



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKPERIMENTAL DAN ANALISA
PENGARUH KETEBALAN *EPOXY ADHESIVE*
TERHADAP KEKAKUAN *BUTT ADHESIVE*
JOINT DENGAN *ADHEREND* ALUMUNIUM
KOTAK BERONGGA PADA LAJU REGANGAN
TINGGI**

Sidik Pramono
NRP. 02111540000168

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Yohanes, S.T.,M.Sc.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



TUGAS AKHIR – TM184835

**STUDI EKPERIMENTAL DAN ANALISA PENGARUH
KETEBALAN *EPOXY ADHESIVE* TERHADAP
KEKAKUAN *BUTT ADHESIVE JOINT* DENGAN
ADHEREND ALUMUNIUM KOTAK BERONGGA PADA
LAJU REGANGAN TINGGI**

**Sidik Pramono
NRP. 02111540000168**

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

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT – TM184835

**EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF THE
EFFECT EPOXY ADHESIVE THICKNESS ON BUTT
ADHESIVE JOINT STIFFNESS OF ALUMINUM SQUARE
HOLLOW ADHEREND AT HIGH STRAIN RATE**

**Sidik Pramono
NRP. 02111540000168**

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

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI EKPERIMENTAL DAN ANALISA PENGARUH KETEBALAN *EPOXY ADHESIVE* TERHADAP KEKAKUAN *BUTT ADHESIVE JOINT* DENGAN *ADHEREND* ALUMINIUM KOTAK BERONGGA PADA LAJU REGANGAN TINGGI

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Sidik Pramono

NRP. 02111540000168

Disetujui oleh Pembimbing Proposal Tugas Akhir:

1. **Dr. Eng. Yohanes, S.T. M.Sc.**
NIP. 198006272012121003
(Pembimbing)
2. **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono DEA**
NIP. 196508101991021001
(Penguji)
3. **Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.**
NIP. 196807061999031004
(Penguji)
4. **Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA**
NIP. 195012111985021001
(Penguji)

SURABAYA
MEI 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**STUDI EKPERIMENTAL DAN ANALISA PENGARUH
KETEBALAN *EPOXY ADHESIVE* TERHADAP
KEKAKUAN *BUTT ADHESIVE JOINT* DENGAN
ADHEREND ALUMINIUM KOTAK BERONGGA PADA
LAJU REGANGAN TINGGI**

Nama Mahasiswa : Sidik Pramono
NRP : 02111540000168
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRAK

Sambungan *adhesive* dipilih untuk struktur ringan karena berbagai kelebihanannya dibandingkan sambungan mekanik konvensional, yaitu ringan dan dapat mendistribusikan tegangan secara merata. Dalam aplikasi otomotif, struktur menerima beban tumbukan sehingga penting mengetahui karakteristik dari sambungan *adhesive* seperti respon tegangan-regangan dan kekakuan. Metode untuk mengetahui karakteristik tersebut adalah menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)*.

Butt joint adalah sambungan yang sering digunakan untuk karakterisasi sifat mekanik sambungan arah aksial. Pengujian sambungan *butt joint* menggunakan *adherend* silindris pejal hanya menghasilkan data karakteristik *bulk adhesive*, sedangkan *adherend* berongga dapat menggambarkan karakteristik sambungan secara keseluruhan. Namun, karakterisasi sambungan *adhesive* dengan dengan *adherend* berongga belum banyak dilakukan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan *epoxy adhesive* terhadap kekakuan pada sambungan tipe *butt* dengan *adherend* aluminium kotak berongga menggunakan alat uji SHPB pada laju regangan tinggi. Ketebalan *adhesive* divariasikan yaitu dengan nilai 0.5; 1.0; 1.5; dan 2.5 milimeter dengan rasio *epoxy-hardener* konstan 1:1. SHPB digunakan untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan dari spesimen sambungan.

Laju regangan dikendalikan agar konsisten, yaitu 32 ± 3 s⁻¹. Nilai kekakuan sambungan yang diperoleh dari nilai modulus elastisitas spesimen dan kemudian dibandingkan untuk tiap variasi ketebalan *adhesive*. Pada rentang variasi yang diuji, nilai modulus elastisitas menurun secara *non-linear* seiring penambahan ketebalan *adhesive*. Validasi juga dilakukan dengan cara melakukan analisa numerik untuk memastikan pengaruh ketebalan *adhesive* pada sambungan *adhesive*. Nilai modulus elastisitas terbesar didapatkan pada ketebalan adhesive 0.5 mm pada rentang ketebalan yang diuji. Modulus elastisitas terus menurun hingga pada ketebalan *adhesive* 2.5 mm, tetapi nilai modulus elastisitas pada rentang ketebalan adhesive 1.5 mm dan 2.5 mm tidak memiliki perbedaan yang signifikan berdasarkan uji *paired t-test*. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi dalam pengambilan keputusan ketebalan *adhesive* yang digunakan pada *butt adhesive joint* dengan adherend aluminium kotak berongga, sehingga dapat meminimalkan biaya yang dibutuhkan dalam pengaplikasian *adhesive joint*.

Kata kunci : *adherend berongga, adhesive joint, kekakuan, ketebalan adhesive, split hopkinson pressure bar.*

EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF THE EFFECT EPOXY ADHESIVE THICKNESS ON BUTT ADHESIVE JOINT STIFFNESS OF HOLLOW SQUARE ALUMINUM ADHEREND AT HIGH STRAIN RATE

Student Name : Sidik Pramono
NRP : 02111540000168
Department : Mechanical Engineering
Advisory Lecturer : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRACT

The adhesive joint was chosen for lightweight structures because of their many advantages over conventional mechanical joints, which are lightweight and can evenly distribute stresses. In automotive applications, structures receive collision loads so it is important to know the characteristics of adhesive joints such as stress-strain response and stiffness. The method to determine this characteristic is to use the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test tool.

The butt joint is a connection that is often used to characterize the mechanical properties of axial direction joints. Producing butt joint using solid cylindrical adherend only produces adhesive characteristic data, whereas hollow adherend can describe the overall connection characteristics. However, the characterization of adhesive joints with hollow adherend has not been done much.

This study aims to determine the effect of the thickness of the epoxy adhesive on the stiffness in the butt-type joint with the hollow square aluminum adherend using a test tool at a high strain rate. The thickness of the adhesive varies with a value of 0.5; 1.0; 1.5; and 2.5 millimeters with a constant epoxy-hardener ratio of 1:1. SHPB is used to get the stress-strain curve from the connection specimen.

The strain rate is controlled to be consistent, which is 32 ± 3 s⁻¹. The value of stiffness adhesive joint is obtained from the

modulus of elasticity of the specimen and then compared for each variation of adhesive thickness. Over the range of variations tested, the modulus of elasticity decreases non-linearly with increasing adhesive thickness. Validation is also done by numerical analysis to ascertain the influence of the thickness of the adhesive. The biggest modulus of elasticity is obtained at an adhesive thickness of 0.5 mm in the thickness range tested. The modulus of elasticity continues to decrease until the thickness of the adhesive is 2.5 mm, but the value of the modulus of elasticity in the range of adhesive thickness of 1.5 mm and 2.5 mm does not have a significant difference based on paired t-test. The results of this study can be used as a reference in making decisions on the thickness of the adhesive used on the butt adhesive joint with the square hollow aluminum adherend, so as to minimize the costs required in applying the adhesive joint.

Keywords : adhesive thickness, adhesive joint, split hopkinson pressure bar, dynamic stiffness, hollow adherend.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis panjatkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Tak lupa shalawat serta salam senantiasa tucurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak, Ibu, dan Kakak tercinta, Suparno, Sunarni, dan Iin Narwanti serta Ageng Warasta yang senantiasa memberi dukungan, motivasi, dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabaran Bapak selama membimbing penulis.
3. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono DEA., Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT., Bapak Indra Sidharta, ST., M.Sc., selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih telah meluangkan waktunya dan atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Bapak Suwarno, ST., MSc., Ph.D., selaku Dosen wali penulis, Terima kasih telah menjadi dosen wali penulis selama tiga setengah tahun.
5. Rekan seperjuangan ITS Team Sapuangin, Terima kasih telah menjadi teman berbagi suka cita, duka cita, dan bertukar ilmu selama berorganisasi dan mengikuti perlombaan tingkat nasional maupun internasional.
6. Rekan Angkatan M58, Terima kasih telah menjadi teman berbagi suka cita, duka cita, dan bertukar ilmu selama penulis menempuh pendidikan di Teknik Mesin ITS.

7. Carla Gravina Wiratama yang telah menemani dan memberikan dukungan selama menyelesaikan perkuliahan di Teknik Mesin ITS.
8. Rekan Tugas Akhir, Terima kasih telah menjadi teman berbagi suka cita, duka cita, dan bertukar ilmu selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin ITS.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 2 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II	7
2.1 Adhesive	7
2.2 Adhesive Joint	7
2.3 Butt Joint	8
2.4 Split Hopkinson Pressure Bar.....	9
2.4.1 Cepat Rambat Gelombang Elastis (<i>Elastic Wave Speed</i>) Dan Impedansi Material.....	11
2.4.2 Kecepatan Setelah Tumbukan Antara <i>Striker Bar</i> Dan <i>Incident Bar</i>	12
2.4.3 Perambatan Gelombang Setelah Tumbukan <i>Striker Bar</i> Dan <i>Incident Bar</i>	15
2.4.4 Regangan (Strain) Pada <i>Incident Bar</i> Akibat Pembebanan	16
2.4.5 Hubungan Perubahan Luas Permukaan Dengan Impedansi.....	17
2.4.6 Tegangan (Stress) dan Regangan (Strain) Pada Spesimen.....	19
2.4.7 Kalibrasi Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar	23

2.5	Kurva Tegangan-Regangan.....	24
2.6	Kekakuan (Stiffness).....	25
2.7	Modulus Elastisitas (Modulus Young).....	26
2.8	Penyerapan Energi (Energy Absorption).....	27
2.9	Penelitian Terdahulu	27
BAB III	.....	33
4.2.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	33
4.2.2	Desain Eksperimen.....	37
3.2.1	Variabel Independen.....	37
3.2.2	Variabel Dependen	38
3.2.3	Uji <i>Paired T-Test</i>	39
4.2.3	Pengaturan Alat Uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	39
4.2.4	Kalibrasi Alat Uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	46
4.2.5	Eksperimen.....	49
3.5.1	Pembuatan Spesimen.....	51
4.2.6	Pengolahan Data Eksperimen.....	54
BAB IV	.....	63
4.1	Hasil Pengujian.....	63
4.2.1	Laju Regangan Tiap Variasi Ketebalan <i>Adhesive</i>	63
4.2.2	Kurva Tegangan-Regangan Tiap Variasi Ketebalan Adhesive	64
4.2	Analisa Numerik.....	69
4.2.1	Pengaruh Ketebalan <i>Adhesive</i> Terhadap Kurva Tegangan-Regangan	70
4.2.2	Pengaruh <i>Misalignment</i> Sambungan <i>Adhesive</i> Terhadap Kurva Tegangan-Regangan	71
4.2.3	Deformasi Maksimal Pada <i>Adhesive</i> Dan Sambungan Adhesive	72

4.3	Pembahasan.....	73
BAB V	.....	75
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	75
5.1	Kesimpulan.....	75
5.2	Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	.....	77
BIODATA PENULIS	.....	81

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Adhesive Joint</i>	8
Gambar 2.2 Jenis Gaya Sambungan.....	8
Gambar 2.3 <i>Butt Joint</i>	9
Gambar 2.4 Skema <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> (SHPB) (George Sunny, 2008)	10
Gambar 2. 5 Pendulum <i>Striker Bar</i>	13
Gambar 2. 6 Tumbukan <i>Striker Bar</i> dan <i>Incident Bar</i> (Sharma, S., 2011).....	14
Gambar 2. 7 Skema Gelombang Kompresi Akibat Tumbukan <i>Striker Bar</i> dan <i>Incident Bar</i> (Sharma, S., 2011)	16
Gambar 2. 8 Skema Perpindahan Partikel Pada <i>Incident Bar</i> (Sharma, S., 2011).....	17
Gambar 2. 9 Perbedaan Luas Permukaan <i>Bar</i> dan Spesimen (Sharma, S., 2011).....	18
Gambar 2. 10 (a) Gelombang <i>incident</i> Dan <i>reflected</i> Pada <i>Incident Bar</i> . (b) Interval Waktu Untuk Mengukur Cepat Rambat Gelombang. (Sharma, S., 2011).....	24
Gambar 2.11 Kurva Tegangan-Regangan	25
Gambar 2.12 Ilustrasi Pemasangan Spesimen (X. Nie, 2008).....	28
Gambar 2.13 Grafik <i>Stress-Strain</i> Pada <i>Solid, Hollow</i> Dan <i>Wrapped</i> Spesimen (X. Nie, 2008).....	28
Gambar 2.14 Grafik <i>Stress-Strain</i> Pada Spesimen Berongga (Nobuhiko Kii, 2014)	29
Gambar 2.15 Sambungan Adherend Dengan Adhesive (Yohanes, 2019).....	30
Gambar 2.16 Pengujian Pada Strain Rate $600 \pm 50 \text{ s}^{-1}$ (Yohanes, 2019).....	31
Gambar 2.17 Grafik <i>Stress-Strain</i> (Yohanes, 2019).....	31
Gambar 2.18 Grafik Pengaruh Ketebalan <i>Adhesive</i> Terhadap Nilai Kekakuan Sambungan (Yohanes, 2019)	32
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34

Gambar 3.2 Skema <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> (SHPB) (Ridho G. P., 2019)	40
Gambar 3.3 Dimensi <i>Striker Bar</i> (Juan Carlos M., 2019).....	41
Gambar 3.4 Dimensi <i>Incident Bar</i> Dan <i>Transmitter Bar</i>	42
Gambar 3.5 Dimensi Spesimen Sambungan <i>Adhesive Tipe Butt Joint</i>	42
Gambar 3.6 <i>Strain Gauge</i> Pada <i>Incident Bar</i>	45
Gambar 3.7 Rangkaian Pada $\frac{1}{4}$ Bridge 120 ohm <i>Hook-up</i> (BCM-1 Module, Omega.com).....	46
Gambar 3.8 <i>Dynamic Strain Meter</i> sebagai <i>A/D Converter</i>	46
Gambar 3.9 Gelombang Regangan Pada <i>Incident Bar</i> Hasil Pengujian.....	47
Gambar 3.10 <i>Flowchart</i> Eksperimen	49
Gambar 3.11 Pengaturan <i>Striker Bar</i>	50
Gambar 3.12 Peletakan Spesimen	51
Gambar 3.13 Proses Dan Hasil Pemotongan <i>Adherend</i>	51
Gambar 3.14 Proses Penyambungan <i>Adherend</i> Dengan Lakban Kertas	52
Gambar 3.15 Proses Pengukuran Ketebalan <i>Adhesive</i> Pada Spesimen	52
Gambar 3.16 Proses Penimbangan Komposisi Rasio Epoxy-Hardener	52
Gambar 3.17 Proses Pengeleman <i>Adhesive</i> Pada Spesimen.....	53
Gambar 3.18 Proses Merapikan Pengeleman <i>Adhesive</i>	53
Gambar 3.19 Proses Pelepasan Lakban Kertas Dari Spesimen...53	
Gambar 3. 20 Proses Validasi Hasil Pengukuran	53
Gambar 3.21 Hasil Spesimen Sambungan <i>Adhesive Tipe Butt Joint</i>	54
Gambar 3.22 Kurva Regangan Terhadap Waktu	55
Gambar 3.23 Kurva Regangan Terhadap Waktu Setelah Proses <i>Resampling</i>	55
Gambar 3.24 Kurva <i>Incident Strain, Reflected Strain, Dan Transmitted Strain</i> Pada Rentang Waktu Yang Sama.....	56
Gambar 3.25 Grafik P1 & P2 Terhadap Waktu	57

Gambar 3.26 Grafik Laju Regangan Terhadap Waktu.....	57
Gambar 3.27 Kurva Tegangan-Regangan	58
Gambar 3.28 Modulus Elastisitas.....	59
Gambar 3.29 Data di <i>worksheet minitab</i>	59
Gambar 3.30 paired t-test	60
Gambar 3.31 <i>Pilih Data</i>	60
Gambar 3.32 Hasil Pengujian <i>Paired T-Test</i>	61
Gambar 4. 1 Grafik Laju Regangan Terhadap Waktu Tiap Variasi Ketebalan <i>Adhesive</i>	64
Gambar 4. 2 Kurva Tegangan Terhadap Regangan Pada Setiap Variasi Ketebalan <i>Adhesive</i>	65
Gambar 4. 3 Grafik Tegangan Maksimal Pada Setiap Variasi Ketebalan <i>Adhesive</i>	66
Gambar 4. 4 Grafik Regangan Maksimal Pada Setiap Variasi Ketebalan <i>Adhesive</i>	67
Gambar 4. 5 Pengaruh Ketebalan <i>Adhesive</i> Terhadap Modulus Elastisitas.....	68
Gambar 4. 6 Pengaruh Ketebalan <i>Adhesive</i> Terhadap Modulus Elastisitas.....	70
Gambar 4. 7 Pengaruh Ketebalan <i>Adhesive</i> Terhadap Modulus Elastisitas.....	71

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Geometri Spesimen Berongga.....	29
Tabel 3. 1 Hasil Penelitian	38
Tabel 3. 2 Hasil Uji <i>Paired T-Test</i>	39
Tabel 4. 1 Deformasi Maksimal Pada Adhesive dan Sambungan Adhesive.....	72
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian <i>Paired T-Test</i>	73

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sambungan *adhesive* merupakan jenis sambungan alternatif untuk menggabungkan dua material yang sejenis atau berbeda dengan menggunakan perekat (*adhesive*). Saat ini, sambungan *adhesive* telah dikembangkan pada beberapa komponen kendaraan seperti rangka kendaraan (*chassis*). Keuntungan dari sambungan *adhesive* adalah kemampuannya mendistribusikan tegangan secara merata sehingga meminimalkan konsentrasi tegangan yang terjadi. Getaran yang terjadi di kendaraan akan diminimalkan oleh serapan energi/*damping* sambungan *adhesive*. Selain itu, berat kendaraan dapat diminimalkan dan desain kendaraan menjadi tidak kompleks.

Komposisi *adhesive*, bentuk sambungan dan geometri *adherend* adalah faktor yang mempengaruhi respon tegangan-regangan serta sifat mekanik dari sambungan *adhesive*^[5]. Sebagai contohnya, bentuk sambungan akan mempengaruhi tegangan (stress) yang terjadi pada sambungan saat pembebanan. Selain itu, geometri *adherend* akan mempengaruhi luas permukaan kontak gaya dan momen inersia *adherend*. Berdasarkan rumus kekakuan material, semakin besar luas permukaan kontak gaya dan momen inersia *adherend*, maka semakin besar nilai kekakuan dari sambungan dan sebaliknya.

