometri .....	24
3.2.1 Gambar Spesimen .....	24
3.2.2 Gambar Pengujian .....	25
3.3 Model Material .....	27
3.3.1 Model Material Spesimen dan Alat Uji Penelitian .....	27
3.3.2 Model Material <i>Adhesive</i> .....	28
3.4 Desain Penelitian .....	29
3.5 <i>Body Contact</i> .....	29
3.5.1 <i>Frictionless</i> .....	29
3.5.2 <i>Bonded</i> .....	30
3.6 <i>Meshing</i> .....	31
3.6.1 Total Elemen .....	31
3.6.2 Jenis Elemen .....	31
3.6.3 <i>Mesh Metric</i> dan Konvergensi .....	32

3.7	<i>Boundary Condition and Loading</i> .....	33
3.8	<i>Analysis Time</i> .....	33
3.9	Hasil .....	34
3.9.1	Grafik Regangan Hasil Pengujian .....	34
3.9.2	Grafik <i>Compressive Force</i> .....	35
3.9.3	Grafik Laju Regangan .....	36
3.9.4	Grafik Tegangan-Regangan .....	37
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	<i>Stress-Strain Curve</i> .....	39
4.2	Sifat Mekanik Sambungan <i>Adhesive</i> .....	43
4.2.1	<i>Strength</i> .....	43
4.2.2	<i>Elasticity</i> .....	44
4.2.3	Modulus Young .....	45
4.2.4	<i>Energy Density</i> .....	46
4.3	Distribusi Tegangan pada Lapisan <i>Adhesive</i> .....	47
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5.1	Kesimpulan .....	55
5.2	Saran .....	56
DAFTAR PUSTAKA .....		xxi
LAMPIRAN .....		xxiii
BIODATA PENULIS .....		xxv

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Jenis tegangan yang umum ditemukan pada sambungan <i>adhesive</i> (a) kompresi (b) <i>tensile</i> (c) <i>shear</i> (d) <i>peel</i> (e) <i>cleavage</i> (Messler, 2004) .....	4
Gambar 2.2 Macam-macam sambungan <i>adhesive</i> yang banyak digunakan dalam struktur dan konstruksi (Messler, 2004) .....	5
Gambar 2.3 Sambungan <i>single lap</i> (Goss, 2010) .....	6
Gambar 2.4 Beban geser tarik (Goss, 2010) .....	6
Gambar 2.5 Pengaruh panjang <i>overlap</i> sambungan terhadap distribusi tegangan (Goss, 2010) .....	6
Gambar 2.6 Kekuatan sambungan tidak meningkat secara linier terhadap pertambahan panjang <i>overlap</i> dikarenakan konsentrasi tegangan pada ujung sambungan (Goss, 2010) ..	6
Gambar 2.7 Menambah lebar sambungan meningkatkan kekuatan sambungan (Goss, 2010) .....	7
Gambar 2.8 Pengaruh jenis <i>adhesive</i> dalam <i>single lap joint</i> (Harris dan Adams, 1985) .....	7
Gambar 2.9 Pengaruh panjang <i>overlap</i> dalam <i>single lap joint</i> (Hu, Huang, dan Li, 2021) ..	8
Gambar 2.10 Desain SHPB yang umum digunakan (Chen dan Song, 2011) .....	8
Gambar 2.11 Kurva tegangan-regangan pada beban statis .....	10
Gambar 2.12 Kurva tegangan-regangan <i>polyurethane elastomer</i> (pue) dengan beban dinamik pada pengujian SHPB (Fan dan Chen, 2019) .....	10
Gambar 2.13 <i>Stress-Strain Curve</i> (a) <i>elastic</i> dan (b) <i>viscoelastic</i> (Mahammedi, 2016) .....	11
Gambar 2.14 <i>Stress relaxation curve</i> (Kelly, 2015) .....	11
Gambar 2.15 <i>Creep curve</i> (Kelly, 2015) .....	12
Gambar 2.16 Model Maxwell (Roeder, 2013) .....	13
Gambar 2.17 Grafik (a) <i>stress relaxation</i> dan (b) <i>creep</i> pada model Maxwell (Roeder, 2013) .....	13
Gambar 2.18 <i>Generalized Maxwell model</i> (Mills, 2006) .....	13
Gambar 2.19 Model Kelvin-Voigt (Roeder, 2013) .....	14
Gambar 2.20 Grafik <i>creep</i> pada model Kelvin-Voigt (Roeder, 2013) .....	14
Gambar 2.21 <i>Generalized Kelvin-Voigt model</i> (Firkowski, 2019) .....	14
Gambar 2.22 Model Zener (Roeder, 2013) .....	15
Gambar 2.23 Grafik (a) <i>stress relaxation</i> dan (b) <i>creep</i> pada model Zener (Roeder, 2013) ..	15
Gambar 2.24 <i>Generalized Zener model</i> (Hao, 2019) .....	15
Gambar 2.25 <i>Node</i> pada penampang <i>gear tooth</i> (Cook, 2001) .....	16
Gambar 2.26 Geometri benda dengan lengkungan (a) elemen <i>mesh</i> dengan bentuk kotak (b) tipe elemen yang sama dengan ukuran dan jumlah berbeda (Hutton, 2004) .....	16
Gambar 2.27 Grafik tegangan terhadap regangan, grafik kekakuan terhadap panjang <i>overlap</i> , dan grafik regangan terhadap panjang <i>overlap</i> (Pribadi, 2019) .....	19
Gambar 2.28 Grafik gaya tarik terhadap panjang <i>overlap</i> (Raos, Kozak, dan Lucic, 2005) ..	20
Gambar 2.29 Grafik tegangan terhadap posisi selama <i>overlap</i> pada variasi suhu dan kecepatan (Chen dan Li, 2010) .....	20
Gambar 2.30 Grafik <i>load</i> terhadap <i>displacement</i> pada <i>brittle</i> , <i>intermediate</i> , dan <i>ductile</i> (Silva, 2006) .....	21
Gambar 2.31 Grafik pengaruh ketebalan ikatan pada tegangan geser (Ojalvo dan Eidinoff, 1974) .....	21
Gambar 2.32 Grafik <i>stress-strain</i> pada variasi tiga jenis <i>adhesive</i> (Asgharifar dkk, 2013) ..	22
Gambar 2.33 Grafik <i>shear-stress</i> (Sato dan Ikegami, 1999) .....	22
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian .....	23
Gambar 3.2 Bentuk asli dari spesimen uji sambungan <i>adhesive</i> tipe <i>single lap</i> .....	25

Gambar 3.3 Rancangan spesimen uji sambungan <i>adhesive</i> tipe <i>single lap</i> , simbol x merupakan panjang <i>adhesive</i> yang akan divariasikan (satuan dalam mm) (Pribadi, 2019)	25
Gambar 3.4 Model tiga dimensi spesimen sambungan <i>adhesive</i> tipe <i>single lap</i> tanpa <i>adhesive</i> .....	25
Gambar 3.5 Bagian komponen pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	25
Gambar 3.6 Rancangan alat uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> beserta dimensi-dimensi yang telah tertera (satuan dalam mm) (Pribadi, 2019) .....	26
Gambar 3.7 Gambar teknik dari <i>striker bar</i> (satuan dalam mm) .....	26
Gambar 3.8 Gambar teknik dari <i>input bar</i> (satuan dalam mm) .....	26
Gambar 3.9 Gambar teknik dari <i>output bar</i> (satuan dalam mm) .....	26
Gambar 3.10 Model tiga dimensi <i>striker bar</i> .....	27
Gambar 3.11 Model tiga dimensi <i>input bar</i> .....	27
Gambar 3.12 Model tiga dimensi <i>output bar</i> .....	27
Gambar 3.13 <i>Body contact of frictionless</i> pada simulasi uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> di Ansys 2019 (a) <i>striker bar</i> dengan <i>input bar</i> , (b) <i>input bar</i> dengan <i>adherend</i> , (c) dan (d) antar <i>adherend</i> , (e) <i>adherend</i> dengan <i>output bar</i> .....	30
Gambar 3.14 <i>Body contact of bonded</i> antara <i>adherend</i> dengan <i>adhesive</i> pada simulasi uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> di Ansys 2019 .....	30
Gambar 3.15 Total elemen yang diterapkan pada <i>striker bar</i> , <i>input bar</i> , <i>adherend</i> , <i>adhesive</i> , dan <i>output bar</i> di simulasi uji penelitian <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	31
Gambar 3.16 Penerapan jenis elemen dalam simulasi (a) <i>striker bar</i> , (b) <i>input bar</i> , (c) <i>adherend</i> , (d) <i>adhesive</i> , dan (e) <i>output bar</i> .....	32
Gambar 3.17 Grafik konvergensi .....	32
Gambar 3.18 Pengaturan <i>boundary condition</i> pada simulasi <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	33
Gambar 3.19 Pengaturan <i>loading</i> berupa <i>initial velocity</i> pada <i>striker bar</i> .....	33
Gambar 3.20 Grafik regangan terhadap waktu .....	34
Gambar 3.21 Grafik hasil <i>trim</i> pada <i>incident strain</i> , <i>reflected strain</i> , dan <i>transmitted strain</i> .....	35
Gambar 3.22 Grafik <i>compressive force</i> ketika kalibrasi (a) simulasi; (b) eksperimen.....	35
Gambar 3.23 Grafik <i>compressive force</i> terhadap waktu yang mengindikasikan <i>dynamic stress equilibrium</i> pada kedua sisi spesimen pada pembebanan dengan <i>adherend</i> dan <i>adhesive</i> ..	36
Gambar 3.24 Grafik laju regangan terhadap waktu hasil dari perhitungan .....	36
Gambar 3.25 <i>Stress-strain curve</i> pada respons kombinasi <i>adherend</i> dan <i>adhesive</i> .....	37
Gambar 4.1 <i>Stress-strain curve</i> (a) panjang <i>overlap</i> 10 mm, (b) panjang <i>overlap</i> 15 mm, (c) panjang <i>overlap</i> 20 mm, dan (d) panjang <i>overlap</i> 25 mm .....	39
Gambar 4.2 <i>Maximum stress</i> , <i>maximum strain</i> , dan <i>slope</i> pada <i>stress-strain curve</i> .....	41
Gambar 4.3 <i>Energy density</i> pada <i>stress-strain curve</i> .....	41
Gambar 4.4 Grafik <i>maximum stress</i> terhadap <i>overlap length</i> pada <i>epoxy resin</i> dan <i>polyurethane</i> .....	44
Gambar 4.5 Grafik <i>maximum strain</i> terhadap <i>overlap length</i> pada <i>epoxy resin</i> dan <i>polyurethane</i> .....	45
Gambar 4.6 Grafik Modulus Young terhadap <i>overlap length</i> pada <i>epoxy resin</i> dan <i>polyurethane</i> .....	46
Gambar 4.7 Grafik <i>energy density</i> terhadap <i>overlap length</i> pada <i>epoxy resin</i> dan <i>polyurethane</i> .....	47
Gambar 4.8 <i>Peel stress</i> pada lapisan <i>adhesive</i> (a) panjang <i>overlap</i> 10 mm, (b) panjang <i>overlap</i> 15 mm, (c) panjang <i>overlap</i> 20 mm, dan (d) panjang <i>overlap</i> 25 mm .....	48
Gambar 4.9 <i>Shear stress</i> pada lapisan <i>adhesive</i> (a) panjang <i>overlap</i> 10 mm, (b) panjang <i>overlap</i> 15 mm, (c) panjang <i>overlap</i> 20 mm, dan (d) panjang <i>overlap</i> 25 mm .....	51

Gambar 4.10 <i>Peel stress</i> dan <i>shear stress</i> pada pembebanan sebesar 20 m/s untuk <i>epoxy resin</i> dengan panjang <i>overlap</i> 25 mm .....	52
Gambar 4.11 <i>Peel stress</i> dan <i>shear stress</i> pada pembebanan sebesar 30 m/s untuk <i>epoxy resin</i> dengan panjang <i>overlap</i> 25 mm .....	53

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kelebihan dan kekurangan <i>adhesive joint</i> .....	3
Tabel 3.1 Data <i>material properties</i> Aluminum 6061-T6 .....	27
Tabel 3.2 <i>Material properties</i> dari <i>epoxy resin</i> (Madenci, 2011) .....	28
Tabel 3.3 <i>Material properties</i> dari <i>polyurethane</i> (Mills, 2006) .....	28
Tabel 3.4 Desain penelitian .....	29
Tabel 3.5 <i>Mesh metric</i> pada simulasi <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	32

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Penggunaan sambungan *adhesive* pada struktur ringan untuk kendaraan semakin berkembang serta melengkapi sambungan mekanis konvensional seperti baut, *riveting*, *soldering*, atau *welding*. Berkembangnya penerapan sambungan *adhesive* disebabkan oleh keuntungan yang didapatkan dibanding dengan jenis sambungan konvensional. Beberapa keuntungan yang didapatkan dari penggunaan sambungan *adhesive* adalah dapat digunakan untuk menyambungkan dua jenis material yang berbeda, mendapatkan kekuatan yang diinginkan, dan bisa menyesuaikan dengan bentuk geometri yang diharapkan. Hal ini dapat dilihat dalam penggunaan *adhesive* untuk sambungan pada struktur pesawat terbang Airbus A320. Material *carbon* dan *glass* disambungkan dengan bantuan *adhesive* pada badan pesawat terbang. Selain itu, *airplane parts* pada badan pesawat terbang yang diharuskan kaku dan cukup keras untuk menahan hujan dan mendukung tekanan penerbangan pesawat serta dengan bentuk geometri yang berbeda-beda maka dalam hal ini *adhesive* juga diterapkan untuk komponen-komponen pada badan pesawat terbang tersebut, seperti *flap track fairings*, *spoiler shroud top panels*, dan *aileron*.

Apabila ditinjau secara teknis lalu dibandingkan dengan jenis sambungan konvensional, sambungan *adhesive* jauh lebih mudah dalam proses pengerjaannya. Keuntungan lain dalam penggunaan *adhesive* yakni tidak terjadi korosi kontak dikarenakan *adhesive* melapisi dua permukaan material yang disambungkan dan sambungan menjadi lebih ringan karena tidak adanya penambahan berat dari komponen sambungan tambahan dan hanya berupa zat perekat. Sambungan *adhesive* mampu meminimalkan konsentrasi tegangan saat diberi beban karena beban didistribusikan ke permukaan sambungan yang lebih luas. Hal-hal tersebut berkaitan erat dengan sifat mekanik yaitu kekuatan dan elastisitas sambungan pada suatu material. Alat yang dapat mengetahui sifat mekanik dari sambungan pada suatu material yaitu *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB).

SHPB merupakan metode uji yang digunakan untuk mengetahui sifat mekanik sambungan dari suatu material berupa *strength* dan *elasticity*. Prinsip kerja dari SHPB yaitu dengan memberikan beban tumbukan pada spesimen yang diuji sehingga membentuk sinyal yang melewati rangkaian komponen dari alat tersebut secara berurutan yaitu *input bar*, spesimen sambungan *adhesive*, dan *output bar*. Sinyal yang melewati *input bar* dan *output bar* selanjutnya dibaca dan diolah untuk mengetahui *stress-strain curve* pada sambungan *adhesive*. *Stress-strain curve* yang diperoleh dari uji SHPB adalah respons kombinasi dari *adherend* dan *adhesive*. Sedangkan, distribusi tegangan yang terjadi pada lapisan *adhesive* tidak nampak dalam alat tersebut. Dengan adanya kekurangan pada alat SHPB, maka perlu dilakukan penelitian berupa simulasi untuk mendapatkan distribusi tegangan dari lapisan *adhesive* dalam sambungan karena hal ini berkaitan dengan kekuatan sambungan.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan penelitian tentang pengaruh *properties adhesive* yakni *prony series* beserta *Young's Modulus* dan panjang *overlap* sebesar 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive* berupa *strength*, *elasticity*, Modulus Young, dan *energy density* dengan tipe sambungan *single lap* yang dibebani *impact* menggunakan metode elemen hingga. Dari hasil penelitian ini, akan dilihat pengaruh dari variasi *properties adhesive* dan panjang *overlap* terhadap sifat mekanik pada sambungan *adhesive*. Hasil penelitian ini akan dijadikan acuan untuk pemilihan *properties adhesive* dan panjang *overlap* sesuai dengan kebutuhan sifat mekanik sambungan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam tugas akhir ini, dirumuskan beberapa permasalahan yaitu sebagai berikut :

1. Bagaimana mendapatkan distribusi tegangan pada lapisan *adhesive*?
2. Bagaimana pengaruh *properties adhesive* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive* berupa *strength*, *elasticity*, Modulus Young, dan *energy density*?
3. Bagaimana pengaruh panjang *overlap* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive* berupa *strength*, *elasticity*, Modulus Young, dan *energy density*?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan distribusi tegangan pada lapisan *adhesive*.
2. Mengetahui pengaruh *properties adhesive* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive* berupa *strength*, *elasticity*, Modulus Young, dan *energy density*.
3. Mengetahui pengaruh panjang *overlap* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive* berupa *strength*, *elasticity*, Modulus Young, dan *energy density*.

## 1.4 Batasan Masalah

Dalam tugas akhir ini, diberikan batasan masalah yaitu sebagai berikut :

1. Gaya gesek pada tumpuan dengan *bar components* diabaikan.
2. Pengaruh temperatur terhadap *stress-strain curve* diabaikan.
3. Pengaruh *misalignment* pada *striker bar*, *input bar*, dan *output bar* diabaikan.
4. Gelombang merambat di dalam rangkaian *pressure bar* secara satu dimensi searah dengan sumbu *pressure bar*.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai dasar pengambilan keputusan untuk pemilihan *properties adhesive* dan panjang *overlap* sesuai dengan kebutuhan sifat mekanik sambungan.

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 *Adhesive*

*Adhesive* merupakan campuran satu atau dua polimer organik yang bereaksi secara kimia serta membentuk polimer baru yang mempunyai daya rekat. Pada industri, *adhesive* didesain berdasarkan kekuatan yang dibutuhkan pada aplikasinya. *Adhesive* berkekuatan tinggi digunakan pada struktur mobil serta pesawat terbang. Dibandingkan dengan sambungan mekanis lainnya semisal baut, *riveting*, *soldering*, atau *welding*, sambungan *adhesive* memiliki beberapa keunggulan. Dalam menentukan *adhesive* yang akan dipergunakan perlu diperhatikan beberapa properti, seperti tingkat perawatan, kemampuan mengisi celah, kekakuan, kemampuan menahan beban, ketahanan terhadap suhu, serta *life-time*. (Adams, 2005)

*Adhesive joint* adalah teknik penyambungan komponen-komponen (*adherend*) dari material homogen serta heterogen dengan memakai perekat *adhesive*. *Adhesive joint* umumnya tidak dapat dirusak tanpa menghancurkan sambungannya. Dengan menggunakan teknik ini, seluruh material mampu disambungkan satu sama lain tanpa ditentukan disparitas material. *Adhesive joint* sebagai solusi pada beberapa perangkat lunak eksklusif di bidang industri, contohnya untuk konstruksi struktur kendaraan ringan dengan memakai baja, aluminium, komposit, serta plastik. Kelebihan dan kekurangan *adhesive joint* dibandingkan dengan metode sambungan lainnya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

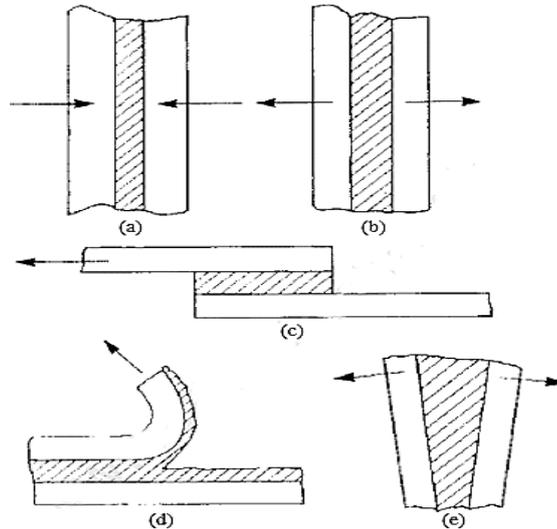
**Tabel 2.1** Kelebihan dan kekurangan *adhesive joint*

Kelebihan	Kekurangan
<i>Adherend</i> tidak dipengaruhi oleh panas	Stabilitas terhadap panas yang terbatas
Distribusi tegangan yang uniform	Dibutuhkan persiapan permukaan <i>adherend</i>
Mampu menyambungkan permukaan yang besar	Dibutuhkan alat penjepit untuk beberapa kasus tertentu
Mampu menyambungkan material yang berbeda	Keterbatasan uji nondestruktif untuk beberapa kasus tertentu
Mampu menyambungkan <i>adherend</i> yang sangat tebal	Waktu <i>curing</i> yang cenderung lama
Tidak terjadi korosi kontak	Analisa tegangan yang rumit
Kekuatan dinamis yang tinggi	Sensitif terhadap lingkungan yang ekstrim
Properti <i>damping</i> yang baik	Dibutuhkan proses kontrol yang ketat

Desain sambungan *adhesive* perlu diperhatikan untuk mendapatkan kekuatan maksimum sambungan. Kekuatan sambungan dipengaruhi oleh properti mekanis *adhesive* serta *adherend* yang digunakan, tegangan internal yang didapatkan pada saat dilakukannya proses, pembebanan yang akan diberikan pada sambungan, serta geometri sambungan. Sambungan

*adhesive* harus dirancang untuk meminimalisir konsentrasi tegangan serta memaksimalkan area yang disambungkan. Untuk keperluan industri, desain sambungan juga perlu mempertimbangkan batasan produksi, fasilitas yang dimiliki, biaya produksi, dan sebagainya.

Jenis tegangan yang umum ditemukan pada sambungan *adhesive* ditunjukkan pada Gambar 2.1. Jenis tegangan tersebut ialah tegangan (a) kompresi, (b) *tensile*, (c) *shear*, (d) *peel*, dan (e) *cleavage*. Kelima jenis tegangan tersebut dapat terjadi secara individual atau dalam kombinasi.



**Gambar 2.1** Jenis tegangan yang umum ditemukan pada sambungan *adhesive* (a) kompresi (b) *tensile* (c) *shear* (d) *peel* (e) *cleavage* (Messler, 2004)

Tegangan kompresi terjadi disebabkan beban yang diberikan tegak lurus terhadap bidang sambungan serta menekan sambungan ke arah dalam. Sambungan *adhesive* lebih tahan terhadap tegangan kompresi sebab tidak memisahkan sambungan. Meskipun begitu, sambungan akan mengalami kegagalan jika *adhesive* lebih lemah terhadap kompresi dibandingkan *adherend*, sehingga terlebih dahulu mengalami *compressive fracture* sebelum *adherend*. Pada praktiknya, kasus yang sering ditemukan ialah beban *bending*, *peeling*, atau *cleavage*.

Tegangan *tensile* bekerja tegak lurus terhadap bidang sambungan serta menarik kedua *adherend* ke arah luar. Secara teori, tegangan di permukaan *adherend* dan di dalam *adhesive* terdistribusi secara merata. Pada kenyataannya, *offsets* di sambungan, *bending* di *adherend*, dan komplikasi lainnya mengakibatkan distribusi tegangan yang tidak seragam. Hal ini bisa menyebabkan terjadinya *peel* ataupun *cleavage*. Pada sambungan *adhesive* yang berada pada kondisi pembebanan tarik, *adherend* harus cukup tebal untuk mencegah terjadinya penyimpangan atau *bending*.

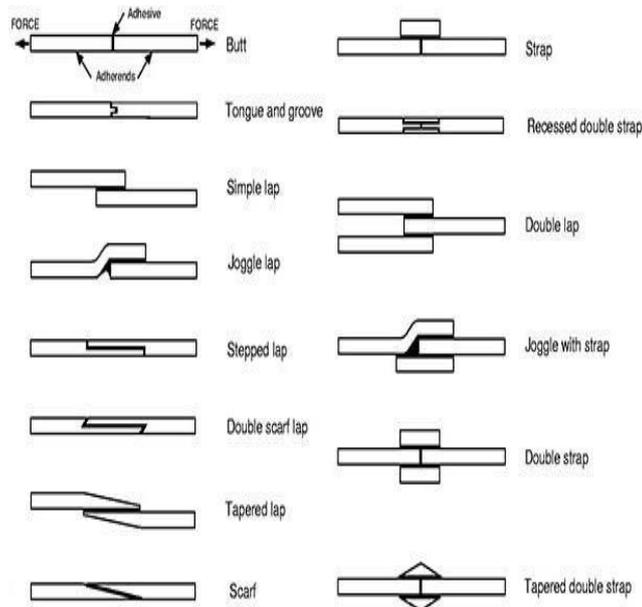
Tegangan *shear* terjadi jika beban *parallel* terhadap bidang sambungan berusaha memisahkan sambungan dengan menggeser elemen sambungan satu terhadap yang lainnya. Tegangan geser terdistribusi merata di semua area sambungan. Sebagian besar beban yang diaplikasikan di struktur sambungan *adhesive* akan ditransmisikan melalui sambungan *adhesive* dalam tegangan geser. Sambungan ini mempunyai geometri tumpang tindih. Kekuatan sambungan ini proporsional terhadap panjang *overlap*, tetapi berkurang dengan bertambahnya lebar *overlap*. Kekuatan geser maksimum sambungan *adhesive* sangat dipengaruhi oleh modulus geser serta ketebalan optimal *adhesive*.

Tegangan *peel* adalah jenis pembebanan di luar bidang sambungan yang berusaha memisahkan sambungan secara tidak merata. Pada umumnya, beban *peel* akan memisahkan sambungan dari ujung sambungan. Beban *peel* dapat terjadi apabila salah satu atau kedua *adherend* bersifat fleksibel serta mampu berdefleksi, hal ini menyebabkan tegangan yang

sangat tinggi akan terjadi pada bagian atas antara *adhesive* serta *adherend*. Beban *peel* harus dicegah sebisa mungkin.

*Cleavage* adalah pembebanan yang serupa dengan *peel*, tetapi *cleavage* memberikan gaya pada salah satu ujung struktur sambungan sampai terjadinya perpisahan. *Cleavage* terjadi jika gaya atau momen tarik *offset* diaplikasikan. Hal ini akan mengakibatkan tegangan didistribusikan secara tidak merata. Sama seperti *peel*, *cleavage* harus dihindari sebisa mungkin.

Desain sambungan yang sederhana membutuhkan biaya yang lebih kecil dan berfungsi dengan baik di tingkat beban yang rendah serta sederhana, sedangkan untuk tingkat beban yang tinggi, diperlukan desain sambungan yang lebih kompleks. Sambungan *adhesive* yang ideal harus mampu mencegah kegagalan sambungan. Pada Gambar 2.2 menunjukkan beberapa jenis sambungan *adhesive* yang paling umum digunakan.



**Gambar 2.2** Macam-macam sambungan *adhesive* yang banyak digunakan dalam struktur dan konstruksi (Messler, 2004)

## 2.2 Single Lap Joint

### 2.2.1 Aplikasi Sambungan *Adhesive Single Lap*

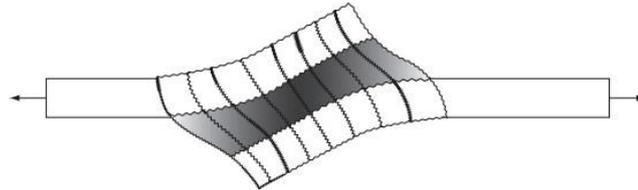
Sambungan jenis *single lap* adalah sambungan yang paling banyak dipergunakan untuk kepentingan eksperimen serta pengujian performa dari *adhesive*. Selain itu, *single lap joint* merupakan jenis sambungan yang paling umum digunakan dalam pengaplikasian di bidang industri. Hal ini karena jenis sambungan ini memiliki kesederhanaan tersendiri untuk menganalisis kekuatan dan karakteristik dalam sambungan. *Single lap joint* juga memberikan keuntungan seperti penghematan waktu, penghematan biaya, karakteristik redaman yang baik, kekuatan yang sangat tinggi dibandingkan dengan proses penyambungan konvensional lainnya.

