



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKPERIMENTAL UNTUK ANALISA
PENGARUH KOMPOSISI *EPOXY/HARDENER*
TERHADAP *YOUNG MODULUS BULK EPOXY*
ADHESIVE PADA PEMBEBANAN DENGAN LAJU
REGANGAN TINGGI**

Kenny Varian
NRP. 0211164000056

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

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



TUGAS AKHIR – TM184835

**STUDI EKPERIMENTAL UNTUK ANALISA
PENGARUH KOMPOSISI *EPOXY/HARDENER*
TERHADAP *YOUNG MODULUS BULK ADHESIVE*
PADA PEMBEBANAN DENGAN LAJU REGANGAN
TINGGI**

**KENNY VARIAN
NRP 0211164000056**

**Dosen Pembimbing:
Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



FINAL PROJECT – TM184835

**EXPERIMENTAL STUDY FOR ANALYSIS OF THE
EFFECT COMPOSITION EPOXY/HARDENER ON
THE YOUNG MODULUS BULK ADHESIVE AT HIGH
STRAIN RATE**

KENNY VARIAN
NRP 02111640000056

Advising Lecturer:
Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems
Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI EKPERIMENTAL UNTUK ANALISA PENGARUH KOMPOSISI *EPOXY/HARDENER* TERHADAP *YOUNG MODULUS BULK EPOXY ADHESIVE* PADA PEMBEBANAN DENGAN LAJU REGANGAN TINGGI

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Kenny Varian

NRP. 02111640000056

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

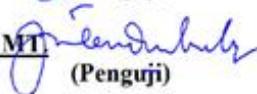
1. **Dr. Eng. Yohanes, S.T. M.Sc.**
NIP. 198006272012121003


(Pembimbing)

2. **Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA.**
NIP. 196508101991021001


(Penguji)

3. **Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.**
NIP. 196807061999031004


(Penguji)

4. **Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA.**
NIP. 195012111985021001


(Penguji)

SURABAYA
MEI 2020

**STUDI EKPERIMENTAL UNTUK ANALISA PENGARUH
KOMPOSISI *EPOXY/HARDENER* TERHADAP YOUNG
MODULUS *BULK EPOXY ADHESIVE* PADA
PEMBEBANAN DENGAN LAJU REGANGAN TINGGI**

Nama Mahasiswa : Kenny Varian
NRP : 0211164000056
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRAK

Penggunaan *adhesive joint* pada struktur ringan kendaraan semakin berkembang dan melengkapi sambungan mekanis konvensional. Hal ini disebabkan oleh kemampuan *adhesive joint* yang ringan, tahan korosi, dan tahan terhadap tumbukan serta mampu menyambungkan material yang berbeda jenis. *Adhesive joint* menjadi kunci untuk membuat struktur kendaraan yang lebih ringan dan lebih aman. Di masa depan, aplikasi sambungan *adhesive* dalam konstruksi otomotif akan semakin berkembang. Oleh karena itu, sambungan *adhesive*, selain harus mampu menopang struktur pada pembebanan statis, juga harus mampu menopang struktur pada pembebanan dinamis.

Sifat mekanik *adhesive joint* ditentukan oleh *properties* dari *base material* dan *bulk adhesive*. Variasi perubahan komposisi *epoxy resin* dengan *hardener* mengakibatkan polimerisasi tidak sempurna dan mengubah sifat mekanik *adhesive layer*. Pada tugas akhir ini akan dilakukan penelitian tentang sensitifitas respon tegangan-regangan *butt adhesive joint* terhadap pengaruh variasi komposisi *epoxy* dengan *hardener*. Pengamatan khusus juga dilakukan pada Young's modulus sambungan yang diestimasi dari slope awal kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari uji *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB).

Uji SHPB akan dilakukan pada *adhesive butt joint* dengan *base material aluminium alloy* AISI 6061 silindris dengan diameter 20 milimeter dan panjang 50 milimeter. *Epoxy adhesive*

layer tebal 2 milimeter dengan variasi komposisi *epoxy:hardener* sebesar 2:1, 2:3, 1:1, 3:2, dan 1:2 digunakan untuk menyambungkan *base material*. Lima spesimen akan diuji untuk setiap variasi komposisi. *T-test statistical method* akan digunakan untuk menganalisa pengaruh komposisi terhadap *Young's modulus* sambungan.

Pengujian *butt adhesive joint* dilakukan pada laju regangan yang konsisten, yaitu $367 \pm 28 \text{ s}^{-1}$. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pengujian *butt adhesive joint* dilakukan pada area elastis, dimana *butt adhesive joint* mengalami kompresi dan kemudian mengalami ekspansi. Pada awal kurva tegangan-regangan (*fase loading*), *butt adhesive joint* mengalami deformasi elastis dimana tegangan memiliki nilai yang proporsional dengan nilai regangan. Setelah mencapai nilai tegangan maksimal, *butt adhesive joint* mengalami fase *unloading* dimana nilai tegangan berkurang hingga mencapai nilai 0 MPa. Nilai *Young's modulus butt adhesive joint* diperoleh dengan menghitung nilai slope garis awal kurva tegangan-regangan yang diperoleh. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi komposisi *adhesive* mempengaruhi nilai *Young's modulus butt adhesive joint*. *Young's modulus butt adhesive joint* meningkat secara non-linier dengan bertambahnya *epoxy* pada *adhesive*, namun mengalami penurunan saat komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 1. Nilai *Young's modulus* terbesar didapat pada komposisi *epoxy* 3 dan *hardener* 2 senilai 0.87 GPa. Selain itu didapatkan hasil untuk nilai regangan maksimal terdapat pada komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3. Hasil dari penelitian ini akan sangat berguna untuk mengetahui performa *butt adhesive joint* dalam aplikasi dimana sambungan mengalami beban tumbukan, misalnya dalam konstruksi otomotif.

Kata kunci : *Komposisi, Butt adhesive joint, Young's modulus, Split Hopkinson Pressure Bar, Adhesive, Epoxy-Hardener*

**EXPERIMENTAL STUDY FOR ANALYSIS OF THE
EFFECT COMPOSITION EPOXY/HARDENER ON THE
YOUNG MODULUS BULK EPOXY ADHESIVE AT HIGH
STRAIN RATE**

Student Name : Kenny Varian
NRP : 0211164000056
Department : Mechanical Engineering
Advisory Lecturer : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRACT

The adhesive joint on lightweight vehicle structures was developed and equipped with conventional mechanical joints. This is caused by the ability of adhesives that are lightweight, corrosion resistant, collision resistant, and able to connect different material types. Adhesive joint is the key to making the vehicle structure lighter and safer. In the future, the application of adhesive joints in automotive construction will further develop. Adhesive joint must be able to support the structure in static loading and able to support the structure in dynamic loading.

The mechanical properties of adhesive joint are determined by the properties of base material and bulk adhesive. Variation in composition of epoxy resin with hardener produce imperfect polymerization and changes mechanical properties of adhesive layer. In this final project will be carried out research on the sensitivity of butt adhesive joint stress-strain response to the effect of variations in composition epoxy with hardener. Special observations were also made on Young's modulus which was estimated from the initial slope of the stress-strain curve obtained from Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB).

The SHPB test will be carried out on adhesive butt joint with a base material of cylindrical aluminum alloy AISI 6061 with a diameter 20 milimeters and length 50 milimeter. The epoxy adhesive have thickness 2 milimeter with a variation ratio of epoxy: hardener is 2:1, 2:3, 1:1, 3:2, and 1:2 are used to joint the base

material. Five specimens will be tested for each composition variation. T-test Statistical method will be used to analyze the effect of composition on Young's modulus.

Testing of butt adhesive joint were carried out at a consistent strain rate of $326 \pm 28s^{-1}$. The result showed that testing of butt adhesive joint were carried out in elastic area, where the butt adhesive joint was compressed and then expansion. At the beginning of stress-strain curve (loading phase), butt adhesive joint undergo elastic deformation where the value of stress is proportional to value of strain. After reaching the maximum stress value, butt adhesive joint undergo an unloading phase, where the value of stress decreases to 0 MPa. The value Young's modulus of butt adhesive joint is obtained by calculating the initial slope of stress-strain curve. The results show that the variation of adhesive composition affects the value of Young's modulus butt adhesive joint. Young's modulus of butt adhesive joint increases non-linearly with increasing epoxy in adhesive, but Young's modulus decreases when the composition ratio of epoxy:hardener is 2:1. The largest Young's modulus value is obtained when the composition ratio of epoxy:hardener is 3:2 with 0.87 GPa. In addition, the results for maximum strain value is obtained when the composition ratio of epoxy:hardener is 2:3. The results of this study will be very useful to determine the performance of butt adhesive joint in applications where joint undergoes impact loading, for example in automotive construction.

Keywords : Composition, Butt adhesive joint, Young's modulus, Split Hopkinson Pressure Bar, Adhesive, Epoxy-Hardener

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam proses penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Dr. Eng. Yohanes, ST. M.Sc., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan ilmu, dukungan dan motivasi, serta membimbing penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini. Segala masukan dan bimbingan yang telah Bapak berikan selama ini sangatlah berharga bagi penulis.
2. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc. PhD., Bapak Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA., Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono DEA., Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT., Bapak Indra Sidharta ST., M.Sc., dan Ibu Aida Annisa Amin Daman. ST., MT selaku dosen penguji tugas akhir penulis karena telah meluangkan waktu dan untuk saran-saran yang telah Bapak dan Ibu berikan demi kebaikan hasil tugas akhir penulis.
3. Keluarga penulis Mama dan Papa serta kakak adik kandung penulis yang telah memberikan banyak dukungan, fasilitas serta hiburan kepada penulis.
4. Bapak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin dan dosen wali yang sejak awal perkuliahan banyak memberikan inspirasi, motivasi, dan bantuan kepada penulis.
5. Seluruh keluarga Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan penulis kesempatan untuk menimba ilmu.
6. Angkatan M59 yang telah memberikan dukungan sekaligus menjadi keluarga penulis selama menempuh perkuliahan di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember mulai dari awal perkuliahan hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

7. Warga laboratorium otomotif yang selalu menemani, mendukung, dan memberikan hiburan untuk penulis.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis satu per satu

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

Surabaya, Mei 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Adhesive</i>	5
2.2 <i>Adhesive Joint</i>	5
2.3 <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	10
2.4 Kurva Tegangan-Regangan	12
2.5 Kekakuan (<i>Stiffness</i>)	15
2.6 Modulus Elastisitas (<i>Modulus Young</i>).....	15
2.7 Kalibrasi pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	16
2.8 Perambatan Gelombang pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	20
2.9 Penyebaran Gelombang pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	23
2.10 Penelitian Terdahulu.....	24
2.10.1 <i>The Effect of the Resin/Hardener Ratio on the Compressive Behavior of an Epoxy System</i>	24
2.10.2 Experimental Determination of Impact Tensile Properties of Adhesive Butt Joints with The Split Hopkinson Bar	29

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2 Spesifikasi <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	34
3.3 Kalibrasi Alat Uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	38
3.4 Eksperimen	41
3.4.1 Diagram Alir Eksperimen.....	42
3.4.2 Persiapan Spesimen	42
3.4.3 Persiapan Pengambilan Data Eksperimen	45
3.5 Pengolahan Data Eksperimen	52
3.6 Pengujian dengan <i>Paired t-test</i>	58
3.7 Analisa Data dan Pembahasan.....	61
3.8 Penarikan Kesimpulan dan Saran	62
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	63
4.1 Hasil Pengujian.....	63
4.1.1 Perbandingan Laju Regangan pada Tiap Komposisi ...	63
4.1.2 Perhitungan Tegangan dan Regangan pada Tiap Komposisi <i>Adhesive</i>	65
4.2 Pembahasan	66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran	73
DAFTAR PUSTAKA	75
BIODATA PENULIS	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Jenis Tegangan yang Umum Ditemukan Pada Sambungan <i>Adhesive</i> (a) Kompresi (b) <i>Tensile</i> (c) <i>Shear</i> (d) <i>Peel</i> (e) <i>Cleavage</i> (Messler, 2004).....	7
Gambar 2.2	Macam-macam Sambungan <i>Adhesive</i> yang Banyak Digunakan	9
Gambar 2.3	<i>Butt Joint</i>	10
Gambar 2.4	Desain Split Hopkinson Pressure Bar yang Umum Digunakan (Chen & Song, 2011).....	11
Gambar 2.5	Kurva Tegangan-Regangan pada Beban Statis	14
Gambar 2.6	Kurva Tegangan-Regangan <i>Polyurethane Elastomer</i> (PUE) dengan Beban Dinamik pada Pengujian <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> (Fan & Chen, 2019).....	14
Gambar 2.7	Gelombang Tegangan Dalam <i>Bar Components</i> yang (a) Sejajar (b) Tidak Sejajar (Chen & Song, 2011)	17
Gambar 2.8	Kalibrasi Amplitudo <i>Incident Pulse</i> (Chen & Song, 2011).....	18
Gambar 2.9	<i>Incident Pulse</i> Akibat Impedansi yang Berbeda Antara Penumbuk Dengan <i>Incident Bar</i> (Chen & Song, 2011)	18
Gambar 2.10	Penentuan Titik Mulai (Chen & Song, 2011).....	19
Gambar 2.11	Penentuan Titik Mulai <i>Reflected Pulse</i> (Chen & Song, 2011)	19
Gambar 2.12	Penentuan Titik Mulai Kurva Tegangan-Regangan (Chen & Song, 2011).....	20
Gambar 2.13	Diagram Posisi-waktu Perambatan Gelombang Dalam <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> (Chen & Song, 2011).....	20
Gambar 2.14	Bagian Pengujian <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> (Chen & Song, 2011).....	22

Gambar 2.15	Penyebaran Gelombang Pada Eksperimen <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> (Chen & Song, 2011) ...	24
Gambar 2.16	Grafik <i>Load-Deflection</i> Hasil <i>Compression Tests</i> (Almeida & Monteiro, 1995).....	26
Gambar 2.17	Grafik <i>Compression Modulus</i> Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995).....	27
Gambar 2.18	Grafik <i>Yield Strength</i> Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995)	28
Gambar 2.19	Hasil Eksperimen (Almeida & Monteiro, 1995) ..	28
Gambar 2.20	Efek Perubahan Ketebalan <i>Adhesive</i> terhadap <i>Tensile Strength</i> dengan <i>Adherend</i> Baja dan Aluminium (Yokoyama, 2003)	30
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 3.2	Geometri <i>Input Bar</i> pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	35
Gambar 3.3	Geometri <i>Transmitter Bar</i> pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	35
Gambar 3.4	Geometri <i>Striker Bar</i> pada <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	36
Gambar 3.5	Skema Alat Uji <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	36
Gambar 3.6	Alat Uji <i>plit Hopkinson Pressure Bar</i>	37
Gambar 3.7	Diagram Lagrangian <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>	38
Gambar 3.8	Gelombang Regangan pada <i>Incident Bar</i> Hasil Pengujian.....	39
Gambar 3.9	Sinyal Pengujian <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> Tanpa Adanya Spesimen	40
Gambar 3.10	Verifikasi <i>Dynamic Stress Equilibrium</i> pada Kedua Sisi Spesimen	41
Gambar 3.11	Geometri Spesimen Uji	43
Gambar 3.12	Pengukuran <i>Adherend</i> Tanpa <i>Adhesive</i>	43
Gambar 3.13	Penimbangan <i>Epoxy</i> dan <i>Hardener</i> dengan Rasio 2:1	44

Gambar 3.14	Penyambungan <i>Adherend</i> dengan <i>Adhesive</i>	44
Gambar 3.15	Spesimen Siap Diuji	45
Gambar 3.16	<i>Running</i> Proses Pengukuran dengan <i>Dynamic Strain Meter</i>	45
Gambar 3.17	Pengaturan Tampilan Monitor.....	45
Gambar 3.18	Menampilkan Grafik T-Y.....	46
Gambar 3.19	Memastikan Nomor <i>Strain Gage</i> yang akan Dibaca	46
Gambar 3.20	Posisi <i>Striker Bar</i> yang Siap Diluncurkan.....	47
Gambar 3.21	Pengaturan <i>Interval Timer Trigger</i>	47
Gambar 3.22	Memasukkan Nilai <i>Interval Timer Trigger</i>	47
Gambar 3.23	Memilih Jenis <i>Trigger</i> yang akan Digunakan	48
Gambar 3.24	Membuka Pengaturan <i>Balance</i>	48
Gambar 3.25	<i>Dynamic Strain Meter</i> sebelum di <i>Balance</i>	49
Gambar 3.26	<i>Dynamic Strain Meter</i> sesudah di <i>Balance</i>	49
Gambar 3.27	Persiapan Start pada <i>Dynamic Measurement Software</i>	50
Gambar 3.28	Konfirmasi Start pada <i>Dynamic Measurement Software</i>	50
Gambar 3.29	Tampilan Monitor saat <i>Striker Bar</i> siap Diluncurkan	51
Gambar 3.30	Hasil yang Diperoleh dari Pengukuran <i>Dynamic Strain Meter</i>	51
Gambar 3.31	Kurva Regangan terhadap Waktu Hasil dari Pengukuran.....	52
Gambar 3.32	Kurva Hasil Pemotongan Kurva <i>Incident, Reflected, dan Transmitted Strain</i>	53
Gambar 3.33	Grafik Laju Regangan terhadap Waktu pada Percobaan dengan 2 <i>Epoxy</i> dan 1 <i>Hardener</i> dengan Ketebalan <i>Adhesive</i> 2 mm	55
Gambar 3.34	Contoh Kurva Hasil Perhitungan Tegangan dengan Regangan pada Percobaan dengan 2 <i>Epoxy</i> dan 1 <i>Hardener</i> dengan Ketebalan <i>Adhesive</i> 2 mm	57
Gambar 3.35	Contoh Estimasi Nilai <i>Young Modulus</i>	58

Gambar 3.36	Data <i>Young Modulus</i> yang siap Diuji dengan <i>Paired t-test</i>	59
Gambar 3.37	Pemilihan Perhitungan Statistik (<i>Paired t-test</i>)....	59
Gambar 3.38	Memasukkan Data yang akan diolah dengan <i>Paired t-test</i>	60
Gambar 3.39	Mengatur <i>Confidence Level</i> dan <i>Hypothesis</i> yang akan digunakan.....	60
Gambar 3.40	Hasil <i>paired t-test</i> Ekseprimen 2 <i>Epoxy</i> dan 1 <i>Hardener</i> dengan 1 <i>Epoxy</i> dan 1 <i>Hardener</i>	61
Gambar 4.1	Grafik Laju Regangan Terhadap Waktu untuk tiap Variasi Komposisi <i>Epoxy/Hardener</i>	64
Gambar 4.2	Kurva Tegangan-Regangan pada masing-masing Variasi Komposisi <i>Adhesive</i>	65
Gambar 4.3	Pengaruh Komposisi <i>Epoxy</i> dan <i>Hardener</i> terhadap <i>Young Modulus Adhesive Butt Joint</i>	67
Gambar 4.4	Pengaruh Komposisi <i>Epoxy</i> dan <i>Hardener</i> terhadap <i>Strain Maksimum</i> pada <i>Adhesive Butt Joint</i>	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kelebihan dan Kekurangan <i>Adhesive Joint</i>	6
Tabel 4.1 Pengujian <i>Paired t-test</i> tiap Komposisi <i>Adhesive</i>	69

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan *adhesive joint* pada struktur ringan kendaraan semakin berkembang dan melengkapi sambungan mekanis konvensional seperti baut, *riveting*, *soldering*, atau *welding*. Hal ini karena kelebihanannya yang ringan, tahan korosi, dan tumbukan serta mampu menyambungkan material yang berbeda jenis. Lebih dari itu, permukaan sambungannya mampu menopang tegangan kerja secara merata sehingga mengurangi potensi keretakan yang berbahaya bagi struktur kendaraan akibat konsentrasi tegangan.

