



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM184835**

**ANALISA PENGARUH PANJANG DAN MISALIGNMENT  
TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN  
SPESIMEN TUBULAR ADHESIVE LAP JOINT PADA LAJU  
REGANGAN TINGGI MENGGUNAKAN PEMODELAN  
FINITE ELEMENT EXPLICIT DYNAMIC**

**Agih Purnama  
NRP. 02111640000096**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA-2020**



**TUGAS AKHIR – TM184835**

**ANALISA PENGARUH PANJANG DAN MISALIGNMENT  
TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN  
SPESIMEN TUBULAR ADHESIVE LAP JOINT PADA  
LAJU REGANGAN TINGGI MENGGUNAKAN  
PEMODELAN FINITE ELEMENT EXPLICIT DYNAMIC**

**Agih Purnama  
NRP. 0211164000096**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKASAYA  
SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA – 2020**



**FINAL PROJECT – TM184835**

**ANALYSIS OF LENGTH AND MISALIGNMENT EFFECT  
ON STRESS-STRAIN RESPONSE OF TUBULAR  
ADHESIVE LAP JOINT SPECIMEN ON HIGH STRAIN  
RATE USING FINITE ELEMENT EXPLICIT DYNAMIC  
MODELING**

**Agih Purnama  
NRP. 0211164000096**

**Advisory Lecture  
Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.  
NIP. 198006272012121003**

**DEPARTEMEN OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND  
SYSTEMS ENGINEERING  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA – 2020**

## HALAMAN PENGESAHAN

# ANALISA PENGARUH PANJANG DAN MISALIGNMENT TERHADAP RESPON TEGANGAN- REGANGAN SPESIMEN TUBULAR ADHESIVE LAP JOINT PADA LAJU REGANGAN TINGGI MENGUNAKAN PEMODELAN FINITE ELEMENT EXPLICIT DYNAMIC

## 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:

**Agih Purnama**

NRP. 02111640000096

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. **Dr. Eng. Yohanes, S.T. M.Sc.**  
NIP. 198006272012121003 (Pembimbing)
2. **Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc.**  
NIP. 197805102001121001 (Penguji)
3. **Ari Kurniawan, Saputra, S.T., M.T.**  
NIP. 1986040120150410 01 (Penguji)

SURABAYA  
AGUSTUS 2020

**ANALISA PENGARUH PANJANG DAN  
MISALIGNMENT TERHADAP RESPON TEGANGAN-  
REGANGAN SPESIMEN *TUBULAR ADHESIVE LAP  
JOINT* PADA LAJU REGANGAN TINGGI  
MENGUNAKAN PEMODELAN *FINITE ELEMENT  
EXPLICIT DYNAMIC***

**Nama Mahasiswa** : Agih Purnama  
**NRP** : 0211164000096  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

**ABSTRAK**

*Sifat mekanis sambungan adhesive dipengaruhi oleh geometri dan propertis dari base material dan bulk adhesive. Salah satu metode karakterisasi sifat mekanis material pada laju regangan tinggi adalah uji split hopkinson pressure bar (SHPB). Berdasarkan standar ASTM, spesimen uji SHPB berbentuk silinder pejal dengan rasio panjang terhadap diameter yang disarankan antara 0,5 hingga 2. Standar tersebut terlalu kecil untuk diterapkan pada tubular adhesive lap joint. Namun, spesimen tubular lap joint yang panjang sangat rawan terhadap bending, barrelling, dan misalignment yang mengakibatkan kesalahan pada respon tegangan-regangan. Pada tugas akhir ini dilakukan penelitian mengenai pengaruh panjang dan misalignment terhadap respon tegangan-regangan spesimen tubular adhesive lap joint. Kurva tegangan-regangan tersebut diperoleh dari simulasi numerik menggunakan ANSYS Explicit dynamics.*

*Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang geometri spesimen tubular adhesive lap joint pada uji SHPB dimana pengaruh bending, barrelling, dan misalignment dapat diabaikan sehingga mendapatkan hasil pengujian yang valid.*

*Tubular adhesive lap joint dalam penelitian ini terdiri dari dua adherend pipa aluminium yang berongga dengan panjang spesimen uji yang divariasikan dengan variasi panjang diantaranya yaitu 14, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, dan 100 mm. Masing-masing variasi panjang memiliki panjang overlap sambungan yang sama yaitu sebesar 10 mm. Selain itu, pengaruh misalignment sebesar  $8,57^\circ$  terhadap respon tegangan-regangan juga diinvestigasi. Hasil yang didapatkan dari simulasi dengan misalignment tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi spesimen tanpa misalignment. Sebelum simulasi, dilakukan uji konvergensi meshing terlebih dahulu dengan cara menentukan sizing meshing dengan error yang paling kecil. Uji konvergensi tersebut dilakukan agar hasil simulasi valid.*

*Panjang spesimen memiliki pengaruh terhadap modulus kombinasi sambungan yang mana semakin panjang spesimen, maka nilai modulus kombinasi semakin besar, dan berlaku sebaliknya. Sementara misalignment juga memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap modulus kombinasi sambungan yang mana misalignment sambungan dapat memperkecil nilai modulus kombinasi sambungan.*

***Kata kunci: Panjang spesimen, Misalignment, Tubular adhesive lap joint, modulus kombinasi, Split hopkinson pressure bar***

**ANALYSIS OF LENGTH AND MISALIGNMENT  
EFFECT ON STRESS-STRAIN RESPONSE OF  
TUBULAR ADHESIVE LAP JOINT SPECIMEN ON  
HIGH STRAIN RATE USING FINITE ELEMENT  
EXPLICIT DYNAMIC MODELING**

**Student Name** : Agih Purnama  
**NRP** : 0211164000096  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Advisory Lecturer** : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

**ABSTRACT**

*The mechanical properties of adhesive joints are influenced by the geometry and properties of the base material and bulk adhesive. One method of characterizing the mechanical properties of materials at high strain rates is the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test. According to the ASTM standard, the SHPB test specimen is a solid cylinder with a recommended length to diameter ratio of 0.5 to 2. The standard is too small to apply to tubular adhesive lap joints. However, long tubular lap joint specimens are highly susceptible to bending, barreling, and misalignment resulting in errors in stress-strain response. In this final project, a research was conducted on the effect of length and misalignment on the stress-strain response of tubular adhesive lap joint specimens. The stress-strain curve is obtained from numerical simulations using ANSYS Explicit dynamics.*

*The purpose of this research is to design the geometry of tubular adhesive lap joint specimens in the SHPB test where the effects of bending, barreling, and misalignment can be ignored so that valid test results are obtained. Tubular adhesive lap joint in this study consisted of two hollow aluminum pipe adherends with the length of the test specimen varied with length variations including 14, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, and 100 mm. Each length variation has the same*

*overlap length of 10 mm. In addition, the effect of a misalignment of 8.57 ° on the stress-strain response was also investigated. The results obtained from the simulation with misalignment are compared with the simulation results of specimens without misalignment. Before the simulation, the meshing convergence test is conducted first by determining the sizing meshing with the smallest error. The convergence test is carried out so that the simulation results are valid.*

*The length of the specimen has an influence on the joint combination modulus where the longer the specimen, the greater the combination modulus value, and vice versa. While the misalignment also has a significant effect on the joint combination modulus, where the connection misalignment can reduce the joint combination modulus value.*

***Keywords: Specimen lengths, Misalignment, Tubular adhesive lap joint, Combination modulus, Split Hopkinson pressure bar***

## **KATA PENGANTAR**

Syukur alhamdulillah atas berkat rahmat Allah SWT serta karunia-Nya yang telah diberikan, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Penulis menyadari bahwa keberhasilan semua ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung penulis dalam proses penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah sabar membimbing, memberikan ilmu, dukungan, dan selalu memotivasi penulis. Segala masukan dan bimbingan yang telah Bapak berikan yang sangat berharga bagi penulis.
2. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc. PhD., Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc., Bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T., selaku dosen penguji seminar proposal dan tugas akhir penulis karena telah meluangkan waktu dan memberikan saran-saran demi kebaikan hasil tugas akhir penulis.
3. Keluarga inti penulis, Ayah, Ibu, dan Adik penulis yang telah memberikan banyak dukungan, fasilitas, serta doa kepada penulis.
4. Bapak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin
5. Pak Bobby Oedy Pramoedyo Soepangkat dan Ibu Aida Annisa Amin Daman selaku dosen wali yang memberikan inspirasi, motivasi, dan bantuan kepada penulis.
6. Seluruh keluarga Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan penulis kesempatan untuk menimba ilmu.
7. Angkatan M59 yang telah memberikan dukungan sekaligus menjadi keluarga penulis selama menempuh perkuliahan di

- Institut Teknologi Sepuluh Nopember mulai dari awal perkuliahan hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Warga laboratorium otomotif yang selalu membantu, mendukung, dan mendoakan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
  9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh penulis.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan masukan maupun saran dari semua pihak. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I.....</b>	<b>1</b>
<b>PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah .....	4
1.4. Tujuan Penelitian .....	4
1.5. Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB II.....</b>	<b>6</b>
<b>TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
2.1. <i>Adhesive</i> .....	6
2.2. Sambungan <i>Adhesive</i> .....	6
2.3. <i>Tubular lap joint</i> .....	7
2.4. Komponen dan Prinsip Kerja <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	8
2.5. Kalibrasi dan Reduksi Data pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	9
2.6. Perhitungan Gelombang yang Merambat pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	14

2.7. Penyebaran Gelombang pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	17
2.8. Kurva Tegangan-Regangan .....	18
2.9. Modulus Geser dan Kekakuan.....	19
2.10. <i>Simulasi ANSYS Explicit Dynamics</i> .....	20
2.11. Penelitian Terdahulu.....	21
2.11.1. <i>Effect of adherends misalignment on the strength of single-lap bonded joints</i> .....	21
2.11.2. <i>Effect of Specimen Size in the Kolsky Bar</i> .....	23
<b>BAB III .....</b>	<b>18</b>
<b>METODE PENELITIAN.....</b>	<b>18</b>
3.1. <i>Flowchart</i> Penelitian.....	18
3.2. <i>Set up</i> Alat Uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	22
3.3. Kalibrasi Alat Uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> .....	24
3.4. Eksperimen .....	26
3.5. Perhitungan Data Hasil Eksperimen .....	28
3.6. Simulasi menggunakan ANSYS .....	33
<b>BAB IV .....</b>	<b>44</b>
<b>ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>44</b>
4.1. Perbandingan Data Spesimen Panjang 100 mm Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen .....	44
4.2. Hasil Simulasi.....	48
4.2.1. <i>Sinyal Reflected</i> .....	48
4.2.2. <i>Sinyal Transmitted</i> .....	51
4.3. Hasil Perhitungan dan Pembahasan .....	53
4.3.1. Laju regangan.....	53

4.3.2. Kurva P1-P2 .....	54
4.3.3. Kurva Tegangan-regangan .....	57
<b>BAB V .....</b>	<b>62</b>
<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>62</b>
5.1. Kesimpulan.....	62
5.2. Saran.....	62
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>64</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>65</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Desain sambungan adhesive yang umum digunakan.....	7
<b>Gambar 2.2</b> Tubular lap joint .....	8
<b>Gambar 2.3</b> Ilustrasi desain split hopkinson pressure bar .....	8
<b>Gambar 2.4</b> Gelombang tegangan dalam bar components yang (a).sejajar (b).tidak sejajar .....	10
<b>Gambar 2.5</b> Kalibrasi amplitudo incident pulse .....	11
<b>Gambar 2.6</b> Incident pulse akibat impedansi yang berbeda antara penumbuk dengan incident bar .....	12
<b>Gambar 2. 7</b> Penentuan titik mulai .....	13
<b>Gambar 2.8</b> Penentuan titik mulai reflected pulse .....	13
<b>Gambar 2.9</b> Penentuan titik mulai kurva tegangan-regangan .....	14
<b>Gambar 2.10</b> Diagram posisi-waktu perambatan gelombang dalam split hopkinson pressure bar .....	14
<b>Gambar 2. 11</b> Bagian pengujian split hopkinson pressure bar.....	16
<b>Gambar 2. 12</b> Penyebaran gelombang pada eksperimen split hopkinson pressure bar .....	18
<b>Gambar 2.13</b> Kurva tegangan-regangan.....	19
<b>Gambar 2.14</b> (a). Beberapa spesimen single lap joint yang siap untuk diuji (b). Gambar yang diambil menggunakan mikroskop optikal untuk mengevaluasi ketebalan adhesive dan misalignment dari adherend (c) Spesimen ketika diuji ..	22
<b>Gambar 2.15</b> Failure load untuk dua spesimen dengan dan tanpa misalignment.....	22
<b>Gambar 2.16</b> Pengaruh panjang spesimen dengan bentuk penampang circle.....	24
<b>Gambar 2. 17</b> Pengaruh panjang spesimen dengan bentuk penampang hexagon .....	24
<b>Gambar 2. 18</b> Pengaruh panjang spesimen dengan bentuk penampang rectangle .....	25
<b>Gambar 3.1</b> Flowchart penelitian.....	19
<b>Gambar 3.2</b> Skema alat uji split hopkinson pressure bar ....	22

<b>Gambar 3.3</b> Alat uji <i>split hopkinson pressure bar</i> .....	23
<b>Gambar 3.4</b> Gelombang regangan pada incident bar hasil pengujian .....	25
<b>Gambar 3.5</b> Flowchart eksperimen .....	26
<b>Gambar 3.6</b> Geometri dua dimensi tubular adhesive lap joint.....	27
<b>Gambar 3.7</b> Kurva regangan terhadap waktu hasil dari pengukuran.....	28
<b>Gambar 3.8</b> Kurva hasil pemotongan kurva incident, reflected, dan transmitted strain .....	29
<b>Gambar 3.9</b> Grafik laju regangan terhadap waktu pada percobaan sambungan adhesive dengan panjang sambungan sebesar 100 mm.....	30
<b>Gambar 3.10</b> Contoh kurva hasil perhitungan tegangan dengan regangan pada percobaan dengan panjang sambungan 100 mm.....	32
<b>Gambar 3.11</b> Contoh estimasi nilai modulus.....	32
<b>Gambar 3.12</b> Flowchart simulasi .....	33
<b>Gambar 3.13</b> Pemodelan tubular adhesive lap joint tanpa misalignment.....	35
<b>Gambar 3.14</b> Geometri striker bar .....	35
<b>Gambar 3.15</b> Geometri incident bar.....	35
<b>Gambar 3.16</b> Geometri transmitted bar .....	35
<b>Gambar 3. 17</b> Geometri dua dimensi spesimen uji misalignment sebesar $8,57^\circ$ dengan ujung spesimen tidak dipotong .....	36
<b>Gambar 3. 18</b> Geometri dua dimensi spesimen uji misalignment sebesar $8,57^\circ$ dengan ujung spesimen dipotong .....	37
<b>Gambar 3. 19</b> Pemodelan tiga dimensi tubular adhesive lap joint dengan misalignment sebesar $8,57^\circ$ .....	37
<b>Gambar 3. 20</b> Pemodelan SHPB dan spseimen uji pada ANSYS Explicit dynamics .....	37
<b>Gambar 3. 21</b> Uji konvergensi alumunium .....	38
<b>Gambar 3. 22</b> Uji konvergensi epoxy .....	39

<b>Gambar 3.23</b> Hasil meshing alumunium dengan sizing hasil uji konvergensi.....	39
<b>Gambar 3.24</b> Hasil meshing dengan sizing hasil uji konvergensi Adhesive .....	40
<b>Gambar 3.25</b> Kurva regangan terhadap waktu hasil simulasi sebelum dihitung .....	40
<b>Gambar 3.26</b> Kurva regangan semua sinyal hasil trim .....	41
<b>Gambar 3.27</b> Kurva perbandingan P1 dan P2 .....	42
<b>Gambar 3.28</b> Laju regangan terhadap waktu.....	42
<b>Gambar 3. 29</b> Kurva tegangan-regangan.....	43
<b>Gambar 4.1</b> Kurva laju regangan spesimen panjang 100 mm hasil eksperimen.....	45
<b>Gambar 4.2</b> Kurva laju regangan terhadap waktu untuk panjang spesimen 100 mm hasil simulasi .....	45
<b>Gambar 4.3</b> Kurva P1-P2 hasil eksperimen.....	46
<b>Gambar 4.4</b> Kurva P1-P2 hasil simulasi .....	47
<b>Gambar 4.5</b> Kurva tegangan-regangan specimen panjang 100 mm hasil eksperimen .....	47
<b>Gambar 4.6</b> Kurva tegangan-regangan untuk panjang spesimen 100 mm hasil simulasi.....	48
<b>Gambar 4.7</b> Grafik Sinyal Reflected terhadap Waktu.....	49
<b>Gambar 4.8</b> Perbandingan sinyal reflected antara spesimen tanpa dan dengan misalignment panjang spesimen 20 mm ..	50
<b>Gambar 4.9</b> Perbandingan sinyal reflected antara spesimen tanpa dan dengan misalignment Panjang spesimen 100 mm	50
<b>Gambar 4.10</b> Perbandingan sinyal transmitted terhadap waktu untuk semua variasi panjang.....	51
<b>Gambar 4.11</b> Perbandingan sinyal transmitted terhadap waktu antara spesimen dengan dan tanpa misalignment untuk spesimen dengan panjang 20 mm .....	52
<b>Gambar 4.12</b> Perbandingan sinyal transmitted terhadap waktu antara spesimen dengan dan tanpa misalignment untuk spesimen dengan panjang100 mm .....	52
<b>Gambar 4.13</b> Perbandingan kurva laju regangan semua variasi panjang .....	53

<b>Gambar 4.14</b> Kurva P1-P2 untuk spesimen panjang 100 mm.....	54
<b>Gambar 4.15</b> Hasil tangkapan layar dari rekaman simulasi pada spesimen uji. (a) sebelum deformasi (b) setelah deformasi. ....	55
<b>Gambar 4.16</b> Gambar skematik adhesive setelah dan sebelum berdeformasi (a).panjang spesimen 20 mm (b).panjang spesimen 100 mm .....	56
<b>Gambar 4.17</b> Perbandingan kurva tegangan-regangan untuk semua variasi panjang.....	58
<b>Gambar 4.18</b> Grafik modulus kombinasi terhadap panjang spesimen .....	59
<b>Gambar 4.19</b> Perbandingan kurva tegangan-regangan antara spesimen dengan dan tanpa misalignment (a).panjang spesimen 20mm (b).panjang spesimen 100mm .....	60

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Rincian spesimen yang digunakan pada pengujian .....	23
<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi striker, incident, dan transmitted bar .	23
<b>Tabel 3.2</b> Parameter epoxy yang digunakan pada simulasi..	34
<b>Tabel 4.1</b> Parameter adherend spesimen uji .....	57
<b>Tabel 4.2</b> Nilai modulus kombinasi untuk tiap variasi panjang .....	59
<b>Tabel 4.3</b> Nilai modulus kombinasi untuk spesimen dengan dan tanpa misalignment .....	61

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Sambungan *adhesive* merupakan sambungan yang menggunakan *adhesive* sebagai perekatnya. *Adhesive* merupakan material *non-metallic* yang dapat digunakan untuk menggabungkan dua material yang berbeda atau sejenis. Saat ini, penggunaan sambungan *adhesive* pada berbagai bidang sedang berkembang khususnya pada bidang otomotif karena sambungan *adhesive* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan jenis sambungan baut, las, keling, dan sambungan mekanis lainnya. Beberapa keunggulan tersebut diantaranya yaitu memiliki kemampuan untuk mendistribusikan tegangan secara merata, daya tahan yang tinggi terhadap kelelahan dan korosi, serta kemampuan menyambungkan material yang berbeda jenis.