*Single lap joint* digunakan sebagai sambungan penahan beban dalam penyambungan struktural untuk berbagai bidang aplikasi seperti industri kelautan, dirgantara, mobil, kereta api, dan dalam konstruksi bangunan. Dalam beberapa tahun terakhir, telah terjadi peningkatan minat di industri otomotif dalam menerapkan *single lap joint* pada komponen struktural kendaraan. *Adhesive* berperforma tinggi yang dikeraskan dapat memberikan kekuatan luar biasa sekaligus menghasilkan struktur yang lebih ringan sehingga dapat meningkatkan keamanan dan efisiensi kendaraan. (Shaikh dkk, 2017)

## 2.2.2 Kekuatan Sambungan *Adhesive Lap Joint*

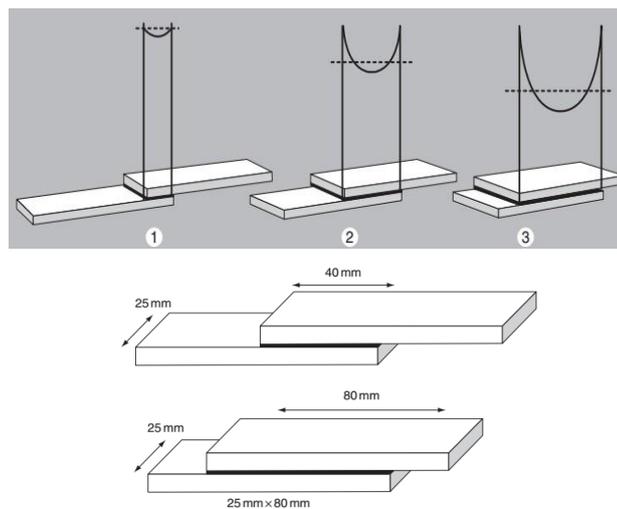


**Gambar 2.3** Sambungan *single lap* (Goss, 2010)

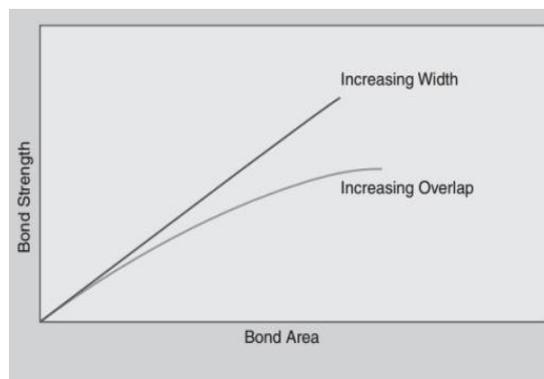


**Gambar 2.4** Beban geser tarik (Goss, 2010)

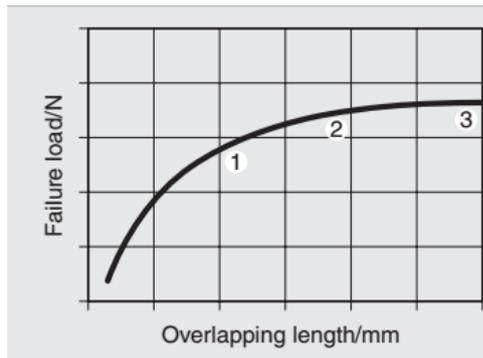
Lapisan *adhesive* dengan *adherend* kaku menerima tegangan geser (Gambar 2.3), sedangkan pada *adherend* lentur lapisan *adhesive* menerima tegangan geser dan *peel* akibat bending (Gambar 2.4). Kekuatan sambungan *single lap joint* bertambah secara nonlinier terhadap panjang *overlap* (Goss, 2010), seperti ditunjukkan oleh kurva distribusi tegangan di Gambar 2.6. Tegangan tertinggi berada di akhir rekatan serta pertambahan panjang overlap pada sambungan tidak mengubah kekuatan sambungan secara signifikan. Terdapat batasan panjang lapisan *adhesive* yang efektif mempengaruhi kekuatan sambungan.



**Gambar 2.5** Pengaruh panjang *overlap* sambungan terhadap distribusi tegangan (Goss, 2010)



**Gambar 2.6** Kekuatan sambungan tidak meningkat secara linier terhadap pertambahan panjang *overlap* dikarenakan konsentrasi tegangan pada ujung sambungan (Goss, 2010)



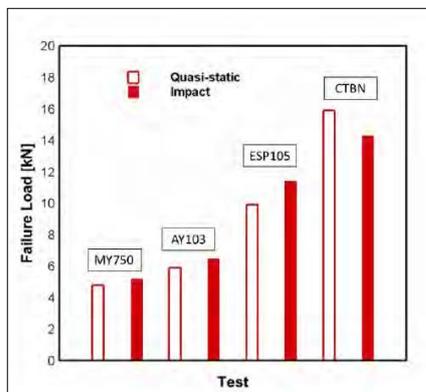
**Gambar 2.7** Menambah lebar sambungan meningkatkan kekuatan sambungan (Goss, 2010)

Hal ini dikarenakan kerusakan sambungan dimulai ketika tegangan menandakan nilai maksimal saat di ujung *overlap* dimana rekatan atau kekuatan sambungan dari *adhesive* terlampaui. Dengan meningkatkan lebar dari sambungan distribusi tegangan geser tidak berubah dan beban yang dikenakan untuk menghambat sambungan meningkat seiring dengan bertambahnya lebar sambungan.

Gaya geser bisa ditimbulkan oleh deformasi mekanis di substrat dan penampilan dari titik tertekan maksimal, yang membuat kekhawatiran saat komponen dipasang merupakan penampang yang tipis serta saat material memiliki modulus elastisitas yang rendah. Kegagalan sambungan acapkali terjadi pada akhir rekatan dimana tegangan maksimum timbul. Tegangan geser nominal dari *adhesive* diukur dibawah kondisi eksperimen yang dikontrol. Kekuatan geser yang rendah bisa dipergunakan untuk aplikasi yang khusus.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Pero Raos, Dražan Kozak dan Mirjana Lucic telah menjelaskan terkait dengan kekuatan sambungan pada sambungan *adhesive* tipe *single lap joint*. Penelitian dilakukan menggunakan metode *tensile test* dengan variasi panjang *overlap* yakni 15 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, dan 60 mm. Dalam penelitian ini, ketebalan *adhesive* diatur secara konstan pada setiap pengujian yaitu sebesar 0,15 mm. Analisis yang diperoleh telah menyatakan bahwa kekuatan sambungan dipengaruhi oleh panjang *overlap* yang digunakan pada sambungan *adhesive*. Semakin panjang *overlap* yang digunakan maka kekuatan tarik pada sambungan *adhesive* semakin meningkat dan semakin pendek *overlap* yang digunakan maka kekuatan tarik sambungan *adhesive* juga semakin menurun.

### 2.2.3 Karakteristik Sambungan *Adhesive Lap Joint* terhadap Beban *Impact*

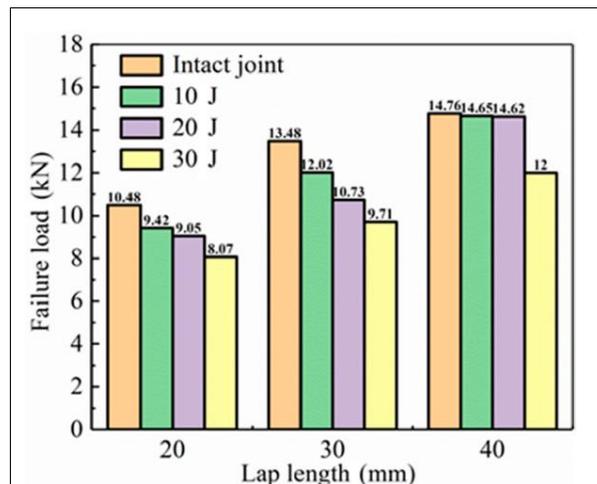


**Gambar 2.8** Pengaruh jenis *adhesive* dalam *single lap joint* (Harris dan Adams, 1985)

Beban *impact* yang diberikan pada sambungan *adhesive* tipe *single lap joint* telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya. Pada penelitian yang dilakukan oleh Harris dan Adams pada tahun 1985. Penelitian ini menggunakan variasi jenis *adhesive* yang berbeda yakni MY750, AY103, ESP105, dan CTBN. Hasil analisis dalam penelitian ini menjelaskan bahwa

penggunaan jenis *adhesive* memiliki pengaruh langsung dalam kekuatan *single lap joint*. Semakin keras *adhesive* yang digunakan maka kekuatan pada sambungan juga semakin meningkat. Gambar 2.8 menunjukkan hasil dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Harris dan Adams.

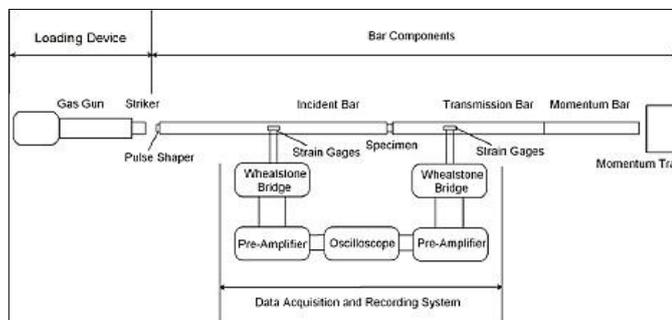
Penelitian lain yang menggunakan *single lap joint* dengan pembebanan *impact* juga telah dilakukan oleh Chunxing Hu, Guibin Huang and Cheng Li pada tahun 2021. Panjang *overlap* yang divariasikan dalam penelitian ini sebesar 20 mm, 30 mm, dan 40 mm. Analisis dalam penelitian ini telah menyatakan bahwasanya semakin panjang *overlap* yang digunakan dalam sambungan maka kekuatan sambungan juga akan meningkat. Gambar 2.9 menunjukkan hasil dari analisis pada penelitian ini.



**Gambar 2.9** Pengaruh panjang *overlap* dalam *single lap joint* (Hu, Huang, dan Li, 2021)

### 2.3 Split Hopkinson Pressure Bar

SHPB atau biasa dikenal jua sebagai *Kolsky Bar* ialah sebuah alat karakterisasi untuk respons mekanis dari material yang berdeformasi di laju regangan tinggi. SHPB diciptakan pertama kali oleh Herbert Kolsky di tahun 1949 buat mengukur respons tegangan-regangan material dalam pembebanan gaya tumbukan. Rancangan SHPB milik Kolsky lalu dikembangkan oleh Krafft dengan menambahkan penggunaan *strain gage* untuk mengukur gelombang tegangan. Saat ini, SHPB yang umum dipergunakan terdiri dari 3 komponen utama yang bisa dicermati pada Gambar 2.10, yaitu *loading device*, *bar components*, serta *data acquisition and recording system*.



**Gambar 2.10** Desain SHPB yang umum digunakan (Chen dan Song, 2011)

Metode pembebanan yang lebih awam dipergunakan di SHPB saat ini adalah pembebanan dinamis, dimana penumbuk (*striker bar*) dipergunakan untuk memberikan gaya tumbukan di *incident bar*. Gaya tumbukan yang diberikan di *incident bar* akan menghasilkan gelombang tegangan yang akan merambat menuju spesimen. Ketika gelombang tegangan tadi

mencapai permukaan antara *incident bar* dengan spesimen, sebagian gelombang direfleksikan kembali ke *incident bar* serta sebagian gelombang lainnya ditransmisikan melalui spesimen menuju *transmission bar*. Kurva tegangan-regangan dapat dihitung sesuai sinyal perambatan gelombang tegangan yang diukur dengan menggunakan *strain gage*.

Pembebanan dinamis yang dilakukan SHPB merupakan suatu keadaan dimana perubahan pada sebuah elemen terjadi terhadap waktu dalam konteks gaya yang bekerja pada struktur tersebut, dimana pada beban dinamis ini bersifat tidak tetap dan memiliki ciri besaran serta arah yang berubah dengan cepat. Deformasi pada struktur dampak beban dinamik yang diberikan SHPB tidak sampai berubah hingga plastis. Pada waktu bergetar bahan dari struktur akan melakukan resistensi/perlawanan terhadap getaran/gerakan, serta pada umumnya dikatakan bahan yang bersangkutan mempunyai kemampuan untuk meredam getaran. Selain itu, pada SHPB juga mengalami pembebanan laju regangan tinggi dimana pembebanan dilakukan dengan kecepatan rambat yang sangat tinggi hingga mencapai 5000 m/s.

Untuk memperoleh hasil eksperimen yang akurat, terdapat beberapa kriteria yang harus dimiliki oleh SHPB. *Incident* dan *transmission bar* harus difabrikasi dengan menggunakan material dan diameter yang sama. *Incident* dan *transmission bar* harus elastis agar dapat mengaplikasikan teori gelombang elastis. Oleh karena itu, material yang digunakan harus memiliki kekuatan tinggi, misalnya baja paduan. Selain itu, *incident* dan *transmission bar* harus lurus, cukup panjang, dan mampu bergerak pada tumpuannya dengan gaya gesek yang seminimal mungkin untuk memastikan perambatan gelombang satu dimensi. *Strain gage* perlu diinstalasi jauh dari ujung bar, setidaknya sepuluh kali diameter bar dari kedua ujung bar. Oleh karena itu, *incident* dan *transmission bar* harus memiliki rasio panjang-diameter setidaknya 20. Untuk menghindari terjadinya tumpang tindih gelombang pada *strain gage*, panjang dari *incident bar* harus setidaknya dua kali lebih panjang dibandingkan dengan *striker*.

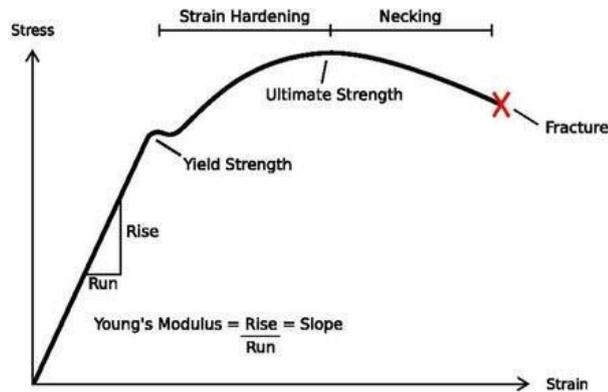
Penelitian yang telah melakukan uji SHPB untuk sambungan *adhesive* yaitu pada tahun 2010 oleh Xuan Chen dan Yulong Li. Jenis sambungan *adhesive* yang digunakan merupakan *single lap joint* dengan ketebalan sebesar 1,77 mm. Pada penelitian ini melakukan analisis terkait dengan kekuatan dinamis pada sambungan *adhesive* dengan variasi suhu pengujian mulai dari 40<sup>0</sup> C hingga 80<sup>0</sup> C dan variasi kecepatan sebesar 20 m/s serta 7 m/s. Analisis dalam penelitian ini menyatakan bahwasanya kekuatan geser pada spesimen mengalami penurunan dengan meningkatnya suhu pengujian dan kekuatan geser mengalami peningkatan dengan meningkatnya kecepatan yang digunakan pada pengujian.

## 2.4 Kurva Tegangan Regangan

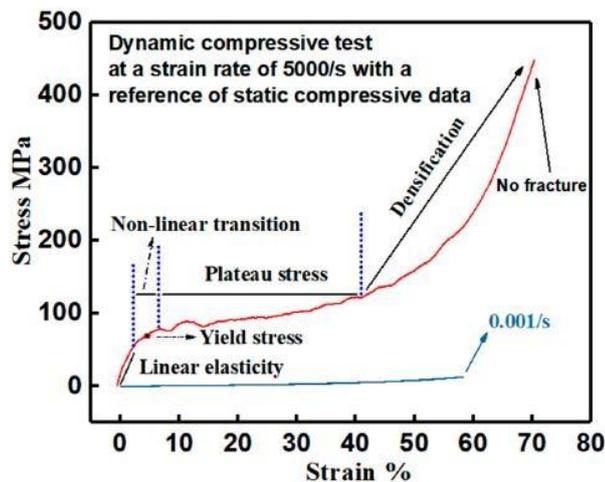
Kurva tegangan-regangan merupakan grafik pengukuran yang penting dari sifat mekanik material. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, tegangan yang didapatkan akan di plot seiring dengan regangan yang terjadi. Kurva tegangan-regangan setiap material mempunyai bentuk yang berbeda. Bentuk setiap kurva di pengaruhi oleh struktur dari material. Dimana material yang sama dengan struktur dimensi luas penampang yang lebih kecil akan berdampak terhadap nilai tegangan yang lebih besar sehingga mampu mengakibatkan bentuk dari kurva tegangan-regangan berbeda. Begitu juga dengan jenis material yang berbeda memiliki kemampuan menerima tegangan dan mengalami regangan yang berbeda.

Kurva tegangan-regangan terbagi menjadi tiga region yaitu *linear elastic region*, *strain hardening region*, dan *necking region* seperti Gambar 2.11. Pada *linear elastic region* ini berlaku *Hooke's Law*, dimana tegangan sebanding dengan regangan. Wilayah ini, berupa garis lurus yang disebut modulus young dan mengalami deformasi elastis. Pada akhir wilayah ini merupakan titik inisiasi deformasi plastis dan didefinisikan sebagai *yield strength*. Pada *strain hardening region* ini, dimana dimulai ketika melewati titik *yield strength* sampai ke

titik *ultimate strength* yang disebut *ultimate tensile strength*. Wilayah ini, berupa garis melengkung naik dan mengalami peningkatan tegangan yang dikarenakan material tersebut bertambah panjang. Pada *necking region*, dimana dimulai ketika melewati titik *ultimate strength* sampai ke titik *fracture*. Wilayah ini berupa garis melengkung menurun disebabkan gaya tarikan menurun meskipun tegangan terus bertambah karena luas permukaan yang mengecil tidak dipertimbangkan.



**Gambar 2.11** Kurva tegangan-regangan pada beban statis



**Gambar 2.12** Kurva tegangan-regangan *polyurethane elastomer* (pue) dengan beban dinamik pada pengujian SHPB (Fan dan Chen, 2019)

## 2.5 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas dapat disebut juga modulus elastisitas atau modulus tarik. Modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan suatu material. Modulus elastisitas dapat didefinisikan sebagai rasio tegangan terhadap regangan seperti Gambar 2.11. Dalam kurva tegangan terhadap regangan digambarkan sebagai gradien dari bagian linear pada awal kurva. Modulus ini diperlukan dalam perhitungan kekakuan batang dan struktur yang lain yang akan digunakan saat aplikasi. Oleh karena itu, modulus young merupakan besaran penting dalam bidang teknik. Nilai modulus young dirumuskan sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Dimana :

E = Modulus Elastisitas (N/m<sup>2</sup>)

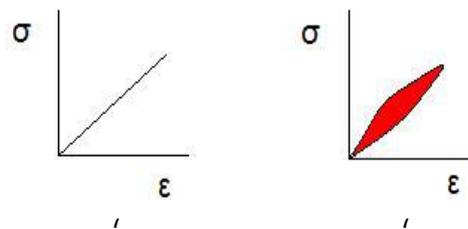
$\sigma$  = Tegangan (N/m<sup>2</sup>)

$\epsilon$  = Regangan

## 2.6 Viscoelastic

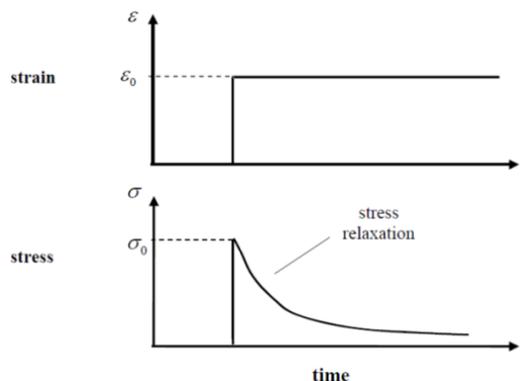
*Viscoelastic* merupakan model material yang memiliki properti *viscoelasticity* dimana pada properti material tersebut mengandung atau mempunyai karakteristik *viscous* dan *elastic* saat material mengalami deformasi. Dalam material *viscoelastic* ini menggabungkan dua karakteristik yang berbeda. Istilah *viscous* menyiratkan bahwa material ini berubah bentuk secara perlahan ketika terkena gaya eksternal. Serta, istilah *elastic* menyiratkan bahwa ketika gaya eksternal dihilangkan, material akan kembali ke konfigurasi bentuk aslinya. (Gould dkk, 2019)

Material *viscoelastic* berbeda dengan material *elastic*. Perbedaan yang mencolok dari kedua material ini dapat diamati langsung melalui *stress-strain curve* pada kedua material. Gambar 2.13 (a) menunjukkan *stress-strain curve* pada material *elastic* dan (b) menunjukkan *stress-strain curve* pada material *viscoelastic*. Material *elastic* menyimpan 100% energi ketika mengalami deformasi. Tetapi, material *viscoelastic* menghilangkan sebagian energi ketika deformasi. Histerisis dapat diamati pada *loop* yang terbentuk dalam *stress-strain curve* di material *viscoelastic*. Luas *loop* pada kurva tersebut sama dengan energi yang terbuang selama siklus *loading* dan *unloading*. Kemampuan untuk membuang energi inilah yang menjadi salah satu alasan utama penggunaan material *viscoelastic* pada pengaplikasian untuk meredam guncangan atau *shock*. Dua *properties* yang membuat kemampuan *viscoelastic* ini adalah adanya *stress relaxation* dan *creep*.



**Gambar 2.13** *Stress-Strain Curve* (a) *elastic* dan (b) *viscoelastic* (Mahammedi, 2016)

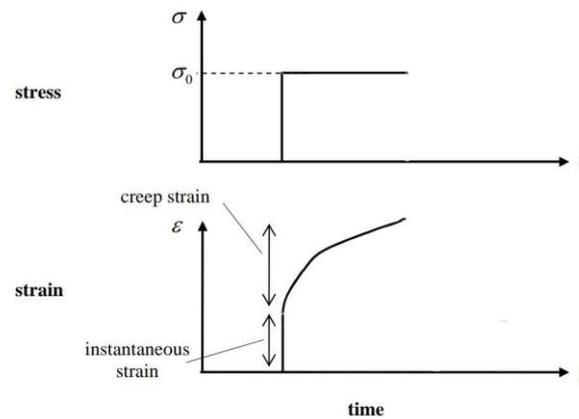
*Stress relaxation* merupakan karakteristik dari material *viscoelastic* yang mengacu pada kondisi tegangan yang mencapai puncak kemudian mengalami penurunan atau berkurang (*rileks*) seiring waktu dengan regangan atau *strain* yang tetap. Gambar 2.14 merupakan grafik dari *stress relaxation*.



**Gambar 2.14** *Stress relaxation curve* (Kelly, 2015)

Pada Gambar 2.14 dapat diketahui bahwasanya *strain* diterapkan pada material *viscoelastic* dengan kondisi yang tetap mulai dari kondisi awal hingga kondisi akhir. Hal ini mengakibatkan *stress* langsung mencapai puncaknya kemudian mengalami penurunan secara perlahan seiring dengan waktu. Kondisi inilah yang merupakan representasi dari *stress relaxation* pada material *viscoelastic*.

*Creep* merupakan karakteristik material *viscoelastic* yang mengacu pada kondisi dimana regangan mengalami peningkatan deformasi hingga pada kondisi *steady-state* dengan tegangan konstan. Gambar 2.15 ditunjukkan grafik dari *creep* pada material *viscoelastic*.

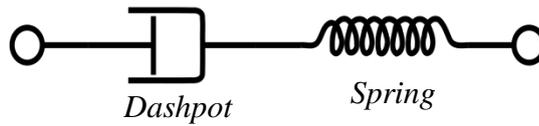


**Gambar 2.15** *Creep curve* (Kelly, 2015)

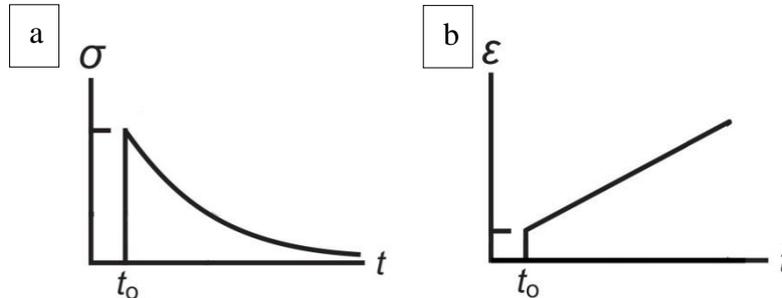
Pada Gambar 2.15 ditunjukkan bahwa tegangan atau *stress* diterapkan pada material *viscoelastic* dengan nilai yang konstan dari kondisi awal hingga akhir. Respons yang ditunjukkan pada regangan atau *strain* yaitu mula-mula material mengalami *instantaneous strain*. *Instantaneous strain* yang dialami oleh material terjadi dalam waktu yang sesaat pada kondisi awal saja kemudian material mengalami regangan yang terus meningkat seiring dengan berjalannya waktu. Regangan yang terus meningkat inilah yang disebut dengan *creep strain*. Peningkatan dari *creep strain* ini terus berlangsung hingga pada kondisi *steady-state* yang telah tercapai dari material *viscoelastic*.

Pemodelan material yang digunakan untuk memodelkan material viskoelastik ada tiga model, yakni model Maxwell, model Kelvin-Voigt, dan model Zener. Ketiga jenis model memiliki ciri tersendiri dalam memodelkan *spring* dan *dashpot* yang digunakan untuk memodelkan material viskoelastik. Perbedaan yang terjadi juga mengakibatkan bentuk kurva dari *stress relaxation* dan *creep* yang diperoleh juga berbeda pula.

Model Maxwell dapat diwakili oleh *dashpot* dan *spring* yang dihubungkan secara seri. Dalam model ini, jika material diletakkan di bawah regangan konstan, tegangan secara bertahap rileks. Ketika suatu bahan diletakkan di bawah tegangan konstan, regangan memiliki dua komponen. Pertama, komponen elastis terjadi seketika, sesuai dengan pegas, dan segera berelaksasi setelah tegangan dilepaskan. Yang kedua adalah komponen kental yang tumbuh seiring dengan berjalannya waktu selama tegangan diterapkan. Model Maxwell memprediksi bahwa tegangan meluruh seiring dengan berjalannya waktu dan untuk kondisi mulur atau tegangan konstan mendalilkan bahwa regangan akan meningkat secara linier dengan berjalannya waktu. Pada Gambar 2.16 menunjukkan rangkaian seri dari *dashpot* dan *spring* pada model Maxwell dan Gambar 2.17 merupakan grafik dari *stress relaxation* dan *creep* untuk model Maxwell.