Adhesive joint banyak digunakan dalam industri otomotif untuk produksi komponen manufaktur, mekanis, dan struktur. Contohnya adalah penggunaan *adhesive joint* pada bagian *bumper*, kaca depan, rem, *wire harness*, *FRP body panels*, kap bagian dalam, dan tangki radiator. Di masa depan, *adhesive joint* juga dapat digunakan untuk menyambungkan rangka mobil modular. Rangka mobil modular adalah komponen mobil yang dapat dipertukarkan, dimana modularitas ini dibuat untuk memudahkan perbaikan, pemeliharaan serta melakukan konfigurasi ulang agar sesuai fungsi yang dibutuhkan. Oleh karena itu, karakterisasi sifat mekanik *adhesive* sangat diperlukan

Penelitian sifat mekanik sambungan *adhesive* dan faktor yang mempengaruhinya banyak dilakukan untuk mendukung penggunaan aplikasi *adhesive* yang semakin luas. **Yokoyama dkk. (2003)** menunjukkan bahwa sifat mekanik *adhesive joint* ditentukan oleh *properties* dari *base material* dan *bulk adhesive*^[3]. Pada penelitian tersebut baru ditemukan adanya pengaruh *properties* akibat penambahan ketebalan *bulk adhesive*. Disisi lain, **Almeida dkk. (1995)** menunjukkan bahwa *compression modulus* dan *yield strength* dari *bulk adhesive* dapat direkayasa dengan memvariasikan komposisi *resin* dan *hardener*^[6]. Dari dua penelitian tersebut muncul sebuah ide untuk meneliti pengaruh variasi komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap nilai *young*

modulus adhesive butt joint. Hipotesa dalam penelitian ini adalah bahwa perubahan komposisi *epoxy/hardener* mempengaruhi nilai *young modulus adhesive* sehingga akan mengubah nilai kekakuan sambungan. Sensitivitas perubahan nilai *young modulus* terhadap perubahan komposisi *epoxy/hardener* juga dapat diketahui dari penelitian. Diharapkan dengan adanya penelitian ini akan lebih mudah merekayasa nilai *young modulus* tanpa perlu memvariasikan ketebalan *adhesive* itu sendiri. Oleh karena itu, penting dilakukan penelitian ini guna memperoleh seberapa besar pengaruh *young modulus* akibat variasi komposisi *epoxy* dan *hardener*.

Adapun penelitian yang akan dilakukan memiliki kesamaan alat uji, jenis *adhesive*, dan spesimen yang sama seperti penelitian yang dilakukan oleh **Yohanes dkk. (2019)**^[11]. Perbedaan pada penelitian ini adalah variasi komposisi *epoxy* dan *hardener* yang mana hal ini belum sempat dilakukan pada penelitian terdahulu. Disamping itu pada penelitian ini menggunakan ketebalan *adhesive* 2 mm karena ketebalan ini memiliki nilai *young modulus* paling tinggi daripada variasi ketebalan lainnya mengikuti hasil yang diperoleh pada penelitian **Yohanes dkk. (2019)**^[11].

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian sambungan *adhesive* untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap kekakuan sambungan pada laju regangan tinggi. alumunium AISI 6061 silinder pejal disambungkan dengan *epoxy adhesive* dan diuji menggunakan *Split Hopkinson Pressure Bar* untuk mendapatkan respon tegangan-regangan. Kekakuan sambungan diwakili oleh nilai *young modulus* yang diestimasi dari slope kurva tegangan-regangan. Metode *paired t-test* digunakan pada data hasil pengujian untuk menentukan pengaruh variasi komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap kekakuan sambungan dan seberapa sensitif nilai kekakuan terhadap perubahan komposisi *epoxy* dan *hardener*. Hasil penelitian ini sangat penting bagi aplikasi praktis, terutama industri struktur dan manufaktur, karena dapat digunakan untuk merekayasa kekakuan sambungan sesuai

kebutuhan. Pengetahuan tentang sensitifitas kekakuan sambungan terhadap perubahan komposisi *epoxy* dan *hardener* sangat penting sebagai panduan praktis bagi industri yang tidak memiliki teknologi kontrol presisi untuk pencampuran *epoxy* dan *hardener*.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini, dirumuskan beberapa permasalahan yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana mendapatkan nilai *young modulus* pada *butt adhesive joint* dari kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari uji SHPB?
2. Bagaimana pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap *young modulus* pada *butt adhesive joint*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan nilai *young modulus* pada *butt adhesive joint* dari kurva tegangan-regangan yang diperoleh.
2. Mengetahui pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap *young modulus* pada *butt adhesive joint*.
3. Mengetahui sensitifitas kekakuan sambungan terhadap perubahan komposisi epoxy dan hardener.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah, yaitu:

1. Ketebalan *adhesive* diatur konstan sebesar $2 \text{ mm} \pm 0,01$.
2. Jenis sambungan yang digunakan adalah *butt joint*.
3. Gelombang yang merambat dalam rangkaian *pressure bar* tidak terdispersi dan merambat sepanjang sumbu axial *pressure bar*.
4. Pengaruh *misalignment* pada *striker bar*, *input bar* dan *output bar* diabaikan.

5. Gaya gesek pada tumpuan dengan *bar components* diabaikan.
6. Pengujian dilakukan pada temperatur ruang.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat, yaitu:

1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian sambungan *adhesive* pada *butt adhesive joint* dengan menggunakan alat *Split Hopkinson Pressure Bar*.
2. Sebagai dasar pengambilan keputusan untuk menentukan perlu tidaknya sebuah kontrol yang presisi terhadap komposisi *epoxy* dan *hardener*.
3. Memberikan peluang rekayasa kekakuan sambungan dengan pengaturan komposisi *epoxy* dan *hardener* pada *butt adhesive joint* agar sesuai dengan kebutuhan.
4. Sebagai rujukan informasi bagi pihak yang akan mengaplikasikan sambungan *butt adhesive joint* pada struktur ringan kendaraan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Adhesive*

Adhesive adalah campuran satu atau dua polimer organik yang bereaksi secara kimia dan menghasilkan polimer baru yang memiliki daya rekat. Dalam industri, *adhesive* dirancang berdasarkan kekuatan yang diperlukan dalam aplikasinya. *Adhesive* berkekuatan rendah digunakan pada kertas dengan sampulnya, sedangkan *adhesive* berkekuatan tinggi digunakan pada struktur mobil dan pesawat terbang. Dibandingkan dengan sambungan mekanis lainnya seperti baut, *riveting*, *soldering*, atau *welding*. *Adhesive* memiliki beberapa keunggulan, antara lain :

1. *Adhesive* mampu mendistribusikan beban ke seluruh area sambungan.
2. *Adhesive* memiliki sifat ketahanan *fatigue* yang baik.
3. Nilai konduktivitas yang rendah pada *adhesive* mengakibatkan korosi *galvanic* antara 2 logam yang berbeda menurun.

Dalam menentukan *adhesive* yang akan digunakan perlu diperhatikan beberapa properti, seperti tingkat perawatan, kemampuan mengisi celah, kekakuan, kemampuan menahan beban, ketahanan terhadap suhu, dan *life-time*. (Robert D.Adams, 2005)

2.2 *Adhesive Joint*

Adhesive joint merupakan teknik penyambungan komponen-komponen (*adherend*) dari material sejenis dan tidak sejenis menggunakan perekat *adhesive*. *Adhesive joint* umumnya tidak dapat dirusak tanpa menghancurkan sambungannya. Dengan teknik ini, semua material mampu disambungkan satu sama lain tanpa dipengaruhi perbedaan material. *Adhesive joint* menjadi solusi dalam beberapa aplikasi tertentu di bidang industri, misalnya untuk konstruksi struktur kendaraan ringan dengan menggunakan baja, aluminium, komposit, dan plastik. Pada tabel 2.1 dapat

dilihat kelebihan dan kekurangan *adhesive joint* dibandingkan dengan metode sambungan lainnya.

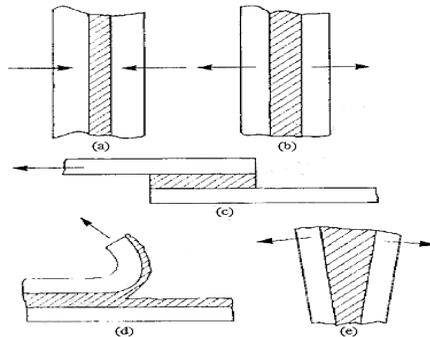
Tabel 2.1 Kelebihan dan Kekurangan *Adhesive Joint*

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

Desain sambungan *adhesive* perlu diperhatikan agar didapatkan kekuatan maksimum pada area yang disambungkan. Faktor utama yang mempengaruhi kekuatan sambungan yaitu, properti mekanis *adhesive* dan *adherend* yang digunakan, tegangan internal yang dihasilkan pada saat dilakukannya proses, pembebanan yang akan diberikan pada sambungan, dan geometri

sambungan. Sambungan *adhesive* harus didesain untuk meminimalisir konsentrasi tegangan dan memaksimalkan area yang disambungkan. Untuk keperluan industri, desain sambungan juga perlu dipertimbangkan berdasarkan batasan produksi, fasilitas yang dimiliki, biaya produksi, dan sebagainya.

Jenis tegangan yang umum ditemukan pada sambungan *adhesive* ditunjukkan pada gambar 2.1. Jenis tegangan tersebut merupakan tegangan kompresi, *shear*, *tensile*, *cleavage*, dan *peel*. Kelima jenis tegangan tersebut dapat terjadi secara individual atau dalam kombinasi.



Gambar 2.1 Jenis Tegangan yang Umum Ditemukan Pada Sambungan *Adhesive* (a) Kompresi (b) *Tensile* (c) *Shear* (d) *Peel* (e) *Cleavage* (Messler, 2004)

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

Tegangan *tensile* bekerja tegak lurus terhadap bidang sambungan dan menarik kedua *adherend* ke arah luar. Secara teori,

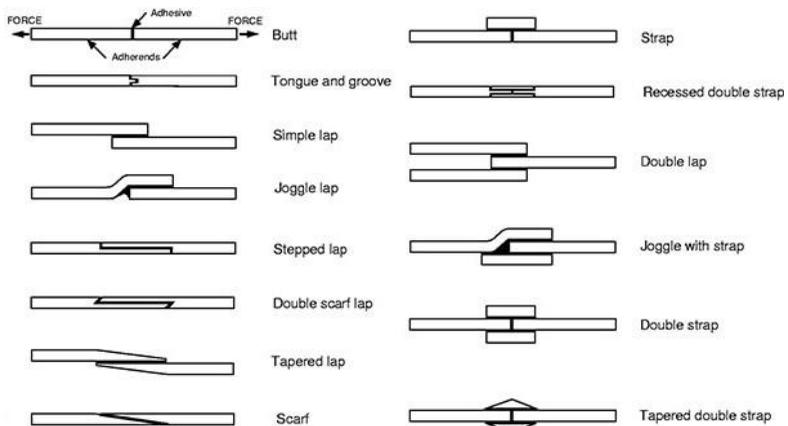
tegangan pada permukaan *adherend* dan di dalam *adhesive* terdistribusi secara merata. Pada kenyataannya, *offsets* pada sambungan, *bending* pada *adherend*, dan komplikasi lainnya diakibatkan distribusi tegangan yang tidak seragam. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *peel* ataupun *cleavage*. Pada sambungan *adhesive* yang berada dalam kondisi pembebanan tarik, *adherend* harus cukup tebal untuk mencegah terjadinya defleksi atau *bending*.

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

Tegangan *peel* merupakan jenis pembebanan di luar bidang sambungan yang berusaha memisahkan sambungan secara tidak merata. Pada umumnya, beban *peel* akan memisahkan sambungan dari ujung sambungan. Beban *peel* dapat terjadi apabila salah satu atau kedua *adherend* bersifat fleksibel dan mampu berdefleksi, hal ini mengakibatkan tegangan yang sangat tinggi akan terjadi pada permukaan antara *adhesive* dan *adherend*. Beban *peel* harus dicegah sebisa mungkin. *Cleavage* merupakan pembebanan yang serupa dengan *peel*, namun *cleavage* memberikan gaya pada salah satu ujung struktur sambungan hingga terjadinya perpisahan. *Cleavage* terjadi apabila gaya atau momen tarik *offset* diaplikasikan. Hal ini akan menyebabkan tegangan didistribusikan secara tidak merata. Sama seperti *peel*, *cleavage* harus dihindari sebisa mungkin.

Desain sambungan yang sederhana membutuhkan biaya yang lebih kecil dan berfungsi dengan baik pada tingkat beban yang rendah

dan sederhana, sedangkan untuk tingkat beban yang tinggi, dibutuhkan desain sambungan yang lebih kompleks. Sambungan *adhesive* yang ideal harus mampu mencegah kegagalan sambungan. Berikut beberapa jenis sambungan *adhesive* yang paling umum dapat dilihat pada gambar 2.2.



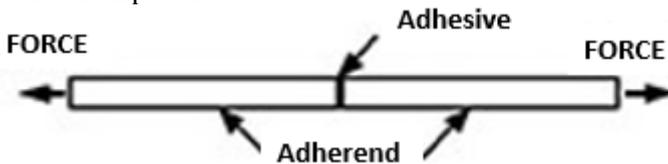
Gambar 2.2 Macam-macam Sambungan *Adhesive* yang Banyak Digunakan

Butt joint atau sambungan tumpul merupakan salah satu jenis sambungan *adhesive* yang paling efisien dan salah satu sambungan yang banyak diaplikasikan, salah satunya terdapat pada pengerjaan pengelasan konstruksi kapal. Penyambungan dengan sambungan *butt* pada umumnya ditemukan antara pelat yang memiliki ketebalan yang sama, tetapi dapat digunakan juga pada penyambungan antara pelat yang berbeda ketebalan. Pada sambungan *butt*, *stress* relative seragam pada pusat, spesimen kombinasi *stress* normal.

Pada sambungan *butt*, tegangan geser relatif kecil serta puncak dari tegangan geser muncul pada tepi dari lapisan *adhesive*. Sambungan *butt* biasa digunakan pada *adherends* tipe *axisymmetric*, persegi, dan persegi panjang yang secara umum *adherends* tersebut digunakan untuk pengujian *adhesive* terhadap

regangan, tegangan, dan *tensile*. Sambungan *butt* jarang digunakan dalam situasi tumpuan praktis, hal ini dikarenakan sambungan *butt* mudah mengalami retak akibat *bending* sederhana karena *peel* atau tekanan tinggi yang dihasilkan meskipun sambungan *butt* kuat dalam menahan tegangan, kompresi, dan geser. Disamping itu, sambungan *butt* memiliki beberapa keunggulan salah satunya mudah dalam menentukan sifat mekanik dari struktural perekat serta dalam perakitannya. (Robert D.Adams, 2005)

Sensitivitas *Butt Adhesive Joint* terhadap komposisi *epoxy* dan *hardener* adalah seberapa besar perubahan yang terjadi pada nilai *Young Modulus* akibat perubahan komposisi *epoxy* dan *hardener* yang diterapkan pada *Butt Joint*. Jika didapatkan selisih yang besar pada *Young Modulus* antara komposisi *adhesive* yang satu dengan lainnya maka dapat disimpulkan bahwa nilai sensitivitas dari *Butt Adhesive Joint* sangat tinggi, begitu juga dengan sebaliknya apabila selisih nilai *Young Modulus* antara komposisi *adhesive* yang satu dengan lainnya sangat kecil maka nilai sensitivitas dari *Butt Adhesive Joint* sangat kecil hal ini dapat diartikan bahwa tidak ada pengaruh yang signifikan terhadap perubahan komposisi.

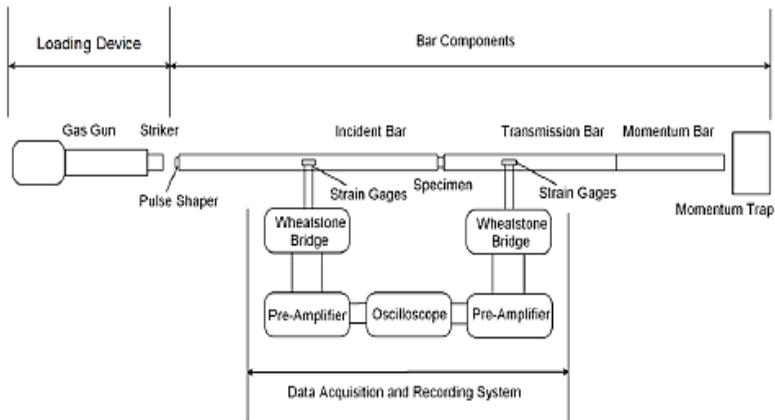


Gambar 2.3 *Butt Joint*

2.3 *Split Hopkinson Pressure Bar*

Split Hopkinson Pressure Bar atau biasa dikenal juga sebagai *Kolsky Bar* merupakan sebuah alat karakterisasi untuk respons mekanis dari material yang berdeformasi pada laju regangan tinggi. *Split Hopkinson Pressure Bar* diciptakan pertama kali oleh Herbert Kolsky pada tahun 1949 untuk mengukur respons tegangan-regangan material dalam pembebanan gaya tumbukan. Rancangan *Split Hopkinson Pressure Bar* milik Kolsky kemudian dikembangkan oleh Krafft dengan menambahkan penggunaan

strain gage pada *Split Hopkinson Pressure Bar* untuk mengukur gelombang tegangan. Saat ini, *Split Hopkinson Pressure Bar* yang umum digunakan terdiri dari 3 komponen utama yang dapat dilihat pada gambar 2.4, yaitu *loading device*, *bar components*, dan *data acquisition and recording system*.



Gambar 2.4 Desain Split Hopkinson Pressure Bar yang Umum Digunakan (Chen & Song, 2011)

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

Pembebanan dinamis yang dilakukan *Split Hopkinson Pressure Bar* adalah suatu keadaan dimana perubahan pada sebuah

elemen terjadi terhadap waktu dalam konteks gaya yang bekerja pada struktur tersebut, dimana pada beban dinamis ini bersifat tidak tetap serta mempunyai karakteristik besaran dan arah yang berubah dengan cepat. Deformasi pada struktur akibat beban dinamik yang diberikan *Split Hopkinson Pressure Bar* tidak sampai berubah hingga plastis. Pada saat bergetar bahan dari struktur akan melakukan resistensi/perlawanan terhadap getaran/gerakan, dan pada umumnya dikatakan bahan yang bersangkutan mempunyai kemampuan untuk meredam getaran. Selain itu, pada *Split Hopkinson Pressure Bar* juga mengalami pembebanan laju regangan tinggi dimana pembebanan dilakukan dengan kecepatan rambat yang sangat tinggi hingga mencapai 5000 m/s.