Alat uji yang digunakan adalah split hopkinson pressure bar yang berfungsi untuk mengetahui sifat material pada pembebanan dinamis dengan laju regangan tinggi. Pembebanan dihasilkan dari tumbukan striker bar pada *incident* bar sehingga menghasilkan sinyal regangan *incident*. Sinyal *incident* kemudian merambat dan menembus spesimen uji menuju *transmitted* bar. Sinyal regangan yang mengenai spesimen sebagian dipantulkan sebagai sinyal *reflected*, dan sebagian diteruskan sebagai sinyal *transmitted*. Semua sinyal tersebut direkam oleh strain meter. Terdapat beberapa kriteria yang harus dimiliki oleh *split hopkinson pressure bar* antara lain *Incident* dan *transmission bar* harus difabrikasi dengan menggunakan material dan diameter yang sama, material yang digunakan oleh *incident* dan *transmission bar* harus memiliki kekuatan tinggi agar dapat mengaplikasikan teori gelombang elastis, *incident* dan *transmission bar* harus lurus, cukup panjang, serta mampu bergerak pada tumpuannya dengan gaya gesek yang seminimal mungkin untuk memastikan perambatan gelombang satu dimensi. Selain itu, *incident* dan *transmission*

*bar* harus memiliki rasio panjang-diameter minimal 20. Dan untuk menghindari terjadinya tumpang tindih gelombang pada *strain gage*, panjang dari *incident bar* harus, setidaknya, dua kali lebih panjang dibandingkan dengan panjang *striker bar*.

Berdasarkan standar ASTM, rasio panjang terhadap diameter spesimen uji SHPB berbentuk silinder pejal yang disarankan yaitu antara 0,5 hingga 2. Standar tersebut terlalu kecil untuk diterapkan pada spesimen *tubular lap joint*. Namun, spesimen *tubular lap joint* yang panjang sangat rawan terhadap *bending*, *barrelling*, dan *misalignment* yang mengakibatkan kesalahan pada kurva tegangan-regangan. Oleh karena itu, diperlukan analisa untuk mengetahui pengaruh rasio panjang-diameter spesimen terhadap kurva tegangan-regangan. Selain itu, spesimen *tubular lap joint* rentan terjadi *misalignment* yang diakibatkan oleh beberapa faktor, salah satunya akibat adanya *overlap*. Maka diperlukan analisa pengaruh *misalignment* terhadap respon tegangan-regangan *tubular adhesive lap joint*.

Berikut ini adalah beberapa penelitian terdahulu mengenai pengaruh panjang spesimen dan *misalignment* sambungan terhadap kekuatan atau kurva tegangan-regangan sambungan. **Srinivasan Dkk. (2011)** melakukan eksperimen terhadap spesimen pejal aluminium 6061 T6 dengan penampang berbentuk *circle*, *hexagon*, dan *rectangle* menggunakan alat uji *kolsky bar* untuk mengetahui pengaruh ukuran spesimen terhadap kurva tegangan-regangan spesimen. Hasil penelitian menyatakan bahwa untuk spesimen dengan penampang berbentuk *circle* dan *hexagon*, tidak memiliki perbedaan kurva tegangan-regangan yang signifikan. Sedangkan, spesimen dengan penampang berbentuk *rectangle* memiliki perbedaan kurva tegangan-regangan yang cukup signifikan yang mana perbedaan tersebut terletak pada initial slope kurva. Spesimen yang lebih panjang memiliki nilai initial slope kurva yang lebih tinggi. Sementara itu, **Polini Dkk. (2019)** melakukan penelitian dengan eksperimen untuk mengetahui pengaruh *misalignment adherend* terhadap

kekuatan *single-lap bonded joints*. Adherends dengan material aluminium AA6082 T651 disambungkan oleh adhesive AV138M. Kemudian, spesimen diuji tarik menggunakan mesin universal instron tipe 5586 dengan kecepatan 1mm/min. Pengujian dilakukan pada spesimen tanpa *misalignment* dan pada spesimen dengan *misalignment* sebesar  $1,20^\circ$ . Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa spesimen tanpa *misalignment* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang terdapat *misalignment*.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi terhadap *tubular adhesive lap joint* menggunakan ANSYS Explicit dynamics untuk mengetahui pengaruh panjang dan *misalignment* spesimen terhadap respon tegangan-regangan. Pada penelitian ini terdapat sembilan variasi panjang spesimen (14, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, dan 100 mm) dengan panjang *overlap* sambungan untuk masing-masing variasi sebesar 10 mm. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh panjang spesimen terhadap kurva tegangan-regangan dan untuk mendapatkan panjang spesimen terbaik yang dapat digunakan sebagai referensi ketika akan melakukan uji eksperimen *tubular adhesive lap joint*. Selain itu, dilakukan simulasi pada spesimen dengan *misalignment* maksimum sebesar  $8,57^\circ$  yang digabung dengan variasi panjang spesimen 20 dan 100 mm, lalu hasil dari simulasi tersebut dibandingkan dengan spesimen variasi panjang 20 dan 100 mm yang tanpa *misalignment*. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh *misalignment* terhadap kurva tegangan-regangan spesimen *tubular adhesive lap joint*.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berikut di bawah rumusan masalah pada tugas akhir ini:

1. Bagaimana pemodelan *finite element* untuk uji SHPB dengan spesimen *tubular adhesive lap joint* ?
2. Bagaimana pengaruh panjang sambungan terhadap nilai modulus *tubular adhesive lap joint* ?

3. Bagaimana pengaruh *misalignment* sambungan terhadap nilai modulus *tubular adhesive lap joint* ?
4. Bagaimana geometri atau panjang spesimen *tubular adhesive lap joint* pada uji SHPB untuk mendapatkan data uji yang valid ?

### 1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Diameter dan sifat material *adherend* homogen.
2. Variasi panjang spesimen diantaranya yaitu 14, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, dan 100 mm dengan rasio *resin-hardener* konstan 1:1.
3. Masing-masing spesimen dengan panjang 20 dan 100 terdapat dua variasi, yaitu spesimen tanpa *misalignment* dan spesimen yang terdapat *misalignment* dengan sudut *misalignment* sebesar  $8,57^\circ$ .
4. Panjang *overlap* sambungan sebesar 10 mm untuk masing-masing variasi panjang.
5. Gelombang yang merambat di dalam rangkaian *pressure bar* tidak terdispersi.
6. Pengaruh *misalignment pressure bar* diabaikan.
7. Pengaruh gesekan pada *pressure bar* diabaikan

### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu:

1. Membuat pemodelan *finite element* untuk uji SHPB dengan spesimen *tubular adhesive lap joint*.
2. Mengetahui pengaruh panjang sambungan terhadap nilai modulus *tubular adhesive lap joint*.
3. Mengetahui pengaruh *misalignment* spesimen terhadap nilai modulus *tubular adhesive lap joint*.
4. Menentukan geometri atau panjang spesimen *tubular adhesive lap joint* pada uji SHPB untuk mendapatkan data uji yang valid.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari tugas akhir adalah:

1. Sebagai dasar perencanaan geometri spesimen *tubular adhesive lap joint* untuk uji SHPB.
2. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian di kemudian hari yang berkaitan dengan penelitian *tubular adhesive lap joint*
3. Sebagai pengembangan pemahaman terhadap karakteristik *tubular adhesive lap joint*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Adhesive**

*Adhesive* merupakan campuran satu atau dua polimer organik yang dapat bereaksi secara kimia menghasilkan polimer baru yang memiliki kemampuan rekat. Pada fase *liquid*, *adhesive* mudah diaplikasikan pada permukaan *adherend*, kemudian *adhesive* mengeras sehingga *adherend* dan *adhesive* membentuk satu kesatuan yang padu. Dalam dunia industri, *adhesive* dapat didesain menyesuaikan dengan kekuatan yang dibutuhkan. Dibandingkan dengan sistem perekat lainnya, *adhesive* memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

1. *Adhesive* dapat mendistribusikan beban ke seluruh area sambungan
2. *Adhesive* mempunyai sifat *fatigue* yang baik
3. Nilai korosi rendah sehingga dapat mengurangi resiko korosi galvanik

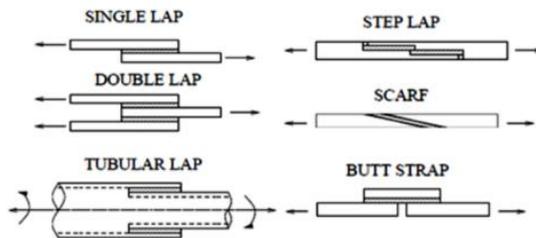
Properti seperti tingkat perawatan, kemampuan mengisi celah, kekakuan, kemampuan menahan beban, ketahanan terhadap suhu, dan *life-time* dari *adhesive* yang akan digunakan perlu diperhatikan agar keunggulan di atas tetap terjaga.

#### **2.2. Sambungan Adhesive**

Sambungan *adhesive* adalah metode untuk menggabungkan logam, plastik, keramik, dan komposit dimana *adhesive* ditempatkan di antara permukaan yang akan disatukan. *Adhesive* dapat membeku sehingga menjadi pengikat (Thiago, 2016). *Adhesive* pada umumnya memiliki nominal tegangan geser antara 1- 40 Mpa, tergantung dari beberapa faktor seperti geometri sambungan, temperatur, dan lain-lain. Modulus young pada *Adhesive* bervariasi dari 1 sampai 10.000 Mpa. Nilai tersebut jauh lebih kecil dibandingkan dengan baja yang memiliki kekuatan material sebesar 350 – 2000 MPa dan modulus young sebesar 200 Gpa.

Untuk mengompensasi dari perbedaan tersebut, diperlukan pemasangan bentuk geometri yang tepat pada sambungan *adhesive*.

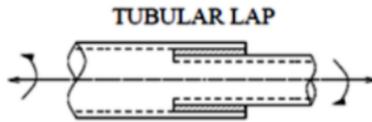
Sambungan *adhesive* yang ideal harus mampu mencegah kegagalan sambungan. Desain sambungan *adhesive* jenis *lap joint* yang paling umum digunakan dapat dilihat pada gambar 2.1. Desain sambungan yang sederhana membutuhkan biaya yang lebih kecil dan dapat berfungsi dengan baik pada tingkat beban yang rendah dan sederhana, sedangkan untuk tingkat beban yang tinggi, dibutuhkan desain sambungan yang lebih kompleks dan biaya yang lebih besar.



**Gambar 2.1** Desain sambungan *adhesive* yang umum digunakan

### 2.3. Tubular lap joint

*Tubular lap joint* merupakan jenis sambungan *adhesive* yang mana ikatan antara *adherend* dengan *adhesive* terjadi melalui *overlap*. Penggunaan sambungan tipe ini sangat luas, terutama untuk menyambungkan material atau komposit berbentuk silinder untuk mendapatkan struktur yang ringan. Dibandingkan dengan sambungan *adhesive* jenis lain, *tubular lap joint* mempunyai massa yang relatif lebih ringan. Hal tersebut karena *adherend*-nya berbentuk silinder berongga seperti yang terlihat pada gambar 2.2. Ketika tumbukan diberikan, maka tegangan yang terjadi pada sambungan *adhesive* merupakan tegangan geser.



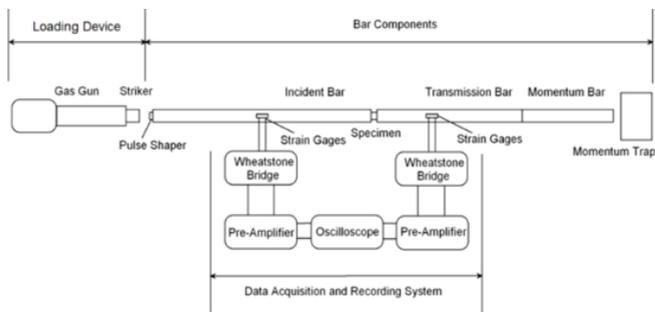
**Gambar 2.2** *Tubular lap joint*

Kekuatan sambungan *tubular lap joint* bertambah secara *non-linier* terhadap panjang *overlap*, tegangan tertinggi berada pada akhir sambungan, dan pertambahan panjang *overlap* pada sambungan tidak merubah kekuatan sambungan secara signifikan karena kerusakan sambungan dimulai saat tegangan menunjukkan nilai maksimal saat di ujung *overlap* dimana rekatan atau kekuatan sambungan dari *adhesive* terlampaui.

## 2.4. Komponen dan Prinsip Kerja *Split Hopkinson*

### *Pressure Bar*

*Split hopkinson pressure bar* (SHPB) merupakan alat uji yang berfungsi untuk mengetahui karakteristik atau sifat mekanis suatu material. Alat SHPB terdiri dari 3 komponen utama, yaitu *loading device*, *bar components*, dan *data acquisition and recording system* dengan ilustrasi yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Ilustrasi desain *split hopkinson pressure bar* (Chen & Song, 2011)

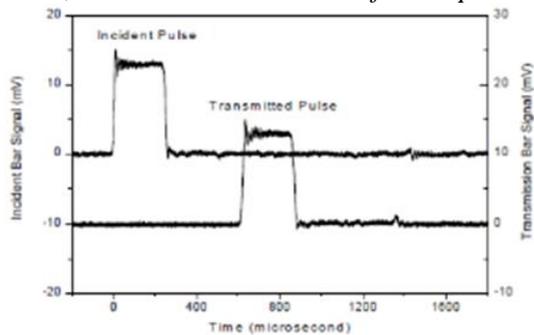
Metode pembebanan pada *split hopkinson pressure bar* saat ini merupakan pembebanan dinamis, dimana penumbuk (*striker bar*) digunakan untuk memberikan gaya tumbukan pada *incident bar*. Gaya tumbukan akan menghasilkan gelombang tegangan yang akan merambat menuju spesimen. Saat gelombang tegangan tersebut mencapai permukaan antara *incident bar* dengan spesimen, sebagian gelombang direfleksikan kembali ke *incident bar* dan sebagian gelombang lainnya ditransmisikan melalui spesimen menuju *transmitted bar*. Kurva tegangan-regangan dapat dihitung berdasarkan sinyal perambatan gelombang tegangan yang diukur dengan menggunakan *strain gage*.

Agar didapatkan hasil yang akurat, terdapat beberapa kriteria yang harus dimiliki oleh *split hopkinson pressure bar* antara lain *Incident* dan *transmitted bar* harus memiliki material dan diameter yang sama, *incident* dan *transmission bar* harus lurus, cukup panjang, serta mampu bergerak pada tumpuannya dengan gaya gesek yang seminimal mungkin untuk memastikan perambatan gelombang satu dimensi. Selain itu, *strain gage* perlu diinstalasi pada titik dengan jarak minimal dari kedua ujung *bar* sebesar sepuluh kali diameter *bar*, maka *incident* dan *transmission bar* harus memiliki rasio panjang-diameter minimal 20. Dan untuk menghindari terjadinya tumpang tindih gelombang pada *strain gage*, panjang dari *incident bar* harus, setidaknya, dua kali lebih panjang dibandingkan dengan panjang *striker bar*.

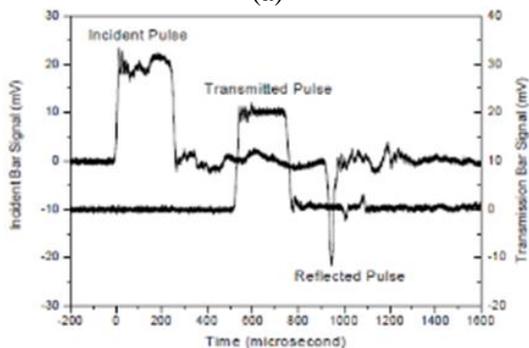
## **2.5. Kalibrasi dan Reduksi Data pada *Split Hopkinson Pressure Bar***

Sebelum digunakan, *split hopkinson pressure bar* perlu dikalibrasi terlebih dahulu. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk memeriksa kesejajaran sistem *bar* adalah dengan meluncurkan penumbuk pada *incident bar* yang bersentuhan langsung dengan *transmission bar* tanpa ada spesimen di antaranya. Penumbuk dan *incident bar* yang sejajar

akan menghasilkan sebuah *incident pulse* dengan profil trapesium seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.4(a). Apabila *incident bar* tidak sejajar dengan *striker*, *incident pulse* akan terdistorsi dengan *baseline* yang fluktuatif seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.4(b). Dikarenakan *transmission bar* bersentuhan langsung dengan *incident bar*, *incident pulse* dalam *incident bar* akan ditransmisikan ke dalam *transmission bar* tanpa adanya pulsa yang direfleksikan. Namun ketika terjadinya ketidaksejajaran antara *incident bar* dengan *transmission bar*, akan terbentuk sebuah *reflected pulse*.



(a)



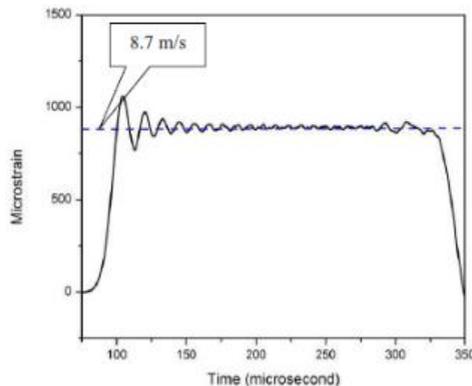
(b)

**Gambar 2.4** Gelombang tegangan dalam *bar components* yang (a).sejajar (b).tidak sejajar (Chen & Song, 2011)

Apabila sistem *bar* sudah sejajar, tegangan dan regangan *bar* dapat diprediksi berdasarkan kecepatan tumbukan,  $C_B$ . Oleh karena itu, sistem pengukuran dapat dikalibrasi dengan memeriksa hubungan antara kecepatan tumbukan dengan tegangan atau regangan *bar*. Untuk memperoleh nilai  $C_B$ , digunakan persamaan berikut:

$$C_B = \frac{2l}{\Delta t} \quad (2.1)$$

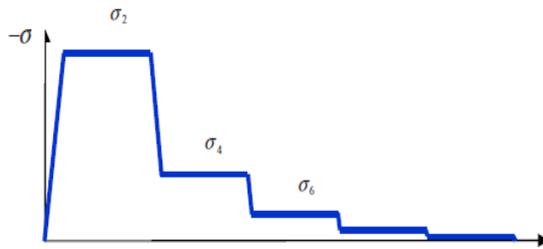
dimana  $l$  merupakan jarak antara *strain gage* dengan ujung spesimen, dan  $\Delta t$  merupakan interval waktu antara *incident pulse* dengan *reflected pulse*. Gambar 2.5 menunjukkan regangan aktual yang diukur dalam *incident bar* dan amplitudo yang diprediksikan dengan kecepatan penumbukan 8.7 m/s.



