

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISA PENGARUH PANJANG ADHESIVE LAYER TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN SAMBUNGAN TUBULAR LAP ADHESIVE JOINT PADA LAJU REGANGAN TINGGI MENGGUNAKAN SIMULASI EXPLICIT DYNAMIC

Mahalli Ridho NRP. 02111640000038

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 ADHESIVE LAYER TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN SAMBUNGAN TUBULAR LAP ADHESIVE JOINT PADA LAJU REGANGAN TINGGI MENGGUNAKAN SIMULASI EXPLICIT DYNAMIC

Mahalli Ridho NRP. 02111640000038

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 EFFECT OF LONG ADHESIVE LAYER ON STRESS STRAIN RESPONSE TUBULAR LAP ADHESIVE JOINT AT HIGH STRAIN RATE USING EXPLICIT DYNAMICS SIMULATION

Mahalli Ridho NRP. 02111640000038

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

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

#### HALAMAN PENGESAHAN

# ANALISA PENGARUH PANJANG ADHESIVE LAYER TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN SAMBUNGAN TUBULAR LAP ADHESIVE JOINT PADA LAJU REGANGAN TINGGI MENGGUNAKAN SIMULASI 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: <u>Mahalli Ridho</u> NRP. 02111640000038

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Alhir:

- 1. Dr. Eng. Yohanes, S.T. M.Sc. NIP. 198006272012121003 (Pembimbing)
- 2. Dr. Eng. Unggul Wasiwitego, S.F., M.Eng. Sc., NIP. 197805102001121001 Market Penguji)
- 3. <u>Ari Kurniawan Saputra, S.T. M.T.</u> NIP. 198604012015(41001) Fenguji

SURABAYA AGUSTUS 2020

## ANALISA PENGARUH PANJANG *ADHESIVE LAYER* TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN SAMBUNGAN *TUBULAR LAP ADHESIVE JOINT* PADA LAJU REGANGAN TINGGI MENGGUNAKAN SIMULASI *EXPLICIT DYNAMIC*

| Nama Mahasiswa   | : Mahalli Ridho              |
|------------------|------------------------------|
| NRP              | : 02111640000038             |
| Departemen       | : Teknik Mesin FTI-ITS       |
| Dosen Pembimbing | : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc. |

#### ABSTRAK

Dalam memproduksi sebuah kendaraan, produsen otomotif harus mengutamakan keselamatan penumpang. Pada rangka otomotif, terdapat berbagai jenis sambungan yang dirancang untuk menopang struktur kendaraan. Tetapi hingga saat ini, jenis sambungan yang digunakan masih jenis sambungan konvensional. Apabila terjadi benturan keras seperti tabrakan, maka jenis sambungan konvensional tidak bisa berperan banyak dalam menyelamatkan penumpang, karena pada jenis sambungan konvensional terdapat konsentrasi tegangan. Namun konsentrasi tegangan tersebut dapat diredam oleh material yang memiliki sifat bisa meredam energi dengan baik, salah satunya adalah adhesive.

Sifat mekanik adhesive joint ditentukan oleh properties dari base material, bulk adhesive dan geometri sambungan. Variasi panjang overlap pada sambungan adhesive jenis tubular lap joint akan mempengaruhi sifat mekaniknya Penelitian ini mempelajari tentang pengaruh variasi panjang overlap terhadap respon tegangan-regangan sambungan hollow tubular adhesive lap joint pada laju regangan tinggi. Diamati juga pengaruhnya terhadap kurva tegangan-regangan sambungan yang diperoleh dari simulasi numerik uji Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) menggunakan ANSYS explicit dynamics.

*Uji* SHPB dan model finite element dilakukan menggunakan spesimen adhesive tubular lap joint dengan base

material pipa aluminium 6061. Pipa besar memiliki diameter dalam 18,7 milimeter sedangkan pipa kecil memiliki diameter luar 17 milimeter dan panjang total 100 milimeter. Variasi panjang overlap yang digunakan pada eksperimen ini adalah 10 mm; 15 mm; 20 mm; dan 25 mm. Hasil pengujian SHPB digunakan untuk validasi model elemen hingga di ANSYS dengan cara membandingkan respon tegangan regangan keduanya pada laju deformasi atau strain rate yang sama.

Pengujian dan simulasi dilakukan pada laju regangan yang sama orde sepuluh. Hasil yang didapatkan dari pengujian menunjukkan bahwa sambungan adhesive hollow tubular lap joint berdeformasi elastis selama periode pembebanan, dimana spesimen mengalami proses kompresi dan proses ekspansi. Pada kurva tegangan regangan sambungan mengalami kenaikan tegangan yang proporsional dengan bertambahnya regangan hingga titik tertentu, lalu mengalami penurunan tegangan hingga kembali ke titik 0 Pa. Dari hasil pengujian baik eksperimen maupun simulasi menunjukkan secara kualitatif bahwa semakin panjang overlap sambungan maka tegangan akan meningkat secara non-linear, sehingga nilai tegangan terbesar didapatkan pada sambungan dengan panjang overlap 25 mm. Hasil penelitian ini akan sangat membantu produsen manufaktur khususnya otomotif dalam mempertimbangkan panjang overlap pada sambungan adhesive hollow tubular lap joint jika diaplikasikan pada daerah sambungan yang mengalami beban tumbukan.

Kata kunci: overlap, adhesive hollow tubular lap joint, tegangan kombinasi, peel stress, explicit dynamics, Split Hopkinson Pressure Bar.

## ANALYSIS EFFECT OF LONG ADHESIVE LAYER ON STRESS STRAIN TUBULAR LAP ADHESIVE JOINT AT HIGH STRAIN RATE USING EXPLICIT DYNAMICS SIMULATION

| Student Name      | : Mahalli Ridho              |
|-------------------|------------------------------|
| NRP               | : 02111640000038             |
| Department        | : Mechanical Engineering     |
| Advisory Lecturer | : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc. |

#### ABSTRACT

In producing a vehicle, automotive manufacturers must prioritize passenger safety. In automotive frames, there are various types of joints designed to support the vehicle structure. But at present, the type of joints used is still the conventional type. In the event of a hard collision, the conventional connection type is not safe for passengers, as the conventional connection type is related to tension regulation. However, this stress concentration can be dampened by materials that have good energy absorption properties such as adhesive.

The mechanical properties of adhesive joints are determined by the properties of the base material, bulk adhesive, and the connection geometry. Variations in the overlap length of the tubular joint adhesive type will affect of variations in overlap lengths on the stress-strain response of hollow tubular adhesive lap joints at high strain rates. The effect of the joint stress-strain curve was also observed, which was obtained from the numerical simulation of the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test using ANSYS explicit dynamics.

The SHPB test and finite element model is using a specimen of adhesive tubular lap joint with aluminum 6061 as the base material. The large pipe has an inner diameter of 18,7 mm, a small pipe has an outer diameter of 17 mm, and the total length of the specimen is 100 mm. the variation of the overlap length used in this experiment is 10 mm; 15 mm; 20 mm; and 25 mm. The SHPB results were used to validate the finite element model in ANSYS by comparing the response of stress-strain at the same deformation rate or strain rate.

Experiment and simulations are carried out at the same orde  $10^1$  strain rate. The lap hollow tubular adhesive deforms elastically during the loading period, during which the specimen enhances the compression and expansion processes. In the joint stress-strain curve, there is a proportional increase in stress with the increase in strain up to a certain point, then the stress decreases until returns to point 0 Pa. From the test results, both experiments and simulations show qualitatively that the longer the overlap joints, the non-linear tension increases, so that the greatest stress value is obtained at joints with an overlap of 25 mm. The results of this study will greatly assist manufacturing manufacturers, especially in automotive considerations in the lap joint tubular adhesive joints if applied to the junction areas that experience impact loads.

Keywords: overlap, adhesive hollow tubular lap joint, combination stress, peel stress, explicit dynamics, 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 untuk saran-saran yang telah Bapak berikan demi kebaikan hasil tugas akhir penulis.
- 3. Keluarga inti penulis, Ayah, Bunda dan Adik kandung penulis yang telah memberikan banyak dukungan, fasilitas serta hiburan kepada penulis.
- 4. Keluarga besar penulis, terutama Datuk Farida Hanum yang telah menemani penulis selama tinggal di Surabaya.
- 5. Bapak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin
- 6. Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja M.T. selaku dosen wali yang selalu membantu dan mendidik sejak awal perkuliahan, banyak memberikan inspirasi, motivasi, dan bantuan kepada penulis.
- 7. Seluruh keluarga Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan penulis kesempatan untuk menimba ilmu.

- Keluarga Departemen Kewirausahaan BEM FTI ITS HARMONIKA 2017/2018 (mbak Dinda, mbak Adel, mas Yusuf, Jati, Kepinbob, Geta, Indayu, Lina, Lila, Sarah, Gefin, dan Handis) yang selalu menghibur.
- Sahabat kerja Departemen Hubungan Luar BEM FTI ITS INTERAKSI 2018/2019 (Fafa, Lila, Annisa, Rizaldo, Yasmin, Dion, Rahmi, Anin, Rafli, dan Ficky) yang sudah membantu banyak.
- 10. 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.
- 11.Warga laboratorium otomotif yang selalu menemani, mendukung, dan memberikan hiburan untuk penulis.
- 12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis satu per satu.
- 13. Ahmad Hamzah, Aryo Bimanto, dan Nabila, yang selalu bersedia membantu penulis dalam keluh kesah selama ini.
- 14. Laskar Andakara Surabaya yang menjadi teman seperantauan, khususnya Azmi, Dony, Rayhan, Afif, dan Fikar yang menjadi teman satu atap.

Penulis menyadari 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

| HALAN   | IAN PENGESAHAN iv                                |
|---------|--|
| ABSTRA  | AKv  |
| ABSTRA  | <i>CT</i> vii                                    |
| KATA F  | PENGANTARix                                      |
| DAFTA   | R ISI xi   |
| DAFTA   | R GAMBAR xiv                                     |
| DAFTA   | R TABEL xvii                                     |
| BAB I   |  |
| PENDA   | HULUAN1  |
| 1.1     | Latar Belakang1                                  |
| 1.2     | Rumusan Masalah3                                 |
| 1.3     | Tujuan Penelitian                                |
| 1.4     | Batasan Masalah4                                 |
| 1.5     | Manfaat Penelitian4                              |
| BAB II. |  |
| TINJAU  | JAN PUSTAKA 6                                    |
| 2.1     | Adhesive   |
| 2.2     | Sambungan Adhesive                               |
| 2.3     | Sambungan Adhesive Tubular10                     |
| 2.4     | Split Hopkinson Pressure Bar11                   |
| 2.5     | Kurva Tegangan-Regangan12                        |
| 2.6     | Tegangan Geser14                                 |
| 2.7     | Pengolahan Data Split Hopkinson Pressure Bar     |
| 2.8     | Perhitungan Pada Split Hopkinson Pressure Bar 17 |
| 2.9     | Simulasi ANSYS20                                 |
| 2.9.1   | Explicit Dynamics 20                             |
| 2.10    | Penelitian Terdahulu                             |
| 2.10.   | 1 An Experimental Study of Fatigue Strength for  |
|         | Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints 21   |
| 2.10.2  | 2 Optimal Tubular Adhesive Bonded Lap Joint of   |
|         | The Carbon Fiber Epoxy Composite Shaft           |

| <b>BAB III</b> |  |
|----------------|--|
| METOD          | OOLOGI PENELITIAN26  |
| 3.1            | Flowchart Penelitian   |
| 3.2            | Setup dan Kalibrasi Alat Uji Split Hopkinson Pressure        |
|                | Bar  |
| 3.3            | Eksperimen   |
| 3.3.1          | Flowchart Eksperimen   |
| 3.3.2          | Spesimen Pengujian   |
| 3.4            | Simulasi Explicit Dynamics ANSYS                             |
| 3.4.1          | Tahapan Simulasi   |
| 3.5            | Pengolahan dan Analisa Data Eksperimen dan Simulasi<br>49    |
| 3.5.1          | Pengolahan dan Analisa Data Eksperimen                       |
| 3.5.2          | Pengolahan dan Analisa Data Simulasi 55                      |
| 3.5.3          | Analisa Perbandingan Hasil Perhitungan                       |
|                | Eksperimen Dengan Simulasi 58                                |
| BAB IV         | Eusperinien Dengan Simulasi                                  |
| HASIL          | DAN PEMBAHASAN61   |
| 4.1            | Hasil Penguijan  |
| 4.1.1          | Laiu Regangan Pada Tiap Variasi <i>Overlap</i>               |
| 4.1.2          | <i>Compressive Force</i> Pada Tiap Variasi <i>Overlap</i> 64 |
| 4.1.3          | Kurva Tegangan Regangan Pada Tiap Variasi                    |
|                | Overlap  |
| 4.2            | Perbandingan Simulasi Terhadap Eksperimen                    |
| 4.3            | Analisa Pada Sambungan Adhesive Layer                        |
| 4.3.1          | Kurva Laju Regangan Pada Tiap Variasi Overlap75              |
| Perba          | ndingan lurva laju regangan simulasi antara                  |
| 1 0100         | spesimen yang memiliki sisa panjang adherend 5               |
|                | mm dengan spesimen yang memiliki panjang total               |
|                | 100 mm dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan                    |
|                | Gambar 4.13  |
| 4.3.2          | Kurva Compressive Force Pada Tiap Variasi                    |
|                | Overlap  |

| 4.3.3  | Deformasi Adhesive                   | 77         |
|--------|--------------------------------------|------------|
| 4.3.4  | Kurva Tegangan-Regangan Pada Tia     | ap Variasi |
|        | Overlap                              | 79         |
| 4.4    | Pembahasan Pengaruh Sisa Panjang Adh | erend Pada |
|        | Sambungan                            |            |
| BAB V. | ~                                    | 82         |
| KESIM  | PULAN DAN SARAN                      | 82         |
| 5.1    | Kesimpulan                           |            |
| 5.2    | Saran                                |            |
| DAFTA  | R PUSTAKA                            | 84         |
| BIODA  | ΓΑ PENULIS                           | 86         |