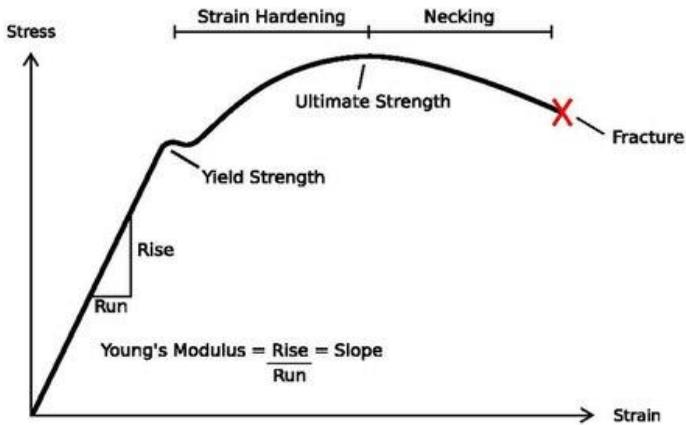
Untuk memperoleh hasil eksperimen yang akurat, terdapat beberapa kriteria yang harus dimiliki oleh *Split Hopkinson Pressure Bar*. *Incident* dan *transmission bar* harus difabrikasi dengan menggunakan material dan diameter yang sama. *Incident* dan *transmission bar* harus elastis agar dapat mengaplikasikan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

2.4 Kurva Tegangan-Regangan

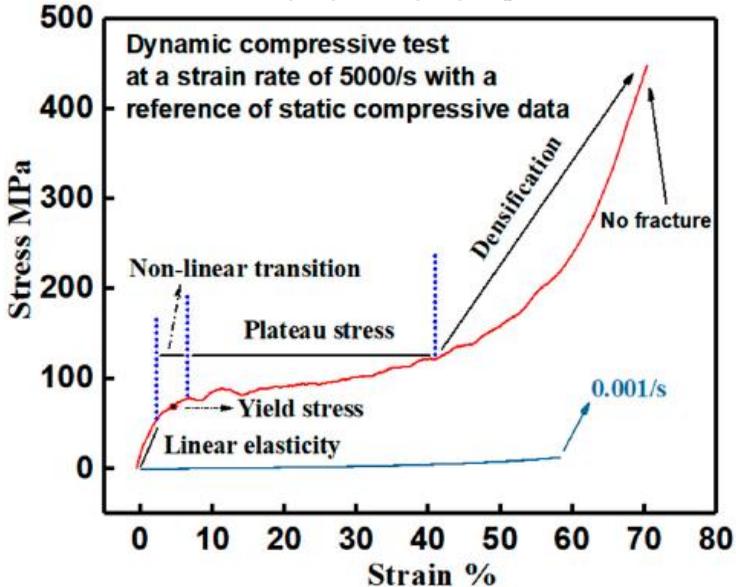
Kurva tegangan-regangan merupakan grafik pengukuran yang penting dari sifat mekanik material. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, tegangan yang didapatkan akan di plot seiring dengan regangan yang terjadi. Kurva tegangan-regangan setiap

material mempunyai bentuk yang berbeda. Bentuk setiap kurva di pengaruhi oleh struktur dari material. Dimana material yang sama dengan struktur dimensi luas penampang yang lebih kecil akan berdampak terhadap nilai tegangan yang lebih besar sehingga mampu mengakibatkan bentuk dari kurva tegangan-regangan berbeda. Begitu juga dengan jenis material yang berbeda memiliki kemampuan menerima tegangan dan mengalami regangan yang berbeda. (Jitendra Pratap Singh, 2016)

Kurva tegangan-regangan terbagi menjadi tiga region yaitu linear elastic region, strain hardening region, dan necking region seperti gambar 2.5. 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 2.5 Kurva Tegangan-Regangan pada Beban Statis



Gambar 2.6 Kurva Tegangan-Regangan *Polyurethane Elastomer* (PUE) dengan Beban Dinamik pada Pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* (Fan & Chen, 2019)

2.5 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 :

$$k = E \cdot \frac{A}{L} \quad (2.1)$$

Dimana :

k = Kekakuan / Stiffness (N/m)

E = Modulus Elastisitas (N/m²)

A = Luas Penampang Material (m²)

L = Panjang Material (m)

2.6 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 2.5. 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 :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Dimana :

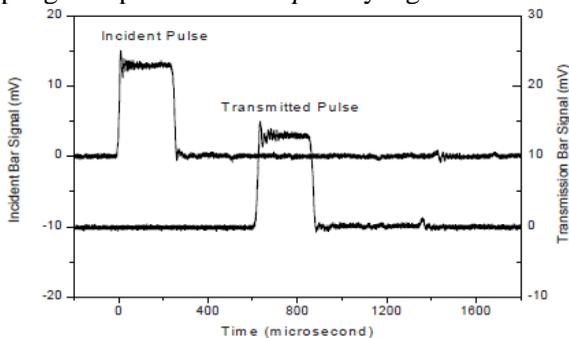
E = Modulus Elastisitas (N/m^2)

σ = Tegangan (N/m^2)

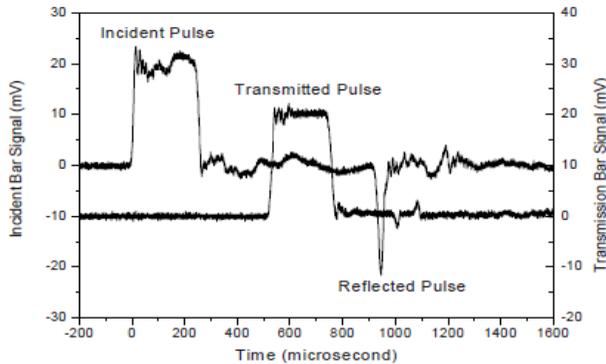
ε = Regangan

2.7 Kalibrasi pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

Split Hopkinson Pressure Bar perlu dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam memeriksa kesejajaran sistem *bar* adalah dengan meluncurkan penumbuk pada *incident bar* yang bersentuhan langsung dengan *transmission bar* tanpa ada spesimen di antaranya. Penumbuk dan *incident bar* yang sejajar akan menghasilkan sebuah *incident pulse* dengan profil trapesium seperti yang pada gambar 2.7(a). Apabila *incident bar* tidak sejajar dengan *striker*, maka *incident pulse* akan terdistorsi dengan *baseline* yang fluktuatif seperti pada gambar 2.7(b). Hal ini disebabkan *transmission bar* bersentuhan langsung dengan *incident bar*, *incident pulse* dalam *incident bar* akan ditransmisikan ke dalam *transmission bar* tanpa adanya pulsa yang direfleksikan. Selain itu, ketidaksejajaran antara *incident bar* dengan *transmission bar* akan mengakibatkan terbentuknya sebuah *reflected pulse*. Selain itu, profil *transmitted pulse* akan menyimpang dari profil *incident pulse* yang sudah ada.



(a)



(b)

Gambar 2.7 Gelombang Tegangan Dalam *Bar Components* yang
 (a) Seajar (b) Tidak Seajar (Chen & Song, 2011)

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

$$C_B = \frac{2l}{\Delta t} \quad (2.31)$$

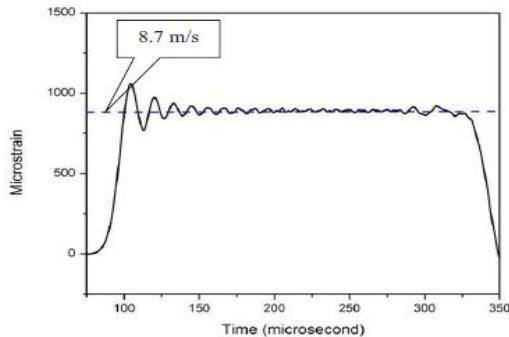
Dimana :

C_B = Kecepatan tumbuk

l = Jarak antara strain gage dengan ujung spesimen

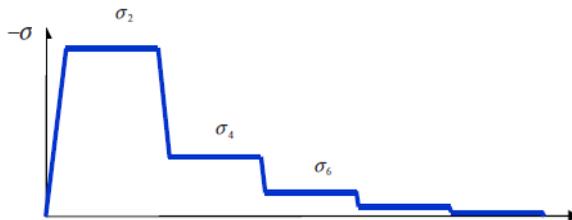
Δt = Interval waktu antara *incident pulse* dengan *reflected pulse*

Gambar 2.8 menunjukkan regangan aktual yang diukur pada *incident bar* dan amplitudo yang diprediksikan dengan kecepatan penumbukan 8.7 m/s.



Gambar 2.8 Kalibrasi Amplitudo *Incident Pulse*
(Chen & Song, 2011)

Persamaan di atas hanya dapat digunakan apabila penumbuk memiliki impedansi gelombang yang sama dengan *incident bar*. Impedansi gelombang yang tidak sesuai antara penumbuk dengan *incident bar* akan menghasilkan perubahan pada profil dan amplitudo dari *incident pulse*. Apabila impedansi penumbuk lebih tinggi, *incident pulse* akan menunjukkan penurunan amplitudo secara progresif seperti pada gambar 2.9. Hal ini dikarenakan momentum penumbuk tidak dapat ditransferkan sepenuhnya pada *incident bar*.



Gambar 2.9 *Incident Pulse* Akibat Impedansi yang Berbeda
Antara Penumbuk Dengan *Incident Bar* (Chen & Song, 2011)

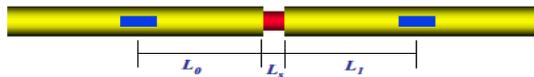
Penentuan titik mulai setiap pulsa dapat mempengaruhi nilai kurva tegangan-regangan secara signifikan. Saat mensinkronisasikan ketiga sinyal, titik mulai *incident pulse* (T_1)

diperkirakan berdasarkan perkiraan titik mulai *incident pulse*, titik mulai *reflected pulse* (T_R) dan *transmitted pulse* (T_T) dapat ditentukan melalui persamaan:

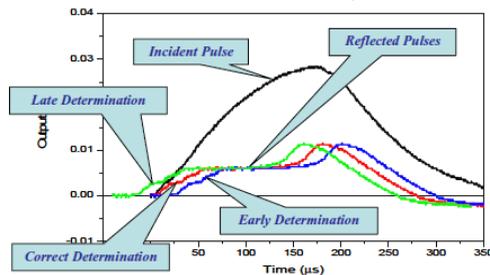
$$T_R = T_I \frac{2L_0}{C_B} \quad (2.4)$$

$$T_T = T_I \frac{L_0 + L_1}{C_B} + \frac{L_S}{C_S} \quad (2.5)$$

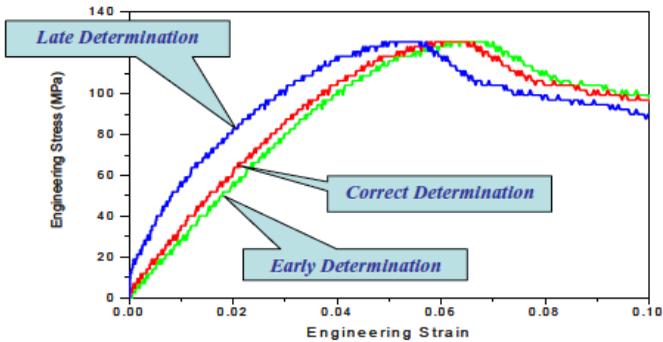
Dimana L_0 dan L_1 merupakan jarak dari lokasi *strain gage* pada *incident bar* dan *transmission bar* ke permukaan spesimen, secara berurutan ditunjukkan pada gambar 2.10. C_s merupakan kecepatan gelombang tegangan dalam spesimen. Pada gambar 2.11 menunjukkan contoh *reflected pulse* dengan penentuan titik mulai yang benar. Penentuan titik mulai yang benar akan mempengaruhi keseimbangan tegangan di sepanjang spesimen. Kesalahan titik mulai *reflected pulse* dapat mengakibatkan kesalahan perhitungan gaya pada ujung depan spesimen. Kesalahan titik mulai juga dapat mengakibatkan kesalahan pada kurva tegangan-regangan seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.10 Penentuan Titik Mulai (Chen & Song, 2011)



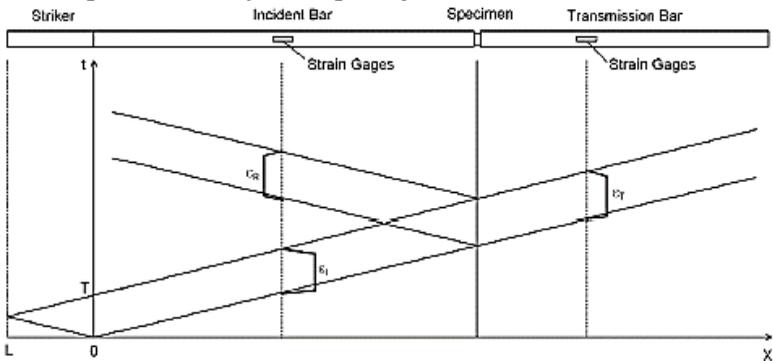
Gambar 2.11 Penentuan Titik Mulai *Reflected Pulse* (Chen & Song, 2011)



Gambar 2.12 Penentuan Titik Mulai Kurva Tegangan-Regangan (Chen & Song, 2011)

2.8 Perambatan Gelombang pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

Diagram posisi perambatan gelombang di dalam *bar* terhadap waktu ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Diagram Posisi-waktu Perambatan Gelombang Dalam *Split Hopkinson Pressure Bar* (Chen & Song, 2011)

Apabila penumbuk memiliki material dan diameter yang sama dengan *incident bar*, amplitudo tegangan atau regangan dari pulsa *incident*, σ_I atau ϵ_I yang dihasilkan oleh penumbuk bergantung pada kecepatan tumbukan, v_{st} ,

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \rho_B C_B v_{st} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{C_B} \quad (2.7)$$

Dimana :

ρ_B = Density dari material

C_B = Kecepatan elastis gelombang material

Δt = Interval waktu antara *incident pulse* dengan *reflected pulse*

σ_I = Tegangan pada *incident bar*

ε_I = Regangan pada *incident bar*

v_{st} = Kecepatan tumbukan *striker bar*

Dengan asumsi bahwa gelombang tegangan merambat pada *incident bar* dan *transmission bar* tanpa adanya penyebaran gelombang, terdapat 3 pulsa regangan yang diukur (Gambar 2.14). v_1 dan v_2 dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$v_1 = C_B (\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (2.8)$$

$$v_2 = C_B \varepsilon_T \quad (2.9)$$

Dimana :

v_1 = Kecepatan partikel *incident bar*

v_2 = Kecepatan partikel *transmitter bar*

ε_R = Regangan *reflected*

ε_T = Regangan *transmitted*

Dimana I, R, dan T merepresentasikan pulsa *incident*, *reflected*, dan *transmitted* secara berurutan. Laju regangan rata-rata dan regangan dalam spesimen dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{C_B}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (2.10)$$

$$\varepsilon = \frac{C_B}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (2.11)$$

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

$$\sigma_1 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (2.12)$$

$$\sigma_2 = \frac{A_B}{A_S} \cdot E_B \cdot \varepsilon_T \quad (2.13)$$

Dimana :

A_b = Luas penampang bar

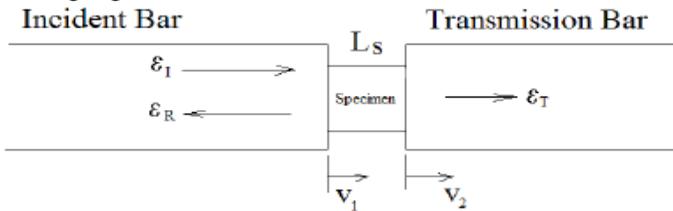
A_s = Luas penampang spesimen

E_b = Modulus young bar

ε_R = Regangan *reflected*

σ_1 = Tegangan *incident bar*

σ_2 = Tegangan *transmitter bar*



Gambar 2.14 Bagian Pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* (Chen & Song, 2011)

Dengan mengasumsikan keseimbangan tegangan yang dapat dinyatakan sebagai:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad (2.14)$$

Maka diperoleh:

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (2.15)$$

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

$$\dot{\varepsilon} = -2 \frac{C_B}{L_S} \varepsilon_R \quad (2.16)$$

$$\varepsilon = -2 \frac{C_B}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (2.17)$$

$$\sigma = \frac{A_B}{A_s} E_B \varepsilon_T \quad (2.18)$$

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

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_B}{A_s} \cdot E_B (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (2.19)$$

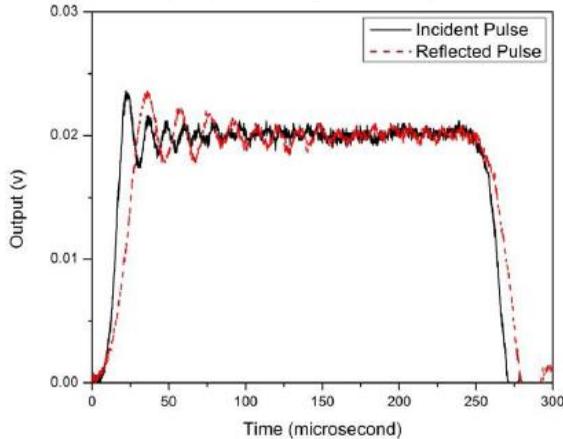
Semua persamaan di atas diperoleh dari konservasi massa dan momentum dengan asumsi perambatan gelombang satu dimensi.

2.9 Penyebaran Gelombang pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

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

Dalam eksperimen menggunakan *Split Hopkinson Pressure Bar*, pulsa ideal yang dihasilkan oleh tumbukan pada *incident bar* terdiri dari spektrum frekuensi. Setiap komponen frekuensi memiliki kecepatan perambatannya masing-masing. Komponen pulsa dengan frekuensi yang lebih tinggi tertinggal oleh komponen pulsa dengan frekuensi yang lebih rendah setelah merambat dengan jarak tertentu. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya penyebaran gelombang seperti yang ditunjukkan pada

gambar 2.15. *Incident pulse* dan *reflected pulse* pada gambar 2.15 diukur dengan menggunakan *strain gage* yang sama pada pertengahan *incident bar*, sehingga perbedaan yang ditunjukkan merupakan akibat dari penyebaran gelombang.