**Gambar 2.16** Model Maxwell (Roeder, 2013)



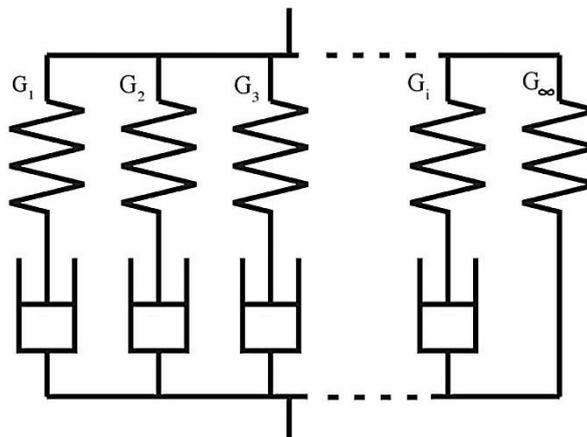
**Gambar 2.17** Grafik (a) *stress relaxation* dan (b) *creep* pada model Maxwell (Roeder, 2013)

Pemodelan material *viscoelastic* dalam model komputasi dapat dilakukan dengan menggunakan *Generalized Maxwell model*. Dapat dilihat pada Gambar 2.18 merupakan model yang digunakan untuk memprediksi sifat viskoelastik pada material dimana material dimodelkan dengan koneksi paralel dari sebuah *isolated spring* dan beberapa elemen *spring-dashpot*. Setiap *spring-dashpot* dirangkai secara seri dan memiliki *shear modulus* yang berbeda-beda sehingga dapat diketahui dengan menggunakan persamaan. Persamaan yang digunakan untuk memodelkan material ini yaitu sebagai berikut.

$$G(t) = G_0 \left( 1 - \sum_{i=1}^n g_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right)$$

Dimana :

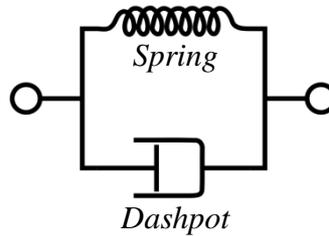
- $G(t)$  = *shear modulus* (MPa)
- $G_0$  = *instantaneous shear modulus* (MPa)
- $g_i$  = *dimensionless shear modulus*
- $\tau_i$  = *relaxation times* (s)



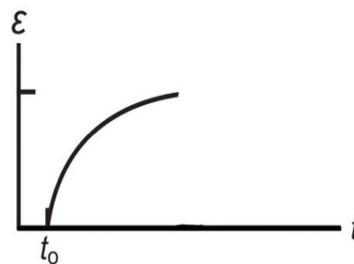
**Gambar 2.18** *Generalized Maxwell model* (Mills, 2006)

Model Kelvin-Voigt, juga dikenal sebagai model Voigt, terdiri dari *dashpot* dan *spring* yang dihubungkan secara paralel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19. Model ini digunakan untuk menjelaskan perilaku *creep* dari material viskoelastik. Pada tegangan konstan, model ini cukup realistis karena dapat memprediksi regangan cenderung mengalami peningkatan seiring waktu terus berlanjut hingga tak terhingga. Model Kelvin-Voigt memiliki keterbatasan dalam memodelkan material viskoelastik. Model ini sangat baik dengan pemodelan *creep* pada material, tetapi dalam kaitannya dengan *stress relaxation*, modelnya

jauh lebih tidak akurat dan tidak ada penggambaran bentuk kurva *stress relaxation* dari model ini. Pada Gambar 2.20 merupakan bentuk kurva dari *creep* yang diperoleh dari model Kelvin-Voigt.



**Gambar 2.19** Model Kelvin-Voigt (Roeder, 2013)



**Gambar 2.20** Grafik *creep* pada model Kelvin-Voigt (Roeder, 2013)

Pemodelan material *viscoelastic* dalam model komputasi untuk model Kelvin-Voigt dapat dilakukan dengan menggunakan *Generalized Kelvin-Voigt model*. Dapat dilihat pada Gambar 2.21 merupakan model yang digunakan untuk memprediksi sifat viskoelastik pada material dimana material dimodelkan dengan koneksi seri dari sebuah *spring* dan beberapa elemen *spring-dashpot*. Setiap *spring-dashpot* dirangkai secara paralel dan memiliki *shear compliance* yang berbeda-beda sehingga dapat diketahui dengan menggunakan persamaan. Persamaan yang digunakan untuk memodelkan material ini yaitu sebagai berikut.

$$J(t) = J_0 + \sum_{i=1}^k J_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right)$$

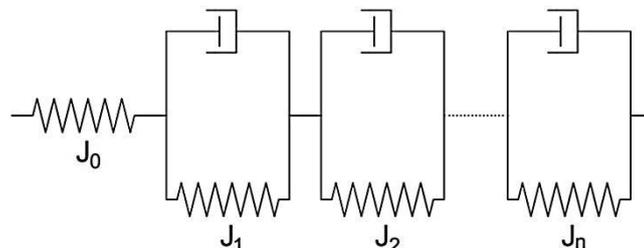
Dimana :

$J(t)$  = *creep compliance* ( $10^{-6}$  per MPa)

$J_0$  = *creep compliance* pada *spring* tunggal ( $10^{-6}$  per MPa)

$J_i$  = *creep compliance of the spring* pada elemen ke- $i$  ( $10^{-6}$  per MPa)

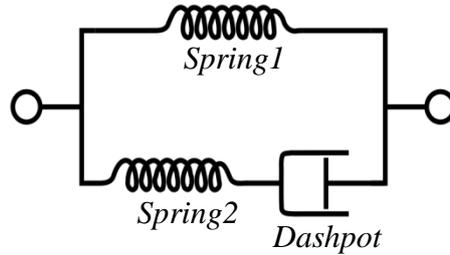
$\tau_i$  = *relaxation times* (s)



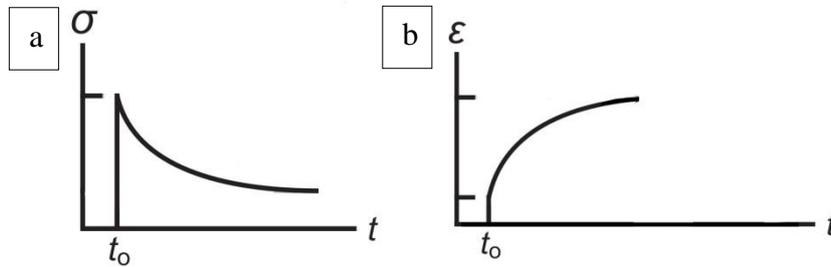
**Gambar 2.21** *Generalized Kelvin-Voigt model* (Firkowski, 2019)

Model Zener, juga dikenal sebagai model *Standard Linear Solid*, terdiri dari dua *spring* dan satu *dashpot*. Pada model ini memodelkan material viskoelastik dengan di bawah tegangan konstan, bahan yang dimodelkan akan seketika berubah bentuk menjadi merenggang dalam waktu yang singkat. Bagian elastis sesaat dalam hal ini merupakan pengaruh dari

spring yang dirangkai dalam model Zener. Setelah itu, regangan akan terus mengalami peningkatan dan secara asimtotik mendekati regangan dalam keadaan *steady-state*. Meskipun model Zener lebih akurat daripada model Maxwell dan Kelvin-Voigt dalam memprediksi *creep* pada viskoelastik, model ini memberikan hasil dari *stress relaxation* yang lebih cepat daripada kondisi kenyataan pada material viskoelastik. Pada Gambar 2.22 menunjukkan rangkaian dari Zener dan Gambar 2.23 menunjukkan grafik dari *stress relaxation* dan *creep*.



Gambar 2.22 Model Zener (Roeder, 2013)



Gambar 2.23 Grafik (a) *stress relaxation* dan (b) *creep* pada model Zener (Roeder, 2013)

Pemodelan material *viscoelastic* dalam model komputasi untuk model Zener dapat dilakukan dengan menggunakan *Generalized Zener model*. Dapat dilihat pada Gambar 2.24 merupakan model yang digunakan untuk memprediksi sifat viskoelastik pada material dimana material dimodelkan dengan koneksi paralel dari beberapa elemen *double spring-dashpot*. Setiap *spring-dashpot* dirangkai secara seri dan ditambahkan *spring* tersendiri yang dirangkai secara paralel dan memiliki *relaxed modulus* yang berbeda-beda sehingga dapat diketahui dengan menggunakan persamaan. Persamaan yang digunakan untuk memodelkan material ini yaitu sebagai berikut.

$$M(t) = M_R \left( 1 - L + \sum_{i=1}^L \frac{1 - itT\epsilon_i}{1 - itT\sigma_i} \right)$$

Dimana :

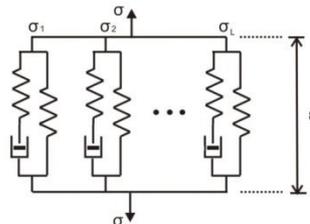
$M(t)$  = *relaxed modulus* (MPa)

$M_R$  = *relaxed modulus* ketika  $t$  sama dengan nol (MPa)

$L$  = jumlah total elemen dalam mekanisme relaksasi

$\tau\epsilon_i$  = waktu relaksasi tegangan pada elemen ke- $i$  (s)

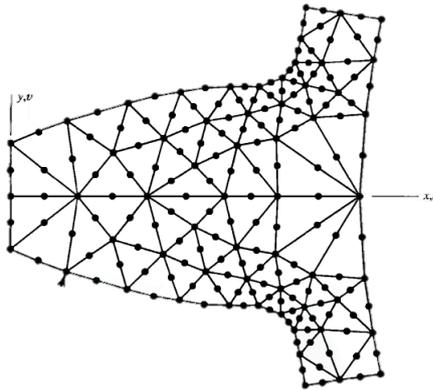
$\tau\sigma_i$  = rata-rata dari regangan ke- $i$  dan waktu relaksasi stress (s)



Gambar 2.24 *Generalized Zener model* (Hao, 2019)

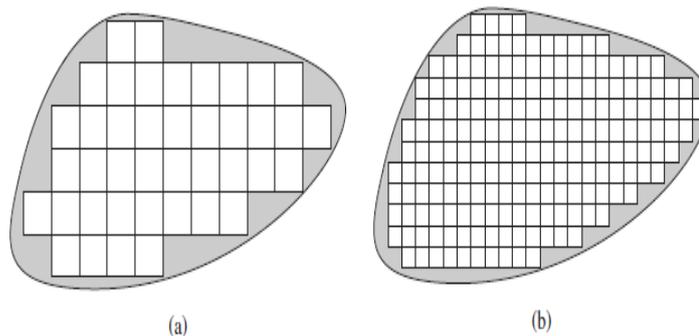
## 2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga atau *finite element method* merupakan salah satu metode solusi numerik dari bidang permasalahan. Sebuah bidang permasalahan mengharuskan kita untuk menentukan distribusi spasial dari satu atau lebih variabel tak bebas. Secara matematis, bidang permasalahan dijelaskan oleh persamaan diferensial atau persamaan integral. Unit elemen hingga dapat divisualisasikan sebagai bagian kecil dari sebuah struktur. Elemen-elemen ini terhubung pada sebuah titik disebut *node*. Kumpulan dari elemen-elemen disebut struktur elemen hingga, kata “struktur” digunakan sebagai pengertian umum untuk mendefinisikan sebuah bodi atau daerah.



**Gambar 2.25** *Node* pada penampang *gear tooth* (Cook, 2001)

Susunan tertentu dari elemen-elemen disebut *mesh*. Secara numerik, *mesh* dari elemen hingga direpresentasikan oleh sistem persamaan aljabar untuk menyelesaikan hal yang tidak diketahui pada *node*. Solusi jumlah nodal bila dikombinasikan dengan bidang yang diasumsikan dalam elemen tertentu dapat menentukan variasi spasial bidang dalam elemen tersebut. Jadi jumlah bidang untuk keseluruhan struktur didekati secara elemen per elemen. Walaupun solusi dari metode elemen hingga tidak eksak menyatakan hasilnya, namun hal ini dapat ditingkatkan dengan menambahkan lebih banyak jumlah elemen pada struktur. (Cook, 2001)



**Gambar 2.26** Geometri benda dengan lengkungan (a) elemen *mesh* dengan bentuk kotak (b) tipe elemen yang sama dengan ukuran dan jumlah berbeda (Hutton, 2004)

Penggunaan *software* analisis elemen hingga dapat membantu proses penyelesaian permasalahan model yang membutuhkan pendekatan dengan elemen hingga, salah satu *software* yang dapat melakukan pemodelan elemen hingga adalah *Ansys Workbench*. *Software* ini menyelesaikan permasalahan dalam 3D dan memiliki banyak paket penyelesaian yang dapat dipilih sesuai permasalahan yang ada, seperti perpindahan panas, aliran fluida, mekanika struktur, elektromagnetik, dan lain sebagainya. *Ansys Explicit Dynamics* adalah salah satu aplikasi pemodelan elemen hingga dari paket *software* *Ansys Workbench*, aplikasi ini dapat melakukan berbagai macam simulasi *engineering*. Pemodelan yang dapat dilakukan

antara lain perilaku dinamis nonlinear benda solid, fluida, gas dan interaksi mereka. Simulasi tipikal terdiri dari pengaturan model, interaksi dan beban yang diterapkan, menyelesaikan respons dinamis nonlinier model dari waktu ke waktu untuk pemuatan dan interaksi, kemudian memeriksa detailnya tanggapan dengan berbagai alat yang tersedia.

#### 2.7.1 Prosedur Analisis Metode Elemen Hingga

Langkah-langkah dalam memformulasikan analisis elemen hingga dari permasalahan fisis umum digunakan dalam beberapa analisis, baik itu struktural, perpindahan panas, aliran fluida, atau permasalahan lainnya. Adapun beberapa langkah-langkah tersebut terbagi menjadi:

##### 1. *Preprocessing*

Pada tahap ini pendefinisian model dilakukan sebagai data awal untuk pemodelan agar hasil yang didapatkan dapat sesuai dengan yang diharapkan. Hal-hal yang ditentukan pada tahap *preprocessing* ini antara lain seperti bentuk geometri, material *properties*, *boundary condition*, pembebanan, tipe elemen, ukuran dari elemen.

##### 2. *Solution*

Pada tahap ini *software* penganalisis elemen hingga menyusun persamaan aljabar pengatur dalam bentuk matriks dan menghitung nilai yang tidak diketahui dari variabel bidang primer. Nilai yang sudah dihitung kemudian digunakan kembali untuk menghitung variabel turunan tambahan seperti, gaya reaksi, element stress, dan aliran panas menggunakan sistem *back substitution*.

##### 3. *Post Processing*

Analisis dan evaluasi dari nilai hasil permasalahan mengacu pada proses *post processing*. *Postprocessor software* dapat melakukan penyortiran, mencetak, dan memplot hasil yang dipilih dari solusi elemen hingga. Contoh operasi yang dapat diselesaikan antara lain mengurutkan tegangan elemen berdasarkan besarnya, mengecek keseimbangan, menghitung faktor keamanan, plot bentuk struktur terdeformasi, animasi perilaku model dinamis, menghasilkan plot suhu berdasarkan warna. Data solusi dapat dimanipulasi dengan banyak cara dalam *postprocessing*, tujuan utama adalah untuk menerapkan pertimbangan teknik yang baik dalam menentukan apakah hasil solusi masuk akal secara fisik. (Hutton, 2004)

#### 2.7.2 *Explicit Dynamics*

Pada analisis *Explicit Dynamics* dapat diketahui beban impak atau perubahan beban secara cepat terhadap waktu, respon dinamis suatu struktur karena perambatan gelombang tegangan. Aspek penting dalam analisis jenis ini adalah pertukaran momentum antara benda-benda bergerak dan juga efek inersia, analisis ini juga dapat memodelkan permasalahan mekanika dengan tingkat nonlinear tinggi seperti fenomena *buckling*, *impact*, *hyperelasticity*, dan material *failure*.

Pada Ansys sendiri, *Explicit Dynamics* merupakan sebuah sub program yang berfungsi untuk mengkaji analisis transient *Explicit Dynamics* yang dapat menampilkan simulasi variasi dalam bidang rekayasa, termasuk perilaku pemodelan dinamik nonlinear dari benda-benda solid, fluida, gas, dan interaksi yang berkaitan. Sub program Ansys *Explicit Dynamics* dapat membantu dalam melakukan visualisasi fisik dalam kurun waktu yang singkat terhadap pemodelan suatu benda yang memiliki kasus nonlinear tinggi dan gaya transient dinamik sehingga dapat memaksimalkan desain dari produk itu sendiri. Program analisis elemen hingga Ansys *Explicit Dynamics* ini memiliki berbagai fitur, antara lain:

- Durasi singkat, kompleks, atau interaksi perubahan struktur.
- Analisis *Quasi-static*.
- Benturan kecepatan tinggi dan *hypervelocity*.
- Beban berat dalam sebuah deformasi material yang luas.

- Kegagalan material.
- Kegagalan material fragmentasi.
- Penetrasi mekanik.
- Benturan celah keruntuhan (*hypervelocity*).
- Proses manufaktur dengan reaksi nonlinear plastis.

## 2.8 ASME V&V 10-2006

### 2.8.1 Verifikasi

Proses verifikasi dalam hal ini melakukan penilaian terhadap keakuratan perangkat elektronik dalam memproduksi gambar (model komputasi) terhadap model matematis. Model matematis umumnya merupakan gabungan dari persamaan differensial dengan kondisi batas yang terkait, kondisi awal, serta persamaan konstitutif. Model komputasi adalah implementasi numerik dari model matematika, biasanya dalam bentuk diskritisasi numerik, algoritma solusi, dan kriteria konvergensi. Penilaian verifikasi mempertimbangkan masalah yang terkait dengan analisis numerik, rekayasa kualitas perangkat lunak, kesalahan pemrograman dalam kode komputer, dan estimasi kesalahan numerik. Verifikasi dalam hal ini dilakukan sebelum validasi.

Verifikasi terdiri dari dua kegiatan mendasar yaitu verifikasi kode dan verifikasi perhitungan. Verifikasi kode adalah aktivitas penilaian untuk memastikan bahwa tidak ada kesalahan pemrograman dalam kode komputer dan bahwa algoritma numerik untuk memecahkan persamaan diskrit menghasilkan solusi yang akurat sehubungan dengan solusi sebenarnya dari persamaan differensial. Verifikasi perhitungan adalah kegiatan penilaian untuk memperkirakan kesalahan solusi numerik yang ada pada setiap hasil simulasi. Verifikasi perhitungan juga disebut sebagai estimasi kesalahan numerik.

Penilaian verifikasi kode dapat secara logis dipisahkan menjadi dua bagian yaitu verifikasi kode numerik yang berfokus pada kebenaran matematis yang mendasari dan implementasi spesifik dari algoritma diskrit untuk memecahkan persamaan differensial dan jaminan kualitas perangkat lunak (SQA) yang membahas hal-hal seperti manajemen konfigurasi, kontrol versi, arsitektur kode, dokumentasi, dan pengujian regresi. Meskipun pengguna kode CSM (*computational solid mechanics*) tidak terlibat langsung dalam mengembangkan dan memproduksi pemodelan perangkat lunak yang digunakan, pengguna ini dapat memberikan umpan balik kepada pengembang untuk memastikan bahwa praktik rekayasa perangkat lunak yang baik diterapkan secara konsisten untuk kode yang digunakan. Jika tidak, kesalahan yang tidak perlu dalam kode dapat mempengaruhi hasil simulasi sedikit demi sedikit dan tidak terduga.

Verifikasi perhitungan diterapkan pada model komputasi yang dimaksudkan untuk memprediksi hasil validasi. Dengan demikian, setiap model komputasi yang dikembangkan dalam validasi akan mengacu pada verifikasi perhitungan. Tujuan verifikasi perhitungan adalah untuk memperkirakan kesalahan numerik yang terkait dengan diskritisasi. Dalam kebanyakan kasus, latihan model komputasi dengan beberapa *mesh* diperlukan untuk memperkirakan kesalahan ini. Sumber kesalahan lainnya adalah bias *mesh*, dimana susunan elemen dapat mempengaruhi hasil, terutama jika *mesh* kasar.

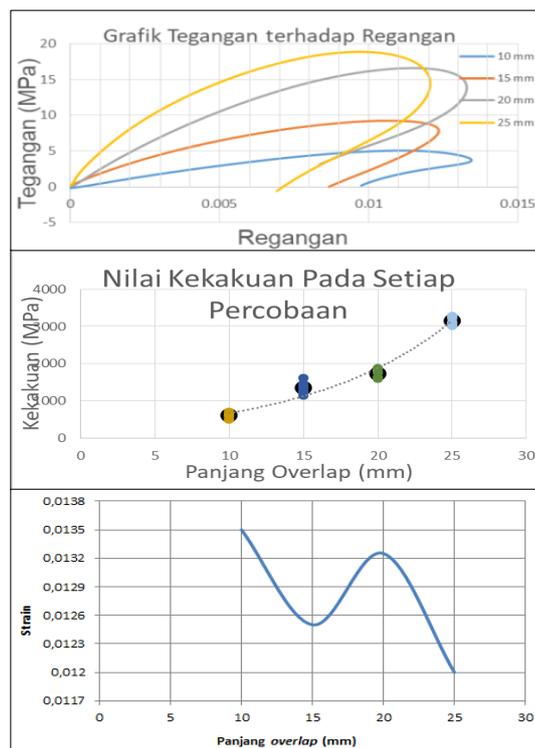
### 2.8.2 Validasi

Validasi merupakan suatu kegiatan yang dilakukan untuk mengesahkan kebenaran terhadap suatu kondisi yang nyata atau realita. Data-data pada hasil eksperimen yang telah dilakukan akan dibandingkan dengan hasil simulasi. Pemodelan geometri, material, kondisi awal, kondisi batas, gaya eksternal, serta respons yang didapatkan dimodelkan sama antara simulasi dengan eksperimen yang telah dilakukan. Hal ini dimaksudkan guna meminimalisir perbedaan pada hasil validasi.

Dalam validasi ini, perlu ditentukan nilai metrik yang akan digunakan untuk membandingkan data pada hasil simulasi dengan eksperimen yang telah dilakukan. Nilai metrik ini sebagai patokan dalam validasi. Jika hasil simulasi dengan eksperimen telah dinyatakan valid, maka pemodelan dalam simulasi dapat digunakan untuk memperoleh data-data pada penelitian ataupun tujuan pemodelan yang dimaksudkan.

## 2.9 Penelitian Terdahulu

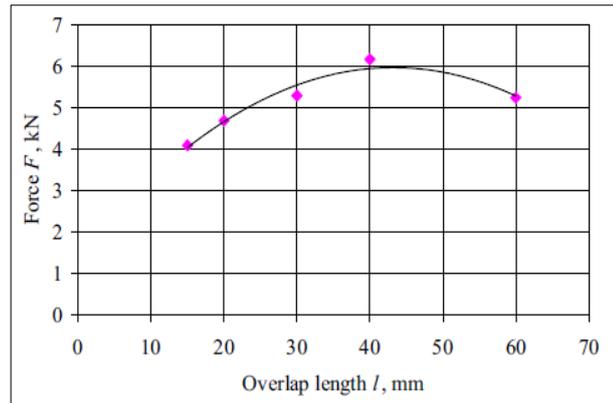
Penelitian tentang sambungan *adhesive* telah banyak diteliti di berbagai negara, salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Ridho Gary Pribadi pada tahun 2019 yang melakukan penelitian tentang pengaruh panjang *overlap* terhadap kekakuan pada sambungan *adhesive* tipe *single lap* dengan pembebanan dinamis. Pada penelitian ini dilakukan eksperimen dengan alat uji SHPB dan spesimen berupa sambungan *adhesive* tipe *single lap* dengan bahan Aluminium tipe 6061. Variasi yang digunakan adalah panjang *overlap* dengan 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm. Ketebalan *adhesive* pada penelitian ini diatur secara konstan sebesar 1 mm. Hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa semakin panjang *overlap* sambungan maka tegangan yang terekam pada grafik akan semakin tinggi dan semakin besar pertambahan dari panjang *overlap* maka nilai kekakuan dari sambungan akan meningkat. Penelitian ini hanya dapat memperoleh respons kombinasi dari *adherend* dan *adhesive*. Oleh karena itu, penelitian kali ini melakukan penelitian pada respons tegangan-regangan dari kombinasi *adherend* dan *adhesive* beserta respons dari lapisan *adhesive*. Gambar 2.27 merupakan hasil dari penelitian yang telah dilakukan oleh Ridho Gary Pribadi.



**Gambar 2.27** Grafik tegangan terhadap regangan, grafik kekakuan terhadap panjang *overlap*, dan grafik regangan terhadap panjang *overlap* (Pribadi, 2019)

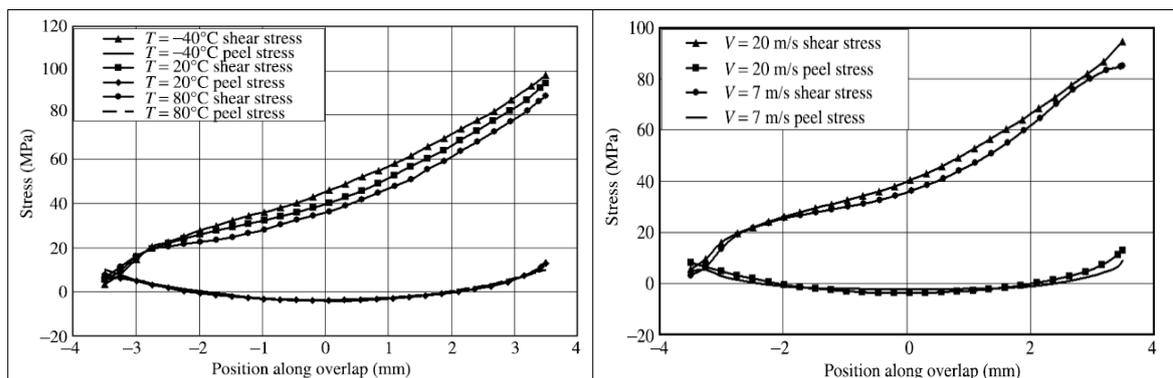
Pada penelitian selanjutnya dilakukan oleh Pero Raos, Dražan Kozak dan Mirjana Lucic pada tahun 2005. Pada penelitian ini melakukan analisis tegangan-regangan dari sambungan *adhesive* tipe *single lap* dengan pembebanan tarik untuk mengetahui panjang *overlap* yang optimal. Material *adherend* yang digunakan dari aluminium. Variasi panjang *overlap* yang digunakan adalah 15 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, dan 60 mm. Ketebalan *adhesive* pada

penelitian ini diatur secara konstan sebesar 0,15 mm. Hasil yang diperoleh membuktikan bahwa panjang *overlap* berpengaruh langsung terhadap kekuatan tarik sambungan, dimana nilai panjang *overlap* yang optimum dapat ditentukan. Semakin panjang *overlap* yang digunakan maka kekuatan tarik sambungan juga semakin meningkat. Pada penelitian ini menggunakan beban tarik untuk mengetahui kekuatan dari sambungan maka dari itu penelitian sekarang menggunakan beban *impact* guna mengetahui pengaruh *overlap* pada sambungan *adhesive* agar dapat memperoleh respons tegangan-regangan dimana hasil dari respons ini dapat diketahui kekuatan dari sambungan pula. Gambar 2.28 merupakan hasil penelitian yang telah dilakukan.



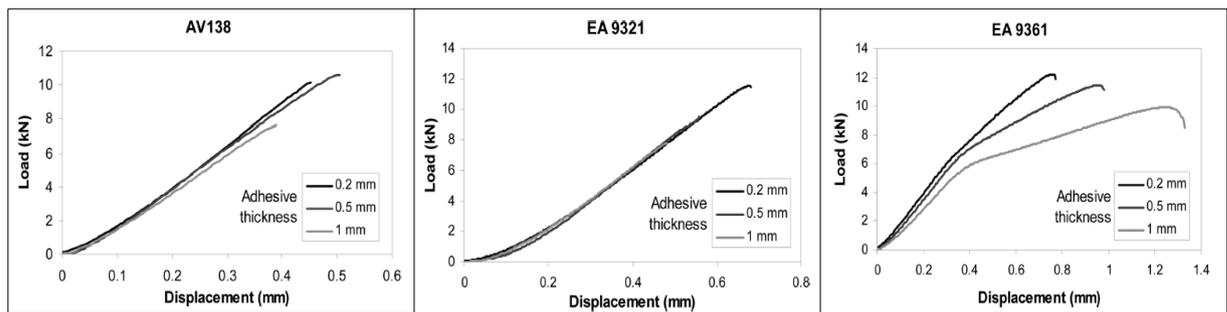
**Gambar 2.28** Grafik gaya tarik terhadap panjang *overlap* (Raos, Kozak, dan Lucic, 2005)

Pada penelitian selanjutnya dilakukan oleh Xuan Chen dan Yulong Li pada tahun 2010. Penelitian ini melakukan penelitian tentang kekuatan dinamis pada sambungan *adhesive* tipe *single lap joint*. Pada penelitian ini menggunakan alat uji SHPB dengan ketebalan *adhesive* sebesar 1,77 mm. Variasi pada penelitian ini yaitu pada dua kecepatan yang digunakan sebesar 20 m/s dan 7 m/s dan suhu pengujian mulai dari 40°C hingga 80°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan geser spesimen menurun dengan meningkatnya suhu dan meningkat dengan meningkatnya kecepatan. Pada penelitian ini menggunakan ketebalan *adhesive* yang cukup tebal untuk mengukur kekuatan sambungan maka dari itu penelitian sekarang melakukan pengecilan ketebalan *adhesive* menjadi 1 mm dan kecepatan secara konstan dengan kecepatan 2 m/s. Gambar 2.29 merupakan hasil penelitian terdahulu.