Sambungan *adhesive* menerima beban dinamis berupa getaran dan tumbukan, sehingga perlu diteliti karakteristik kekakuan dan serapan energinya untuk memastikan kehandalan dan keamanan sambungan. Kekakuan adalah kemampuan sebuah material untuk mempertahankan bentuk saat menerima beban. Sedangkan serapan energi adalah kemampuan untuk menyerap energi yang dibangkitkan oleh tumbukan/getaran, agar energi yang tersalurkan ke bagian lain berkurang. Kedua karakter mekanik tersebut dapat diestimasi dari respon tegangan-regangan spesimen

sambungan yang diuji menggunakan *Split Hopkinson Pressure Bar*.

Penelitian karakterisasi menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* telah banyak dilakukan. **Yohanes dkk. (2019)** menunjukkan bahwa ketebalan lapisan *adhesive* mempengaruhi kekakuan *adhesive* butt joint secara *non monotone* dan menemukan bahwa ketebalan *adhesive* 2 mm dapat memaksimalkan kekakuan sambungan. Namun, *adherend* aluminium silindris pejal yang digunakan dalam penelitian tersebut hanya umum digunakan di laboratorium sedangkan pada praktiknya rangka struktur ringan banyak menggunakan *adherend* pipa berongga. *Adherend* berongga akan memiliki nilai kekakuan yang berbeda dengan *adherend* pejal karena terjadi perbedaan *state of stress* pada lapisan *adhesive*. **Nobuhiko K. dkk. (2014)** *stress* pada lapisan *adhesive* dipengaruhi oleh *inner diameter* dari komponen *adherend*. Hipotesa yang dibangun pada penelitian ini adalah nilai kekakuan *adhesive joint* dipengaruhi oleh ketebalan *adhesive* dan geometri *adherend*. Oleh karena itu, akan dilakukan penelitian karakterisasi *butt adhesive joint* dengan variasi ketebalan *adhesive* menggunakan *adherend* aluminium kotak berongga.

Penelitian karakterisasi ini sangat dibutuhkan dalam pengembangan aplikasi *adhesive joint*, salah satu contohnya adalah *modular chassis*. *Modular chassis* adalah jenis rangka kendaraan yang memiliki kelebihan yaitu bentuk *chassis* dapat dimodifikasi lebih panjang, lebih pendek, dan lebih lebar sehingga *body kendaraan* yang berbeda dapat dipasang pada *chassis* yang sama. Penggunaan jenis *modular chassis* mempunyai berbagai manfaat yaitu penghematan biaya karena tidak harus merancang fondasi setiap kendaraan baru dari awal, pembuat mobil dapat merancang dan membangun komponen kendaraan dalam jumlah yang lebih besar, dan dapat mengurangi jumlah suku cadang yang berbeda yang harus disediakan oleh pembuat kendaraan karena satu bagian dapat digunakan pada beberapa model kendaraan yang berbeda. Selain itu kendaraan yang berbeda dengan *chassis* yang sama dapat

dibangun di jalur perakitan yang sama, sehingga mengurangi biaya dan ruang yang dibutuhkan untuk membangunnya. Manfaat tersebut menjadi motivasi bagi peneliti sehingga dilakukan penelitian karakterisasi *adhesive joint* untuk mendapatkan nilai kekakuan dan kekuatan yang optimal pada sambungan *adhesive joint* dengan berbagai kondisi pengukuran.

Dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian karakteristik kekakuan *butt adhesive joint* untuk mengetahui respon tegangan-regangan sambungan *adhesive* sehingga mendapatkan nilai modulus elastisitas pada beban dinamis berupa tumbukan. Alat uji yang digunakan adalah *Split Hopkinson Pressure Bar* untuk mendapatkan gelombang regangan yang terjadi akibat tumbukan. Dengan mengestimasi gelombang *incident*, *reflected*, dan *transmitted* serta melakukan pengolahan data hasil pengujian menggunakan *software*, maka akan mendapatkan respon tegangan-regangan sambungan *adhesive* sehingga dapat menentukan nilai kekakuan dengan cara mengestimasi *slope* pada awal kurva tegangan-regangan. Adherend yang digunakan adalah alumunium kotak berongga berukuran 16 mm x 16 mm dengan ketebalan 0.8 mm. Pengujian sambungan dilakukan dengan variasi ketebalan *adhesive* sebesar 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, dan 2.5 mm. Variasi ketebalan dalam rentang tersebut dilakukan karena keterbatasan ketelitian alat ukur dan biaya yang digunakan jika dilakukan pada rentang yang lebih kecil dan lebih besar. Variasi ketebalan ini dilakukan untuk mendapatkan pola/tren seiring pertambahan ketebalan *adhesive* sehingga dapat membuktikan adanya pengaruh ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan sambungan *adhesive*. Nilai modulus elastisitas yang diperoleh merepresentasikan nilai kekakuan sambungan *adhesive*. Pengujian dilakukan pada lima spesimen setiap variasi ketebalan sehingga nilai rata-rata modulus elastisitas digunakan dalam analisa hasil pengujian. Deviasi modulus elastisitas pada tiap kondisi pengujian sering terjadi, maka dilakukan uji *paired t-test* dengan membandingkan tiap variasi ketebalan *adhesive* untuk memastikan kebenaran adanya pengaruh yang signifikan yang

disebabkan variasi ketebalan. Hasil dari pengujian ini adalah pola/tren nilai kekakuan *adhesive butt joint* terhadap ketebalan *adhesive* yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk menentukan ketebalan *adhesive* pada *butt adhesive joint* dengan *adherend* alumunium kotak berongga berdasarkan kebutuhan nilai kekakuan yang diinginkan.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini diperlukan beberapa tahap penyelesaian masalah untuk bisa menganalisa pengaruh ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan *adhesive joint* yaitu:

1. Bagaimana mendapatkan respon tegangan-regangan *adhesive joint* pada beban dengan laju regangan tinggi menggunakan SHPB?
2. Bagaimana mendapatkan nilai kekakuan *adhesive joint* untuk tiap variasi ketebalan *adhesive*?
3. Bagaimana mendapatkan pengaruh karakteristik variasi ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan *butt adhesive joint* untuk penampang *adherend* alumunium kotak berongga?

1.3 Tujuan Penelitian

Berkaitan dengan rumusan masalah, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pola/tren nilai kekakuan sambungan tipe *butt joint* dengan *adherend* alumunium kotak berongga pada rentang ketebalan *adhesive* yang divariasikan. Pola/tren ini digunakan sebagai acuan sehingga dapat meminimalkan biaya yang dibutuhkan dalam pengaplikasian *adhesive joint*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah, yaitu:

1. Komposisi pada epoxy terhadap hardener adalah 1 : 1. Total massa komposisi epoxy dan hardener adalah 0.6 gram. Ketelitian alat ukur timbangan yang digunakan adalah 0.01 gram.

2. Ketebalan *adhesive* divariasikan pada nilai 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, dan 2.5 mm. Ketelitian alat ukur jangka sorong yang digunakan adalah 0.01 mm.
3. Pengujian dilakukan pada temperature ruangan.
4. Gelombang merambat tanpa mengalami dispersi dan merambat hanya ke arah aksial pressure bar.
5. Pengaruh misalignment diabaikan.
6. Pengaruh gesekan pada *pressure bar* diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat, yaitu:

1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian *butt adhesive joint* dengan *adherend* alumunium kotak berongga.
2. Sebagai dasar pengambilan keputusan untuk menentukan ketebalan *adhesive* pada *butt adhesive joint* dengan *adherend* alumunium kotak berongga berdasarkan kebutuhan pengguna.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Adhesive

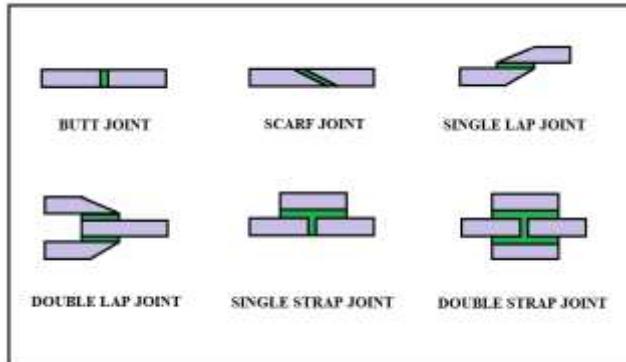
Adhesive atau perekat adalah zat yang digunakan untuk menggabungkan dua material sejenis atau berbeda, misalnya *epoxy-hardener*. Sambungan menggunakan *adhesive* menawarkan manfaat yang lebih signifikan daripada metode konvensional. Sebagai contohnya, *Adhesive* dapat mendistribusikan beban serta tegangan secara merata pada area ikatan dan dapat mengurangi biaya produksi dan perawatan. Selain itu, dapat memastikan isolasi listrik yang lebih baik, mengurangi korosi dan dapat mengurangi tingkat getaran pada rakitan dengan sekrup dan keling^[5]. Oleh karena itu, penggunaan *adhesive* telah diaplikasikan di bidang industri seperti otomotif.

Saat ini, *adhesive* dikembangkan untuk memperoleh kekakuan yang baik (*stiffness*). Sementara itu, campuran *adhesive* berkekuatan tinggi juga terus dikembangkan untuk memperpendek waktu *curing* (pengeringan). Kecepatan periode *curing* ini berbeda-beda tergantung dari persentasi katalis yang dipakai dan tergantung dari besarnya panas yang dipakai dalam periode *curing*^[6].

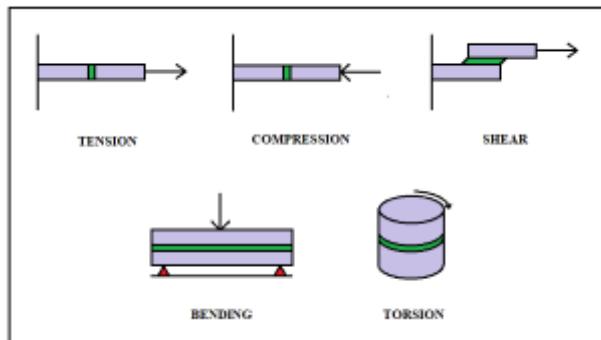
2.2 Adhesive Joint

Sambungan *adhesive* adalah proses penyatuan material di mana perekat ditempatkan di antara permukaan dari bagian yang disebut *adherend*^[7]. Dalam pengaplikasiannya sambungan yang menggunakan *adhesive* mempunyai beberapa macam jenis sambungan seperti *butt joint*, *lap joint*, *scarf joint* dan lain-lain. Adapun jenis sambungan lain yang dapat digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Jenis sambungan yang sering digunakan adalah sambungan tipe *butt* karena mudah dalam perakitannya dan mudah divariasian ketebalan *adhesive* yang akan digunakan^[1]. Pada sambungan *adhesive* juga terdapat berbagai gaya yang bekerja seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Jenis

gaya yang diberikan akan mempengaruhi tegangan (*stress*) yang dialami oleh sambungan tersebut.



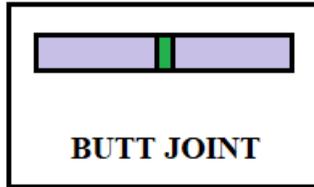
Gambar 2.1 *Adhesive Joint*



Gambar 2.2 Jenis Gaya Sambungan

2.3 Butt Joint

Butt joint adalah salah satu bentuk sambungan untuk menggabungkan dua material sejenis atau berbeda. Bentuk sambungan ini dimana dua material disatukan dengan cara menempatkan kedua ujung bersama tanpa bentuk khusus. Oleh sebab itu, *butt joint* merupakan bentuk sambungan yang paling sederhana.



Gambar 2.3 *Butt Joint*

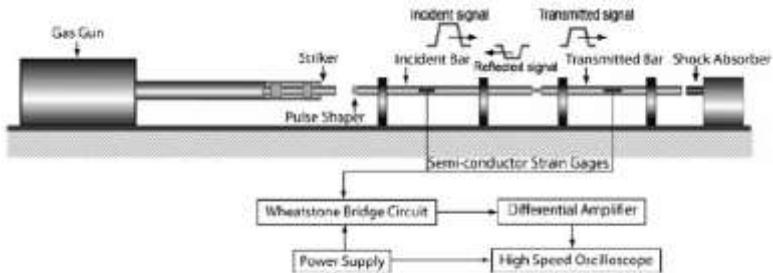
Pengaplikasian *butt joint* banyak digunakan pada material yang berbentuk persegi. Penggunaan *adhesive* pada *butt joint* harus dilakukan pengujian untuk mendapatkan kekuatan sambungan yang baik. Pada dasarnya, tegangan geser yang terjadi pada permukaan *butt joint* kecil. Tegangan geser yang besar terjadi pada lapisan *adhesive* ^[12].

Pada kasus sambungan *butt joint* terdapat variasi tegangan sepanjang ketebalan perekat. Pada *butt joint* terjadi singularitas tegangan di sudut antarmuka dan variasi tegangan melalui ketebalan perekat. Oleh sebab itu, validitas pendekatan konvensional terhadap evaluasi kekuatan sambungan perekat dipertanyakan ^[13].

2.4 Split Hopkinson Pressure Bar

Split Hopkinson Pressure Bar merupakan salah satu metode pengujian untuk mengetahui karakteristik material dengan mengukur perubahan sifat mekanik yang bervariasi seiring dengan laju regangan yang diberikan pada pembebanan dinamis. Pengujian dengan metode ini bertujuan untuk mendapatkan hubungan antara tegangan, regangan dan laju regangan yang mempengaruhi karakteristik material.

Pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* dilakukan dengan laju regangan yang tinggi ($\sim 2 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ hingga 10^4 s^{-1}) dan berdasarkan konsep gelombang tegangan satu dimensi. Pengujian ini dikatakan valid harus memenuhi dua kondisi yaitu keseimbangan gaya pada permukaan spesimen dan laju regangan yang sama ^[14].



Gambar 2.4 Skema *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB)
(George Sunny, 2008)

Pada umumnya, komponen utama terdiri dari *striker bar*, *incident bar*, *transmitter bar* dan *specimen*. *Striker bar*, *incident bar*, dan *transmitter bar* terbuat dari material yang sejenis dan mempunyai area penampang yang sama. Posisi *striker bar*, *incident bar*, *transmitter bar* dan *specimen* berada dalam garis lurus yang sama. Posisi *striker bar*, *incident bar*, *transmitter bar* dan *specimen* berada dalam garis lurus yang sama.

Selama pengujian *striker bar*, *incident bar*, dan *transmitter bar* harus dalam kondisi sifat elastis. Material yang akan diuji diletakkan diantara *incident bar* dan *transmitter bar*. *Striker bar* bergerak ke arah *incident bar* sehingga terjadi tumbukan. Tumbukan tersebut akan mengirimkan gelombang kompresi elastis (gelombang insiden) yang merambat pada *incident bar* ke material uji. Saat mencapai material uji, gelombang terpantul kembali karena adanya penolakan antara *bar* dan material uji. Sebagian gelombang melewati *transmitter bar*. Kedua gelombang tersebut direkam oleh *strain gauge* yang dipasang pada *incident bar* dan *transmitter bar*. *Strain gauge* diletakkan ditengah kedua bar sehingga gelombang insiden dan gelombang pantulan tidak tumpang tindih. *Wheatstone bridge* dipasang untuk mengukur perubahan resistensi dan mengubah gelombang regangan menjadi sinyal regangan yang ditampilkan pada osiloskop. Hasil dari

pengujian ini berupa plot regangan terhadap waktu yang dapat digunakan untuk membuat kurva tegangan-regangan material uji.

2.4.1 Cepat Rambat Gelombang Elastis (*Elastic Wave Speed*) Dan Impedansi Material

Cepat rambat gelombang adalah jarak yang ditempuh oleh gelombang setiap satu-satuan waktu. Cepat rambat gelombang material pada kondisi elastis dinamakan cepat rambat gelombang elastis. Cepat rambat gelombang elastis pada setiap material tidak sama. Gelombang elastis dapat terjadi karena adanya energi kinetik yang merambat dari satu partikel ke partikel lain sehingga mengalami regangan. Semakin erat ikatan partikel pada material maka semakin cepat energi kinetik merambat dan partikel tersebut lebih mudah bergerak. Kecepatan gelombang elastis pada material dipengaruhi oleh sifat elastis material dan kerapatan material. Oleh karena itu, kecepatan gelombang elastis pada material dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2. 1)$$

Dimana :

C_o = Kecepatan Gelombang Elastis (m/s)

E = Modulus Elastisitas atau Modulus Young (N/m²)

ρ = Kerapatan Material atau *Density* (Kg/m³)

Impedansi material adalah hambatan yang terjadi ketika gelombang merambat pada suatu material. Nilai impedansi dipengaruhi oleh kerapatan material dan cepat rambat gelombang elastis material. Impedansi ini menentukan berapa banyak gelombang yang ditransmisikan dan dipantulkan. Semakin besar perbedaan impedansi antara kedua materia maka semakin besar jumlah energi yang dipantulkan. Impedansi dapat disebut perbandingan gaya yang diberikan dengan kecepatan partikel yang

ada. Oleh karena itu, impedansi material dapat dirumuskan sebagai berikut

$$Z = \frac{F}{v} = - \frac{A \cdot E}{C_o} \quad (2. 2)$$

Dimana $E = \rho \cdot C_o^2$ dari persamaan (2.1),

$$Z = \frac{F}{v} = A \cdot \rho \cdot C_o \quad (2. 3)$$

Dimana :

Z = Impedansi Material (kg/s)

F = Gaya Yang Diberikan (N)

v = Kecepatan Partikel (m/s)

A = Luas Permukaan (m²)

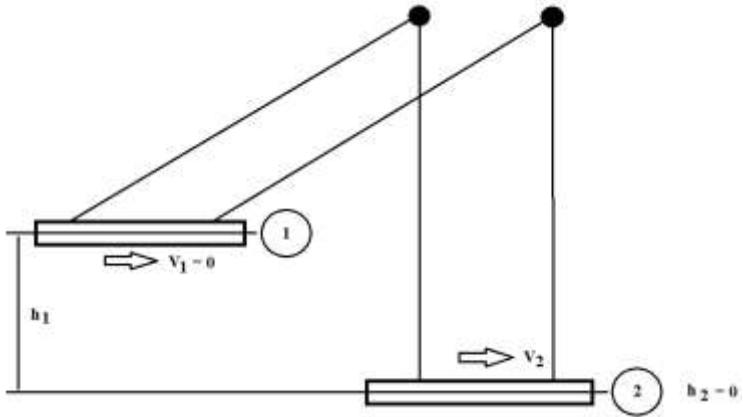
E = Modulus Elastisitas (N/ m²)

