



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 184835

**PREDIKSI PARAMETER MATERIAL
VISCOELASTIC EPOXY ADHESIVE
MENGUNAKAN PEMODELAN *FINITE
ELEMENT METHOD***

Naufal Alfi Arzaki
02111640000126

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

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



TUGAS AKHIR - TM 184835

**PREDIKSI PARAMETER MATERIAL
VISCOELASTIC EPOXY ADHESIVE
MENGUNAKAN PEMODELAN *FINITE
ELEMENT METHOD***

Naufal Alfi Arzaki
02111640000126

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

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



TUGAS AKHIR - TM 184835

***PARAMETER PREDICTIONS OF MATERIAL
VISCOELASTIC EPOXY ADHESIVE USING
FINITE ELEMENT METHOD***

Naufal Alfi Arzaki
02111640000126

Supervisor
Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

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

HALAMAN PENGESAHAN

PREDIKSI PARAMETER MATERIAL VISCOELASTIC EPOXY ADHESIVE MENGGUNAKAN PEMODELAN FINITE ELEMENT METHOD

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Naufal Alfi Arzaki
02111640000126

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. **Dr. Eng. Yohanes, S.T. M.Sc.**
NIP. 198006272012121003  (Pembimbing)
2. **Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc.**
NIP. 197805102001121001  (Penguji I)
3. **Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T.**
NIP. 1986040120150419001  (Penguji II)



SURABAYA
AGUSTUS 2020

PREDIKSI PARAMETER MATERIAL VISCOELASTIC EPOXY ADHESIVE MENGGUNAKAN PEMODELAN FINITE ELEMENT METHOD

Nama Mahasiswa : Naufal Alfi Arzaki
NRP : 02111640000126
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRAK

Di bidang otomotif, adhesive joint digunakan untuk membangun konstruksi kendaraan ringan. Penggunaan Adhesive joint melengkapi sambungan konvensional seperti welding dan riveting karena dapat menyatukan dua material yang berbeda jenis yang tidak dapat dilas. Lebih dari itu distribusi tanganan yang merata pada adhesive joint dapat mengurangi inisiasi keretakan pada sambungan.

Sifat mekanik adhesive joint ditentukan oleh properties dari base material dan bulk adhesive. Sifat mekanik bulk adhesive dapat direkayasa dengan mengubah komposisi antara resin dan hardener. Namun, dampak perubahan komposisi tersebut terhadap sifat viscoelastoc material adhesive belum banyak diteliti. Padahal parameter material tersebut menentukan kesuksesan pemodelan finite element untuk rekayasa struktur, khususnya pada beban laju regangan tinggi. Maka dari itu diperlukan penelitian untuk mengetahui dampak perubahan komposisi resin/hardener terhadap parameter viscoelastic adhesive. Pada penelitian ini, parameter-parameter tersebut ditentukan melalui simulasi uji split Hopkinson pressure bar (SHPB) yang dimodelkan dengan finite element method. Parameter-parameter tersebut ditentukan secara trial and error sehingga menghasilkan respon tegangan-regangan yang sama dengan yang diperoleh dari eksperimen SHPB. Pendekatan numerik ini digunakan sebagai alternatif pengujian creep untuk memangkas biaya dan waktu yang dibutuhkan. Di sisi

lain, sifat viscoelastic adhesive tersebut diperlukan untuk pemodelan finite element yang valid untuk analisa adhesive joint.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter pada model material epoxy adhesive untuk komposisi resin/hardener yang divariasikan yaitu 1:1,2:1,1:2,3:2,2:3. Parameter – parameter material viscoelastic yang didapatkan dari simulasi adalah instantaneous shear modulus, shear modulus, dan decay time. Didapatkan juga parameter cepat rambat gelombang pada parameter material adhesive dari model equation of shock (EOS). Analisa yang dilakukan untuk menentukan kolerasi antara nilai parameter material dengan komposisi resin/hardener. yang Setelah dilakukan simulasi kemudian akan dianalisa korelasi antara komposisi tersebut dengan parameter material viscoelastic yaitu, instantaneous shear modulus, shear modulus, dan decay time serta CI (cepat rambat).