# DAFTAR GAMBAR

| Gambar 2.1 Jenis tegangan yang umum ditemukan pada                    |
|---|
| sambungan adhesive (a) kompresi (b) tensile (c) shear (d) peel        |
| (e) <i>cleavage</i> (Messler, 2004)                                   |
| Gambar 2.2 Sambungan adhesive tubular joint (Dai Gil Lee, 1991)       |
|   |
| Gambar 2.3 Desain Split Hopkinson Pressure Bar yang umum              |
| digunakan (Chen & Song, 2011)11                                       |
| Gambar 2.4 Grafik tegangan regangan (Callister, 2010)                 |
| Gambar 2.5 Arah tegangan geser (Hibbeler, 2011)14                     |
| Gambar 2.6 Arah regangan yang terjadi saat tumbukan (Chen &           |
| Song, 2011)   |
| Gambar 2.7 Diagram posisi waktu perambatan gelombang dalam            |
| Split Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011)                      |
| Gambar 2.8 Hasil pengujian pengaruh <i>surface roughness</i> terhadap |
| beban <i>fatigue</i> (Dai Gil Lee, 1991)22                            |
| Gambar 2.9 Hasil pengujian pengaruh ketebalan adhesive terhadap       |
| beban <i>fatigue</i> (Dai Gil Lee, 1991)22                            |
| Gambar 2.10 Hubungan antara torsi dengan sudut puntir (Ki Soo         |
| Kim, 1992)  |
| Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian                                |
| Gambar 3.2 Skema alat uji Split Hopkinson Pressure Bar31              |
| Gambar 3.3 Alat uji Split Hopkinson Pressure Bar                      |
| Gambar 3.4 Diagram Lagrangian pada Split Hopkinson Pressure           |
| Bar   |
| Gambar 3.5 Alat dynamic strainmeter                                   |
| Gambar 3.6 Sinyal pengujian Split Hopkinson Pressure Bar tanpa        |
| adanya spesimen   |
| Gambar 3.7 Flowchart pengambilan data eksperimen                      |
| Gambar 3.8 Alat potong tampak atas40                                  |
| Gambar 3.9 Alat potong tampak samping40                               |
| Gambar 3.10 Gerinda   |
| Gambar 3.11 Geometri spesimen uji (dalam satuan mm)42                 |

| Gambar 3.12 Spesimen uji tampak atas42                          |
|---|
| Gambar 3.13 Spesimen uji tampak samping                         |
| Gambar 3.14 Flowchart simulasi                                  |
| Gambar 3.15 Dimensi striker bar45                               |
| Gambar 3.16 Dimensi incident bar                                |
| Gambar 3.17 Dimensi spesimen uji45                              |
| Gambar 3.18 Dimensi transmitted bar                             |
| Gambar 3.19 Perbandingan uji konvergensi. (a) konvergensi       |
| aluminium (b) konvergensi adhesive                              |
| Gambar 3.20 Hasil meshing aluminium                             |
| Gambar 3.21 Hasil meshing adhesive                              |
| Gambar 3.22 Permodelan pada ANSYS Explicit Dynamics49           |
| Gambar 3.23 Kurva regangan terhadap waktu hasil dari pengujian. |
|   |
| Gambar 3.24 Kurva hasil pemotongan kurva incident, reflected,   |
| dan transmitted strain eksperimen51                             |
| Gambar 3.25 Kurva hasil perhitungan P1 dan P2 terhadap waktu    |
|   |
| Gambar 3.26 Grafik laju regangan terhadap waktu pada percobaan  |
| variasi panjang overlap 10 mm53                                 |
| Gambar 3.27 Contoh kurva hasil perhitungan tegangan-regangan    |
| pada percobaan overlap 10 mm55                                  |
| Gambar 3.28 Grafik regangan terhadap waktu hasil simulasi56     |
| Gambar 3.29 Grafik <i>trim</i>                                  |
| Gambar 3.30 Grafik P1-P257                                      |
| Gambar 3.31 Grafik laju regangan57                              |
| Gambar 3.32 Grafik tegangan-regangan                            |
| Gambar 3.33 Perbandingan kurva trim incident                    |
| -   |
| Gambar 4.1 Laju regangan pada tiap variasi overlap (a) hasil    |
| eksperimen (b) hasil simulasi62                                 |
| Gambar 4.2 Kurva compressive force hasil eksperimen             |

|            | •                |                       | •        |     |
|------------|------------------|-----------------------|----------|-----|
| Gambar 4.3 | Kurva compressiv | <i>ve force</i> hasil | simulasi | .65 |

| Gambar 4.4 Hasil tangkapan layar dari rekaman simulasi pada          |
|--|
| spesimen uji. (a) spesimen sebelum ditumbuk (b) spesimen             |
| saat ditumbuk66  |
| Gambar 4.5 Deformasi pada adhesive saat terkena tumbukan66           |
| Gambar 4.6 Tegangan peel pada sambungan lap joint (Lucas F.M.        |
| da Silva & R.D. Adams, 2006)67                                       |
| Gambar 4.7 Tegangan pada adherend sambungan lap joint (Lucas         |
| F.M. da Silva & R.D. Adams, 2006)67                                  |
| Gambar 4.8 Kurva tegangan regangan pada tiap variasi overlap. (a)    |
| hasil eksperimen (b) hasil simulasi69                                |
| Gambar 4.9 Deformasi adhesive pada panjang total spesimen 100        |
| mm70   |
| Gambar 4.10 Hasil tangkapan layar pada <i>adherend</i> yang panjang. |
| (a) sebelum diberi beban (b) saat diberi beban73                     |
| Gambar 4.11 Spesimen dengan sisa panjang adherend 5 mm74             |
| Gambar 4.12 Laju regangan spesimen dengan spesimen sisa              |
| <i>adherend</i> 5 mm75   |
| Gambar 4.13 Laju regangan spesimen panjang total adherend 100        |
| mm75   |
| Gambar 4.14 Kurva compressive force spesimen dengan sisa             |
| adherend 5 mm76  |
| Gambar 4.15 Kurva compressive force spesimen dengan panjang          |
| total 100 mm77   |
| Gambar 4.16 Adhesive yang berdeformasi pada spesimen dengan          |
| sisa panjang <i>adherend</i> 5 mm78                                  |
| Gambar 4.17 Adhesive yang berdeformasi pada spesimen dengan          |
| panjang total 100 mm78   |
| Gambar 4.18 Kurva tegangan-regangan pada spesimen sisa               |
| panjang <i>adherend</i> 5 mm80                                       |

# DAFTAR TABEL

| Tabel 2.1 Kelebihan dan kekurangan adhesive joint (N     | Messler, |
|--|----------|
| 2004)  | 7        |
| Tabel 2.2 Kapasitas torsi maksimal pada sambungan (dalan | n satuan |
| Nm)  | 24       |
| Tabel 4.1 Perbandingan hasil laju regangan pada tiap     | variasi  |
| panjang lapisan <i>adhesive</i>                          | 63       |
| Tabel 4.2 Parameter epoxy untuk simulasi pada ANSYS      | Explicit |
| Dynamics   | 71       |
| Tabel 4. 3 Epoxy dalam penelitian (Jordan et al, 2010)   | 72       |
| Tabel 4.4 Parameter adherend spesimen                    | 79       |
| •  |          |

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Dalam memproduksi sebuah kendaraan. produsen otomotif harus mengutamakan kesalamatan penumpang. Pada rangka otomotif, terdapat berbagai jenis sambungan yang dirancang untuk menguatkan struktur kendaraan. Tetapi hingga saat ini jenis sambungan yang digunakan masih jenis sambungan konvensional. Saat tabrakan, jenis sambungan konvensional tidak bisa berperan banyak dalam menyelamatkan penumpang karena pada jenis sambungan konvensional terdapat konsentrasi tegangan. Namun, konsentrasi tegangan tersebut dapat diredam oleh material yang memiliki sifat bisa meredam energi dengan baik. Salah satunya adalah penggunaan adhesive seperti yang ditunjukkan oleh penelitian oleh W. Li dkk (1999) yang menyatakan bahwa, semakin tebal lapisan adhesive maka struktur akan memiliki peredaman yang lebih baik. Penggunaan adhesive dapat dikombinasikan dengan jenis-jenis sambungan konvensional seperti, lap joint, scarf joint, butt joint, edge joint, dan disebut sebagai hybrid joint

Adhesive joint adalah sambungan dua material dengan bahan dasar menggunakan perekat yang banyak dijumpai dalam dunia industri. Penerapan adhesive joint pada struktur kendaraan kini semakin banyak diminati dan semakin berkembang, termasuk penelitian tentang adhesive joint. Berkembangnya penerapan adhesive joint disebabkan oleh keuntungan yang didapatkan dibanding dengan jenis sambungan konvensional. Beberapa keuntungan yang didapatkan dari penggunaan adhesive joint adalah bisa digunakan untuk menyambungkan dua jenis material yang berbeda, mendapatkan kekuatan yang diinginkan, lebih ringan dan bisa menyesuaikan dengan bentuk geometri yang diinginkan. Apabila ditinjau secara teknis lalu dibandingkan dengan jenis sambungan konvensional, *adhesive joint* jauh lebih mudah dalam proses pengerjaannya. Selain itu menurut Messler (2004) *adhesive* juga memiliki sifat yang lebih tahan korosi dan lebih ringan. *Adhesive joint* meminimalkan konsentrasi tegangan saat diberi beban karena beban didistribusikan ke permukaan sambungan yang lebih luas. Hal ini berbanding terbalik dengan sambungan konvensional, misalnya *riveting*. *Riveting* jika diberi beban tinggi atau tumbukan, maka akan muncul kerusakan karena adanya konsentrasi tegangan. Konsentrasi tegangan tersebut akan menjadi salah satu penyebab kerusakan lebih lanjut pada rusaknya struktur ringan kendaraan seperti retak, hal tersebut sangat membahayakan bagi konstruksi kendaraan.

Penggunaan adhesive joint sudah mulai diterapkan pada sambungan *real* struktur kendaraan. Salah satu jenis struktur kendaraan yang sering digunakan adalah rangka tubular. Jenis rangka tubular banyak digunakan pada industri otomotif karena mampu menerima dan mendistribusikan gaya menjadi lebih merata ke seluruh permukaan, dan proses manufaktur yang bisa disesuaikan dengan desain. Dalam kondisi diam, struktur hanya bekerja untuk menahan beban statis. Namun selain beban statis, struktur kendaraan pada kondisi *real* juga menerima beban dinamis yaitu pada kondisi kendaraan sedang bergerak. Di masa depan, adhesive joint akan menjadi sebuah alternatif lain pada sambungan tubular untuk menciptakan struktur kendaraan yang lebih ringan dan lebih kuat menahan gaya yang diberikan pada kendaraan. Terlebih lagi, jenis tubular tidak hanya diproduksi dari steel saja namun dari bahan carbon juga sehingga dibutuhkan sambungan adhesive.

Penelitian tentang karakteristik *adhesive joint* sudah banyak dilakukan, salah satunya adalah penelitian tentang pengaruh variasi nilai kekasaran permukaan dan variasi ketebalan *adhesive* pada *single lap tubular joint* yang diteliti oleh Dai Gil Lee dkk (1991). Selain itu penelitian yang diteliti oleh Ki Soo Kim dkk (1992) mengenai sambungan *tubular adhesive lap joint* yang optimal juga menyebutkan bahwa sambungan *double lap* lebih kuat. Namun, karakterisasi tegangan-regangan dari *tubular adhesive lap joint* pada laju regangan atau laju deformasi tinggi belum banyak dilakukan. Padahal, *properties* tersebut penting diketahui agar dapat mensimulasikan dan menganalisa deformasi dan tegangan pada struktur saat menerima beban tumbuk, misal tabrakan. Oleh karena itu, penulis meneliti pengaruh panjang *overlap* terhadap respon tegangan-regangan *hollow tubular adhesive joint* pada laju regangan tinggi menggunakan uji SHPB dan pemodelan elemen hingga di *ANSYS explicit dynamic*. Data hasil pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* digunakan untuk validasi/pembanding hasil simulasi.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar perancangan sambungan pada struktur pipa *(tubular structure)* yang berperan penting mendukung perkembangan struktur ringan misal, *tubular frame* pada kendaraan.

### 1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini, dirumuskan beberapa permasalahan yaitu sebagai berikut:

- 1. Bagaimana hubungan respon tegangan-regangan spesimen *tubular lap joint* pada laju regangan tinggi dari uji SHPB?
- 2. Bagaimana model elemen hingga untuk uji SHPB dengan spesimen *tubular lap joint*?
- 3. Bagaimana pengaruh panjang *overlap* (*adhesive layer*) terhadap respon tegangan-regangan *tubular adhesive lap joint*?

# **1.3** Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan respon tegangan-regangan *tubular adhesive lap joint* pada laju regangan tinggi.

- 2. Mendapatkan parameter/model material *adhesive* untuk simulasi *explicit dynamic*.
- 3. Menyediakan opsi desain sambungan *tubular adhesive lap joint* dengan rentang sifat mekanik yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan.
- 4. Mendapatkan panjang *overlap* yang paling bagus dari jenis sambungan *hollow tubular lap joint*.
- 5. Mendapatkan parameter data material *epoxy* yang dibutuhkan oleh *ANSYS* berdasarkan data eksperimen yang didapatkan.
- 6. Membuat permodelan pada *ANSYS* untuk pengujian variasi panjang *overlap* yang berbeda-beda.

## 1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah, yaitu sebagai berikut:

- 1. Ketebalan *adhesive* ditentukan dari perbedaan diameter dua spesimen.
- 2. Sambungan yang diuji merupakan sambungan real.
- 3. Gelombang yang merambat dalam rangkaian *pressure bar* tidak terdispersi.
- 4. Misalignment pada pressure bar diabaikan.
- 5. Gaya gesek pada tumpuan dengan *bar components* diabaikan.
- 6. Pengujian dilakukan pada temperatur ruang.
- 7. *Strain* yang diukur pada *pressure bar* sama dengan *strain* yang diukur pada spesimen dengan mengabaikan *wave distortion*.

# 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian sambungan *adhesive* pada *hollow tubular lap joint* yang

ditumbuk menggunakan alat Split Hopkinson Pressure Bar.

- 2. Sebagai dasar pengambilan keputusan untuk menetukan panjang *overlap* pada *hollow tubular lap joint* yang tepat pada konstruksi kendaraan.
- 3. Sebagai referensi dalam menentukan parameter pada permodelan *ANSYS* untuk pengujian menggunakan SHPB pada jenis sambungan *hollow tubular lap joint*.

# BAB II TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Adhesive

Adhesive merupakan salah satu jenis perekat yang menggunakan dua campuran bahan kimia, yaitu resin dan hardener. Komposisi resin/hardener sangat menentukan polimerisasi adhesive dan rasionya ditentukan oleh produsen untuk mendapatkan kekuatan rekat yang maksimal. Jika porsi epoxy/hardener tidak tepat, maka adhesive akan menjadi semakin kaku atau lunak.

Tujuan dari penggunaan *adhesive* adalah untuk menyerap energi yang diberikan akibat pemberian beban tinggi. Kelebihan dari penggunaan *adhesive* adalah mudah dalam penggunaan, bisa diaplikasikan pada berbagai macam material, dan bisa menyambungkan jenis material yang berbeda.