C_o = Cepat Rambat Gelombang (m/s)

ρ = Kerapatan Material atau *Density* (kg/m³)

2.4.2 Kecepatan Setelah Tumbukan Antara *Striker Bar* Dan *Incident Bar*

Pembebanan dinamis dalam pengujian Split Hopkinson Pressure Bar dapat menggunakan metode impak. *Striker bar* dengan kecepatan tertentu akan menumbuk *incident bar* sehingga *incident bar* bergerak dengan kecepatan yang diakibatkan tumbukan. Kecepatan *striker bar* ketika menumbuk *incident bar* dapat dirumuskan berdasarkan prinsip energi mekanik sebagai berikut :



Gambar 2. 5 Pendulum *Striker Bar*

$$E_{m1} = E_{m2} \quad (2.4)$$

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2} \quad (2.5)$$

$$m \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = m \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 \quad (2.6)$$

dimana $v_1 = 0$ m/s dan $h_2 = 0$ m,

$$m \cdot g \cdot h_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 \quad (2.7)$$

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \quad (2.8)$$

Dimana :

$E_{m1,2}$ = Energi Mekanik Kondisi 1 dan 2 (J)

$E_{p1,2}$ = Energi Potensial Kondisi 1 dan 2 (J)

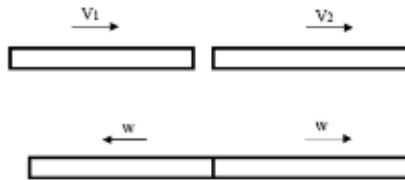
$E_{k1,2}$ = Energi Kinetik Kondisi 1 dan 2 (J)

m = Massa *Striker Bar* (kg)

g = Percepatan Gravitasi (m/s^2)

$h_{1,2}$ = Ketinggian Striker Bar Kondisi 1 dan 2 (m)
 $v_{1,2}$ = Kecepatan Striker Bar Kondisi 1 dan 2 (m/s)

Ketika terjadi tumbukan antara *striker bar* dan *incident bar*, partikel pada kedua bar tersebut mengalami regangan dengan kecepatan tertentu dan akan kembali ke posisi semula. Kecepatan partikel pada kedua bar dapat diketahui berdasarkan prinsip momentum sebagai berikut :



Gambar 2. 6 Tumbukan *Striker Bar* dan *Incident Bar* (Sharma, S., 2011)

$$m \cdot v_1 + m \cdot v_1' = m \cdot v_2 + m \cdot v_2' \quad (2. 9)$$

dimana kedua bar terbuat dari material yang sama sehingga massa partikel kedua bar bernilai sama sebesar m dan kecepatan partikel kedua bar yang bergerak setelah terjadi tumbukan bernilai sama sebesar w . Kecepatan v_1 = kecepatan striker bar kondisi ke-2 (v_{sb}) dan kecepatan $v_2 = 0$.

$$v_1 - w = v_2 + w \quad (2. 10)$$

$$w = \frac{v_{sb} - v_2}{2} \quad (2. 11)$$

$$w = \frac{v_{sb}}{2} \quad (2. 12)$$

Dimana :

- m = Massa Partikel *Incident Bar* dan *Striker Bar* (kg)
- v_1 = Kecepatan Partikel *Striker Bar* Saat Tumbukan (m/s)
- v_1' = Kecepatan Partikel *Striker Bar* Setelah Tumbukan (m/s)
- v_2 = Kecepatan Partikel *Striker Bar* Saat Tumbukan (m/s)
- v_2' = Kecepatan Partikel *Striker Bar* Setelah Tumbukan (m/s)

2.4.3 Perambatan Gelombang Setelah Tumbukan *Striker Bar* Dan *Incident Bar*

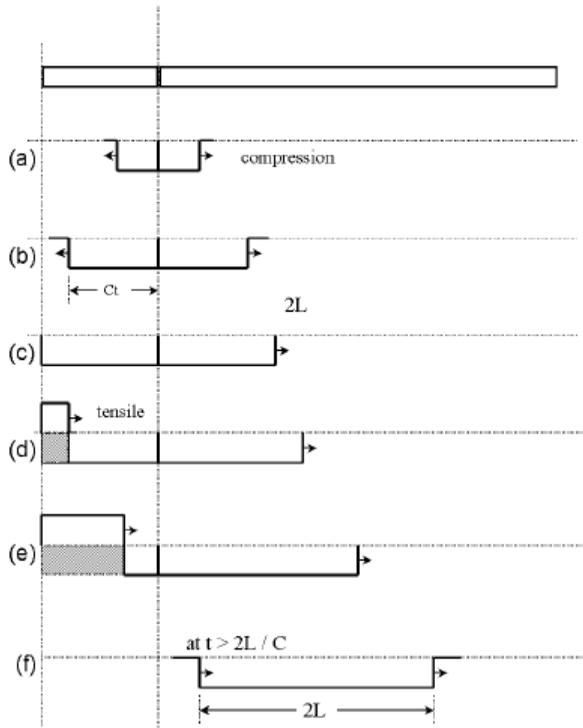
Tumbukan antara *incident bar* dan *striker bar* menghasilkan gelombang kompresi pada kedua bar. Skema dari gelombang kompresi pada kedua bar seperti gambar 2.7. Gelombang kompresi merambat pada kedua bar dari antarmuka dengan kecepatan C_0 dan gelombang kompresi mencapai ujung kiri *striker bar* menghasilkan gelombang *reflected*. Saat gelombang *reflected* merambat sampai antarmuka kedua bar, *striker bar* terpisah dari *incident bar* dan gelombang kompresi berhenti bertambah panjang. Panjang gelombang kompresi yang dihasilkan dengan demikian dua kali panjang *striker bar* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Panjang Gelombang Kompresi} = 2 \cdot L_{sb} \quad (2.13)$$

$$t = \frac{\text{Panjang Gelombang Kompresi}}{C_{sb}} \quad (2.14)$$

Dimana :

- L_{sb} = Panjang *Striker Bar* (m)
- C_{sb} = Cepat Rambat Gelombang Elastis *Striker bar* (m/s)
- t = Durasi Gelombang Kompresi (s)



Gambar 2. 7 Skema Gelombang Kompresi Akibat Tumbukan *Striker Bar* dan *Incident Bar* (Sharma, S., 2011)

2.4.4 Regangan (Strain) Pada *Incident Bar* Akibat Pembebanan

Gelombang kompresi yang terjadi akibat tumbukan menghasilkan regangan elastis pada *incident bar* seperti gambar 2.8. Saat $t = 0$, tidak terjadi regangan pada *incident bar*. Saat $t = t$, terjadi regangan sepanjang cepat rambat gelombang terhadap waktu. Sehingga regangan elastis yang terjadi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{-u}{C_{inc} \cdot t} = \frac{-w}{C_{inc}} \quad (2.15)$$

Dimana $w = v_{sb} / 2$ dari persamaan (2.12),

$$\varepsilon_i = \frac{-v_{sb}}{2 \cdot C_{inc}} \quad (2.16)$$

Sehingga dapat diketahui juga kecepatan dari striker bar, yaitu :

$$v_{sb} = -2 \cdot C_{inc} \cdot \varepsilon_i \quad (2.17)$$

Dimana :

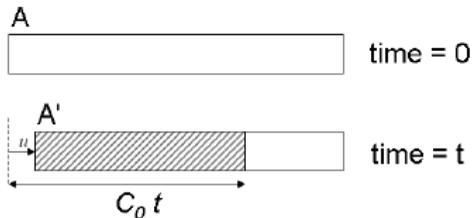
ε = Regangan

u = Perpindahan Partikel (m)

t = Waktu Perpindahan Partikel (s)

ε_i = Regangan Pada *Incident Bar*

C_{inc} = Cepat Rambat Gelombang Pada *Incident Bar* (m/s)

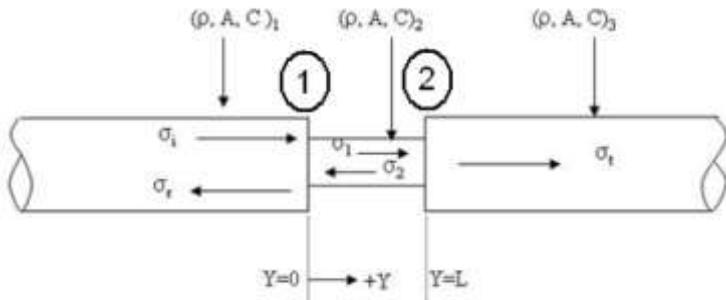


Gambar 2. 8 Skema Perpindahan Partikel Pada *Incident Bar*
(Sharma, S., 2011)

2.4.5 Hubungan Perubahan Luas Permukaan Dengan Impedansi

Pada pengujian dengan menggunakan alat uji Split Hopkinson Pressure Bar sering mengalami diskontinuitas.

Diskontinuitas adalah ketidaksinambungan atau perubahan dalam luas permukaan dan sifat material. Dalam pengujian ini, perhitungan yang dilakukan harus memerhatikan faktor impedansi material. C_o dan ρ merupakan konstanta material yang konstan. Pada setiap material perubahan impedansi hanya dapat terjadi dengan mengubah luas permukaan. Diskontinuitas terjadi pada antarmuka *bar* dan spesimen seperti gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Perbedaan Luas Permukaan *Bar* dan Spesimen (Sharma, S., 2011)

Variabel ρ , A and C adalah kerapatan, luas permukaan, dan cepat rambat pada material. Pada antarmuka 1 ($Y=0$), gelombang σ_i dipantulkan dan ditransmisikan sebagai σ_r dan σ_1 . Pada antarmuka 2 ($Y=L$), gelombang σ_1 dipantulkan dan ditransmisikan sebagai σ_2 dan σ_t . Tingkat pantulan dan transmisi tergantung pada ketidakcocokan impedansi pada setiap permukaan. Pada *bar* dan spesimen memiliki kecepatan yang sama karena antarmuka 1 dan 2 dalam keadaan kontak setiap saat. Gaya yang terjadi pada antarmuka 1 dan 2 harus menyeimbangkan satu sama lain untuk memenuhi kesetimbangan. Persamaan pada antarmuka 1 dan 2 ditunjukkan dibawah ini.

- ❖ Antarmuka 1 ($Y=0$)
 - ❖ Kontinuitas Kecepatan ($v = \sigma / \rho C_o$) dari persamaan (2.2)

$$\frac{\sigma_i - \sigma_r}{(\rho \cdot Co)_1} = \frac{\sigma_1}{(\rho \cdot Co)_2} \quad (2.18)$$

Dimana $\sigma_{i,r,1}$ terjadi pada antarmuka 1 dan $(\rho \cdot C)$ untuk material 1 dan 2.

❖ Kesetimbangan Gaya

$$A_o (\sigma_i + \sigma_r) = A_{s1} (\sigma_{s1}) \quad (2.19)$$

❖ Antarmuka 2 (Y=L)

❖ Kontinuitas Kecepatan ($v = \sigma / \rho Co$) dari persamaan (2.2)

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{(\rho \cdot Co)_2} = \frac{\sigma_t}{(\rho \cdot Co)_3} \quad (2.20)$$

Dimana $\sigma_{1,2,t}$ terjadi pada antarmuka 1 dan $(\rho \cdot Co)$ untuk material 2 dan 3.

❖ Kesetimbangan Gaya

$$A_{s2} (\sigma_2 + \sigma_1) = A_o (\sigma_t) \quad (2.21)$$

2.4.6 Tegangan (Stress) dan Regangan (Strain) Pada Spesimen

Kecepatan partikel yang terjadi mempengaruhi laju regangan dan regangan.. Kecepatan partikel pada antarmuka 1 (*incident bar* dan spesimen) adalah penjumlahan kecepatan partikel yang disebabkan oleh gelombang *incident* dan gelombang *reflected*. Sedangkan kecepatan partikel pada antarmuka 2 (spesimen dan *transmitter bar*) adalah kecepatan partikel yang

disebabkan oleh gelombang transmitted. Berikut ini adalah persamaan kecepatan partikel pada antarmuka 1.

$$v_{s1} = v_i + v_r \quad (2. 22)$$

Dimana $v_i = - C_o \cdot \varepsilon_i$ dan $v_r = C_o \cdot \varepsilon_r$, maka

$$v_{s1} = - C_o (\varepsilon_i - \varepsilon_r) \quad (2. 23)$$

Sedangkan kecepatan partikel pada antarmuka 2 yaitu,

$$v_{s2} = - C_o (\varepsilon_t) \quad (2. 24)$$

Laju regangan spesimen adalah kecepatan partikel pada spesimen terhadap panjang spesimen, maka dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{(v_{s1} - v_{s2})}{L_s} \quad (2. 25)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{- C_o (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)}{L_s} \quad (2. 26)$$

Dimana :

- $\dot{\varepsilon}_s$ = Laju Ragangan Spesimen (s^{-1})
- v_{s1} = Kecepatan Partikel Pada Antarmuka 1 (m/s)
- v_{s2} = Kecepatan Partikel Pada Antarmuka 1 (m/s)
- ε_i = Regangan *Incident*
- ε_r = Regangan *Reflected*
- ε_t = Regangan *Transmitted*
- L_s = Panjang Spesimen (m)
- C_o = Cepat Rambat Gelombang (m/s)

Pada spesimen terjadi beberapa perambatan gelombang yang diakibatkan oleh pembebanan. Antarmuka antara *bar* dan spesimen setiap saat mengalami kontak sehingga belaku kesetimbangan gaya saat diberikan pembebanan. Kesetimbangan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s2} \quad (2. 27)$$

Dari persamaan (2.18) dan (2.21) didapatkan nilai σ_{s1} dan σ_{s2} , yaitu :

$$(\sigma_{s1}) = \frac{A_o (\sigma_i + \sigma_r)}{A_{s1}} \quad (2. 28)$$

$$(\sigma_{s2}) = \frac{A_o (\sigma_t)}{A_{s2}} \quad (2. 29)$$

Dimana A_{s1} dan A_{s2} adalah sama, sehingga persamaan gelombang tegangan didapatkan yaitu :

$$\sigma_i + \sigma_r = \sigma_t \quad (2. 30)$$

Berdasarkan persamaan $\sigma = E \cdot \varepsilon$, sehingga gelombang regangan didapatkan yaitu :

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t \quad (2. 31)$$

Dari persamaan (2.29) dan $\sigma = E \cdot \varepsilon$, dimana tegangan (stress) pada spesimen yaitu

$$\sigma_s = \sigma_{s1} = \sigma_{s2} \quad (2. 32)$$

$$\sigma_s = \sigma_{s1} = \frac{A_o \cdot E \cdot (\varepsilon_i + \varepsilon_r)}{A_s} \quad (2. 33)$$

$$\sigma_s = \sigma_{s2} = \frac{A_o \cdot E \cdot \varepsilon_t}{A_s} \quad (2.34)$$

Dari persamaan (2.33) dan (2.34) dapat diketahui gaya yang terjadi, yaitu

$$P_{s1} = A_o \cdot E \cdot [\varepsilon_I + \varepsilon_R] \quad (2.35)$$

$$P_{s2} = A_o \cdot E \cdot [\varepsilon_T] \quad (2.36)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.31) pada persamaan (2.26) maka persamaan laju regangan dapat disederhanakan, yaitu :

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{2 \cdot C_o (\varepsilon_r)}{L_s} \quad (2.37)$$

Regangan yang terjadi pada setiap waktu t dapat diketahui dengan mengintegrasikan laju regangan terhadap waktu dari 0 ke t , yaitu :

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot C_o}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (2.38)$$

Dimana :

- σ_s = Tegangan Spesimen (N/m^2)
- σ_{s1} = Tegangan Spesimen Ditinjau Dari Antarmuka 1 (N/m^2)
- σ_{s2} = Tegangan Spesimen Ditinjau Dari Antarmuka 2 (N/m^2)
- P_{s1} = Gaya Antarmuka 1 (N)
- P_{s2} = Gaya Antarmuka 2 (N)
- σ_i = Tegangan Spesimen Gelombang *Incident* (N/m^2)
- σ_r = Tegangan Spesimen Gelombang *Reflected* (N/m^2)
- σ_t = Tegangan Spesimen Gelombang *Transmitted* (N/m^2)
- ε_i = Regangan Spesimen Gelombang *Incident*
- ε_r = Regangan Spesimen Gelombang *Reflected*

- ε_t = Regangan Spesimen Gelombang *Transmitted*
- C_o = Cepat Rambat Gelombang (m/s)
- L_s = Panjang Spesimen (m)
- A_o = Luas Permukaan *Bar* (m²)
- A_s = Luas Permukaan Spesimen (m²)

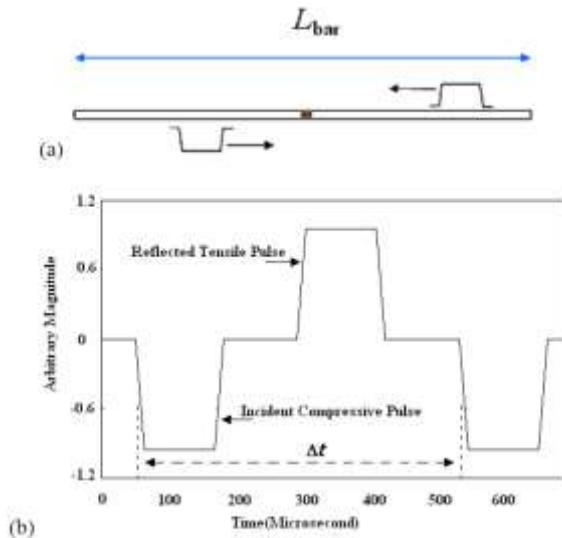
2.4.7 Kalibrasi Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar

Kalibrasi dari pengujian menggunakan alat uji Split Hopkinson Pressure Bar dilakukan dengan cara memastikan nilai cepat rambat gelombang elastis yang terjadi sesuai dengan material *bar* yang digunakan. Ketika *striker bar* menumbuk *incident bar*, gelombang kompresi akan merambat sepanjang *incident bar* dan akan terpantul kembali saat mencapai ujung lain *bar*. Gelombang kompresi yang dihasilkan pada *incident bar* saat pengujian ditunjukkan pada gambar 2.10 (a). Interval waktu antara dimulainya gelombang kompresi dan gelombang kompresi pantulan ditunjukkan pada gambar 2.10 (b). Oleh karena itu, nilai cepat rambat gelombang elastis dapat diketahui berdasarkan durasi interval waktu dan panjang *incident bar* sebagai berikut :

$$C_o = \frac{2 \cdot L}{\Delta t} \quad (2.39)$$

Dimana :

- C_o = Cepat Rambat Gelombang Elastis (m/s)
- L = Panjang Incident Bar (m)
- Δt = Interval Waktu (s)