**Gambar 2.5** Kalibrasi amplitudo *incident pulse*  
(Chen & Song, 2011)

Persamaan di atas hanya dapat dipenuhi apabila penumbuk memiliki impedansi gelombang yang sama dengan *incident bar*. Impedansi gelombang yang tidak sesuai antara penumbuk dengan *incident bar* akan menghasilkan perubahan pada profil dan amplitudo dari *incident pulse*. Apabila

impedansi penumbuk lebih tinggi, *incident pulse* akan menunjukkan penurunan amplitudo secara progresif seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. Hal ini dikarenakan momentum penumbuk tidak dapat ditransferkan sepenuhnya pada *incident bar*.



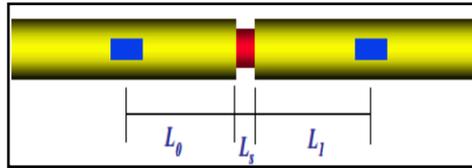
**Gambar 2.6** *Incident pulse* akibat impedansi yang berbeda antara penumbuk dengan *incident bar* (Chen & Song, 2011)

Penentuan titik mulai setiap pulsa dapat mempengaruhi kurva tegangan-regangan secara signifikan. Saat mensinkronisasikan ketiga sinyal, titik mulai *incident pulse* ( $T_I$ ) diperkirakan. Berdasarkan perkiraan titik mulai *incident pulse*, titik mulai *reflected pulse* ( $T_R$ ) dan *transmitted pulse* ( $T_T$ ) dapat ditentukan melalui persamaan:

$$T_R = T_I \frac{2L_0}{C_B} \quad (2.2)$$

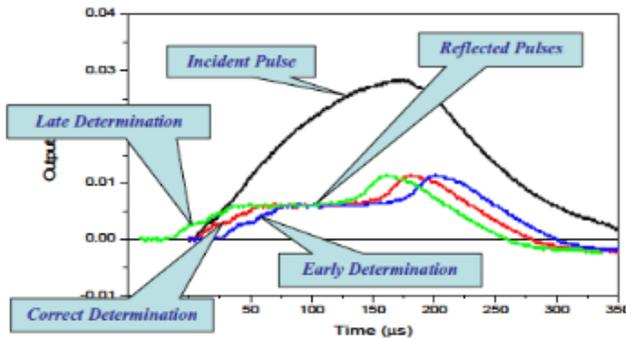
$$T_T = T_I \frac{L_0 + L_1}{C_B} + \frac{L_S}{C_S} \quad (2.3)$$

dimana  $L_0$  dan  $L_1$  merupakan jarak lokasi *strain gage* pada *incident bar* dan *transmission bar* ke permukaan spesimen secara berurutan seperti ditunjukkan pada gambar 2.7, sementara  $C_S$  merupakan kecepatan gelombang tegangan dalam spesimen.

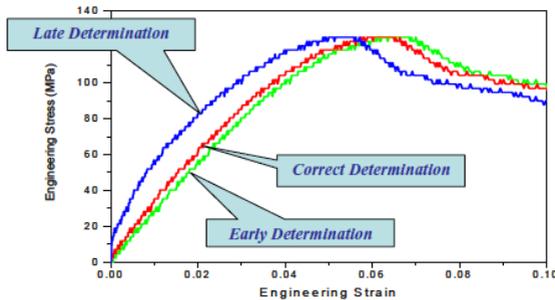


**Gambar 2. 7** Penentuan titik mulai  
(Chen & Song, 2011)

Gambar 2.8 menunjukkan contoh *reflected pulse* dengan penentuan titik mulai yang benar. Penentuan titik mulai yang benar akan mempengaruhi keseimbangan tegangan di sepanjang spesimen. Kesalahan titik mulai *reflected pulse* dapat mengakibatkan kesalahan perhitungan gaya pada ujung spesimen uji. Kesalahan titik mulai juga dapat mengakibatkan kesalahan pada kurva tegangan-regangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9 yang merupakan gambar perbandingan antara kurva tegangan-regangan dengan titik mulai yang salah dan benar.



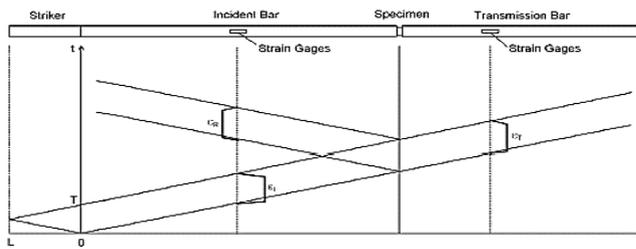
**Gambar 2.8** Penentuan titik mulai *reflected pulse*  
(Chen & Song, 2011)



**Gambar 2.9** Penentuan titik mulai kurva tegangan-regangan  
(Chen & Song, 2011)

## 2.6. Perhitungan Gelombang yang Merambat pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 2.5, strain gage harus diletakkan di tengah-tengah *incident* dan *transmitted* bar agar tidak terjadi tumpang tindih sinyal gelombang. Diagram posisi perambatan gelombang ditunjukkan pada gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Diagram posisi-waktu perambatan gelombang dalam *split hopkinson pressure bar*  
(Chen & Song, 2011)

Apabila penumbuk memiliki material dan diameter yang sama dengan *incident bar*, amplitudo tegangan ( $\sigma_i$ ) atau regangan ( $\epsilon_i$ ) dari pulsa *incident* yang dihasilkan oleh impact

penumbuk bergantung pada kecepatan tumbukan,  $v_{st}$ , seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \rho_B C_B v_{st} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \frac{v_{st}}{C_B} \quad (2.5)$$

dimana  $\rho_B$  dan  $C_B$  merupakan massa jenis dan kecepatan gelombang material *bar* secara berurutan.

Dengan asumsi bahwa gelombang tegangan merambat pada *incident bar* dan *transmission bar* tanpa adanya penyebaran gelombang, terdapat 3 pulsa regangan yang diukur seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11.  $v_1$  dan  $v_2$  dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$v_1 = C_B (\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (2.6)$$

$$v_2 = C_B \varepsilon_T \quad (2.7)$$

dimana  $\varepsilon_I$  merupakan nilai regangan incident,  $\varepsilon_R$  merupakan nilai regangan *reflected*, dan  $\varepsilon_T$  merupakan nilai regangan *transmitted*. Laju regangan rata-rata dan regangan dalam spesimen dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{C_B}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (2.8)$$

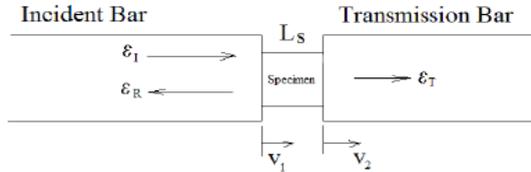
$$\varepsilon = \frac{C_B}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (2.9)$$

dimana  $L_s$  merupakan panjang awal spesimen. Tegangan pada kedua ujung spesimen dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_1 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (2.10)$$

$$\sigma_2 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B \cdot \varepsilon_T \quad (2.11)$$

dimana  $A_B$  dan  $A_S$  merupakan luas permukaan *bar* dan spesimen secara berurutan, dan  $E_B$  merupakan modulus young material *bar*.



**Gambar 2.11** Bagian pengujian *split hopkinson pressure bar* (Chen & Song, 2011)

Dengan mengasumsikan keseimbangan tegangan yang dapat dinyatakan sebagai:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad (2.12)$$

Maka diperoleh:

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (2.13)$$

Melalui persamaan tegangan dan regangan yang sebelumnya telah didefinisikan dapat disederhanakan menjadi:

$$\dot{\varepsilon} = -2 \frac{C_B}{L_s} \varepsilon_R \quad (2.14)$$

$$\varepsilon = -2 \frac{C_B}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (2.15)$$

$$\sigma = \frac{A_B}{A_S} E_B \varepsilon_T \quad (2.16)$$

Apabila tegangan spesimen tidak dalam keseimbangan yang sempurna, maka tegangan dalam spesimen dapat dihitung dengan mengambil nilai rata-rata tegangan pada kedua ujung spesimen yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_B}{A_s} \cdot E_B(\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (2.17)$$

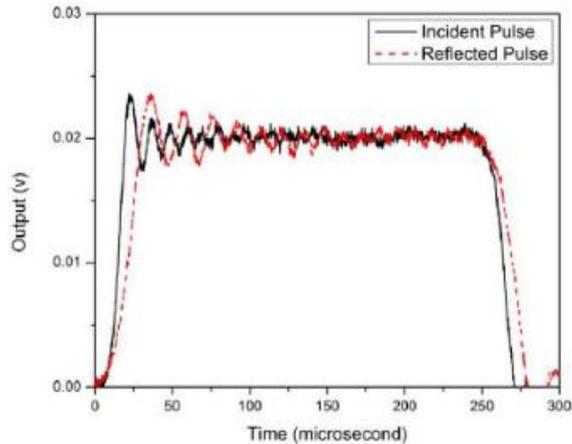
Semua persamaan di atas diperoleh dari konservasi massa dan momentum dengan asumsi perambatan gelombang satu dimensi.

## **2.7. Penyebaran Gelombang pada *Split Hopkinson Pressure Bar***

Osilasi seringkali terjadi sebagai akibat dari terjadinya penyebaran gelombang. Efek dari penyebaran gelombang akan terakumulasi selama gelombang merambat di dalam *bar*, dan akan menjadi lebih signifikan dengan bertambahnya diameter *bar*. Penyebaran gelombang telah diteliti secara ekstensif oleh Pochhammer-Chree. Solusi Pochhammer-Chree menunjukkan bahwa kecepatan perambatan gelombang tegangan berkurang dengan berkurangnya panjang gelombang. Dengan kata lain, gelombang frekuensi tinggi merambat lebih lambat dibandingkan dengan gelombang frekuensi rendah.

Dalam eksperimen menggunakan *split hopkinson pressure bar*, pulsa ideal yang dihasilkan oleh tumbukan pada *incident bar* terdiri dari beberapa spektrum frekuensi. Setiap komponen frekuensi memiliki kecepatan perambatannya masing-masing. Komponen pulsa dengan frekuensi yang lebih tinggi tertinggal oleh komponen pulsa dengan frekuensi yang lebih rendah setelah merambat dengan jarak tertentu. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya penyebaran gelombang seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12. *Incident pulse* dan *reflected pulse* pada gambar 2.12 diukur dengan menggunakan *strain gage* yang sama pada pertengahan *incident bar* sehingga

perbedaan yang ditunjukkan merupakan akibat dari penyebaran gelombang.



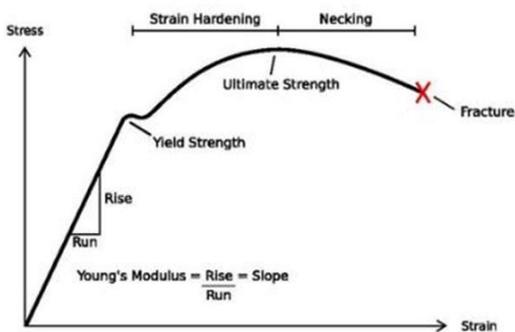
**Gambar 2.12** Penyebaran gelombang pada eksperimen *split hopkinson pressure bar* (Chen & Song, 2011)

## 2.8. Kurva Tegangan-Regangan

Kurva tegangan-regangan merupakan grafik pengukuran yang penting dari sifat mekanik material. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, tegangan yang didapatkan akan diplot seiring dengan regangan yang terjadi. Kurva tegangan-regangan setiap material mempunyai bentuk yang berbeda yang dipengaruhi oleh struktur dari material. (Jitendra Pratap Singh, 2016)

Kurva tegangan-regangan terbagi menjadi tiga *region* yaitu *linear elastic region*, *Strain hardening region*, dan *necking region* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Pada *linear elastic region* ini berlaku *Hooke's Law*, dimana tegangan sebanding dengan regangan. Pada wilayah tersebut terjadi deformasi elastis yang ditunjukkan dengan garis lurus yang disebut modulus young. Akhir area tersebut merupakan

titik inisiasi deformasi plastis yang didefinisikan sebagai *yield strength*. Pada *strain hardening region* yang dimulai ketika melewati titik *yield strength* sampai ke titik *ultimate strength* yang disebut *ultimate tensile strength* ditunjukkan dengan garis melengkung naik, dan area tersebut mengalami peningkatan tegangan karena bertambah panjangnya material. Kemudian, *necking region* yang dimulai ketika melewati titik *ultimate strength* sampai ke titik *fracture* yang ditunjukkan oleh garis melengkung menurun disebabkan oleh gaya tarikan yang menurun. Pada area tersebut, luas penampang material mengalami pengecilan hingga terjadi *fracture*.



**Gambar 2.13** Kurva tegangan-regangan

## 2.9. Modulus Geser dan Kekakuan

Modulus geser didefinisikan sebagai rasio perbandingan tegangan geser terhadap regangan geser. Selain itu, modulus geser diketahui juga sebagai modulus kekakuan dan dinyatakan sebagai  $G$ . Unit SI dari modulus geser adalah pascal (Pa). Modulus geser benda padat yang besar menunjukkan bahwa benda padat tersebut sangat kaku, dengan kata lain, gaya yang besar dibutuhkan untuk menghasilkan deformasi. Modulus geser didapatkan dengan mengukur deformasi benda padat yang diberi gaya sejajar terhadap salah satu permukaan dari benda padat, sementara gaya reaksi yang terjadi merupakan

gaya gesek antara permukaan benda padat yang dikenai gaya dengan permukaan yang bersentuhan dengan benda padat tersebut. Nilai modulus geser dirumuskan sebagai berikut:

$$G = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.18)$$

dimana G merupakan modulus geser,  $\sigma$  merupakan tegangan, dan  $\varepsilon$  merupakan regangan yang terjadi pada material yang diuji.

Sementara itu, kekakuan adalah kemampuan suatu material untuk menerima tegangan atau beban tanpa menyebabkan terjadinya deformasi atau defleksi. Modulus elastisitas material tidaklah sama dengan kekakuan material. Kekakuan adalah sifat struktural yang dipengaruhi oleh geometri spesimen serta bahan yang dikandungnya. Modulus geser adalah properti material atau kandungan pada material, dan tidak dipengaruhi oleh geometri spesimen. Nilai kekakuan pada pembebanan tarik atau tekan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$k = G \cdot \frac{A}{L} \quad (2.19)$$

dimana k merupakan kekakuan, A merupakan luas penampang material, dan L merupakan panjang dari material yang dihitung.

## **2.10. Simulasi ANSYS Explicit Dynamics**

ANSYS merupakan perangkat lunak yang berbasis metode lemen hingga. Pada penelitian ini digunakan explicit dynamic system karena simulasi yang digunakan merupakan beban impak dalam durasi yang pendek.

Eksperimen menggunakan SHPB dapat direkayasa ulang secara numerik dalam simulasi menggunakan parameter yang sama dengan eksperimen yang sudah ada, kemudian dilakukan verifikasi data untuk memvalidasi kebenaran

simulasi. Untuk mensimulasikan benda yang menerima tumbukan atau tegangan dinamis dapat digunakan simulasi dengan *ANSYS Explicit dynamics*. *Explicit Dynamics* dapat mensimulasikan peristiwa singkat yang menerima gaya dinamis yang *nonlinear* dan *transient*.

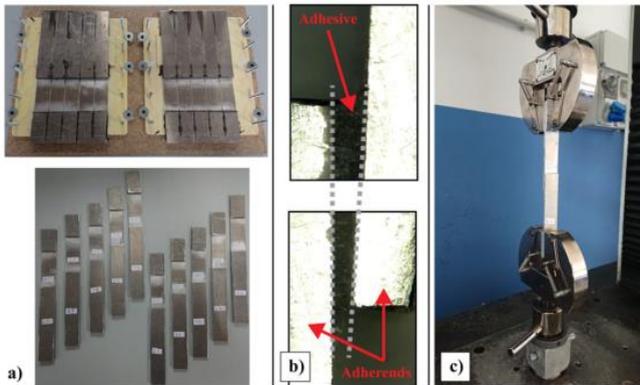
Dengan simulasi menggunakan ANSYS, dapat diketahui respon dari spesimen uji ketika diberikan pembebanan. Hal tersebut dikarenakan algoritma yang bekerja memprediksi respon yang kompleks, seperti deformasi material dan *body interaction* antar material. Dalam *explicit dynamics*, metode yang digunakan untuk menganalisa sistem yaitu dengan cara integrasi terhadap waktu. Metode analisa tersebut memiliki kelebihan yaitu tidak membutuhkan iterasi saat mengintegrasikan waktu, tidak membutuhkan uji konvergensi, dan tidak melakukan invers matriks kekakuan.

## 2.11. Penelitian Terdahulu

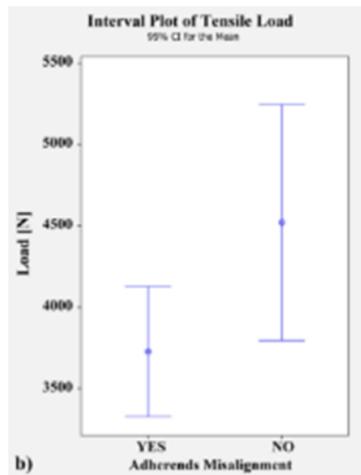
### 2.11.1. *Effect of adherends misalignment on the strength of single-lap bonded joints*

Penelitian ini dilakukan oleh **Polini Dkk. (2019)** yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh *misalignment adherend* terhadap kekuatan *single-lap bonded joints* dengan kedua *adherend* yang memiliki volume  $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$  dengan material yang digunakan adalah material aluminium AA6082 T651. Sambungan tersebut menggunakan *adhesive* tipe AV138 sebagai penyambungannya dengan panjang *overlap* dan ketebalan sambungan *adhesive* sebesar 25,5 mm dan 3 mm secara berturut-turut. Penelitian ini dilakukan dengan uji tarik menggunakan mesin universal Instron tipe 5586 dengan kecepatan 1 mm/min. Spesimen *single-lap bonded joints* yang siap untuk diuji ditunjukkan pada gambar 2.14(a) yang mana pada gambar tersebut terdapat sepuluh spesimen. Kemudian, untuk melihat ketepatan *misalignment adherend*, digunakan mikroskop optikal dengan hasil pengambilan gambar ditunjukkan pada gambar 2.14(b). Sementara itu,

gambar 2.14(c) menunjukkan spesimen yang sedang diuji menggunakan mesin uji tarik universal merk Instron tipe 5568.



**Gambar 2.14** (a). Beberapa spesimen *single lap joint* yang siap untuk diuji (b). Gambar yang diambil menggunakan mikroskop optikal untuk mengevaluasi ketebalan *adhesive* dan *misalignment* dari *adherend* (c) Spesimen ketika diuji



**Gambar 2.15** *Failure load* untuk dua spesimen dengan dan tanpa *misalignment*

Gambar 2.15 menunjukkan bahwa spesimen tanpa *misalignment* memiliki *failure load* rata-rata sebesar 4500 N yang mana nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang terdapat *misalignment* yang memiliki *failure load* rata-rata sebesar 3750 N. Hal tersebut menunjukkan bahwa spesimen tanpa *misalignment* lebih kuat dibandingkan dengan spesimen yang terdapat *misalignment*.