Gambar 2.15 Penyebaran Gelombang Pada Eksperimen *Split Hopkinson Pressure Bar* (Chen & Song, 2011)

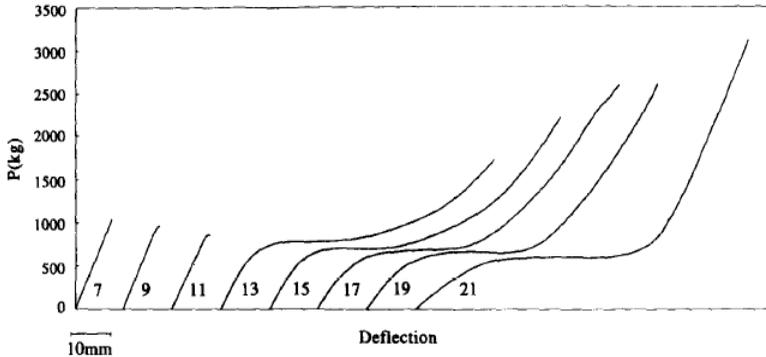
2.10 Penelitian Terdahulu

2.10.1 *The Effect of the Resin/Hardener Ratio on the Compressive Behavior of an Epoxy System*

Penelitian dilakukan oleh Almeida dan Monteiro untuk melihat pengaruh rasio *resin/hardener* pada *epoxy* saat diberikan gaya tekan. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan delapan macam rasio *resin/hardener* pada *epoxy*. Eksperimen ini dilakukan dengan melakukan kompresi pada spesimen serta hasil yang diperoleh berkaitan dengan jaringan makromolekul yang berkembang pada spesimen. Spesimen yang disambungkan dengan komposisi *resin* yang lebih banyak, didapatkan sifat *brittle* pada sambungan yang dibuktikan dengan berkembangnya makromolekul yang kaku pada struktur. Pada spesimen yang disambungkan dengan komposisi *hardener* yang lebih banyak, didapatkan perilaku fraktur pada sambungan spesimen dengan nilai kapasitas deformasi besar.

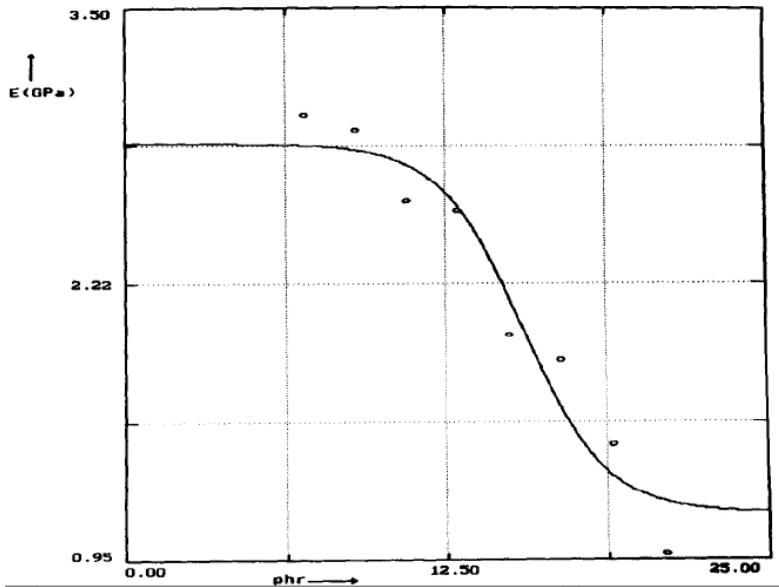
Eksperimen ini dilakukan dengan silinder sepanjang 20 mm, diameter 10 mm, dan ketebalan *epoxy* 2 mm kemudian diuji dengan alat tes yang digerakkan secara mekanik. Dengan kecepatan yang digunakan tumbuk 1 mm/min dan 10 spesimen di tes per rasio phr. Baik *yield strength* dan modulus elastisitas telah ditentukan. Untuk menjaga kesejajaran spesimen serta menjamin muatan aksial yang akan diberikan, digunakan *hardened steel ball joint* sesuai dengan rekomendasi *ASTM standard D-695*. Ratio *resin/hardener* menggunakan variasi antara 7 hingga 21 phr dari *hardener* per 100 bagian dari *resin* seperti pada gambar 2.16. Jumlah *resin* dan *hardener* ditimbang ± 0.0002 g dengan *standart deviasi* 0.5%.

Sistem pencampuran *resin-hardener* menggunakan acuan rasio *stoichiometric* dengan nilai setimbanginya pada angka 13 phr. Pada eksperimen ini dilakukan dengan rentang kaya akan *epoxy* dan kaya akan *amine*, untuk yang kaya *epoxy* nilainya berkisar phr < 13 dan yang kaya akan *amine* nilainya berkisar phr > 13. Kemudian *epoxy* dan *hardener* diaduk secara menyeluruh dan dituangkan ke dalam cetakan silikon terbuka berbentuk bar. Campuran *adhesive* ini dibuat pada suhu ruang sesuai rekomendasi pabrik. Dibutuhkan waktu minimal 7 hari setelah spesimen disambungkan dengan *adhesive* sebelum dilakukan pengujian secara mekanis.

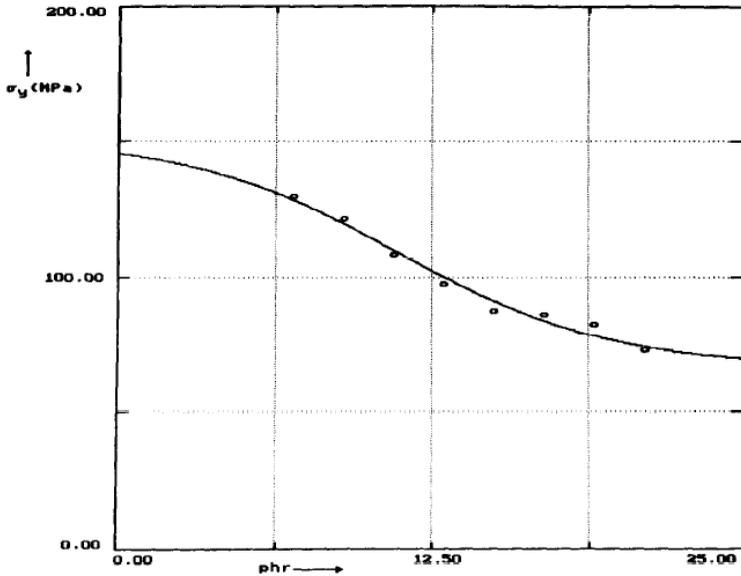


Gambar 2.16 Grafik *Load-Deflection* Hasil *Compression Tests* (Almeida & Monteiro, 1995)

Setelah dilakukan pengujian terhadap spesimen dengan berbagai rasio resin-hardener didapatkan kurva *load-deflection* pada gambar 2.16. Melalui kurva ini dapat disimpulkan bahwa semakin banyak kandungan epoxy pada *adhesive* mengakibatkan semakin rendah nilai *load-deflection* spesimen dengan kandungan *hardener* yang lebih banyak. Selain itu didapatkan nilai *modulus young* paling tinggi pada komposisi 7 phr sebesar 3.00 ± 0.1 GPa, kemudian nilai *modulus young* terendah pada komposisi 21 phr dimana didapatkan nilai sebesar 0.97 ± 0.2 . Nilai-nilai yang didapatkan pada percobaan ini digambarkan kedalam kurva seperti pada gambar 2.17, dimana nilai-nilai *modulus young* menurun seiring bertambahnya nilai phr. Pada gambar 2.18 dijelaskan melalui grafik *yield strength* bahwa semakin besar nilai phr mengakibatkan nilai *yield strength* semakin kecil. Didapatkan pula data-data *modulus young* dan *yield strength* secara lebih detail di setiap phr pada gambar 2.19.



Gambar 2.17 Grafik *Compression Modulus* Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995)



Gambar 2.18 Grafik *Yield Strength* Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995)

Experimental Results

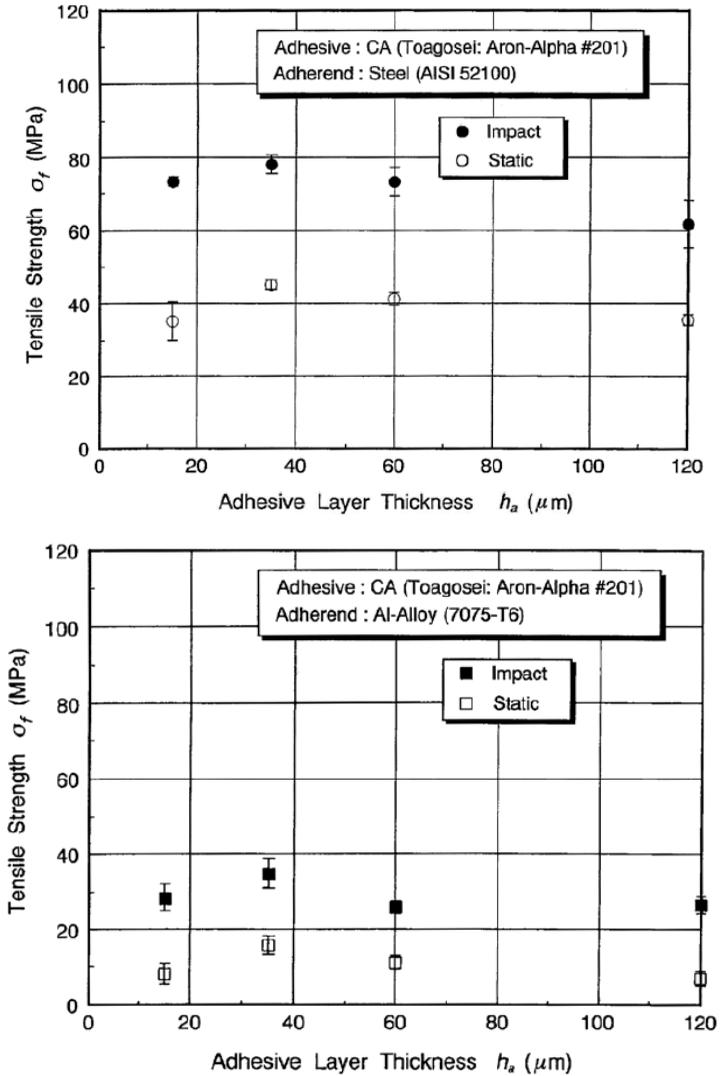
<i>phr</i>	<i>E</i> (GPa)	σ_y (MPa)
7	3.00 ± 0.1	129.4 ± 3.0
9	2.93 ± 0.1	121.0 ± 5.3
11	2.60 ± 0.1	108.1 ± 4.0
13	2.55 ± 0.3	97.0 ± 7.1
15	1.98 ± 0.1	87.2 ± 8.1
17	1.86 ± 0.2	85.7 ± 3.5
19	1.48 ± 0.1	82.0 ± 5.0
21	0.97 ± 0.2	72.5 ± 2.8

Gambar 2.19 Hasil Eksperimen (Almeida & Monteiro, 1995)

2.10.2 Experimental Determination of Impact Tensile Properties of Adhesive Butt Joints with The Split Hopkinson Bar

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yokoyama ini, *tensile strength* dan energy serapan dari *adhesive butt-joints* pada pembebanan dengan laju regangan tinggi dilakukan dengan uji *Split Hopkinson Bar* dengan spesimen silinder. *Adhesive single-component cyanoacrylate* dan dua adheren yang berbedaa digunakan pada uji adhesi. *Impact tensile strength* dari *cyanoacrylate adhesive butt-joint* ditentukan dengan meninjau histori tegangan tarik pada uji *failure*. Daya serap energi diperoleh dengan integrasi numerik dari data beban tarik dinamis dan data deformasi *adhesive*. *Axyssimetric finite element* dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan pada lapisan *adhesive* dari *cyanoacrylate adhesive butt- joint*.

Yokoyama melakukan penelitian efek dari *loading rate*, ketebalan *adhesive*, bahan *adherend* terhadap besar *tensile strength* dan daya serapan energi dari *cyanoacrylate adhesive butt-joint* secara rinci. Hasil yang ditunjukkan pada penelitian ini terlihat pada gambar 2.20. Pada gambar tersebut terlihat bahwa bahan *adherend* dan ketebalan *adhesive* memiliki pengaruh signifikan terhadap *tensile strength* sambungan.



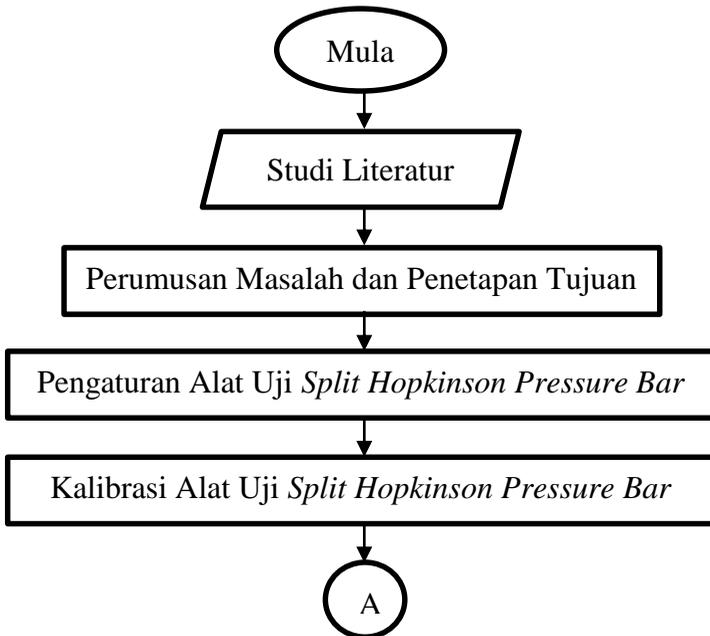
Gambar 2.20 Efek Perubahan Ketebalan *Adhesive* terhadap *Tensile Strength* dengan *Adherend* Baja dan Aluminium (Yokoyama, 2003)

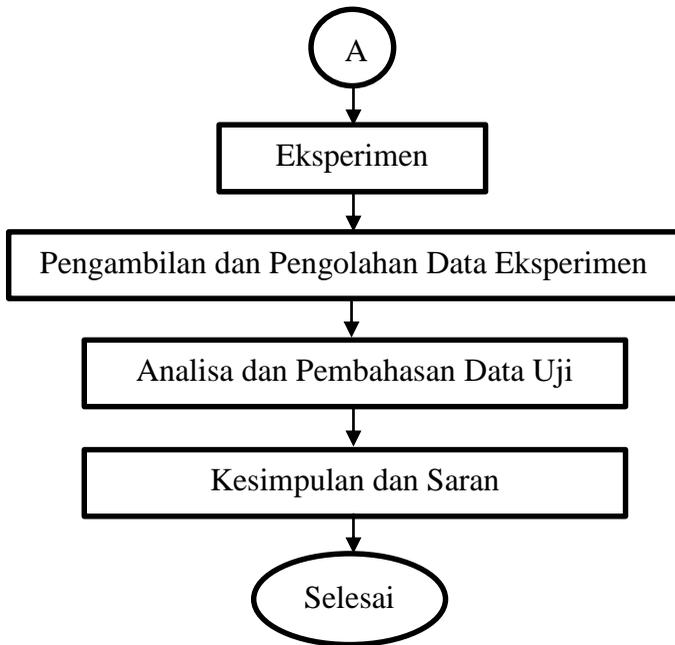
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penulisan metode penelitian pada bab ini bertujuan untuk menjelaskan tahapan dari penelitian yang dilakukan yaitu pembuatan spesimen, pengujian dengan *split hopkinson pressure bar*, dan pengolahan data dengan tujuan mendapatkan nilai *young modulus*. Setelah mendapatkan nilai *young modulus* nantinya akan dibuktikan ada tidaknya pengaruh serta besar deviasi yang terjadi dari variasi komposisi *epoxy* dan *hardener* pada *adhesive butt joint* dengan menggunakan *paired t-test*.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan melalui diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 adalah gambar diagram alir penelitian, dengan merumuskan tujuan penelitian, tahapan-tahapan dalam proses penelitian ini antara lain:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan langkah pertama yang dilakukan, guna menentukan ruang lingkup permasalahan dan mencari referensi yang berkaitan dengan penelitian ini. Studi literatur dan referensi yang digunakan bersumber dari buku teks dan jurnal ilmiah. Materi yang diperoleh melalui studi literatur terdiri atas dasar teori *adhesive*, *adhesive joint*, alat uji *split hopkinson pressure bar*, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan tugas akhir ini.

2. Perumusan masalah dan penetapan tujuan penelitian

Perumusan masalah dalam penelitian ini menjawab masalah yang terdapat pada latar belakang dari penelitian ini. Perumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana mendapatkan nilai *young modulus* pada *butt adhesive joint* dari kurva tegangan-regangan dan mencari pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap *young modulus* pada *butt adhesive joint*. Sedangkan tujuan penelitian ini adalah memperoleh seberapa besar pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap *young modulus* pada *butt adhesive joint*.

3. Pengaturan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*
Pengaturan alat uji ini terdiri dari beberapa tahap seperti memeriksa posisi dari *strain gage*, mengatur posisi *striker*, *input* dan *output bar*, serta melakukan *balance* terhadap *dynamic strainmeter*. Setelah itu baru bisa dilakukan kalibrasi serta pengujian spesimen.
4. Kalibrasi alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*
Kalibrasi ini perlu dilakukan untuk mendapatkan nilai pengujian yang dapat dibandingkan setiap melakukan eksperimen. Adapun beberapa kriteria yang harus dipenuhi dalam tahap kalibrasi ini seperti kecepatan rambat mendekati 5100 m/s,
5. Eksperimen
Eksperimen ini melibatkan beberapa tahap seperti pembuatan spesimen dengan *adherend* silinder pejal dengan variasi komposisi *epoxy* dan *hardener* yang telah ditentukan, kemudian setelah spesimen jadi baru dilakukan pengujian dengan alat uji yaitu *Split Hopkinson Pressure Bar*.
6. Pengambilan dan pengolahan data eksperimen
Setelah eksperimen dilakukan langkah selanjutnya adalah pengambilan data dari *strain gage* melalui *dynamic strainmeter* yang akan ditampilkan pada

komputer. Kemudian data yang didapatkan akan diolah dengan software matlab untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan. Setelah itu akan ditarik slope dari kurva tegangan-regangan untuk didapatkan nilai *young modulus*. Dimana nilai *young modulus* ini akan dilakukan uji *paired t-test* dengan menggunakan software minitab untuk menentukan seberapa besar pengaruh yang terjadi akibat variasi komposisi *epoxy* dan *hardener*.

7. Analisa dan pembahasan data uji
 Dalam analisa dan pembahasan data uji akan diketahui hubungan antara variasi komposisi *adhesive* pada sambungan tipe *butt* terhadap nilai *young modulus*. Pembahasan dan penjelasan analisa tersebut akan digunakan sebagai acuan dalam menarik kesimpulan.
8. Kesimpulan dan saran
 Dari hasil analisa yang telah dilakukan akan dibuat kesimpulan dari penelitian ini. Kesimpulan menjawab tujuan penelitian serta memaparkan poin penting pembahasan hasil eksperimen. Selain itu, akan disampaikan pula saran untuk penelitian selanjutnya agar didapatkan hasil yang lebih baik.

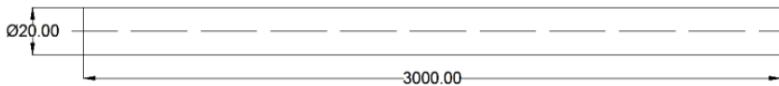
3.2 Spesifikasi *Split Hopkinson Pressure Bar*

Alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* merupakan peralatan yang digunakan pada penelitian ini guna mendapatkan nilai *young modulus* pada *butt adhesive joint*. Adapun beberapa komponen penting yang terdapat pada *Split Hopkinson Pressure Bar* antara lain *incident bar*, *striker bar*, *transmitter bar*, *strain gage*, *strain meter*, jembatan *wheatstone* dan komputer. Dimana skema dari peralatan ini dapat dilihat pada gambar 3.5 serta rancangan dari alat uji yang saya gunakan seperti pada gambar 3.6.