Dari hasil yang diperoleh dapat diketahui jika Parameter – parameter material viscoelastic dan cepat rambat parameter material adhesive bersesuaian dengan variasi komposisi adhesive. Penambahan nilai instantaneous shear modulus, shear modulus dan CI menyebabkan kenaikan nilai young modulus dari adhesive, sama halnya dengan penambahan persentase epoxy pada penelitian Kenny Varian jika dilihat secara kualitatif. Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa pemodelan Split Hopkinson Pressure Bar untuk pengujian variasi komposisi resin/hardener yang berbeda-beda membutuhkan hasil eksperimen yang diuji pada alat yang memadai dan valid agar simulasi pada penelitian ini dapat tervalidasi secara kuantitatif maupun kualitatif.

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

**PARAMETER PREDICTIONS OF MATERIAL
VISCOELASTIC EPOXY ADHESIVE USING FINITE
ELEMENT METHOD**

Name : Naufal Alfi Arzaki
NRP : 0211164000126
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRACT

In the automotive sector, adhesive joints are used to build light vehicle construction. The use of adhesive joints complements conventional joints such as welding and riveting because they can join together two different types of materials that cannot be welded. Moreover, even distribution of tension on the adhesive joint can reduce the initiation of cracks in the joint.

The mechanical properties of the adhesive joint are determined by the properties of the base material and bulk adhesive. The mechanical properties of bulk adhesives can be engineered by changing the composition between resin and hardener. However, the impact of these changes in composition on the viscoelastoc properties of the adhesive material has not been widely studied. In fact, these material parameters determine the success of finite element modeling for structural engineering, especially at high stress load loads. Therefore, research is needed to determine the impact of changes in resin / hardener composition on the viscoelastic adhesive parameters. In this research, these parameters were determined through a simulation of the split hopkinson pressure bar (SHPB) test modeled by the finite element method. These parameters were determined by trial and error so as to produce a stress-strain response similar to that obtained from the SHPB experiment. This numerical approach is used as an alternative to creep testing to reduce costs and time required. On the other hand, the viscoelastic properties of the adhesive are

required for a valid finite element modeling for adhesive joint analysis.

The research purpose is to obtain the parameters of the epoxy adhesive material model for the resin / hardener composition which is varied, namely 1: 1,2: 1,1: 2,3: 2,2: 3. The viscoelastic material parameters obtained from the simulation are instantaneous shear modulus, shear modulus, and decay time. Also obtained parameter of wave fast propagation in the adhesive material parameter from the equation of shock (EOS) model. The analysis was carried out to determine the correlation between the material parameter values and the resin / hardener composition. After the simulation is carried out, the correlation between the composition will be analyzed with the parameters of the viscoelastic material, namely, instantaneous shear modulus, shear modulus, and decay time and C1 (fast propagation).

From the results obtained, it can be seen if the viscoelastic material parameters and the fast propagation of the adhesive material parameters correspond to the variations in the composition of the adhesive. The addition of instantaneous shear modulus, shear modulus and C1 values increased the value of the young modulus of the adhesive, as well as the addition of the percentage of epoxy in Kenny Varian's research when viewed qualitatively. From this research it can be seen that the Split Hopkinson Pressure Bar modeling for testing different variations of resin / hardener composition requires experimental results tested on adequate and valid tools so that the simulation in this study can be validated quantitatively and qualitatively.

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

Kata Pengantar

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah subhanahu wa ta'ala yang telah memberikan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini, dan kepada Rasulullah Muhammad shalallahu 'alaihi wa salam yang telah memberikan syafaat kepada seluruh umatnya. Melalui kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung baik secara moral dan material dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Allah SWT atas kurnia, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Ayahanda Agus Prayitno, Ibunda Palupi Puspitorini, Kakak Gelvin Iqbal Pradhipta, Kakak Yanuar Taufik Alfiansyah, dan keluarga yang senantiasa memberikan dukungan moral, kasih sayang, dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang tidak pernah berhenti memberikan ilmu yang bermanfaat, arahan, saran, bimbingan, dan motivasi yang tidak ternilai sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc. dan Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T. selaku dosen penguji tugas akhir atas semua kritik dan saran untuk penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Ibu H.C. Kis Agustin, Ir. DEA. Dr selaku dosen wali penulis selama menempuh Pendidikan di Teknik Mesin FTIRS-ITS, berkat bantuannya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Adisti Auliya' Putri yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis. Terimakasih atas hiburan, motivasi dan doanya selama pengerjaan tugas akhir penulis.