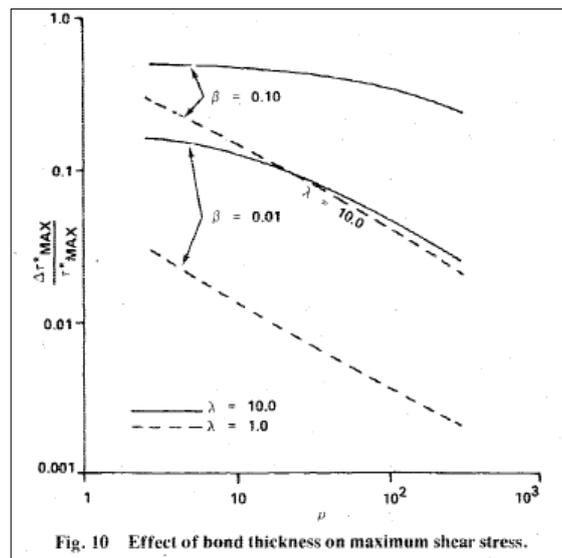
**Gambar 2.29** Grafik tegangan terhadap posisi selama *overlap* pada variasi suhu dan kecepatan (Chen dan Li, 2010)

Pada penelitian selanjutnya dilakukan oleh Lucas F. M. da Silva pada tahun 2006. Penelitian ini melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh jenis dan ketebalan *adhesive* pada kekuatan geser. Sambungan yang digunakan pada penelitian ini adalah *single lap joint*. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah tiga jenis *adhesive* (*brittle*, *intermediate*, dan *ductile*) dan ketebalan *adhesive* sebesar 0,2 mm, 0,5 mm, dan 1 mm. Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa kekuatan geser semakin meningkat dengan jenis *adhesive* yang semakin keras dan ketebalan *adhesive* yang semakin menurun. Maka dari itu, pada penelitian yang sekarang melakukan spesifikasi untuk mengetahui kekuatan sambungan dengan menggunakan dua variasi *adhesive* yaitu *epoxy resin* dan *polyurethane* serta ketebalan *adhesive* konstan sebesar 1 mm. Gambar 2.30 merupakan hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Lucas F. M. da Silva.



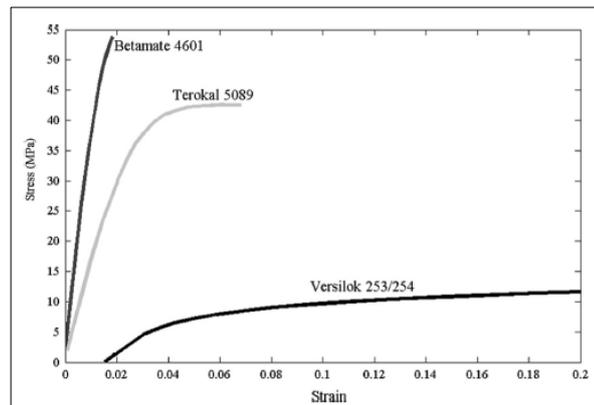
**Gambar 2.30** Grafik *load* terhadap *displacement* pada *brittle*, *intermediate*, dan *ductile* (Silva, 2006)

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh I. U. Ojalvo dan H. L. Eidinoff pada tahun 1978 yang meneliti tentang pengaruh ketebalan ikatan pada tegangan di sambungan *adhesive* tipe *single lap joints*. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah rasio ketebalan ikatan terhadap *adherend*. Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa dimasukkannya pengaruh ketebalan ikatan meningkatkan *shear stress* maksimum yang diprediksi. Dengan begitu, maka pada penelitian kali ini tidak menggunakan rasio dan digunakan ketebalan secara konstan dengan ketebalan sebesar 1 mm. Gambar 2.31 merupakan hasil dari penelitian ini.



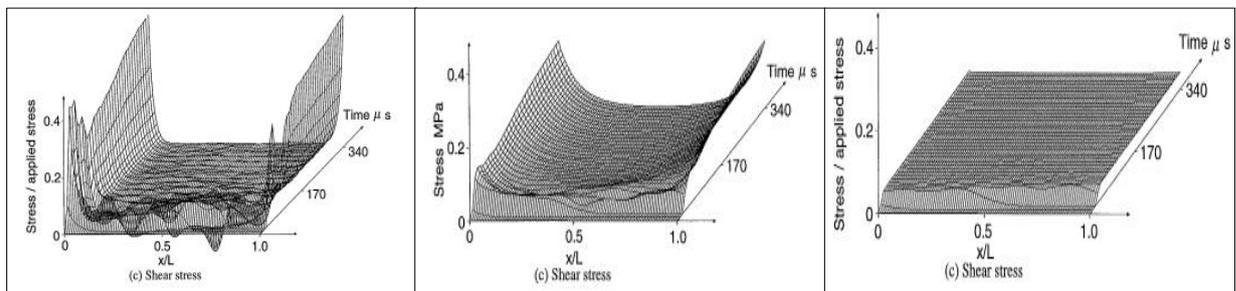
**Gambar 2.31** Grafik pengaruh ketebalan ikatan pada tegangan geser (Ojalvo dan Eidinoff, 1974)

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Mehdi Asgharifar, Fanrong Kong, Blair Carlson, dan Radovan Kovacevic pada tahun 2013 yang meneliti tentang analisis dinamis dari sambungan *adhesive* dengan *solid projectile impact*. Sambungan *adhesive* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *single lap joint* dengan variasi tiga *adhesive*, yaitu Trokal 5089, Betamate 4601, dan Versilok 253/254. Hasil pada penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan yang lebih rendah pada lapisan *adhesive* dapat dicapai ketika menggunakan *adhesive* dengan *properties* modulus dari *adhesive* yang lebih rendah. Dikarenakan *adhesive* jenis *epoxy resin* dan *polyurethane* belum digunakan, maka dalam penelitian sekarang melakukan variasi dengan dua jenis *adhesive* tersebut. Gambar 2.32 merupakan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Mehdi Asgharifar dkk.



**Gambar 2.32** Grafik *stress-strain* pada variasi tiga jenis *adhesive* (Asgharifar dkk, 2013)

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh C. Sato dan K. Ikegami pada tahun 1999 yang meneliti tentang deformasi dinamis dari *lap joints* dan *scarf joints* dengan beban *impact*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa ada konsentrasi tegangan di kedua tepi lapisan *adhesive* ketika beban diterapkan pada *single lap joints* dan *tapered lap joints*. Tegangan pada tepi menunjukkan puncak dan penurunan pada tahap awal pembebanan. Setelah tahap awal, tegangan meningkat secara bertahap karena deformasi lentur. Namun, konsentrasi tegangan dari *scarf joints* lebih kecil jika dibandingkan dengan *single lap joints* dan *tapered lap joints*. Dikarenakan pada penelitian terdahulu ini telah mendapatkan respons kombinasi dari *adherend* dan *adhesive* tetapi respons dari lapisan *adhesive* tidak tampak, maka penelitian kali ini melakukan simulasi untuk mendapatkan respons dari lapisan *adhesive*.

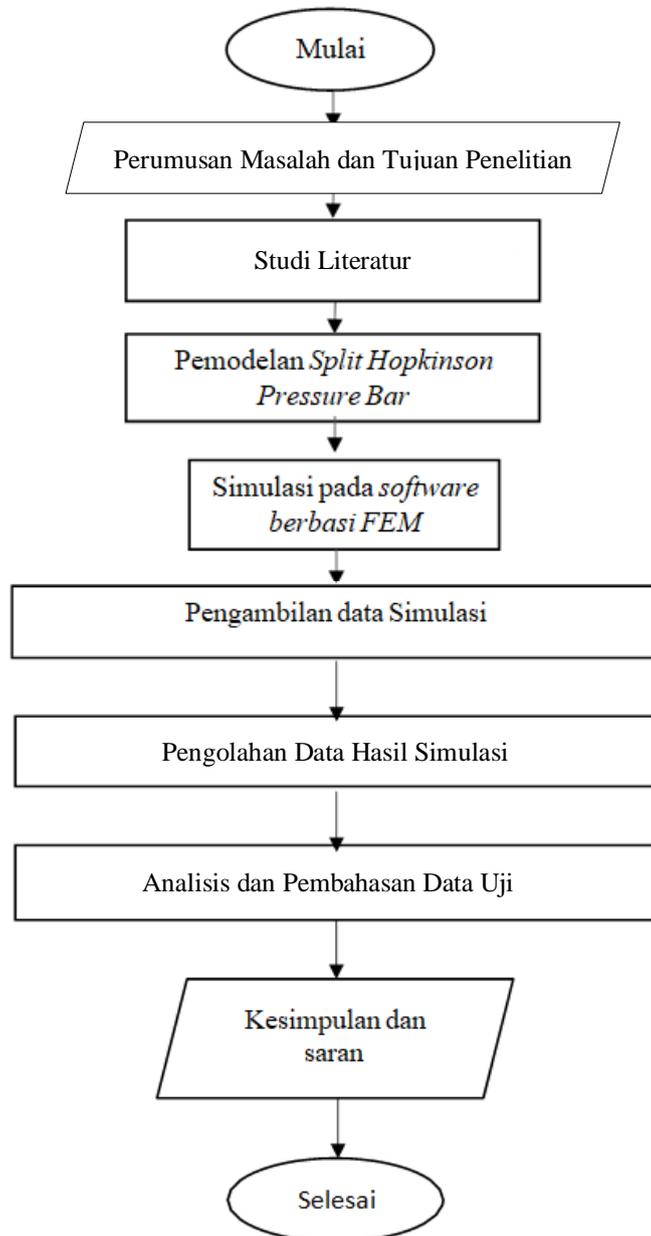


**Gambar 2.33** Grafik *shear-stress* (Sato dan Ikegami, 1999)

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 *Flowchart* Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan. Tahapan penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian ini digambarkan melalui *flowchart* Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** *Flowchart* penelitian

a) Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Identifikasi masalah pada penelitian ini dibagi menjadi perumusan masalah dan tujuan penelitian. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan distribusi tegangan pada lapisan *adhesive*, mengetahui pengaruh *properties adhesive* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive*, dan pengaruh panjang *overlap* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive*.

b) Studi Literatur

Untuk mencari referensi yang berkaitan dengan penelitian melalui buku teks dan jurnal ilmiah. Materi yang dipelajari adalah dasar teori dari *adhesive joint*, prinsip kerja dari SHPB, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini.

c) Pemodelan SHPB dan Simulasi

Simulasi yang dilakukan menggunakan numerik *explicit dynamics* (Ansys) dengan membuat pemodelan alat uji SHPB dan spesimen *single lap joint* seperti yang dibuat pada eksperimen Ridho Gary Pribadi.

d) Pengolahan Data Hasil Simulasi

Data yang didapatkan berupa sinyal regangan terhadap waktu yang akan diolah menjadi *stress-strain curve* menggunakan beberapa persamaan yang ada. Dari *stress-strain curve*, akan diketahui sifat mekanik sambungan *adhesive*. Serta, melakukan pengolahan data dari distribusi tegangan pada lapisan *adhesive*.

e) Analisis dan Pembahasan data

Analisis dan pembahasan data dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari *properties adhesive* dan panjang *overlap* terhadap sifat mekanik dari kombinasi *adherend* dan *adhesive* serta distribusi tegangan pada lapisan *adhesive*. Setelah mengetahui hubungannya, analisis dan pembahasan data akan digunakan sebagai acuan menarik kesimpulan.

f) Kesimpulan dan saran

Penarikan kesimpulan berdasarkan analisis yang dilakukan dengan menjawab tujuan penelitian yang sudah ditentukan serta memberikan saran untuk penelitian selanjutnya agar hasil yang didapatkan menjadi lebih baik.

## 3.2 Model Geometri

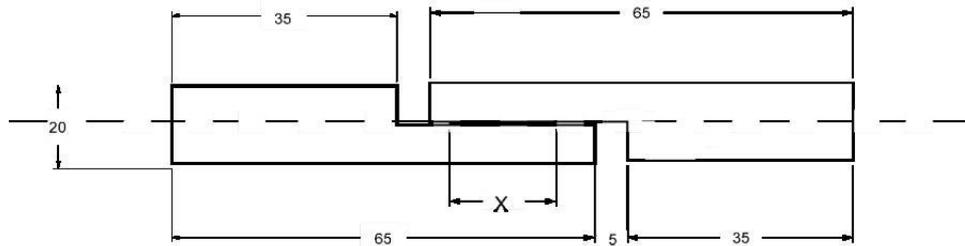
### 3.2.1 Gambar Spesimen

Spesimen yang digunakan pada penelitian ini adalah sambungan *adhesive* tipe *single lap*. Untuk ketebalan *adhesive*, diatur secara konstan pada tiap variasi dengan ketebalan yaitu 1 milimeter. Pemodelan spesimen dilakukan dengan membuat desain berdasarkan bentuk asli dari dua benda pejal yang diteliti dimana spesimen ini merupakan spesimen uji yang digunakan oleh Ridho Gary Pribadi pada tahun 2019. Benda pejal berbentuk silinder dengan diameter 20 mm dan panjang 65 mm. Silinder pejal tersebut mengalami pemotongan setebal 10,5 mm dengan panjang 30 mm sehingga ketebalan *adherend* pada sambungan *adhesive* ini sebesar 9,5 mm. *Thickness* dari *adherend* pada penelitian ini jauh lebih tebal daripada penelitian-penelitian terdahulu. Pada penelitian terdahulu menggunakan pelat aluminum dengan ketebalan minimum 1 mm dan maksimum 4 mm. Nilai *thickness* yang relatif kecil ini merupakan tipis atau *thin*. Maka dari itu, sambungan *adhesive* pada penelitian ini ialah tipe *thick single lap*. Penggunaan ketebalan sebesar 9,5 mm dalam penelitian ini dimaksudkan guna menghindari terjadinya *bending* pada sambungan *adhesive* dan hanya terjadi *shear stress* sesuai dengan yang diharapkan pada simulasi SHPB.

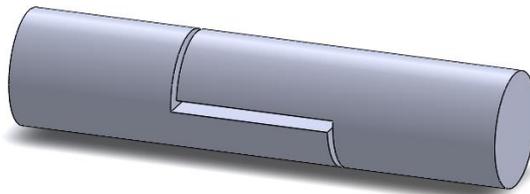
Pemodelan dilakukan dengan mengukur dimensi dari spesimen terlebih dahulu dengan menggunakan jangka sorong. Selanjutnya, dimensi-dimensi yang telah didapatkan digunakan untuk membuat gambar teknik dua dimensi dari spesimen pada *software Ansys design modeler*. Dengan melakukan *extruded boss/base* dan *extruded cut* pada gambar dua dimensi, maka dapat dibentuk model spesimen menjadi tiga dimensi. Setelah model tiga dimensi dari masing-masing komponen terbentuk, maka langkah selanjutnya adalah menyatukan komponen-komponen spesimen menjadi satu bagian. Gambar 3.2, 3.3. dan 3.4 merupakan gambar spesimen berupa bentuk asli, gambar dua dimensi, dan model tiga dimensi.



**Gambar 3.2** Bentuk asli dari spesimen uji sambungan *adhesive* tipe *single lap*



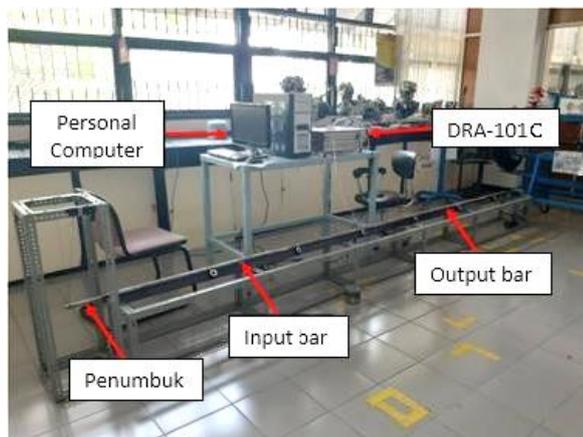
**Gambar 3.3** Rancangan spesimen uji sambungan *adhesive* tipe *single lap*, simbol  $x$  merupakan panjang *adhesive* yang akan divariasikan (satuan dalam mm) (Pribadi, 2019)



**Gambar 3.4** Model tiga dimensi spesimen sambungan *adhesive* tipe *single lap* tanpa *adhesive*

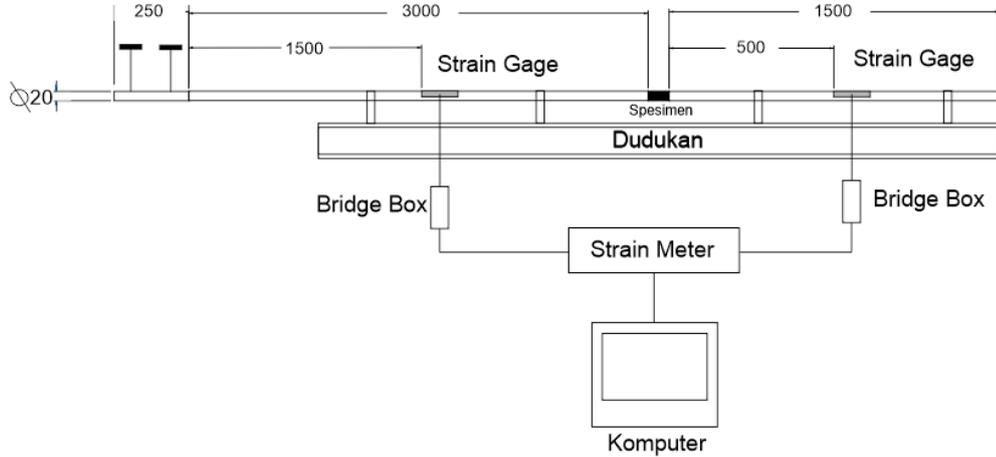
### 3.2.2 Gambar Pengujian

Alat uji yang digunakan pada penelitian ini adalah alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*. *Split Hopkinson Pressure Bar* terdiri dari beberapa komponen, yaitu *striker bar*, *input bar*, dan *output bar* dengan material yang digunakan adalah Aluminium 6061-T6. Alat ini memerlukan suatu alat ukur yang biasa disebut dengan *strain meter*. *Strain meter* memiliki fungsi untuk mengubah regangan yang melewati *input bar* dan *output bar* menjadi sinyal digital yang akan dikirim ke komputer sebagai grafik antara regangan terhadap waktu. Pada penelitian ini *strain meter* yang digunakan adalah *dynamic strain meter* DRA 101C dari Tokyo Sokki Konkyujo. Gambar 3.5 merupakan gambar dari alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*.

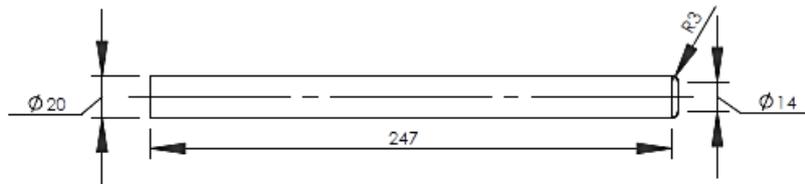


**Gambar 3.5** Bagian komponen pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

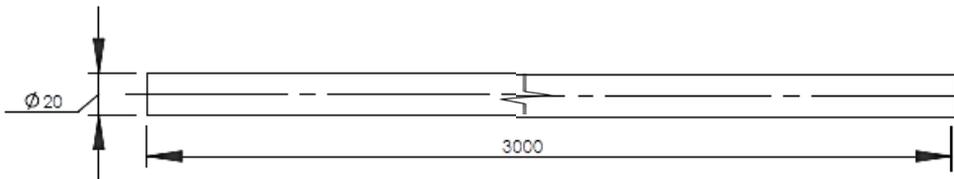
Perancangan dari alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* dilakukan dengan membuat gambar teknik dari komponen-komponen pada alat uji tersebut. Gambar teknik mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Ridho Gary Pribadi pada tahun 2019. Gambar teknik dibuat dalam bentuk rancangan alat uji secara keseluruhan, komponen penumbuk (*striker bar*), *input bar*, dan juga *output bar*.



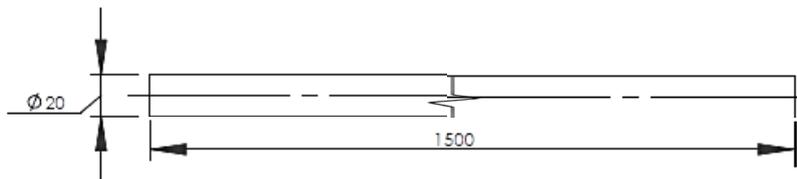
**Gambar 3.6** Rancangan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* beserta dimensi-dimensi yang telah tertera (satuan dalam mm) (Pribadi, 2019)



**Gambar 3.7** Gambar teknik dari *striker bar* (satuan dalam mm)

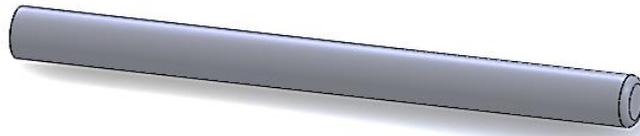


**Gambar 3.8** Gambar teknik dari *input bar* (satuan dalam mm)

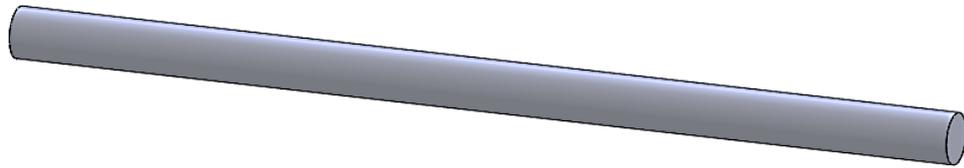


**Gambar 3.9** Gambar teknik dari *output bar* (satuan dalam mm)

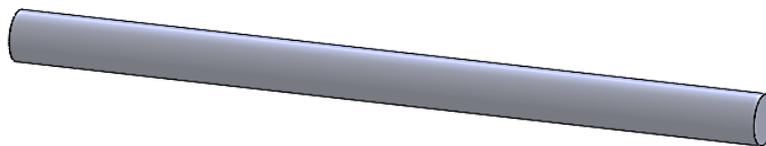
Pemodelan alat uji berupa model tiga dimensi dari *Split Hopkinson Pressure Bar* dibuat dengan menggunakan *software Ansys design modeler* dengan referensi dimensi-dimensi yang telah tertera pada Gambar 3.7, 3.8, dan 3.9. Model tiga dimensi dibuat secara terpisah dari masing-masing komponen yakni *striker bar*, *input bar*, dan juga *output bar*. Komponen-komponen tersebut nantinya digabungkan menjadi satu dalam pemodelan dengan menggunakan *software Ansys design modeler*. Pada Gambar 3.10, 3.11, dan 3.12 secara berurutan merupakan hasil dari model tiga dimensi *striker bar*, *input bar*, dan *output bar*.



**Gambar 3.10** Model tiga dimensi *striker bar*



**Gambar 3.11** Model tiga dimensi *input bar*



**Gambar 3.12** Model tiga dimensi *output bar*

### 3.3 Model Material

#### 3.3.1 Model Material Spesimen dan Alat Uji Penelitian

Jenis material yang digunakan pada spesimen penelitian dan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* adalah Aluminum 6061-T6. T6 dalam material ini artinya paduan aluminum mengalami proses *solution heat treatment* kemudian diproses dengan *artificial aging*. Model material Aluminum 6061-T6 yang digunakan pada simulasi *Split Hopkinson Pressure Bar* didapatkan dari *engineering data* pada *software* Ansys dan situs Matweb. Model material diambil dari *explicit dynamics* dengan pemodelan *Steinberg Guinan Strength*. Model material ini banyak digunakan dalam simulasi dengan pembebanan *impact* karena dapat merepresentasikan *strain rate sensitivity* pada material. (Peng dkk, 2008)

**Tabel 3.1** Data *material properties* Aluminum 6061-T6

Parameter	AL 6061-T6	Unit
<i>Density</i>	2703	kg/m <sup>3</sup>
<i>Initial Yield Stress</i>	290	MPa
<i>Maximum Yield Stress Y<sub>max</sub></i>	680	MPa
<i>Hardening Constant B</i>	125	
<i>Hardening Exponent n</i>	0,1	
<i>Derivative D<sub>G</sub>/D<sub>P</sub> G'P</i>	1,8	
<i>Derivative dG/dT G'T</i>	-17	MPa/K
<i>Derivative dY/dP Y'P</i>	0,018908	
<i>Melting Temperature T<sub>melt</sub></i>	1220	K

### 3.3.2 Model Material Adhesive

Untuk *stage bonding*, *adhesive* dapat dibagi dalam dua kategori utama yaitu *polyurethane* dan *epoxy*. *Polyurethane* dapat memberikan karakteristik unik karena variasi luas dalam sifat fisik yang dapat dicapai dengan memodifikasi formulasinya. *Polyurethane* bersifat fleksibel dan dapat mendistribusikan tegangan secara merata ke seluruh sambungan yang direkatkan dalam sambungan. Sedangkan untuk *epoxy*, keuntungan terbesar dari *adhesive* ini adalah kemampuannya untuk mempertahankan sifat fisik yang sangat baik setelah terpapar suhu tinggi, seperti yang ditemui dalam oven pemrosesan cat otomotif. *Epoxy*, secara umum, sedikit kurang fleksibel dan membutuhkan toleransi celah *bonding* yang lebih dekat daripada *polyurethane*. (Revellino, Saggese, dan Gaiero, 2000)

*Polyurethane* merupakan *adhesive* yang memiliki kekuatan ikatan yang lebih rendah daripada *epoxy resin*. Penggunaan industri untuk *polyurethane* biasanya digunakan untuk konstruksi, furnitur, laminating, farmasi, alas kaki, lantai dan atap. *Epoxy resin* merupakan bagian utama dari kelas perekat yang disebut *structural adhesives* atau *engineering adhesives*. *Epoxy resin* dengan kinerja perekat yang tinggi ini digunakan dalam konstruksi pesawat terbang, mobil, sepeda, perahu, tongkat golf, ski, papan seluncur salju, dan aplikasi lain yang memerlukan ikatan kekuatan tinggi. Pemodelan material *adhesive* dilakukan dengan melakukan input model material *viscoelastic*. Dalam hal ini, *prony series* diinputkan dalam *material properties* yang terdiri dari *relaxation times* dan *shear modulus*. Nilai dari *shear modulus* didapatkan berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan seperti dijelaskan pada bab II subbab *viscoelastic*.