# 2.2 Sambungan Adhesive

Sambungan *adhesive* merupakan salah satu metode penyambungan material dengan menggunakan *adhesive* yang dioleskan pada permukaan yang ingin direkatkan. Material yang disambungkan disebut sebagai *adherend*, sedangkan perekatnya disebut dengan *adhesive*. *Adhesive* digunakan sebagai salah satu perekat sambungan karena sifatnya yang mampu menyerap energi tumbukan pada struktur agar tidak membahayakan penumpang. Tidak seperti pada jenis sambungan konvensional, sambungan *adhesive* cenderung tidak merusak komponen material yang akan disambungkan. Tabel 2.1 menunjukkan kelebihan dan kekurangan *adhesive joint* dibandingkan dengan metode sambungan konvensional.

| Kelebihan   | Kekurangan  |
|---|---|
| Dapat diaplikasikan pada<br>material yang tebal dan atau<br>tipis     | Apabila rusak maka harus<br>langsung diganti      |
| Distribusi tegangan yang<br>uniform                                   | Dibutuhkan persiapan<br>permukaan <i>adherend</i> |
| Bisa disesuaikan untuk<br>berbagai jenis bentuk<br>sambungan          | Sangat sensitif terhadap solvent                  |
| Tahan terhadap reaksi kimia   | Keterbatasan uji nondestruktif                    |
| lain (seperti korosi)   | untuk beberapa kasus tertentu                     |
| Permukaan sambungan yang<br>dihasilkan halus                          | Waktu <i>curing</i> yang cenderung lama           |
| Bisa diaplikasikan untuk<br>sambungan dengan material<br>yang berbeda | Analisa tegangan yang rumit                       |
| Pengerjaan yang lebih cepat<br>dan murah                              | Sensitif terhadap lingkungan<br>yang ekstrim      |
| Properti damping yang baik  | Dibutuhkan proses kontrol<br>yang ketat           |

Tabel 2.1 Kelebihan dan kekurangan *adhesive joint* (Messler, 2004)

Desain sambungan *adhesive* harus diperhatikan untuk menghindari kegagalan fungsi akibat kegagalan menopang tegangan kerja. Sambungan *adhesive* yang bagus harus dapat menerima tegangan secara maksimal pada daerah yang disambung dan memperkecil konsentrasi tegangan. Penentuan desain sambungan *adhesive* bergantung pada biaya produksi dan kebutuhan struktur kendaraan. Untuk menerima tegangan secara maksimal dan memperkecil konsentrasi tegangan, dibutuhkan kekuatan dari *adhesive* itu sendiri. Kekuatan *adhesive* dapat ditentukan dari:

- Sifat mekanika dari *adhesive* dan *adherend*
- *Residual stresses* saat pemrosesan

- Tipe beban yang ditopang oleh sambungan
- Geometri sambungan

Tegangan yang ada pada sambungan *adhesive* terdapat dalam beberapa jenis. Secara umum, jenis tegangan yang dapat ditemukan pada sambungan *adhesive* ada lima yaitu; tegangan kompresi, tegangan tarik, tegangan geser, *cleavage*, dan *peel*. Keseluruhan jenis tegangan ini dapat terjadi secara individu atau kombinasi. Gambar tegangan yang ada pada sambungan *adhesive* bisa dilihat pada Gambar 2.1.



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

Menurut Messler (2004), tegangan kompresi terjadi saat beban yang diberikan tegak lurus dengan sambungan dan menekan *adhesive*. Jika *adhesive* kaku maka tegangan kompresi yang diterima oleh *adhesive* akan kecil. Namun, pada kondisi ini *adherend* menjadi lebih rentan gagal dibandingkan lapisan *adhesive*. Tegangan tarik terjadi saat beban bekerja tegak lurus terhadap sambungan dan *adherend*. Tegangan tarik ini membuka dan memisahkan adhesive dari sambungan. Teorinya, tegangan tarik pada permukaan *adherend* didistribusikan merata ke seluruh permukaan adhesive. Namun secara realitanya, offsets pada sambungan, bending pada adherend, dan komplikasi lainnya mengakibatkan tegangan menjadi tidak merata. Hal tersebut menyebabkan terjadinya *peel* atau *cleavage*. Kekuatan tarik harus diseimbangkan dengan geser pada sambungan agar tidak terjadi tegangan uniaxial. Adherend harus cukup tebal untuk mencegah terjadinya bending atau offset loading pada pembebanan tarik. Tegangan geser merupakan tipe pembebanan yang paling sering dijumpai pada sambungan *adhesive*. Adhesive mengalami tegangan geser saat beban bekerja paralel terhadap bidang sambungan. Tegangan geser memisahkan sambungan dengan menggeser spesimen satu dengan yang lainnya. Kekuatan geser sambungan adhesive berbanding lurus dengan panjang overlap, tetapi akan berkurang dengan bertambah lebar overlap. Modulus geser dan ketebalan optimal *adhesive* sangat mempengaruhi kekuatan geser maksimum sambungan adhesive. Tegangan peel memisahkan akibat ketidakseragaman distribusi sambungan gaya pada permukaan adhesive. Umumnya, beban peel memisahkan sambungan mulai dari ujung sambungan. Tegangan peel terjadi apabila salah satu ataupun kedua adherend lentur dan mudah berdefleksi. Kondisi tersebut mengakibatkan tegangan tinggi pada interface adhesive dan adherend. Oleh sebab itu beban peel harus dihindari dari sambungan adhesive dengan cara mengetahui beban maksimal yang dapat diterima oleh sambungan.

Tegangan *cleavage* mirip dengan tegangan *peel.* Perbedaannya adalah, pembebanan *cleavage* akan bekerja pada sambungan dengan *adherend* yang *rigid.* Apabila terdapat *offset* tegangan tarik atau gaya momen pada pembebanan *cleavage* maka akan mengakibatkan tegangan *nonuniform* pada sambungan. Sama seperti pembebanan *peel*, pembebanan *cleavage* harus dihindari sebisa mungkin, salah satu caranya adalah dengan mengetahui tegangan maksimal yang bisa diterima oleh sambungan. Sesuai dengan fungsi dari sambungan *adhesive*, ia harus mampu mencegah kegagalan sambungan dengan cara meredam getaran yang diterima saat diberi pembebanan tinggi. Apabila desain sambungan sederhana, maka membutuhkan biaya yang lebih kecil dan berfungsi dengan baik pada tingkat beban rendah dan sederhana. Namun desain sambungan yang lebih kompleks membutuhkan biaya yang lebih besar dan berfungsi dengan baik pada tingkat beban yang tinggi.

#### 2.3 Sambungan Adhesive Tubular

Adhesive tubular joint merupakan penyambungan antar dua spesimen dengan geometri berupa *tube*. Keuntungan menggunakan *tube* dalam struktur rangka kendaraan adalah mudah dalam proses manufaktur, geometri yang tidak rumit, dan dapat mendistribusikan gaya secara merata pada ujung spesimen.

Jenis sambungan ini banyak digunakan pada struktur kendaraan bermotor roda dua, lalu sebagai *roll cage* untuk menahan terjadinya *rolling resistance* kabin dari sebuah mobil apabila terjadi *rolling*. Salah satu jenis sambungan *tubular* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sambungan *adhesive tubular joint* (Dai Gil Lee, 1991)

Keterangan:

| $J_1 dan J_2$         | = momen inersia dari masing – masing <i>adherends</i> |
|-----------------------|---|
| G1 dan G2             | = shear modulus dari adherends                        |
| $\mathbf{r}_1$        | = radius dalam <i>adhesive</i>                        |
| <b>r</b> <sub>2</sub> | = radius luar <i>adhesive</i>                         |
| 1                     | = panjang <i>adhesive</i> pada sambungan              |

#### 2.4 Split Hopkinson Pressure Bar

Split Hopkinson Pressure Bar (SPHB) atau dikenal juga sebagai Kolsky Bar adalah salah satu alat uji yang digunakan untuk mengetahui respon tegangan-regangan material pada laju regangan tinggi. Split Hopkinson Pressure Bar terdiri dari 3 komponen utama seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, yaitu loading device, bar components, dan data acquisition and recording system.



Gambar 2.3 Desain *Split Hopkinson Pressure Bar* yang umum digunakan (Chen & Song, 2011)

Umumnya, semua *bar* memiliki diameter dan material yang sama. *Striker bar* akan menumbuk *incident bar* sehingga membangkitkan gelombang tegangan pada *incident bar*. Gelombang tegangan didalam *bar* dihitung dari regangan permukaan yang diukur oleh strain gauge pada permukaan pressure bar. Oleh sebab itu, material dari bar harus elastis secara linier dan memiliki kekuatan *yield* yang tinggi. Untuk menjamin bahwa gelombang yang merambat merupakan gelombang satu dimensi, maka hal – hal yang harus diperhatikan adalah bar yang harus lurus secara fisik, tidak ada hambatan pada *support*, dan gaya gesek yang terjadi harus kecil. Setelah striker bar menumbuk incident bar, maka akan timbul tegangan kompresi dalam satu arah dan memberikan beban dinamik pada spesimen yang besarnya berubah terhadap waktu. Setelah gelombang mencapai spesimen, maka sebagian gelombang tegangan kompresi dipantulkan kembali ke incident bar lalu menjadi gelombang tegangan tarik, dan sebagian lagi diteruskan ke transmitted bar dalam bentuk tegangan kompresi. Seluruh struktur harus segaris sumbu (align). Incident bar memiliki panjang minimal dua kali panjang striker bar untuk mencegah terjadinya overlap antara sinyal incident dengan sinyal yang dipantulkan. Spesimen uji dijepit diantara incident bar dan transmission bar seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Output dari eksperimen alat Split Hopkinson Pressure Bar ini adalah sinyal regangan terhadap waktu yang kemudian digunakan untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan.

### 2.5 Kurva Tegangan-Regangan

Kurva tegangan regangan (*stress strain curve*) merepresentasikan sifat mekanik sebuah spesimen ketika diberi beban. Secara umum, kurva tegangan regangan memiliki bentuk seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Grafik tegangan regangan (Callister, 2010)

Dari titik 0 (nol), grafik berbentuk garis lurus awal merupakan daerah elastis, dimana tegangan berbanding lurus dengan regangan. Apabila tegangan dilepaskan kembali, maka spesimen akan berbentuk seperti semula. Apabila tegangan terus diberikan hingga melebihi batas elastis maka spesimen memasuki zona plastis, dimana spesimen tidak bisa kembali ke bentuk semula atau bisa disebut dengan deformasi plastis. Kurva tegangan regangan dibuat dari perbandingan beban yang diberikan dan hasil elongasi yang dihasilkan pada spesimen. Tegangan yang diplot pada kurva tegangan regangan akan menjadi tegangan longitudinal rata rata pada spesimen yaitu, rasio beban berupa terhadap luasan penampang spesimen. Persamaan tegangan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \tag{2.1}$$

keterangan:

 $\sigma$  = tegangan

P = beban

 $A_0$  = penampang spesimen

Regangan yang telah diplot pada kurva tegangan regangan tersebut adalah regangan rata – rata, dimana nilai tersebut bisa didapatkan

dari pembagian elongasi panjang spesimen dengan panjang awal. Persamaan regangan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \tag{2.2}$$

keterangan:

 $\delta$  = elongasi

 $L_0$  = panjang awal

 $\Delta L$  = selisih panjang akhir dengan panjang awal

Karena kedua tegangan regangan yang didapatkan dari pembagian beban dan elongasi dengan faktor yang konstan, maka kurva beban elongasi memiliki bentuk yang sama dengan kurva tegangan regangan (*stress strain curve*).

### 2.6 Tegangan Geser

Menurut Hibbeler (2011), tegangan geser dapat diartikan sebagai intensitas gaya tangensial yang bekerja pada luasan  $\Delta A$ . Saat terjadi tegangan geser pada suatu material maka volume dari material itu sendiri harus dalam keadaan *equilibrium* atau tidak berubah. Berikut pada Gambar 2.5 adalah gambaran bagaimana tegangan geser bekerja pada suatu medium.



Gambar 2.5 Arah tegangan geser (Hibbeler, 2011)

Tegangan regangan pada level rendah secara virtual memiliki karakteristik yang sama dengan keadaan *tensile* dan

*compressive* untuk mengetahui nilai modulus elastisitas. Tegangan geser dan regangan geser memiliki hubungan untuk mengetahui nilai modulus geser, hubungan tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{2.3}$$

keterangan:

G = modulus geser

 $\tau$  = regangan geser

 $\gamma$  = regangan geser

#### 2.7 Pengolahan Data Split Hopkinson Pressure Bar

Setelah dilakukan eksperimen menggunakan *Split Hopkinson Pressure Bar*, maka akan didapatkan data berupa sinyal regangan yang direkam oleh *strain gauge*. Durasi pembebanan yang dihasilkan dapat dihitung dengan mengetahui panjang *striker bar*:

$$T = \frac{2L}{c_{St}} \tag{2.4}$$

keterangan:

T =durasi pembebanan

*L* = panjang *striker bar* 

 $C_{St}$  = kecepatan gelombang elastis dari material *striker bar* 

Pada umumnya, *striker bar* memiliki material dan luas penampang yang sama dengan *incident bar* dan *transmitted bar*. Dalam kasus seperti ini, regangan dari *incident pulse* yang dihasilkan dari tumbukan *striker bar* dipengaruhi oleh kecepatan *striker bar*. Secara matematis, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \rho_B C_B V_{st} \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{st}}{C_B} \tag{2.6}$$

keterangan:

 $\rho_B$  = densitas dari material

 $C_B$  = kecepatan elastis gelombang material

| V <sub>st</sub> | = kecepatan striker bar      |
|-----------------|------------------------------|
| $\sigma_I$      | = tegangan pada incident bar |
| $\mathcal{E}_I$ | = regangan pada incident bar |

Ketika *striker bar* menumbuk *incident bar*, maka arah rambat gelombang regangan yang terjadi pada alat *Split Hopkinson Pressure Bar* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Arah regangan yang terjadi saat tumbukan (Chen & Song, 2011)

Gelombang regangan akibat tumbukan merambat dari *incident bar* ke *transmission bar* tanpa terjadinya dispersi. Dengan demikian, sinyal yang ditangkap oleh s*train gauge* pada *incident bar* dan *transmission bar* merepresentasikan sinyal regangan yang terjadi pada ujung spesimen yang kontak dengan *pressure bar*. Pada pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar*, gelombang regangan berhubungan dengan kecepatan partikel pada kedua ujung spesimen. Kedua hubungan tersebut bisa ditulis dengan persamaan:

$$V_1 = C_B \left( \varepsilon_I - \varepsilon_R \right) \tag{2.7}$$

$$V_2 = C_B \left( \varepsilon_T \right) \tag{2.8}$$

keterangan:

$$\varepsilon_I$$
 = regangan *incident*

 $\varepsilon_R$  = regangan *reflected* 

 $\varepsilon_T$  = regangan *transmitted* 

Sedangkan, untuk laju regangan rata – rata dan regangan pada spesimen dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{c_B}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T)$$
(2.9)

$$\varepsilon = \frac{c_B}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \qquad (2.10)$$

keterangan:

 $L_s$  = panjang awal spesimen

Untuk tegangan pada kedua ujung spesimen dihitung dengan persamaan elastis:

$$\sigma_1 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B \left( \varepsilon_I + \varepsilon_R \right) \tag{2.11}$$

$$\sigma_2 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B \left( \varepsilon_T \right) \tag{2.12}$$

$$P_1 = A_b E \left\{ \varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) \right\}$$
(2.13)

$$P_2 = A_b E \varepsilon_T(t) \tag{2.14}$$

keterangan:

 $A_B$  = luas penampang *bar* 

 $A_S$  = luas penampang spesimen

 $E_B$  = modulus young bar

#### 2.8 Perhitungan Pada Split Hopkinson Pressure Bar

Menurut Chen & Song (2011), *strain gauges* yang berfungsi untuk menangkap sinyal regangan dari rangkaian alat uji SHPB tidak bisa diletakkan sembarangan, karena untuk menghindari sinyal yang tertangkap bertumpang tindih maka peletakkan *strain gauge* harus diperhatikan. Diagram Lagrangian atau diagram posisi perambatan gelombang yang tejadi di dalam *bar* yang sudah tertumbuk terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 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 atau regangan dari pulsa *incident*,  $\sigma_I$  atau  $\epsilon_I$  yang dihasilkan oleh impak penumbuk bergantung pada kecepatan tumbukan (v<sub>st</sub>) seperti pada persamaan berikut:

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \rho_B C_B v_{st} \tag{2.15}$$

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{c_B} \tag{2.16}$$

keterangan:

 $\rho_{\rm B} = \text{massa jenis material } bar$  $C_{\rm B} = \text{kecepatan gelombang material } bar$ 

Dengan asumsi bahwa gelombang tegangan merambat pada *incident bar* dan *transmission bar* tanpa adanya penyebaran gelombang, terdapat 3 pulsa regangan yang diukur (Gambar 2.6).  $v_1$  dan  $v_2$  dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$v_1 = C_B(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \tag{2.17}$$

$$v_2 = C_B \varepsilon_T \tag{2.18}$$

keterangan:

 $\varepsilon_I = \text{sinyal incident}$ 

 $\varepsilon_R$  = sinyal reflected

 $\varepsilon_T$  = sinyal *transmitted* 

Laju regangan rata - rata dan regangan dalam spesimen dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{c_B}{L_s} \left( \varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T \right) \tag{2.19}$$

$$\varepsilon = \frac{c_B}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \qquad (2.20)$$

keterangan:

 $L_s$  = panjang spesimen

Tegangan pada kedua ujung spesimen dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_1 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B(\varepsilon_I + \varepsilon_R) \tag{2.21}$$

$$\sigma_2 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B \cdot \varepsilon_T \tag{2.22}$$

keterangan:

 $A_B = luas permukaan bar$  $A_S = luas permukaan spesimen$ 

 $E_B = modulus young material bar.$ 

Dengan mengasumsikan keseimbangan tegangan yang dapat dinyatakan sebagai:  $\sigma_1 = \sigma_2$ 

maka diperoleh:

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \tag{2.23}$$

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

$$\dot{\varepsilon} = -2 \frac{C_B}{L_s} \varepsilon_R$$
  
$$\varepsilon = -2 \frac{C_B}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R \, dt \qquad (2.24)$$

$$\sigma = \frac{A_B}{A_s} E_B \varepsilon_T \tag{2.25}$$

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:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_B}{A_s} \cdot E_B(\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \qquad (2.26)$$
semua persamaan di atas diperoleh dari konservasi massa dan momentum dengan asumsi perambatan gelombang satu dimensi.

# 2.9 Simulasi ANSYS

ANSYS adalah salah satu perangkat lunak yang berbasis metode elemen hingga. ANSYS digunakan untuk menganalisa masalah yang ada dibidang *engineering*. Pada penelitian ini, digunakan *explicit dynamics analysis system* karena simulasi yang digunakan merupakan beban impak dan dalam durasi pendek.

Eksperimen yang dilakukan pada alat uji SHPB dapat direkayasa ulang secara numerik dalam simulasi ini, dengan parameter yang sama antara eksperimen dan dilakukan verifikasi data untuk memvalidasi kebenaran simulasi.

## 2.9.1 Explicit Dynamics

Untuk melakukan simulasi pada alat SHPB yang menerima tumbukan atau tegangan dinamis, dapat digunakan simulasi dengan *ANSYS Explicit Dynamics*. Selain itu *explicit dynamics* dapat melakukan simulasi peristiwa singkat yang menerima gaya dinamis *nonlinear* dan *transient*.

Dengan simulasi menggunakan *ANSYS*, dapat diketahui respon dari spesimen uji dalam tahapan pembebanan. Hal ini dikarenakan algoritma yang bekerja memprediksi respon yang kompleks, seperti deformasi material dan interaksi antar *bodies*. Dalam *explicit dynamics*, metode yang digunakan untuk menganalisa sistem adalah dengan cara integrasi terhadap waktu.

Metode analisa integrasi terhadap waktu untuk *nonlinear* seperti ini memiliki beberapa kelebihan yaitu tidak membutuhkan iterasi saat mengintegrasikan waktu, tidak membutuhkan uji konvergensi, dan tidak melakukan *invers* matriks kekakuan.

#### 2.10 Penelitian Terdahulu

## 2.10.1 An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints

Penelitian ini membahas mengenai studi eksperimental terhadap beban *fatigue* pada *adhesive tubular single lap joints* yang dilakukan oleh Dai Gil Lee, Ki Soo Kim dan Yong-Taek Im di Korea Advanced Institute of Science and Tehcnology pada tahun 1991. Penelitian ini membandingkan pengaruh dari ketebalan adhesive dan surface roughness terhadap beban fatigue dengan spesimen yang digunakan adalah single tubular lap joint dan menggunakan alat uji Shimadzu TB-10. Kelebihan dari single tubular lap joint ini adalah mudah dimanufaktur dan membutuhkan biaya yang kecil dibandingkan dengan jenis sambungan lain seperti double lap joint, stepped lap joint, dan scarf joint. Tetapi terdapat kekurangan dari single tubular lap joint, yaitu memiliki tegangan yang tinggi dan memiliki gradien yang berubah-ubah pada ujung adhesive layer. Pembebanan fatigue yang dilakukan pada pengujian ini adalah dynamic fatigue, karena beban dynamic akan mengalami kegagalan pada stress level yang lebih rendah dibandingkan beban static.

Parameter yang digunakan adalah surface roughness of adherends, adhesive thickness, geometric shapes of adherends, curing and environmental conditions (pressure, temperature, and humidity). Material spesimen yang digunakan carbon steel S45C yang dikontrol kekasaran permukaan dan ketebalan adhesive. Untuk material adhesive yang digunakan merupakan epoxy resin IPCO 9923 dengan perbandingan rasio epoxy resin 1:1.

Variasi *surface roughness* yang dilakukan dalam pengujian ini berada pada *range* 1,5 hingga 2,5  $\mu$ m, ketebalan *adhesive* pada *range* 0,1 hingga 1,7 mm dan rata-rata pembebanan amplitudo *shear stress* pada angka 4 MPa. Untuk hasil pengujian pengaruh variasi *surface roughness* pada ketebalan 1 mm terhadap beban *fatigue* dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan hasil pengujian pengaruh variasi ketebalan *adhesive* terhadap beban *fatigue* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.8 Hasil pengujian pengaruh *surface roughness* terhadap beban *fatigue* (Dai Gil Lee, 1991)



Gambar 2.9 Hasil pengujian pengaruh ketebalan *adhesive* terhadap beban *fatigue* (Dai Gil Lee, 1991)

Dari hasil pengujian yang didapatkan, peneliti memberikan beberapa konklusi. Pertama, konklusi yang diberikan merupakan *surface roughness* yang optimal terdapat pada angka kekasaran 2  $\mu$ m, karena *fatigue strength* tidak berubah banyak ketika *surface roughness* berada pada angka kekasaran 1,5 hingga 2,5  $\mu$ m. Kedua, beban *torsional fatigue strength* meningkat ketika ketebalan *adhesive* menurun, namun hal tersebut kontradiktif dengan jenis pembebanan statis. Ketebalan *adhesive* yang optimal terdapat pada angka 0,15 mm karena apabila kurang dari 0,15 mm sangat tidak mungkin untuk dilakukan. Ketiga, melakukan abrasi terhadap permukaan alat uji agar kekasaran permukaan antara spesimen dan alat uji sama. Nilai optimal *mesh number of abrasive paper* untuk *dynamic torque* terdapat pada angka kisaran 100.

# 2.10.2 Optimal Tubular Adhesive Bonded Lap Joint of The Carbon Fiber Epoxy Composite Shaft

Penelitian ini dilakukan oleh Ki Soo Kim, Won Tae Kim, dan Dai Gil Lee pada tahun 1992 tentang bentuk sambungan yang optimal pada *tubular adhesive lap joint*. Dalam penelitian ini, digunakan variasi bentuk sambungan. Variasi bentuk sambungan yang diuji ada 4 jenis, yaitu *single lap joint, single lap with scarf, double lap,* dan *double lap with scarf*. Pengujian dilakukan menggunakan *torsional static test,* dengan *steel adherends* terbuat dari S45C *carbon steel* dan *composite adherends* terbuat dari *high strength carbon fiber composite.* 

Pengujian dilakukan dengan cara menambahkan *angle of*  $twist 0^{\circ}-5^{\circ}/min$  pada sambungan sehingga torsi yang bekerja pada spesimen juga bertambah. Hal tersebut dapat dibuktikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Hubungan antara torsi dengan sudut puntir (Ki Soo Kim, 1992)

Setelah diuji, didapatkan nilai kapasitas torsi maksimal pada masing masing sambungan, hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2.

| Adhesive  | Joint type            | Surface treated<br>in nitric acid | Not surface<br>treated |
|-----------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------|
| IPCO 9923 | Single lap            | Not tested                        | 1780                   |
|           | Single lap with scarf | Not tested                        | 1710                   |
|           | Double lap            | 3320                              | 2270                   |
|           | Double lap with scarf | 2550                              | 2020                   |
| HYSOL     | Single lap            | Not tested                        | 1980                   |
| 9309.2 NA | Single lap with scarf | Not tested                        | 1880                   |
|           | Double lap            | 3400                              | 2800                   |
|           | Double lap with scarf | 3280                              | 2840                   |

Tabel 2.2 Kapasitas torsi maksimal pada sambungan (dalam satuan Nm)

Terdapat beberapa konklusi yang disampaikan dalam penelitian ini. Konklusi yang diberikan adalah jenis sambungan *double lap joint* memiliki nilai kapasitas torsi maksimal dibanding jenis sambungan *single lap joint*. Selanjutnya jenis sambungan *tapered scarf* pada *composite adherend* tidak menjadi sebuah hal yang menguntungkan pada jenis sambungan *tubular adhesive lap joint*.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh panjang lapisan *adhesive* terhadap respon tegangan-regangan sambungan *tubular lap joint*. Respon tegangan-regangan diperoleh dari hasil simulasi *finite element model* menggunakan perangkat lunak *ANSYS Explicit Dynamics*. Alat uji SHPB digunakan untuk validasi *finite element model* dan menentukan parameter material yang digunakan dalam simulasi. Dalam penelitian ini juga dikaji pengaruh panjang *overlap* terhadap modulus *tubular lap joint*. Pada bab ini akan dijelaskan tahapan penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan tersebut.

#### 3.1 *Flowchart* Penelitian

Dalam penelitian ini masalah yang ditentukan akan diselesaikan dengan tahapan-tahapan yang digambarkan pada Gambar 3.1.







Gambar 3.1 Flowchart penelitian

Hal pertama yang dilakukan adalah studi literatur yang terkait dengan penelitian ini. Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan topik penelitian serta kontribusinya dan untuk meningkatkan pengetahuan penulis terkait topik yang diteliti. Dari studi literatur diketahui bahwa karakteristik *adhesive* dipengaruhi oleh geometri sambungan, salah satunya adalah panjang lapisan *adhesive*. Setelah melakukan studi literatur, langkah kedua adalah membuat hipotesa dan merumuskan masalah. Hipotesa awal penulis adalah panjang lapisan *adhesive* mempengaruhi kondisi tegangan kerja pada sambungan sehingga mempengaruhi sifat mekaniknya. Untuk membuktikan hipotesa tersebut, maka dilakukan pengujian dan simulasi dinamis (tumbukan). Alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* diperlukan untuk menghasilkan

kurva tegangan regangan, lalu untuk memvalidasi *finite element* model yang digunakan untuk simulasi menggunakan ANSYS Explicit Dynamics. Pada penelitian panjang lapisan adhesive pada hollow tubular lap joint divariasikan masing-masing 10 mm, 15 mm, 20 mm, dan 25 mm.

Langkah selanjutnya yaitu merancang eksperimen dan simulasi. Karena eksperimen hanya digunakan untuk validasi model simulasi maka dirancang untuk menguji 1 variasi, sedangkan untuk simulasi dirancang untuk menguji 4 spesimen dengan panjang lapisan *adhesive* berbeda-beda.

Langkah berikutnya adalah setup alat uji Split Hopkinson Pressure Bar dan kalibrasi yang bertujuan untuk memastikan bahwa hasil pengujian memiliki angka yang benar dan alat uji bekerja dengan baik. Agar tujuan tersebut tercapai, maka perlu dilakukan beberapa pengaturan seperti pengecekan misalignment antar pressure bar dan striker bar, setting alat pengukuran dynamic strainmeter. Langkah-langkah setup dan kalibrasi dijelaskan lebih rinci pada sub-bab 3.2 berikutnya.

Langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah melakukan eksperimen menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*. Eksperimen dilakukan dengan cara menumbuk *striker bar* ke *pressure bar*. Lalu *strain gauges* yang diletakkan di rangkaian *pressure bar* akan membaca sinyal regangan. Sinyal tersebut dikirim ke alat *dynamic strain meter* lalu akan ditampilkan di komputer menjadi kurva regangan terhadap waktu.

Dari kurva regangan terhadap waktu, maka didapatkan regangan yang diukur seperti pada persamaan 2.17 dan 2.18. Dari nilai regangan tersebut dimasukkan ke persamaan 2.19 untuk mengetahui laju regangan dari spesimen yang diuji, dan nilai regangan tersebut dimasukkan ke persamaan 2.24 dan 2.25 atau 2.26 untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan.

Setelah eksperimen dilakukan, selanjutnya adalah melakukan *modelling* di perangkat lunak *ANSYS* dengan meniru alat uji SHPB yang digunakan untuk eksperimen. Seluruh

parameter yang digunakan pada eksperimen juga harus sama dengan yang dilakukan pada *ANSYS* agar hasil yang didapatkan bisa dibandingkan.

Hasil eksperimen yang berupa kurva regangan *incident bar* digunakan untuk proses validasi terhadap kurva regangan *incident bar* model *finite element*. Validasi model *finite element* digunakan untuk memastikan bahwa kondisi simulasi sudah sama dengan kondisi eksperimen. Oleh sebab itu proses ini penting untuk dilakukan.

Setelah kurva *incident bar* antara eksperimen dan simulasi sudah mendekati, selanjutnya melakukan simulasi numerik dengan model yang telah dibuat mirip dengan alat uji SHPB untuk eksperimen. Variasi simulasi numerik yang dilakukan adalah panjang lapisan *adhesive*.