7. Fariza, Hansel, Gassa, Jerry, Faris (Ubi), Martin, Aldi, Garry, Dion, Farhan (us us), Lanang, Thaariq, Shaffan, Fatir, dan Angkatan M59 Teknik Mesin FTIRS-ITS yang telah menemani dan membantu penulis dari awal tahun kuliah hingga dalam penulisan tugas akhir ini.
8. Radifan, Berto, Toni, Reza (Hap), Rifqi, Wasatrio, Bosko, Danang, Hibat, Khabib, Enggar yang telah menemani penulis. Terimakasih atas hiburan, motivasi dan doanya.
9. Kenny Varian, Shidiq, Habibi, Mahalli, Emy, Agih, dan seluruh Warga Laboratorium Otomotif yang telah membantu selama proses pengerjaan tugas akhir, berbagi ilmu dan cerita, dan memberikan motivasi kepada penulis.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu-persatu. Terima kasih banyak.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, segala saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, penulis berharap agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

Daftar Isi

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Mafaat Penelitian	3
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Adhesive	5
2.2 Adhesive Joint	5
2.3 Split Hopkinson Pressure Bar	8
2.4 Kalibrasi dan Reduksi Data pada Split Hopkinson Pressure Bar	9
2.5 Perambatan Gelombang dalam Split Hopkinson Pressure Bar	12
2.6 Penyebaran Gelombang pada Split Hopkinson Pressure Bar	14
2.7 Pengujian Mulur (creep)	15
2.8 Penelitian Terdahulu	16
METODOLOGI	25
3.1 Flowchart Penelitian	25
3.2 Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar	28
3.3 Kalibrasi Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar	29

3.4	Pemodelan Split Hopkinson Pressure Bar dan Simulasi	31
3.4.1	Flowchart Simulasi	31
3.4.2	Pengambilan Data pada Simulasi	32
3.5	Pengolahan Data	34
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	39
4.1	Pemodelan Simulasi	39
4.1.1	<i>Pre-processing</i>	39
4.1.2	<i>Simulation</i>	41
4.1.3	<i>Post-Processing</i>	41
4.2	Analisa Hasil Simulasi	42
4.2.2	Perbandingan Kurva Tegangan - Regangan pada Tiap Variasi	45
4.3	Pembahasan	47
BAB V	.....	53
KESIMPULAN	.....	53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	.....	54
BIODATA PENULIS	.....	56

Daftar Gambar

Gambar 2. 1 Desain Sambungan Adhesive yang Paling Umum Digunakan	7
Gambar 2. 2 Gaya yang Bekerja Pada Butt Adhesive Joint Akibat Pembebanan (a) Tarik Kompresi (b) Bending (Messler, 2004).....	7
Gambar 2. 3 Desain Split Hopkinson Pressure Bar yang Umum Digunakan (Chen & Song, 2011)	9
Gambar 2. 4 Gelombang Tegangan Dalam Bar Components yang (a) Sejajar (b) Tidak Sejajar (Chen & Song, 2011)	11
Gambar 2. 5 Kalibrasi Amplitudo Incident Pulse (Chen & Song, 2011).....	12
Gambar 2. 6 Diagram Posisi-waktu Perambatan Gelombang Dalam Split Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011).....	12
Gambar 2. 7 Bagian Pengujian Split Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011).....	13
Gambar 2. 8 Penyebaran Gelombang Pada Eksperimen Split Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011).....	15
Gambar 2. 9 Kurva creep	15
Gambar 2. 10 Grafik Load-Deflection Hasil Compression Tests (Almeida & Monteiro, 1995).....	17
Gambar 2. 11 Grafik Compression Modulus Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995).....	18
Gambar 2. 12 Grafik Yield Strength Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995).....	18
Gambar 2. 13 Hasil Eksperimen (Almeida & Monteiro, 1995).	19
Gambar 2. 14 Dimensi Spesimen Pin dan Collar (Yokoyama & Shimizu, 1998)	20
Gambar 2. 15 Konfigurasi Spesimen Pin dan Collar (Yokoyama & Shimizu, 1998)	20
Gambar 2. 16 Pengaruh Ketebalan Adhesive Terhadap Kekuatan Geser Untuk Material Adherend Steel (JIS SUJ2) (Yokoyama & Shimizu, 1998)	21