### 2.11.2. Effect of Specimen Size in the Kolsky Bar

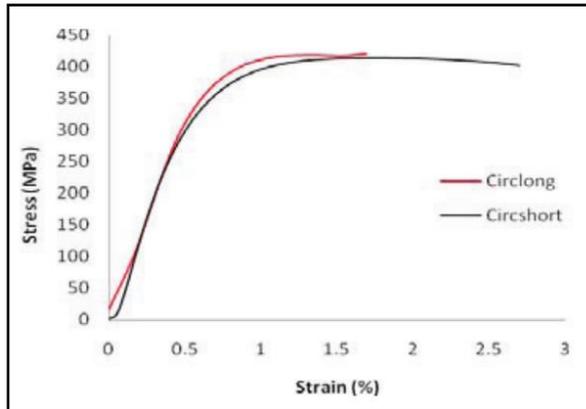
Penelitian ini dilakukan **Srinivasan Dkk. (2011)** yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran spesimen terhadap kurva tegangan-regangan spesimen. Penelitian dilakukan dengan eksperimen menggunakan alat uji *kolsky bar*. *Kolsky bar* merupakan alat uji yang terdiri dari dua batang silinder. Cara kerja dari alat uji tersebut yaitu dengan cara meluncurkan peluncur yang akan menumbuk batang, dan akan menghasilkan gelombang yang akan ditransmisikan ke spesimen uji. Spesimen uji yang digunakan merupakan spesimen pejal dengan jenis penampang dan panjang spesimen secara rinci ditunjukkan pada tabel 2.1. Material yang digunakan pada pengujian adalah aluminium 6061 T6 dengan laju regangan konstan sebesar 1100 – 1300/s.

**Tabel 2. 1** Rincian spesimen yang digunakan pada pengujian

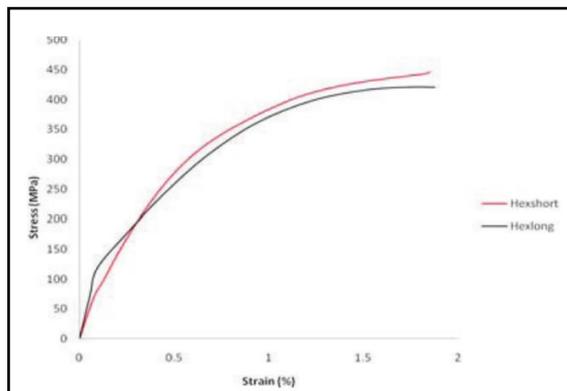
Cross-section of the Specimen	Length of the Specimen	$\sqrt{J/A}$	Nomenclature
Hexagon	5,5 mm	1,4	Hexshort
	8 mm	2	Hexlong
Rectangle	6 mm	1,5	Recshort
Edge Size: 6,5 mm x 12,7 mm	8 mm	1,9	Reclong
Circle	6,4 mm	1,4	Cirshort
	Diameter: 12,7 mm	9 mm	2

Perbandingan kurva tegangan-regangan antar spesimen panjang dan pendek pada spesimen yang memiliki bentuk penampang yang sama ditunjukkan pada gambar 2.16 untuk

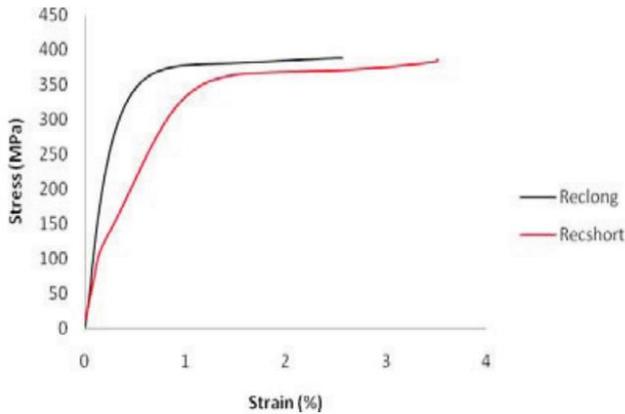
penampang circle, gambar 2.17 untuk penampang rectangle, dan gambar 2.18 untuk penampang circle.



**Gambar 2.16** Pengaruh panjang spesimen dengan bentuk penampang *circle*



**Gambar 2. 17** Pengaruh panjang spesimen dengan bentuk penampang *hexagon*



(c)

**Gambar 2. 18** Pengaruh panjang spesimen dengan bentuk penampang *rectangle*

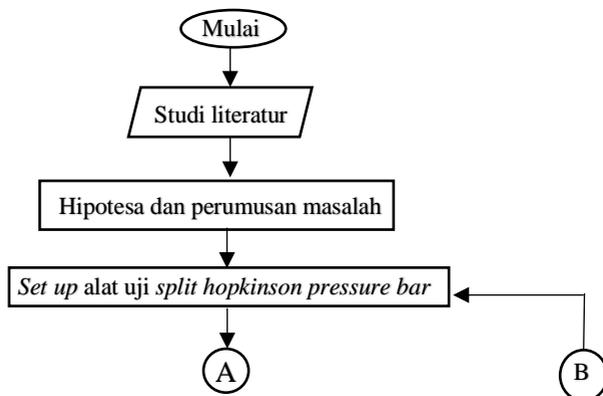
Gambar 2.16, 2.17, dan 2.18 menunjukkan kurva tegangan-regangan untuk spesimen dengan penampang tertentu. Dalam gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk penampang berbentuk circle dan hexagon, perbedaan *initial slope* kurva tegangan-regangan terhadap panjang spesimen tidak signifikan. Sementara untuk spesimen uji dengan penampang rectangle, perbedaan *initial slope* kurva tegangan-regangan cukup signifikan yang mana spesimen yang lebih panjang memiliki initial slope kurva tegangan-regangan yang lebih kecil.

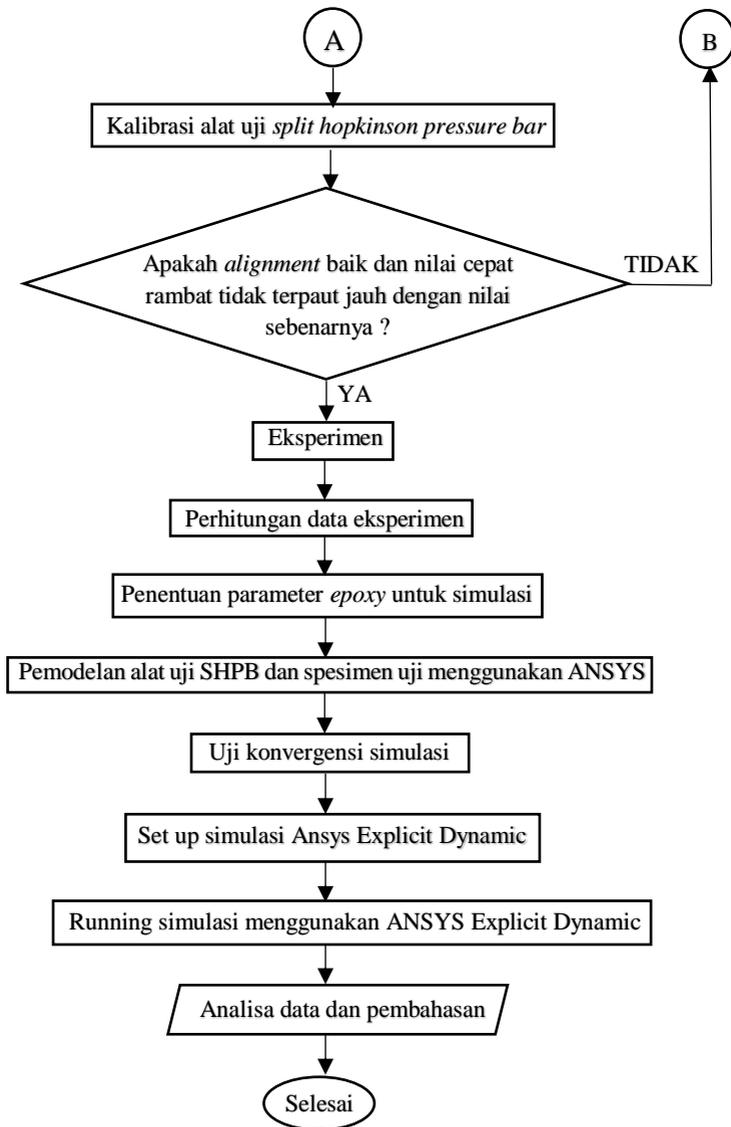
### BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh panjang dan *misalignment* sambungan terhadap nilai kekakuan *tubular adhesive lap joint*. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *software ANSYS Explicit dynamics*, selain itu dilakukan juga eksperimen untuk memvalidasi data hasil simulasi. Alat uji eksperimen yang digunakan adalah *split hopkinson pressure bar*. Perumusan masalah pada penelitian ini yaitu bagaimana pengaruh panjang serta *misalignment* spesimen *tubular adhesive lap joint* terhadap modulus spesimen. Nilai modulus didapatkan dari hasil estimasi *initial slope* kurva tegangan-regangan yang didapatkan dari simulasi menggunakan *ANSYS Explicit dynamics* dan serangkaian pengujian menggunakan alat uji SHPB serta perhitungan data menggunakan *software MATLAB* dan *microsoft excel*.

#### 3.1. Flowchart Penelitian

Tahap-tahap yang dilakukan pada penelitian ini digambarkan melalui *flowchart* yang ditunjukkan pada gambar 3.1.





**Gambar 3.1** Flowchart penelitian

Studi literatur merupakan tahap pertama yang dilakukan dalam penelitian ini untuk mendapatkan topik penelitian dan mencari referensi yang berkaitan dengan penelitian ini. Studi literatur dan referensi yang digunakan bersumber dari buku teks dan jurnal ilmiah. Materi yang diperoleh melalui studi literatur terdiri atas dasar teori *adhesive, lap joint adhesive*, alat uji *split hopkinson pressure bar*, simulasi *explicit dynamics* pada ANSYS, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan tugas akhir ini. Hasil studi literatur telah disampaikan secara rinci pada bab ii.

Setelah studi literatur, tahap selanjutnya yaitu membangun hipotesa. Hipotesa yang dibangun pada penelitian ini adalah seberapa besar pengaruh panjang dan *misalignment* sambungan terhadap respon tegangan-regangan *tubular adhesive lap joint*. Dari hipotesa tersebut, didapatkan perumusan masalah yaitu bagaimana mendapatkan kurva tegangan-regangan pada *tubular adhesive lap joint* dari data hasil simulasi dan mencari pengaruh panjang serta *misalignment* spesimen terhadap kurva tegangan-regangan *tubular adhesive lap joint* dengan menggunakan *software ANSYS* untuk simulasi dan alat uji *split hopkinson pressure bar* untuk eksperimen yang mana data hasil eksperimen digunakan sebagai pembandingan data hasil simulasi secara kualitatif.

Kemudian tahap selanjutnya yaitu melakukan eksperimen yang dimulai dengan *set up* alat uji yang bertujuan meyakinkan bahwa hasil pengujian memiliki angka yang benar, dan alat uji bekerja dengan baik. Langkah-langkah yang dilakukan dalam *set up* alat uji yaitu memeriksa *misalignment* antar *bar*, mengatur posisi *striker bar, incident bar*, dan rangka pengait *striker bar*, memeriksa posisi dari *strain gage*, serta melakukan *balance* terhadap *Dynamic strain meter*. Penjelasan lebih rinci mengenai *set up* alat uji terletak pada subbab 3.2.

Setelah *set up* alat uji, dilakukan kalibrasi dengan cara membandingkan cepat rambat dari hasil pengujian dan

kemampuan cepat rambat material yang sebenarnya. Proses kalibrasi dilakukan dengan melakukan pembebanan pada *input bar* tanpa adanya spesimen yang bertujuan untuk memastikan peneliti terkait akurasi data yang akan keluar pada proses pengukuran. Penjelasan lebih rinci mengenai proses kalibrasi terletak pada subbab 3.3.

Tahap selanjutnya yaitu eksperimen yang dilakukan pada *tubular adhesive lap joint* dengan *adherend*-nya adalah aluminium 6061 berbentuk silinder berongga menggunakan alat uji *split hopkinson pressure bar*. Tahapan eksperimen yaitu persiapan spesimen yang akan diuji, pengujian spesimen, dan mendapatkan data hasil pengujian. Penjelasan lebih rinci mengenai tahap eksperimen terletak pada subbab 3.4.

Setelah eksperimen, dilanjutkan dengan perhitungan data hasil eksperimen yang berupa kurva regangan terhadap waktu dihitung menggunakan persamaan-persamaan yang sudah dijelaskan di dasar teori untuk mendapatkan kurva regangan-tegangan. Tahap-tahap perhitungan data dijelaskan lebih rinci pada subbab 3.5.

Kemudian tahap selanjutnya yaitu melakukan simulasi menggunakan ANSYS *explicit dynamics* untuk mengetahui pengaruh panjang dan *misalignment* sambungan terhadap respon tegangan-regangan *tubular adhesive lap joint* dalam kondisi yang ideal. Hasil simulasi lebih akurat dibandingkan dengan eksperimen karena pada proses simulasi mengabaikan gangguan-gangguan yang ditemui pada uji eksperimen. Pada proses simulasi, akan dihasilkan sinyal regangan *incident*, *reflected*, dan *transmitted* sebagai fungsi dari waktu. Simulasi dimulai dengan penentuan nilai parameter *epoxy* pada ANSYS *engineering data* yang mengacu pada data nilai parameter *epoxy* sebenarnya yang terdapat pada paper peneliti lain. Setelah penentuan parameter, dilanjutkan dengan pemodelan alat uji SHPB dan spesimen uji menggunakan *Spaceclaim*. Setelah itu, melakukan uji konvergensi dengan menentukan *element size* pada *meshing* untuk menurunkan nilai error yang

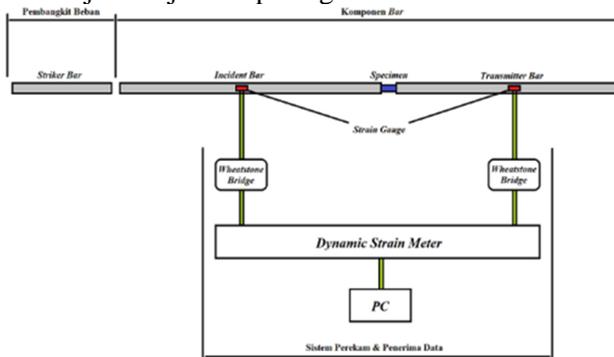
terjadi pada simulasi. Kemudian *set up* simulasi, dan yang terakhir yaitu *running* simulasi untuk mendapatkan data regangan pada input dan output bar. Setelah didapatkan, data hasil simulasi akan dihitung menggunakan microsoft excel. Hasil perhitungan yaitu berupa kurva laju regangan, *compressive force*, dan tegangan-regangan.

Setelah dihitung, data hasil simulasi akan dibandingkan dengan data hasil eksperimen untuk memverifikasi hasil simulasi. Setelah itu, dilanjutkan dengan menganalisa data hasil simulasi untuk mengetahui pengaruh panjang dan *misalignment* spesimen terhadap respon tegangan-regangan *tubular adhesive lap joint*.

Dari hasil analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan akan dibuat kesimpulan dari penelitian ini. Kesimpulan menjawab tujuan penelitian serta memaparkan poin penting pembahasan hasil simulasi. Selain itu, akan dibuat juga saran untuk penelitian selanjutnya agar didapatkan hasil yang lebih baik.

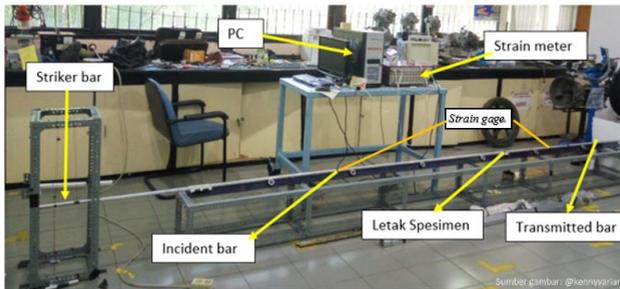
### 3.2. *Set up* Alat Uji *Split Hopkinson Pressure Bar*

*Set up* alat uji dilakukan untuk memastikan bahwa alat dapat bekerja dengan baik. Alat uji yang digunakan pada penelitian ini adalah *split hopkinson pressure bar* dengan skema alat uji ditunjukkan pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Skema alat uji *split hopkinson pressure bar*

Alat uji *split hopkinson pressure bar* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.3 yang mana alat tersebut terdiri dari beberapa komponen diantaranya *incident bar*, *striker bar*, *transmitted bar*, *strain gages*, *dynamic strain meter*, dan *Personal Computer (PC)*. Sementara itu, untuk spesifikasi dari *striker*, *incident*, dan *transmitted bar* ditunjukkan pada tabel 3.1.



**Gambar 3.3** Alat uji *split hopkinson pressure bar*

**Tabel 3.1** Spesifikasi *striker*, *incident*, dan *transmitted bar*

Komponen	Bahan	Geometri	Dimensi	
			Panjang(mm)	Diameter(mm)
<i>Striker bar</i>	Alumunium AISI 6061	Silinder pejal	200 mm	L1 = 14 L2 = 20
<i>Incident bar</i>	Alumunium AISI 6061	Silinder pejal	3000 mm	20
<i>Transmitted bar</i>	Alumunium AISI 6061	Silinder pejal	1500 mm	20

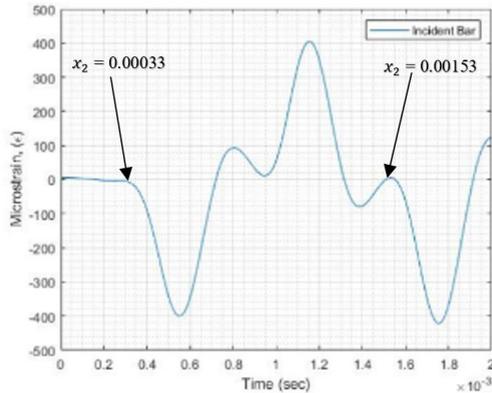
*Set up* alat uji dimulai dengan diaturnya posisi rangka yang digunakan untuk menggantung *striker bar* agar berada pada posisi yang sudah diberi tanda, selain itu benang pengikat *striker* dipastikan tidak kusut, dan *striker bar* dipastikan berada pada ketinggian yang telah ditentukan yaitu dengan diletakkannya *striker bar* di belakang penahan. Kemudian, posisi dari *incident bar* juga diatur hingga berada pada posisi yang sudah diberi tanda. Pengaturan-pengaturan tersebut

dilakukan agar pada saat tumbukan terjadi *alignment* antara *striker* dengan *incident bar* dan kecepatan tumbukan sesuai dengan yang diinginkan, yaitu sebesar 1,21 m/s.

*Set up* alat uji selanjutnya yaitu pemasangan *strain gage*. *Strain gage* dipasang di tengah *incident* dan *transmitted bar* untuk mencegah terjadinya tumpang tindih sinyal. *Strain gage* merupakan komponen elektronika yang dipakai untuk mengukur tekanan (deformasi atau regangan). Alat ini berbentuk kawat logam yang bersifat insulatif yang ditempel pada benda yang akan diukur tekanannya, dan tekanan tersebut berasal dari pembebanan. Prinsip *strain gage* adalah jika tekanan pada benda berubah, maka kawat akan terdeformasi, dan tahanan listrik alat ini akan berubah. Perubahan tahanan listrik ini akan dimasukkan ke dalam rangkaian *wheatstone bridge* yang kemudian akan diketahui berapa besar tahanan pada *strain gage*.