Setelah semua simulasi selesai, langkah selanjutnya adalah menganalisa hasil tersebut. Sama seperti eksperimen, hasil dari simulasi perlu dilakukan perhitungan agar mendapatkan kurva tegangan-regangan. Kurva tegangan-regangan tersebut dianalisa untuk mengetahui apakah terdapat pengaruh panjang lapisan *adhesive* terhadap karakteristik kurva tegangan-regangan *tubular lap joint*.

Langkah terakhir dari pengujian ini adalah penarikan kesimpulan dari hasil yang didapatkan dan dari perbandingan antara kurva tegangan regangan hasil uji eksperimen dengan hasil uji simulasi. Kesimpulan tersebut akan menjawab tujuan penelitian dan memberikan informasi penting dari hasil eksperimen. Selain kesimpulan juga dipaparkan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya agar tetap bermanfaat.

# 3.2 Setup dan Kalibrasi Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar

Untuk meyakinkan bahwa hasil pengujian memiliki angka yang benar, maka perlu dilakukan *setup* alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*, karena SHPB merupakan peralatan utama yang digunakan dalam eksperimen penelitian ini. Alat ini terdiri dari beberapa komponen, yaitu *incident bar, transmission bar,* dan *striker* dengan material yang digunakan adalah *aluminium alloy*. Selain itu, alat ini membutuhkan alat ukur yang selanjutnya disebut dengan *strain meter. Strain meter* berfungsi untuk mengubah regangan yang melewati *incident bar* dan *transmission bar* menjadi sinyal digital yang dikirim ke komputer sebagai grafik regangan terhadap waktu. Pada penelitian ini digunakan *dynamic strain meter DRA 101C* dari Tokyo Sokki Konkyujo sebagai *strain meter*. Untuk skema alat dapat dilihat pada Gambar 3.2, lalu untuk alat uji nyata *Split Hopkinson Pressure Bar* dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Skema alat uji Split Hopkinson Pressure Bar



Gambar 3.3 Alat uji Split Hopkinson Pressure Bar

*Strain gauge* tidak bisa diletakkan sesuai dengan keinginan sendiri, menurut diagram Lagrangian *strain gauge* harus diletakkan pada bagian tengah masing – masing *bar*. Hal tersebut untuk mencegah terjadinya tumpang tindih sinyal yang mengalir. Diagram Lagrangian dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram Lagrangian pada Split Hopkinson Pressure Bar

Terdapat beberapa hal yang perlu dilakukan saat setup alat uji SHPB ini. Pertama pastikan bahwa antara incident bar dengan transmission bar dalam satu sumbu, hal ini dapat dibuktikan dengan menempelkan permukaan masing - masing bar dan disamakan antara permukaan yang bersentuhan. Kedua. permukaan spesimen harus satu sumbu dengan incident dan transmission bar agar saat terjadi kontak sinyal mengalir secara sempurna. Ketiga, pemberian grease antara permukaan spesimen dengan incident dan transmission bar agar seluruh permukaan menempel. Hal tersebut perlu dilakukan untuk mencegah adanya noise berupa celah udara yang sangat kecil antar permukaan. Ketiga, ketinggian striker bar diatur sesuai kebutuhan kecepatan yang akan digunakan. Dalam penelitian ini, digunakan kecepatan 1,21 m/s.

Komponen pendukung yang digunakan untuk pengolahan data merupakan sebuah alat *dynamic strainmeter* yang terlihat seperti pada Gambar 3.5. Alat tersebut dihubungkan ke komputer untuk mengkonversi data dari *strain gauge* menjadi sebuah grafik yang ditampilkan pada komputer. Pengukuran merupakan suatu tolak ukur yang digunakan dalam pengujian ini. Sebelum melakukan perhitungan dan analisa data lebih lanjut, peneliti terlebih dahulu melakukan pengujian. Pengukuran dan identifikasi parameter yang digunakan pada pengujian. Pengukuran dan identifikasi parameter untuk kalibrasi yang digunakan pada pengujian menggunakan *strain gauge* dengan merk Kyowa KFGS-2N dengan *gauge factor* sebesar 2.08  $\pm$  1.0%, *gauge resistance* sebesar 120.4  $\pm$  1.0%  $\Omega$ , *gauge length* 2 mm, memiliki jarak *strain gauge* 1 ke spesimen (X<sub>1</sub>) sejauh 0,5 m dan memiliki frekuensi *sampling* (f<sub>s</sub>) sebesar 20.000 Hz.



Gambar 3.5 Alat dynamic strainmeter

*Strain gauge* tersebut dipasang pada *incident bar* dan *transmitted bar*, dengan tipe *bar* yang digunakan adalah berbahan dasar *aluminium*. *Bar* tersebut memiliki *modulus Young bar* (E) sebesar 69 Gpa dan luas penampang (Ab) sebesar 0.000314 m<sup>2</sup>.

Panjang dari *incident bar* adalah 3 m dan panjang dari *transmitted bar* adalah 1,5 m.

Untuk merekatkan spesimen uji, digunakan sambungan *adhesive* berbahan dasar *epoxy. Epoxy adhesive* yang digunakan bermerk Dextone dengan daya tahan panas hingga 120°C, mulai awal proses pencampuran hingga waktu kering akhir memakan waktu 3 jam, dan rasio *resin hardener* yang disarankan oleh produsen sebesar 1:1. Untuk *adherend* tipe yang digunakan adalah aluminium 6061 T6 dengan tipe *joint* berupa *hollow tubular lap* dengan ketebalan *adhesive* sebesar 0.85 mm  $\pm$  0,01. Panjang *lap joint* yang digunakan ada empat variasi, yaitu sebesar 10 mm  $\pm$  0.3 mm; 15 mm  $\pm$  0.3 mm; 20 mm  $\pm$  0.3 mm; 25 mm  $\pm$  0.3 mm dengan luas penampang *adhesive* 4.755 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>.

Apabila seluruhnya sudah di-setup, langkah berikutnya adalah melakukan kalibrasi pada alat uji SHPB. Proses kalibrasi perlu dilakukan untuk memastikan peneliti bahwa data yang akan diambil dari output proses pengukuran sudah akurat dan hasil pengujian dapat dibandingkan setiap melakukan eksperimen. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan kemampuan cepat rambat material yang sebenarnya dengan cepat rambat hasil pengujian. Apabila nilai perbandingan kedua aspek tersebut tidak terpaut jauh, maka dapat dinyatakan kalibrasi tersebut telah berhasil. Proses kalibrasi dilakukan dengan cara diberi pembebanan pada alat uji tanpa menggunakan spesimen, dengan kata lain tidak ada jarak antara incident bar dengan transmitted bar saat pembebanan diberikan. Kemampuan cepat rambat material yang sebenarnya dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$C_{\rm o} = \sqrt{\frac{{\rm E}}{\rho}}$$
$$C_{\rm o} = \sqrt{\frac{6890000000}{2700}} = 5051.585743 \ \frac{m}{s}$$

Lalu untuk mengetahui cepat rambat hasil pengujian, perlu dilakukan pengambilan data dari hasil data olahan menggunakan *software MATLAB* seperti pada Gambar 3.6 dan persamaan sebagai berikut:



Gambar 3.6 Sinyal pengujian Split Hopkinson Pressure Bar tanpa adanya spesimen

Untuk menentukan apakah proses kalibrasi sudah berhasil apa belum, penulis membandingkan cepat rambat yang diuji dengan cepat rambat yang sesuai dengan teori dengan persamaan sebagai berikut:

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

$$C_b = \frac{2.L}{\Delta t} = \frac{2.3 m}{(0.00161 - 0.00037)s} = \frac{6 m}{0.00124s}$$
$$= 4898.71 \frac{m}{s}$$

keterangan:

 $\begin{array}{ll} L & = \text{panjang incident bar} \\ \Delta t & = \text{selisih waktu incident} - reflected \end{array}$ 

Dari persamaan diatas didapatkan hasil yang tidak sama namun mendekati dengan teori cepat rambat material *aluminium alloy*. Apabila dibandingkan nilainya antara hasil kalibrasi dengan teori, maka didapatkan selisih 3%. Hal tersebut masih bisa diterima dalam proses kalibrasi ini karena *error* tidak memiliki selisih yang besar.

## 3.3 Eksperimen

Eksperimen dilakukan menggunakan spesimen pipa *hollow* aluminium 6061 T6 yang memiliki perbedaan diameter dan variasi panjang *overlap* dengan tipe sambungan berupa *lap joint* pada alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*. Tujuan dari eksperimen ini adalah sebagai validator simulasi. Diharapkan eksperimen ini akan sama dengan kondisi simulasi.

## 3.3.1 Flowchart Eksperimen

Agar penelitian ini berjalan dengan baik, maka perlu dilakukan beberapa tahapan. Tahapan tersebut akan dipaparkan pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Flowchart pengambilan data eksperimen

Hal pertama yang harus dilakukan sebelum eksperimen adalah mempersiapkan spesimen. Spesimen yang diuji merupakan pipa *hollow* aluminium 6061 T6. Spesimen harus diberi beberapa perlakuan agar memiliki bentuk yang sama antara satu spesimen dengan spesimen lainnya sehingga bisa dibandingkan hasilnya. Perlakuan tersebut akan dibahas pada subbab 3.4.2.

Langkah selanjutnya adalah mempersiapkan komputer yang sudah dipasang *software dynamic strain meter*. Spesifikasi dan parameter yang digunakan pada alat uji *dynamic strain meter*  dapat dilihat pada subbab 3.3. Alat uji ini akan membaca sinyal yang diterima pada *strain gauge* yang terletak pada *bar* dan dikonversikan menjadi kurva regangan terhadap waktu. Persiapan komputer dan *software dynamic strain meter* dapat dilihat pada subbab 3.4.3.

Langkah berikutnya yaitu melakukan pengujian spesimen dengan panjang *overlap* 10 mm menggunakan alat uji SHPB. Spesimen diletakkan antara *incident bar* dan *transmitted bar*. Setelah semua siap maka *striker bar* dilepaskan ke *incident bar* dan *software dynamic strain* akan memberikan kurva regangan terhadap terhadap waktu seperti pada Gambar 3.28.

## 3.3.2 Spesimen Pengujian

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sambungan *adhesive* dengan jenis sambungan *hollow tubular lap joint* yang memiliki geometri seperti pada Gambar 3.11 dan bentuk nyata seperti pada Gambar 3.12 dan 3.13 dengan material yang digunakan adalah aluminium 6061 T6. Spesimen uji terdiri dari dua *adherend*, yaitu pipa besar yang memiliki diameter luar 19,7 mm dan diameter dalam 18,7 mm, sedangkan untuk pipa kecil memiliki diameter luar 17 mm dan diameter dalam 16 mm.

Spesimen perlu diberi beberapa perlakuan agar sesuai dengan spesifikasi yang ingin digunakan. Perlakuan pertama yang diberikan pada spesimen adalah pemotongan, karena spesimen di pasaran memiliki panjang 6 m, sedangkan yang dibutuhkan untuk menjadi spesimen hanya berukuran 50 mm. Agar pemotongan menjadi presisi digunakan alat potong bermerk Krisbow khusus pemotongan pipa berbahan dasar *aluminium* seperti pada Gambar 3.8 dan 3.9.



Gambar 3.8 Alat potong tampak atas



Gambar 3.9 Alat potong tampak samping

Setelah spesimen dipotong sesuai dengan ukuran yang dibutuhkan, maka dilanjutkan proses gerinda. Gerinda yang digunakan merupakan gerinda kecil seperti pada Gambar 3.10. Alasan penggunaan gerinda kecil karena spesimen yang dipotong memiliki ketebalan yang tipis, apabila menggunakan gerinda besar akan terjadi pembebanan lebih pada spesimen uji sehingga pemotongan tidak merata.



Gambar 3.10 Gerinda

Pada awalnya kedua spesimen merupakan pipa hollow dengan panjang awal 6 meter, lalu dipotong untuk spesimen 1 menjadi 50 mm dan spesimen 2 menjadi 60 mm. Namun dalam proses pengeleman rentan terjadi penyimpangan. Penyimpangan yang rentan terjadi dalam pembuatan spesimen adalah tidak ratanva ketebalan adhesive pada permukaan overlap karena pengeleman menggunakan tangan. Untuk mengendalikan penyimpangan tersebut digunakan sebuah ragum untuk menahan salah satu spesimen agar tidak berpindah posisi saat diproses pengeleman dengan spesimen lainnya. Lalu untuk adhesive yang digunakan untuk menyambungkan kedua spesimen menggunakan adhesive epoxy dengan merk Dextone, dimana adhesive epoxy tersebut terdiri dari resin dan hardener. Daya tahan terhadap temperatur memiliki nilai maksimum 120 °C dengan kekuatan tarik adhesive > 20,68 MPa. Adhesive yang digunakan memiliki waktu kering selama 3 jam. Penelitian ini menggunakan satu spesimen dengan pengujian spesimen berupa panjang *overlap* sebesar 10 mm dengan rasio jumlah resin dan jumlah hardener yang konstan (1:1). Ketebalan adhesive yang mengikuti bentuk geometeri spesimen yaitu sebesar 0,85 mm  $\pm$  0,01, dan luas penampang *adhesive* sebesar 2.383 x  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>.



Gambar 3.11 Geometri spesimen uji (dalam satuan mm)

Keterangan:

- X = panjang spesimen yang diberi *adhesive*
- Y = ketebalan *adhesive*



Gambar 3.12 Spesimen uji tampak atas



Gambar 3.13 Spesimen uji tampak samping

### 3.4 Simulasi Explicit Dynamics ANSYS

Setelah melakukan pengambilan data secara eksperimen menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*, maka dilakukan simulasi untuk validasi data eksperimen tersebut. Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak *ANSYS Explicit*  *Dynamics* untuk mengetahui pengaruh panjang *overlap* terhadap kekakuan *adhesive* pada spesimen *hollow tubular lap joint*, karena pembuatan spesimen eksperimen sulit untuk dibuat secara presisi dan konsisten. Analisa pada simulasi akan dilakukan dengan mengukur regangan pada titik tengah *incident bar* dan *transmitted bar* dan akan didapatkan kurva regangan terhadap waktu lalu diproses menjadi kurva tegangan – regangan.

Agar simulasi dapat dilakukan, maka perlu dilakukan dengan beberapa tahapan. Tahapan tersebut akan dipaparkan pada Gambar 3.14.





Gambar 3.14 Flowchart simulasi

#### 3.4.1 Tahapan Simulasi

Pada tahapan pertama simulasi adalah menentukan panjang *overlap* spesimen yang akan disimulasikan. Terdapat empat jenis *overlap* yang akan diuji dalam simulasi ini, *overlap* tersebut yaitu sepanjang 10 mm; 15 mm; 20 mm; dan 25 mm dengan jenis sambungan *lap joint*. Simulasi ini menjaga panjang total *adherend* tetap sebesar 100 mm.