**Tabel 3.2** *Material properties* dari *epoxy resin* (Madenci, 2011)

Parameter	<i>Adhesive</i>			
Material	<i>Epoxy Resin</i>			
<i>Prony Series</i>	$\tau_i$ (s)	$G_i$ (MPa)	$\tau_i$ (s)	$G_i$ (MPa)
	$1 \times 10^{-4}$	76,92	$1 \times 10^2$	1038,46
	$1 \times 10^{-3}$	307,69	$1 \times 10^3$	1115,38
	$1 \times 10^{-2}$	576,92	$1 \times 10^4$	961,53
	1	384,61	$1 \times 10^5$	346,15
	$1 \times 10^1$	423,07		
<i>Young's Modulus</i> (MPa)	700			
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3			

**Tabel 3.3** *Material properties* dari *polyurethane* (Mills, 2006)

Parameter	<i>Adhesive</i>
Material	<i>Polyurethane</i>

<i>Prony Series</i>	$\tau_i$ (s)	Gi (MPa)	$\tau_i$ (s)	Gi (MPa)
	0,01	17,241	1	17,200
	0,03	17,241	3	16,42
	0,1	17,241	10	14,24
	0,3	17,241		
<i>Young's Modulus</i> (MPa)	50			
<i>Poisson's Ratio</i>	0,45			

### 3.4 Desain Penelitian

Desain penelitian berupa simulasi pada penelitian ini tertera pada Tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Desain penelitian

<i>Properties Adhesive</i>	Panjang <i>Overlap</i> (mm)	Distribusi Tegangan pada Lapisan <i>Adhesive</i>	Sifat Mekanik Sambungan <i>Adhesive</i>
<i>Epoxy Resin</i>	10		
	15		
	20		
	25		
<i>Polyurethane</i>	10		
	15		
	20		
	25		

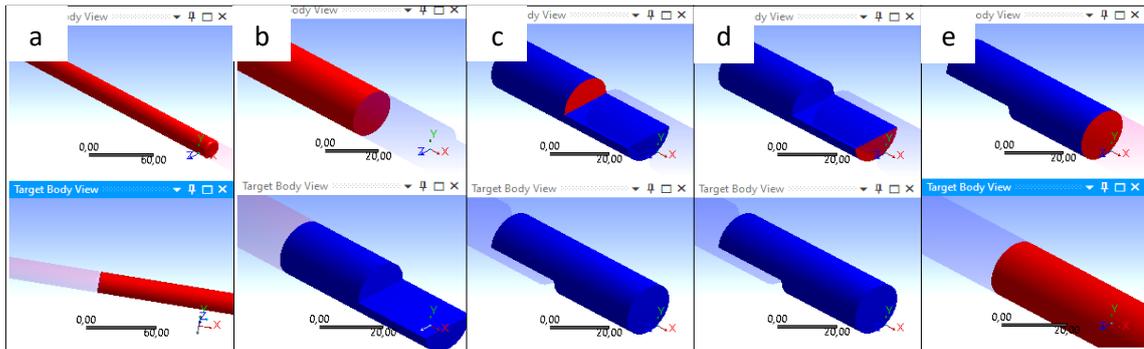
### 3.5 Body Contact

#### 3.5.1 Frictionless

*Body contact of frictionless* merupakan kontak yang menerapkan koefisien gesekan dengan asumsi nol sehingga membuat terjadinya pergeseran secara bebas antar *body*, *face*, *edge*, dan/atau *vertex* dari kedua benda geometri yang telah diterapkan dalam simulasi Ansys. Kontak yang diakibatkan dari *frictionless* memiliki pengaruh tersendiri. Pengaruh kontak ini dibedakan dalam dua arah yakni *normal direction* dan *tangential direction*. Kontak yang terjadi antara *contact* dengan *target* membuat *contact* dapat terlepas atau terpisah dengan

*target* dalam *normal direction*. Hal ini berarti selama pembebanan yang terjadi *contact* dapat bergerak bebas (tidak terikat dengan *target*) dalam arah normal. Dalam *tangential direction*, *contact* dapat meluncur tanpa adanya hambatan disepanjang *body*, *face*, *edge*, dan/atau *vertex* dari *target* yang telah diterapkan dalam pengaturan *body contact*.

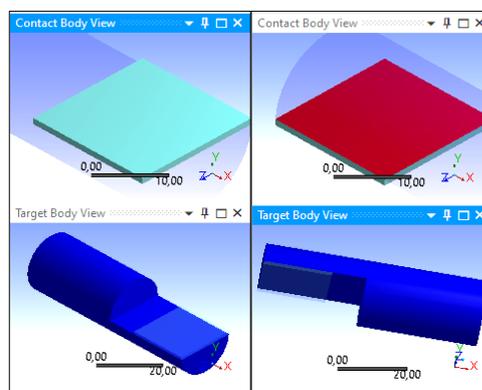
Pada simulasi uji *Split Hopkinson Pressure Bar* di Ansys 2019 *body contact of frictionless* terjadi antara *striker bar* dengan *input bar*, *input bar* dengan *adherend*, antar *adherend*, dan *adherend* dengan *output bar*. Gambar 3.13 merupakan gambar dari *body contact of frictionless* pada Ansys 2019 pada penelitian ini.



**Gambar 3.13** *Body contact of frictionless* pada simulasi uji *Split Hopkinson Pressure Bar* di Ansys 2019 (a) *striker bar* dengan *input bar*, (b) *input bar* dengan *adherend*, (c) dan (d) antar *adherend*, (e) *adherend* dengan *output bar*

### 3.5.2 Bonded

*Body contact of bonded* adalah sebuah *body contact* yang membuat semua bidang kontak yang diterapkan dan telah diatur dalam Ansys dalam hal ini dapat berupa *body*, *face*, *edge*, dan/atau *vertex* dari sebuah benda geometri tidak akan terjadi pergeseran atau pemisahan dengan kontak dari *body*, *face*, *edge*, dan/atau *vertex* benda geometri yang lain yang telah direkatkan. Jenis kontak ini dapat menghasilkan solusi linier dari pembebanan pada simulasi. Hal ini dikarenakan panjang atau luas kontak tidak akan berubah selama penerapan beban yang terjadi dalam rentang waktu yang telah ditentukan. Pengaruh *body contact of bonded* dibedakan menjadi dua arah yaitu *normal direction* dan *tangential direction*. Dalam *normal direction*, kontak yang terjadi antara *contact* dengan *target* membuat *contact* tidak dapat dipisahkan karena telah diterapkan *body contact of bonded* antar keduanya. Dalam *tangential direction*, kontak yang terjadi antara *contact* dengan *target* membuat *contact* tidak dapat meluncur sesuai dengan arah tangensial. Pada simulasi uji *Split Hopkinson Pressure Bar* di Ansys 2019 *body contact of bonded* terjadi pada *adhesive* dengan *adherend* (spesimen uji penelitian). Gambar 3.14 merupakan gambar dari *body contact of bonded* pada penelitian ini.



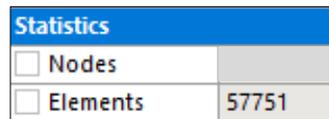
**Gambar 3.14** *Body contact of bonded* antara *adherend* dengan *adhesive* pada simulasi uji *Split Hopkinson Pressure Bar* di Ansys 2019

### 3.6 Meshing

#### 3.6.1 Total Elemen

Total dari elemen yang digunakan pada *meshing* Ansys berpengaruh dalam keakurasian hasil analisis. Pengaruh yang diberikan cukup signifikan. Dalam hal ini, semakin banyak elemen yang digunakan maka keakurasian dari hasil analisis juga semakin tinggi. Sebaliknya, semakin sedikit jumlah elemen yang digunakan maka keakurasian yang dapat dihasilkan dari analisis pada Ansys juga semakin rendah.

*Meshing* geometri pada Ansys memiliki peranan yang penting terhadap waktu komputasi beserta hasil analisis. Jika *meshing* yang diterapkan terlalu kasar, maka hasil dari analisis dapat diasumsikan memiliki akurasi yang rendah. Akan tetapi, jika *meshing* yang diterapkan terlalu halus maka simulasi akan membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama untuk dijalankan tanpa memberikan peningkatan akurasi yang berarti. Strategi yang dapat diterapkan untuk mengatasi hal ini agar analisis dapat dijalankan dengan efektif yaitu dengan melakukan analisis terhadap geometri, pembebanan, kondisi batas, dan lain sebagainya terlebih dahulu sebelum melakukan *meshing*. Area pada geometri dimana tidak diharapkan terjadinya pembebanan yang signifikan dapat dilakukan *meshing* dengan kasar untuk mengurangi jumlah elemen secara keseluruhan. Hal ini dapat membantu memberikan keseimbangan yang efektif antara simulasi dengan akurasi hasil analisis yang terkait. Pada simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar* total dari elemen yang diterapkan pada geometri dapat dilihat pada Gambar 3.15.



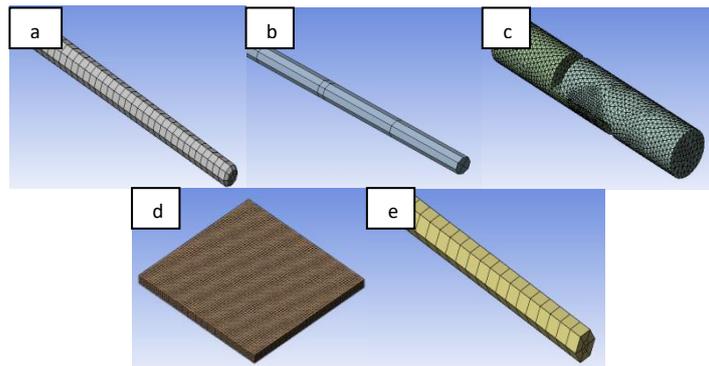
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	
<input type="checkbox"/> Elements	57751

**Gambar 3.15** Total elemen yang diterapkan pada *striker bar*, *input bar*, *adherend*, *adhesive*, dan *output bar* di simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar*

#### 3.6.2 Jenis Elemen

Secara umum, keakuratan analisis ditentukan oleh jumlah elemen yang digunakan dalam Ansys. Semakin banyak elemennya maka menunjukkan keakurasian yang tinggi. Ada faktor lain yang juga berpengaruh dalam keakurasian analisis yaitu memilih jenis elemen ketika *meshing* pada Ansys. Memilih jenis elemen yang tepat akan memperoleh solusi yang akurat dan handal. Dalam penerapan *meshing* pada Ansys, jenis elemen *hexahedral* dan *tetrahedral* merupakan elemen yang sering digunakan dalam *meshing* untuk memecahkan analisis. Pada saat ini, elemen jenis *hexahedral* merupakan elemen yang sering digunakan karena keakuratan perhitungan mendekati kondisi kenyataan.

Pada simulasi *Split Hopkinson Pressure Bar* ini menggunakan dua jenis elemen, yaitu *hexahedral* dan *tetrahedral*. Penggunaan jenis elemen yang bervariasi ini dimaksudkan untuk memperkecil waktu komputasi tanpa mengurangi keakuratan data yang dihasilkan dalam simulasi. Jenis elemen *hexahedral* diterapkan pada *striker bar*, *adhesive*, dan *output bar*. Untuk jenis elemen *tetrahedral* diterapkan pada *input bar* dan *adherend*. Dalam simulasi *Split Hopkinson Pressure Bar* ini, ukuran elemen terkecil yakni terletak pada lapisan *adhesive*. Dengan menggunakan jenis elemen *hexahedral*, pada lapisan ini diterapkan *meshing* dengan dimensi panjang dan lebar sebesar 0,33 mm dan 0,2 mm. Gambar 3.16 merupakan tangkapan layar dari penerapan jenis elemen pada *meshing* Ansys.



**Gambar 3.16** Penerapan jenis elemen dalam simulasi (a) *striker bar*, (b) *input bar*, (c) *adherend*, (d) *adhesive*, dan (e) *output bar*

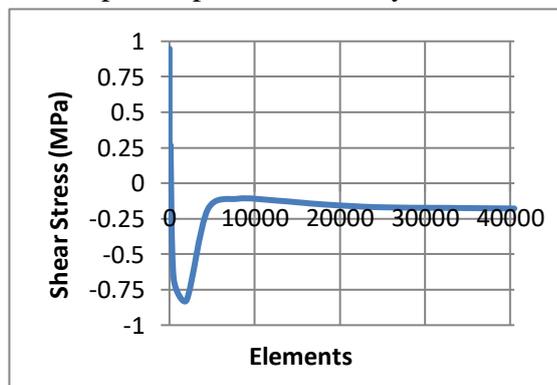
### 3.6.3 Mesh Metric dan Konvergensi

*Mesh metric* merupakan salah satu fitur yang paling berguna dalam menentukan bentuk dan ukuran elemen yang benar dalam *meshing* di Ansys. Dalam simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar*, *mesh metric* yang digunakan yaitu *aspect ratio* dan *skewness*. *Aspect ratio* didefinisikan sebagai rasio ukuran terpanjang dari elemen dengan ukuran terpendek dari elemen. *Aspect ratio* merepresentasikan kualitas dari elemen dimana angka satu merupakan bentuk elemen baik *tetrahedral* ataupun *hexahedral* dalam bentuk yang sempurna dan bentuk elemen lebih buruk ditunjukkan dengan *aspect ratio* yang lebih tinggi. Nilai dari *skewness* pada *mesh metric* menentukan seberapa mendekati *meshing* ke bentuk idealnya, dengan rentang nilai dari 0 hingga 1. Semakin mendekati nilai 1 maka bentuk geometri *meshing* semakin terdistorsi. Tabel 3.5 menunjukkan nilai dari *mesh metric* pada simulasi *Split Hopkinson Pressure Bar* ini.

**Tabel 3.5** *Mesh metric* pada simulasi *Split Hopkinson Pressure Bar*

<i>Mesh Metric</i>	Nilai
<i>Aspect Ratio</i>	1,841
<i>Skewness</i>	0,1712

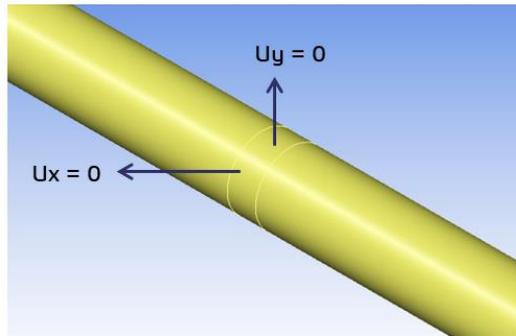
Konvergensi dalam penelitian ini guna memperoleh *meshing* dengan jenis dan jumlah elemen yang tepat sesuai dengan keakuratan data sehingga penerapan *meshing* pada geometri dapat efisien. Variasi *meshing* yang dilakukan pada penelitian ini terletak pada lapisan *adhesive* dengan jumlah elemen lapisan *adhesive* yang bervariasi mulai dari 4 elemen hingga 40.500 elemen. Gambar 3.17 merupakan grafik dari konvergensi yang telah dilakukan pada simulasi ini. Berdasarkan hasil yang telah didapatkan maka *meshing* dalam penelitian ini dapat diketahui mengalami *convergent* pada elemen 18.000 hingga 40.500 yang ditandai dengan garis yang stabil tanpa mengalami kenaikan ataupun penurunan yang signifikan. Maka dari itu, elemen yang digunakan pada lapisan *adhesive* yakni sebesar 18.000 elemen.



**Gambar 3.17** Grafik konvergensi

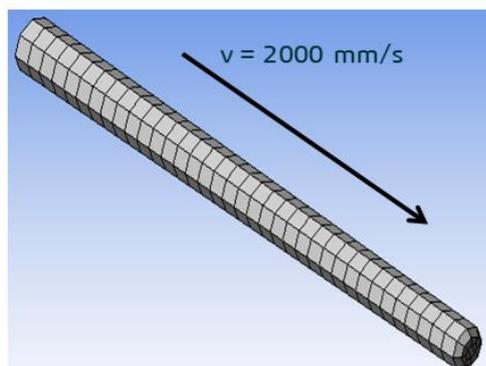
### 3.7 Boundary Condition and Loading

*Boundary conditions* pada simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar* diterapkan dengan memberikan *roller* pada *input bar* dan *output bar* sesuai dengan kondisi pada eksperimen yang telah dilakukan. Pada *input bar* terdapat 4 *roller* dan *output bar* terdapat 2 *roller*. Jarak tiap *roller* pada masing-masing *bar* sebesar 600 mm. Dengan adanya *roller* ini, maka *bar* hanya bergerak searah dengan sumbu aksial *pressure bar*. Selanjutnya, *roller* pada masing-masing *bar* dilakukan pengaturan *body operation* dengan *imprint faces* dan *roller* untuk kemudian dilakukan *suppress*. Fitur *displacement* diterapkan pada *imprint faces* dengan memasukkan nilai  $U_x=0$ ;  $U_y=0$ ; dan  $U_z=free$ .



**Gambar 3.18** Pengaturan *boundary condition* pada simulasi *Split Hopkinson Pressure Bar*

*Loading* yang diterapkan pada simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar* di Ansys 2019 berupa *initial velocity* dari *striker bar* yang menumbuk *input bar* dengan *initial velocity* sebesar 2000 mm/s atau 2 m/s. *Initial velocity* yang diterapkan bergerak dalam arah sumbu x dengan mengatur nilai dari *initial velocity* pada sumbu y dan sumbu z sebesar 0 mm/s. *Initial velocity* yang diterapkan hanya digunakan dalam *scope* geometri *body of striker bar*. Gambar 3.19 merupakan gambar dari pengaturan *initial velocity* dari *striker bar* pada simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar*.



**Gambar 3.19** Pengaturan *loading* berupa *initial velocity* pada *striker bar*

### 3.8 Analysis Time

*Analysis time* pada simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar* diatur dalam pengaturan pada *software* Ansys 2019 bagian *analysis setting*. *End time* yang digunakan untuk simulasi dalam penelitian ini diatur dengan rentang waktu yaitu  $1,72 \times 10^{-3}$  s. *Split Hopkinson Pressure Bar* memiliki batas frekuensi minimal yang harus dipenuhi agar data yang diperoleh dari eksperimen yang dilakukan oleh alat uji ini dapat dinyatakan valid. Sistem akuisisi dan perekaman data harus memiliki respons frekuensi minimal 100 kHz untuk

merekam detail yang cukup dari eksperimen *Split Hopkinson Pressure Bar*. (Chen & Song, 2011).

Dengan adanya batas minimal tersebut, maka *analysis time* yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan perhitungan frekuensi untuk memastikan kevalidan data yang diambil dalam penelitian ini. Berikut perhitungan frekuensi dalam simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar*.

$$f = \frac{n}{T}$$

$$f = \frac{500}{0,00172}$$

$$f = 290697 \text{ Hz}$$

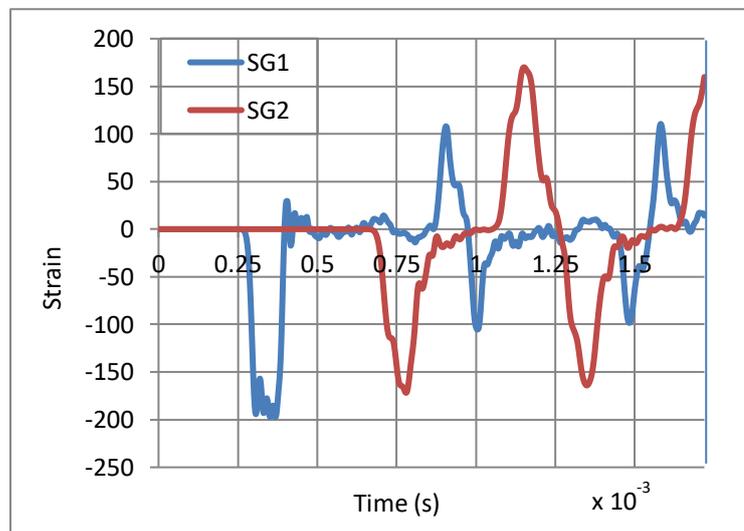
$$f = 290,67 \text{ kHz}$$

Berdasarkan hasil dari perhitungan dapat diketahui bahwa frekuensi dalam simulasi uji penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar* sebesar 290,67 kHz. Nilai dari frekuensi ini telah melebihi batas minimal dari frekuensi yang telah ditetapkan pada eksperimen dengan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* yakni sebesar 100 kHz. Maka dari itu, data yang diperoleh dari hasil simulasi pada penelitian ini dapat dilakukan penelitian lebih lanjut karena telah melebihi batas minimum yang telah ditetapkan sebelumnya.

### 3.9 Hasil

#### 3.9.1 Grafik Regangan Hasil Pengujian

Hasil dari pengujian simulasi *Split Hopkinson Pressure Bar* pada *software* Ansys dihasilkan kurva regangan terhadap waktu pada *input bar* dan *output bar*. Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi dengan melakukan pembebanan pada *pressure bar* dengan spesimen beserta *adhesive*. Gambar 3.20 merupakan gambar dari grafik hasil simulasi.

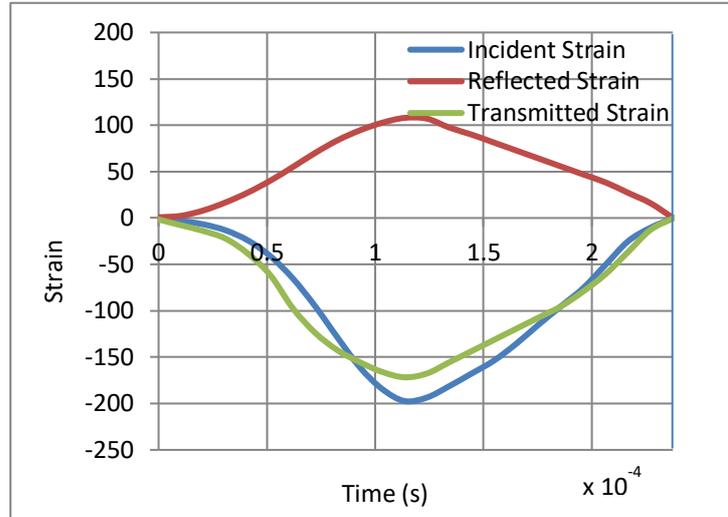


**Gambar 3.20** Grafik regangan terhadap waktu

Pada gambar 3.20 merupakan grafik regangan terhadap waktu yang diperoleh dari hasil simulasi dengan pembebanan pada *pressure bar* dengan *adherend* dan *adhesive*. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa besar *incident strain* maksimum sebesar -197,33 microstrain, *reflected strain* maksimum sebesar 107,91 microstrain, dan *transmitted strain* maksimum sebesar -171,71 microstrain.

Kurva regangan terhadap waktu yang diperoleh dilakukan *trim* untuk memperoleh kurva *incident strain*, *reflected strain*, dan *transmitted strain* yang semula pada rentang waktu berbeda menjadi satu rentang waktu yang sama. Kurva ini digunakan sebagai data

pembentukan grafik P1 & P2 dan kurva tegangan-regangan. Pada Gambar 3.21 merupakan hasil dari *trim* pada grafik regangan terhadap waktu.



**Gambar 3.21** Grafik hasil *trim* pada *incident strain*, *reflected strain*, dan *transmitted strain*

### 3.9.2 Grafik *Compressive Force*

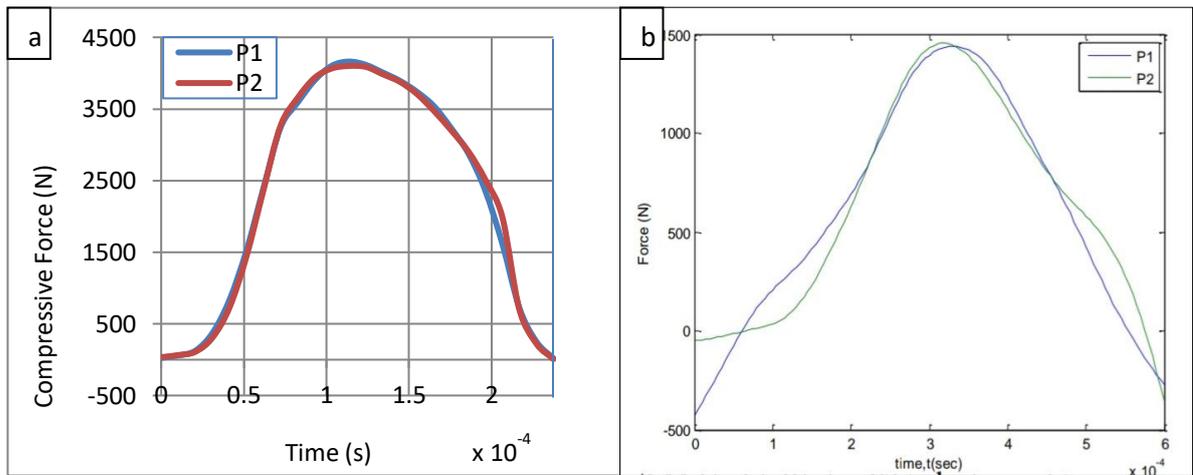
Persamaan yang digunakan dalam mengolah data regangan untuk mengetahui *compressive force* yaitu sebagai berikut :

$$P1 = A_b E \{ \varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) \}$$

$$P2 = A_b E \varepsilon_T(t)$$

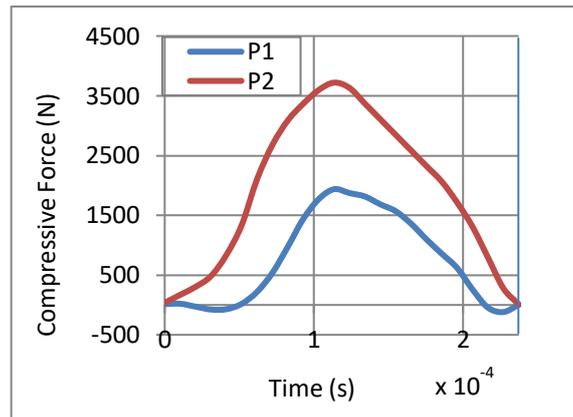
Dimana  $A_b$  merupakan luas permukaan bar,  $E$  merupakan modulus Young bar, dan  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_R$ , dan  $\varepsilon_T$  merupakan *incident strain*, *reflected strain*, dan *transmitted strain* secara berurutan.

Grafik *compressive force* pada saat kalibrasi yaitu diperoleh dengan melakukan simulasi hanya menggunakan *striker bar*, *input bar*, dan *output bar* (tanpa spesimen uji). Data berupa regangan yang direkam pada *strain gage* di *input bar* dan *output bar* diolah dan dihasilkan grafik *compressive force* pada Gambar 3.22. Kurva yang berhimpit dalam hal ini mengindikasikan *dynamic stress equilibrium* yang sempurna. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil kurva *compressive force* ketika kalibrasi dari hasil simulasi dan eksperimen. Berdasarkan Gambar 3.22 (a) dan (b) menunjukkan bahwasanya kurva dari P1 dan P2 pada simulasi dan eksperimen terlihat kurva melengkung yang sama.



**Gambar 3.22** Grafik *compressive force* ketika kalibrasi (a) simulasi; (b) eksperimen

Kemudian, untuk grafik *compressive force* pada kedua sisi spesimen uji dengan menggunakan persamaan yang telah dijelaskan sebelumnya dan data regangan dapat diketahui dengan melihat kurva yang telah dilakukan *trim* seperti pada Gambar 3.21 maka diperoleh grafik pada Gambar 3.23. Berdasarkan Gambar 3.23 dapat diketahui bahwa terjadi perbedaan nilai dari P1 dan P2. Perbedaan nilai dalam grafik tersebut dikarenakan pengaruh dari *properties material* pada spesimen uji yang digunakan dalam simulasi dan merepresentasikan bahwasanya spesimen uji dalam keadaan dinamis. Hal ini serta mengindikasikan bahwa terjadi *dynamic stress equilibrium* pada kedua sisi spesimen.



**Gambar 3.23** Grafik *compressive force* terhadap waktu yang mengindikasikan *dynamic stress equilibrium* pada kedua sisi spesimen pada pembebanan dengan *adherend* dan *adhesive*

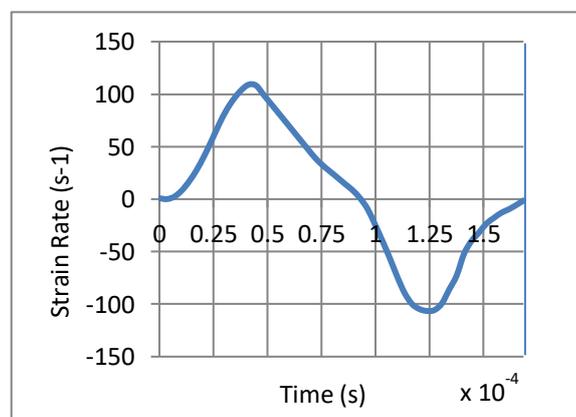
### 3.9.3 Grafik Laju Regangan

Dari data yang didapatkan, dilakukan perhitungan laju regangan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{\epsilon}_n = 2 \frac{C_0}{L_S} \epsilon_R (t)$$

Dalam pengukuran *Split Hopkinson Pressure Bar* yang ideal, laju regangan harus konstan selama pembebanan. Maka dari itu, perlu dilakukan perhitungan untuk memastikan proses pengukuran dilakukan pada laju regangan identik agar hasil pengolahan data tersebut dilakukan penelitian lebih lanjut. Pada Gambar 3.24 menunjukkan bahwa laju regangan mula-mula naik. Hal ini menunjukkan bahwa adanya pembebanan berupa kompresi pada *adherend* dan *adhesive* karena adanya penumbukan oleh *striker bar*.