Gambar 2. 17 Pengaruh Ketebalan Adhesive Terhadap Kekuatan Geser Untuk Material Adherend Al-Alloy (7075-T6) (Yokoyama & Shimizu, 1998)	21
Gambar 2. 18 Model Butt Adhesive Joint Dalam Pembebanan Momen Bending (Nakano, Sawa, & Sekiguchi, 2013)	22
Gambar 2. 19 Pengaruh Ketebalan Adhesive Terhadap Distribusi Tegangan Principal Maksimum (Nakano, Sawa, & Sekiguchi, 2013).....	23
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3. 2 Skema Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar	28
Gambar 3. 3 Diagram Lagrangiang Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar.....	29
Gambar 3. 4 Gelombang Regangan terhadap waktu pada Incident Bar hasil kalibrasi.....	30
Gambar 3. 5 Diagram Alir Simulasi	32
Gambar 3. 6 Geometri Spesimen pada Simulasi	33
Gambar 3. 7 Permodelan Split Hopkinson Pressure Bar pada ANSYS Explicit Dynamics	33
Gambar 3. 8 Kurva Regangan Terhadap Waktu Hasil Simulasi	34
Gambar 3. 9 Kurva Hasil Pemotongan Kurva Incident, Reflected, dan Transmitted Strain pada Simulasi.....	35
Gambar 3. 10 Grafik Laju Regangan terhadap Waktu pada Simulasi	36
Gambar 3.11 Kurva Tegangan terhadap Regangan pada Simulasi	36
Gambar 4. 1 Geometri Input Bar pada Split Hopkinson Pressure Bar	40
Gambar 4. 2 Geometri Output Bar pada Split Hopkinson Pressure Bar.....	40

Gambar 4. 3 Geometri Striker Bar pada Split Hopkinson Pressure Bar.....	40
Gambar 4. 4 Geometri pemodelan Split Hopkinson Pressure Bar pada ANSYS	40
Gambar 4. 5 Grafik tegangan – waktu pada pada strain probe 1 dan strain probe 2	42
Gambar 4. 6 Pengaruh Penambahan Nilai Shear Modulus terhadap Young Modulus	43
Gambar 4. 7 Grafik Laju Regangan terhadap Waktu untuk tiap Variasi ISM dan SM.....	44
Gambar 4. 8 Grafik Laju Regangan terhadap Waktu untuk tiap Variasi C1.....	45
Gambar 4. 9 Kurva Tegangan-Regangan untuk tiap Variasi nilai ISM dan SM	46
Gambar 4. 10 Kurva Tegangan-Regangan untuk tiap Variasi nilai C1	46
Gambar 4. 11 Pengaruh Penambahan Nilai Instantaneous Shear Modulus dan Shear Modulus terhadap Young Modulus Adhesive Butt Joint	47
Gambar 4. 12 Pengaruh Penambahan Nilai C1 terhadap Young Modulus Adhesive Butt Joint.....	48
Gambar 4. 13 Pengaruh Komposisi Epoxy dan Hardener terhadap Young Modulus Adhesive Butt Joint	48

Daftar Tabel

Tabel 3. 1 Komponen bar pada Split Hopkinson Pressure Bar...28

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di bidang otomotif, *adhesive joint* digunakan untuk membangun konstruksi kendaraan ringan. Penggunaan *adhesive joint* melengkapi sambungan konvensional seperti *welding* dan *riveting* karena dapat menyatukan dua material yang berbeda jenis yang tidak dapat dilas. Lebih dari itu distribusi tegangan yang merata pada *adhesive joint* dapat mengurangi inisiasi keretakan pada sambungan. *Adhesive joint* diharapkan dapat digunakan sebagai penyambung struktur rangka modular. Rangka modular adalah komponen mobil yang dapat dipertukarkan, untuk memudahkan perbaikan, pemeliharaan serta melakukan konfigurasi ulang agar sesuai fungsi yang diperlukan.