Adapun beberapa spesifikasi komponen pada *Split Hopkinson Pressure Bar* yang saya gunakan pada penelitian ini seperti :

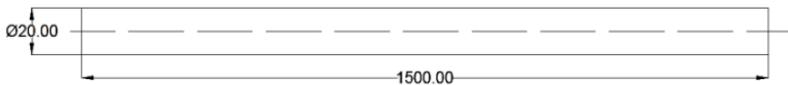
1. *Strain gage*
 Tipe *strain gage* = Kyowa KFGS-2N-120-11 L3M2R
Gage factor = $2.08 \pm 1.0 \%$
Gage resistance = $120.4 \pm 1.0 \%$ Ω
Gage length = 2 mm

2. *Input bar*
 Bahan = Alumunium AISI 6061
 Geometri = Silinder Pejal
 Panjang = 3000 mm
 Diameter = 20 mm



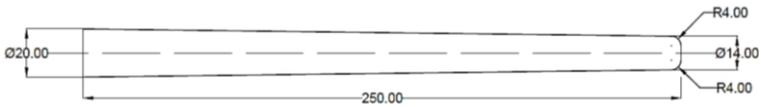
Gambar 3.2 Geometri *Input Bar* pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

3. *Transmitter bar*
 Bahan = Alumunium AISI 6061
 Geometri = Silinder Pejal
 Panjang = 1500 mm
 Diameter = 20 mm



Gambar 3.3 Geometri *Transmitter Bar* pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

4. *Striker bar*
 Bahan = Alumunium AISI 6061
 Geometri = Silinder Pejal dengan *chamfer*
 Panjang = 250 mm
 Diameter = 20 mm dan 14 mm



Gambar 3.4 Geometri *Striker Bar* pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

5. *Strain meter*

Tipe

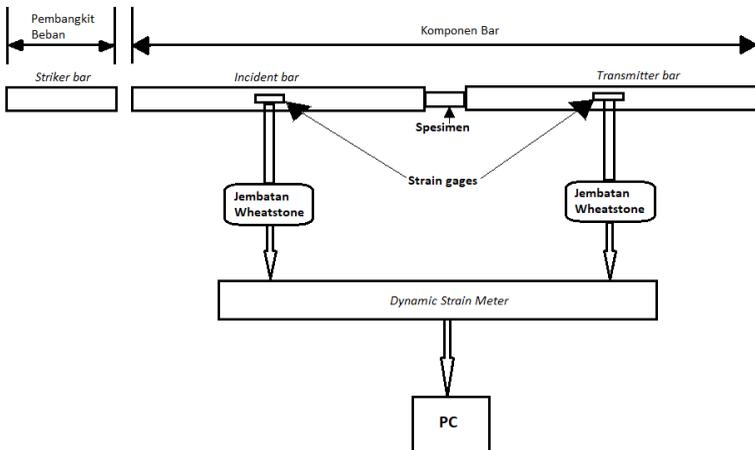
= *Dynamic Strain Meter*

DRA-101C

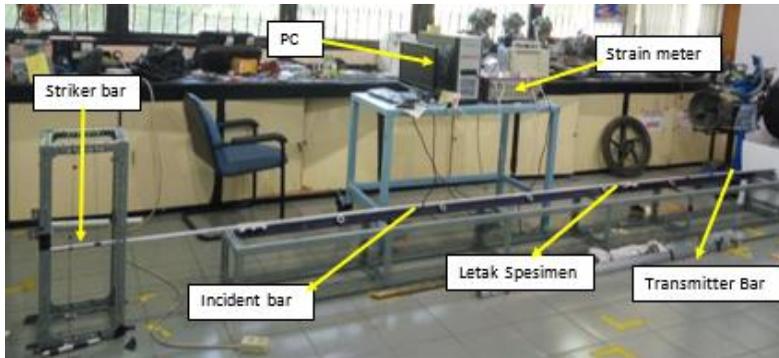
Sampling rate

= 0.05 ms

Frekuensi *sampling* (f_s) = 20.000 Hz

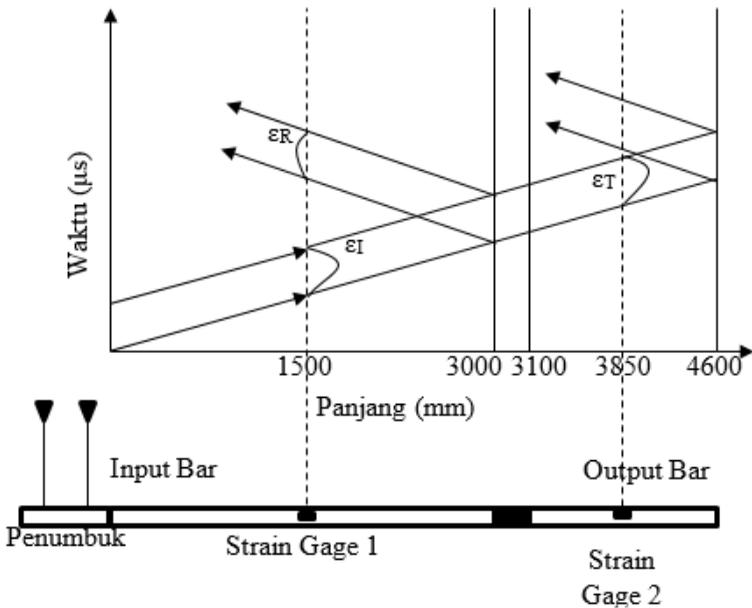


Gambar 3.5 Skema Alat Uji *Split Hopkinson Pressure Bar*



Gambar 3.6 Alat Uji *plit Hopkinson Pressure Bar*

Terdapat beberapa hal penting lainnya yang perlu diperhatikan pada *Split hopkinson pressure bar* antara lain peletakan *strain gage*. *Strain gage* dipasang di tengah *incident* dan *transmission bar* untuk mencegah terjadinya tumpang tindih sinyal. Berikut ini merupakan diagram Lagrangian yang menunjukkan posisi penempatan *strain gage* pada *Split Hopkinson Pressure Bar*:



Gambar 3.7 Diagram Lagrangian *Split Hopkinson Pressure Bar*

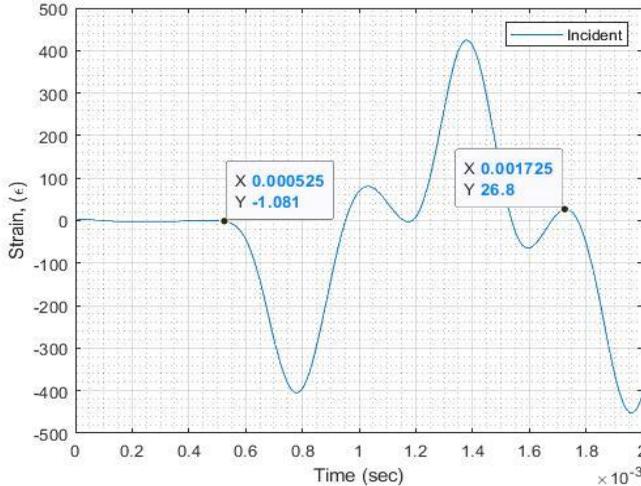
Selain itu pada *Split hopkinson pressure bar* yang digunakan dalam eksperimen ini kecepatan tumbukan dikendalikan dengan menggunakan ketinggian striker bar sebesar 7 cm, sehingga dihasilkan kecepatan tumbuk sebesar 1,18 m/s. Dengan kecepatan tumbuk sebesar 1,18 m/s dan massa dari *striker bar* sebesar 0,21 kg dihasilkan energi tumbuk senilai 0,146 J.

3.3 Kalibrasi Alat Uji *Split Hopkinson Pressure Bar*

Kalibrasi ini perlu dilakukan untuk mendapatkan nilai pengujian yang dapat dibandingkan setiap melakukan eksperimen. Terdapat dua metode dalam kalibrasi yaitu:

1. Kalibrasi dilakukan dengan cara membandingkan cepat rambat dari hasil pengujian dan kemampuan cepat rambat material yang sebenarnya. Proses kalibrasi dilakukan dengan melakukan pembebanan pada *input bar* tanpa adanya spesimen yang bertujuan untuk

memastikan peneliti terkait akurasi data yang akan keluar pada proses pengukuran. Cepat rambat gelombang elastis dapat diketahui menggunakan persamaan sebagai berikut :



Gambar 3.8 Gelombang Regangan pada *Incident Bar* Hasil Pengujian

$$C_b = \frac{L}{\Delta t} = \frac{2.3 \text{ m}}{(0.000525 - 0.0001725) \text{ s}} = \frac{6 \text{ m}}{0.00012 \text{ s}} = 5000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

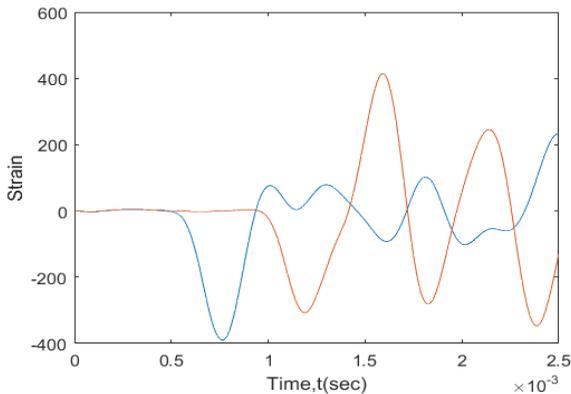
$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

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

Kemampuan perambatan gelombang pada material sebesar 5051.585 m/s, sedangkan cepat rambat gelombang pada material dari hasil pengujian kalibrasi sebesar 5000 m/s. Selisih perhitungan dan pengujian sebesar 1.02% . Oleh karena itu, data yang akan

didapatkan dari pengujian menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* dapat diterima.

2. Kalibrasi dilakukan dengan memberikan beban tumbukan pada split Hopkinson pressure bar tanpa adanya spesimen yang diuji untuk memastikan validasi dan akurasi data pengujian. *Incident pulse* dan *transmitted pulse* yang identik mengindikasikan kesejajaran input dan output bar yang baik. Berikut ini merupakan sinyal yang diperoleh pada pengujian tanpa adanya spesimen:



Gambar 3.9 Sinyal Pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* Tanpa Adanya Spesimen

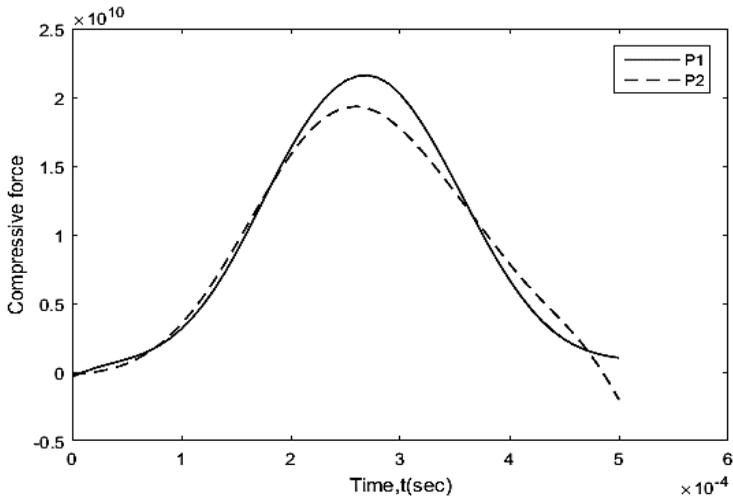
Gaya pada kedua sisi spesimen dapat dinyatakan melalui persamaan :

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

$$P_2 = A_b E \varepsilon_T(t)$$

Dimana A_b merupakan luas permukaan bar, E merupakan modulus Young bar, dan $\varepsilon_I, \varepsilon_R, \varepsilon_T$ merupakan *incident pulse, reflected pulse, dan transmitted pulse* secara berurutan. Gaya pada kedua sisi spesimen kemudian dihitung berdasarkan persamaan gaya pada kedua sisi spesimen dan digambarkan ke dalam grafik yang ditunjukkan pada gambar 3.10. Dari gambar 3.10 dapat dilihat

bahwa P_1 memiliki nilai yang hampir sama seperti nilai P_2 , hal ini mengindikasikan *dynamic stress equilibrium* pada kedua sisi spesimen.

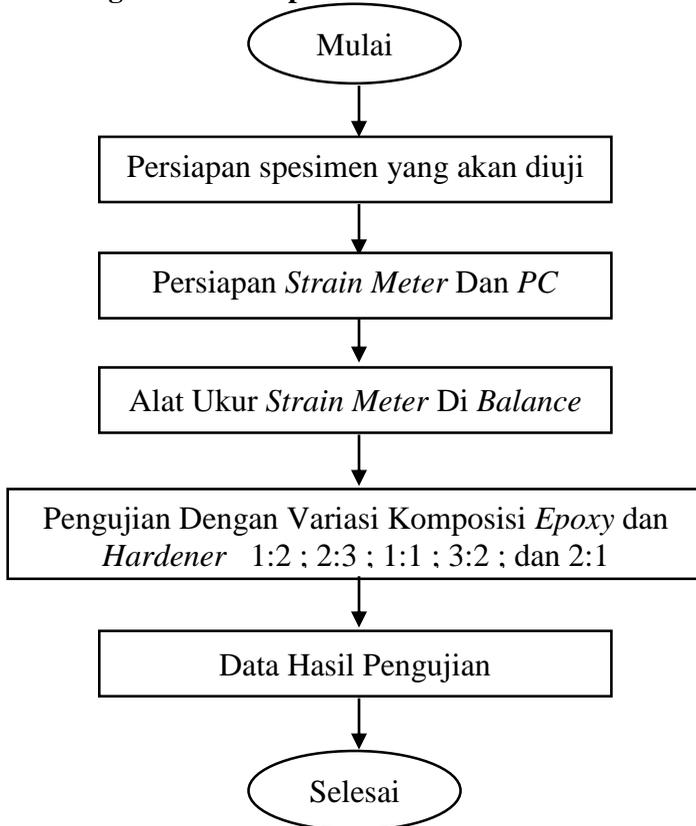


Gambar 3.10 Verifikasi *Dynamic Stress Equilibrium* pada Kedua Sisi Spesimen

3.4 Eksperimen

Eksperimen dilakukan pada spesimen pipa aluminium AISI 6061 silinder pejal yang disambungkan menggunakan *adhesive* dengan tipe sambungan *butt joint*. Alat uji eksperimen ini adalah *Split Hopkinson Pressure Bar*. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai *young modulus* dari spesimen yang disambungkan dengan *adhesive* variasi komposisi. Pada eksperimen ini diharapkan pengaruh dari variasi komposisi *adhesive* ini mampu merekayasa nilai *young modulus adhesive butt joint*.

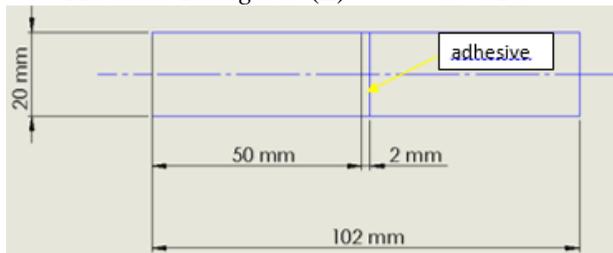
3.4.1 Diagram Alir Eksperimen



3.4.2 Persiapan Spesimen

Spesimen terbuat 2 buah pipa aluminium AISI 6061 silinder pejal yang disambungkan dengan *adhesive*. *Adhesive* yang digunakan adalah jenis *epoxy* dan *hardener*. Pengujian sambungan dilakukan dengan variasi komposisi dengan rasio *epoxy* dan *hardener* sebesar 2:1 ; 3:2 ; 1:1 ; 2:3 ; dan 1:2. Untuk ketebalan *adhesive* diatur sebesar $2\text{mm} \pm 0,01$. Jumlah spesimen sambungan yang dibuat adalah 5 buah setiap variasi komposisi *adhesive*. Selain itu terdapat beberapa data yang menjadi parameter pengukuran untuk spesimen antara lain :

1. Data *adhesive*
 - Tipe *adhesive* = epoxy adhesive
 - Daya tahan panas *adhesive* = 120°C
 - Kekuatan tarik *adhesive* = >20,68 MPa
 - Waktu kering akhir *adhesive* = 3 jam
 - Rasio epoxy-hardener = 2:1; 3:2; 1:1; 2:3; 1:2
 - Tipe *joint* = butt joint
 - Ketebalan *adhesive* (L_s) = 2 mm \pm 0,01
 - Luas penampang *adhesive* = 0.000314 m²
2. Data *adherend*
 - Tipe *adherend* = Aluminium AISI 6061
 - Geometri = Silinder Pejal
 - Panjang = 50 mm
 - Diameter = 20 mm
 - Modulus Young bar (E) = 69 GPa



Gambar 3.11 Geometri Spesimen Uji

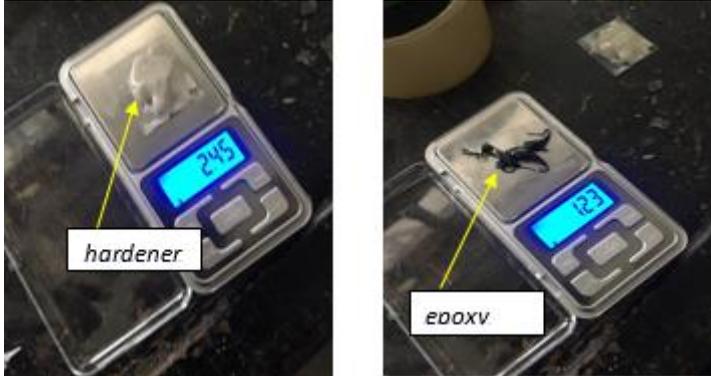
Adapun prosedur dalam pembuatan spesimen sebagai berikut :

1. Melakukan pengukuran dimensi kedua *adherend* sebelum diberi *adhesive* dengan jangka sorong.



Gambar 3.12 Pengukuran *Adherend* Tanpa *Adhesive*

2. Menimbang komposisi *epoxy* dan *hardener* sesuai variasi yang dibutuhkan menggunakan timbangan digital. Setelah ditimbang *epoxy* dan *hardener* akan dicampur kemudian diaduk hingga tercampur secara merata. Campuran yang merata ini kita sebut *adhesive*.



Gambar 3.13 Penimbangan *Epoxy* dan *Hardener* dengan Rasio 2:1

3. Langkah selanjutnya adalah penyambungan *adherend* dengan *adhesive* tersebut serta mengontrol ketebalan adhesive sebesar $2 \text{ mm} \pm 0,01$. Sebelum spesimen siap diuji, dibutuhkan waktu tunggu kurang lebih selama 12 jam agar *adhesive* tersambung secara sempurna dengan *adherend*.