### **3.3. Kalibrasi Alat Uji *Split Hopkinson Pressure Bar***

Kalibrasi dilakukan untuk memastikan alat uji *split hopkinson pressure bar* berfungsi dengan baik dengan cara membandingkan cepat rambat hasil pengujian dengan cepat rambat sebenarnya yang dimiliki material. Jika perbedaan nilainya tidak berbeda terlalu jauh, maka alat masih berfungsi dengan baik. Proses kalibrasi dilakukan dengan meluncurkan *striker bar* pada *incident bar* yang bersentuhan langsung dengan *transmitted bar* tanpa ada spesimen di antara *incident* dengan *transmitted bar*. Dari proses tersebut akan didapatkan kurva regangan terhadap waktu seperti yang terlihat pada gambar 3.4 yang akan digunakan dalam perhitungan cepat rambat gelombang hasil pengujian. Hasil dari perhitungan tersebut akan dibandingkan dengan hasil perhitungan cepat rambat yang dimiliki material. Jika perbedaan terjadi di bawah 5%, maka hasil kalibrasi tersebut menunjukkan bahwa alat uji berfungsi dengan baik.



**Gambar 3.4** Gelombang regangan pada *incident bar* hasil pengujian

Cepat rambat gelombang hasil pengujian didapatkan melalui perhitungan di bawah ini :

$$C_0 = \frac{2 \cdot L}{\Delta t}$$

$$C_b = \frac{L}{\Delta t} = \frac{2.3 \text{ m}}{(0.00153 - 0.00033) \text{ s}} = \frac{6 \text{ m}}{0.0012 \text{ s}} = 5000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

dimana  $\Delta t$  merupakan waktu gelombang regangan merambat pada *incident bar*, dan  $L$  merupakan panjang dari *incident bar*. Kemudian, cepat rambat sebenarnya,  $C_0$ , yang dimiliki material didapatkan melalui perhitungan di bawah ini:

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

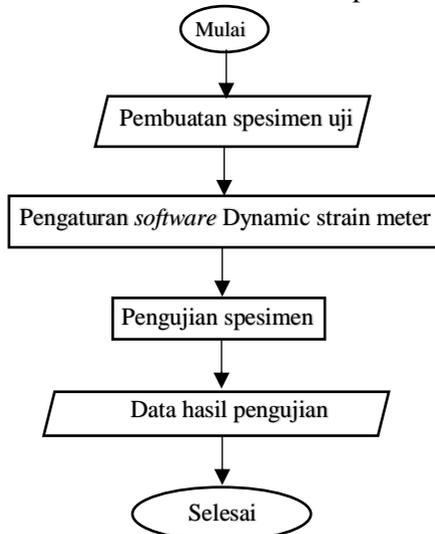
$$C_0 = \sqrt{\frac{68900000000}{2700}} = 5051.585743 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Kemampuan perambatan gelombang pada material sebesar 5051.585 m/s, sedangkan cepat rambat gelombang pada material dari hasil pengujian kalibrasi sebesar 5000 m/s. Selisih antara cepat rambat gelombang hasil pengujian dengan cepat rambat gelombang yang dimiliki material sebesar 1% atau kurang dari 5%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa alat uji masih berfungsi dengan baik.

### 3.4. Eksperimen

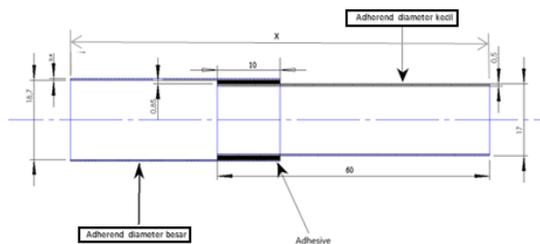
Setelah selesai *set up* dan kalibrasi alat uji, tahap penelitian selanjutnya yaitu eksperimen yang terdiri dari beberapa tahap, yaitu mengatur *software Dynamic strain meter*, mengambil data melalui penumbukan *incident bar* dengan menggunakan *striker bar*, dan mendapatkan data hasil penumbukan berupa kurva regangan terhadap waktu yang direkam oleh *Dynamic strain meter*.

Berikut di bawah ini *Flowchart* tahapan eksperimen :



**Gambar 3.5** *Flowchart* eksperimen

Tahap pertama eksperimen yaitu pembuatan spesimen uji *tubular adhesive lap joint* yang terdiri dari beberapa tahap, diantaranya yaitu pemotongan spesimen, penimbangan *resin-epoxy*, serta penyambungan *adherend*. Spesimen *tubular adhesive lap joint* terdiri dari dua *adherend* yang disambungkan oleh *adhesive*. *Adhesive* yang digunakan adalah *adhesive* tipe *epoxy* yang dicampur dengan *hardener* dengan perbandingan campuran 1:1. *Adhesive* sendiri memiliki daya tahan terhadap temperatur sebesar 120°C dengan kekuatan tarik *adhesive* > 20,68 Mpa serta waktu kering selama 3 jam. Kemudian *adherend* yang digunakan adalah pipa berongga alumunium AISI 6061 yang terdiri dari dua *adherend* dengan panjang dan diameter yang berbeda. *Adherend* 1 memiliki panjang 50 mm, diameter luar 19,7 mm, dan diameter dalam 18,5 mm. Sedangkan *adherend* 2 memiliki panjang 60 mm, diameter luar 17 mm, dan diameter dalam 16 mm. Geometri dua dimensi dari *tubular adhesive lap joint* ditunjukkan pada gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Geometri dua dimensi *tubular adhesive lap joint*

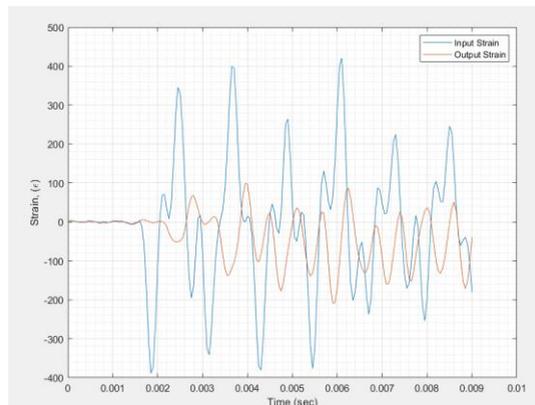
Setelah pembuatan spesimen dan sebelum dilakukan pengujian, dilakukan pengaturan *software Dynamic strain meter* terlebih dahulu. Pengujian dimulai dengan dilepaskannya striker bar dari penahan. Data yang dihasilkan dari pengujian disimpan serta dikonversi ke dalam bentuk *file excel*. Hal ini perlu dilakukan untuk memudahkan langkah perhitungan data pada MATLAB.

### 3.5. Perhitungan Data Hasil Eksperimen

Hasil pengukuran yang didapatkan dihitung agar didapatkan data yang informatif dengan tampilan grafik. Pada eksperimen ini digunakan *software* MATLAB untuk menghitung data. Berikut dibawah ini dijabarkan tahapan dalam perhitungan data hasil pengujian menggunakan *software* MATLAB:

a. Data regangan hasil pengujian

Hasil dari pengukuran menggunakan alat uji *split hopkinson pressure bar* adalah kurva regangan terhadap waktu pada *incident* dan *transmitted bar* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7.

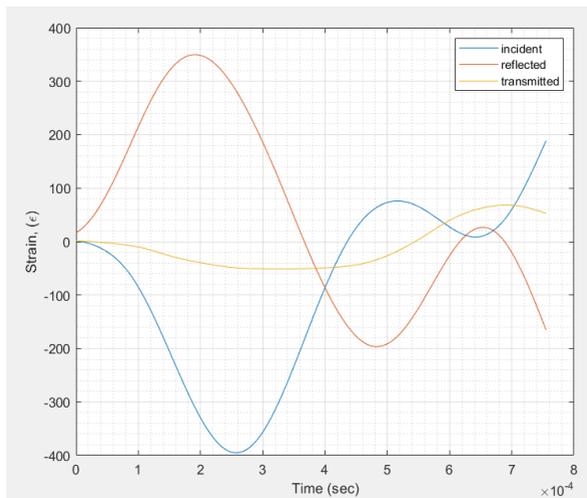


**Gambar 3.7** Kurva regangan terhadap waktu hasil dari pengukuran

Pada eksperimen yang menggunakan spesimen uji dengan panjang sambungan sebesar 100 mm didapatkan kurva hasil pengukuran seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7. Dapat dilihat dari kurva tersebut, besar regangan *incident* maksimum sebesar -388.9 microstrain, regangan *reflected* 345.4 microstrain, dan regangan *transmitted* -50.88 microstrain.

b. Trim

Kurva regangan terhadap waktu yang diperoleh, dilakukan *trim* untuk memperoleh kurva regangan *incident*, *reflected*, dan *transmitted* yang semula pada rentang waktu berbeda menjadi satu rentang waktu yang sama. Kurva ini, yang ditunjukkan pada gambar 3.8, digunakan sebagai data pembentukan grafik P1 & P2 dan kurva tegangan-regangan.

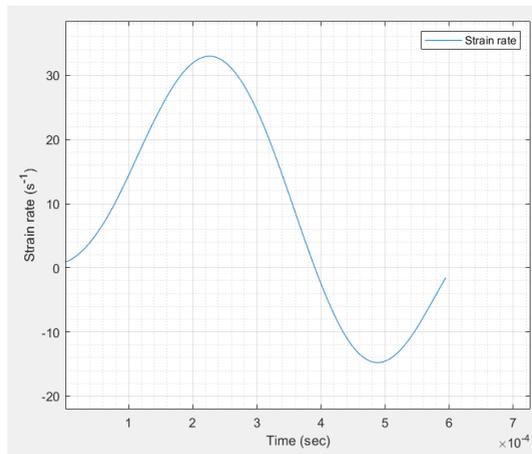


**Gambar 3.8** Kurva hasil pemotongan kurva *incident*, *reflected*, dan *transmitted strain*

c. Kurva laju regangan

Kurva laju regangan dapat dilihat pada gambar 3.9. Pada gambar tersebut, terlihat bahwa laju regangan mula-mula naik, ini menunjukkan adanya pembebanan kompresi pada spesimen karena adanya penumbukan oleh *striker bar*. Selanjutnya laju regangan mengalami penurunan hingga mengalami ekspansi yang ditunjukkan dengan nilai laju regangan yang negatif. Akan tetapi, eksperimen ini dilakukan dengan meninjau pembebanan dinamis yang

berupa kompresi saja sehingga yang ditinjau dari kurva laju regangan tersebut adalah laju regangan yang mempunyai nilai positif.



**Gambar 3.9** Grafik laju regangan terhadap waktu pada percobaan sambungan *adhesive* dengan panjang sambungan sebesar 100 mm.

*Tubular adhesive lap joint* dengan panjang *overlap* sambungan sebesar 10 mm diuji pada temperatur ruang menggunakan alat uji *split hopkinson pressure bar* dengan besar laju regangan terhadap waktu yang dapat dilihat pada gambar 3.9. Besarnya laju regangan tersebut dipengaruhi oleh kecepatan tumbuk dari *striker bar*. Pengujian ini dilakukan dengan kecepatan tumbuk sebesar 1,21 m/s, dan dari tumbukan *striker bar* tersebut didapatkan nilai laju regangan maksimal sebesar  $32.98\text{s}^{-1}$ .

Dalam pengukuran yang ideal, laju regangan kerja harus konstan selama pembebanan, namun kondisi tersebut sulit didapatkan dalam praktiknya. Setelah melakukan perhitungan didapatkan bahwa laju regangan selalu berubah selama pembebanan seperti yang ditunjukkan pada

gambar 3.9. Namun laju regangan konstan terjadi dalam waktu singkat di dekat titik maksimumnya. Oleh karena itu, dalam eksperimen ini, regangan ditentukan pada titik maksimumnya.

d. Grafik tegangan-regangan

Pada proses ini, data hasil *trim* akan dibentuk menjadi grafik tegangan-regangan melalui persamaan yang telah dijelaskan pada tinjauan pustaka. Untuk perhitungan besar tegangan ( $\sigma_n$ ) didapatkan dengan persamaan berikut :

$$\sigma_n = E_b \frac{A_b}{A_s} \varepsilon_{T(t)}$$

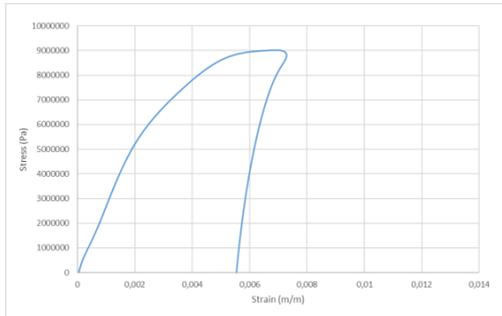
Pada eksperimen ini, *young's modulus bar* ( $E_b$ ) merupakan *young's modulus* alumunium AISI 6061 yaitu sebesar 69 GPa. Sedangkan luas permukaan *bar* ( $A_b$ ) yaitu sebesar  $1.227 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ , sementara  $A_s$  merupakan luas permukaan spesimen yang bersentuhan langsung dengan *transmitted* atau *incident bar*. Besar regangan *transmitted* dapat dilihat pada kurva yang telah di-trim pada gambar 3.8.

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 ( $C_0$ ) telah didapatkan nilainya sebesar 5000 m/s, sedangkan  $L_s$  merupakan panjang total spesimen uji dimana pada eksperimen yang telah dilakukan panjang spesimen uji sebesar  $100 \text{ mm} \pm 2$ . Besar regangan *reflected* dapat dilihat pada kurva yang telah di-trim pada gambar 3.8.

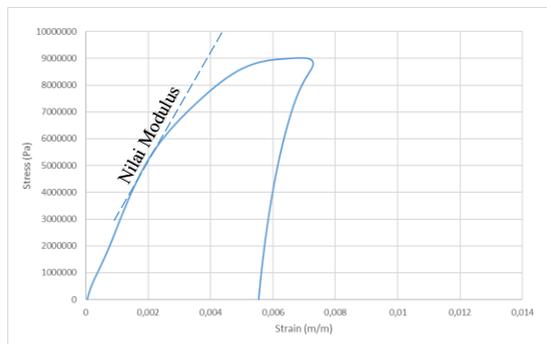
Dengan memasukkan persamaan di atas, didapatkan nilai tegangan dan regangan dari hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 3.10.



**Gambar 3.10** Contoh kurva hasil perhitungan tegangan dengan regangan pada percobaan dengan panjang sambungan 100 mm

e. Nilai modulus kombinasi

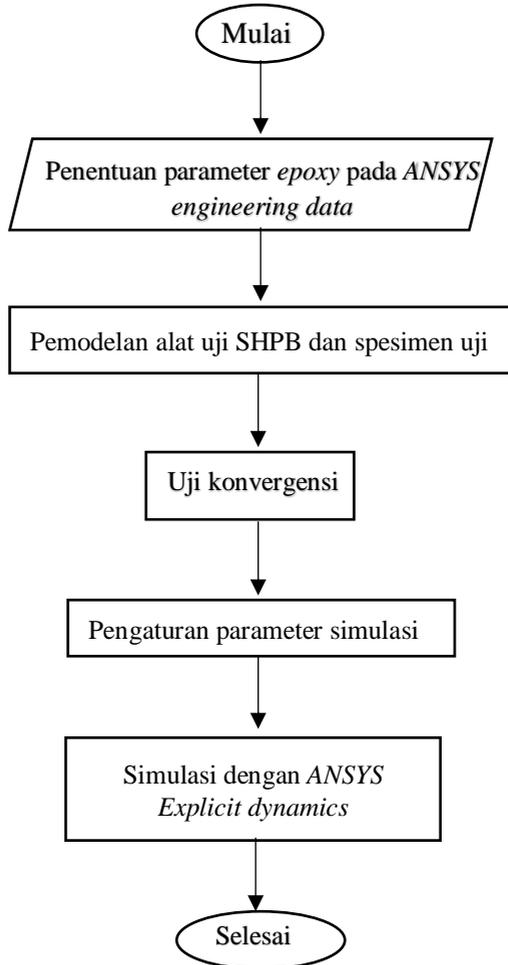
Setelah didapatkan kurva tegangan-regangan, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai modulus. Nilai modulus disini merupakan *initial slope* dari kurva tegangan-regangan. Gambar 3.11 merupakan contoh nilai *initial slope* dari kurva tegangan-regangan pada pengujian dengan panjang sambungan sebesar 100 mm. Dari kurva tersebut didapatkan nilai modulus sebesar 3 GPa.



**Gambar 3.11** Contoh estimasi nilai modulus

### 3.6. Simulasi menggunakan ANSYS

Tahap-tahap simulasi menggunakan ANSYS digambarkan melalui sebuah flowchart yang ditunjukkan pada gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Flowchart simulasi

Tahap awal simulasi dimulai dengan penentuan parameter *epoxy* pada *Ansys engineering data*. Penentuan nilai parameter *epoxy* bertujuan agar nilai parameter *epoxy* pada simulasi mendekati nilai parameter *epoxy* yang digunakan pada eksperimen. Dikarenakan pabrik pembuat *epoxy* yang digunakan pada eksperimen tidak mencantumkan parameter *epoxy* yang diperlukan untuk simulasi, maka penentuan dilakukan dengan mengacu pada data *epoxy* yang terdapat pada penelitian yang telah dilakukan peneliti lain. Parameter *epoxy* yang digunakan pada simulasi ini disajikan pada tabel 3.2.

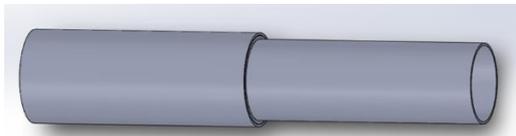
**Tabel 3.2** Parameter *epoxy* yang digunakan pada simulasi

No.	Properties	Values
1.	<i>Density</i>	1190 kg/m <sup>3</sup>
2.	<i>Shear modulus</i>	9 x 10 <sup>8</sup> Pa
3.	<i>Instantaneous Shear modulus</i>	1,9 x 10 <sup>8</sup> Pa
4.	C1	2270 m/s

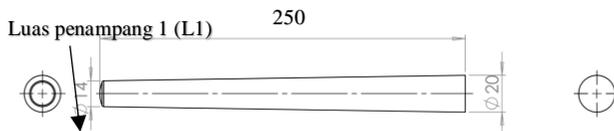
Nilai *density* dan C1 didapatkan dari data *epoxy* pada penelitian yang dilakukan oleh **Jeniffer L. Jordan Dkk. (2010)**, sementara nilai *shear modulus* didapatkan dari data *epoxy* pada penelitian yang dilakukan oleh **Yohannes dan Ridho (2019)**, dan untuk nilai *instantaneous shear modulus* didapatkan dari *website www.matweb.com*.

Setelah penentuan nilai parameter *epoxy*, dilanjutkan dengan pemodelan alat uji SHPB dan spesimen uji *tubular adhesive lap joint*. alat uji SHPB yang terdiri dari *striker*, *incident*, dan *transmitted bar* memiliki geometri dua dimensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.14, 3.15, dan 3.16 secara berturut-turut. Sementara untuk geometri dua dimensi spesimen uji tanpa *misalignment* ditunjukkan pada gambar 3.6, dan hasil pemodelan tiga dimensi ditunjukkan pada gambar 3.13. Spesimen uji diberikan variasi panjang total spesimen dengan variasi panjang diantaranya yaitu 14, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, dan 100 mm dengan *overlap* sambungan untuk masing-

masing variasi sebesar 10 mm. Panjang divariasikan mulai dari 14 mm, lalu panjang ditambah beberapa milimeter secara bertahap untuk mengetahui pada panjang berapa spesimen mulai memiliki perubahan sifat yang signifikan. Panjang maksimal variasi yang digunakan sebesar 100 mm karena panjang tersebut merupakan panjang spesimen yang sering digunakan pada eksperimen menggunakan alat uji *split hopkinson pressure bar*. Material yang digunakan untuk alat uji SHPB dan *adherend* spesimen uji adalah AL 6061-T6 yang memiliki *density* sebesar  $2875,3 \text{ kg/m}^3$ .