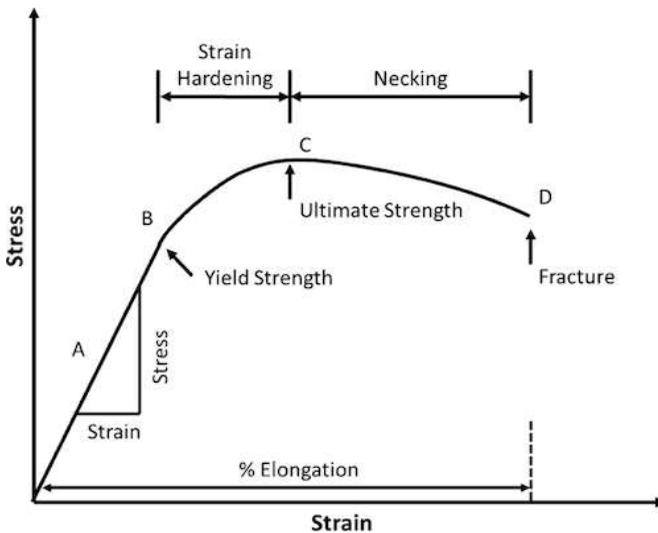
Gambar 2. 10 (a) Gelombang *incident* Dan *reflected* Pada *Incident Bar*. (b) Interval Waktu Untuk Mengukur Cepat Rambat Gelombang. (Sharma, S., 2011)

2.5 Kurva Tegangan-Regangan

Kurva tegangan-regangan merupakan grafik pengukuran yang penting dari sifat mekanik material. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, tegangan yang didapatkan akan di plot seiring dengan regangan yang terjadi. Kurva tegangan-regangan setiap material mempunyai bentuk yang berbeda. Bentuk setiap kurva di pengaruhi oleh struktur dari material.^[15]

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

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



Gambar 2.11 Kurva Tegangan-Regangan

2.6 Kekakuan (Stiffness)

Kekakuan adalah kemampuan suatu material untuk menerima tegangan atau beban tanpa menyebabkan terjadinya deformasi atau defleksi. Modulus elastisitas material tidaklah sama dengan kekakuan material. Kekakuan adalah sifat struktural, yang dipengaruhi oleh geometri spesimen serta bahan yang dikandungnya. Modulus Young adalah properti material atau kandungan pada material dan tidak dipengaruhi oleh geometri

spesimen. Nilai kekakuan pada pembebanan tarik atau tekan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$k = E \cdot \frac{A}{L} \quad (2.40)$$

Dimana :

- k = Kekakuan / Stiffness (N/m)
- E = Modulus Elastisitas (N/m²)
- A = Luas Penampang Material (m²)
- L = Panjang Material (m)

2.7 Modulus Elastisitas (Modulus Young)

Modulus elastisitas dapat disebut juga modulus elastisitas atau modulus tarik. Modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan suatu material. Modulus elastisitas dapat didefinisikan sebagai rasio tegangan terhadap regangan seperti gambar 2.6. Dalam kurva tegangan terhadap regangan digambarkan sebagai gradien dari bagian linear pada awal kurva. Modulus ini diperlukan dalam perhitungan kekakuan batang dan struktur yang lain yang akan digunakan saat aplikasi. Oleh karena itu, modulus young merupakan besaran penting dalam bidang teknik. Nilai modulus young dirumuskan sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.41)$$

Dimana :

- E = Modulus Elastisitas (N/m²)
- σ = Tegangan (N/m²)
- ε = Regangan

Modulus Young ditentukan oleh gaya ikatan antar atom. Ikatan atom ini tidak dapat diubah tanpa terjadinya perubahan mendasar dari sifat materialnya. Modulus young hanya dapat berubah dalam jumlah tertentu oleh perlakuan panas, atau

pengerjaan dingin, atau penambahan paduan tertentu. Modulus Young umumnya diukur dengan metode dinamik.

2.8 Penyerapan Energi (Energy Absorption)

Setiap material mempunyai kemampuan untuk menyerap energi dari luar akibat terjadinya kerusakan. Penyerapan energi ini merupakan area di bawah kurva tegangan-regangan dan sangat tergantung pada kekuatan tarik atau tekan suatu material. Jumlah energi yang diserap oleh spesimen diperoleh dengan mengevaluasi integral dari kurva tegangan dan regangan. Penyerapan energi oleh material dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$W = \int_0^t \sigma_{(\varepsilon)} d\varepsilon \quad (2.42)$$

Dimana :

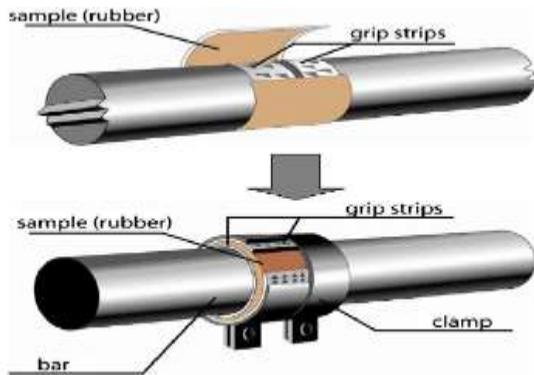
W = Penyerapan Energi (J)

σ = Tegangan (N/m²)

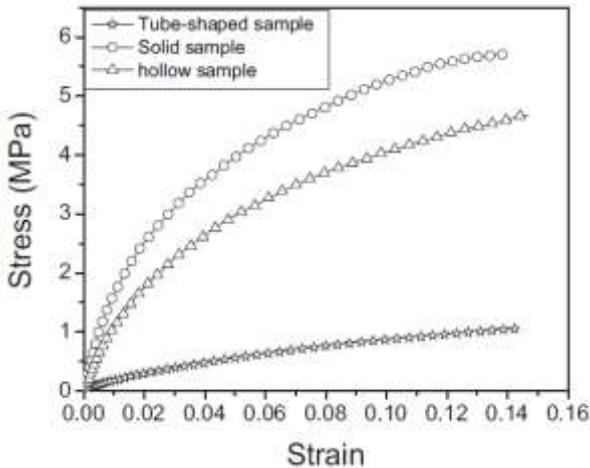
ε = Regangan

2.9 Penelitian Terdahulu

X. Nie, B. Song dan W.W. Chen pada tahun 2008 meneliti karakteristik dinamik soft material terbuat dari *ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) rubber*. Spesimen yang berbentuk *solid*, *hollow* dan *wrapped* diuji dengan *SHPB*. Spesimen dipasang di antara *incident bar* dan *transmitted bar* berdiameter sebesar 12.7 mm. Spesimen dijepit pada pressure bar seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12, agar berdeformasi seragam dan mencegah slip sehingga didapatkan data eksperimental yang valid. Pada hasil penelitian ini, tegangan spesimen *hollow* lebih kecil daripada spesimen *solid* pada *strain rate* sebesar 1000 s⁻¹ yang ditunjukkan pada gambar 2.13 sehingga nilai kekakuan spesimen *hollow* akan lebih kecil daripada spesimen *solid*.



Gambar 2.12 Ilustrasi Pemasangan Spesimen (X. Nie, 2008)



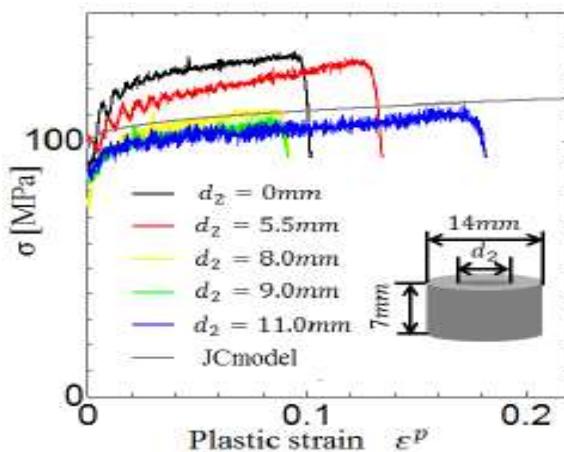
Gambar 2.13 Grafik *Stress-Strain* Pada *Solid*, *Hollow* Dan *Wrapped* Spesimen (X. Nie, 2008)

Penelitian kedua dilakukan oleh Nobuhiko Kii, Takeshi Iwamoto, Alexis Rusinek, dan Tomasz Jankowiak pada 2014 berjudul *A Study on Reduction of Friction in Impact Compressive Test Based on The Split Hopkinson Pressure Bar Method by Using a Hollow Specimen*. Penelitian melakukan pengujian *Split*

Hopkinson Pressure Bar. Dimensi spesimen silinder adalah diameter sebesar 14 mm dan panjang sebesar 7 mm. Selain geometri spesimen silinder pejal, uji dampak dilakukan untuk berbagai ukuran spesimen berongga. Tabel 2.1 menunjukkan geometri spesimen berongga. Pada Tabel 2.1, d_1 dan d_2 masing-masing menunjukkan diameter luar dan dalam. Pada penelitian ini berdasarkan metode SHPB menggunakan spesimen berongga dengan ketebalan yang cukup tipis dilakukan, penurunan tingkat stres yang berlebihan dapat diamati seperti gambar 2.14.

Tabel 2. 1 Geometri Spesimen Berongga

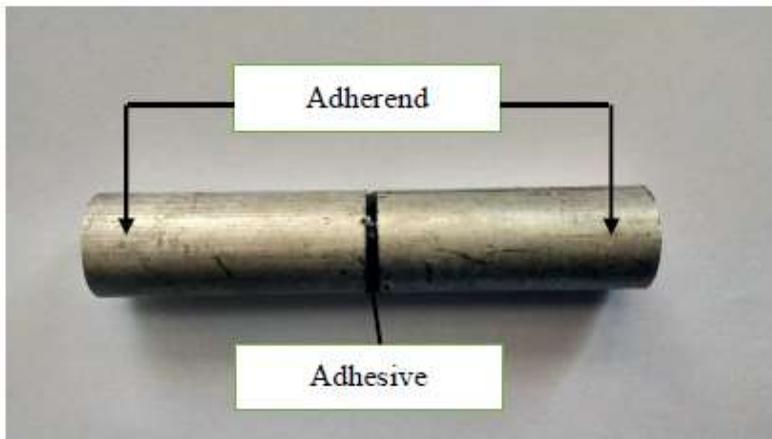
h [mm]	7	7	7	7	7
d_1 [mm]	14	14	14	14	14
d_2 [mm]	0	5.5	8	9	11



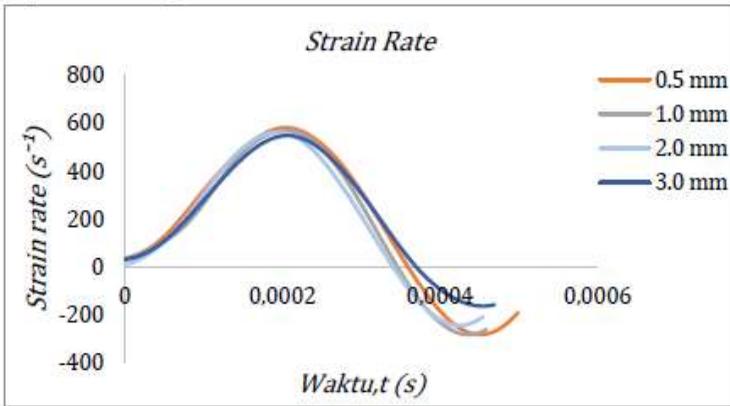
Gambar 2.14 Grafik Stress-Strain Pada Spesimen Berongga (Nobuhiko Kii, 2014)

Penelitian ketiga dilakukan oleh Yohanes, Agus S. Pramono, dan Adib B. Hudayya pada tahun 2019 berjudul *Non-monotonous Effect of Adhesive Thickness on The Dynamic Stiffness of Adhesive Butt Joint*. Penelitian melakukan pengujian *Split*

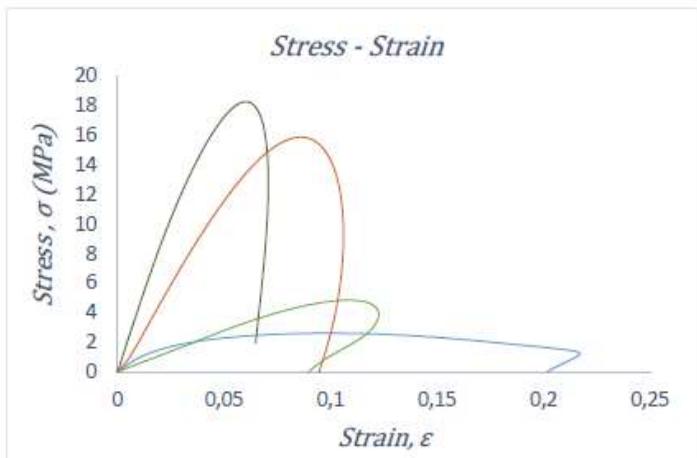
Hopkinson Pressure Bar untuk mengetahui nilai kekakuan *adhesive* dari sambungan tipe *butt*. Spesimen yang digunakan berbentuk silindris padat dengan diameter 20 mm dan panjang 50 mm. Spesimen terbuat dari material aluminium 6061. Spesimen yang disambungkan dengan *adhesive* yang terdiri dari *epoxy* dan *hardener* seperti gambar 2.15. Pengujian dilakukan dengan variasi ketebalan sebesar 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm dan 3.0 mm. Dari masing-masing variasi tersebut, dilakukan pengambilan data sebanyak 5 kali. Data hasil pengujian dengan metode SHPB dikatakan valid jika dilakukan pada *strain rate* yang konsisten seperti gambar 2.16. Grafik stress-strain yang diperoleh pada setiap variasi ketebalan berbeda beda seperti gambar 2.17. Pada penelitian ini diperoleh kekakuan *adhesive* maksimum pada ketebalan 2 mm sebesar 450 Mpa seperti gambar 2.18.



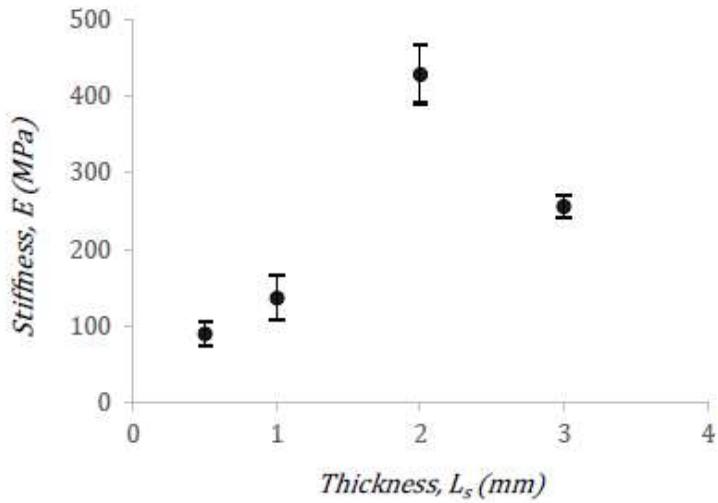
Gambar 2.15 Sambungan Adherend Dengan Adhesive (Yohanes, 2019)



Gambar 2.16 Pengujian Pada Strain Rate $600 \pm 50 \text{ s}^{-1}$ (Yohanes, 2019)



Gambar 2.17 Grafik Stress-Strain (Yohanes, 2019)

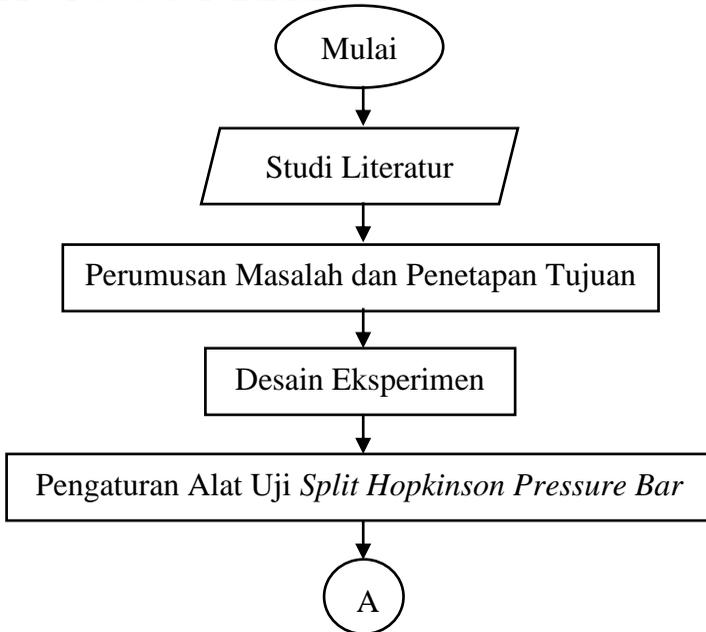


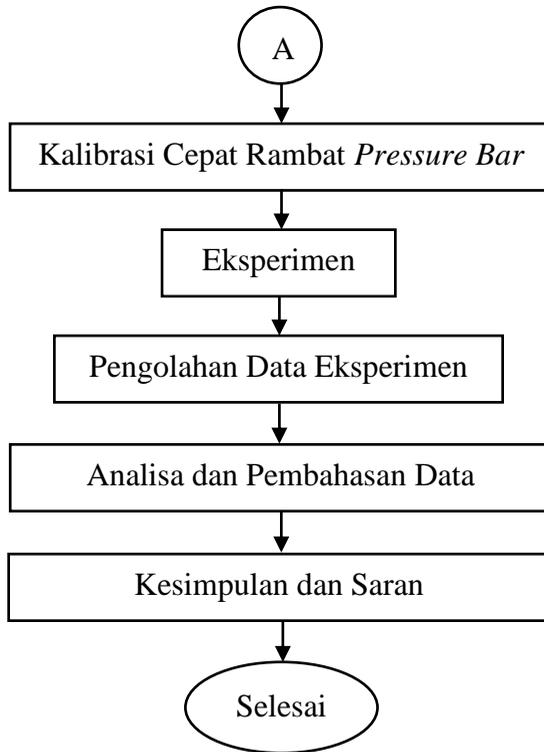
Gambar 2.18 Grafik Pengaruh Ketebalan *Adhesive* Terhadap Nilai Kekakuan Sambungan (Yohanes, 2019)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh karakteristik ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan *butt adhesive joint* untuk penampang *adherend* aluminium kotak berongga. Untuk mengetahui hal tersebut diperlukan respon tegangan-regangan *butt adhesive joint*. Oleh sebab itu, penelitian ini menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* dengan beban pada laju regangan tinggi. Setelah mendapatkan kurva tegangan-regangan, nilai modulus elastisitas akan didapatkan dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan. Data nilai modulus elastisitas dilakukan uji *paired t-test* untuk mengetahui pengaruh serta deviasi yang terjadi dari variasi ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan *butt adhesive joint*.