Selanjutnya yaitu permodelan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* di *ANSYS Spaceclaim* dengan ukuran dan material yang sesuai dengan alat SHPB yang akan digunakan pada pengujian eksperimen diatas. Material yang digunakan merupakan *explicit material*. Pada *striker bar, incident bar, transmitted bar* dan *adherend* menggunakan *AL6061 T6* dengan *density* sebesar 2875,32 kg/m<sup>3</sup>. Sedangkan jenis *adhesive* yang digunakan adalah *resin epoxy* dengan *density* sebesar 1190 kg/m<sup>3</sup> dan memiliki ketebalan 0,85 mm. Penggunaan material dapat diatur pada *engineering data,* dan dimensi masing – masing komponen dapat dilihat pada Gambar 3.15 hingga Gambar 3.18 (satuan dalam mm).



Gambar 3.15 Dimensi striker bar



Gambar 3.16 Dimensi incident bar



Gambar 3.18 Dimensi transmitted bar

Agar simulasi ini dapat dikatakan valid, maka perlu dilakukan uji konvergensi agar hasil simulasi yang didapatkan mendekati nilai sesungguhnya dengan cara menentukan jumlah elemen *meshing* yang akan digunakan. Uji konvergensi dilakukan dengan membandingkan amplitudo sinyal *incident* dan *reflected* pada variasi jumlah elemen yang dapat dilihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Perbandingan uji konvergensi. (a) konvergensi aluminium (b) konvergensi *adhesive* 

Dari hasil pengujian konvergensi, dipilih nilai *error* yang paling sedikit dengan cara menghitung selisih terkecil dari nilai regangan *incident bar* dan *transmitted bar* dan mempertimbangkan *solving time*. Untuk aluminium menggunakan *meshing size* 0,0055 karena pertimbangan *solving time* tidak jauh berbeda dengan 0,006, sedangkan untuk hasil *meshing* dengan nilai 0,0055 lebih halus daripada *meshing* dengan nilai 0,006. Untuk *adhesive* menggunakan 0,0007 karena selisih nilai regangan berbeda sedikit dengan 0,0006 dan *solving time* yang dibutuhkan lebih cepat daripada 0,0006. Berikut ini adalah hasil *meshing* pada aluminium dan *adhesive* yang dapat dilihat pada Gambar 3.20 dan Gambar 3.21.



Gambar 3.20 Hasil meshing aluminium



Gambar 3.21 Hasil meshing adhesive

Apabila uji konvergensi, maka tahap berikutnya yaitu melakukan simulasi dengan *ANSYS Explicit Dynamics*. Pada permodelan alat uji SHPB diletakkan dua *strain probe* pada titik tengah *incident bar* dan titik tengah *transmitted bar*. Pada bagian *contact body interaction*, antara *striker bar* dengan *incident bar* menjadi *frictionless*, antara *incident bar* dengan spesimen menjadi *frictionless*, dan antara spesimen dengan *adhesive* menjadi *bonded*. Simulasi dilakukan pada temperatur ruang dan dengan kecepatan *striker bar* sebesar 1,21 m/s. Visualisasi simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 Permodelan pada ANSYS Explicit Dynamics

Dalam simulasi ini digunakan beberapa parameter pengukuran agar hasil simulasi dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen. Parameter tersebut adalah sebagai berikut:

- diameter *pressure bar* = 20 mm
- luas permukaan *pressure bar* =  $3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- diameter *adherend* besar = 19,7 mm (diameter luar); 18,7 mm (diameter dalam)
- diameter *adherend* kecil = 18 mm (diameter luar); 17 mm (diameter dalam)
- luas permukaan *adhesive* = 1,227 x 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>
  ketebalan *adhesive* = 0.85 mm
- Ketebalah *uanestve* 0,65 mm
- temperatur pengujian = temperatur ruang

# 3.5 Pengolahan dan Analisa Data Eksperimen dan Simulasi

Pada penelitian ini dilakukan pengolahan dan analisa data sebanyak dua kali, yaitu data eksperimen menggunakan alat uji SHPB dan akan divalidasi oleh data hasil simulasi menggunakan *ANSYS explicit dynamics* untuk masing – masing spesimen. Proses pengolahan dan analisa data eksperimen maupun simulasi akan dibahas lebih lanjut.

#### 3.5.1 Pengolahan dan Analisa Data Eksperimen

Hasil dari pengukuran menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* akan memperlihatkan kurva regangan terhadap waktu pada kedua *bar* yang telah dipasang *strain gauge (incident bar dan transmitted bar)* yang dihasilkan dari alat *Dynamic Strain Meter.* Kurva regangan terhadap waktu akan diproses terlebih dahulu melewati beberapa proses berikut menggunakan *software MATLAB* untuk mendapatkan nilai kurva tegangan-regangan dan laju regangan:

a. Kurva Regangan Terhadap Waktu Hasil Pengujian

Setelah proses pengolahan data dari *dynamic strain meter* dan dilanjutkan ke proses pengolahan data menggunakan *software MATLAB*, maka bentuk kurva regangan terhadap waktu akan terlihat seperti pada Gambar 3.23. Kurva tersebut menunjukkan nilai dari *incident, transmitted*, dan *reflected* dari *strain gauge* pada alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*.



Gambar 3.23 Kurva regangan terhadap waktu hasil dari pengujian.

Pada eksperimen menggunakan spesimen uji dengan panjang *overlap* sebesar 10 mm didapatkan kurva hasil pengukuran seperti pada Gambar 3.23. Dapat dilihat dari kurva tersebut bahwa besar regangan *incident* maksimum sebesar -99,62 *microstrain*, regangan *reflected* 95,89 *microstrain*, dan regangan *transmitted* - 4,09 *microstrain*. Dari Gambar 3.37 menujukkan perbedaan antara grafik hasil pengukuran spesimen dengan kurva hasil pengukuran saat kalibrasi (tanpa spesimen). Pada kurva pengukuran tanpa

spesimen tidak mempunyai *reflected pulse*. Sehingga pemberian *adhesive* pada spesimen memiliki pengaruh terhadap bentuk gelombang regangan.

#### b. Trim

Pada proses *trim* ini dilakukan pemotongan kurva *incident strain, reflected strain,* dan *transmitted strain* yang semula berada pada rentang waktu yang berbeda menjadi satu rentang waktu yang sama seperti terlihat pada Gambar 3.24. Selanjutnya hasil pemotongan tersebut dilakukan pergeseran sinyal, sehingga sinyal *incident, reflected,* dan *transmitted* seolah-olah terjadi dalam waktu yang sama.



Gambar 3.24 Kurva hasil pemotongan kurva *incident*, *reflected*, dan *transmitted strain* eksperimen

#### c. Compressive Force

Setelah mendapatkan kurva *trim* maka data tersebut akan dibentuk menjadi grafik P1 dan P2 terhadap waktu yang menunjukkan *compressive force* dari tiap ujung spesimen. Persamaan yang digunakan untuk membentuk grafik P1 dan P2 dapat dilihat pada persamaan (2.13) dan (2.14) pada bab 2, dan kurva P1 P2 terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 3.25.



Gambar 3.25 Kurva hasil perhitungan P1 dan P2 terhadap waktu

d. Perhitungan Laju Regangan ( $\dot{\varepsilon}$ )

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

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{L_s} (\varepsilon_{I(t)} - \varepsilon_{R(t)} - \varepsilon_{T(t)})$$

dalam pengukuran yang ideal pada *Split Hopkinson Pressure Bar*, laju regangan harus konstan selama pembebanan. Sehingga perlu dilakukan perhitungan ini untuk memastikan proses pengukuran dilakukan pada laju regangan identik, sehingga hasil pengolahan data tersebut dapat dibadingkan.

Pada Gambar 3.26 menunjukkan laju regangan mengalami kenaikan hingga titik puncak tertentu yang menandakan bahwa proses pembebanan kompresi sedang terjadi akibat dari penumbukan *striker bar*. Setelah kompresi terjadi, grafik laju regangan mengalami penurunan signifikan yang menunjukkan

bahwa proses ekspansi sedang terjadi. Namun eksperimen ini dilakukan dengan meninjau pembebanan dinamis berupa kompresi saja. Sehingga yang hanya ditinjau dari kurva laju regangan adalah laju regangan yang memiliki nilai positif.



Gambar 3.26 Grafik laju regangan terhadap waktu pada percobaan variasi panjang *overlap* 10 mm

Dengan spesimen yang memiliki panjang *overlap* 10 mm, dilakukan pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* dengan besar laju regangan terhadap waktu seperti pada Gambar 3.40. Besarnya laju regangan tersebut dipengaruhi oleh kecepatan penumbukan dari *striker bar*. Pada pengujian spesimen ini, dilakukan dengan kecepatan tumbuk sebesar 1,21 m/s. Dengan tumbukan dari *striker bar* tersebut didapatkan laju regangan maksimal pada 7,15 s<sup>-1</sup>. Dalam pengukuran yang ideal, laju regangan kerja harus konstan selama pembebanan. Namun nyatanya kondisi tersebut sulit didapatkan. Setelah melakukan perhitungan didapatkan bahwa laju regangan selalu berubah selama pembebanan. Namun laju regangan konstan terjadi dalam waktu singkat di dekat titik maksimumnya. Oleh karena itu, dalam eksperimen ini regangan ditentukan pada titik maksimumnya.

#### e. 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:

$$\sigma = E_b \frac{A_b}{2A_s} (\varepsilon_{I(t)} - \varepsilon_{R(t)} - \varepsilon_{T(t)})$$

Pada eksperimen ini, modulus young bar ( $E_b$ ) merupakan *modulus young* aluminium 6061 yaitu 69 GPa. Permukaan bar memiliki luas permukaan ( $A_b$ ) 0,000314 m<sup>2</sup>, sedangkan luas permukaan spesimen rata - rata ( $A_s$ ) bernilai 1,227 x 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>. Untuk besar regangan *transmitted* diketahui dengan melihat kurva yang telah dilakukan trim seperti pada Gambar 3.36.

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

$$\varepsilon = \frac{C_0}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_{I(t)} - \varepsilon_{R(t)} - \varepsilon_{T(t)}) dt$$

Pada penelitian ini, kecepatan rambat gelombang (C<sub>0</sub>) telah didapatkan nilainya sebesar 4898,71 m/s, sedangkan L<sub>s</sub> merupakan ketebalan *adhesive* dimana pada penelitian ini ketebalan *adhesive* dijaga sebesar 0,85 mm  $\pm$  0,01. Untuk besar regangan *reflected* diketahui dengan melihat kurva tegangan regangan seperti pada Gambar 3.27.



Gambar 3.27 Contoh kurva hasil perhitungan tegangan-regangan pada percobaan *overlap* 10 mm

## 3.5.2 Pengolahan dan Analisa Data Simulasi

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak *ANSYS explicit dynamics* akan memberikan nilai regangan terhadap waktu yang ditangkap oleh *strain gauge* yang dipasang pada bagian tengah *incident bar* dan bagian tengah *transmitted bar*. Berikut ini adalah contoh grafik pada Gambar 3.28 hingga Gambar 3.32 yang didapatkan dari hasil simulasi dan perhitungan pada spesimen *overlap* 10 mm.


Gambar 3.28 Grafik regangan terhadap waktu hasil simulasi



Gambar 3.29 Grafik trim



Gambar 3.30 Grafik P1-P2



Gambar 3.31 Grafik laju regangan



Gambar 3.32 Grafik tegangan-regangan

Pada simulasi menggunakan spesimen uji dengan panjang *overlap* sebesar 10 mm didapatkan kurva hasil pengukuran seperti pada Gambar 3.28. Dapat dilihat dari kurva tersebut bahwa besar regangan *incident* maksimum sebesar –90,14 *microstrain*, regangan *reflected* 84,79 *microstrain*, dan regangan *transmitted* - 2,3 *microstrain*. Pada penelitian ini dilakukan validasi pada grafik regangan terhadap waktu hanya pada *incident bar*. Hasil eksperimen jika dibandingkan dengan hasil simulasi menunjukkan perbedaan nilai *incident* sebesar 10,6 *microstrain* dan perbedaan nilai *reflected* sebesar 7,6 *microstrain*. Untuk laju regangan seperti pada Gambar 3.31 memiliki nilai maksimum 9,17/s yang menandakan selisih antara laju regangan eksperimen dengan laju regangan simulasi memiliki selisih nilai maksimum sebesar 2,02/s.

#### 3.5.3 Analisa Perbandingan Hasil Perhitungan Eksperimen Dengan Simulasi

Hasil perhitungan eksperimen dan simulasi perlu dibandingkan untuk mengetahui apakah hasil simulasi dapat dikatakan valid terhadap eksperimen atau tidak. Pada penelitian ini, hasil simulasi dapat dikatakan valid apabila nilai regangan *incident* pada kurva *trim* regangan terhadap waktu mendekati antara simulasi dengan eksperimen. Kurva *trim* regangan terhadap waktu antara simulasi dengan eksperimen dapat dilihat pada Gambar 3.33.



Gambar 3.33 Perbandingan kurva trim incident

Hasil eksperimen jika dibandingkan dengan hasil simulasi menunjukkan perbedaan nilai *incident* sebesar 9,7 *microstrain*. Adanya selisih nilai dan pada *time* yang berbeda disebabkan oleh alat uji SHPB untuk eksperimen memiliki alat pembacaan yang kurang akurat, sehingga tidak sama persis hasilnya dengan simulasi. Dari Gambar 3.33 maka dapat disimpulkan bahwa pengujian menggunakan simulasi sudah valid dengan pengujian eksperimen.

Setelah membandingkan kedua hasil dan menganalisa hasil perbandingan tersebut dan membahasnya. Analisa dan pembahasan hasil simulasi akan dilakukan berdasarkan data eksperimen dan pada teori yang ada, dari hasil analisa dan pembahasan data akan diketahui pengaruh panjang *overlap* 

terhadap kurva tegangan-regangan. Apabila analisa dan pembahasan hasil simulasi sudah dilakukan, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan dan saran untuk penelitian ini. Kesimpulan nantinya akan menjawab tujuan penelitian ini dilakukan serta mencantumkan beberapa poin penting setelah penelitian ini dilakukan. Saran akan dibuat dengan maksud untuk membangun nilai positif terhadap penelitian ini serta mendapatkan hasil yang lebih baik.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh panjang *overlap* terhadap kurva tegangan-regangan sambungan *adhesive* pada laju regangan tinggi. Untuk mengetahui pengaruh tersebut dilakukan analisa data hasil pengujian menggunakan SHPB. Simulasi numerik (*ANSYS Explicit Dynamics*) digunakan untuk melengkapi data yang tidak diperoleh dari pengujian karena keterbatasan kondisi pengujian.

Tahapan penelitian ini dilakukan dengan eksperimen terlebih dahulu menggunakan alat uji SHPB. Dari hasil pengujian tersebut akan melakukan perhitungan menggunakan persamaan untuk alat uji SHPB, hasil perhitungan akan menampilkan kurva tegangan-regangan pada akhirnya. Begitupun dengan metode numerik, namun yang membedakan adalah dilakukan menggunakan perangkat lunak *ANSYS*.