Selanjutnya, laju regangan mengalami penurunan hingga mengalami ekspansi yang ditunjukkan dengan nilai laju regangan yang negatif. Akan tetapi, simulasi ini dilakukan dengan meninjau pembebanan dinamis yang hanya berupa kompresi sehingga yang ditinjau dari kurva laju regangan tersebut adalah laju regangan yang mempunyai nilai positif.



**Gambar 3.24** Grafik laju regangan terhadap waktu hasil dari perhitungan

### 3.9.4 Grafik Tegangan-Regangan

Pada proses ini data hasil *trim* dibentuk menjadi grafik tegangan-regangan melalui persamaan dengan perhitungan besar tegangan ( $\sigma_n$ ) didapatkan dengan persamaan berikut :

$$\sigma_n = E_b \frac{Ab}{As} \varepsilon_T (t)$$

Pada simulasi ini, modulus Young bar ( $E_b$ ) merupakan modulus Young dari material Aluminum 6061-T6 yaitu 69 GPa dan luas permukaan bar ( $Ab$ ) sama dengan luas permukaan spesimen ( $As$ ) yaitu 0,000314 m<sup>2</sup>. Untuk besar regangan *transmitted* dapat diketahui dengan melihat kurva yang telah dilakukan *trim* seperti pada Gambar 3.21.

Untuk perhitungan nilai regangan ( $\varepsilon_n$ ) dapat dilakukan dengan persamaan berikut :

$$\varepsilon_n = 2 \frac{C_0}{L_s} \int \varepsilon_R (t) dt$$

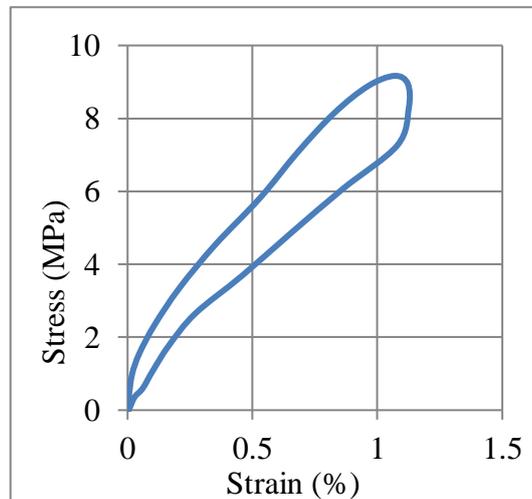
Pada penelitian ini, kecepatan rambat gelombang ( $C_0$ ) dapat diketahui melalui perhitungan yaitu sebagai berikut :

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{69000000000}{2703}}$$

$$C_0 = 5052,444 \text{ m/s}$$

$L_s$  merupakan ketebalan *adhesive* dimana pada penelitian ini ketebalan *adhesive* dijaga secara konstan sebesar 1 mm. Untuk besar regangan *reflected* dapat diketahui dengan melihat kurva yang telah dilakukan *trim* seperti pada Gambar 3.21. Dengan memasukkan persamaan diatas, didapatkan grafik dari nilai tegangan dan regangan dari hasil perhitungan yaitu seperti pada Gambar 3.25 berikut.



**Gambar 3.25** *Stress-strain curve* pada respons kombinasi *adherend* dan *adhesive*

Pada Gambar 3.25 dapat diketahui bahwa terbentuk kurva *close loop* ketika fase *loading* dan *unloading*. Area didalam kurva tersebut merupakan *energy absorption* yang dapat diketahui nilainya dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut.

$$Energy\ Absorption = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i + y_{i+1})}{2} (x_{i+1} - x_i)$$

Dimana :

y = nilai dari *stress*

x = nilai dari *strain*

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

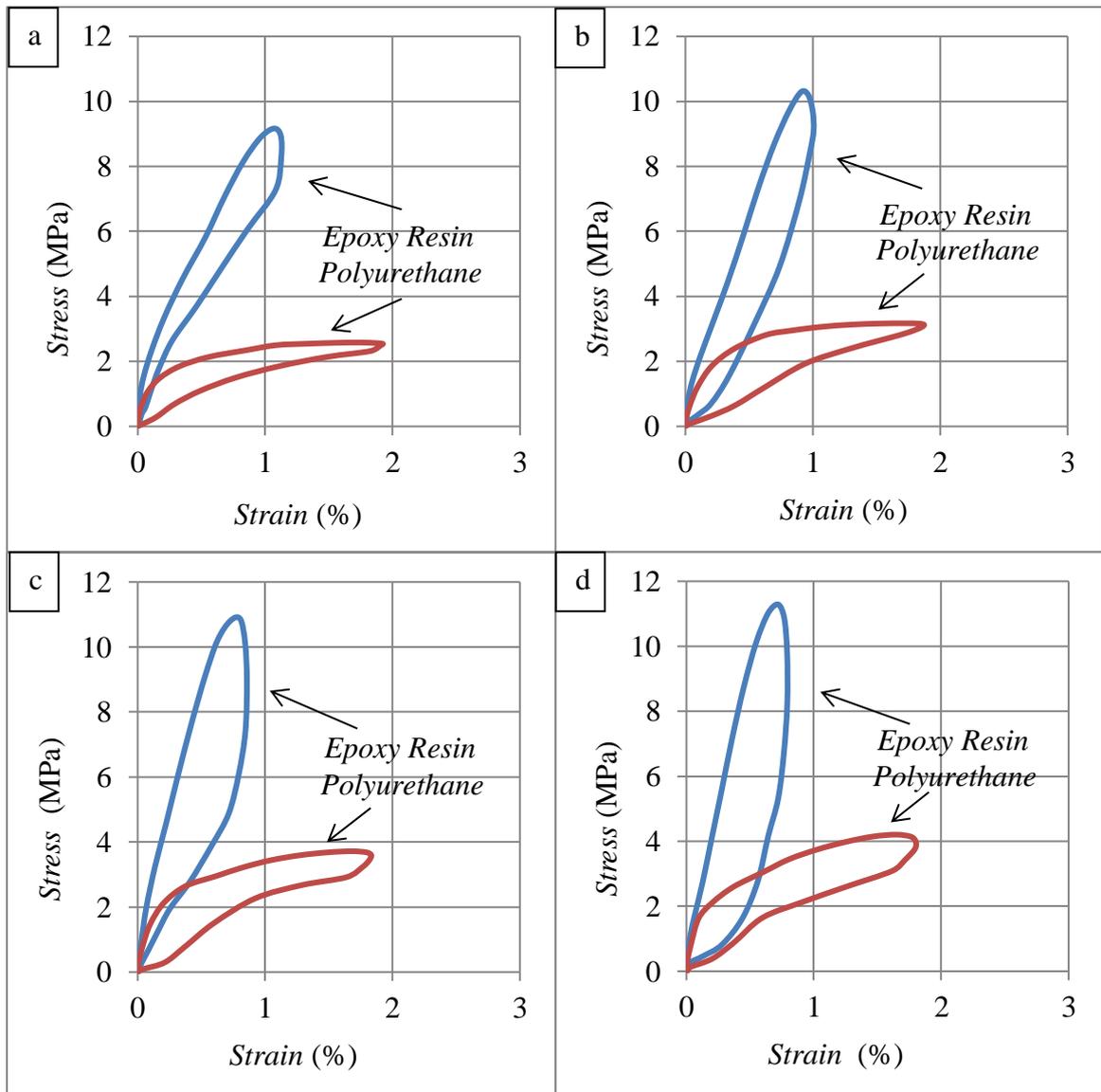
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *properties adhesive* dan panjang *overlap* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive* serta mendapatkan distribusi tegangan pada lapisan *adhesive*. Penelitian dilakukan dengan dua variasi *adhesive*, yakni *epoxy resin* dan *polyurethane*, serta variasi panjang *overlap* sebesar 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm dengan menggunakan uji SHPB. Hasil dan analisis untuk variasi *properties adhesive* dan panjang *overlap* pada *single lap joint* terhadap *stress-strain curve* beserta distribusi tegangan pada lapisan *adhesive* dibahas pada sub-bab tersendiri. Begitu pula dengan pengaruh *properties adhesive* dan panjang *overlap* terhadap sifat mekanik sambungan *adhesive*. Urutan pembahasan yang dilakukan adalah analisis *stress-strain curve* untuk setiap variasi *properties adhesive* dan panjang *overlap* kemudian menganalisis sifat mekanik pada sambungan *adhesive*, yakni *strength*, *elongation*, *rigidity*, dan *energy absorption*. Selanjutnya, melakukan analisis terhadap distribusi tegangan yang terjadi pada lapisan *adhesive* dengan variasi *properties adhesive* beserta panjang *overlap* ketika sambungan *adhesive* dibebani *impact*.

### 4.1 Stress-Strain Curve

Pengujian SHPB pada sambungan *adhesive* tipe *single lap* dilakukan dengan menggunakan dua variasi *adhesive*, yakni *epoxy resin* dan *polyurethane*. Beserta, empat variasi panjang *overlap*, yaitu 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm. Melalui pengujian tersebut, didapatkan hasil berupa *stress-strain curve*. *Stress-strain curve* pada *single lap joint* diperoleh melalui perhitungan. Pada Gambar 4.1 menunjukkan hasil dari *stress-strain curve* dengan (a) panjang *overlap* 10 mm, (b) panjang *overlap* 15 mm, (c) panjang *overlap* 20 mm, dan (d) panjang *overlap* 25 mm.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.1 terdapat perbedaan kurva pada setiap variasi *properties adhesive* dengan panjang *overlap* yang berbeda pula. Sumbu vertikal pada *stress-strain curve* menunjukkan tegangan (*stress*) dan sumbu horizontal menunjukkan regangan (*strain*) yang terjadi pada sambungan *adhesive* ketika dibebani *impact*. Pada Gambar 4.1 terdapat dua indikator warna untuk membedakan variasi *adhesive* yang digunakan pada pengujian. Indikator warna biru menunjukkan *epoxy resin* dan warna merah menunjukkan *polyurethane*.

Secara umum kurva mula-mula naik hingga mencapai tegangan maksimum. Hal ini menunjukkan terjadinya pembebanan berupa kompresi (*loading*) pada sambungan *adhesive*. Kemudian, tegangan menurun dimana menunjukkan terjadinya ekspansi (*unloading*) hingga nilai dari tegangan kembali pada nilai 0 MPa. *Stress-strain curve* yang diperoleh tidak mencapai *yield point* dari *single lap joint* sehingga sambungan *adhesive* ini hanya mengalami deformasi elastis akibat pembebanan yang dilakukan pada pengujian. Kurva dari *loading* dan *unloading* pada sambungan *adhesive* membentuk kurva berupa *close loop*. Hal ini dikarenakan model material viskoelastis pada *adhesive* yang digunakan untuk *single lap joint* pada pengujian ini. *Close loop* dalam *stress-strain curve* pada Gambar 4.1 menunjukkan besar serapan energi yang terjadi pada sambungan *adhesive* ketika sambungan tersebut mengalami pembebanan berupa *impact*. Dengan menggunakan *properties adhesive* dan panjang *overlap* yang berbeda-beda pada sambungan *adhesive*, mengakibatkan bentuk kurva *close loop* yang diperoleh pada *stress-strain curve* berbeda pula.



**Gambar 4.1** Stress-strain curve (a) panjang overlap 10 mm, (b) panjang overlap 15 mm, (c) panjang overlap 20 mm, dan (d) panjang overlap 25 mm

Analisis *stress-strain curve* pada variasi *epoxy resin* dan *polyurethane* di setiap variasi panjang *overlap* yakni 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm dilakukan analisis perbandingan. Hal ini guna mengetahui pengaruh dari *properties adhesive* beserta panjang *overlap* yang digunakan dalam sambungan *adhesive* tipe *single lap joint*. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.1 dapat diketahui beberapa hal yaitu sebagai berikut.

Pertama, pengaruh *properties adhesive* dari *prony series* yang diterapkan pada *epoxy resin* dan *polyurethane* memberikan efek yang berbeda pada kedua jenis *adhesive* ketika diberikan pembebanan berupa *impact*. *Prony series* dengan memasukkan *properties* dari *shear modulus* dan *relaxation times* menyatakan respons material *viscoelastic* terhadap tegangan yang terjadi pada material tersebut. Dalam hal ini, *prony series* dari *epoxy resin* menunjukkan bahwasanya material *adhesive* ini lebih sulit untuk terdeformasi daripada *polyurethane*. Sehingga, sambungan *adhesive* dengan menggunakan *epoxy resin* menjadi lebih kaku daripada sambungan *adhesive* dengan menggunakan *polyurethane*. Hal yang ditimbulkan memberikan pengaruh terhadap nilai dari *stress* dan *strain*. Berdasarkan Gambar 4.1 sambungan *adhesive* dengan *epoxy resin* mempunyai nilai *stress* yang lebih tinggi

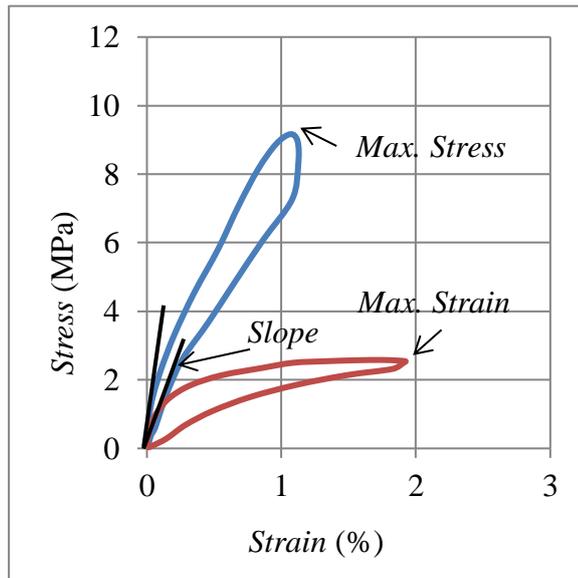
daripada sambungan *adhesive* dengan *polyurethane*. Akan tetapi, sambungan *adhesive* dengan *polyurethane* mempunyai *strain* yang lebih tinggi daripada sambungan *adhesive* dengan *epoxy resin*. Dengan begitu, semakin sulit material untuk terdeformasi maka nilai *stress* yang didapatkan juga semakin tinggi dengan nilai *strain* yang rendah. Semakin mudah material untuk terdeformasi maka nilai *stress* yang didapatkan juga semakin rendah dengan nilai *strain* yang tinggi.

Kedua, pengaruh *properties adhesive* dalam *thick single lap joint* memiliki efek yang signifikan. Pengaruh ini dikarenakan nilai dari *Young's Modulus* kedua *adhesive* yang berbeda. Pada *epoxy resin* memiliki nilai *Young's Modulus* sebesar 700 MPa dan *polyurethane* memiliki nilai *Young's Modulus* sebesar 50 MPa. Perbedaan nilai *Young's Modulus* dari *epoxy resin* yang lebih tinggi daripada *polyurethane* berpengaruh terhadap nilai *stress* yang diperoleh dalam sambungan *adhesive*. *Epoxy resin* memiliki nilai *stress* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *polyurethane*. Akan tetapi, *strain* pada sambungan *adhesive* dengan *polyurethane* memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan sambungan *adhesive* menggunakan *epoxy resin*. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai *Young's Modulus* pada *adhesive* yang digunakan di sambungan maka *stress* yang didapatkan juga semakin tinggi dengan nilai *strain* yang rendah, begitu juga sebaliknya. Semakin rendah nilai *Young's Modulus* pada *adhesive* maka nilai *stress* yang didapatkan semakin rendah pula dengan nilai *strain* yang tinggi.

Ketiga, pengaruh dari penggunaan *overlap length* yang bervariasi sebesar 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm pada *single lap joint*. Pengaruh panjang *overlap* ini mengakibatkan terjadinya perubahan nilai pada *stress* dan *strain* yang diperoleh di sambungan *adhesive*. Berdasarkan Gambar 4.1 dapat dijelaskan bahwasanya nilai *stress* pada jenis *adhesive epoxy resin* dan *polyurethane* mengalami peningkatan nilai seiring dengan bertambahnya *overlap length* yang digunakan pada sambungan *adhesive*. Namun, penambahan panjang *overlap* dalam nilai *strain* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya *overlap length* yang digunakan pada sambungan *adhesive*. Oleh karena itu, dapat diketahui bahwa semakin panjang *overlap* yang digunakan pada *single lap joint* maka nilai tegangan semakin meningkat dan nilai regangan semakin menurun.

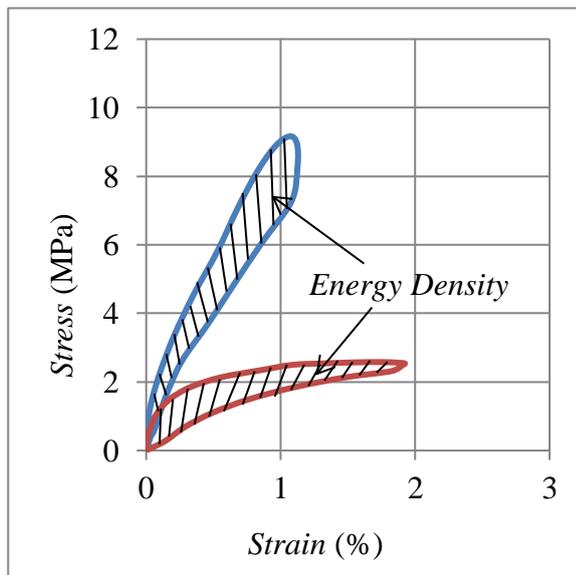
Keempat, *pattern* dari kedua jenis *adhesive* yakni *epoxy resin* dan *polyurethane* memiliki pola yang sama di setiap variasi panjang *overlap*. Pada Gambar 4.1 dapat diketahui pola dari masing-masing jenis *adhesive* dengan perubahan nilai *stress* dan *strain* yang sama akibat dari penggunaan *overlap length* yang bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa secara general pada *stress-strain curve* terjadi perubahan berpola dan signifikan untuk nilai *stress* dan *strain* pada *single lap joint* ketika mengalami pembebanan berupa *impact*.

Pada Gambar 4.2 terdapat *stress-strain curve* dengan *slope* yang ditunjukkan dengan garis berwarna hitam yang dimulai dari titik nol pada grafik dan indikator *maximum stress* beserta *maximum strain*. Dalam hal ini, dilakukan estimasi nilai dari *slope* guna mengetahui nilai dari Modulus Young pada setiap variasi jenis *adhesive* dengan panjang *overlap* yang berbeda-beda. *Stress-strain curve* pada Gambar 4.2 merupakan grafik dari variasi panjang *overlap* 10 mm. Penggunaan *slope* juga dilakukan pada *stress-strain curve* dari *epoxy resin* dan *polyurethane* dengan variasi panjang *overlap* yang berbeda-beda pula. Hal ini dilakukan guna mewakili penjelasan *slope* untuk *stress-strain curve* variasi yang lain. Parameter *maximum stress*, *maximum strain*, dan Modulus Young dilakukan analisis lebih lanjut pada subbab sifat mekanik sambungan *adhesive*.



**Gambar 4.2** Maximum stress, maximum strain, dan slope pada stress-strain curve

Pada Gambar 4.3 menunjukkan *stress-strain curve* pada *epoxy resin* dan *polyurethane* dengan variasi panjang *overlap* 10 mm. Kurva berupa *close loop* pada *stress-strain curve* tersebut menunjukkan besar *energy density* yang terjadi pada sambungan *adhesive* ketika fase *loading* dan *unloading*. Bagian yang diarsir dengan garis-garis berwarna hitam pada kurva dari *epoxy resin* dan *polyurethane* dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan luas area *trapezoidal* sehingga diketahui nilai dari besarnya *energy density*. Pengarsiran seperti ini juga dilakukan untuk tiap variasi jenis *adhesive* dengan panjang *overlap* yang berbeda-beda pula. Parameter dari *energy density* dilakukan analisis lebih lanjut pada subbab sifat mekanik sambungan *adhesive*.



**Gambar 4.3** Energy density pada stress-strain curve

## 4.2 Sifat Mekanik Sambungan *Adhesive*

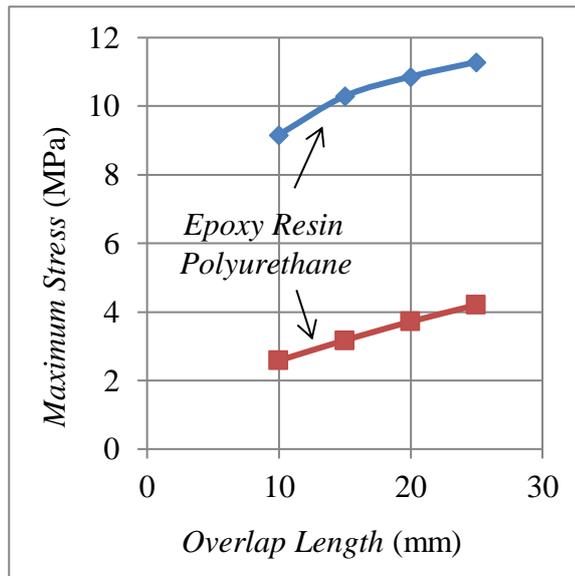
### 4.2.1 *Strength*

Kekuatan pada sambungan *adhesive* dapat diketahui dengan melakukan analisis tegangan maksimum pada grafik di Gambar 4.4. Kurva pada grafik tersebut terdapat dua indikator warna untuk membedakan dua jenis *adhesive* yang digunakan pada pengujian. Warna biru menunjukkan *epoxy resin* dan warna merah menunjukkan *polyurethane*. Tegangan maksimum pada *stress-strain curve* dari masing-masing jenis *adhesive* dengan variasi *overlap length* yang berbeda diletakkan dalam satu grafik untuk dianalisis lebih lanjut.

Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin panjang *overlap* yang digunakan maka tegangan maksimum yang didapatkan juga semakin meningkat. Dengan begitu, *strength* pada sambungan *adhesive* juga mengalami peningkatan. Peningkatan tegangan maksimum pada *epoxy resin* dengan variasi panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm secara berurutan sebesar 9,16 MPa, 10,29 MPa, 10,86 MPa, dan 11,28 MPa. Dan untuk *polyurethane*, peningkatan tegangan maksimum pada variasi panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm secara berurutan sebesar 2,58 MPa, 3,17 MPa, 3,71 MPa, dan 4,20 MPa.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan nilai *stress* dari sambungan *adhesive* yang menggunakan *epoxy resin* dan *polyurethane* memiliki perbedaan yang signifikan. Sambungan *adhesive* dengan menggunakan *epoxy resin* memiliki nilai *stress* yang lebih tinggi disetiap variasi *overlap length* daripada *polyurethane*. Hal ini dikarenakan nilai dari *prony series* dan *Young's Modulus*. *Prony series* dengan memasukkan nilai *shear modulus* dan *relaxation times* menyatakan respons material *viscoelastic* terhadap tegangan yang terjadi pada material tersebut. Dalam hal ini pada *epoxy resin* mengindikasikan bahwasanya material viskoelastik *adhesive epoxy resin* lebih sulit terdeformasi daripada *polyurethane*. Dan, *epoxy resin* juga memiliki nilai *Young's Modulus* lebih besar yakni 700 MPa daripada *polyurethane* sebesar 50 MPa. Dengan begitu, dapat diketahui bahwa *behaviour* dari *viscoelastic* dengan menggunakan *properties prony series* dan besar nilai *Young's Modulus* berpengaruh terhadap besarnya nilai *stress* pada sambungan *adhesive*.

Kenaikan nilai *stress* pada *epoxy resin* mengalami kenaikan yang linier di awal variasi panjang *overlap* yakni 10 mm, 15 mm, dan 20 mm. Pada variasi panjang *overlap* dari 20 mm ke 25 mm dapat diketahui bahwasanya kurva melandai dan hal ini menunjukkan tidak terjadinya perubahan nilai *stress* yang signifikan. *Overlap length* 25 mm menunjukkan terjadinya asimtot pada kurva *stress* dari *epoxy resin*. Untuk sambungan *adhesive* dengan menggunakan jenis *adhesive polyurethane*, kurva dari nilai *stress* mengalami kenaikan yang linier disetiap variasi panjang *overlap*, yakni 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm. Maka dari itu, berdasarkan kedua kurva tersebut menunjukkan pengaruh pertambahan panjang dari lapisan *adhesive* dapat meningkatkan nilai *stress* pada sambungan *adhesive* dengan jenis *adhesive* yang berbeda.



**Gambar 4.4** Grafik *maximum stress* terhadap *overlap length* pada *epoxy resin* dan *polyurethane*

#### 4.2.2 Elasticity

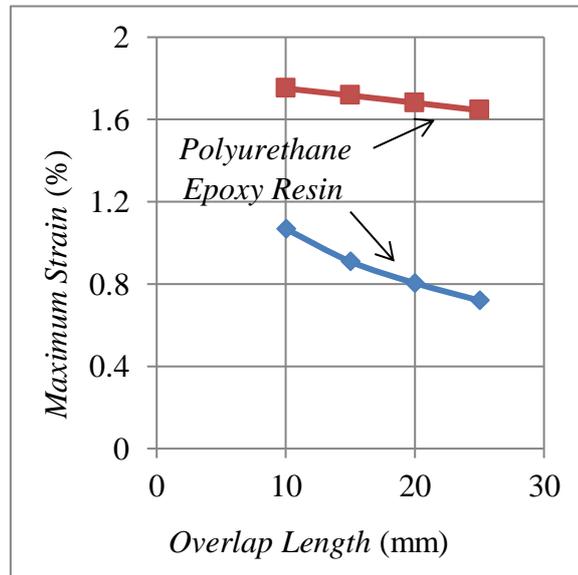
Fleksibilitas pada sambungan *adhesive* dapat diketahui dengan melakukan analisis grafik pada Gambar 4.5. Nilai regangan maksimum dari *epoxy resin* dan *polyurethane* disetiap variasi panjang *overlap* diletakkan dalam satu grafik untuk mengetahui pengaruh dari setiap penambahan panjang *overlap*. Kurva pada grafik tersebut terdapat dua indikator warna untuk membedakan dua jenis *adhesive* yang digunakan pada pengujian. Warna biru menunjukkan *epoxy resin* dan warna merah menunjukkan *polyurethane*.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.5 tersebut nilai regangan yang didapatkan dari hasil pengujian dari setiap variasi panjang *overlap* mengalami penurunan. Hal ini juga menunjukkan bahwasanya semakin bertambahnya panjang *overlap* yang digunakan pada sambungan *adhesive* maka *elasticity* yang terjadi semakin menurun dan kemampuan fleksibilitas sambungan juga semakin berkurang. Penurunan dari nilai regangan maksimum pada *epoxy resin* dengan variasi panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm secara berurutan sebesar 1,06 %, 0,90 %, 0,80 %, dan 0,71 %. Dan untuk *polyurethane*, penurunan nilai regangan maksimum pada variasi panjang *overlap* sebesar 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm secara berurutan adalah 1,75 %, 1,71 %, 1,68 %, dan 1,64 %.