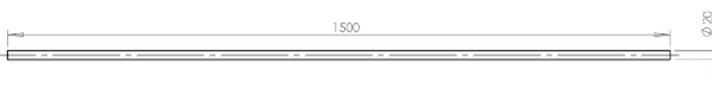
**Gambar 3.13** Pemodelan *tubular adhesive lap joint* tanpa *misalignment*



**Gambar 3.14** Geometri *striker bar*



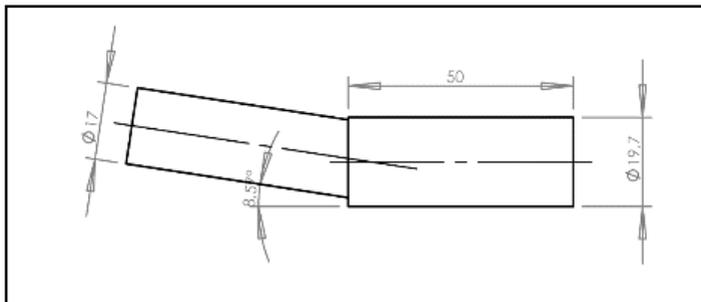
**Gambar 3.15** Geometri *incident bar*



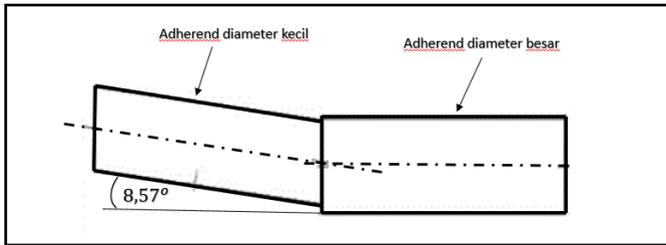
**Gambar 3.16** Geometri *transmitted bar*

Hasil pemodelan alat uji SHPB dan spesimen uji dengan *ANSYS Explicit dynamics* ditunjukkan pada gambar 3.20 yang mana pada model tersebut dipasang dua *strain probe* pada titik tengah *incident* dan *transmitted bar*. Kemudian, untuk panjang spesimen 20 dan 100 mm dilakukan simulasi lain dengan menambahkan *misalignment* sambungan sebesar  $8,57^\circ$  yang mana nilai tersebut merupakan sudut *misalignment* maksimum yang dapat terjadi pada sambungan *tubular adhesive lap joint*. Spesimen dengan *misalignment* hasil pemodelan menggunakan *spaceclaim* ditunjukkan pada gambar 3.19. *Misalignment* diberikan pada specimen yang memiliki panjang 20 dan 100 mm yang mana masing-masing panjang terdiri dari spesimen yang ujungnya dipotong dan tidak dipotong. Ujung spesimen yang dipotong bertujuan untuk mengetahui pengaruh luas kontak antara permukaan spesimen dengan *transmitted bar* terhadap sinyal *transmitted* yang merambat.

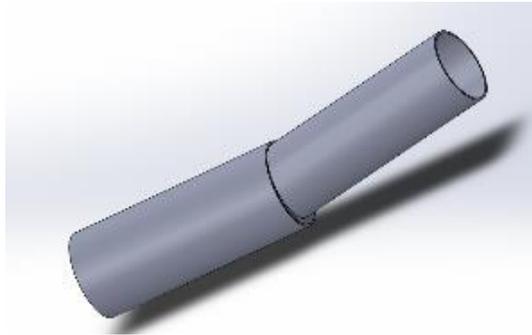
Geometri dua dimensi spesimen yang terdapat *misalignment* dengan ujung *adherend* yang tidak dipotong dan dipotong ditunjukkan pada gambar 3.17 dan 3.18 secara berturut-turut.



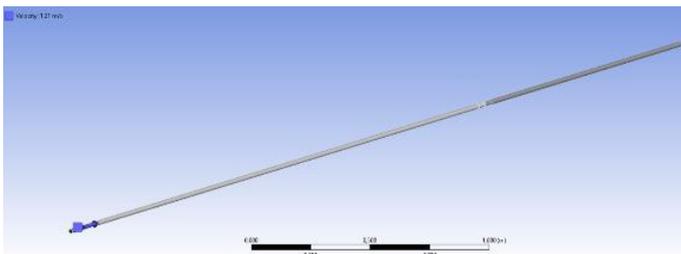
**Gambar 3. 17** Geometri dua dimensi spesimen uji *misalignment* sebesar  $8,57^\circ$  dengan ujung spesimen tidak dipotong



**Gambar 3. 18** Geometri dua dimensi spesimen uji misalignment sebesar  $8,57^\circ$  dengan ujung spesimen dipotong

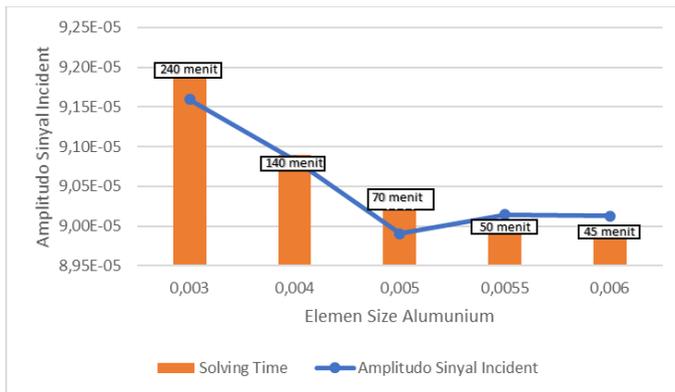


**Gambar 3. 19** Pemodelan tiga dimensi *tubular adhesive lap joint* dengan *misalignment* sebesar  $8,57^\circ$



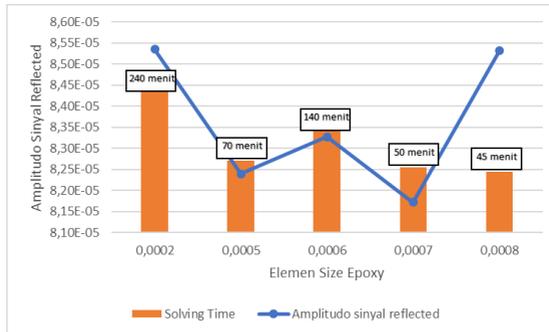
**Gambar 3. 20** Pemodelan SHPB dan spesimen uji pada *ANSYS Explicit dynamics*

Selanjutnya setelah pemodelan dan sebelum dilakukan simulasi, dilakukan uji kovergensi untuk memvalidasi hasil simulasi. Uji kovergensi dilakukan dengan cara melakukan beberapa kali *meshing* pada *incident* dan *transmitted bar* dengan ukuran elemen yang divariasikan secara bertahap dari nilai yang lebih besar hingga ke nilai yang lebih kecil. Grafik uji konvergensi aluminium ditunjukkan pada gambar 3.21.



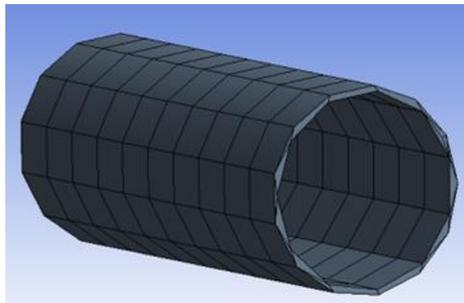
**Gambar 3. 21** Uji konvergensi aluminium

Grafik pada gambar 3.21 menunjukkan bahwa dari lima *element size*, terdapat tiga nilai *element size* yang memiliki nilai amplitudo sinyal yang berdekatan, yaitu *element size* dengan nilai 0,005, 0,0055, dan 0,006 . Dari ketiga nilai *element size* tersebut, yang dipilih yaitu *element size* 0,0055 karena pertimbangan waktu yang diperlukan untuk running simulasi tidak jauh berbeda dengan *element size* 0,006, sedangkan untuk hasil *meshing*, *element size* 0,0055 lebih halus dibandingkan dengan nilai *element size* 0,006. Sementara itu, untuk grafik uji konvergensi *epoxy* ditunjukkan pada gambar 3.22.

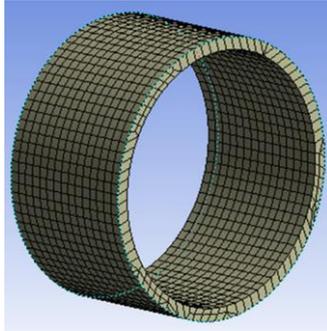


**Gambar 3. 22** Uji konvergensi epoxy

Grafik pada gambar 3.22 menunjukkan bahwa dari lima *element size*, terdapat tiga nilai *element size* yang memiliki nilai amplitudo sinyal yang berdekatan, yaitu *element size* dengan nilai 0,0005, 0,0006, dan 0,0007. Dari ketiga nilai *element size* tersebut, yang dipilih yaitu *element size* 0,0007 karena diantara tiga nilai *element size* yang nilai amplitudo sinyalnya berdekatan tersebut, *element size* 0,0007 memiliki *solving time* yang paling kecil sehingga waktu yang digunakan untuk *running* lebih cepat. Hasil dari *meshing* dengan *sizing* yang didapatkan dari hasil uji kovergensi untuk aluminium dan *adhesive* ditunjukkan pada gambar 3.23 dan 3.24 secara berturut-turut.

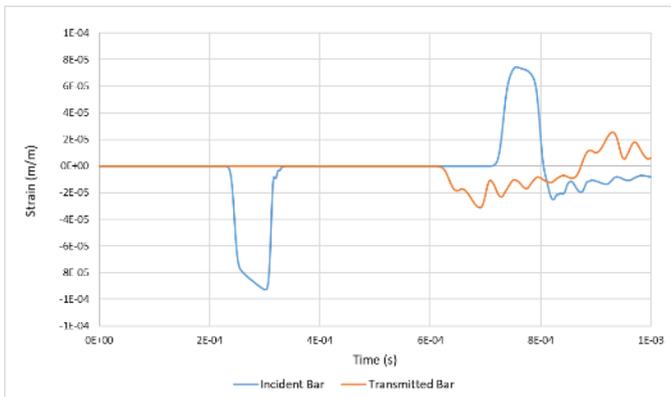


**Gambar 3.23** Hasil *meshing* aluminium dengan *sizing* hasil uji konvergensi



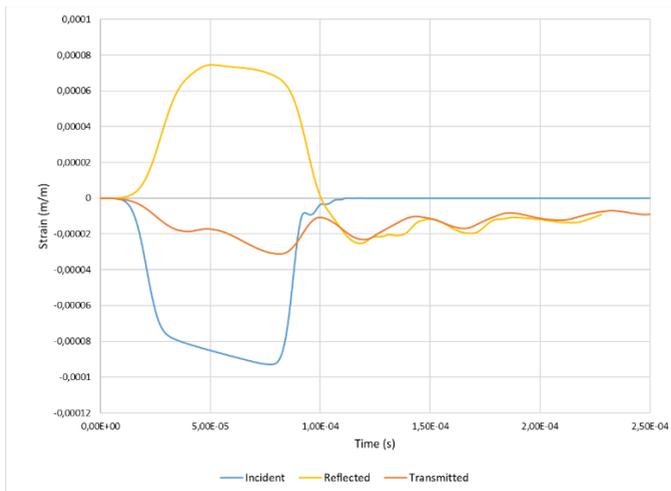
**Gambar 3.24** Hasil *meshing* dengan *sizing* hasil uji konvergensi *Adhesive*

Setelah uji konvergensi, kemudian dilakukan *set up* simulasi yang dimulai dengan pengaturan *body interaction* antara *striker bar*, *incident bar*, dan *adherend* menjadi *frictionless*, dan *body interaction* antara *adherend* dan *adhesive* menjadi *bonded*. Setelah *set up*, dilanjutkan dengan *running* simulasi dan menghasilkan kurva regangan terhadap waktu seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.25.



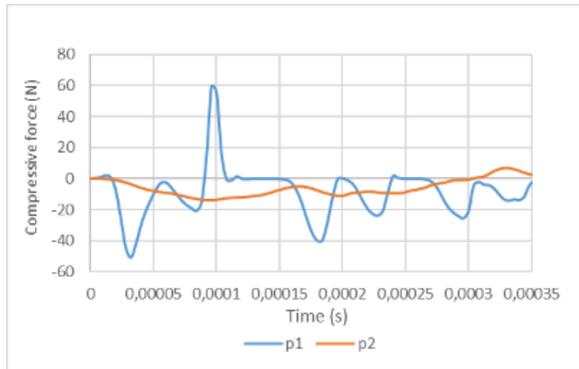
**Gambar 3.25** Kurva regangan terhadap waktu hasil simulasi sebelum dihitung

Kurva regangan terhadap waktu yang diperoleh, kemudian di-trim untuk memperoleh kurva regangan *incident*, *reflected*, dan *transmitted* yang semula pada rentang waktu berbeda menjadi satu rentang waktu yang sama. Kurva hasil trim tersebut, yang ditunjukkan pada gambar 3.26, digunakan sebagai data pembentukan kurva P1 & P2, kurva laju regangan, dan kurva tegangan-regangan.



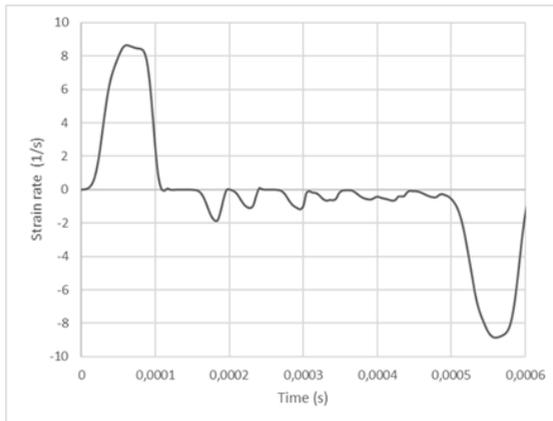
**Gambar 3.26** Kurva regangan semua sinyal hasil trim

Gambar 3.26 yang merupakan kurva regangan terhadap waktu untuk ketiga sinyal yang sudah ditrim dan digeser, menunjukkan nilai maksimum untuk sinyal *reflected* sebesar 0,0000747, untuk kurva *incident* sebesar -0,0000929, dan untuk sinyal *transmitted* sebesar 0,0000311. Setelah kurva di-trim, kemudian data hasil trim tersebut dihitung untuk mendapatkan kurva P1 & P2 yang ditunjukkan pada gambar 3.27.



**Gambar 3.27** Kurva perbandingan P1 dan P2

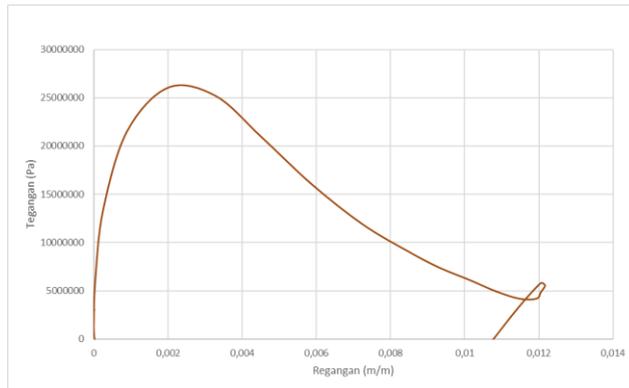
Kemudian, data dihitung kembali untuk mendapatkan kurva laju regangan terhadap waktu yang ditunjukkan pada gambar 3.28.



**Gambar 3.28** Laju regangan terhadap waktu

Kurva laju regangan yang ditunjukkan pada gambar 3.28 memiliki nilai maksimum saat kompresi sebesar  $8,35s^{-1}$ , sementara nilai maksimum saat ekspansi sebesar  $8,45s^{-1}$ . Setelah didapatkan kurva laju regangan, selanjutnya data

dihitung untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan yang kurvanya ditunjukkan pada gambar 3.29.



**Gambar 3. 29** Kurva tegangan-regangan

Kurva pada gambar 3.29 merupakan kurva tegangan-regangan. Dari kurva tersebut dapat diketahui nilai modulus dengan cara mengestimasi *initial slope* yang mana nilai modulus yang didapatkan sebesar 12,6 Gpa.

## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

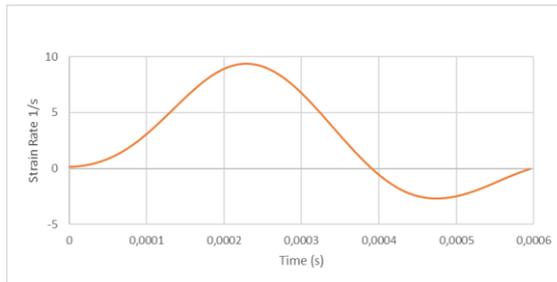
Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi menggunakan ANSYS *Explicit dynamics* pada spesimen *tubular adhesive lap joint* dengan alat uji SHPB yang telah dimodelkan menggunakan *spaceclaim* yang terdapat pada ANSYS. Simulasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh panjang dan *misalignment* spesimen uji terhadap respon tegangan-regangan sambungan serta mendapatkan panjang optimal spesimen *tubular adhesive lap joint* yang digunakan untuk uji eksperimen. Selain itu, telah dilakukan uji eksperimen menggunakan alat uji SHPB terhadap spesimen uji yang memiliki panjang total 100 mm, data hasil eksperimen tersebut digunakan sebagai pembandingan data hasil simulasi secara kualitatif.

#### 4.1. Perbandingan Data Spesimen Panjang 100 mm Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen

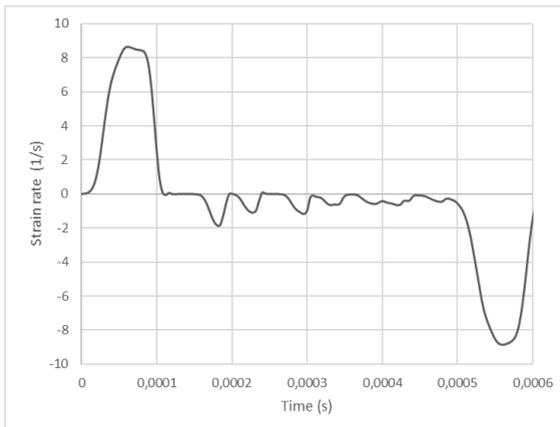
Pada subbab ini berisi perbandingan kurva laju regangan, kurva P1-P2, dan kurva tegangan-regangan hasil simulasi dengan hasil eksperimen. Perbandingan dilakukan secara kualitatif dengan cara membandingkan bentuk ataupun tren kurva hasil simulasi dengan hasil eksperimen. Jika kurva hasil simulasi memiliki kesamaan bentuk ataupun tren dengan hasil eksperimen, maka data hasil simulasi valid secara kualitatif.