4.2.1 Flowchart Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian *butt adhesive joint* dilakukan sesuai dengan metode ilmiah yang dijabarkan dalam *flowchart* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1. Hal pertama yang dilakukan adalah studi literatur yang terkait dengan penelitian ini seperti *adhesive*, *adhesive joint*, *Split Hopkinson Pressure Bar* dan *data processing* MATLAB. Studi literatur dilakukan dengan membaca buku teks, jurnal ilmiah, dan penelitian terdahulu. Studi literatur ini bertujuan sebagai dasar teori dan untuk memperoleh hipotesa sehingga dapat menentukan rumusan masalah serta tujuan dalam penelitian.

Kedua, rumusan masalah dan tujuan ditentukan berdasarkan hipotesa yang diperoleh dari studi literatur. Rumusan

masalah penelitian adalah mengenai bagaimana mendapatkan nilai modulus elastisitas pada *butt adhesive joint* dari kurva tegangan-regangan dan mencari pengaruh ketebalan *adhesive* terhadap nilai modulus elastisitas pada *butt adhesive joint*. Sedangkan tujuan penelitian adalah memperoleh pola/tren nilai modulus elastisitas *butt adhesive joint* pada rentang ketebalan *adhesive* yang diuji sehingga dapat digunakan sebagai acuan ketebalan *adhesive* yang digunakan dan dapat meminimalkan biaya pengaplikasian *adhesive joint*.

Ketiga, desain eksperimen dilakukan sehingga eksperimen dilakukan dengan baik. Eksperimen ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan *butt adhesive joint*. Sambungan *adhesive* terdiri dari *adherend* dan *adhesive*. *Adherend* yang digunakan adalah alumunium kotak berongga yang berukuran 1.6 mm x 1.6 mm dengan ketebalan 0.8 mm, sedangkan *adhesive* yang digunakan terdiri dari *epoxy* dan *hardener*. Komposisi *epoxy* dan *hardener* yang digunakan adalah 1 : 1. Ketebalan *adhesive* akan divariasikan pada rentang ketebalan sebesar 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, dan 2.5 mm. Sambungan *adhesive* akan diuji menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* untuk memperoleh gelombang regangan *adhesive joint*. Gelombang tersebut akan diolah menjadi kurva tegangan-regangan menggunakan *data processing* MATLAB. Data yang diinginkan pada eksperimen ini adalah nilai modulus elastisitas. Nilai modulus elastisitas akan diperoleh dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan *adhesive joint*. Nilai modulus elastisitas tersebut akan mempresentasikan nilai kekakuan *adhesive joint*. Untuk memastikan kebenaran data yang diperoleh dan mengetahui pengaruh ketebalan *adhesive*, maka akan dilakukan uji *paired t-test*.

Keempat, pengaturan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* terdiri beberapa tahapan yaitu mengatur posisi *striker bar*, *incident bar*, spesimen, dan *transmitter bar*. Ketinggian *striker bar* diatur sebelum melakukan tumbukan. Hal tersebut dilakukan agar

mendapatkan hasil pengukuran eksperimen dalam kondisi yang baik.

Kelima, kalibrasi alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* dilakukan dengan cara melakukan pengujian tanpa adanya spesimen dan melakukan pemeriksaan terhadap *misalignment* antara *incident bar* dan *transmitter bar*. Pengujian tanpa spesimen dilakukan untuk memastikan cepat rambat gelombang yang terjadi sama atau mendekati dengan cepat rambat gelombang aluminium yaitu 5100 m/s. Sedangkan, pemeriksaan *misalignment* tersebut dilakukan agar meminimalkan perubahan bentuk gelombang *reflected* dan gelombang *transmitted*.

Keenam, eksperimen dilakukan sesuai dengan tahapan yang dijabarkan pada *flowchart* seperti gambar 3.11. Eksperimen ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu pembuatan spesimen, menyalakan *dynamic strain meter* dan *PC*, mengatur posisi *striker bar*, *incident bar*, spesimen, dan *transmitter bar*, melakukan *balance* terhadap *dynamic strain meter*, dan pengambilan data pengujian.

Ketujuh, pengolahan data eksperimen dilakukan menggunakan *software* MATLAB dengan cara memasukkan *coding* rumus sehingga mendapatkan grafik yaitu laju regangan terhadap waktu dan tegangan terhadap waktu. Setelah itu, nilai modulus elastisitas akan didapatkan dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan.

Keenam, analisa dan pembahasan hasil pengolahan data akan dilakukan uji *paired t-test* yang bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan sambungan *butt adhesive joint* dengan penampang *adherend* aluminium kotak berongga. Pembahasan dan analisa data tersebut akan digunakan sebagai acuan dalam menarik kesimpulan. Terakhir, kesimpulan dan saran dilakukan yang bertujuan untuk memaparkan poin penting dari analisa dan pembahasan hasil eksperimen serta saran untuk penelitian selanjutnya agar didapatkan hasil yang lebih baik.

4.2.2 Desain Eksperimen

Sebelum dilakukan eksperimen, penyusunan desain eksperimen dilakukan dalam penelitian ini. Desain eksperimen dilakukan dengan menentukan variabel independen dan variabel dependen. Selain itu, pada hasil eksperimen dilakukan uji statistik yaitu uji *paired t-test*. Hal tersebut dilakukan bertujuan dapat mencapai tujuan penelitian.

3.2.1 Variabel Independen

Variabel independen atau variabel bebas merupakan variabel yang nilainya tidak tergantung pada variabel lain. Besar nilai variabel ini dapat ditentukan secara bebas tergantung kebutuhan yang diinginkan. Pada penelitian ini, variabel independen terdiri dari faktor control dan *noise*.

a. Faktor Kontrol

Faktor kontrol adalah faktor dengan nilai yang dapat ditentukan dan dikendalikan oleh penguji. Faktor kontrol pada penelitian ini adalah ketebalan dari *adhesive*. Pada penelitian ini, variasi ketebalahn *adhesive* adalah 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.5 mm, dan 2.5 mm dengan komposisi rasio *epoxy – hardener* konstan sebesar 1 : 1. Pemilihan rasio *epoxy-hardener* ini merupakan rasio pencampuran yang dianjurkan oleh spesifikasi pabrik dan yang ideal karena memiliki nilai kekauan dan strain maksimal yang cukup baik berdasarkan data eksperimen. Setiap variasi ketebalan dilakukan pengambilan data lima kali.

b. Faktor Noise

Faktor *noise* adalah faktor pengganggu di mana nilainya tidak dapat dikendalikan oleh peneliti. Faktor *noise* pada penelitian ini adalah gesekan pada *pressure bar*. Namun, dalam penelitian ini faktor gesekan pada *pressure bar* diabaikan.

3.2.2 Variabel Dependen

Variabel dependen atau terikat adalah variabel yang keberadaannya menjadi suatu akibat dikarenakan adanya variabel bebas. Disebut variabel terkait karena kondisi atau variasinya terkait dan dipengaruhi oleh variasi variabel lain. Variabel ini disebut juga variabel *output*. Pada penelitian ini, variabel dependen yang diukur dan dibandingkan adalah nilai modulus elastisitas sambungan *adhesive* dan energi redaman pada sambungan *adhesive*. Hasil dari eksperimen ini akan dijabarkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Hasil Penelitian

THICKNESS (mm)	DATA SPESIMEN KE-	Modulus Elastisitas (Pa)	Modulus Elastisitas (Pa)
0.5	1		
0.5	2		
0.5	3		
0.5	4		
0.5	5		
1	1		
1	2		
1	3		
1	4		
1	5		
1.5	1		
1.5	2		
1.5	3		
1.5	4		
1.5	5		
2.5	1		
2.5	2		

2.5	3		
2.5	4		
2.5	5		

3.2.3 Uji Paired T-Test

Uji *paired t-test* adalah uji yang digunakan untuk mengetahui apakah ada perbedaan hasil pengukuran pada variasi yang diuji. Jika *P-value* lebih dari 0.05, maka dapat dikatakan tidak ada perbedaan pada setiap variasi tersebut. Namun, jika *P-value* kurang dari 0,05 maka dapat dikatakan ada perbedaan pada setiap variasi tersebut. Setelah melakukan uji *paired t-test*, hasil uji tersebut akan dijabarkan pada tabel 3.3

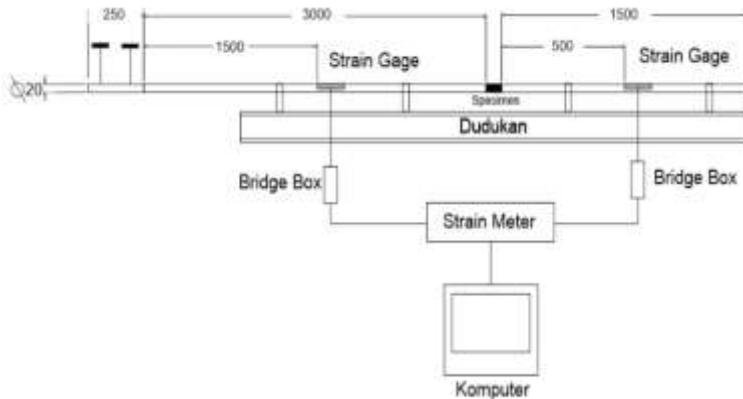
Tabel 3. 2 Hasil Uji Paired T-Test

Ketebalan Adhesive		P-Value	Ada Perbedaan (Ya/Tidak)
0.5	1		
0.5	1.5		
0.5	2.5		
1	1.5		
1	2.5		
1.5	2.5		

4.2.3 Pengaturan Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar

Alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* digunakan untuk mendapatkan respon tegangan-regangan dari material. Mekanisme pembebanan SHPB yang digunakan adalah tumbukan. *Striker bar* menumbuk *incident bar* sehingga menghasilkan gelombang regangan yang merambat sampai ke spesimen dan *transmitter bar*. Gelombang tersebut dinamakan gelombang *incident* dan akan diukur oleh *strain gauge* di *incident bar*. Ketika sampai di spesimen, sebagian gelombang *incident* akan dipantulkan. Gelombang tersebut dinamakan gelombang *reflected* dan akan

diukur oleh *strain gauge* di *incident bar*. Sebagian gelombang *incident* lainnya akan ditransmisikan ke *transmitter bar*. Gelombang tersebut dinamakan gelombang *transmitted* dan akan diukur oleh *strain gauge* di *transmitter bar*. Berdasarkan rumus perhitungan, ketiga gelombang tersebut akan digunakan untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan. Setelah itu, nilai modulus elastisitas akan didapatkan dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan. SHPB terdiri dari beberapa komponen seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2, yaitu:

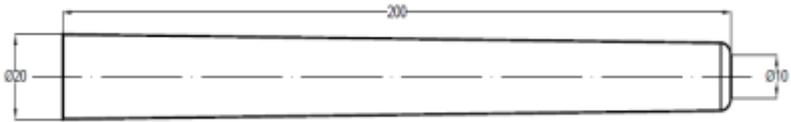


Gambar 3.2 Skema *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) (Ridho G. P., 2019)

(a) *Striker Bar*

Striker bar atau batang penumbuk adalah alat yang digunakan untuk menumbuk *incident bar* yang mana kecepatan tumbukan dapat dikontrol sehingga stabil. *Striker bar* memiliki diameter sebesar 20 mm dan panjang sebesar 20 cm. Material *striker bar* adalah aluminium tipe 6061. Beban yang diberikan oleh *striker bar* terdapat 2 jenis yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis adalah beban diberikan secara langsung pada *incident bar*, sedangkan beban dinamis adalah beban diberikan dengan cara menumbuk pada *incident bar*. Pada pengujian ini,

jenis beban yang diberikan adalah beban dinamis dengan cara tumbukan.



Gambar 3.3 Dimensi *Striker Bar* (Juan Carlos M., 2019)

(b) *Incident Bar & Transmitter Bar*

Incident bar atau batang *input* merupakan batang yang menerima gaya tumbukan secara langsung dari *striker bar*. Setelah tumbukan, gelombang regangan akan merambat sampai ke spesimen sambungan hingga *transmitter bar*. Dalam pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* ini, *incident bar* memiliki diameter sebesar 20 mm dan panjang sebesar 3 m. *Incident bar* terbuat dari material aluminium 6061 dan memiliki ukuran minimal dua kali lebih panjang dari *striker bar* untuk mencegah *overlapping* antara gelombang *incident* dan gelombang *reflected*. Sedangkan *transmitter bar* atau batang *output* merupakan batang yang menerima sebagian gelombang regangan dari *incident bar* melalui spesimen. *Transmitter bar* memiliki diameter sebesar 20 mm dan panjang sebesar 1.5 m. *Striker bar*, *incident bar*, dan *transmitter bar* harus berada pada satu sumbu yang lurus sehingga dapat memperoleh *one-dimensional wave* saat terjadi tumbukan.



Gambar 3.4 Dimensi *Incident Bar* Dan *Transmitter Bar*

(c) Spesimen

Spesimen yang digunakan adalah *butt adhesive joint*. *Adherend* terbuat aluminium kotak berongga yang ukuran 16 mm x 16 mm dan tebal 0.8 mm. *Adhesive* yang digunakan terdiri dari campuran antara *epoxy* dan *hardener*. Rasio *epoxy* dan *hardener* adalah 1 : 1. Ketebalan *adhesive* pada sambungan divariasikan para rentang 0.5 mm sampai 2.5 mm. Spesimen akan diletakan diantara *incident bar* dan *transmitter bar*.



Gambar 3.5 Dimensi Spesimen Sambungan *Adhesive Tipe Butt Joint*

(d) *Strain Gauge*

Strain gauge merupakan komponen elektronika yang dipakai untuk mengukur tekanan (deformasi atau strain). Alat ini berbentuk foil logam atau kawat logam yang bersifat insulatif (isolasi) yang ditempel pada benda yang akan diukur tekanannya dan tekanan berasal dari pembebanan. Prinsip *strain gauge* adalah jika tekanan pada benda berubah, maka foil atau kawat akan terdeformasi, dan tahanan listrik alat ini akan berubah. Perubahan tahanan listrik ini akan dimasukkan kedalam rangkaian *wheatstone bridge* yang kemudian akan diketahui berapa besar tahanan pada *strain gauge*. Pada pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* ini, tipe *strain gauge* yang digunakan adalah Kyowa KFGS-2N-120-11 L3M2R dengan *gauge factor* sebesar $2.08 \pm 1.0 \%$ dan *gauge resistance* sebesar $120.4 \pm 1.0 \%$ Ω . *Strain gauge* tersebut diletakan di *incident bar* dan di *transmitter bar*.

Dalam pemilihan *strain gauge* harus mengetahui tentang *gage length*, *gage resistance*, dan *gage pattern* sehingga pengujian dapat dilakukan dengan baik. Berikut ini bagaimana memilih *strain gauge*, yaitu:

1. Berdasarkan *Gage Length*

Gage length adalah panjang sensitif regangan dari *strain gauge*. *Gage length* berkisar dari 0,2 mm hingga 100 mm (0,008 in - 4 in), tetapi panjang 3 mm hingga 6 mm (0,125 in - 0,25 in) umumnya direkomendasikan untuk aplikasi umum.

- ❖ Pilih *gage length* berkisar (3mm; 0,125 in), jika
 - Tempat pemasangan sangat kecil.
 - Gradien regangan perlu diukur. Jika strain yang diukur begitu dekat atau pada *fillet*, lubang, atau tekukan dengan diameter (<25 mm; 1 in).
 - Akurasi tidak penting.
- ❖ Pilih *gage length* berkisar (6mm; 0,25 in), jika
 - Pemasangan yang cepat merupakan hal yang penting. *Gage length* yang lebih panjang lebih mudah dalam pemasangan.
 - Tempat pemasangan tidak dalam temperature yang tinggi. *Gage length* yang lebih panjang kurang sensitif terhadap efek panas.
 - Objek yang diukur memiliki sifat material non-homogen seperti beton. *Gage length* dengan panjang dua kali atau lebih dari non-homogenitas diperlukan untuk menghindari fluktuasi regangan.
 - Biaya menjadi masalah. *Gage length* dengan panjang berkisar 5,0 - 12,5 mm (0,2 - 0,5 in) lebih murah daripada panjang lainnya.

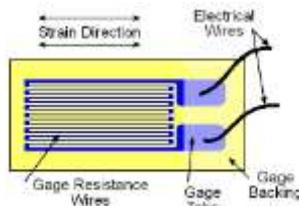
2. Berdasarkan *Gage Resistance*

Gage resistance secara langsung berkaitan dengan sensitivitas. Semakin tinggi *resistance*, maka semakin tinggi sensitivitasnya.

- ❖ Pilih *gage resistance* berkisar (350 or 1000 Ω), jika
 - Membutuhkan sensitivitas yang lebih tinggi untuk mendapatkan kompatibilitas tertentu dengan instrumentasi yang ada.
- ❖ Pilih *gage resistance* berkisar (120 Ω), jika
 - Kelelahan akibat pembebanan menjadi masalah. Kawat resistansi yang lebih rendah memiliki diameter lebih besar, dan lebih tahan lelah. *Gage resistance* 120 Ω biasanya lebih murah dari *gage resistance* 350 Ω .

3. Berdasarkan *Gage Pattern*

- ❖ Pilih *unaxial strain gage*, jika
 - Perlu mengukur satu arah regangan.
- ❖ Pilih *bi-axial strain gage* (0°-90° Tee rosette), jika
 - Perlu mengukur tegangan utama, itu berarti bahwa sumbu utama diketahui.
- ❖ Pilih *three-element strain gage* (0°-45°-90° rectangular rosette or 0°-60°-120° delta rosette), jika
 - Perlu mengukur tegangan utama dan tidak tahu sumbu utama.

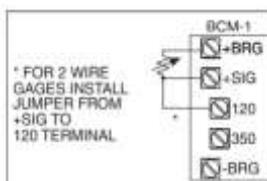


Gambar 3.6 *Strain Gauge* Pada *Incident Bar*

(e) *Wheatstone Bridge*

Wheatstone bridge atau jembatan *wheatstone* merupakan alat ukur yang dipergunakan untuk memperoleh ketelitian dalam melaksanakan pengukuran terhadap suatu tahanan yang belum diketahui nilainya dan relatif kecil sekali dalam keadaan seimbang yaitu galvanometer menunjukkan angka nol. Rangkaian *wheatstone bridge* memiliki susunan dari 4 buah hambatan, dimana 2 dari hambatan tersebut adalah hambatan *variable* dan hambatan yang belum diketahui besarnya yang disusun secara seri satu sama lain dan pada 2 titik diagonalnya dipasang sebuah Galvanometer dan pada 2 titik diagonal lainnya diberikan sumber tegangan. Galvanometer adalah alat yang digunakan untuk mendeteksi dan pengukuran arus. R1, R2, dan R3 merupakan hambatan yang sudah diketahui, sedangkan R4 adalah hambatan yang akan dicari besarnya.