## 4.1 Hasil Pengujian

Pada subbab ini akan dijelaskan hasil dari metode eksperimen dan metode simulasi. Hasil simulasi akan dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk mengetahui apakah parameter yang dimasukkan ke *ANSYS* sudah menyerupai kondisi eksperimen. Hasil yang akan dibandingkan adalah kurva laju regangan, kurva *compressive force*, dan kurva tegangan-regangan.

## 4.1.1 Laju Regangan Pada Tiap Variasi Overlap

Pada alat uji SHPB yang ideal seharusnya laju regangan juga memiliki nilai yang konstan selama pembebanan, tetapi laju regangan yang nilainya konstan hanya bisa didapatkan apabila pengujiannya hingga pada daerah plastis. Dalam pengujian ini pengujian dilakukan pada daerah elastis, hal tersebut dibuktikan dengan laju regangan yang berubah-ubah seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Laju regangan pada tiap variasi *overlap* (a) hasil eksperimen (b) hasil simulasi

Pada Gambar 4.1 menunjukkan amplitudo sinyal regangan hasil simulasi sebanding dengan hasil eksperimen. Titik maksimum saat naik menandakan adanya pembebanan kompresi, sedangkan titik minimum saat turun menandakan adanya proses ekspansi. Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa laju regangan yang didapatkan dari hasil eksperimen dan simulasi memiliki nilai maksimum masing-masing yang mirip antar variasi *overlap*.

Pengukuran yang ideal pada SHPB seharusnya memiliki laju regangan yang konsisten selama pembebanan. Akan tetapi untuk mendapatkan kondisi yang ideal dalam percobaan sangat sulit. Hal tersebut dikarenakan pengukuran di area elastis memang tidak memungkinkan untuk memperoleh laju deformasi yang konstan. Diperlukan rekayasa bentuk pulsa *incident* untuk memperoleh laju regangan konstan selama deformasi. Namun, hal itu belum terlaksana di penelitian ini. Pada percobaan ini dilakukan pendekatan melalui titik maksimum laju regangan sebagai acuan untuk mendapatkan data yang valid.

Dari tiap-tiap variasi panjang *overlap* didapatkan nilai laju regangan yang akan dibandingkan antara eksperimen dengan simulasi untuk memastikan validitas dari nilai laju regangan itu sendiri tiap percobaan. Setelah didapatkan kurva laju regangan yang konsisten maka selanjutnya dapat dibandingkan kurva tegangan-regangan. Dari perhitungan menggunakan persamaan (2.10) didapatkan hasil seperti pada Tabel 4.1

| No. | Panjang Lapisan | Hasil Eksperimen | Hasil Simulasi |
|-----|-----------------|------------------|----------------|
|     | Adhesive        | (1/s)            | (1/s)          |
| 1.  | 10 mm           | 7,15             | 9,17           |
| 2.  | 15 mm           | 8,48             | 9,03           |
| 3.  | 20 mm           | 7,95             | 8,77           |
| 4.  | 25 mm           | 7,15             | 8,66           |

Tabel 4.1 Perbandingan hasil laju regangan pada tiap variasi panjang lapisan *adhesive* 

Titik maksimum laju regangan yang mirip dapat dijadikan sebagai acuan untuk mendapatkan data yang *valid*. Hasil penelitian ini menunjukkan nilai laju regangan yang sebanding di orde  $10^1$  s<sup>-1</sup> baik untuk simulasi maupun eksperimen dengan nilai masing-masing adalah, 7,8±0,7 s<sup>-1</sup> untuk eksperimen dan 8,9±0,3 s<sup>-1</sup> untuk

simulasi. Selisih nilai laju regangan tersebut tidak berpengaruh signifikan terhadap respon tegangan-regangan sehingga hasilnya dapat dibandingkan.

#### 4.1.2 Compressive Force Pada Tiap Variasi Overlap

*Compressive force* merupakan beban yang diterima dari tiap ujung spesimen dan memiliki kontak dengan *incident* dan *transmitted bar*. Pada tegangan satu dimensi seperti pada sambungan *single lap joint* yang diteliti oleh Yohanes dan Ridho (2019) dimana pembebanan hanya terjadi searah sumbu X, kurva *compressive force* antar ujung spesimen berhimpit. Namun jenis sambungan *tubular lap joint* seperti spesimen yang diuji pada salah satu variasi pengujian pada penelitian ini tidak berhimpit, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Kurva compressive force hasil eksperimen



Gambar 4.3 Kurva compressive force hasil simulasi

Dari Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa gaya yang diterima oleh ujung *adherend* yang berkontak dengan *incident bar* (P1) berbeda dengan gaya yang diterima oleh ujung *adherend* yang berkontak dengan *transmitted bar* (P2). Hal tersebut disebabkan oleh gaya tumbukan yang diterima oleh spesimen menjadi dua arah, yaitu ke arah sumbu X yang merupakan tegangan geser dan sumbu Y yang merupakan tegangan *peel*.

Selain itu pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki kurva yang naik turun secara signifikan dan tidak sehalus hasil eksperimen. Hal ini disebabkan oleh pembacaaan dari alat baca yang ada di perangkat alat uji SHPB yang kurang teliti, sehingga menyebabkan kurva hasil eksperimen menjadi halus.

Karena gaya tumbukan dua arah (*uniaxial*), maka kurva compressive force baik hasil eksperimen maupun hasil simulasi menunjukkan kurva P1 dengan P2 tidak berhimpit. Untuk memastikan gaya tumbukan yang diterima oleh spesimen menjadi dua arah, berikut adalah hasil tangkapan layar dari rekaman simulasi pada spesimen menggunakan *ANSYS Explicit Dynamics* yang dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil tangkapan layar dari rekaman simulasi pada spesimen uji. (a) spesimen sebelum ditumbuk (b) spesimen saat ditumbuk

Untuk memperjelas nilai deformasi yang terjadi pada *adhesive*, berikut ini adalah gambar dari *adhesive* yang berdeformasi saat ditumbuk oleh *striker bar* yang dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Deformasi pada adhesive saat terkena tumbukan

Fenomena adanya *peel stress* pada jenis sambungan *adhesive lap joint* juga diperkuat oleh penelitian yang dilakukan

oleh Lucas F.M. da Silva dan R.D. Adams (2006) mengenai teknik pengurangan tegangan *peel* pada *adhesive joint*. Berikut ini adalah gambar dari penelitian tersebut yang menggambarkan adanya kegagalan *peel* akibat *peel stress* pada *lap joint* yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 serta tegangan di *adherend* pada Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Tegangan *peel* pada sambungan *lap joint* (Lucas F.M. da Silva & R.D. Adams, 2006)



Gambar 4.7 Tegangan pada *adherend* sambungan *lap joint* (Lucas F.M. da Silva & R.D. Adams, 2006)

Dengan adanya fenomena *peel stress* pada penelitian ini, maka kurva *compressive force* tidak dapat dijadikan sebagai acuan validasi untuk alat uji SHPB seperti kurva *compressive force* jenis sambungan *adhesive single lap joint* yang diteliti oleh Yohanes dan Ridho (2019). Tetapi untuk hasil simulasi dapat dikatakan valid dikarenakan menunjukkan hal yang sama dengan hasil eksperimen yaitu kurva P1 dengan P2 sama-sama tidak berhimpit.

## 4.1.3 Kurva Tegangan Regangan Pada Tiap Variasi Overlap

Kurva tegangan regangan hasil pengujian pada daerah elastis seharusnya berbentuk *closeloop*, namun pada hasil eksperimen dan simulasi pada penelitian ini menunjukkan kurva tidak berbentuk *closeloop* seperti pada Gambar 4.8. Kurva yang tidak *closeloop* tersebut disebabkan oleh spesimen yang lepas atau hilang kontak antara permukaan spesimen dengan *transmitted bar*, sehingga sinyal yang seharusnya diterima *transmitted bar* menjadi berkurang dan tidak kembali ke titik 0. Terdapat kemungkinan terjadinya deformasi plastis akibat tegangan geser, namun dalam penelitian ini mengalami keterbatasan tidak dapat terbaca oleh alat ukur eksperimen yang digunakan.



(b)

Gambar 4.8 Kurva tegangan regangan pada tiap variasi *overlap*. (a) hasil eksperimen (b) hasil simulasi

Spesimen mengalami kehilangan kontak dengan *transmitted bar* disebabkan tidak adanya *stopper* yang berfungsi untuk penahan *transmitted bar* setelah diberi pembebanan dinamis pada ujung alat uji SHPB seperti pada umumnya, selain itu massa *transmitted bar* lebih kecil dibandingkan massa *incident bar* yang menyebabkan *transmitted bar* menjadi bergerak lebih cepat.

Dari Gambar 4.8 terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara eksperimen dan simulasi. Perbedaan tersebut dapat dilihat bahwa hasil eksperimen menunjukkan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan simulasi, lalu nilai regangan dari simulasi lebih besar dibandingkan dengan eksperimen, dan sensitifitas terhadap lapisan *adhesive* pada eksperimen sangat sensitif dibandingkan pada simulasi yang tidak sensitif. Dari perbedaan yang didapatkan, maka *finite element model* yang digunakan belum mewakili kondisi eksperimen sehingga belum bisa digunakan untuk analisa. Hal ini mungkin disebabkan dari pengaruh sisa panjang *adherend* yang terlalu panjang, karena *adherend* yang terlalu panjang sulit untuk berdeformasi sehingga akan mempengaruhi bentuk deformasi dari *adhesive* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Deformasi *adhesive* pada panjang total spesimen 100 mm

#### 4.2 Perbandingan Simulasi Terhadap Eksperimen

Setelah melakukan penelitian pengaruh panjang overlap pada sambungan adhesive lap joint menggunakan alat uji Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) untuk eksperimen dan perangkat lunak ANSYS Explicit Dynamics untuk simulasi. Setelah membandingkan kurva laju regagan maka dilakukan perbandingan kurva tersebut untuk mengetahui parameter yang harus dimasukkan ke ANSYS untuk material epoxy. Kurva *compressive force* pada Gambar 4.2 tidak berhimpit, terdapat penelitian pendukung yang dilakukan oleh N. Pugno dan A. Carpinteri (2003) yang menyatakan bahwa pada jenis sambungan *lap joint* terdapat beberapa gaya yang bekerja, yaitu tegangan geser dan tegangan normal. Pada spesimen *tubular adhesive joint* tegangan geser maksimal terjadi di ujung-ujung bagian *adhesive*, sehingga solusi untuk mengoptimasi tegangan *uniform axial* pada spesimen yaitu dengan melakukan *chamfering* atau *tapering* pada bagian ujung *adherend* yang di-*bonded* dengan *adhesive* untuk mengurangi tegangan yang terjadi.

Didapatkan rata-rata hasil pengukuran yang dilakukan pada laju regangan sebesar 7,8 $\pm$ 0,7/s pada eksperimen dan 9 $\pm$ 0,2/s pada simulasi. Pengaruh panjang *overlap* dengan kurva tegangan regangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 hasil eksperimen dan hasil simulasi menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan. Perbedaan nilai pada kurva tegangan regangan antara simulasi dan eksperimen disebabkan oleh alat SHPB untuk eksperimen memiliki kekurangan yaitu alat ukur pembacaan yang kurat akurat.

Dengan pembahasan tersebut maka hasil simulasi dapat dinyatakan valid secara kualitatif bahwa parameter *epoxy* yang dimasukkan pada perangkat lunak *ANSYS explicit dynamics* secara *trial and error* untuk simulasi sudah mewakili hasil eksperimen kecuali kurva tegangan-regangan, sehingga parameter untuk *adhesive* bermerk Dextone dapat dilihat pada Tabel 4.2

| No. | Properties                                    | Value                    |  |  |
|-----|---|--------------------------|--|--|
| 1.  | Density                                       | 1190 kg/m <sup>3</sup>   |  |  |
| 2.  | Instantaneous Shear Modulus<br>(High Rate) G0 | 1,9 x 10 <sup>8</sup> Pa |  |  |
| 3.  | Viscoelastic Decay Constant                   | 0,001/s                  |  |  |
| 4.  | Shear Modulus                                 | 9 x 10 <sup>8</sup> Pa   |  |  |
| 5.  | C1  | 2270 m/s                 |  |  |

| Tabel 4.2 Parameter epoxy un | ntuk simulasi pa | da ANSYS Explicit |
|------------------------------|------------------|-------------------|
|------------------------------|------------------|-------------------|

Dynamics

Density adalah nilai kerapatan atau substansi massa per volume dari suatu material, sedangkan parameter C1 merupakan nilai cepat rambat suatu material. Lalu *instantaneous shear modulus* merupakan nilai maksimum *shear stress* dari suatu material yang diberi beban F terhadap waktu, dengan pembebanan F secara konstan nilai *shear stress* akan turun yang membutuhkan waktu hingga nilai *shear modulus* menjadi konstan, waktu tersebut adalah *viscoelastic decay constant* pada fase *longterm shear stress*. Sedangkan *shear modulus* sendiri adalah nilai yang menyatakan respon suatu bahan terhadap tegangan geser yang diberikan.

Dari Tabel 4.2 terdapat nilai yang serupa dengan penelitian oleh Jennifer L. Jordan et al (2010). Nilai dari penelitian tersebut yang sama dapat dilihat pada Tabel 4.3.

| No. | Properties | Value                  |
|-----|------------|------------------------|
| 1.  | Density    | 1190 kg/m <sup>3</sup> |
| 2.  | C1         | 2270 m/s               |

Tabel 4. 3 *Epoxy* dalam penelitian (Jordan et al, 2010)

Sedangkan nilai *shear modulus* yang didapatkan sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Yohanes dan Ridho (2019), dan *instantaneous shear modulus* didapatkan dari *website www.matweb.com*.

Dari hasil pembahasan ini, maka dapat dipastikan bahwa simulasi sudah mewakili kondisi eksperimen. Namun setelah dianalisa ternyata kurva *compressive force* tidak berhimpit seperti pada penelitian Yohanes dan Ridho (2019), serta kurva teganganregangan yang didapatkan memiliki perbedaan yang signifikan antara ekperimen dan simulasi, hal ini membuat penulis melakukan simulasi tambahan yang akan dijelaskan pada subbab 4.3.

#### 4.3 Analisa Pada Sambungan Adhesive Layer

Sebelumnya penulis melakukan simulasi dengan panjang total spesimen dijaga tetap 100 mm pada variasi *overlap* sebesar 10 mm; 15 mm; 20 mm; dan 25 mm. Maksud dan tujuan panjang total spesimen dijaga tetap adalah untuk membuat kondisi pengujian sama/sebanding, karena didalam SHPB yang distandardisasi adalah panjang total spesimen. Misal menurut buku standar ASM rasio panjang spesimen dengan diameter spesimen.