Pada Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa terjadi perbedaan nilai *strain* beserta penurunan nilai *strain* untuk variasi *adhesive* disetiap *overlap length*. Berdasarkan grafik tersebut dapat dianalisis bahwasanya sambungan *adhesive* dengan menggunakan *polyurethane* memiliki nilai *strain* yang lebih tinggi daripada sambungan *adhesive* dengan *epoxy resin*. Hal ini dikarenakan *properties adhesive* dari *prony series* dan *Young's Modulus* yang diterapkan pada material *adhesive*. *Prony series* dengan memasukkan nilai *shear modulus* dan *relaxation times* menyatakan respons material *viscoelastic* terhadap tegangan yang terjadi pada material tersebut. Dalam hal ini, pada *polyurethane* mengindikasikan bahwasanya material viskoelastik *adhesive polyurethane* lebih mudah terdeformasi daripada *epoxy resin*. Dan, *polyurethane* memiliki nilai *Young's Modulus* yang lebih rendah sebesar 50 MPa daripada *epoxy resin* sebesar 700 MPa. Oleh karena itu, nilai dari *prony series* dan *Young's Modulus* yang rendah pada jenis *adhesive* membuat sambungan *adhesive* mendapatkan nilai *strain* yang tinggi.

Dalam grafik pada Gambar 4.5, menunjukkan untuk *epoxy resin* dan *polyurethane* mengalami penurunan nilai *strain* disetiap *overlap length* yang digunakan pada sambungan

*adhesive*. Variasi *overlap length* untuk *epoxy resin* memiliki pengaruh yang signifikan dengan kurva yang menurun secara perlahan ke bawah. Hal ini berbeda dengan *polyurethane*. Kurva penurunan nilai *strain* untuk *polyurethane* menunjukkan kurva yang melandai. Dengan begitu, perubahan panjang *overlap* tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai *strain* untuk penggunaan sambungan dengan jenis *adhesive polyurethane*. Akan tetapi, secara general penambahan panjang *overlap* dapat menurunkan nilai *strain* pada masing-masing jenis *adhesive*.



**Gambar 4.5** Grafik *maximum strain* terhadap *overlap length* pada *epoxy resin* dan *polyurethane*

#### 4.2.3 Modulus Young

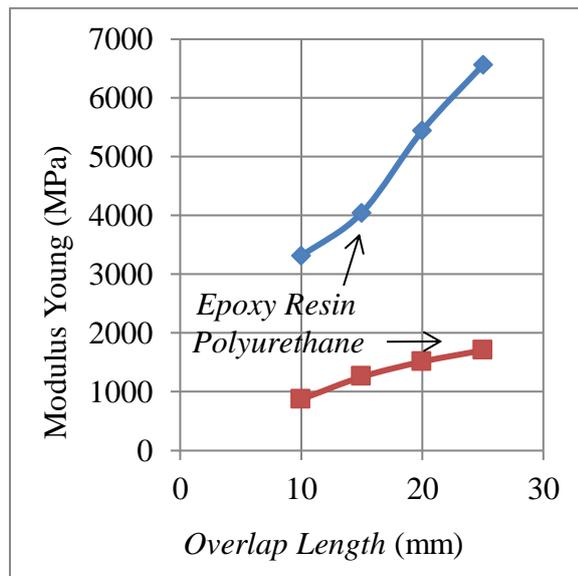
Modulus Young pada sambungan *adhesive* dapat diketahui dengan melakukan analisis terhadap grafik di Gambar 4.6. Nilai Modulus Young didapatkan melalui perhitungan dengan mengestimasi nilai *slope* pada *stress-strain curve* dari *epoxy resin* dan *polyurethane* disetiap variasi panjang *overlap*. Nilai Modulus Young dari masing-masing jenis *adhesive* diletakkan dalam satu grafik guna dianalisis lebih lanjut dengan dua indikator warna untuk membedakan jenis *adhesive*, yakni warna biru menunjukkan *epoxy resin* dan warna merah menunjukkan *polyurethane*.

Berdasarkan pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa semakin panjang *overlap* yang digunakan pada sambungan *adhesive* maka nilai dari Modulus Young juga semakin meningkat. Pada *epoxy resin* dengan variasi panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm memiliki nilai Modulus Young yang berurutan sebesar 3309,43 MPa, 4046,46 MPa, 5444,09 MPa, dan 6557,40 MPa. Dan untuk *polyurethane*, dengan *overlap length* yang digunakan pada sambungan *adhesive* sebesar 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm memiliki nilai Modulus Young yang berurutan yakni 871,74 MPa, 1254,57 MPa, 1513,11 MPa, dan 1705,32 MPa.

Pada Gambar 4.6 dapat diketahui perbedaan Modulus Young dari dua jenis *adhesive* yang berbeda disetiap variasi *overlap length*. Sambungan *adhesive* dengan menggunakan *epoxy resin* memiliki Modulus Young yang lebih tinggi daripada sambungan *adhesive* dengan *polyurethane*. Hal ini dikarenakan *properties adhesive* yakni *prony series* dan *Young's Modulus* yang berpengaruh terhadap nilai *stress* dimana juga berakibat terhadap nilai Modulus Young pada sambungan *adhesive*. Maka dari itu, *prony series* yang mengindikasikan material viskoelastik yang sulit terdeformasi dan nilai *Young's Modulus* yang tinggi pada

*adhesive* mengakibatkan nilai *stress* yang tinggi pula sedemikian hingga nilai Modulus Young yang didapatkan dari *stress-strain curve* juga tinggi.

Analisis berdasarkan grafik pada Gambar 4.6 tersebut menunjukkan bahwasanya disetiap *overlap length* kenaikan nilai *stiffness* pada *epoxy resin* memiliki nilai yang lebih tinggi daripada *polyurethane*. Kenaikan yang tinggi dapat diketahui dari kurva *epoxy resin* yang linier ke atas daripada *polyurethane* yang melandai ke atas. Hal ini berarti panjang *overlap* memiliki pengaruh peningkatan yang signifikan terhadap Modulus Young sambungan *adhesive* untuk *epoxy resin* daripada *polyurethane*. Namun, secara general penambahan panjang *overlap* mengakibatkan kedua jenis *adhesive* yang digunakan pada sambungan *adhesive* memiliki nilai Modulus Young yang semakin meningkat.



**Gambar 4.6** Grafik Modulus Young terhadap *overlap length* pada *epoxy resin* dan *polyurethane*

#### 4.2.4 Energy Density

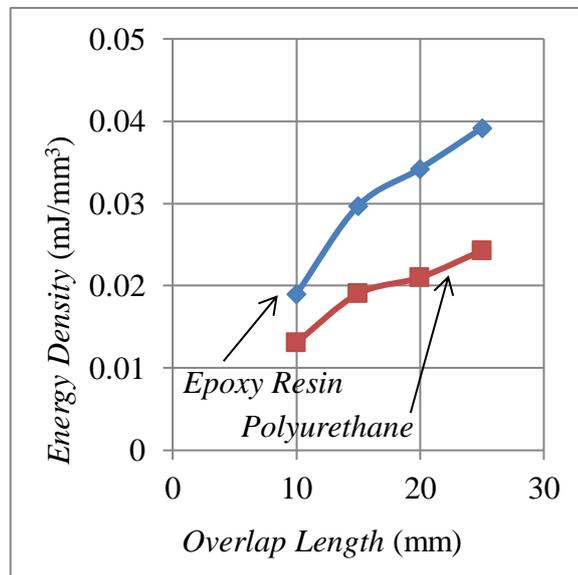
*Energy density* yang terjadi pada sambungan *adhesive* ketika pada fase *loading* dan *unloading* terbentuk kurva *close loop*. Melalui kurva ini, dapat diketahui besarnya *energy density* dengan melakukan perhitungan luas area pada kurva. Besarnya *energy density* pada setiap variasi panjang *overlap* memiliki nilai yang berbeda-beda dengan jenis *adhesive* yang berbeda juga. Nilai dari *energy density* pada setiap variasi *adhesive* dan *overlap length* diletakkan dalam satu grafik untuk dianalisis. Kurva pada grafik tersebut terdapat dua indikator warna untuk membedakan dua jenis *adhesive* yang digunakan pada pengujian. Warna biru menunjukkan *epoxy resin* dan warna merah menunjukkan *polyurethane*.

Berdasarkan Gambar 4.7 menunjukkan nilai dari *energy density* pada setiap variasi panjang *overlap*. Sesuai dengan grafik tersebut dapat diketahui bahwa *energy density* pada sambungan *adhesive* mengalami peningkatan dengan bertambahnya panjang *overlap* yang digunakan pada sambungan. Nilai dari *energy density* pada variasi *epoxy resin* dengan panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm secara berurutan sebesar 0,018 mJ/mm<sup>3</sup>, 0,029 mJ/mm<sup>3</sup>, 0,034 mJ/mm<sup>3</sup>, dan 0,039 mJ/mm<sup>3</sup>. Dan untuk *polyurethane*, nilai dari *energy density* pada variasi panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm secara berurutan yakni 0,013 mJ/mm<sup>3</sup>, 0,019 mJ/mm<sup>3</sup>, 0,021 mJ/mm<sup>3</sup>, dan 0,024 mJ/mm<sup>3</sup>.

Pada Gambar 4.7 dapat dianalisis terkait dengan *energy density* pada sambungan *adhesive* dengan variasi *overlap length* dan penggunaan dua jenis *adhesive* yang berbeda, yakni *epoxy resin* dan *polyurethane*. Nilai *energy density* dari sambungan *adhesive* dengan

menggunakan *epoxy resin* memiliki nilai yang lebih tinggi daripada sambungan *adhesive* dengan *polyurethane*. Hal ini dikarenakan nilai dari *prony series* yang mengindikasikan *epoxy resin* lebih sulit terdeformasi daripada *polyurethane* dan *Young's Modulus* pada *epoxy resin* yang lebih tinggi daripada *polyurethane* sehingga membuat *strength* yang semakin meningkat dan *energy density* yang semakin meningkat pula.

Pengaruh dari *overlap length* memiliki perubahan yang signifikan pada kedua jenis sambungan *adhesive*. Pada sambungan *adhesive* dengan *epoxy resin* mengalami peningkatan kurva yang linier pada rentang 10 mm ke 15 mm. Kurva mengalami bentuk yang melandai pada *overlap length* 15 mm ke 20 mm dan meningkat secara linier lagi pada rentang 20 mm ke 25 mm. Perubahan bentuk kurva ini juga terjadi pada sambungan *adhesive* dengan menggunakan *polyurethane*. Pada *overlap length* 10 mm ke 15 mm kurva meningkat secara linier dan melandai pada *overlap length* 15 mm ke 20 mm. Kemudian, peningkatan secara linier terjadi lagi untuk *overlap length* 20 mm ke 25 mm. Dalam hal ini, dapat diketahui bahwa secara umum dengan penambahan panjang *overlap* pada lapisan *adhesive* mengakibatkan bertambahnya nilai *energy density* pada sambungan *adhesive* tersebut.



**Gambar 4.7** Grafik *energy density* terhadap *overlap length* pada *epoxy resin* dan *polyurethane*

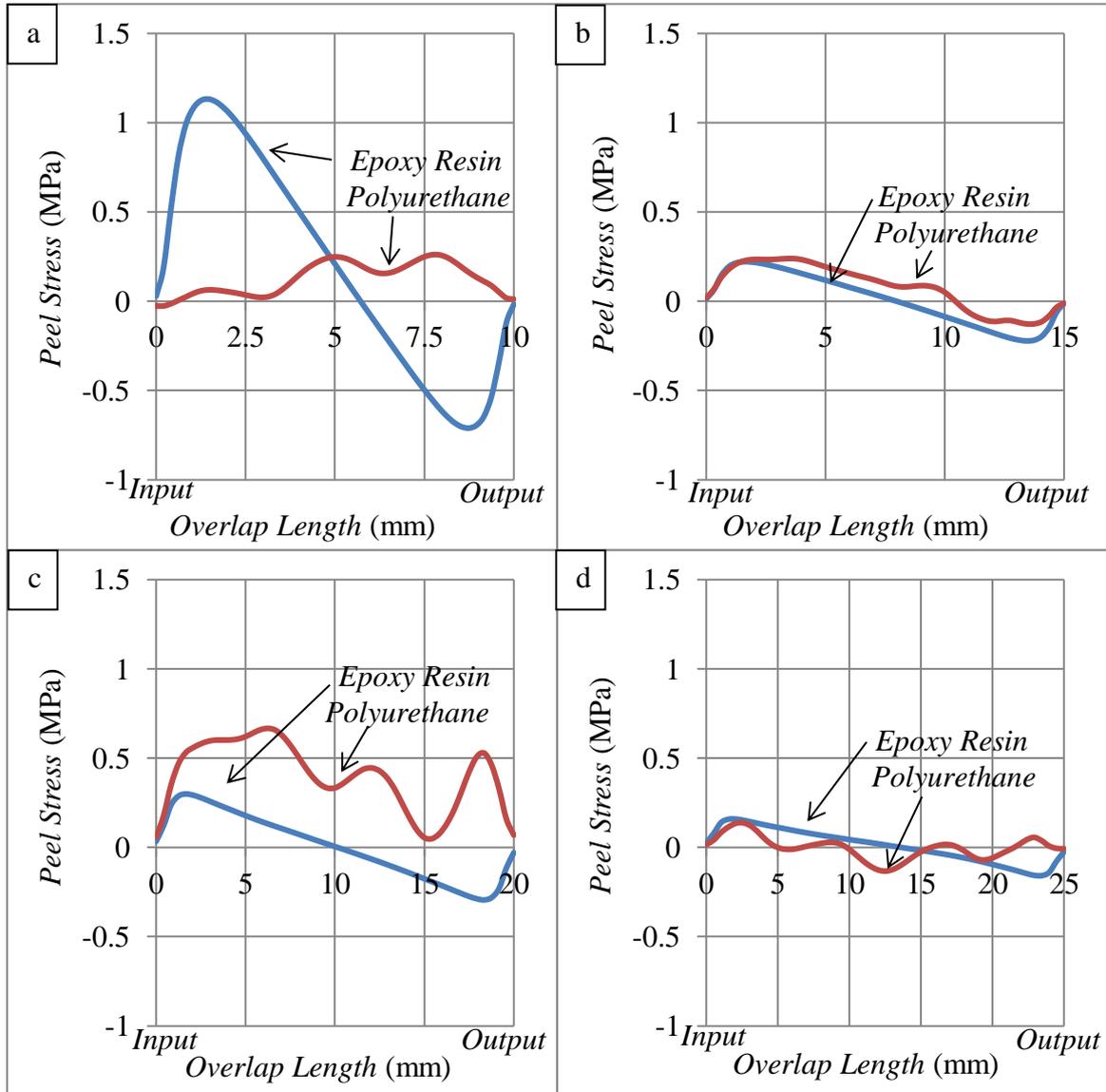
### 4.3 Distribusi Tegangan pada Lapisan *Adhesive*

Distribusi tegangan pada lapisan *adhesive* dilakukan analisis untuk mengetahui penyebaran tegangan yang terjadi pada lapisan *adhesive* ketika sambungan *adhesive* dibebani *impact* dan besar kegagalan akibat tegangan tersebut. Distribusi tegangan dianalisis ketika sambungan *adhesive* mengalami kompresi (*loading*) dan ekspansi (*unloading*). Pada *single lap joint*, tegangan yang terjadi untuk lapisan *adhesive*, yaitu *peel stress* dan *shear stress*. Batas kegagalan maksimum dari *peel stress* yang terjadi pada lapisan *adhesive* menggunakan batas nilai dari *peel strength* untuk *epoxy resin* sebesar 4,88 MPa dan *polyurethane* sebesar 6,43 MPa. Sedangkan, batas kegagalan maksimum akibat dari *shear stress* pada lapisan *adhesive* menggunakan nilai dari *shear strength* untuk *epoxy resin* sebesar 16,9 MPa dan untuk *polyurethane* sebesar 19,7 MPa.

Kurva dari *epoxy resin* dan *polyurethane* untuk setiap variasi panjang *overlap* diletakkan dalam satu grafik. Indikator warna digunakan dalam analisis ini untuk membedakan kedua jenis *adhesive*, yakni warna biru untuk *epoxy resin* dan warna merah untuk *polyurethane*. Penggunaan jenis *adhesive* yang berbeda pada sambungan *adhesive* memberikan pengaruh

yang berbeda pula terhadap distribusi tegangan dan kegagalan akibat tegangan yang terjadi pada lapisan *adhesive*. Begitu pula dengan *overlap length*.

Pada Gambar 4.8 menunjukkan grafik dari *peel stress* pada lapisan *adhesive* dengan (a) panjang *overlap* 10 mm, (b) panjang *overlap* 15 mm, (c) panjang *overlap* 20 mm, dan (d) panjang *overlap* 25 mm. Bentuk kurva pada kedua jenis *adhesive* memberikan bentuk yang berbeda. Perbedaan bentuk kurva ini juga terjadi pada setiap variasi panjang *overlap*.



**Gambar 4.8** *Peel stress* pada lapisan *adhesive* (a) panjang *overlap* 10 mm, (b) panjang *overlap* 15 mm, (c) panjang *overlap* 20 mm, dan (d) panjang *overlap* 25 mm

Berdasarkan Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa *epoxy resin* memiliki *peel stress* yang lebih tinggi daripada *polyurethane* pada variasi panjang *overlap* 10 mm dan 25 mm. Sedangkan, *polyurethane* memiliki *peel stress* yang lebih tinggi daripada *epoxy resin* pada variasi panjang *overlap* 15 mm dan 20 mm. Pada variasi panjang *overlap* 10 mm untuk *epoxy resin peel stress* maksimum terjadi di 1,45 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 1,13 MPa dan untuk *polyurethane* terjadi di 7,7 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,26 MPa. Pada variasi panjang *overlap* 15 mm untuk *epoxy resin peel stress* maksimum terjadi di 1,56 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,22 MPa dan

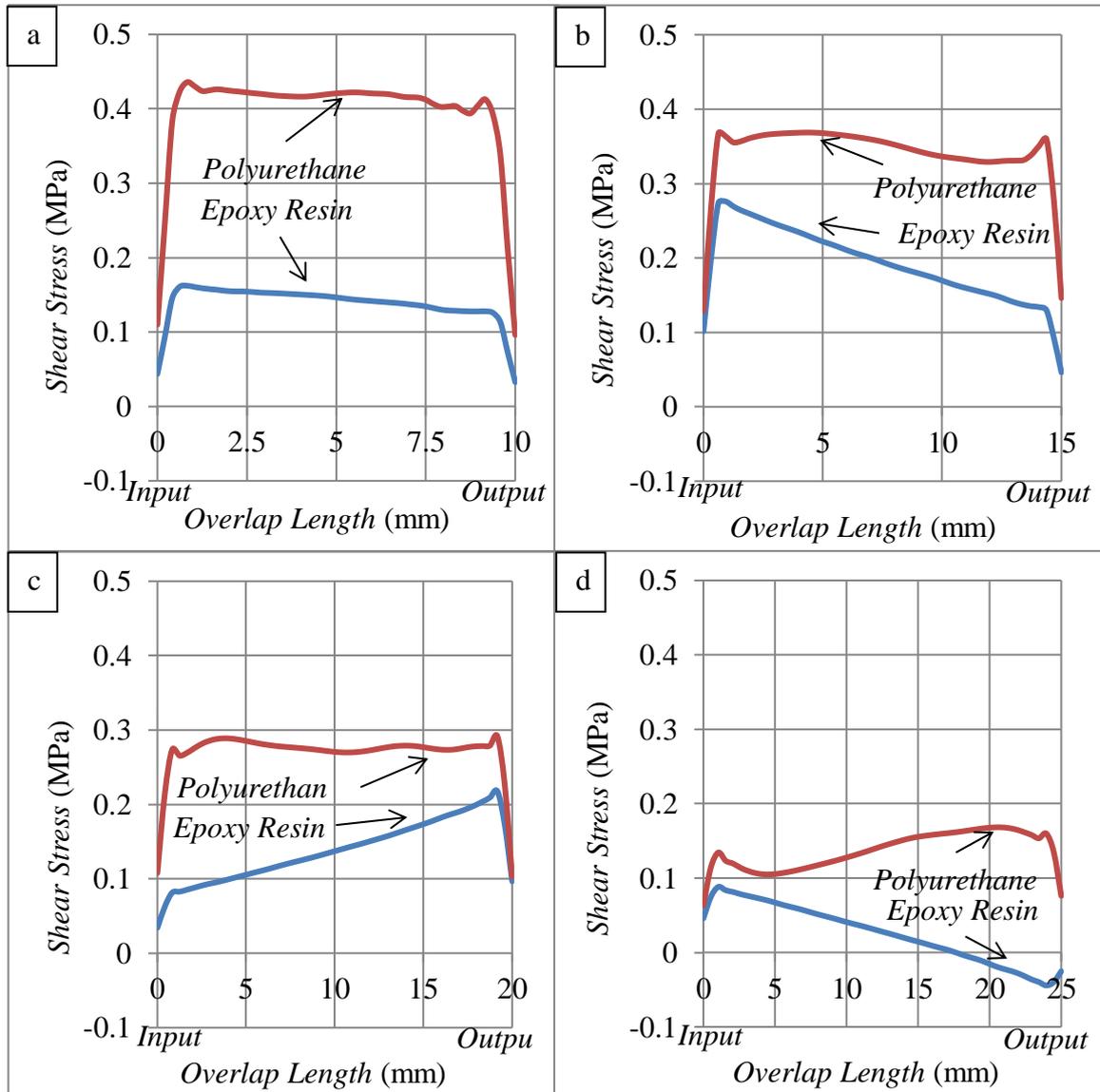
untuk *polyurethane* terjadi di 3,43 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,23 MPa. Pada variasi panjang *overlap* 20 mm untuk *epoxy resin peel stress* maksimum terjadi di 2,08 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,29 MPa dan untuk *polyurethane* terjadi di 5,83 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,60 MPa. Pada variasi panjang *overlap* 25 mm untuk *epoxy resin peel stress* maksimum terjadi di 2,08 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,15 MPa dan untuk *polyurethane* terjadi di 2,60 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,13 MPa. Kegagalan-kegagalan yang terjadi pada *epoxy resin* dan *polyurethane* yang diakibatkan dari *peel stress* menunjukkan nilai batas aman dengan nilai *peel stress* kurang dari 4,88 MPa untuk *epoxy resin* dan *polyurethane* sebesar 6,43 MPa. Grafik pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwasanya distribusi tegangan dari *peel stress* untuk *epoxy resin* dan *polyurethane* tidak terjadi secara merata. Untuk *epoxy resin*, bentuk kurva memiliki *peek stress* yang berbeda dari *input* pembebanan dan *output* pembebanan dengan bentuk yang berkebalikan. Sedangkan untuk *polyurethane*, bentuk kurva ditunjukkan dengan bentuk yang bergelombang disepanjang lapisan *adhesive*.

Distribusi tegangan pada lapisan *adhesive* ketika *peel stress* terjadi di sepanjang lapisan dipengaruhi oleh *properties adhesive* dan panjang *overlap* tersebut. *Properties adhesive* dengan menggunakan *prony series* dan *Young's Modulus* memberikan efek yang berbeda untuk kedua jenis *adhesive*, yakni *epoxy resin* dan *polyurethane*. *Prony series* pada *epoxy resin* yang mengindikasikan material *viscoelastic* yang sulit terdeformasi dan nilai *Young's Modulus* sebesar 700 MPa membuat material ini memiliki kemampuan fleksibilitas yang rendah sehingga distribusi tegangan yang terjadi menjadi tidak merata di sepanjang lapisan *adhesive*. Bentuk kurva yang nampak memiliki *peek stress* di kedua ujung dari sisi pada bagian *input* dan *output* pembebanan. Sedangkan untuk *polyurethane*, *prony series* yang diterapkan pada *polyurethane* yang mengindikasikan material *viscoelastic* yang mudah terdeformasi dan nilai *Young's Modulus* sebesar 50 MPa membuat material ini memiliki kemampuan fleksibilitas yang tinggi. Namun, *peel stress* yang dialami oleh *polyurethane* memberikan hasil kurva yang bergelombang di sepanjang lapisan *adhesive* sehingga menunjukkan bahwa distribusi tegangan juga tidak merata di sepanjang lapisan *adhesive*. Bentuk kurva dari *polyurethane* memiliki bentuk yang berbeda dengan *epoxy resin*. Kurva distribusi tegangan menunjukkan bentuk yang bergelombang dengan letak *peek stress* yang bervariasi untuk setiap panjang *overlap*. Pengaruh dari penambahan panjang *overlap* dalam hal ini meningkatkan kekuatan dari *adhesive* dan menurunkan kemampuan *fleksibilitas*. Kegagalan dari *peel stress* memiliki nilai paling kecil pada panjang *overlap* 25 mm untuk *epoxy resin* dan *polyurethane* sehingga dapat diketahui bahwa *adhesive* memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, ataupun 20 mm. Kemampuan *fleksibilitas* yang dipengaruhi oleh panjang *overlap* dapat dilihat bahwa kurva distribusi tegangan dari *peel stress* untuk *polyurethane* terjadi gelombang yang sedikit pada panjang *overlap* 10 mm sehingga menunjukkan bahwa fleksibilitas yang tinggi dapat mendistribusikan tegangan secara lebih merata dibandingkan dengan panjang *overlap* 15 mm, 20 mm, dan 25 mm. Untuk *epoxy resin* dengan kemampuan fleksibilitas yang rendah, maka penambahan panjang *overlap* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap bentuk kurva dari distribusi tegangan. Dapat dilihat bahwa kurva distribusi tegangan pada setiap panjang *overlap* memiliki pola yang sama.

Pada Gambar 4.9 menunjukkan grafik dari *shear stress* pada lapisan *adhesive* dengan (a) panjang *overlap* 10 mm, (b) panjang *overlap* 15 mm, (c) panjang *overlap* 20 mm, dan (d) panjang *overlap* 25 mm. Bentuk kurva pada kedua jenis *adhesive* memberikan bentuk yang berbeda. Perbedaan bentuk kurva ini juga terjadi pada setiap variasi panjang *overlap*. Berdasarkan Gambar 4.9 dapat diketahui bahwa *shear stress* yang terjadi pada lapisan *adhesive polyurethane* memiliki nilai yang lebih tinggi daripada *epoxy resin*. Perbedaan nilai

ini terjadi untuk setiap variasi panjang *overlap* dari lapisan *adhesive* tersebut. Pada variasi panjang *overlap* 10 mm untuk *epoxy resin shear stress* maksimum terjadi di 0,83 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,16 MPa dan untuk *polyurethane* terjadi di 1,04 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,43 MPa. Pada variasi panjang *overlap* 15 mm untuk *epoxy resin shear stress* maksimum terjadi di 0,93 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,27 MPa dan untuk *polyurethane* terjadi di 0,62 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,36 MPa. Pada variasi panjang *overlap* 20 mm untuk *epoxy resin shear stress* maksimum terjadi di 19,16 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,21 MPa dan untuk *polyurethane* terjadi di 19,16 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,29 MPa. Pada variasi panjang *overlap* 25 mm untuk *epoxy resin shear stress* maksimum terjadi di 1,04 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,08 MPa dan untuk *polyurethane* terjadi di 20,83 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 0,16 MPa. Kegagalan yang terjadi pada lapisan *adhesive* untuk *epoxy resin* dan *polyurethane* masih dalam batas aman dikarenakan *shear stress* yang terjadi masih kurang dari 16,9 MPa untuk *epoxy resin* dan untuk *polyurethane* sebesar 19,7 MPa. Distribusi tegangan pada lapisan *adhesive* dengan tegangan yang terjadi, yakni *shear stress* dapat diketahui pada Gambar 4.9 yang menunjukkan bahwa distribusi tegangan terjadi secara merata disepanjang lapisan *adhesive* untuk *polyurethane* dengan bentuk kurva yang homogen dikedua sisi dari *input* dan *output* pembebanan dibandingkan dengan bentuk kurva dari *epoxy resin* yang memiliki ujung-ujung *peek stress* yang tinggi pada kurva distribusi tegangan.