Dalam pengaplikasian *wheatstone bridge*, pemilihan jenis rangkaian dengan *strain gauge* harus diperhatikan. Pemilihan rangkaian *wheatstone bridge* harus sesuai dengan tujuan pengukuran yang akan dilakukan. Pada pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* ini, tipe *wheatstone bridge* yang digunakan adalah *Wheatstone Bridge* OMEGA BCM-1. *Wheatstone bridge* dapat digunakan untuk pengukuran *quarter bridge* dengan hambatan sebesar 120 ohm or 350 ohm. Besar hambatan yang digunakan yaitu 120 ohm, yang sesuai dengan *strain gauge* yang digunakan. Rangkaian *wheatstone bridge* yang digunakan adalah $\frac{1}{4}$ Bridge 120 ohm *Hook-up*.



Gambar 3.7 Rangkaian Pada $\frac{1}{4}$ Bridge 120 ohm *Hook-up* (BCM-1 Module, Omega.com)

(f) *Dynamic Strain Meter*

Dynamic Strain Meter sebagai *A/D Converter* atau *analog to digital converter* merupakan sebuah rangkaian elektronik yang berfungsi mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital. Sinyal analog adalah sinyal yang langsung dapat diukur dalam bentuk gelombang yang kontinyu, yang membawa informasi dengan mengubah karakteristik gelombang. Dua parameter/ karakteristik terpenting yang dimiliki oleh isyarat analog adalah amplitude dan frekuensi. Sedangkan sinyal digital adalah sinyal yang terdiri dari kombinasi bilangan 0 dan 1 yang disebut bilangan biner. Ketika sinyal berada dalam bentuk sinyal digital maka akan lebih mudah untuk menghilangkan *noise* yang terjadi. *Dynamic Strain meter* yang digunakan pada pengujian ini adalah *Dynamic Strain Meter* (DRA 101C) dari Tokyo Sokki Konkyujo.



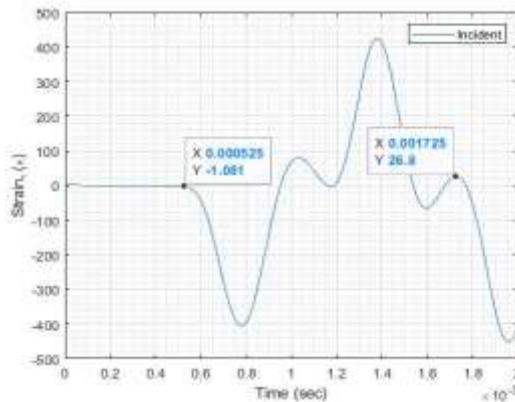
Gambar 3.8 *Dynamic Strain Meter* sebagai *A/D Converter*

4.2.4 Kalibrasi Alat Uji *Split Hopkinson Pressure Bar*

Kalibrasi dilakukan pengujian untuk memastikan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* berfungsi dengan baik. Pengujian ini tanpa menggunakan spesimen uji. Kalibrasi dilakukan dengan cara membandingkan cepat rambat dari hasil pengujian dan

kemampuan cepat rambat material yang sebenarnya. Data yang diperoleh akan diolah melalui *data processing* menggunakan *software* sehingga didapatkan kurva regangan terhadap waktu.

Cepat rambat gelombang (C_0) pada pressure bar digunakan sebagai data perhitungan regangan dan laju regangan. Selain sebagai perhitungan, cepat rambat gelombang sebagai kalibrasi pengujian alat Split Hopkinson Pressure Bar dimana cepat rambat gelombang yang didapatkan harus sesuai dengan kemampuan material *bar* dalam perambatan gelombang. Pada pengujian ini untuk mengetahui nilai cepat rambat gelombang regangan pada *incident bar*. Cepat rambat gelombang elastis dapat diketahui menggunakan persamaan (2.36) sebagai berikut :



Gambar 3.9 Gelombang Regangan Pada Incident Bar Hasil Pengujian

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

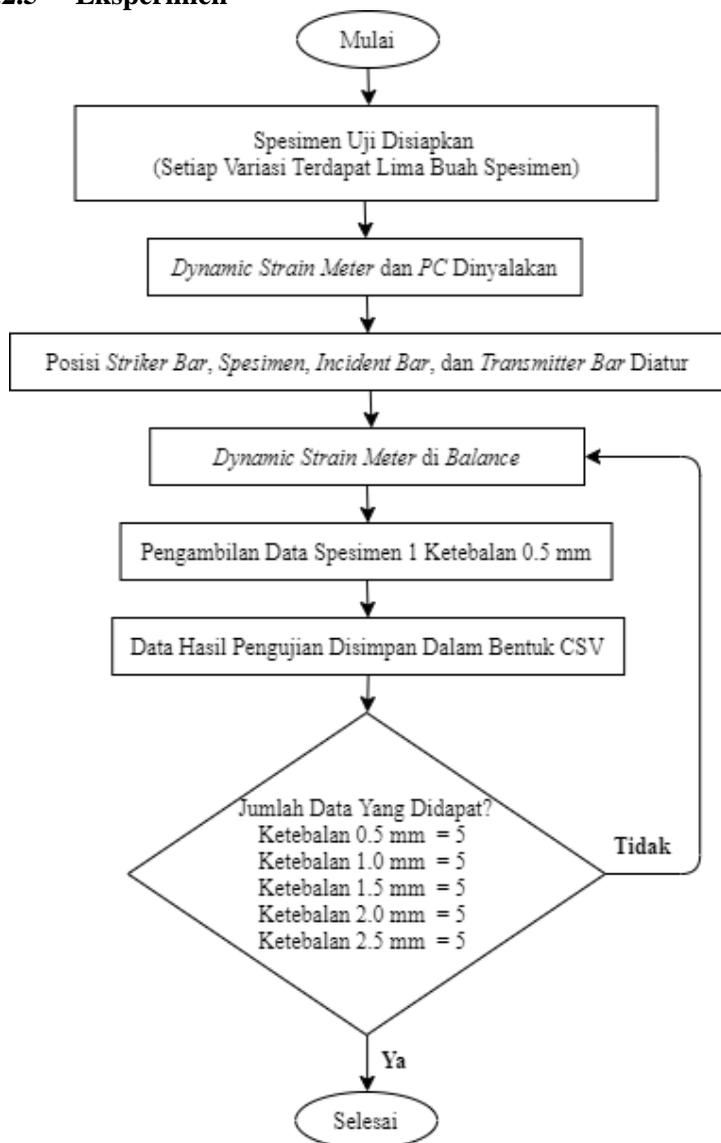
$$C_b = \frac{L}{\Delta t} = \frac{2.3 \text{ m}}{(0.000525 - 0.0001725) \text{ s}} = \frac{6 \text{ m}}{0.000125 \text{ s}} = 5000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sedangkan kemampuan perambatan gelombang material dapat diketahui dengan persamaan (2.1) sebagai berikut :

$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
$$C_o = \sqrt{\frac{68900000000}{2700}} = 5051.585743 \frac{m}{s}$$

Kemampuan perambatan gelombang pada material sebesar 5051.585 m/s, sedangkan cepat rambat gelombang pada material dari hasil pengujian kalibrasi sebesar 5000 m/s. Selisih perhitungan dan pengujian sebesar 1.02% . Oleh karena itu, data yang akan didapatkan dari pengujian menggunakan alat uji Split Hopkinson Pressure Bar dapat diterima.

4.2.5 Eksperimen

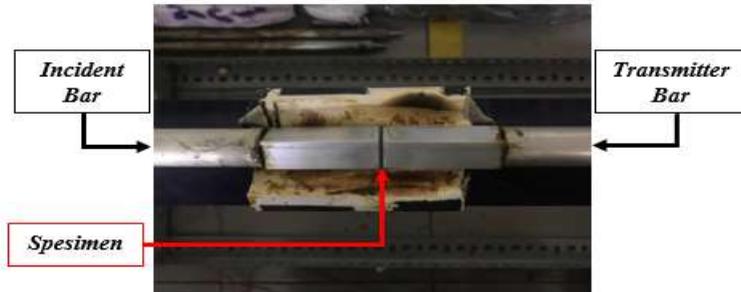


Gambar 3.10 *Flowchart* Eksperimen

Eksperimen ini dilakukan sesuai dengan tahapan yang dijabarkan dalam *flowchart* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.12. Pertama, spesimen uji disiapkan dengan ketebalan *adhesive* yang divariasikan pada rentang 0.5 mm sampai 2.5 mm dan komposisi *epoxy* dan *hardener* yang digunakan adalah 1 : 1. Setiap variasi ketebalan *adhesive* mempunyai lima buah spesimen untuk pengujian. Kedua, *dynamic strain meter* dan *PC* dinyalakan. Ketiga, *striker bar* diatur pada ketinggian yang telah ditentukan sehingga didapatkan kecepatan tumbukan yang sama jika dilakukan pengujian kembali. Sedangkan, spesimen diletakan diantara *incident bar* dan *transmitter bar*. Keempat, *dynamic strain meter* dilakukan proses *balance* sebelum dilakukan pengujian. Kelima, pengujian dilakukan dengan cara meluncurkan *striker bar* sehingga menumbuk *incident bar*. Tumbukan tersebut akan menghasilkan gelombang regangan yang akan merambat pada *incident bar*, spesimen, dan *transmitter bar*. Setelah itu, gelombang regangan tersebut direkam oleh *strain gauge* dan diproses oleh *dynamic strain meter* sehingga akan ditampilkan pada *PC* dalam bentuk grafik dan disimpan dalam bentuk CSV. Selanjutnya, pengujian dilakukan kembali pada spesimen uji dengan variasi ketebalan yang berbeda.



Gambar 3.11 Pengaturan *Striker Bar*



Gambar 3.12 Peletakan Spesimen

3.5.1 Pembuatan Spesimen

Adherend berupa aluminium kotak berongga yang disambungkan menggunakan *adhesive*. *Adherend* pada awalnya memiliki panjang sebesar 1 m dipotong dengan menggunakan gerinda tangan sehingga memiliki panjang sebesar 50 mm. Permukaan hasil pemotongan dihaluskan dengan kertas gosok sehingga ujung permukaan *adherend* rata dan halus. *Adherend* ditempatkan pada jig spesimen dan disambungkan dengan tipe *butt joint*. *Adhesive* yang digunakan terdiri dari *epoxy* dan *hardener*. Pengujian sambungan dilakukan dengan variasi ketebalan *adhesive* sebesar 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2.0mm, dan 2.5 mm. Rasio komposisi dari *epoxy* dan *hardener* adalah 1 : 1. Jumlah spesimen sambungan yang dibuat adalah lima buah setiap variasi ketebalan *adhesive*.



Gambar 3.13 Proses Dan Hasil Pemotongan *Adherend*



Gambar 3.14 Proses Penyambungan *Adherend* Dengan Lakban Kertas



Gambar 3.15 Proses Pengukuran Ketebalan Adhesive Pada Spesimen



Gambar 3.16 Proses Penimbangan Komposisi Rasio Epoxy-Hardener



Gamabr 3.17 Proses Pengeleman *Adhesive* Pada Spesimen



Gamabr 3.18 Proses Merapikan Pengeleman *Adhesive*



Gambar 3.19 Proses Pelepasan Lakban Kertas Dari Spesimen



Gambar 3. 20 Proses Validasi Hasil Pengukuran



Gambar 3.21 Hasil Spesimen Sambungan *Adhesive Butt Joint*

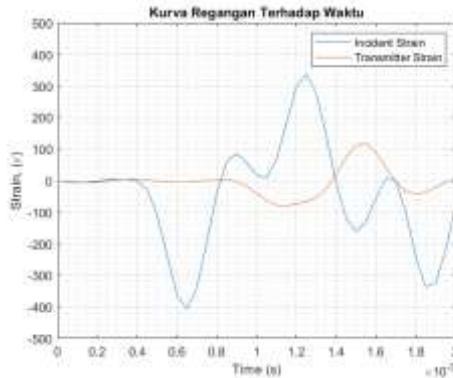
4.2.6 Pengolahan Data Eksperimen

Data hasil pengukuran bentuk CSV diolah menggunakan *software* MATLAB sehingga diperoleh kurva tegangan-regangan. Nilai modulus elastisitas dapat diperoleh dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan. Selanjutnya, data nilai modulus elastisitas dilakukan uji *paired t-test* menggunakan *software* *minitab* dengan tujuan mengetahui pengaruh ketebalan *adhesive* pada kekakuan *butt adhesive joint* yang signifikan. Berikut ini adalah tahapan menggunakan *software* MATLAB dan *minitab*.

3.6.1 Pengolahan Data Menggunakan *Software* MATLAB

- (a) Data Regangan Incident Bar Dan Transmitter Bar
Gelombang regangan pada *incident bar* dan *transmitter bar* yang direkam oleh *strain gauge*, akan diproses oleh *Dynamic*

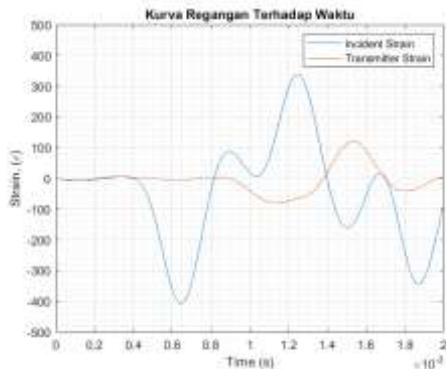
Strain Meter sehingga menghasilkan kurva regangan terhadap waktu.



Gambar 3.22 Kurva Regangan Terhadap Waktu

(b) *Resampling*

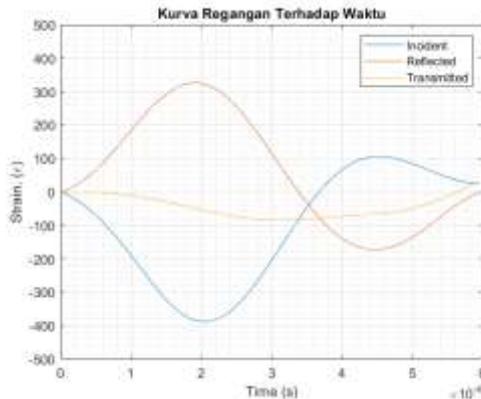
Proses *resampling* dilakukan agar pemotongan gelombang *incident*, *reflected*, dan *transmitted* dapat dilakukan pada awal gelombang sebelum dilakukan proses *trim*. Hal ini dilakukan karena kemampuan pengukuran dari *dynamic strain meter* hanya sebesar 0.05 s.



Gambar 3.23 Kurva Regangan Terhadap Waktu Setelah Proses *Resampling*

(c) Trim

Kurva regangan terhadap waktu yang diperoleh akan dilakukan *trim* untuk memperoleh gelombang *incident strain*, *reflected strain*, dan *transmitted* pada satu rentang waktu yang sama. Pemotongan dilakukan berdasarkan durasi pembebanan. Kurva ini akan digunakan untuk mendapatkan grafik P1 & P2 dan kurva tegangan-regangan.



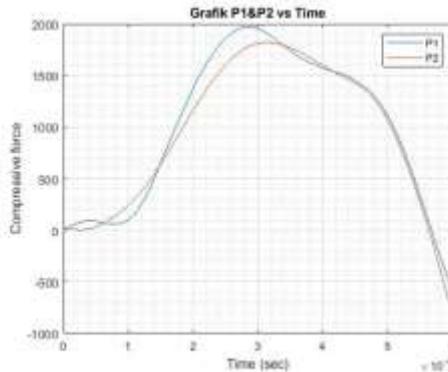
Gambar 3.24 Kurva *Incident Strain*, *Reflected Strain*, Dan *Transmitted Strain* Pada Rentang Waktu Yang Sama

(d) Grafik P1 & P2

Data kurva *incident strain*, *reflected strain*, dan *transmitted strain* pada rentang waktu yang sama akan diproses menjadi grafik P1 & P2 terhadap waktu, menggunakan persamaan (2.35) dan (2.36) sebagai berikut :

$$P_{s1} = A_o \cdot E \cdot [\varepsilon_I + \varepsilon_R]$$

$$P_{s2} = A_o \cdot E \cdot [\varepsilon_T]$$

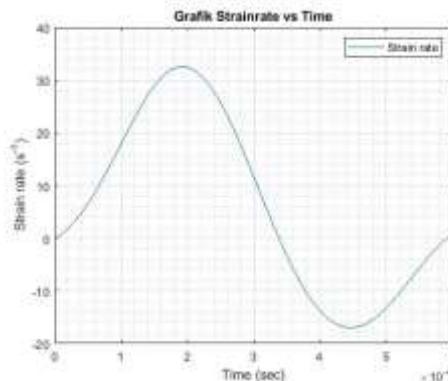


Gambar 3.25 Grafik P1 & P2 Terhadap Waktu

(e) Laju Regangan

Laju regangan merupakan suatu hal yang penting dalam pengujian ini. Data pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* dikatakan *valid* ketika data pengujian pada kondisi laju regangan yang sama. Laju regangan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.26) sebagai berikut :

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{-C_o (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t)}{L_s}$$



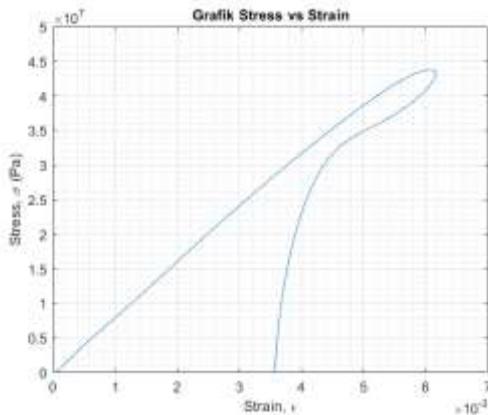
Gambar 3.26 Grafik Laju Regangan Terhadap Waktu

(f) Kurva Tegangan-Regangan

Data kurva *incident strain*, *reflected strain*, dan *transmitted strain* pada rentang waktu yang sama akan diproses menjadi kurva tegangan-regangan menggunakan persamaan (2.34) dan (2.38) sebagai berikut :

$$\sigma_s = \sigma_{s2} = \frac{A_o \cdot E \cdot \varepsilon_t}{A_s}$$

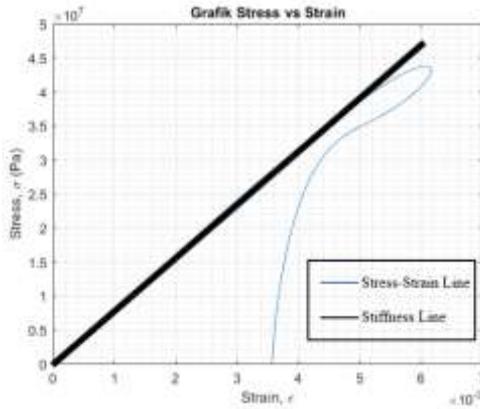
$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot C_o}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r dt$$



Gambar 3.27 Kurva Tegangan-Regangan

(g) Modulus Elastisitas

Setelah mendapatkan kurva tegangan-regangan, nilai modulus elastisitas akan didapatkan dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan seperti gambar



Gambar 3.28 Modulus Elastisitas

3.6.2 Uji Paired T-Test Menggunakan *Software minitab*

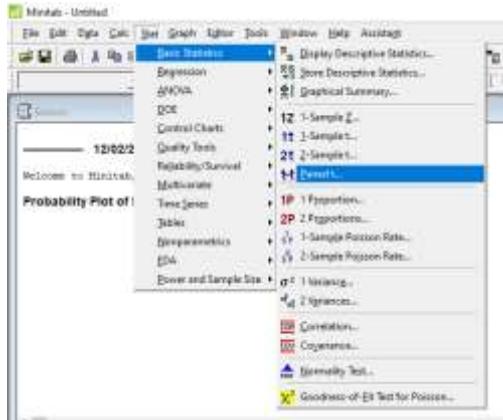
- (a) Masukkan data modulus elastisitas di worksheet minitab seperti gambar 3.29.