Perbandingan data hasil simulasi dengan eksperimen hanya hanya dibandingkan secara kualitatif karena data hasil eksperimen tidak dapat dijadikan sebagai pembandingan secara kuantitatif. Hal tersebut disebabkan oleh beberapa faktor yang terjadi pada uji eksperimen, diantaranya yaitu kemungkinan terjadinya *misalignment* antara *striker* dengan *incident bar* pada saat tumbukan, terjadinya *buckling* pada *pressure bar*, terjadinya *misalignment* pada sambungan spesimen uji, atau ketidakakuratan alat ukur dalam uji eksperimen.

Perbandingan data hasil simulasi dengan data hasil eksperimen untuk spesimen uji dengan panjang 100 mm pada pengujian ini memiliki kesamaan bentuk ataupun tren kurva atau dengan kata lain hasil simulasi pada spesimen panjang 100 mm pada pengujian ini valid secara kualitatif. Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan kurva laju regangan terhadap waktu untuk panjang spesimen 100 mm hasil eksperimen dan simulasi secara berturut-turut.



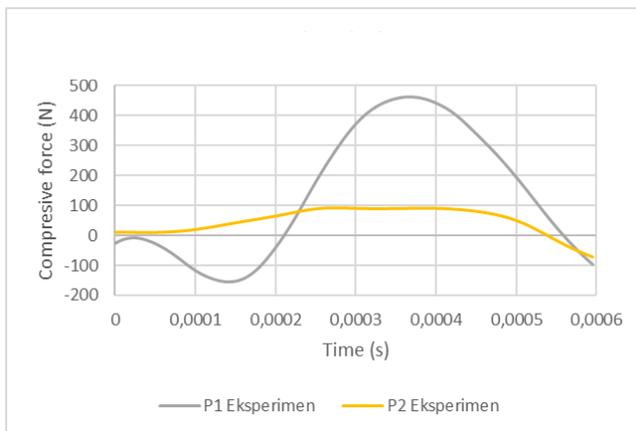
**Gambar 4.1** Kurva laju regangan spesimen panjang 100 mm hasil eksperimen



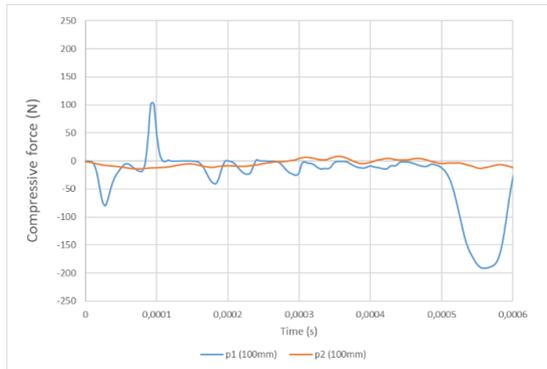
**Gambar 4.2** Kurva laju regangan terhadap waktu untuk panjang spesimen 100 mm hasil simulasi

Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan bahwa spesimen berdeformasi pada laju regangan yang sebanding antara hasil eksperimen dengan simulasi. Laju regangan hasil simulasi tidak menunjukkan fase ekspansi yang jelas serta periode deformasi yang tidak beraturan jika dibandingkan dengan hasil eksperimen. Selain itu, pada simulasi, laju regangan maksimum ketika ekspansi memiliki nilai laju regangan maksimum yang sama ketika kompresi. Sementara, pada eksperimen, nilai maksimum laju regangan ketika kompresi dan ekspansi, memiliki nilai yang berbeda. Namun, keduanya menunjukkan pola sinusoidal dengan nilai amplitudo laju regangan yang hampir sama pada saat kompresi.

Selain kurva laju regangan, Kurva P1-P2 atau *compressive force* yang dihasilkan dari eksperimen dan simulasi juga dibandingkan secara kualitatif. Kurva P1-P2 untuk panjang spesimen 100 mm hasil uji eksperimen dan simulasi ditunjukkan pada gambar 4.3 dan 4.4 secara berturut-turut.



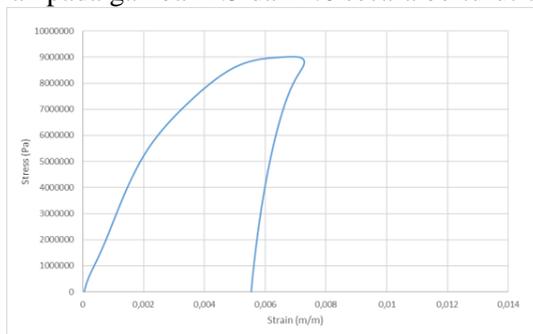
**Gambar 4.3** Kurva P1-P2 hasil eksperimen



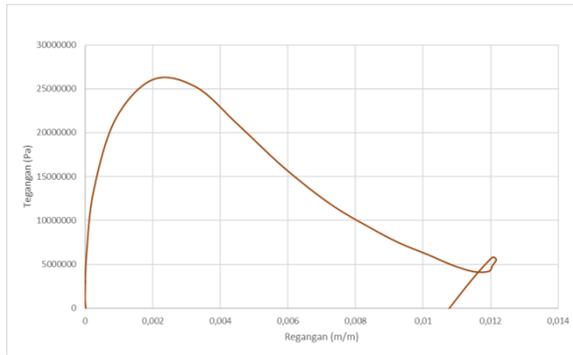
**Gambar 4.4** Kurva P1-P2 hasil simulasi

Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan bahwa kurva P1-P2 hasil eksperimen dan simulasi memiliki kesamaan, yaitu kurva P1-P2 hasil simulasi tidak berhimpit. Kesamaan yang lainnya, yaitu kurva P1 memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan kurva P2. Beberapa faktor yang menyebabkan kurva P1 tidak berhimpit dengan kurva P2 dibahas pada subbab 4.3.

Kemudian, kurva tegangan-regangan hasil simulasi juga dibandingkan dengan kurva tegangan-regangan hasil eksperimen secara kualitatif. Kurva tegangan-regangan hasil eksperimen dan simulasi untuk panjang spesimen 100 mm ditunjukkan pada gambar 4.5 dan 4.6 secara berturut-turut.



**Gambar 4.5** Kurva tegangan-regangan specimen panjang 100 mm hasil eksperimen



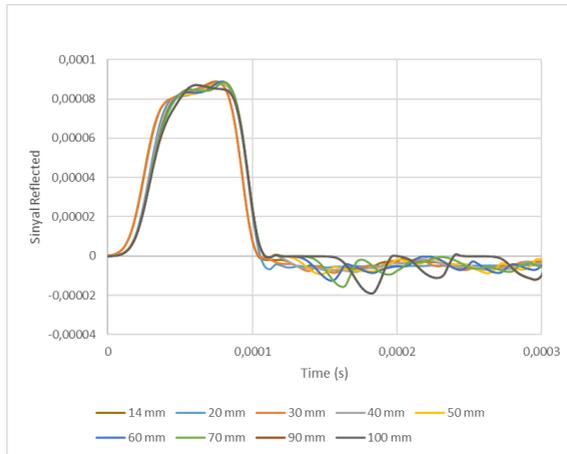
**Gambar 4.6** Kurva tegangan-regangan untuk panjang spesimen 100 mm hasil simulasi

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan bahwa kurva tegangan-regangan spesimen *tubular adhesive lap joint* hasil eksperimen dan hasil simulasi memiliki tren kurva yang sama, yaitu mula-mula kurva menaik hingga rentang waktu tertentu, setelah mencapai puncak, kemudian tren kurva menurun hingga rentang waktu tertentu. Kesamaan lain dari kurva tegangan-regangan hasil eksperimen dan hasil simulasi pada spesimen *tubular adhesive lap joint* ini, yaitu bentuk kurva yang tidak *close-loop* yang disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor-faktor penyebab kurva tegangan-regangan spesimen *tubular adhesive lap joint* yang tidak *close-loop* tersebut dibahas pada subbab 4.3.

## 4.2. Hasil Simulasi

### 4.2.1. Sinyal *Reflected*

Saat *epoxy* resin menerima gelombang yang dihasilkan oleh tumbukkan yang diberikan oleh *striker bar* pada *incident bar*, gelombang tersebut sebagian ditransmisikan melewati spesimen, sementara sebagian lainnya dipantulkan kembali ke *incident bar*. Gelombang yang dipantulkan tersebut merupakan sinyal *reflected*. Perbandingan sinyal *reflected* semua variasi panjang ditunjukkan pada gambar 4.7.

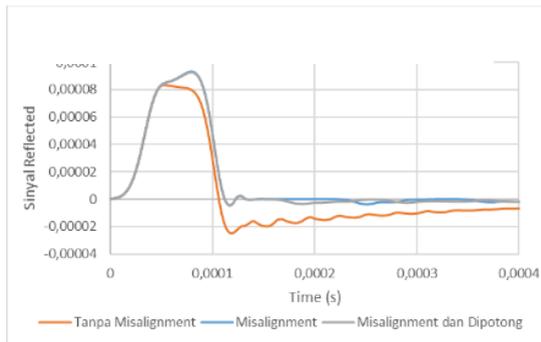


**Gambar 4.7** Grafik Sinyal *Reflected* terhadap Waktu

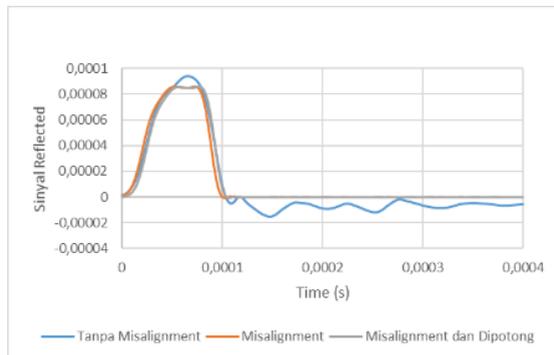
Gambar 4.7 merupakan grafik perbandingan sinyal *reflected* semua variasi panjang yang menunjukkan bahwa perubahan panjang tidak berpengaruh secara signifikan terhadap amplitudo sinyal *reflected*. Akan tetapi, semakin panjang spesimen akan mengakibatkan rambatan gelombang semakin beresilasi. Itu artinya, dari semua variasi panjang, panjang spesimen 14 mm yang merupakan nilai panjang paling kecil dari semua variasi pada pengujian ini memiliki keseimbangan rambatan gelombang yang paling baik diantara variasi lainnya.

Pada penelitian ini juga dilakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh *misalignment* terhadap respon tegangan-regangan sambungan. Pengujian *misalignment* dilakukan pada spesimen dengan panjang 20 dan 100 mm dengan sudut *misalignment* sebesar  $8,57^\circ$ . Selain itu, untuk mengetahui pengaruh konsentrasi tegangan, ujung dari spesimen *misalignment* yang bersentuhan dengan *transmitted bar* dipotong dengan potongan yang sejajar dengan bidang penampang dari *transmitted bar* agar luas kontak permukaan spesimen dengan bar menjadi lebih luas.

Kurva hasil simulasi untuk mengetahui pengaruh *misalignment* untuk panjang spesimen 20 dan 100 mm ditunjukkan pada gambar 4.8 dan 4.9 secara berturut-turut.



**Gambar 4.8** Perbandingan sinyal *reflected* antara spesimen tanpa dan dengan *misalignment* panjang spesimen 20 mm



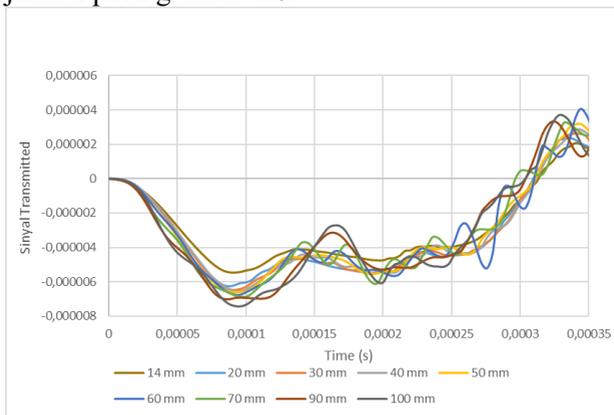
**Gambar 4.9** Perbandingan sinyal *reflected* antara spesimen tanpa dan dengan *misalignment* Panjang spesimen 100 mm

Kurva pada gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan bahwa sinyal *reflected* pada spesimen dengan dan tanpa *misalignment* memiliki perbedaan. Sementara antara sinyal *reflected* spesimen *misalignment* yang dipotong dan tidak dipotong ujungnya memiliki kurva yang berhimpit, itu artinya luas

kontak antara permukaan spesimen dengan *transmitted bar* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap sinyal *reflected*. Gambar dua dimensi dari spesimen yang ujungnya dipotong dan tidak dipotong ditunjukkan pada gambar 3.18 dan 3.17 secara berturut-turut.

#### 4.2.2. Sinyal *Transmitted*

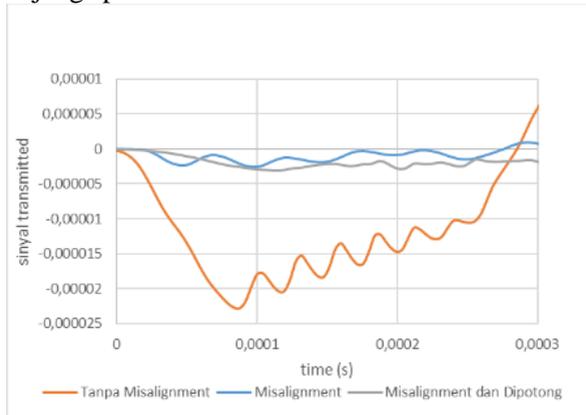
Sinyal *transmitted* merupakan sisa gelombang yang tidak dipantulkan oleh *epoxy* dan diteruskan ke *transmitted bar*. Perbandingan sinyal *transmitted* untuk semua variasi panjang ditunjukkan pada gambar 4.6.



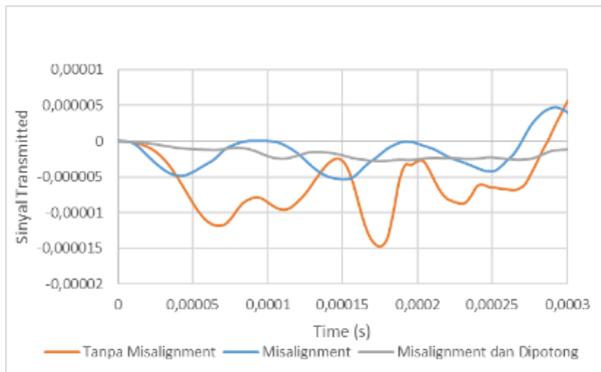
**Gambar 4.10** Perbandingan sinyal *transmitted* terhadap waktu untuk semua variasi panjang

Dari gambar 4.10 terlihat bahwa amplitudo sinyal *transmitted* untuk semua variasi panjang tidak memiliki perbedaan secara signifikan. Sama seperti sinyal *reflected*, semakin panjang spesimen, maka sinyal akan semakin berisilasi atau dengan kata lain rambatan gelombang semakin tidak setimbang. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa spesimen dengan panjang 14 mm, yang merupakan variasi panjang yang bernilai paling kecil pada pengujian ini, memiliki rambatan sinyal yang relatif lebih setimbang dibandingkan dengan rambatan sinyal pada variasi panjang lainnya.

Sementara perbandingan sinyal *reflected* antara spesimen dengan dan tanpa *misalignment* ditunjukkan pada gambar 4.11 untuk panjang spesimen 20 mm dan gambar 4.12 untuk panjang spesimen 100 mm.



**Gambar 4.11** Perbandingan sinyal *transmitted* terhadap waktu antara spesimen dengan dan tanpa *misalignment* untuk spesimen dengan panjang 20 mm



**Gambar 4.12** Perbandingan sinyal *transmitted* terhadap waktu antara spesimen dengan dan tanpa *misalignment* untuk spesimen dengan panjang 100 mm

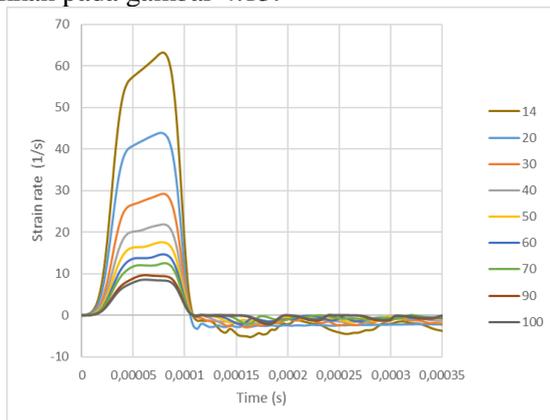
Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan bahwa sinyal *transmitted* pada spesimen tanpa *misalignment* memiliki amplitudo yang lebih besar dibandingkan dengan spesimen yang terdapat *misalignment*. Hal tersebut terjadi karena adanya dispersi gelombang yang diakibatkan oleh *misalignment* sambungan spesimen.

Sementara itu, luas kontak permukaan antara spesimen dengan *transmitted bar* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai amplitudo sinyal *transmitted*. Namun, untuk spesimen *misalignment* yang tidak dipotong ujungnya memiliki rambatan sinyal yang lebih beresilasi atau dengan kata lain rambatan gelombangnya relatif tidak setimbang dibandingkan dengan spesimen *misalignment* yang dipotong ujung specimennya.

### 4.3. Hasil Perhitungan dan Pembahasan

#### 4.3.1. Laju regangan

Data hasil simulasi dihitung menggunakan *microsoft excel* untuk mendapatkan kurva laju regangan terhadap waktu. Perbandingan kurva laju regangan untuk semua variasi panjang ditunjukkan pada gambar 4.13.

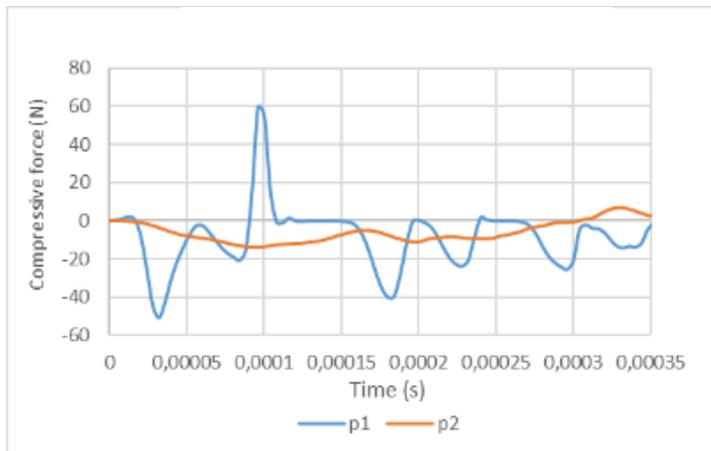


**Gambar 4.13** Perbandingan kurva laju regangan semua variasi panjang

Dapat dilihat pada gambar 4.13, laju regangan yang naik menunjukkan adanya kompresi pada spesimen yang disebabkan oleh tumbukkan *striker bar*. Nilai amplitudo kurva laju regangan semakin kecil seiring dengan bertambahnya panjang spesimen. Perbedaan nilai amplitudo kurva laju regangan antara variasi panjang yang berdekatan tidak lebih dari  $20\text{s}^{-1}$ .

#### 4.3.2. Kurva P1-P2

Kurva P1-P2 yang dihasilkan pada simulasi ditunjukkan pada gambar 4.14.