Distribusi tegangan yang terjadi pada lapisan *adhesive* ketika *shear stress* terjadi dengan pembebanan *impact* dipengaruhi oleh *properties adhesive*, yakni *prony series* dan *Young's Modulus* beserta penambahan panjang *overlap*. *Epoxy resin* dengan menggunakan *prony series* yang mengindikasikan material viskoelastik yang sulit terdeformasi dengan nilai *Young Modulus* sebesar 700 MPa membuat *adhesive* ini memiliki kemampuan fleksibilitas yang rendah. Hal ini dapat diketahui dengan bentuk kurva pada *shear stress* yang dialami oleh *epoxy resin* memiliki bentuk yang berbeda pada kedua sisi dari *input* dan *output* pembebanan dengan *peek stress* yang tinggi di sepanjang kurva. *Polyurethane* dengan menggunakan *prony series* yang mengindikasikan material viskoelastik yang mudah terdeformasi dengan nilai *Young's Modulus* sebesar 50 MPa membuat *polyurethane* memiliki kemampuan fleksibilitas yang tinggi. Hal ini memberikan pengaruh ketika *polyurethane* mengalami tegangan berupa *shear stress*. Dapat diketahui bahwa kurva berbentuk homogen pada kedua sisinya dimana bentuk ini menunjukkan tegangan geser didistribusikan secara merata di sepanjang lapisan *adhesive*. Penambahan panjang *overlap* dalam hal ini memberikan pengaruh terhadap kekuatan pada lapisan *adhesive* dan kemampuan fleksibilitas ketika kegagalan dari *shear stress* terjadi. Dapat diketahui pada Gambar 4.9 kegagalan dari *shear stress* terkecil terjadi pada panjang *overlap* 25 mm untuk *epoxy resin* dan *polyurethane*. Hal ini menunjukkan bahwa dengan panjang *overlap* 25 mm memberikan kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan panjang *overlap* 10 mm, 15 mm, dan 20 mm. Kemampuan fleksibilitas menurun seiring dengan penambahan panjang *overlap* sehingga distribusi tegangan untuk *polyurethane* secara merata terjadi pada panjang *overlap* 10 mm dibandingkan dengan panjang *overlap* 15 mm, 20 mm, dan 25 mm. Untuk *epoxy resin* dengan kemampuan fleksibilitas yang rendah, maka penambahan panjang *overlap* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap bentuk kurva dari distribusi tegangan. Dapat dilihat bahwa kurva distribusi tegangan pada setiap panjang *overlap* memiliki pola yang sama.



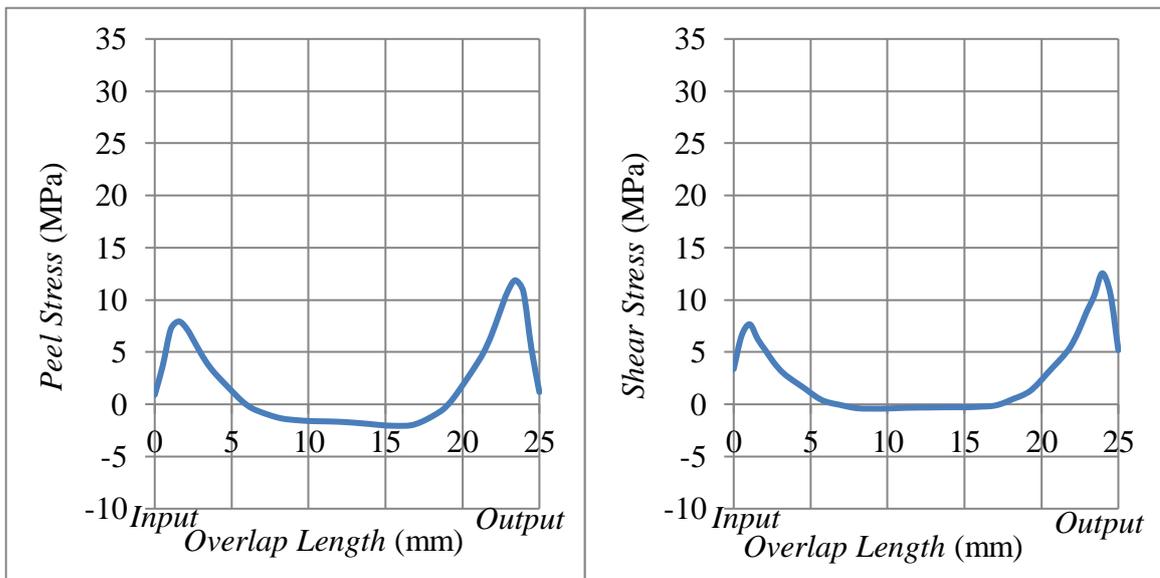
**Gambar 4.9** Shear stress pada lapisan adhesive (a) panjang overlap 10 mm, (b) panjang overlap 15 mm, (c) panjang overlap 20 mm, dan (d) panjang overlap 25 mm

Berdasarkan analisis pada Gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan bahwa distribusi tegangan yang terjadi pada lapisan adhesive yang lebih baik dibandingkan yang lain dengan kegagalan dari peel stress dan shear stress terkecil, yakni terjadi pada epoxy resin dengan panjang overlap 25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa epoxy resin dengan panjang overlap 25 mm memiliki kekuatan terbesar dalam variasi penelitian ini. Pembebanan yang diterapkan dalam hal ini sebesar 2 m/s. Selanjutnya, analisis dilakukan lebih lanjut untuk mengetahui kekuatan dari adhesive terkait kegagalan yang terjadi akibat dari peel stress dan shear stress. Pembebanan diaplikasikan dengan initial velocity pada striker bar sebesar 20 m/s dan 30 m/s.

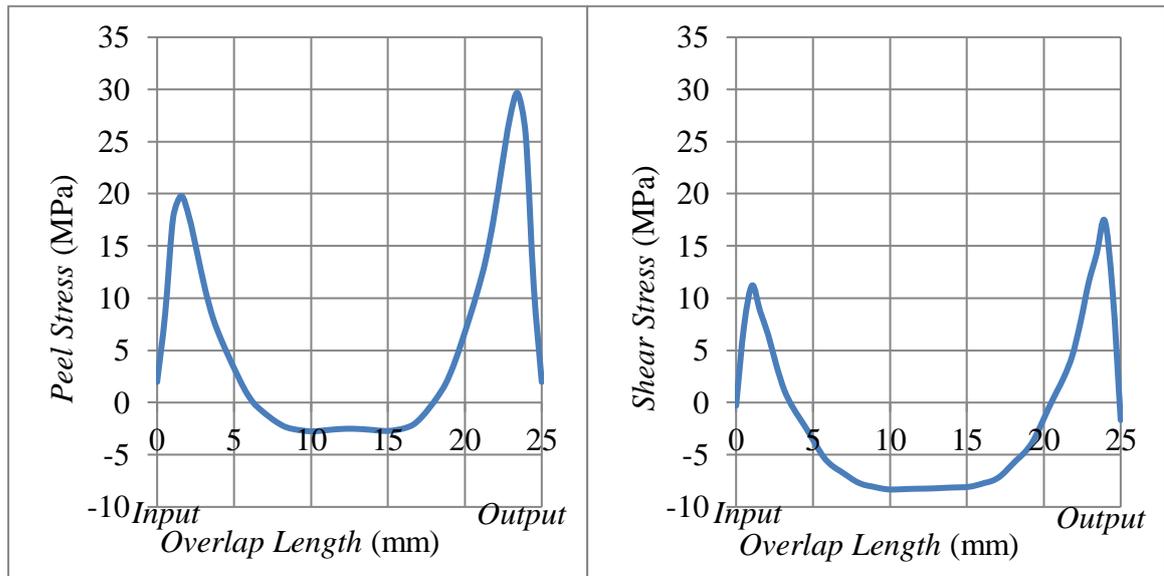
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.10 dapat diketahui bahwa kegagalan yang terjadi pada epoxy resin dengan panjang overlap 25 mm dengan pembebanan menggunakan initial velocity dari striker bar sebesar 20 m/s memberikan hasil yang berbeda untuk peel stress dan shear stress. Peel stress maksimum terjadi di 23,43 mm dari input pembebanan dengan nilai sebesar 11,88 MPa dan shear stress maksimum terjadi di 23,95 mm dari input pembebanan dengan nilai sebesar 12,55 MPa. Batas maksimum dari peel strength untuk epoxy resin sebesar 4,88 MPa dan batas dari shear strength untuk epoxy resin sebesar 16,9 MPa. Dalam hal ini dapat

diketahui bahwa kegagalan yang diakibatkan dari *peel stress* telah melebihi batas aman atau batas kekuatan *epoxy resin* dalam menerima *peel stress*. Akan tetapi, *shear stress* yang terjadi masih dalam batas aman dengan tidak melebihi batas kekuatan *epoxy resin* dalam menerima *shear stress*.

Selanjutnya, analisis dilakukan pada *initial velocity* dari *striker bar* sebesar 30 m/s. Berdasarkan Gambar 4.11 dapat diketahui bahwa grafik pada *peel stress* dan *shear stress* memberikan bentuk kurva yang berbeda. *Peel stress* maksimum terjadi di 23,43 mm dari *input* pembebanan dengan nilai *peel stress* sebesar 29,63 MPa dan *shear stress* maksimum terjadi di 23,95 mm dari *input* pembebanan dengan nilai sebesar 17,43 MPa. Dalam hal ini, menunjukkan bahwasanya kegagalan yang diakibatkan dari *peel stress* dan *shear stress* telah melebihi batas aman atau batas kekuatan *epoxy resin* dalam menerima tegangan yang terjadi, yakni *peel strength* sebesar 4,88 MPa dan *shear strength* sebesar 16,9 MPa. Maka dari itu, dapat dijelaskan dalam penelitian ini bahwasanya *adhesive epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm yang memiliki kekuatan tertinggi dalam variasi penelitian ini mulai mengalami kegagalan yang diakibatkan dari *peel stress* ketika sambungan *adhesive* menerima *impact* dengan *initial velocity* dari *striker bar* sebesar 20 m/s dan kegagalan yang disebabkan dari *shear stress* terjadi saat sambungan *adhesive* menerima *impact* dengan *initial velocity* dari *striker bar* sebesar 30 m/s. Kegagalan yang melebihi batas aman dalam hal ini diperlukan *treatment* lebih lanjut untuk meningkatkan kekuatan pada *adhesive*, yakni dengan melakukan penambahan panjang *overlap* agar kekuatan yang didapatkan juga semakin meningkat sehingga kegagalan yang terjadi dapat dihindarkan.



**Gambar 4.10** *Peel stress* dan *shear stress* pada pembebanan sebesar 20 m/s untuk *epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm



**Gambar 4.11** Peel stress dan shear stress pada pembebanan sebesar 30 m/s untuk epoxy resin dengan panjang overlap 25 mm

Kedua jenis adhesive, yakni epoxy resin dan polyurethane memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Dalam hal ini, epoxy resin memiliki kekuatan yang tinggi sehingga mampu menerima pembebanan yang besar, tetapi memiliki kemampuan fleksibilitas yang rendah sehingga membuat epoxy resin menjadi adhesive yang keras. Polyurethane memiliki kekuatan yang rendah dalam menerima pembebanan namun memiliki kemampuan fleksibilitas yang tinggi dan mudah untuk berdeformasi sehingga hal ini menjadikan polyurethane menjadi adhesive yang lunak. Penerapan dalam aspek perindustrian untuk epoxy resin dan polyurethane juga berbeda pula.

Epoxy resin dengan kemampuan yang dimiliki yakni memiliki kekuatan yang tinggi serta sulit untuk berdeformasi paling umum digunakan dalam industri pesawat terbang. Epoxy resin digunakan untuk merekatkan material carbon, fiberglass, dan aluminium. Hal ini dikarenakan badan pesawat terbang membutuhkan material yang keras dan sulit untuk berdeformasi ketika diberikan pembebanan agar dapat menahan hujan dan mendukung tekanan penerbangan pesawat. Serta, dapat mempertahankan bentuk fisik dari pesawat terbang itu sendiri. Bagian-bagian dari badan pesawat terbang yang menggunakan epoxy resin sebagai bahan perekat, yakni engine cowls, bottom access panels and deflectors, flaps, flap track fairings, spoiler shroud top panels, aileron, tailplane and elevator, apron, dan trailing edge panels.

Polyurethane dengan kemampuan fleksibilitas yang tinggi dan mudah untuk berdeformasi paling banyak digunakan dalam industri automobile. Polyurethane sering digunakan untuk merekatkan body parts dari mobil, yakni front bumper, fender, body side panel, roof, dan rear bumper. Hal ini dikarenakan body dari mobil dirancang selain mempertahankan bentuk fisik tetapi lebih diutamakan keselamatan dari pengguna jalan sehingga body mobil dapat dengan mudah terdeformasi ketika terjadi kecelakaan. Dengan begitu, akibat yang ditimbulkan dari kecelakaan dapat berkurang. Interior dari mobil juga banyak menggunakan polyurethane sebagai bahan perekat. Adhesive ini digunakan untuk merekatkan tekstil, backfoamed textiles, karpet, dan kulit pada car sky roof, door trim, automobile trunk cover plate, dan automobile central control armrest platform. Bagian-bagian ini merupakan parts yang berdekatan serta bersentuhan secara langsung ketika pengguna mobil berada di dalam. Kenyamanan dengan memberikan efek soft dengan menggunakan polyurethane dilakukan dalam hal ini untuk menghindarkan kesan keras dan tidak nyaman karena dapat membuat sakit ketika berbenturan dengan tubuh pengguna mobil.

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi SHPB pada sambungan *adhesive* tipe *single lap* yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan dapat dijelaskan bahwa sambungan *adhesive* menggunakan *epoxy resin* memiliki *strength*, Modulus Young, dan *energy density* yang lebih tinggi daripada sambungan *adhesive* menggunakan *polyurethane*. Hal ini dikarenakan pengaruh dari *prony series* pada *epoxy resin* yang memodelkan material viskoelastik yang sulit untuk terdeformasi dan nilai *Young's Modulus* pada *epoxy resin* lebih tinggi daripada *polyurethane*. Sehingga, semakin sulit material viskoelastik untuk terdeformasi dan semakin tinggi nilai *Young's Modulus* maka semakin tinggi pula *strength*, Modulus Young, dan *energy density* pada sambungan *adhesive*. Namun, sambungan *adhesive* menggunakan *polyurethane* memiliki *elasticity* yang lebih tinggi daripada sambungan *adhesive* menggunakan *epoxy resin*. Hal ini merupakan pengaruh dari *prony series* pada *polyurethane* yang memodelkan material viskoelastik yang mudah untuk terdeformasi dan nilai *Young's Modulus* pada *polyurethane* lebih rendah daripada *epoxy resin*. Oleh karena itu, semakin mudah material viskoelastik untuk terdeformasi dan semakin rendah nilai *Young's Modulus* maka semakin tinggi *elasticity* pada sambungan *adhesive*.
2. Hasil yang diperoleh dengan variasi panjang *overlap* sebesar 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm pada *epoxy resin* dan *polyurethane* menjelaskan bahwa peningkatan terjadi untuk *strength*, Modulus Young, dan *energy density* pada sambungan *adhesive* seiring dengan bertambahnya panjang *overlap*. Hal ini dikarenakan semakin panjang *overlap* yang digunakan pada sambungan *adhesive* maka semakin sulit pula sambungan *adhesive* untuk terdeformasi. Tetapi, penurunan terjadi seiring dengan bertambahnya panjang *overlap* untuk *elasticity* pada sambungan *adhesive* menggunakan *epoxy resin* dan *polyurethane*. Hal ini karena semakin panjang *overlap* yang digunakan pada sambungan *adhesive* maka semakin sulit sambungan *adhesive* untuk terdeformasi sehingga kemampuan fleksibilitas juga semakin berkurang.
3. Distribusi tegangan yang diperoleh dari *peel stress* untuk *epoxy resin* dan *polyurethane* tidak terjadi secara merata. Akan tetapi, distribusi tegangan dari *shear stress* untuk *polyurethane* terjadi secara merata dibandingkan dengan *epoxy resin*. Hal ini terjadi karena *peel stress* memberikan tegangan pada pangkal lapisan *adhesive* terlebih dahulu kemudian berlanjut hingga ujung lapisan *adhesive*, sedangkan *shear stress* terjadi di sepanjang lapisan *adhesive* secara bersamaan. Pengaruh dari *prony series* pada *polyurethane* yang memodelkan material viskoelastik yang mudah terdeformasi daripada *epoxy resin* dan nilai *Young's Modulus* dari *polyurethane* yang lebih rendah daripada *epoxy resin* memberikan dampak terhadap pendistribusian tegangan. Semakin mudah material untuk terdeformasi dengan nilai *Young's Modulus* yang rendah maka kemampuan fleksibilitas *adhesive* semakin tinggi sehingga pendistribusian tegangan geser pada lapisan *adhesive* semakin rata. Kegagalan yang diakibatkan dari *peel stress* dan *shear stress* untuk *epoxy resin* dan *polyurethane* masih dalam batas aman dengan menjauhi dari *peel strength* dan *shear strength* pada *epoxy resin* dan *polyurethane*. Kegagalan terkecil terjadi pada *epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm. Hal ini dikarenakan pengaruh dari *prony series* pada *epoxy resin* yang sulit untuk terdeformasi dan nilai *Young's Modulus* yang tinggi sehingga kekuatan *adhesive* juga semakin tinggi pula disertai dengan panjang *overlap* 25 mm.

Oleh karena itu, penambahan panjang *overlap* memberikan pengaruh terhadap kekuatan *adhesive*. Semakin panjang *overlap* yang digunakan pada *adhesive* maka semakin sulit *adhesive* tersebut untuk terdeformasi dan kekuatan *adhesive* semakin tinggi pula.

4. Variasi pembebanan dengan *initial velocity* pada *striker bar* sebesar 20 m/s dan 30 m/s dilakukan pada *adhesive* dengan kegagalan terkecil, yaitu *epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm guna mengetahui batas kegagalan akibat *peel stress* dan *shear stress* pada *adhesive* yang memiliki kekuatan tertinggi. Hasil analisis yang diperoleh menjelaskan bahwa *adhesive epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm yang memiliki kekuatan tertinggi dalam variasi penelitian ini mulai mengalami kegagalan yang melebihi batas aman yang diakibatkan dari *peel stress* sebesar 11,88 MPa ketika sambungan *adhesive* menerima *impact* dengan *initial velocity* dari *striker bar* sebesar 20 m/s dan kegagalan yang disebabkan dari *shear stress* sebesar 17,43 MPa terjadi saat sambungan *adhesive* menerima *impact* dengan *initial velocity* dari *striker bar* sebesar 30 m/s. Perlakuan khusus diperlukan dalam hal ini untuk menghindarkan kegagalan yang diakibatkan dari *peel stress* dan *shear stress*, yakni dengan melakukan pertambahan panjang *overlap* untuk meningkatkan kekuatan *adhesive* sehingga kegagalan dapat dihindarkan. Oleh karena itu, dapat ditarik kesimpulan bahwasanya *epoxy resin* dengan panjang *overlap* 25 mm mulai mengalami kegagalan yang diakibatkan dari tegangan yang terjadi yaitu ketika menerima pembebanan berupa *impact* dari *striker bar* dengan *initial velocity* sebesar 20 m/s.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian ini dapat diberikan saran antara lain:

1. Diperlukan studi lebih lanjut terkait dengan penggunaan *properties adhesive* yang lain guna mendapatkan hasil yang lebih baik pada sambungan *adhesive* tipe *single lap*.

## DAFTAR PUSTAKA

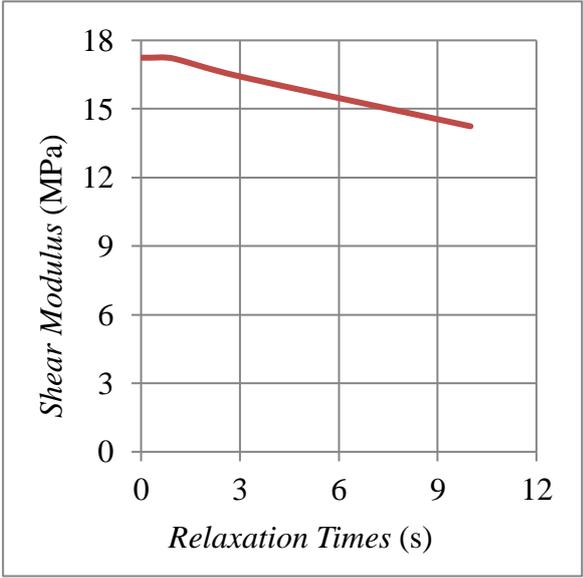
- Adams, Robert D. 2005. *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. New York : CRC Press.
- Asgharifar, Mehdi dkk. 2013. *Dynamic Analysis of Adhesively Bonded Joint under Solid Projectile Impact*. Warren : Southern Methodist University.
- Chen, W., Song, B. 2011. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*. New York: Springer Science Business Media.
- Chen, Xuan dan Yulong Li. 2010. *An Experimental Technique on The Dynamic Strength of Adhesively Bonded Single Lap Joints*. Xi'an : Northwestern Polytechnical University.
- Cook, R. D. 2001. *Concept and Applications of Finite Elements Analysis 4th Edition*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.
- Effinger, Veronika dkk. 2014. *Nonlinear Viscoelastic Modeling for Foams*. Bamberg : University of Stuttgart.
- Engineers, The American Society of Mechanical. 2006. *ASME V&V 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*. New York : The American Society of Mechanical Engineers.
- Fan, J., dan Chen A. 2019. *Studying a Flexible Polyurethane Elastomer with Improved Impact-Resistant Performance*. Beijing : Beijing Institute of Technology.
- Goss, Bob. 2010. *Practical Guide to Adhesive Bonding of Small Engineering Plastic and Rubber Parts*. Shawburry : iSmithers Rapra Publishing.
- Gould, Trenton E. dkk. 2019. *Mouth Protection in Sports*. Hattiesburg : The University of Southern Mississippi.
- Harris, J. A. dan R. D. Adams. 1985. *An Assessment of The Impact Perfomance of Bonded Joints for Use in High Energy Absorbing Structures*. Bristol : University of Bristol
- Hu, Chunxing, Guibin Huang, dan Cheng Li. 2021. *Experimental and Numerical Study of Low-Velocity Impact and Tensile adter Impact for CFRP Laminates Single Lap-Joints Adhesively Bonded Structure*. Zhengzhou : Zhengzhou University
- Hutton, D. V. 2004. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. Boston : McGraw-Hill.
- Kelly, Piaras A. 2015. *Solid Mechanics Part I : An Introduction to Solid Mechanics*. New Zealand : University of Auckland.
- Mahammedi, Charfeldine, Gaetano Ellia, dan Chandra Mouli Vemury. 2016. *Nonlinear Modelling of Ground Performance Under Seismic Conditions*. Middlesbrough : Teeside University.
- Madenci, E. dan Uterkus S. 2011. *Ordinary State-Based Peridynamics for Thermoviscoelastic Deformation*. United Kingdom : University of Stathclyde.
- Messler, Robert W. 2004. *Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology*. Massachusetts : Elsevier Butterworth- Heinemann.

- Mills, N. J. 2006. *Finite Element Models for the Viscoelasticity of Open-Cell Polyurethane Foam*. Birmingham : University of Birmingham.
- Noor, Sauki Ramandha Fadh. 2022. *Analisis Pengaruh Ketebalan Adhesive dalam Menahan Deformasi Casing Battery Pack pada Uji Impak Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Nugraha, Rizky. 2021. *Analisa Pengaruh Modulus dan Viscoelastis pada Rasio Geometri Ti-Adhesive Terhadap Kekuatan dan Serapan Energi Single Lap Joint yang Dikenakan Beban Impact dengan Metode Elemen Hingga*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Ojalvo, I. U. dan H. L. Eidinoff. 1974. *Bond Thickness Effects upon Stresses in Single Lap Adhesively Joints*. Bethpage : Grumman Aerospace Corp.
- Peng, Jianxing dkk. 2008. *Determination of Parameters of Steinberg-Guinan Constitutive Model with Shock Wave Experiments*. Mianyang : Institute of Fluid Physics.
- Pribadi, Ridho Gary. 2019. *Studi Eksperimen dan Analisa Pengaruh Panjang Overlap Terhadap Kekakuan pada Sambungan Adhesive Tipe Single Lap dengan Pembebanan Dinamis*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Raos, Pero, Dražan Kozak, dan Mirjana Lucic. 2005. *Stress-Strain Analysis of Single-Lap Tensile Loaded Adhesive Joints*. Slavonski Brod : University of Osijek.
- Revellino, M., L. Saggese, dan E. Gaiero. 2000. *Compression Molding of SMCs*. Oxford : Elsevier.
- Sato, C. dan K. Ikegami. 1999. *Dynamic Deformation of Lap Joints and Scarf Joints under Impact Loads*. Yokohama : Tokyo Institute of Technology.
- Shaikh, Sameer dkk. 2017. *Single Lap Adhesive Joint (SLAJ) : A Study*. Pune : Savitribai Phule Pune University.
- Silva, Lucas da. 2006. *Effect of Adhesively Type and Thickness on the Lap Shear Strength*. Porto : University of Porto.

## LAMPIRAN

Data prony series

Material	<i>Epoxy Resin</i>			
<i>Prony Series</i>	$\tau_i$ (s)	$G_i$ (MPa)	$\tau_i$ (s)	$G_i$ (MPa)
	$1 \times 10^{-4}$	76,92	$1 \times 10^2$	1038,46
	$1 \times 10^{-3}$	307,69	$1 \times 10^3$	1115,38
	$1 \times 10^{-2}$	576,92	$1 \times 10^4$	961,53
	1	384,61	$1 \times 10^5$	346,15
	$1 \times 10^1$	423,07		
Grafik				

Material	<i>Polyurethane</i>													
<i>Prony Series</i>	$\tau_i$ (s)	Gi (MPa)	$\tau_i$ (s)	Gi (MPa)										
	0,01	17,241	1	17,200										
	0,03	17,241	3	16,42										
	0,1	17,241	10	14,24										
	0,3	17,241												
Grafik	 <table border="1" data-bbox="770 701 1353 1279"> <caption>Data points for the Shear Modulus vs. Relaxation Times graph</caption> <thead> <tr> <th>Relaxation Times (s)</th> <th>Shear Modulus (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>17,241</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>17,200</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>16,42</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>14,24</td> </tr> </tbody> </table>				Relaxation Times (s)	Shear Modulus (MPa)	0	17,241	1	17,200	3	16,42	10	14,24
Relaxation Times (s)	Shear Modulus (MPa)													
0	17,241													
1	17,200													
3	16,42													
10	14,24													

## BIODATA PENULIS



Rahmad Try Susetyo merupakan nama lengkap penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Kediri pada 8 Juni 2000 ini merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis memulai pendidikan formal di TK Mardi Putra kemudian melanjutkan ke SD Negeri Semampir 1 Kota Kediri. Setelah lulus dari sekolah dasar, penulis melanjutkan ke jenjang sekolah menengah yang dimulai di SMP Negeri 1 Kediri. Selanjutnya, melanjutkan ke jenjang berikutnya di SMA Negeri 1 Kediri. Setelah menyelesaikan pendidikan pada jenjang sekolah menengah, penulis melanjutkan studi S1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menjalani perkuliahan penulis aktif dalam berbagai kegiatan kepanitiaan dan pelatihan, antara lain Pelatihan Spiritual dan Kebangsaan 2018, Latihan Keterampilan Mahasiswa Wirausaha Tingkat Dasar 2018, Maba Cup ITS 2018, Pelatihan Karya Tulis Ilmiah Tingkat Dasar 2018, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Pra Tingkat Dasar 2019, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Dasar 2019, Orientasi Keprofesian dan Kompetensi Berbasis Kurikulum 2019, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Menengah 2020, dan Wisuda 121 Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS. Penulis juga aktif dalam bidang organisasi mahasiswa, yaitu sebagai staf Departemen Dalam Negeri Himpunan Mahasiswa Mesin FT-IRS ITS Periode 2019/2020 dan Kepala Biro Internal Keluarga Mahasiswa Mesin Departemen Organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin FT-IRS ITS Periode 2020/2021. Penulis mengambil konsentrasi ilmu rumpun desain khususnya terkait dengan mekanika benda padat. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email [tyosusetyo45@gmail.com](mailto:tyosusetyo45@gmail.com).