The screenshot shows a Minitab worksheet with the following data:

	C1	C2	C3	C4
	Ketebalan 0,5 mm			
1	1,41E+10	8,56E+09		
2	1,29E+10	6,49E+09		
3	1,24E+10	8,71E+09		
4	1,66E+10	9,09E+09		
5	1,30E+10	9,69E+09		
6				
7				
8				
9				
10				
11				

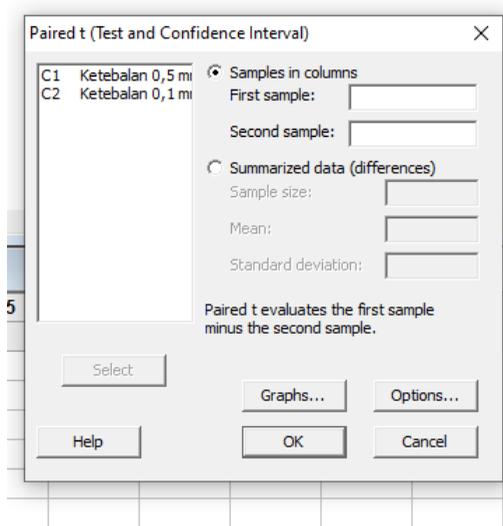
Gambar 3.29 Data di *worksheet minitab*

- (b) Pilih uji statistik *paired t-test*.



Gambar 3.30 *paired t-test*

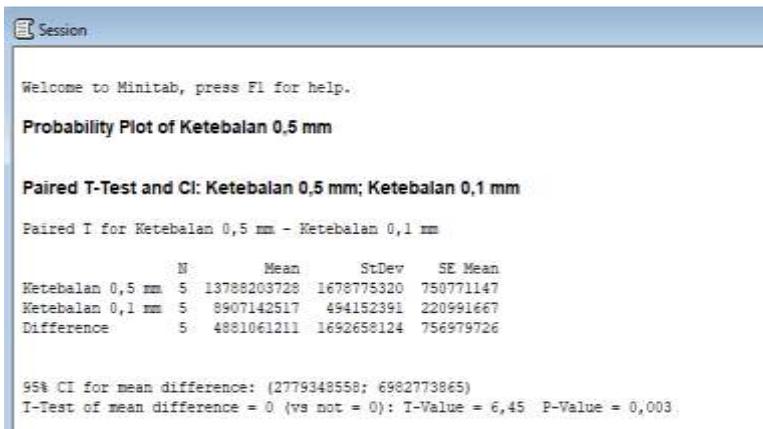
- (c) Pilih data eksperimen yang akan dibandingkan.



Gambar 3.31 *Pilih Data*

(d) Penarikan kesimpulan uji *paired t-test*.

Setelah didapatkan hasil statistik dari *software* minitab, langkah selanjutnya adalah mengambil kesimpulan dari *p-value* pengujian. Nilai *p-value* kurang dari 0,05 dapat disimpulkan bahwa data yang dibandingkan memiliki perbedaan yang signifikan pada *confident interval* 95%. Apabila nilai *p-value* lebih dari 0,05 data yang dibandingkan tidak memiliki perbedaan yang signifikan pada *confident interval* 95%. Untuk hasil yang diperoleh pada gambar 3.37 didapatkan bahwa hasil eksperimen dari ketebalan *adhesive* 0.5 mm dengan ketebalan *adhesive* 1.0 mm memiliki nilai *p-value* yaitu 0.003, maka pengaruh ketebalan *adhesive* pada variasi tersebut memiliki perbedaan yang sangat signifikan karena nilai *p-value* kurang dari 0,05.



Gambar 3.32 Hasil Pengujian *Paired T-Test*

Untuk memastikan kebenaran pengaruh ketebalan *adhesive*, validasi akan dilakukan dengan cara melakukan analisa numerik permodelan SHPB. Selain itu, analisa numerik juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh adanya *misalignment* pada sambungan *adhesive*. Analisa numerik ini dilakukan merujuk pada langkah-langkah penelitian yang dilakukan oleh Mahalli [18].

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan *butt adhesive joint* dengan *adherend* aluminium kotak berongga. Penelitian ini menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* yang bertujuan untuk mendapatkan gelombang regangan yang terjadi pada beban dinamis. Dengan mengestimasi periode gelombang regangan dan melakukan perhitungan rumus, gelombang regangan diolah menjadi grafik laju regangan menggunakan persamaan (2.26), dan kurva tegangan-regangan sambungan *adhesive* menggunakan persamaan (2.34 & 2.38), sehingga modulus elastisitas didapatkan dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan sambungan *adhesive*. Kemudian, uji *paired t-test* dilakukan terhadap nilai modulus elastisitas tiap variasi ketebalan *adhesive* untuk mengetahui seberapa besar pengaruh ketebalan *adhesive* pada rentang yang diuji. Hasil pengujian dan pembahasan dipaparkan pada bab ini.

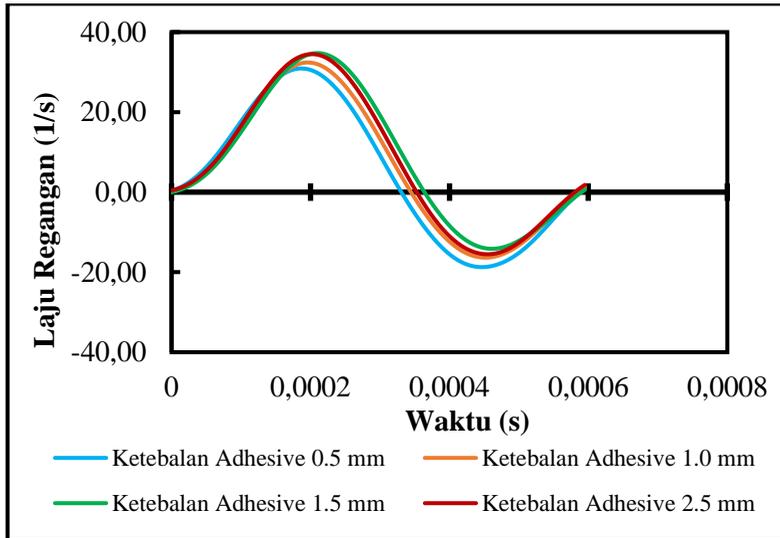
4.1 Hasil Pengujian

Pengujian *butt adhesive joint* dilakukan dengan variasi ketebalan *adhesive* yaitu 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, dan 2.5 mm. Tiap variasi ketebalan dilakukan pada lima buah spesimen. Komposisi antara *epoxy* dan *hardener* yang digunakan yaitu 1 : 1.

4.2.1 Laju Regangan Tiap Variasi Ketebalan *Adhesive*

Dalam penelitian menggunakan *Split Hopkinson Pressure Bar* yang ideal, laju regangan harus konstan selama pembebanan. Namun, laju regangan yang konstan hanya didapatkan jika pengujian dilakukan sampai daerah plastis. Pada penelitian ini, pengujian hanya dilakukan di daerah elastis. Hal tersebut dibuktikan dengan laju regangan yang berubah-ubah ditunjukkan pada gambar 4.1. Laju regangan pada spesimen sambungan terlihat

fluktuatif antara positif dan negatif. Nilai positif menunjukkan kompresi pada spesimen dan nilai negatif menunjukkan ekspansi.



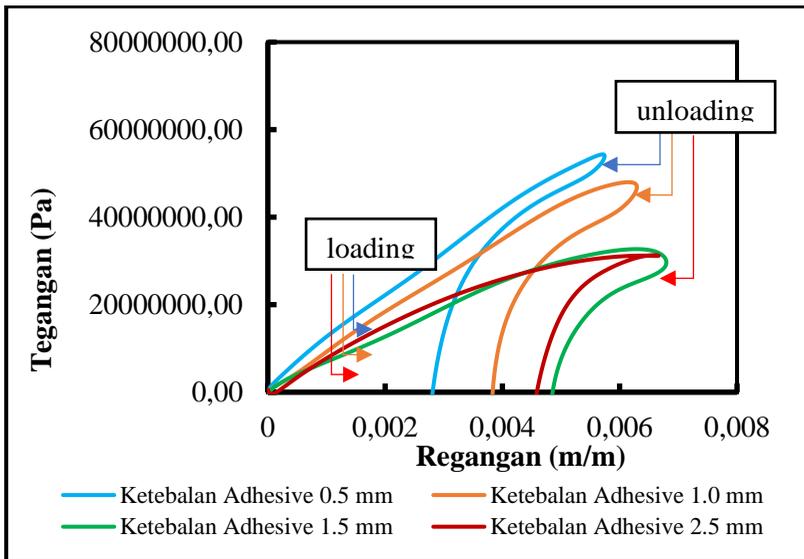
Gambar 4. 1 Grafik Laju Regangan Terhadap Waktu Tiap Variasi Ketebalan *Adhesive*

Laju regangan yang didapatkan memiliki titik maksimum yang hampir sama ditunjukkan pada gambar 4.1. Titik maksimum laju regangan yang hampir sama dijadikan acuan untuk mendapatkan data yang valid, sehingga perubahan nilai modulus elastisitas pada rentang ketebalan yang diuji dapat dibandingkan. Pada penelitian ini, laju regangan yang didapatkan dari setiap pengujian yaitu $32 \pm 3 \text{ s}^{-1}$.

4.2.2 Kurva Tegangan-Regangan Tiap Variasi Ketebalan *Adhesive*

Secara teoritis, kurva tegangan-regangan berbentuk *close-loop* pada daerah elastis. Namun, pada penelitian ini didapatkan kurva tegangan-regangan yang tidak berbentuk *close-loop* pada

daerah elastis ditunjukkan pada gambar 4.2. Hal ini terjadi karena terdapat sebagian gelombang *transmitted* yang tidak ditransmisikan dari spesimen ke *transmitted bar* akibat spesimen sambungan kehilangan kontak dengan *transmitter bar*. Massa *transmitter bar* yang lebih kecil daripada *incident bar* menyebabkan inersia *transmitted bar* lebih kecil daripada *incident bar* sehingga *transmitter bar* bergerak lebih cepat daripada *incident bar*.

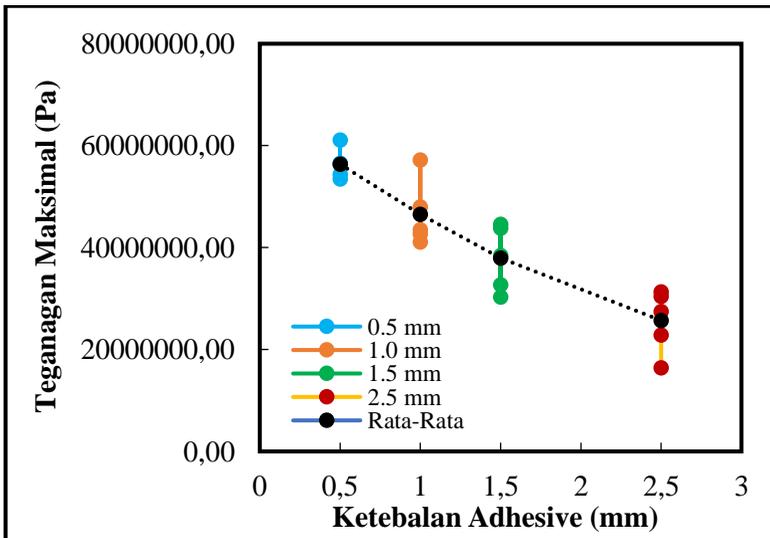


Gambar 4. 2 Kurva Tegangan Terhadap Regangan Pada Setiap Variasi Ketebalan *Adhesive*

Kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari pengujian menunjukkan karakteristik yang berbeda dengan kurva tegangan-regangan pengujian material pada area plastis. Kurva tegangan regangan yang diperoleh terlihat adanya *hysteresis loop*. Hal tersebut menunjukkan karakteristik viskoelastik dari *butt adhesive joint*, dimana *adhesive* akan menyerap sebagian energi melalui

gesekan internal pada saat berdeformasi. Daya serapan energi dapat diperoleh dengan menghitung area di bawah kurva tegangan-regangan.

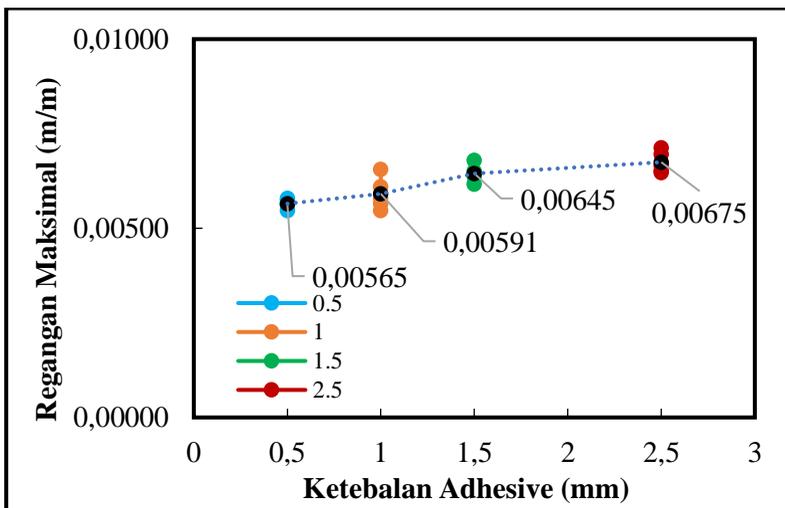
Kurva tegangan-regangan spesimen sambungan mengalami tahap *loading* dan *unloading* ditunjukkan pada gambar 4.2. Tahap *loading* terjadi pada awal kurva, dimana spesimen sambungan mulai mengalami deformasi elastis hingga mencapai tegangan maksimum. Sedangkan tahap *unloading* terjadi saat tegangan maksimum akan menurun hingga mencapai nilai tegangan 0 MPa. Pada tahap *loading* akan didapatkan nilai modulus elastisitas sambungan *adhesive* dari *slope* pada awal kurva tegangan-regangan.



Gambar 4. 3 Grafik Tegangan Maksimal Pada Setiap Variasi Ketebalan *Adhesive*

Pada rentang yang diuji, tegangan maksimal turun seiring penambahan ketebalan *adhesive* yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Hal serupa juga didapatkan pada penelitian yang dilakukan

oleh **Toshiyuki Sawa**, yang melakukan pengujian sambungan *adhesive* dengan ketebalan *adhesive* pada rentang 0.05 mm dan 0.2 mm. Tegangan maksimal yang diperoleh menurun seiring penambahan ketebalan *adhesive* karena kapasitas penyerapan energi meningkat dengan bertambahnya *volume adhesive*. Pada penelitian ini, sambungan *adhesive* dengan ketebalan *adhesive* sebesar 2.5 mm memiliki kapasitas serapan energi yang lebih besar pada rentang ketebalan *adhesive* 0.5 mm hingga ketebalan *adhesive* 2.5 mm.

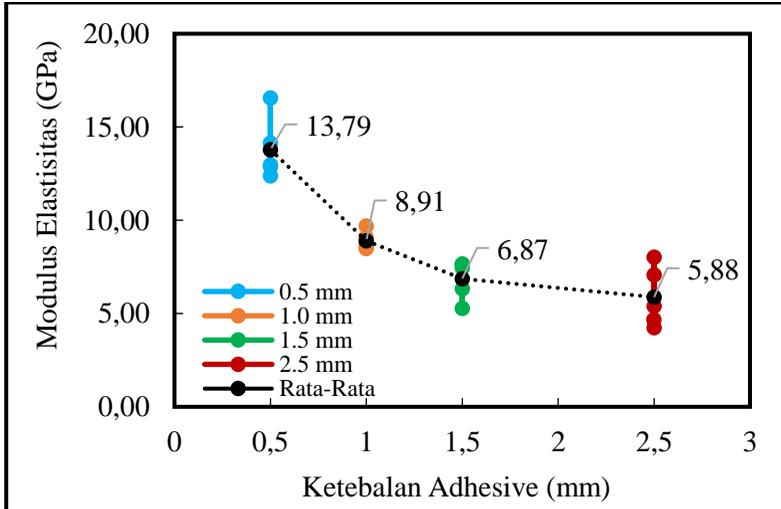


Gambar 4. 4 Grafik Regangan Maksimal Pada Setiap Variasi Ketebalan *Adhesive*

Sedangkan, regangan maksimum naik seiring penambahan ketebalan *adhesive* yang ditunjukkan pada gambar 4.5. Regangan maksimal yang bertambah berarti kemampuan *elongation* dari sambungan *adhesive* meningkat. Kemampuan *elongation* yang meningkat membuat sambungan *adhesive* dapat berdeformasi lebih panjang sebelum mengalami patah. Hal tersebut menunjukkan bahwa sambungan *adhesive* bersifat elastis sehingga

memiliki daya tahan lebih baik terhadap *fatigue* dengan bertambahnya ketebalan *adhesive*. Namun, peningkatan regangan maksimal tidak signifikan seiring penambahan ketebalan *adhesive*. Pada penelitian ini, sambungan *adhesive* dengan ketebalan *adhesive* sebesar 2.5 mm memiliki kemampuan *elongation* yang lebih besar pada rentang ketebalan *adhesive* 0.5 mm hingga ketebalan *adhesive* 2.5 mm.