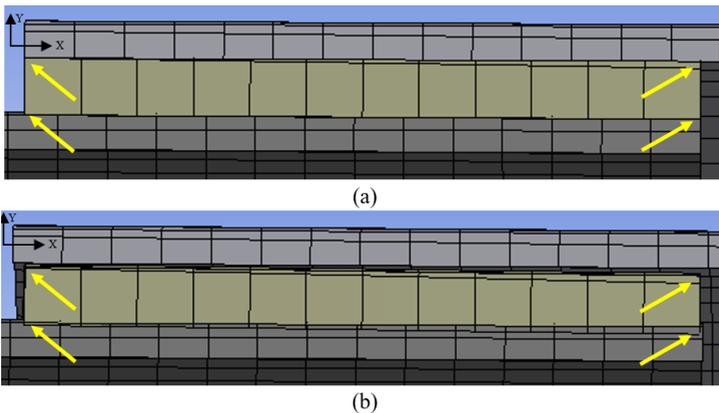


**Gambar 4.14** Kurva P1-P2 untuk spesimen panjang 100 mm

Kurva P1-P2, yang dihasilkan dari simulasi pada spesimen uji *tubular adhesive lap joint*, tidak berhimpit seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.14. Hal tersebut berbeda dengan pengujian dengan menggunakan spesimen *butt joint* seperti yang telah dilakukan oleh **Yohannes dan Kenny Varian** (2020) yang mana kurva P1-P2 hasil eksperimen berhimpit. Kurva P1-P2 pada *butt joint* berhimpit karena tegangan yang terjadi hanya tegangan ke arah sumbu x saja.

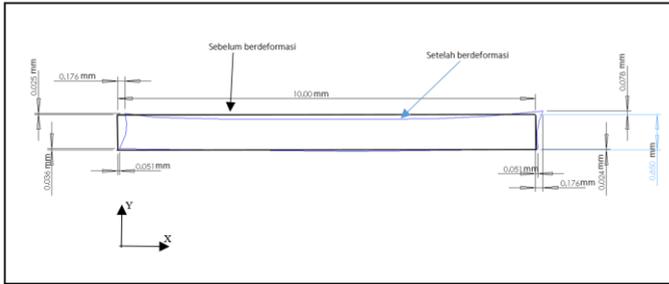
Terdapat beberapa faktor yang mengakibatkan kurva P1-P2 pada pengujian ini tidak berhimpit, diantaranya yaitu terjadinya tegangan ke arah sumbu x yang merupakan tegangan geser dan tegangan ke arah sumbu y yang merupakan tegangan peel. Tegangan peel dapat mengakibatkan sambungan *adhesive* berdeformasi ke arah sumbu-y.

Sambungan pada pengujian ini mengalami tegangan geser dan peel, hal tersebut dibuktikan oleh hasil simulasi yang dilakukan untuk mengetahui terjadinya deformasi pada sambungan. Tangkapan layar sebelum dan sesudah ditumbuk dari hasil simulasi yang terjadi pada spesimen dengan panjang 100 mm ditunjukkan pada gambar 4.15 (a) dan (b) secara berturut-turut.

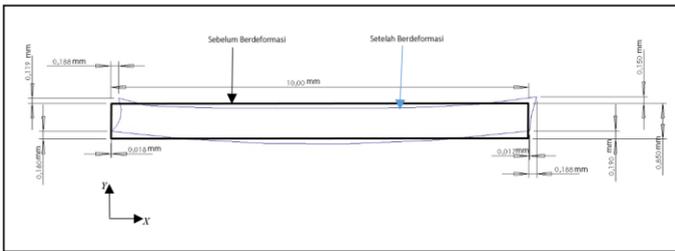


**Gambar 4.15** Hasil tangkapan layar dari rekaman simulasi pada spesimen uji. (a) sebelum deformasi (b) setelah deformasi.

Sementara gambar skematik deformasi yang terjadi pada spesimen panjang 20 dan 100 mm ditunjukkan pada gambar 4.16 (a) dan (b) berturut-turut.



(a)



(b)

**Gambar 4.16** Gambar skematik *adhesive* setelah dan sebelum berdeformasi (a).panjang spesimen 20 mm (b).panjang spesimen 100 mm

Terjadinya tegangan peel pada *adhesive* spesimen uji disebabkan oleh konsentrasi tegangan akibat perbedaan nilai kekakuan antara kedua *adherend* pada spesimen uji yang memiliki diameter berbeda.

Nilai kekakuan *adherend* dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Kekakuan} = \frac{E \times A_s}{L_s},$$

dimana E merupakan modulus young *adherend*,  $A_s$  merupakan luas permukaan *adherend*, dan  $L_s$  merupakan panjang

spesimen. Hasil dari perhitungan nilai kekakuan untuk masing-masing *adherend* disajikan pada tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Parameter *adherend* spesimen uji

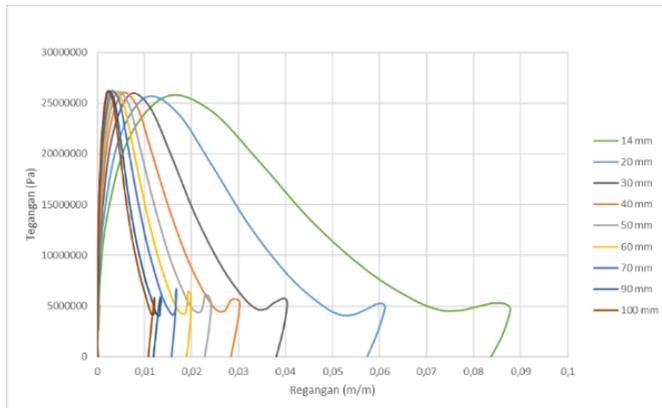
No.	<i>Adherend</i>	Modulus <i>Young</i>	Luas Permukaan	Panjang <i>Adherend</i>	Kekakuan (N/m)
1.	Pipa Besar	69 GPa	$3,016 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$50 \times 10^{-3} \text{ m}$	41620800
2.	Pipa Kecil		$2,591 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$60 \times 10^{-3} \text{ m}$	29796500

Hasil perhitungan nilai kekakuan yang disajikan pada tabel 4.1 menunjukkan bahwa *adherend* pipa besar memiliki nilai kekakuan yang berbeda dengan *adherend* pipa kecil, yang mana *adherend* pipa besar memiliki nilai kekakuan sebesar 41620 KN/m, sedangkan untuk *adherend* pipa kecil memiliki nilai kekakuan sebesar 29696 KN/m. Kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa nilai kekakuan *adherend* pipa besar memiliki nilai kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan nilai kekakuan *adherend* pipa kecil.

Terjadinya tegangan peel atau *peel stress* pada *lap joint* juga didukung oleh penelitian yang telah dilakukan oleh **N. Pugno Dkk. (2003)** yang menyatakan bahwa pada *lap joint* terdapat beberapa gaya yang bekerja, yaitu *peel stress* dan *shear stress*. N. Pugno Dkk. Memberikan saran agar tegangan yang terjadi merupakan tegangan *uniform uniaxial*, maka harus dilakukan *chamfering* atau *tapering* pada bagian ujung *adherend* yang kontak langsung dengan *adhesive*.

#### 4.3.3. Kurva Tegangan-regangan

Kurva tegangan-regangan spesimen tubular adhesive lap joint hasil simulasi didapatkan dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan 2.9 dan 2.10. Perhitungan dilakukan terhadap semua variasi panjang spesimen yang mana hasil perhitungan tersebut ditunjukkan pada gambar 4.17.



**Gambar 4.17** Perbandingan kurva tegangan-regangan untuk semua variasi panjang

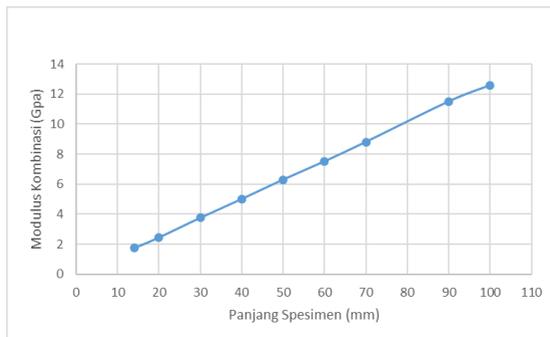
Dapat dilihat pada gambar 4.17 kurva mula-mula naik, hal ini menandakan adanya pembebanan pada spesimen yaitu kompresi yang disebabkan oleh tumbukan *striker bar*. Setelah itu kurva menurun yang menandakan pembebanan telah dilepaskan. Kurva yang turun ditentukan dengan deformasi yang diterima oleh spesimen. Saat spesimen menerima deformasi elastis maka kurva akan kembali ke titik awal, sedangkan jika spesimen menerima deformasi plastis maka kurva tidak bisa kembali ke titik awal. Pada gambar 4.17 terlihat bahwa kurva tegangan-regangan semua variasi panjang tidak *close-loop* atau dengan kata lain semua variasi panjang spesimen pada pengujian ini mengalami deformasi plastis. Seperti yang telah dibahas pada subbab 4.3.2, deformasi sambungan spesimen uji terjadi ke arah sumbu x dan y. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai initial slope dari kurva tegangan-regangan merupakan nilai dari modulus kombinasi, bukan modulus geser saja karena tegangan yang terjadi pada pengujian merupakan tegangan geser dan tegangan peel.

Kurva tegangan-regangan pada gambar 4.17 menunjukkan bahwa semakin panjang spesimen, maka nilai

modulus kombinasi dari spesimen akan semakin besar. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.17 yang menunjukkan bahwa nilai *initial slope* semakin besar seiring dengan bertambah panjangnya spesimen. Data modulus kombinasi untuk tiap variasi panjang dapat dilihat pada tabel 4.2. Sementara untuk grafik nilai modulus kombinasi terhadap panjang spesimen ditunjukkan pada gambar 4.18.

**Tabel 4. 2** Nilai modulus kombinasi untuk tiap variasi panjang

Panjang (mm)	Modulus Kombinasi (Gpa)
14	1,74
20	2,45
30	3,77
40	5,02
50	6,31
60	7,52
70	8,81
90	11,50
100	12,58

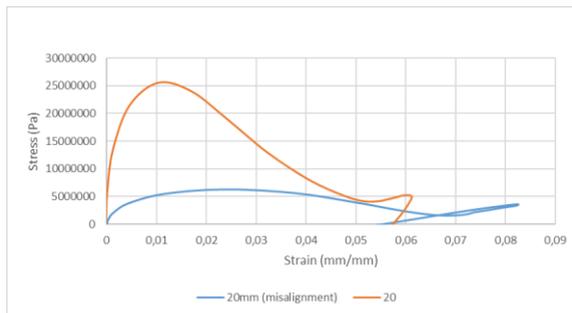


**Gambar 4. 18** Grafik modulus kombinasi terhadap panjang spesimen

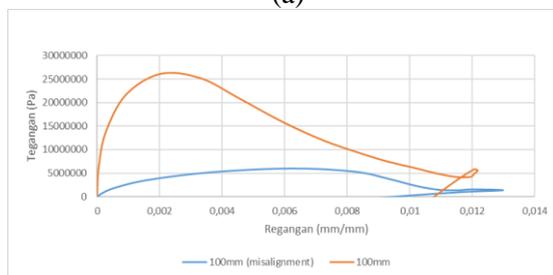
Gambar 4.18 menunjukkan bahwa nilai modulus kombinasi atau juga kekakuan kombinasi dipengaruhi oleh panjang spesimen uji. Nilai modulus kombinasi terkecil terdapat pada

spesimen dengan panjang 14 mm, itu artinya spesimen tersebut memiliki kemampuan paling rendah dalam menerima beban hingga deformasi plastis. Sementara nilai modulus kombinasi terbesar terdapat pada spesimen dengan panjang 100 mm, itu artinya spesimen tersebut memiliki kemampuan paling tinggi dalam menerima beban hingga mengalami deformasi plastis.

Sementara itu, untuk spesimen uji dengan *misalignment* sebesar  $8,57^\circ$  memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap kurva tegangan-regangan spesimen uji. Perbandingan kurva tegangan-regangan antara spesimen dengan dan tanpa *misalignment* untuk panjang spesimen 20 mm dan 100mm ditunjukkan pada gambar 4.19 (a) dan (b) secara berturut-turut.



(a)



(b)

**Gambar 4.19** Perbandingan kurva tegangan-regangan antara spesimen dengan dan tanpa *misalignment* (a).panjang spesimen 20mm (b).panjang spesimen 100mm

Perbedaan nilai modulus kombinasi antara spesimen dengan dan tanpa *misalignment* cukup signifikan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.19. Nilai modulus kombinasi semua kurva tegangan-regangan pada gambar 4.19 dapat dilihat pada tabel 4.3.

**Tabel 4. 3** Nilai modulus kombinasi untuk spesimen dengan dan tanpa *misalignment*

Panjang spesimen	Modulus Kombinasi (Gpa)	
	Tanpa Misalignment	Dengan Misalignment
20 mm	2,45	0,14
100 mm	12,58	6,50

Berdasarkan semua kurva tegangan-regangan yang didapatkan, spesimen pada pegujian ini mengalami deformasi plastis karena kurva tegangan-regangan tidak *close-loop*. Hal tersebut diperkuat dengan data deformasi yang didapatkan dengan melakukan simulasi pada spesimen panjang 20 dan 100 mm yang mana data tersebut menunjukkan bahwa spesimen mengalami deformasi plastis, lebih tepatnya deformasi terjadi pada sambungan *adhesive*. Gambar skematik spesimen yang berdeformasi ditunjukkan pada gambar 4.16 (a) dan (b).

Gambar 4.16(a) dan (b) yang merupakan gambar skematik menunjukkan deformasi plastis yang terjadi pada *adhesive* spesimen panjang 20 dan 100 mm. Dalam gambar tersebut dapat dilihat bahwa spesimen panjang 100 mm memiliki nilai deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan spesimen panjang 20 mm.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari penelitian ini penulis memberikan beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Karakteristik *tubular adhesive lap joint* dari kurva tegangan-regangan yang diperoleh secara simulasi menunjukkan bahwa nilai modulus kombinasi akan meningkat seiring dengan bertambahnya panjang spesimen. Itu artinya, spesimen dengan panjang 100 mm merupakan spesimen yang memiliki nilai modulus kombinasi paling tinggi dibandingkan variasi panjang lainnya.
2. Bertambah panjangnya spesimen mengakibatkan rambatan gelombang semakin berosilasi. Rambatan gelombang paling setimbang terdapat pada spesimen uji dengan panjang 14 mm yang merupakan panjang spesimen paling kecil pada pengujian ini.
3. *Misalignment* yang terdapat pada sambungan spesimen uji mempengaruhi nilai modulus kombinasi secara signifikan yang mana *misalignment* dapat mengakibatkan nilai modulus kombinasi sambungan menjadi lebih kecil.
4. Spesimen yang memiliki panjang 20 mm memiliki nilai deformasi yang lebih kecil dibandingkan dengan spesimen yang memiliki panjang 100 mm.

#### **5.2. Saran**

Setelah melakukan penelitian, terdapat beberapa saran dari penulis agar penelitian berikutnya menjadi lebih baik lagi seperti berikut:

1. Melakukan validasi data dengan membandingkan data simulasi dan eksperimen pada tiap variasi pengukuran.
2. Untuk jenis sambungan *tubular lap joint* lebih baik ditambahkan *fillet* untuk mereduksi tegangan *peel*.

3. Pada uji eksperimen, proses penyambungan *adherend* harus menggunakan alat bantu seperti jig agar tidak terjadi *misalignment* sambungan.
4. Spesimen uji yang digunakan pada eksperimen disarankan memiliki panjang 14 mm dikarenakan pada spesimen tersebut rambatan gelombang lebih seimbang, dan deformasi yang terjadi pada sambungan *adhesive* lebih kecil dibandingkan dengan spesimen yang memiliki ukuran lebih panjang sehingga memiliki keseimbangan dinamis yang paling baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen, W., Song, B. 2011. **Split Hopkinson (*Kolsky*) Bar: Design, Testing and Applications**. New York: Springer Science Business Media.
- [2] Mittal, K.L. 2003. **Handbook of Adhesive Technology: Second Edition, Revised and Expanded**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [3] Pramono, A.S., Rivazani H., Sujarwanto. 2014. **Split Bar Hopkinson with Springs Striker Bar Launcher**. Applied Mechanics and Materials. 493:383-387.
- [4] Polini, Wilma., Andrea Corrado. 2019. **Effect of Adhrends Misalignment on the Strength of Single-lap Bonded Joints**. Cassino: Universita di Cassino e del lazio Meridionale.
- [5] Tekalur, S.A., Oishik Sen. 2011. **Effect of Specimen Size in the *Kolsky* Bar**. Lansing: Elsevier Ltd.
- [6] Jr, William D. Callister., Rethwisch, David G. Retchwisch. 2010. **Material Science and Engineering an Introduction**. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Pugno, N., A. Carpinteri. 2003. **Tubular Adhesive Joints Under Axial Load**. Italy: Politecnico di Torino.
- [8] Lucic, M., A. Stoic., J. Kopac. 2005. **Investigation of Aluminum Single Lap Adhesively Bonded Joints**. Croatia: University of Ljubljana.
- [9] Jordan, Jennifer L., Dana M. Dattelbaum, Gerrit Sutherland, D. Wayne Richards, Stephen A. Sheffield, Richard D. Dick. 2010. **Shock Equation of Multi-Phase Epoxy-Based Composite (Al-MnO<sub>2</sub>-Epoxy)**. USA: AIP.
- [10]Yohannes, Ridho Gary P. 2019. **Studi Eksperimen dan Analisa Pengaruh Panjang Overlap Terhadap Kekakuan pada Sambungan Tipe Single Lap dengan Pembebanan Dinamis**. Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

## BIODATA PENULIS



**Agih Purnama** dilahirkan di Sumedang, 25 September 1997. Merupakan anak pertama dari 5 bersaudara yang lahir dari orangtua bernama Olih Gunawan dan Jujun Juanah. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Hegarmanah 1, SMP Negeri 1 Jatinangor, dan SMA Negeri Tanjungsari. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan ke jenjang perkuliahan S1 di Departemen Teknik

Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2016-2020.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik selama perkuliahan. Dalam kegiatan non akademik pada tahun ke-1 hingga ke 4 perkuliahan, penulis aktif menjadi berbagai anggota kepanitiaan dan pengurus organisasi. Penulis aktif dalam organisasi Ash-Shaff Teknik Mesin ITS sebagai staff Departemen Pelayanan Umat 2017/2018 dan sebagai Kepala Departemen Pelayanan Umat 2018/2019. Selain kuliah, penulis juga bekerja sebagai pengajar pada sebuah bimbingan belajar yang bernama LBB sigma center dari tahun 2017 hingga 2019. Pada tahun terakhir, penulis mulai fokus pada penelitian tentang *adhesive joint* yang dibimbing oleh Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.

Penulis mempunyai motto hidup “**Hidup ini seperti sepeda. Agar tetap seimbang, kau harus terus bergerak (Albert Einstein)**” yang membuat penulis berusaha untuk selalu optimis dan sabar dalam memperoleh keinginan serta menghadapi segala kondisi dan keadaan. Dengan motto tersebut, penulis akhirnya juga dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Semua pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis melalui email [agihpurnama@yahoo.com](mailto:agihpurnama@yahoo.com).