Namun setelah melakukan perhitungan dari kurva regangan terhadap waktu terdapat kurva yang tidak sesuai ekspektasi awal, yaitu kurva *compressive force* yang tidak berhimpit dan kurva tegangan-regangan yang berbeda saat dibandingkan. Jika kurva *compressive force* tidak berhimpit maka menandakan tidak terjadinya kesetimbangan dinamik, salah dua penyebabnya adalah sisa panjang *adherend* yang mempengaruhi deformasi pada sambungan *adhesive* dan beda kekakuan antar *adherend* pengujian. Padahal sisa panjang *adherend* yang terlalu panjang dan beda kekakuan pada *adherend* rawan terhadap *bending* dan *barreling*, hal tersebut dapat dilihat dari hasil tangkapan layar pada Gambar 4.10.



(b)

Gambar 4.10 Hasil tangkapan layar pada *adherend* yang panjang. (a) sebelum diberi beban (b) saat diberi beban

Berdasarkan fakta yang didapatkan dari hasil analisa tersebut, maka tidak *fair* membandingkan perilaku sambungan *adhesive* ketika sisa *adherend* lebih dominan pengaruhnya. Oleh sebab itu penulis mencoba untuk menambahkan simulasi lain dengan menjaga sisa panjang *adherend* sebesar 5 mm, harapan penulis dengan adanya simulasi ini adalah deformasi tegangan yang terjadi di sambungan tidak dipengaruhi oleh sisa *adherend* sehingga yang diukur hanya sambungannya tanpa pengaruh *adherend*. Berikut ini adalah gambar teknik spesimen *adhesive hollow tubular lap joint* dengan sisa panjang *adherend* 5 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Spesimen dengan sisa panjang adherend 5 mm

Keterangan:

X = panjang variasi *overlap* 

Untuk mengetahui efek dari variasi *overlap* dengan panjang sisa *adherend* dijaga tetap, berikut adalah beberapa aspek yang dijadikan pembanding dengan simulasi sebelumnya yang memiliki panjang total *adherend* 100 mm untuk dibahas lebih lanjut.

#### 4.3.1 Kurva Laju Regangan Pada Tiap Variasi Overlap

Perbandingan lurva laju regangan simulasi antara spesimen yang memiliki sisa panjang *adherend* 5 mm dengan spesimen yang memiliki panjang total 100 mm dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13.



Gambar 4.12 Laju regangan spesimen dengan spesimen sisa adherend 5 mm



Gambar 4.13 Laju regangan spesimen panjang total *adherend* 100 mm

Pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan bahwa pembebanan kompresi pada spesimen dengan sisa panjang *adherend* 5 mm memiliki perbedaan pada tiap variasinya, hal ini berbeda dengan spesimen yang memiliki panjang total *adherend* 100 mm. Penyebab dari pembebanan yang berubah-ubah tersebut dikarenakan panjang *adherend* yang tidak konstan, sehingga pembebanan maksimum terjadi pada panjang *overlap* 10 mm.

#### 4.3.2 Kurva Compressive Force Pada Tiap Variasi Overlap

Kurva *compressive force* selain menunjukkan gaya yang diterima di ujung spesimen juga menunjukkan terjadinya kesetimbangan dinamik pada spesimen. Apabila terjadi kesetimbangan dinamik maka kurva *compressive force* yang terdiri dari P1 dan P2 akan berhimpit. Gambar 4.14 adalah perbandingan kurva *compressive force* antara spesimen yang memiliki sisa panjang *adherend* 5 mm dengan Gambar 4.15 spesimen yang memiliki panjang total 100 mm.



Gambar 4.14 Kurva *compressive force* spesimen dengan sisa adherend 5 mm



Gambar 4.15 Kurva *compressive force* spesimen dengan panjang total 100 mm

Dari perbandingan tersebut, didapatkan fakta bahwa meskipun panjang sisa *adherend* sudah dijaga tidak berubah tetapi kurva *compressive force* menunjukkan P1 dan P2 tetap tidak berhimpit. Hal ini berarti tidak hanya semata-mata dipengaruhi oleh sisa *adherend*, ada faktor lain yang berpengaruh yaitu deformasi dari *adherend* meskipun sudah diminimalkan. Tetapi terdapat perbedaan pada Gambar 4.15, yaitu kurva spesimen dengan sisa *adherend* 5 mm memiliki bentuk yang lebih halus dibandingkan dengan kurva spesimen yang memiliki panjang total spesimen 100 mm. Dengan adanya perbedaan tersebut maka disimpulkan bahwa memang ada pengaruh panjang sisa *adherend* pada spesimen *adhesive hollow tubular lap joint*.

#### 4.3.3 Deformasi Adhesive

Selain aspek kurva *compressive force* yang dibandingkan, ada aspek deformasi pada *adhesive* juga yang dibandingkan antara

spesimen yang memiliki sisa *adherend* 5 mm dengan spesimen yang memiliki panjang total 100 mm untuk mengetahui apakah panjang *adherend* berpengaruh terhadap deformasi di *adhesive* spesimen. Berikut ini adalah gambar desain dari *adhesive* yang berdeformasi pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.



Gambar 4.16 *Adhesive* yang berdeformasi pada spesimen dengan sisa panjang *adherend* 5 mm



Gambar 4.17 *Adhesive* yang berdeformasi pada spesimen dengan panjang total 100 mm

Dari perbandingan Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa *adhesive* pada spesimen yang memiliki sisa panjang *adherend* 5 mm berdeformasi lebih sedikit daripada *adhesive* yang ada di spesimen dengan panjang total 100 mm. Selain itu, pipa *adherend* dengan beda diameter seperti spesimen dalam pengujian ini akan mengakibatkan beda kekakuan. Beda kekakuan inilah yang akan mengakibatkan perbedaan deformasi dan memicu konsentrasi tegangan serta *peeling*. Berikut adalah Tabel 4.4 yang berisikan data dari parameter yang dimiliki oleh masing-masing *adherend*.

| No. | Adherend      | Modulus<br>Young | Luas<br>Permukaan                                      | Panjang<br>Adherend        | Kekakuan<br>(N/m) |
|-----|---------------|------------------|--|----------------------------|-------------------|
| 1.  | Pipa<br>Besar | 69 GPa           | 3,016 x 10 <sup>-</sup><br><sup>5</sup> m <sup>2</sup> | 50 x 10 <sup>-3</sup><br>m | 41620800          |
| 2.  | Pipa<br>Kecil |                  | 2,591 x 10 <sup>-</sup><br><sup>5</sup> m <sup>2</sup> | 60 x 10 <sup>-3</sup><br>m | 29796500          |

Tabel 4.4 Parameter adherend spesimen

Nilai kekakuan didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{E \cdot A}{L}$$

keterangan:

E = modulus *young* 

A = luas permukaan

L = panjang *adherend* 

Dari fakta yang didapatkan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa memang ada pengaruh dari sisa panjang *adherend* dan perbedaan kekakuan pada spesimen *adhesive hollow tubular lap joint* yang memicu terjadinya konsentrasi tegangan serta *peel*.

## 4.3.4 Kurva Tegangan-Regangan Pada Tiap Variasi Overlap

Kurva tegangan-regangan pada tiap variasi *overlap* untuk spesimen yang memiliki sisa panjang *adherend* 5 mm dapat dilihat pada Gambar 4.18. Penulis mencoba untuk menambahkan variasi *overlap* sebesar 12,5 mm; 17,5 mm; dan 22,5 mm.



Gambar 4.18 Kurva tegangan-regangan pada spesimen sisa panjang *adherend* 5 mm

Dari Gambar 4.18 menunjukkan bahwa simulasi *finite model element* dengan spesimen yang memiliki sisa panjang *adherend* 5 mm lebih sensitif.

Berdasarkan variasi panjang *overlap* yang diuji, tegangan maksimum terjadi pada spesimen yang memiliki panjang lapisan *adhesive layer* sebesar 25 mm, dan regangan maksimum terjadi pada spesimen yang memiliki panjang lapisan *adhesive layer* sebesar 10 mm. Hal ini serupa dengan kondisi eksperimen yang telah dilakukan, bahwa semakin panjang lapisan *adhesive layer* maka tegangan maksimum yang diterima juga semakin besar. Sehingga memang betul adanya bahwa panjang *adherend* akan mempengaruhi sensitifitas kurva tegangan-regangan.

# 4.4 Pembahasan Pengaruh Sisa Panjang Adherend Pada Sambungan

Setelah melakukan analisa hasil simulasi pengaruh sisa panjang *adherend* di spesimen dengan membandingkan kurva

compressive force, deformasi yang terjadi di adhesive antara spesimen yang memiliki sisa panjang adherend 5 mm dengan spesimen yang memiliki panjang total 100 mm, dan perbedaan kekakuan masing-masing adherend maka disimpulkan bahwa memang betul adanya pengaruh sisa panjang adherend di spesimen dan beda kekakuan adherend. Hal ini dibuktikan dengan adanya perbedaan bentuk kurva compressive force dimana kurva dengan spesimen yang memiliki sisa panjang *adherend* 5 mm lebih halus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14, serta deformasi pada adhesive yang memiliki sisa panjang adherend 5 mm juga lebih sedikit yang dapat dilihat pada Gambar 4.15. Perbedaan kekakuan masing-masing adherend untuk spesimen uji seperti yang tertera pada Tabel 4.4 juga menjadi pengaruh terhadap deformasi yang memicu terjadinya konsentrasi tegangan. Dengan adanya fakta dan data tersebut maka efek seperti barreling dan bending dapat diminimalisir dengan cara mengurangi sisa panjang adherend.

# BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

# 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini penulis memberikan beberapa kesimpulan, antara lain:

- 1. Berdasarkan eksperimen, kurva tegangan-regangan sangat dipengaruhi oleh lapisan *adhesive*. Semakin panjang *adhesive layer* maka semakin besar kekakuannya, semakin kecil deformasinya, dan tegangan yang diterima semakin besar.
- 2. Model elemen hingga yang digunakan sudah mendekati kondisi eksperimen, sehingga bisa dilakukan analisa pada lapisan *adhesive* dengan parameter *viscoelastic* seperti pada Tabel 4.2. Dengan sisa panjang *adherend* yang terlalu panjang, simulasi tidak sensitif sehingga sifat *adherend* lebih dominan dibandingkan *adhesive*-nya. Artinya, model *finite model element* sudah valid dengan parameter tersebut.
- 3. Pengaruh panjang *overlap* terhadap kurva teganganregangan antara simulasi dengan eksperimen mempunyai tren kenaikan yang sama.

#### 5.2 Saran

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

- 1. Merencanakan ulang alat uji SHPB yang lama menjadi alat uji SHPB yang standar pengujian ASM.
- 2. *Striker bar* menggunakan sistem tekanan/pneumatik agar kecepatan dapat dijaga konstan dan penumbukan menjadi lebih akurat.

- 3. Pembuatan spesimen untuk *tubular hollow lap joint* menggunakan *jig* agar memudahkan proses dan mendapatkan hasil yang presisi.
- 4. Untuk jenis sambungan *tubular lap joint* lebih baik dilakukan proses *chamfer* atau *taper* pada ujung-ujung *adhesive* untuk mereduksi tegangan *uniaxial*.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] ASM International. 2000. Mechanical Testing and Evaluation Volume 8. Ohio: Materials Park.
- [2] Budynas, Richard G., Nisbett, J Keith. 2015. Shigley's Mechanical Engineering Design – Tenth Edition. New York: McGraw-Hill Education.
- [3] Chen, W., Song, B. 2011. Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications. New York: Springer Science Business Media.
- [4] Hibbeler, R.C. 2011. Mechanics of Materials Eight Edition. USA: Pearson Prentice Hall.
- [5] Jr, Robert W. Messler. 2004. Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology. Massachusetts: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [6] Jr, William D. Callister., Rethwisch, David G. Retchwisch. 2010. Material Science and Engineering an Introduction. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Jordan, Jennifer L., Dana M. Dattelbaum, Gerrit Sutherland, D. Wayne Richards, Stephen A. Sheffield, Richard D. Dick. 2010. Shock Equation of State of Multi-Phase Epoxy-Based Composite (Al-MnO<sub>2</sub>-Epoxy). USA: AIP.
- [8] Kim, Yongha., Youngjae Chun, Seong S. Cheon. 2015. Shear Directional Impact Characteristics of Adhesively Bonded Tubular Joints. UK: Taylor & Francis.
- [9] Lee, Dai Gil., Ki Soo Kim., Yong-Taek Im. 1991. An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints. Korea: Taylor & Francis.
- [10] Li, W., L. Blunt, K.J. Stout. 1999. Stiffness Analysis of Adhesive Bonded Tee Joints. UK: University of Birmingham.

- [11] Lucic, M., A. Stoic., J. Kopac. 2005. Investigation of Aluminum Single Lap Adhesively Bonded Joints. Croatia: University of Ljubljana.
- [12] Pugno, N., A. Carpinteri. 2003. Tubular Adhesive Joints Under Axial Load. Italy: Politecnico di Torino.
- [13] Silva, Lucas F.M. da., R.D. Adams. 2006. Techniques to Reduce the Peel Stresses in Adhesive Joints with Composites. Portugal: Universidade do Porto.
- [14] Soo Kim, Ki., Won Tae Kim., Dai Gil Lee. 1992. Optimal Tubular Adhesive Bonded Lap Joint of The Carbon Fiber Epoxy Composite Shaft. Korea: Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- [15] www.matweb.com. Overview Materials for Epoxy Adhesive. Diakses pada 31 Juli 2020, dari matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c1ec1ad603 c74f628578663aaf44f261
- [16] Yohanes, Ridho Gary P. 2019. Studi Eksperimen dan Analisa Pengaruh Panjang Overlap Terhadap Kekakuan Pada Sambungan Adhesive Tipe Single Lap Dengan Pembebanan Dinamis. Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.



#### **BIODATA PENULIS**

Mahalli Ridho dilahirkan di Surabaya, 3 Juni 1998. Merupakan anak pertama dari 2 bersaudara yang lahir dari orangtua bernama Akmaluddin Ridho dan Sofia Handayani. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Anyelir 1 Depok, SMP Negeri 2 Depok, dan SMA Negeri 1 Depok. Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Depok 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 Kewirausahaan 2017/2018 dan sebagai Kepala Departemen Kewirausahaan 2018/2019. Penulis juga aktif menjadi pengurus sebagai staff Departemen Kewirausahaan BEM FTI ITS 2017/2018 dan sebagai Kepala Biro Kajian Strategis BEM FTI ITS 2018/2019. Selain aktif berorganisasi, penulis juga aktif mengisi materi LKMW TD yang diselenggarakan oleh himpunan di ITS dan sebagai pemandu dalam bidang kewirausahaan untuk Kampus ITS. Selain kuliah, penulis juga bekerja di perusahaan PT. Maju Kaya dan menempati posisi direktur. 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 "Jadilah seperti pohon yang tumbuh dan lebat, dilempar batu namun memberi buah (Abu Bakar As Siddiq)" 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 mahalliridho@gmail.com.