Setelah didapatkan kurva tegangan-regangan sambungan *adhesive*, nilai modulus elastisitas akan didapatkan pada rentang variasi ketebalan *adhesive* yang diuji. Berdasarkan persamaan (2.40), kekakuan dipengaruhi oleh modulus elastisitas, luas permukaan kontak gaya dan panjang spesimen sambungan. Luas permukaan kontak gaya yang konstan dan perubahan panjang spesimen sambungan yang tidak signifikan, maka nilai modulus elastisitas dapat mempresentasikan kekakuan sambungan *adhesive*. Nilai modulus elastisitas yang didapatkan pada penelitian ini ditampilkan pada gambar 4.3.



Gambar 4. 5 Pengaruh Ketebalan *Adhesive* Terhadap Modulus Elastisitas

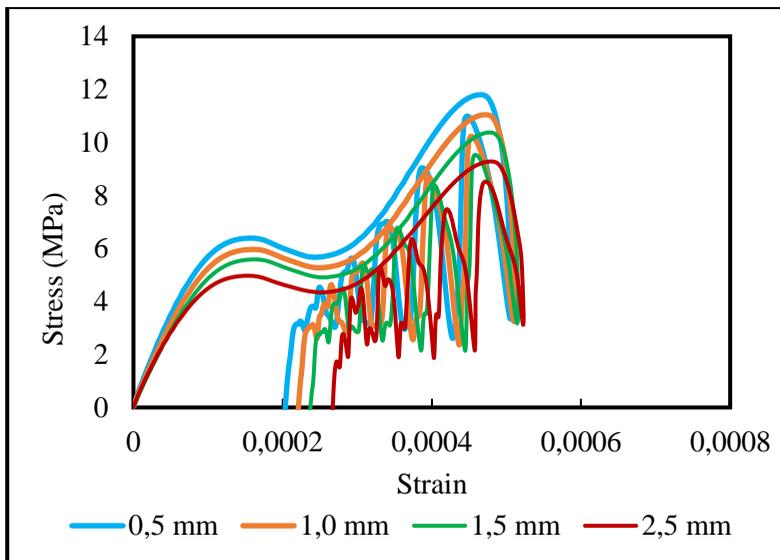
Gambar 4.5 menunjukkan pengaruh ketebalan *adhesive* terhadap nilai modulus elastisitas. Terlihat bahwa nilai modulus elastisitas menurun secara non-linear seiring penambahan ketebalan *adhesive* dari ketebalan *adhesive* 0,5 mm hingga ketebalan *adhesive* 2,5 mm. Pada ketebalan *adhesive* 0,5 mm didapatkan nilai modulus elastisitas rata-rata sebesar 13,79 GPa. Nilai modulus elastisitas rata-rata menurun secara signifikan menjadi 8,91 GPa pada ketebalan *adhesive* 1,0 mm. Pada ketebalan *adhesive* 1,5 mm dan 2,5 mm, nilai modulus elastisitas rata-rata juga mengalami penurunan menjadi 6,87 GPa dan 5,88 GPa. Penurunan nilai modulus elastisitas rata-rata pada penelitian ini diduga pengaruh penambahan *adhesive*, spesimen sambungan mengalami *bukling* saat diberikan beban, dan adanya *misalignment* dalam sambungan *adhesive*.

4.2 Analisa Numerik

Analisa numerik dilakukan untuk memastikan penyebab penurunan nilai modulus rata-rata pada pengujian ini dan mengetahui besar deformasi dari *adhesive* dan sambungan *adhesive*. Langkah-langkah pada analisa numerik ini dilakukan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh **Mahalli [18]**. Analisa numerik dilakukan dengan memodelkan mekanisme Split Hopkinson Pressure Bar yang terdiri dari *striker bar*, *incident bar*, *specimen*, dan *transmitted bar*. Variasi yang dilakukan adalah penambahan ketebalan *adhesive* dan *misalignment* sambungan *adhesive*. Ketebalan *adhesive* yang digunakan adalah 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, dan 2.5 mm. Sedangkan *misalignment* sambungan *adhesive* yang digunakan adalah 0.5°, 1.0°, 1.5° dan 2.0°. Material yang digunakan pada komponen bar adalah Aluminium T6 6061, sedangkan pada *adhesive* adalah *epoxy resin*. Adapun parameter lain yang diatur seperti kecepatan tumbukan *striker bar* adalah 1,17 m/s dan arah gerak komponen bar hanya pada sumbu x. Namun, pada penelitian **Mahalli** menggunakan sambungan dengan tipe *lap*

joint dan aluminium silindris berongga sebagai *adherend*. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan sambungan dengan tipe *butt joint* dan aluminium kotak berongga sebagai *adherend*.

4.2.1 Pengaruh Ketebalan *Adhesive* Terhadap Kurva Tegangan-Regangan

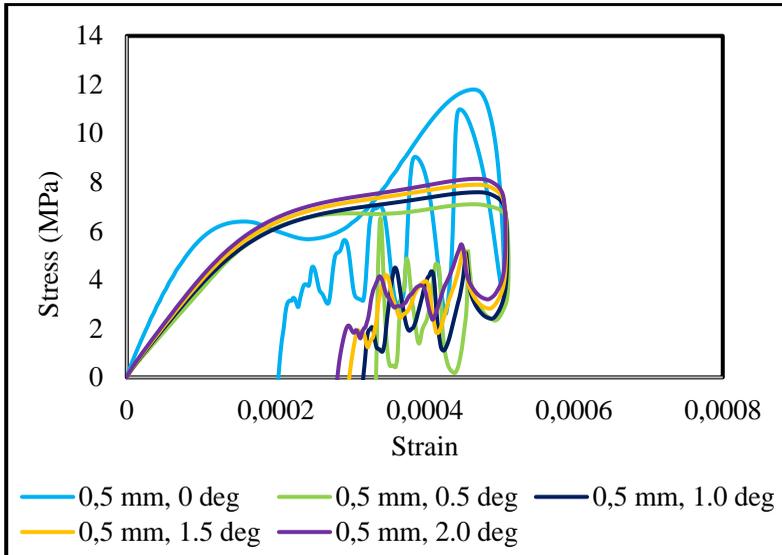


Gambar 4. 6 Pengaruh Ketebalan *Adhesive* Terhadap Modulus Elastisitas

Setelah melakukan analisa numerik, didapatkan kurva tegangan-regangan yang ditunjukkan pada gambar 4.6. Terlihat pada gambar tersebut, nilai modulus elastisitas menurun seiring penambahan ketebalan *adhesive* pada rentang 0.5 mm hingga 2.5 mm. Penambahan ketebalan *adhesive* juga mempengaruhi tegangan maksimal dan regangan maksimal pada sambungan *adhesive*. Nilai tegangan maksimal yang diterima sambungan *adhesive* semakin menurun seiring dengan penambahan ketebalan *adhesive*. Sedangkan regangan maksimal yang terjadi pada

sambungan *adhesive* semakin meningkat seiring dengan penambahan ketebalan *adhesive*, tetapi peningkatan regangan maksimal tidak signifikan.

4.2.2 Pengaruh *Misalignment* Sambungan *Adhesive* Terhadap Kurva Tegangan-Regangan



Gambar 4. 7 Pengaruh Ketebalan *Adhesive* Terhadap Modulus Elastisitas

Setelah melakukan analisa numerik, didapatkan kurva tegangan-regangan yang ditunjukkan pada gambar 4.7. Terlihat pada gambar tersebut, *misalignment* pada sambungan *adhesive* mempengaruhi kurva tegangan-regangan pada sambungan *adhesive*. Nilai modulus elastisitas pada sambungan *adhesive* 0.5 mm tanpa *misalignment* akan menurun ketika terdapat *misalignment* pada sambungan *adhesive*. Tetapi, bertambahnya *misalignment* sambungan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan nilai modulus elastisitas pada rentang

misalignment sebesar 0.5° hingga 2.0° . Terlihat juga nilai tegangan maksimal pada sambungan adhesive 0.5 mm tanpa *misalignment* akan menurun ketika terdapat *misalignment* pada sambungan *adhesive*.

4.2.3 Deformasi Maksimal Pada Adhesive Dan Sambungan Adhesive

Tabel 4. 1 Deformasi Maksimal Pada Adhesive dan Sambungan Adhesive

Ketebalan Adhesive (mm)	Deformasi Maksimal Adhesive (mm)	Deformasi Maksimal Sambungan Adhesive (mm)
0,5	0,05451	0,0590
1	0,05182	0,0603
1,5	0,05141	0,0615
2,5	0,05450	0,0637

Pada pengujian, regangan maksimal yang terukur adalah regangan maksimal sambungan *adhesive*. Nilai deformasi maksimal mengalami kenaikan seiring dengan penambahan ketebalan *adhesive*, tetapi peningkatan deformasi maksimal tidak signifikan. Hal tersebut menunjukkan tidak terjadi *buckling* pada spesimen sambungan yang menyebabkan penurunan modulus elastisitas sambungan adhesive seiring dengan penambahan ketebalan adhesive.

Tabel 4.1 juga menunjukkan deformasi maksimal yang terjadi pada *adhesive*. Terlihat bahwa ketebalan 0.5 mm dan 2.5 mm memiliki deformasi maksimal yang hampir sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa deformasi pada ketebalan *adhesive* 0.5 mm dipengaruhi oleh kontak *adherend* karena *adhesive* yang digunakan sangat tipis. Oleh karena itu, dapat dikatakan regangan

maksimal pada ketebalan adhesive 0.5 mm dipengaruhi oleh kontak *adherend*.

4.3 Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian sambungan adhesive *butt joint* dengan *adherend* aluminium kotak berongga, didapatkan nilai modulus elastisitas menurun seiring dengan penambahan ketebalan *adhesive* pada rentang 0.5 mm hingga 2.5 mm. Hasil ini serupa dengan analisa numerik yang dilakukan, dimana nilai modulus elastisitas menurun seiring dengan penambahan ketebalan adhesive. Namun, penurunan ini dapat juga dipengaruhi oleh adanya *misalignment* pada sambungan *adhesive*.

Dalam penelitian ini, ketebalan *adhesive* dan komposisi *adhesive* sangat dikontrol dalam pengujian yang dilakukan. Namun, hasil pengujian ini menunjukkan adanya deviasi nilai modulus elastisitas pada masing-masing variasi. Hal tersebut diakibatkan oleh cara mengestimasi *slope* pada awal kurva tegangan-regangan. Deviasi ini dapat mempengaruhi analisa dan pembahasan dalam pengujian. Oleh karena itu, uji *paired t-test* akan dilakukan menggunakan *software* minitab.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian *Paired T-Test*

Ketebalan Adhesive		<i>P-Value</i>	Ada Perbedaan (Ya/Tidak)
0.5	1	0.003	Ya
0.5	1.5	0.005	Ya
0.5	2.5	0.003	Ya
1	1.5	0.018	Ya
1	2.5	0.025	Ya
1.5	2.5	0.208	Tidak

Pengujian *paired t-test* untuk mengetahui seberapa besar sensitivitas nilai modulus elastisitas akibat variasi ketebalan *adhesive*. Nilai modulus elastisitas antar masing-masing variasi

ketebalan *adhesive* dibandingkan dengan menggunakan *confident interval* 95%, dimana nilai *p-value* kurang dari 0.05 membuktikan adanya perbedaan yang signifikan dengan tingkat keyakinan 95%. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa pada rentang ketebalan *adhesive* 0.5 mm dan 1.5 mm mengalami perubahan nilai modulus elastistas yang signifikan akibat perubahan ketebalan *adhesive* dengan nilai *p-value* kurang dari 0.05. Namun, pada rentang ketebalan *adhesive* 1.5 mm dan 2.5 mm memiliki nilai *p-value* lebih dari 0.05, sehingga dapat dikatakan perubahan ketebalan *adhesive* pada rentang tersebut sudah tidak mempengaruhi nilai modulus elastisitas sambungan *adhesive*.

Berdasarkan penelitian ini, dapat diketahui ketebalan *adhesive* yang optimal pada *butt adhesive joint* dengan adherend aluminium kotak berongga. Untuk sambungan yang membutuhkan kekakuan yang tinggi dapat menggunakan ketebalan *adhesive* yang memiliki nilai modulus elastisitas paling besar yaitu 0,5 mm. Sedangkan, untuk sambungan yang membutuhkan daya tahan terhadap *fatigue* dan kapasitas penyerapan energi yang baik dapat menggunakan ketebalan *adhesive* yaitu 2,5 mm.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan antara lain :

1. Kurva tegangan-regangan yang diperoleh menunjukkan karakteristik viskoelastik dari *butt adhesive joint*, dimana *adhesive* menyerap sebagian energi melalui gesekan internal pada saat berdeformasi.
2. Kekakuan *butt adhesive joint* menurun secara non-linear seiring pertambahan ketebalan *adhesive* pada rentang ketebalan *adhesive* dari 0.5 mm hingga 2.5 mm. Namun, penurunan kekakuan *butt adhesive joint* dapat disebabkan juga oleh adanya misalignment pada sambungan.
3. Pada rentang ketebalan *adhesive* yang diuji, nilai kekakuan *butt adhesive joint* terbesar didapatkan pada ketebalan *adhesive* 0.5 mm.
4. Berdasarkan uji paired t-test, ketebalan *adhesive* sudah tidak berpengaruh terhadap nilai kekakuan pada rentang ketebalan *adhesive* dari 1.5 mm hingga 2.5 mm.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian, adapun saran dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Strain meter sebaiknya menggunakan alat yang bisa membaca sinyal regangan dengan sampling rate yang lebih kecil dari 0.05 ms sehingga jumlah data yang diperoleh lebih banyak.
2. *Pressure bar* sebaiknya diganti dengan *pressure bar* yang memiliki panjang yang sama.
3. Metode tumbukan diganti agar tumbukan terkontrol, misalnya dengan sistem pneumatik otomatis. *Striker bar* akan didorong oleh tekanan gas yang telah disesuaikan oleh *valve*.
4. *Striker bar* diberikan laras agar tidak terjadi *missalignment* saat tumbukan terjadi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yohanes., Pramono, A. S., and Hudayya, A. B. 2019. “Non-monotonous Effect of Adhesive Thickness on Dynamic Stiffness of Adhesive Butt Joint”. Mechanical Engineering Departement, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] Yohanes., dan Amalin, S. P. N. 2019. “Analisa Pengaruh Pemrosesan Data Uji Split Hopkinson Pressure Bar Terhadap Karakteristik Respon Tegangan-Regangan Spesimen”. Department Mechanical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [3] Yohanes., dan Marcos, J. C. 2019. “Studi Eksperimen Dan Analisa Pengaruh Ketebalan Adhesive Terhadap Kekakuan Scarf Adhesive Joint Pada Laju Regangan Tinggi”. Department Mechanical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Yohanes., dan Pribadi, R. G. 2019. “Studi Eksperimen Dan Analisa Pengaruh Panjang Overlap Terhadap Kekakuan Pada Sambungan Adhesive Tipe Single Lap Dengan Pembebanan Dinamis”. Department Mechanical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Stewart, R., Goodship, V., Guild, F., et al. 2005. “Investigation and demonstration of the durability of air plasma pre-treatment on polypropylene automotive bumpers”. **International Journal of Adhesion & Adhesives** 25: 93-99.
- [6] Cebrian, A. S., Moser, P., Zogg, M., and Ermanni, P. 2012. “Paste Adhesive Modification for Induction Curing”. **Society for the Advancement of Material and Process Engineering**. Centre of Structure Technologies, ETH Zürich.
- [7] Campbell, C. F., 2011. **Joining: Understanding the Basics**. USA : ASM International.

- [8] Dorn L.,1994. “**Factor Influencing The Strength of Adhesive Joint**”. <URL: <https://www.slideshare.net/corematerials/talat-lecture-4702-factors-influencing-the-strength-of-adhesive-joints.html>>.
- [9] Nie, X., Song, B., Ge, Y., et al. 2009. “Dynamic Tensile Testing of Soft Material”. **Experiment Mechanics** 49 : 451-458.
- [10] Kii, N., Iwanoto, T., Rusinek, A., and Jankowiak, T. 2014. “A Study on Reduction of Friction in Impact Compressive Test Based on The Split Hopkinson Pressure Bar Method by Using a Hollow Specimen”. **Applied Mechanics and Material** Vol. 566 : 548-553
- [11] Sekiguchi, Y., and Yohanes. 2018. “Synergistic Effects of Mixed Silica Micro-nanoparticles on Compressive Dynamic Stiffness and Damping of Epoxy Adhesive”. **Journal of Dynamic Behavior of Materials** 4(2): 190 - 200.
- [12] Adams, R.D. 1997. **Structural Adhesive Joint in Engineering**. New York : Elsevier Applied Science.
- [13] Alwar R.S., and Nagaraja Y.R. 1976. “Elastic Analysis of Adhesive Butt Joints”. **J. Adhesion** Vol. 7 : 279 - 287.
- [14] Gray, G. T. 2000. “Classic Split Hopkinson Pressure Bar”. **Mechanical Testing and Evaluation ASM Handbook** Vol. 8 : 462 - 476.
- [15] Singh, J. P., and Verma, S. 2017. **Woven Terry Fabrics : Manufacturing and Quality Management**. England : Woodhead Publishing.
- [16] Sharma, S., Chavan, V. N., Agrawal, R. G., et al. 2011. “Split Hopkinson Pressure Bar : an Experimental Technique for High Strain Rate Tests”. Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India.
- [17] Sawa, T., Suzuki, Y., and Kido, S. 2003. “Stress Analysis and Strength Estimation of Butt Adhesive Joints of Dissimilar Hollow Cylinders Under Impact Tensile

- Loadings”. **Journal of Adhesion Science and Technology** Vol. 17 : 943 – 965.
- [18] Yohanes., dan Ridho, M. 2020. “Studi Numerik Untuk Analisa Pengaruh Panjang Overlap Terhadap Kekakuan Sambungan Tubular Lap Adhesive Joint Pada Pembebanan Dengan Laju Regangan Tinggi”. Mechanical Engineering Departement, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Sidik Pramono dilahirkan di Jakarta, 21 September 1996 anak ketiga yang terlahir dari orangtua bernama Suparno dan Sunarni. Penulis telah menempuh Pendidikan Formal di SDN Jelambar 06 Pagi, SMPN 75 Jakarta, dan SMAN 112 Jakarta. Setelah lulus dari SMA Negeri 112 Jakarta pada tahun 2015 penulis melanjutkan ke jenjang perkuliahan S1 di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2015-2020.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik selama perkuliahan. Dalam kegiatan non akademik pada tahun ke-1 dan ke-2 perkuliahan, penulis aktif menjadi dalam beberapa kegiatan kepanitiaan dan magang organisasi. Pada tahun ke-3 perkuliahan, penulis aktif menjadi staf divisi Vehicle Dynamic di ITS Team Sapuangin. Dan pada tahun ke-4 perkuliahan, penulis diamanahi menjadi Technical Manager di ITS Team Sapuangin. 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 “*You can do it*” yang membuat penulis berusaha untuk selalu optimis 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 pramonosidik.me@gmail.com.