Gambar 3.14 Penyambungan *Adherend* dengan *Adhesive*



Gambar 3.15 Spesimen Siap Diuji

3.4.3 Persiapan Pengambilan Data Eksperimen

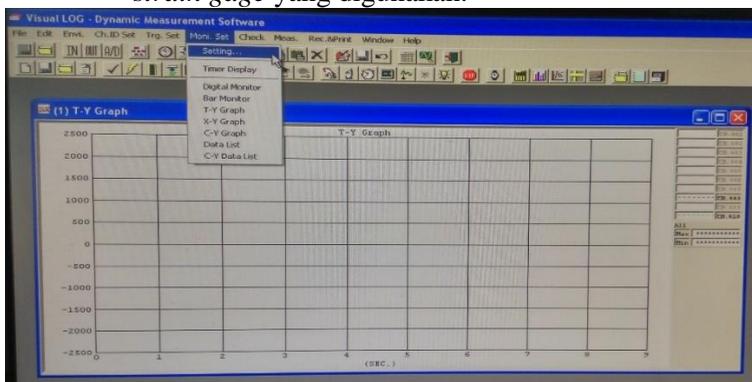
Terdapat beberapa tahapan untuk mendapatkan data eksperimen dari spesimen yang akan diuji dengan *Split Hopkinson Pressure Bar* antara lain sebagai berikut :

1. Nyalakan PC dan *dynamic strain meter*.
2. Buka aplikasi *dynamic measurement software*, klik tombol *run*.

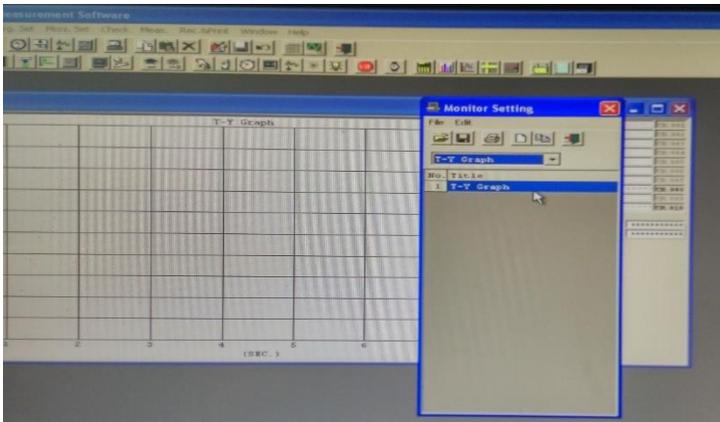


Gambar 3.16 Running Proses Pengukuran dengan *Dynamic Strain Meter*

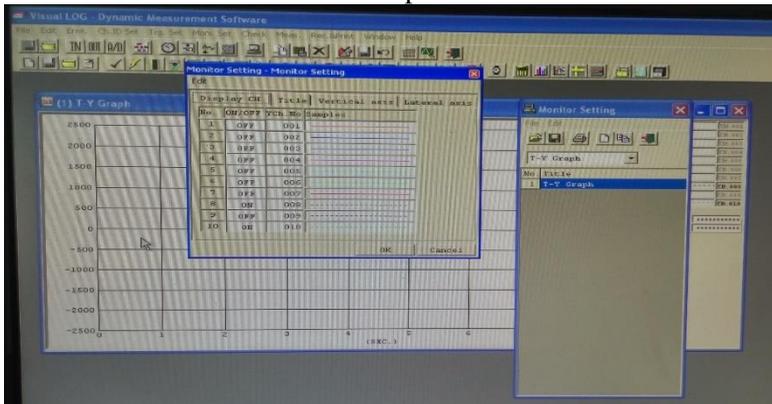
3. Pengaturan *monitor* agar menampilkan hasil dari *strain gage* yang digunakan.



Gambar 3.17 Pengaturan Tampilan Monitor



Gambar 3.18 Menampilkan Grafik T-Y

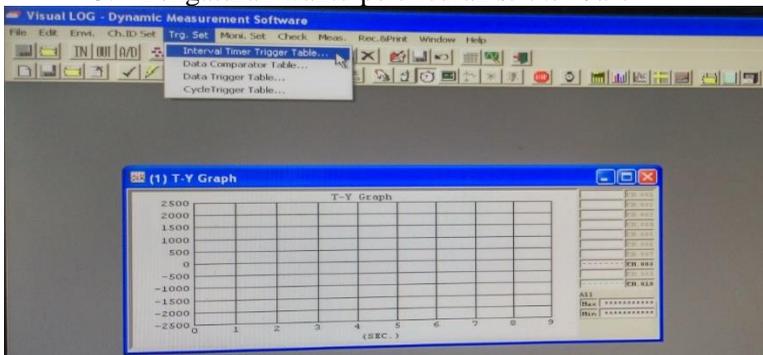


Gambar 3.19 Memastikan Nomor *Strain Gage* yang akan Dibaca

4. Siapkan posisi striker bar dan spesimen pada tempatnya.



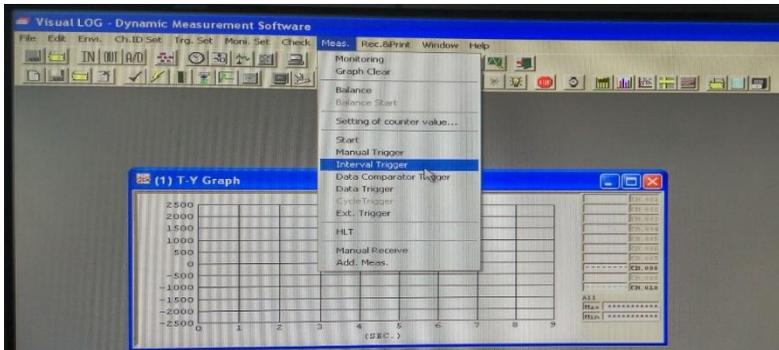
Gambar 3.20 Posisi *Striker Bar* yang Siap Diluncurkan
5. Pengaturan waktu peluncuran *striker bar*.



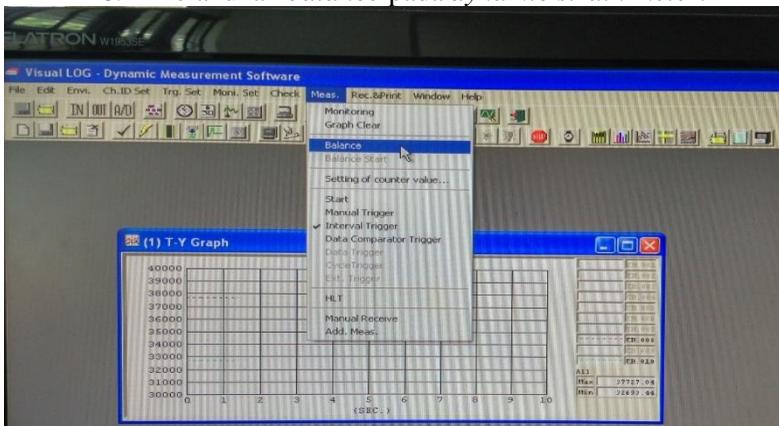
Gambar 3.21 Pengaturan *Interval Timer Trigger*

StepNo.	Date	Interval	Control	Repeat	
1	2020/01/20 15:59:35	00:00:00			1
2	****/****/****	00:00:00			0
3	****/****/****	00:00:00			0
4	****/****/****	00:00:00			0
5	****/****/****	00:00:00			0
6	****/****/****	00:00:00			0
7	****/****/****	00:00:00			0
8	****/****/****	00:00:00			0
9	****/****/****	00:00:00			0
10	****/****/****	00:00:00			0
11	****/****/****	00:00:00			0
12	****/****/****	00:00:00			0
13	****/****/****	00:00:00			0
14	****/****/****	00:00:00			0
15	****/****/****	00:00:00			0
16	****/****/****	00:00:00			0

Gambar 3.22 Memasukkan Nilai *Interval Timer Trigger*



Gambar 3.23 Memilih Jenis *Trigger* yang akan Digunakan
6. Melakukan *balance* pada *dynamic strain meter*.



Gambar 3.24 Membuka Pengaturan *Balance*

The screenshot shows the 'Balance' window in the 'Data LOG - Dynamic Measurement Software'. The window contains a table with the following data:

Ch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Box								181.34		1571.9
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

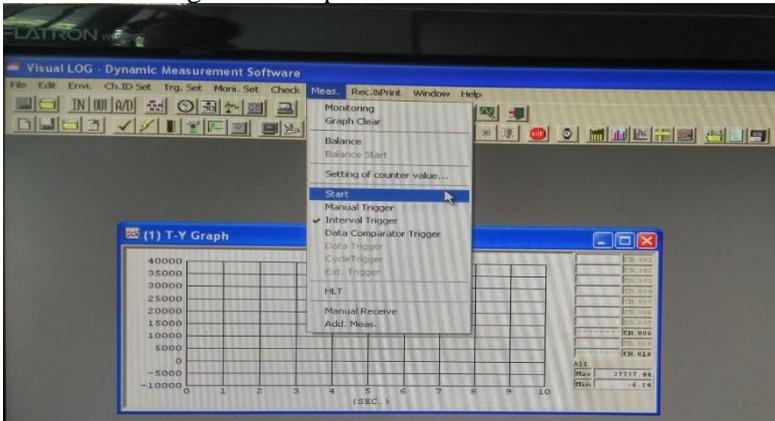
Gambar 3.25 *Dynamic Strain Meter* sebelum di *Balance*

The screenshot shows the 'Balance' window in the 'Data LOG - Dynamic Measurement Software'. The window contains a table with the following data:

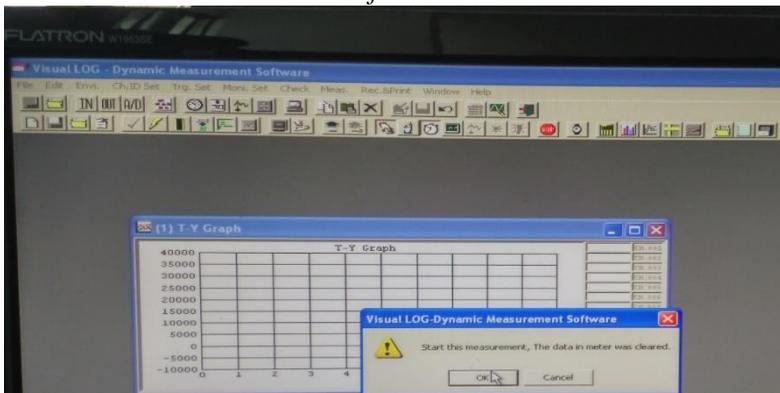
Ch	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Box								0		2
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Gambar 3.26 *Dynamic Strain Meter* sesudah di *Balance*

7. Pengukuran siap dilakukan

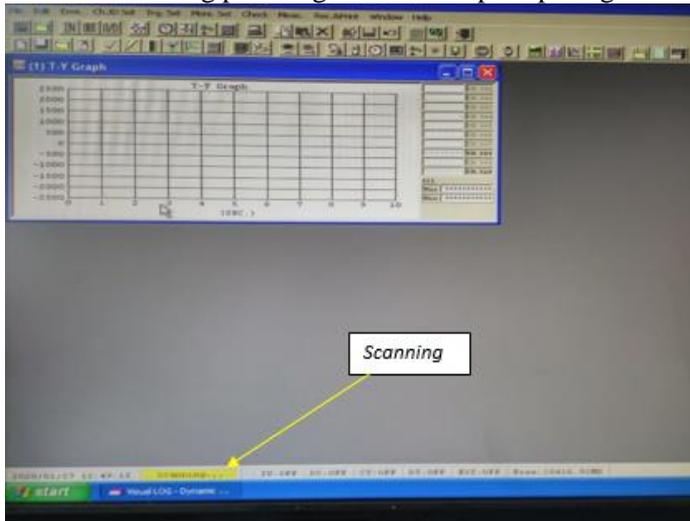


Gambar 3.27 Persiapan Start pada *Dynamic Measurement Software*



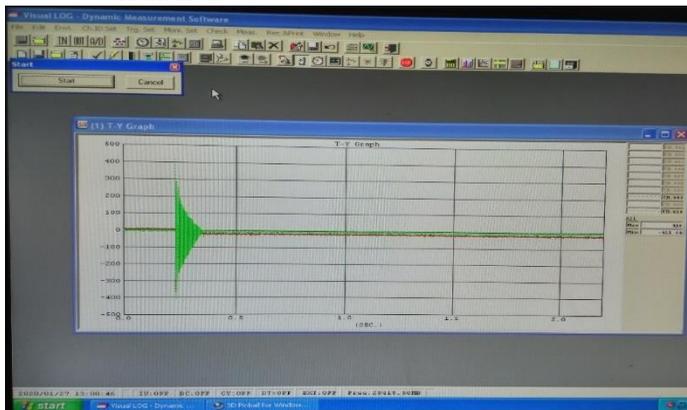
Gambar 3.28 Konfirmasi Start pada *Dynamic Measurement Software*

8. Peluncuran *striker bar* pada interval waktu yang telah diatur. *Striker bar* dilepaskan saat muncul tulisan scanning pada bagian bawah seperti pada gambar 3.29



Gambar 3.29 Tampilan Monitor saat *Striker Bar* siap Diluncurkan

9. Hasil yang diperoleh setelah pengukuran selesai dilakukan.



Gambar 3.30 Hasil yang Diperoleh dari Pengukuran *Dynamic Strain Meter*

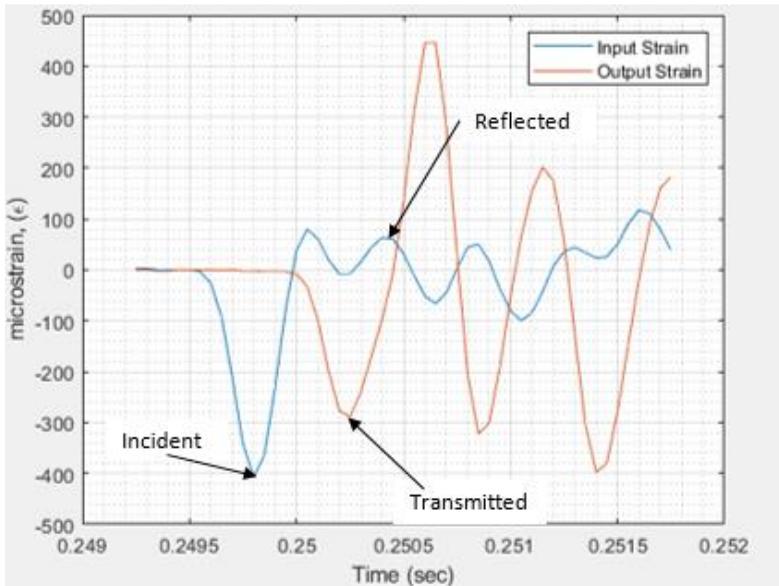
10. Langkah terakhir adalah menyimpan hasil yang diperoleh serta mengkonversi ke bentuk *file excel*. Hal ini perlu dilakukan untuk memudahkan langkah pengolahan data pada matlab.

3.5 Pengolahan Data Eksperimen

Hasil pengukuran yang didapatkan perlu diolah agar didapatkan data yang informatif dengan tampilan grafik. Pada eksperimen ini digunakan *software* Matlab untuk mengolah data. Proses yang digunakan pada pengolahan data dijabarkan sebagai berikut :

- a. Data regangan hasil pengujian

Hasil dari pengukuran menggunakan *Split Hopkinson Pressure Bar* dihasilkan kurva regangan terhadap waktu pada *incident* dan *transmitted bar*.



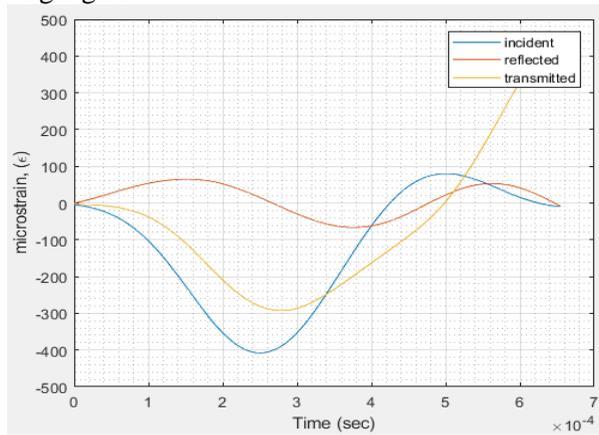
Gambar 3.31 Kurva Regangan terhadap Waktu Hasil dari Pengukuran

Pada eksperimen menggunakan spesimen uji dengan perbandingan(*epoxy:hardener*) 1:2 serta ketebalan *adhesive*

2 mm didapatkan kurva hasil pengukuran seperti pada gambar 3.31. Dapat dilihat dari kurva tersebut, besar regangan *incident* maksimum sebesar -407,1 microstrain, regangan *reflected* 62,96 microstrain, dan regangan *transmitted* -288,9 microstrain.

b. Trim

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



Gambar 3.32 Kurva Hasil Pemotongan Kurva *Incident*, *Reflected*, dan *Transmitted Strain*

c. Perhitungan Cepat Rambat Gelombang (C_0) pada *Pressure Bar*

Cepat rambat gelombang pada *pressure bar* yang berbahan aluminium AISI 6061 secara teori adalah 5100 m/s pada suhu 20°C. Sebelum mengolah data menjadi kurva tegangan-regangan, perlu dilakukan terlebih dahulu

perhitungan laju regangan. Dalam menghitung cepat rambat gelombang yang merambat pada *bar* dan spesimen, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

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

Dimana L merupakan panjang dari jarak kedua *strain gage* pada *incident bar* dan *transmitted bar*, Δt merupakan jeda waktu antara *incident strain* dan *transmission strain*. Dengan mendapatkan persamaan cepat rambat tersebut, didapatkan:

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

$$C_0 = \frac{L}{\Delta t} = \frac{2.3 \text{ m}}{(0.000525 - 0.0001725) \text{ s}} = \frac{6 \text{ m}}{0.00012 \text{ s}} = 5000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

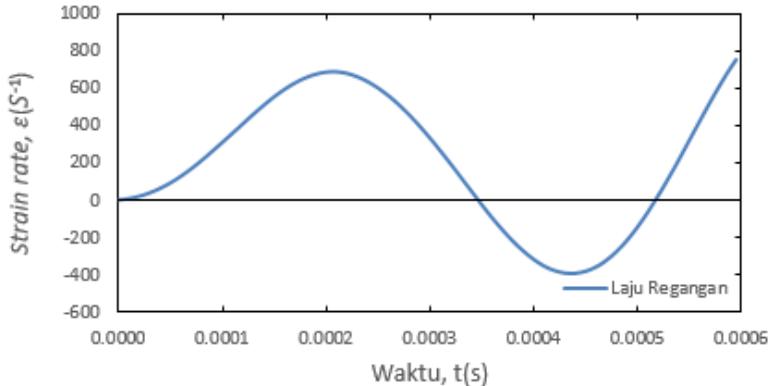
Dari data yang didapatkan, dilakukan perhitungan laju regangan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_n = E \frac{A_b}{A_s} \epsilon_T(t)$$

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

Pada gambar 3.33 menunjukkan bahwa laju regangan mula-mula naik, ini menunjukkan adanya pembebanan berupa kompres pada spesimen karena adanya penumbukan oleh *striker bar*. Selanjutnya laju regangan mengalami penurunan hingga mengalami ekspansi yang ditunjukkan dengan nilai laju regangan yang negatif. Akan tetapi, eksperimen ini dilakukan dengan meninjau

pembebanan dinamis yang berupa kompresi saja. Sehingga yang ditinjau dari kurva laju regangan tersebut adalah laju regangan yang mempunyai nilai positif.



Gambar 3.33 Grafik Laju Regangan terhadap Waktu pada Percobaan dengan 2 *Epoxy* dan 1 *Hardener* dengan Ketebalan *Adhesive* 2 mm

Dengan spesimen 2 *epoxy* dan 1 *hardener* dengan ketebalan *adhesive* 2 mm, dilakukan pengujian *Split Hopkinson Pressure Bar* dengan besar laju regangan terhadap waktu seperti pada gambar 3.33. Besarnya laju regangan tersebut dipengaruhi oleh kecepatan tumbuk dari *striker bar*. Pada pengujian spesimen ini, dilakukan dengan kecepatan tumbuk sebesar 1.18 m/s. Dengan tumbukan dari *striker bar* tersebut didapatkan laju regangan maksimal pada $687.19s^{-1}$.

Dalam pengukuran yang ideal, laju regangan kerja harus konstan selama pembebanan. Namun kondisi tersebut sulit didapatkan dalam praktiknya. Setelah melakukan perhitungan didapatkan bahwa laju regangan selalu berubah selama pembebanan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.33. Namun laju regangan konstan terjadi dalam waktu singkat di dekat titik maksimumnya. Oleh karena itu, dalam eksperimen ini regangan ditentukan pada titik maksimumnya.

e. Grafik Tegangan-Regangan

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

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

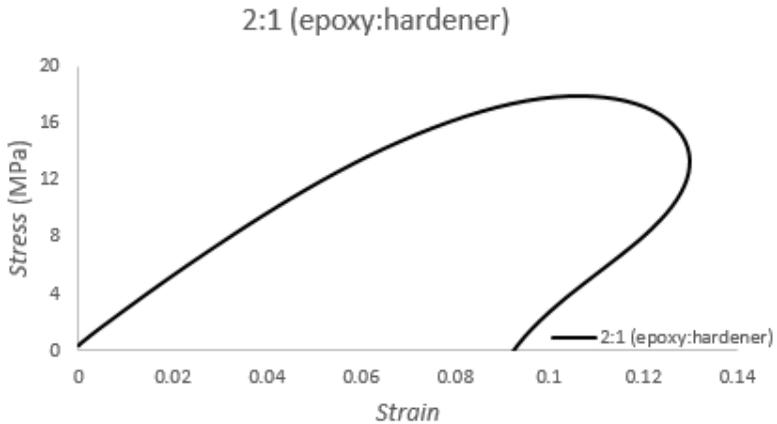
Pada eksperimen ini, modulus young bar (E_b) merupakan modulus young alumunium AISI 6061 yaitu 69 GPa. Sedangkan luas permukaan bar (A_b) sama dengan luas permukaan spesimen (A_s) yaitu 0,000314 m². Untuk besar regangan *transmitted* diketahui dengan melihat kurva yang telah dilakukan trim seperti pada gambar 3.32.

Untuk perhitungan nilai regangan (ε_n) dapat dilakukan dengan persamaan berikut :

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

Pada penelitian ini, kecepatan rambat gelombang (C_0) telah didapatkan nilainya sebesar 5000 m/s , sedangkan L_s merupakan ketebalan *adhesive* dimana pada penelitian ini ketebalan *adhesive* dijaga sebesar 2 mm. Untuk besar regangan *reflected* diketahui dengan melihat kurva yang telah dilakukan *trim* seperti pada gambar 3.32.

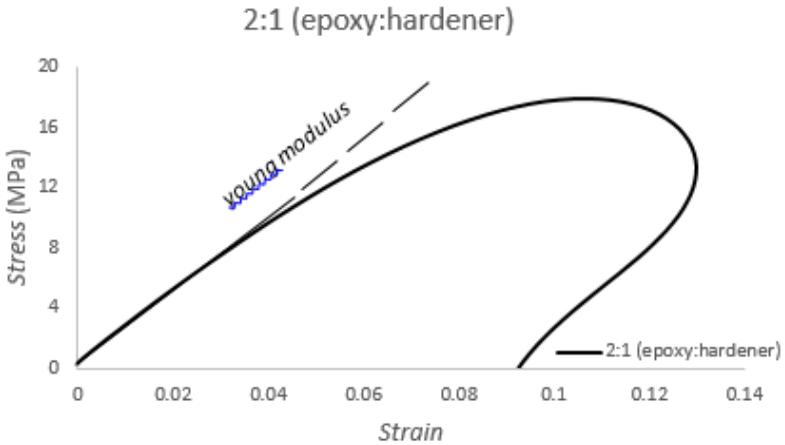
Dengan memasukkan persamaan diatas, didapatkan nilai tegangan dan regangan dari hasil pengukuran seperti pada gambar 3.34.



Gambar 3.34 Contoh Kurva Hasil Perhitungan Tegangan dengan Regangan pada Percobaan dengan 2 *Epoxy* dan 1 *Hardener* dengan Ketebalan *Adhesive* 2 mm

f. Nilai *Young Modulus*

Setelah didapatkan kurva tegangan dan regangan, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai kekakuan dari masing-masing tiap pengujian. Nilai kekakuan disini merupakan *initial slope* dari kurva tegangan-regangan. Gambar 3.35 merupakan contoh nilai slope dari kurva tegangan-regangan pada pengujian 2 *hardener* 1 *epoxy* dengan ketebalan *adhesive* 2 mm. Dari kurva tersebut didapatkan nilai *young modulus* sebesar 0,24 GPa.

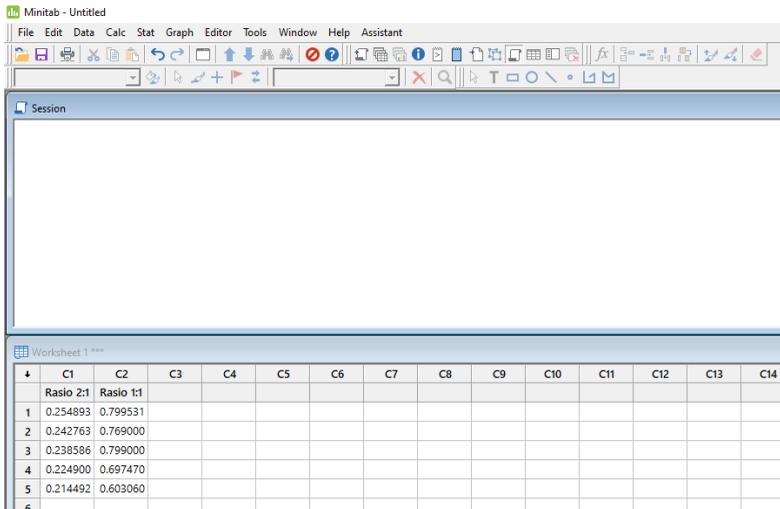


Gambar 3.35 Contoh Estimasi Nilai *Young Modulus*

3.6 Pengujian dengan *Paired t-test*

Setelah didapatkan nilai *young modulus* disetiap eksperimen akan dilakukan uji *paired t-test* dengan *software* minitab. Proses yang digunakan untuk pengujian *paired t-test* dijabarkan sebagai berikut :

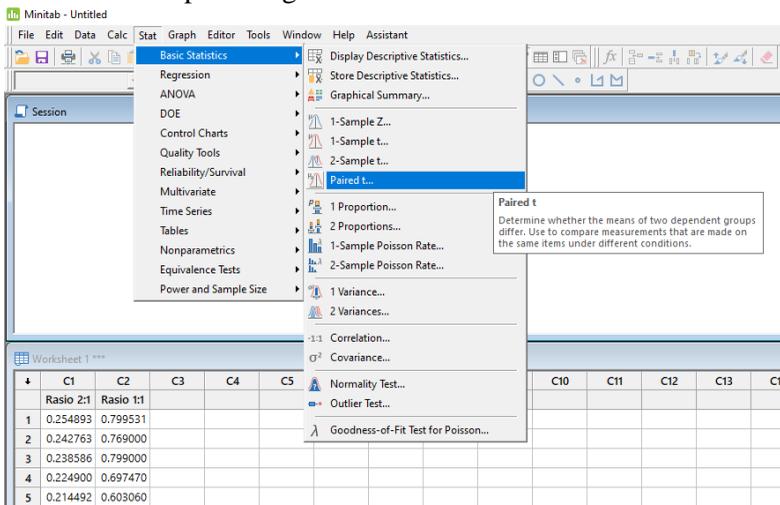
- a. Siapkan data yang akan diuji *paired t-test* di *worksheet* minitab seperti pada gambar 3.36.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	Rasio 2:1	Rasio 1:1												
1	0.254893	0.799531												
2	0.242763	0.769000												
3	0.238586	0.799000												
4	0.224900	0.697470												
5	0.214492	0.603060												
6														

Gambar 3.36 Data *Young Modulus* yang siap Diuji dengan *Paired t-test*

b. Proses perhitungan oleh minitab



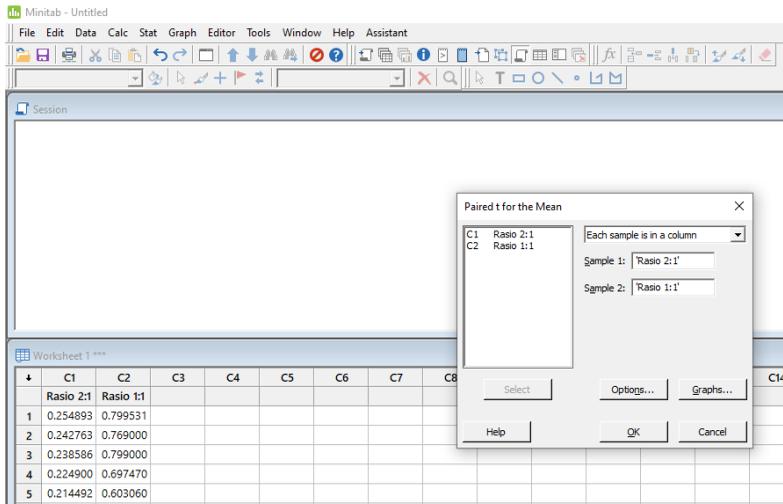
Stat

- Basic Statistics
 - Display Descriptive Statistics...
 - Store Descriptive Statistics...
 - Graphical Summary...
- Regression
- ANOVA
- DOE
- Control Charts
- Quality Tools
- Reliability/Survival
- Multivariate
- Time Series
- Tables
- Nonparametrics
 - 1-Sample Z...
 - 1-Sample t...
 - 2-Sample t...
 - Paired t...**
- Equivalence Tests
 - 1 Proportion...
 - 2 Proportions...
 - 1-Sample Poisson Rate...
 - 2-Sample Poisson Rate...
- Power and Sample Size
 - 1 Variance...
 - 2 Variances...
 - Correlation...
 - Covariance...
 - Normality Test...
 - Outlier Test...
 - Goodness-of-Fit Test for Poisson...

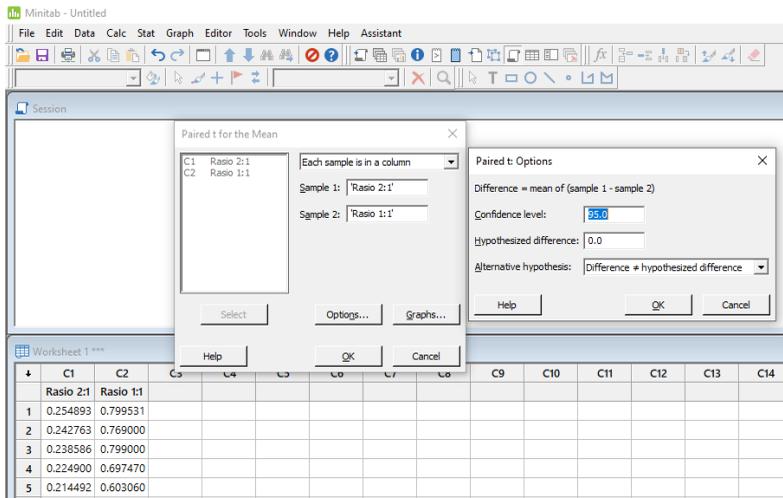
Paired t
Determine whether the means of two dependent groups differ. Use to compare measurements that are made on the same items under different conditions.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	Rasio 2:1	Rasio 1:1												
1	0.254893	0.799531												
2	0.242763	0.769000												
3	0.238586	0.799000												
4	0.224900	0.697470												
5	0.214492	0.603060												

Gambar 3.37 Pemilihan Perhitungan Statistik (*Paired t-test*)

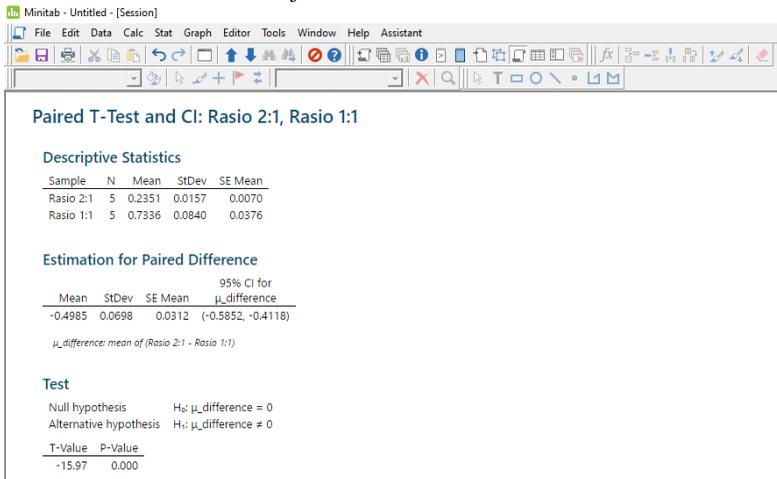


Gambar 3.38 Memasukkan Data yang akan diolah dengan *Paired t-test*



Gambar 3.39 Mengatur *Confidence Level* dan *Hypothesis* yang akan digunakan

c. Hasil statistik *software* minitab



Gambar 3.40 Hasil *paired t-test* Ekseprimen 2 Epoxy dan 1 Hardener dengan 1 Epoxy dan 1 Hardener

d. Penarikan kesimpulan dari hasil *paired t-test*

Setelah didapatkan hasil statistik dari *software* minitab, langkah selanjutnya adalah mengambil kesimpulan dari *p-value* yang diberikan. 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 3.40 didapatkan bahwa hasil eksperimen dari 2 epoxy : 1 hardener dengan 1 epoxy : 1 hardener memiliki perbedaan yang sangat signifikan karena nilai *p-value* kurang dari 0,05.

3.7 Analisa Data dan Pembahasan

Dalam bab ini, data hasil eksperimen sistem akan dianalisa dan dibahas sesuai dasar teori yang ada. Dari hasil analisa data dan pembahasan akan diketahui hubungan antara variasi komposisi

adhesive pada sambungan tipe *butt joint* terhadap nilai *young modulus*. Pembahasan dan penjelasan analisa tersebut akan digunakan sebagai acuan dalam menarik kesimpulan.

3.8 Penarikan Kesimpulan dan Saran

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

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

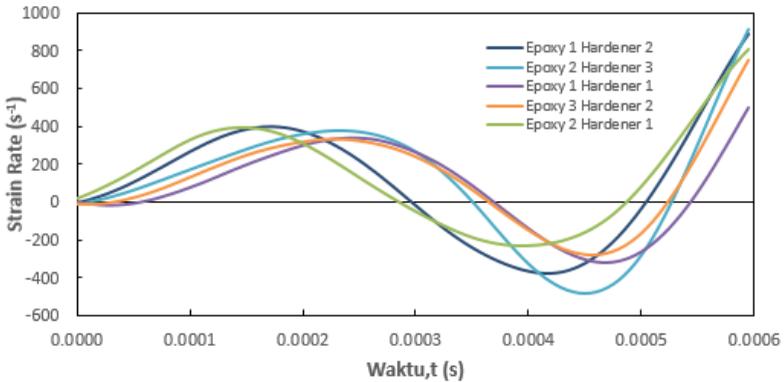
Pengujian pengaruh komposisi *adhesive* terhadap kekakuan *butt joint* dilakukan dengan *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)*. Data regangan yang diperoleh dari uji SHPB digunakan untuk mendapatkan respon tegangan-regangan sambungan. *Young modulus* diperoleh dengan mencari besar *initial slope* kurva tegangan-regangan dari hasil percobaan. Kemudian dilakukan pengujian *paired t-test* terhadap nilai *young modulus* pada setiap variasi komposisi *adhesive* untuk mendapatkan seberapa besar sensitivitas yang terjadi antar variasi. Hasil pengujian dan pembahasannya dipaparkan pada bab ini.

4.1 Hasil Pengujian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh komposisi *adhesive* terhadap karakteristik *young modulus* dari *adhesive*. *Adherend* yang digunakan adalah pipa aluminium A6061 berbentuk silinder pejal. Ketebalan *adhesive* pada sambungan yang diuji adalah 2 mm. Dengan komposisi epoxy dan hardener pada *adhesive* yang terdiri dari 5 macam yaitu 2:1, 3:2, 1:1, 2:3 dan 1:2.

4.1.1 Perbandingan Laju Regangan pada Tiap Komposisi

Dari data yang didapatkan, dilakukan perhitungan laju regangan dengan memakai persamaan (2.18). Dalam penelitian dengan *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)* yang ideal, laju regangan harus konsisten selama pembebanan. Maka perlu dilakukan perhitungan laju regangan untuk memastikan proses pengukuran dilakukan pada laju regangan yang konsisten, sehingga hasilnya dapat dibandingkan.



Gambar 4.1 Grafik Laju Regangan Terhadap Waktu untuk tiap Variasi Komposisi *Epoxy/Hardener*

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa laju regangan mula-mula naik, menunjukkan terjadinya pembebanan berupa kompresi pada spesimen akibat tumbukan dari *striker bar*. Kemudian laju regangan mengalami penurunan hingga mengalami ekspansi yang ditunjukkan dengan nilai laju regangan yang negatif. Pada penelitian ini dilakukan dengan meninjau pembebanan dinamis yang berupa kompresi saja. Oleh karena itu nilai yang ditinjau dari kurva laju regangan adalah saat nilai laju regangan mempunyai nilai positif.

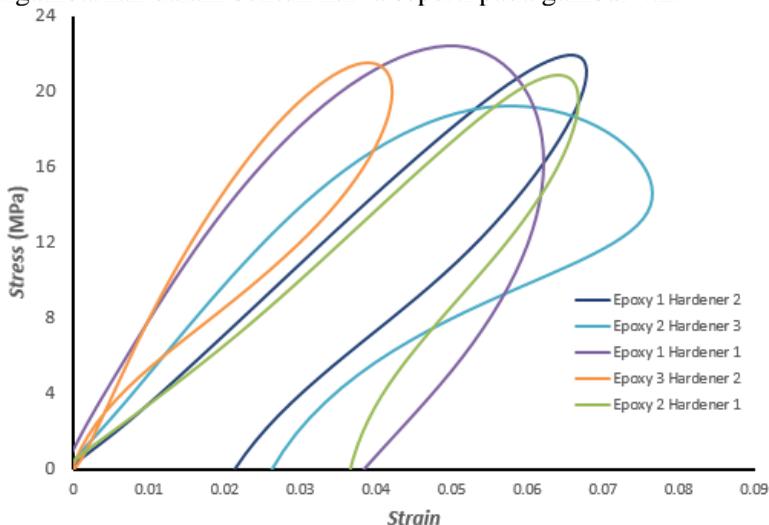
Dalam pengukuran yang ideal, laju regangan harus memiliki nilai *strainrate* maksimum yang konsisten selama pembebanan. Akan tetapi kondisi ini sulit untuk didapatkan dalam percobaan. Hal ini disebabkan dari cara kerja *striker bar* yang masih menggunakan metode tumbukan bandul. Metode tumbukan bandul sangat sulit diatur untuk memiliki kecepatan tumbuk yang konsisten, karena kecepatan bergantung dengan kontrol ketinggian dan titik tumbuk dari *striker bar* itu sendiri. Kontrol ketinggian dan titik tumbuk *striker bar* ini masih menggunakan bantuan alat sederhana yang belum teruji validitasnya. Pada penelitian ini konsistensi nilai titik maksimum laju regangan digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan data yang valid sehingga dapat

dibandingkan perubahan nilai *young modulus* terhadap pengaruh komposisi *adhesive*.

Dari masing-masing variasi komposisi *adhesive* didapatkan nilai laju regangan yang nantinya akan dibandingkan untuk memastikan validitas dari nilai laju regangan itu sendiri disetiap percobaan. Setelah didapatkan kurva laju regangan yang konsisten, langkah selanjutnya adalah membandingkan kurva tegangan-regangannya. Dari perhitungan didapatkan besar laju regangan dari setiap percobaan yaitu $367 \pm 28 \text{ s}^{-1}$.

4.1.2 Perhitungan Tegangan dan Regangan pada Tiap Komposisi *Adhesive*

Kurva tegangan dan regangan didapatkan melalui persamaan (2.17) dan (2.18). Dengan kecepatan rambat gelombang (C_0) sebesar 5100 m/s didapatkan tegangan dan regangan yang digambarkan dalam bentuk kurva seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Kurva Tegangan-Regangan pada masing-masing Variasi Komposisi *Adhesive*

Pada gambar 4.2 terlihat kurva tegangan-regangan yang didapatkan di setiap variasi komposisi *adhesive* sambungan berbeda-beda. Hal ini membuktikan adanya pengaruh komposisi *adhesive* terhadap karakteristik kurva tegangan regangan. Secara umum kurva mula-mula naik hingga mencapai tegangan maksimum. Hal ini menunjukkan terjadinya pembebanan berupa kompresi pada spesimen. Kemudian tegangan menurun yang mana disini menunjukkan terjadinya ekspansi (unloading) hingga nilai dari stress kembali 0 MPa. Kurva tegangan-regangan yang diperoleh tidak mencapai *yield point* dari *butt adhesive joint* dikarenakan penelitian dilakukan pada area elastis sebagaimana ditunjukkan pada grafik laju regangan.

Gambar 4.2 juga menunjukkan bahwa komposisi *adhesive* mempengaruhi respon tegangan-regangan *butt adhesive joint*. Pada percobaan dengan komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3 didapatkan nilai regangan yang paling besar. Untuk stress maksimum didapatkan pada percobaan dengan komposisi *epoxy* 1 dan *hardener* 1, namun perbedaannya tidak signifikan.

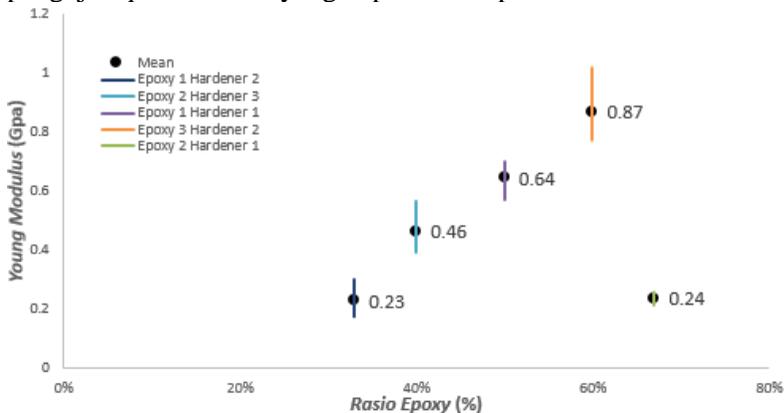
Terjadinya perbedaan bentuk kurva tegangan regangan akan mempengaruhi nilai kekakuan dan energi redaman. Kekakuan didapatkan dengan menghitung *slope* dari kurva tegangan regangan elastis. Untuk energy redaman didapatkan dengan menghitung luasan daerah dibawah kurva tegangan regangan. Akan tetapi, dalam percobaan ini tidak dapat dilakukan perhitungan nilai energi redaman karena kurva tegangan regangan yang didapatkan tidak berbentuk *close-loop*. Pada penelitian ini *properties adhesive* yang dapat dihitung adalah *young modulus*

4.2 Pembahasan

Setelah dilakukan penelitian *adhesive butt joint* dengan *Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)*, didapatkan nilai *young modulus* pada tiap variasi komposisi *adhesive*. Selanjutnya dilakukan perbandingan anatara nilai *young modulus* tersebut untuk mengetahui komposisi yang optimum pada *adhesive butt joint*.

Nilai *young modulus* didapatkan dari kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari gelombang regangan hasil pengukuran. Dimana pengukuran dilakukan pada laju regangan $367 \pm 28 \text{ s}^{-1}$ dan kecepatan rambat pada *adhesive* sebesar 4704 m/s disetiap pengujian. Nilai *young modulus* didapatkan dengan melakukan pengujian pada 5 variasi komposisi *epoxy/hardener*. Tiap variasi dilakukan 5 kali percobaan (spesimen). Pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* dengan nilai *young modulus* ditampilkan pada gambar 4.3.

Dari grafik efek komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap *young modulus* terdapat nilai deviasi dari masing-masing variasi. Deviasi ini disebabkan oleh kecepatan tumbuk *striker bar* yang tidak konsisten dan titik tumbuk dari *striker bar* yang tidak selalu sesumbu sehingga dihasilkan nilai laju regangan yang tidak konsisten. Meskipun begitu, dengan meninjau Gambar 4.3, deviasi yang terjadi tidak signifikan sehingga tidak berpengaruh besar terhadap interpretasi data yang diukur. Hal ini dibuktikan dengan pengujian *paired t-test* yang dapat dilihat pada tabel 4.1.



Gambar 4.3 Pengaruh Komposisi *Epoxy* dan *Hardener* terhadap *Young Modulus Adhesive Butt Joint*

Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* pada *adhesive butt joint* terhadap nilai *young modulus*.

Terlihat bahwa nilai *young modulus* meningkat secara non-linier seiring pertambahan komposisi *epoxy* pada *adhesive*, namun menurun ketika *adhesive* memiliki komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 1. Pada komposisi *epoxy* 1 dan *hardener* 2 didapatkan *young modulus* rata-rata sebesar 0,23 GPa. Pada saat komposisi *epoxy* ditambahkan dalam *adhesive* nilai dari *young modulus* rata-rata meningkat seperti pada komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3 senilai 0,46 GPa, komposisi *epoxy* 1 dan *hardener* 1 senilai 0,64 GPa, dan komposisi *epoxy* 3 dan *hardener* 2 senilai 0,87 GPa. Kemudian menurun secara drastis pada saat komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 1 senilai 0,24 GPa.

Kenaikan nilai *young modulus* pada penelitian ini hampir sama dengan penelitian yang dilakukan Almeida dan Monteiro, jenis *adhesive* yang digunakan pada penelitian tersebut sama dengan yang dilakukan pada penelitian ini yaitu tipe *epoxy hardener*. Dimana nilai dari *young modulus* meningkat seiring bertambahnya komposisi *epoxy*. Pada penelitian Almeida dan Monteiro dilakukan penelitian secara statis dengan menggunakan *mechanically driven test machine*, sedangkan pada penelitian ini dilakukam penelitian secara dinamik dengan *Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)*. Meskipun pengujian dilakukan dengan metode yang berbeda hasil yang diperoleh memiliki pola yang sama, hal ini dapat disimpulkan bahwa kemampuan *adhesive* baik pada pembebanan statik maupun dinamik memiliki karakteristik yang serupa. Selain itu terdapat perbedaan dari komposisi *epoxy* dan *hardener* serta bagaiman cara melakukan pencampurannya. Dimana pada penelitian ini proses pencampuran antara *epoxy dan hardener* dilakukan dengan menggunakan timbangan 0,01 gram sedangkan pada penelitian Almeida dan Monteiro menggunakan pengukuran secara stoikiometri dengan satuan *per hundred resin(phr)*. Sehingga hasil yang didapatkan dari penelitian ini tidak memiliki nilai yang sama dengan penelitian Almeida dan Monteiro.

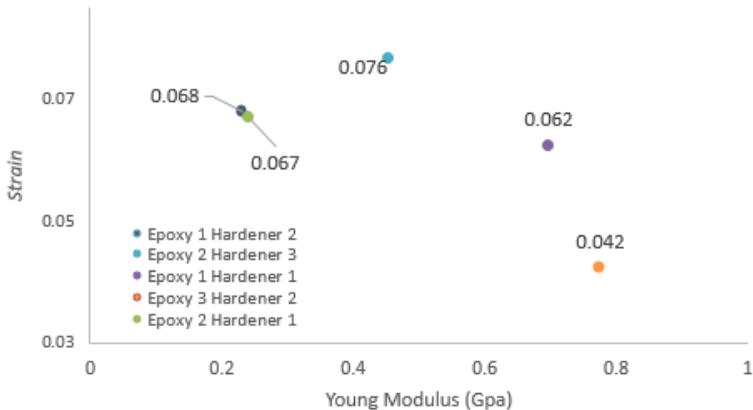
Pada penelitian ini tidak dapat dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Yokoyama terhadap nilai *young*

modulus dari sambungan *adhesive butt joint*. Hal ini dikarenakan *properties adherend* yang digunakan memiliki material yang sama dengan *input bar* dan *output bar*, sehingga muncul dugaan bahwa *dynamic strainmeter* hanya membaca saat terjadi rambatan gelombang ketika terjadi perubahan *properties material*. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah nilai *young modulus* pada *bulk adhesive* saja, bukan pada sambungan *adhesive butt joint* dengan *adherend* aluminium AISI 6061. Oleh karena itu penelitian ini tidak dapat ditarik kesimpulan apakah komposisi *epoxy* dan *hardener* pada *adhesive* dapat mengubah karakteristik dari sambungan material.

Tabel 4.1 Pengujian *Paired t-test* tiap Komposisi *Adhesive*

Perbandingan nilai <i>young modulus</i> disetiap komposisi <i>adhesive</i> (Epoxy - Hardener)		P-Value
1 - 2	1 - 1	0.000
1 - 2	3 - 2	0.000
1 - 2	2 - 1	0.776
2 - 3	1 - 1	0.014
2 - 3	3 - 2	0.001
2 - 3	2 - 1	0.002
1 - 1	3 - 2	0.018
1 - 1	2 - 1	0.000
3 - 2	2 - 1	0.000

Setelah didapatkan data *young modulus* dilakukan pengujian *paired t-test* dengan menggunakan software minitab guna mengetahui seberapa besar sensitivitas nilai *young modulus* akibat variasi komposisi *epoxy* dan *hardener*. Pengujian *paired t-test* ini menggunakan *confident interval* 95% dimana nilai p-value kurang dari 0,05 menandakan adanya perbedaan yang signifikan dengan tingkat keyakinan 95%. Melalui tabel 4.1 didapatkan hasil bahwa nilai *young modulus* mengalami perubahan yang signifikan di setiap variasi komposisi, kecuali pada saat komposisi *epoxy* 1 dan *hardener* 2 dengan *epoxy* 2 dan *hardener* 1 hal ini dibuktikan dari nilai p-value senilai 0,776 yang mana lebih besar dari 0,05. Sehingga dapat dikatakan nilai *young modulus* pada komposisi *epoxy* 1 dan *hardener* 2 dengan *epoxy* 2 dan *hardener* 1 tidak memiliki perbedaan yang signifikan meskipun telah diberikan perlakuan yang berbeda.



Gambar 4.4 Pengaruh Komposisi *Epoxy* dan *Hardener* terhadap *Strain* Maksimum pada *Adhesive Butt Joint*

Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* terhadap *strain* maksimum pada *adhesive butt joint*. Terlihat bahwa nilai *strain* maksimum tertinggi berada pada komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3 dengan *young modulus* 0,46 GPa, sedangkan untuk *strain* terendah berada pada *epoxy* 3 dan *hardener* 2 dengan *young modulus* 0,78 GPa. Secara keseluruhan nilai *strain* maksimum akan berkurang seiring bertambah besar *young modulus*. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *adhesive* dengan nilai *young modulus* rendah memiliki sifat material yang lebih *ductile* karena *strain* yang dihasilkan lebih besar daripada *adhesive* dengan nilai *young modulus* lebih tinggi. Melalui 5 komposisi ini dapat disimpulkan bahwa komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3 adalah yang paling optimum karena memiliki nilai *strain* maksimum paling tinggi dan *young modulus* yang tidak terlalu rendah. Berdasarkan hasil penelitian ini dapat diketahui pula bahwa komposisi yang dianjurkan oleh produsen *adhesive* yaitu *epoxy* 1 dan *hardener* 1, memiliki performa yang cukup baik dengan nilai *young modulus* yang cukup tinggi dengan hanya terpaut beberapa poin dari *young modulus* paling tinggi yaitu pada

komposisi *epoxy* 3 dan *hardener* 2 serta nilai *strain* yang tidak terlalu rendah dari *strain* tertinggi pada komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3.

Melalui penelitian ini dapat diketahui campuran *adhesive* yang cocok dalam penerapannya terhadap suatu sambungan. Untuk sambungan yang membutuhkan daya tahan terhadap *fatigue* dapat dipilih komposisi *adhesive* yang memiliki nilai *strain* paling besar seperti pada komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3. Sedangkan untuk sambungan yang membutuhkan kekakuan yang tinggi dapat menggunakan *adhesive* yang memiliki nilai *young modulus* paling besar seperti pada komposisi *epoxy* 3 dan *hardener* 2.

Disamping itu nilai *young modulus* yang berubah-ubah akibat dari variasi komposisi ini juga dipengaruhi oleh ketidaksempurnaan polimerisasi *epoxy* dengan *hardene*. Penambahan *hardener* yang berlebihan akan menghasilkan komposisi *adhesive* yang rapuh dan juga kelebihan *hardener* yang tidak terpolimerisasi mampu mengakibatkan korosi pada permukaan logam *adherend*. (J. Kuczmaszewski, 2004)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan antara lain :

1. Nilai *young modulus* berpengaruh secara non-linier meningkat seiring bertambahnya komposisi *epoxy*, namun mengalami penurunan ketika komposisi *epoxy 2 hardener 1*.
2. Nilai *strain* terbesar didapatkan pada saat komposisi *epoxy 2* dan *hardener 3* senilai 0.0764.
3. Nilai *young modulus* terbesar didapatkan pada saat komposisi *epoxy 3* dan *hardener 2* senilai 0.87 GPa.
4. Berdasarkan pengujian *paired t-test* didapatkan hasil bahwa setiap perubahan komposisi memiliki pengaruh yang signifikan pada nilai *young modulus* kecuali pada saat komposisi *epoxy 2* dan *hardener 1* dengan komposisi *epoxy 1* dan *hardener 2* yang tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai *young modulus*.

5.2 Saran

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

1. Strain meter sebaiknya digunakan alat yang mampu membaca sinyal regangan dengan *sampling rate* lebih teliti agar kurva regangan yang didapatkan lebih detail pembacaannya.
2. *Striker bar* sebaiknya menggunakan sistim hidrolik, sehingga penumbukan lebih akurat.
3. Untuk penelitian selanjutnya, bisa dilakukan penelitian pengaruh komposisi *adhesive* dengan *adherend* yang berbeda dari input bar dan output bar.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Banea, MD., da silva, LFM. 2009. “Adhesively Bonded Joint in Composite Materials : An Overview”. J. Materials : Design and Application
- [2] Banea, MD., et. al. 2014. “The Effect of Adhesive Thickness on The Mechanical Behaviour of A Structural Polyurethane Adhesive”. London : Taylor & Francis.
- [3] Brockmann, W., et. al. 2009. **Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [4] Budynas, Richard G., Nisbett, J Keith. 2015. **Shigley’s Mechanical Engineering Design – Tenth Edition**. New York : McGraw-Hill Education.
- [5] Chen, W., Song, B. 2011. **Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications**. New York: Springer Science Business Media.
- [6] D’Almeida, JRM., Monteiro, SN. 1995. “The Effect of the Resin/Hardener Ratio on the Compressive Behavior of an Epoxy System”. Rio de Janeiro : Universidade Catolica do Rio de Janeiro.
- [7] Jr, Robert W. Messler. 2004. **Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology**. Massachusetts: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [8] Yokoyama, T. 2003. “Experimental Determination of Impact Tensile Properties of Adhesive Butt Joints with The Split Hopkinson Bar”. Okayama : Okayama University of Science.
- [9] Pramono, A.S., Rivazani H., Sujarwanto. 2014. “Split Bar Hopkinson with Springs Striker Bar Launcher”. Applied Mechanics and Materials. 493:383-387.
- [10] Sekiguchi, Y., 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.
- [11] Yohanes, Pramono, A.S., Hidayya, A.B. 2019. “Non-monotonous Effect of Adhesive Thickness on The Dynamic Stiffness of Adhesive Butt Joint”.
- [12] J. Kuczmaszewski. 2004. **Fundamentals of metal-metal Adhesive Joint Design**. Lublin: Lublin University of Technology
- [13] Adams., Robert D. 2005. **Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications**. New York: CRC Press
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Fan, J., dan Chen A. 2019. **Studying a Flexible Polyurethane Elastomer with Improved Impact-Resistant Performance**. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology.

BIODATA PENULIS



Kenny Varian dilahirkan di Surabaya, 21 Desember 1997 anak kedua yang terlahir dari orangtua bernama Ika Irawan dan Agustina. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di SD RA Kartini Surabaya, SMPN 13 Surabaya, dan SMAN 5 Surabaya. Setelah lulus dari SMA Negeri 5 Surabaya pada tahun 2016 penulis melanjutkan ke jenjang perkuliahan S1 di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2016-2020.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik selama perkuliahan. Dalam kegiatan non akademik pada tahun ke-1 hingga ke-4 perkuliahan, penulis aktif menjadi pemain inti tim basket putra Fakultas Teknologi Industri Rekeyasa Sistem dan Departemen Teknik Mesin. Selama aktif dalam tim basket penulis mendapatkan beberapa prestasi diantaranya Juara 1 Dies Natalies ITS tahun 2016 dan 2019 serta Runner Up di tahun 2017 dan 2018. Pada tahun ke-2 hingga ke-4 perkuliahan, penulis aktif bekerja sambil menjadi marketing property di Ray White Klampis. 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 “*A man without plan is nothing*” 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 kennylic21@gmail.com.