Pada penelitian Almeida dan Monteiro (1995) dijelaskan bahwa *compression modulus* dan *yield strength* dari *bulk adhesive* dapat direkayasa melalui variasi komposisi *epoxy* dengan *hardener*. Penelitian terbaru dilakukan oleh Yohanes dkk. (2019) yang menunjukkan pengaruh dari ketebalan *adhesive* terhadap kekakuan ditemukan ketebalan 2 mm dapat memaksimalkan kekuatan sambungan, penelitian karakterisasi ini menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar*. Dari penelitian terdahulu tentang *adhesive* tersebut menjadi dasar dibuatnya penelitian untuk mengetahui dampak perubahan komposisi resin/hardener terhadap parameter *viscoelastic* pada *adhesive*.

Sifat mekanik *adhesive joint* ditentukan oleh properties dari *base material* dan *bulk adhesive*. Sifat mekanik *bulk adhesive* dapat direkayasa dengan mengubah komposisi antara *resin* dan *hardener*. Namun, dampak perubahan komposisi tersebut terhadap sifat *viscoelastic* *c* material *adhesive* belum banyak diteliti. Padahal parameter material tersebut menentukan kesuksesan pemodelan *finite element* untuk rekayasa struktur, khususnya pada beban laju regangan tinggi. Maka dari itu diperlukan penelitian

untuk mengetahui dampak perubahan komposisi resin/hardener terhadap parameter *viscoelastic adhesive*. Pada penelitian ini, parameter-parameter tersebut ditentukan melalui simulasi uji *split hopkinson pressure bar* (SHPB) yang dimodelkan dengan *finite element method*. Parameter-parameter tersebut ditentukan secara *trial and error* sehingga menghasilkan respon tegangan-regangan yang sama dengan yang diperoleh dari eksperimen SHPB. Pendekatan numerik ini digunakan sebagai alternatif pengujian creep untuk memangkas biaya dan waktu yang dibutuhkan. Di sisi lain, sifat *viscoelastic adhesive* tersebut diperlukan untuk pemodelan finite element yang valid untuk analisa *adhesive joint*.

Simulasi dilakukan menggunakan *split hopkinson pressure bar* dengan spesimen *adhesive butt joint* dengan *base material aluminium alloy AISI 6061* silindris dengan dan panjang *adherend* 50 milimeter. Ketebalan *adhesive* diatur 2 milimeter. Parameter – parameter material *viscoelastic* yang didapatkan dari simulasi adalah *instantaneous shear modulus*, *shear modulus*, dan *decay time*. Didapatkan juga parameter cepat rambat gelombang pada parameter material *adhesive* dari model *equation of shock (EOS)*.

Dari hasil yang diperoleh dapat diketahui jika Parameter – parameter material *viscoelastic* dan cepat rambat parameter material *adhesive* bersesuaian dengan variasi komposisi adhesive. Penambahan nilai *instantaneous shear modulus*, *shear modulus* dan C1 menyebabkan kenaikan nilai *young modulus* dari *adhesive*, sama halnya dengan penambahan persentase epoxy pada penelitian Kenny Varian jika dilihat secara kualitatif. Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa pemodelan *split hopkinson pressure bar* untuk pengujian variasi komposisi resin/hardener yang berbeda-beda membutuhkan hasil eksperimen yang diuji pada alat yang memadai dan valid agar simulasi pada penelitian ini dapat tervalidasi secara kuantitatif maupun kualitatif.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana pemodelan pada *software* berbasis *FEM* untuk pengujian variasi komposisi yang berbeda-beda?
2. Bagaimana parameter material *Epoxy resin* pada *software* berbasis *FEM* melalui perbandingan dengan data eksperimen?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Gaya gesek antara tumpuan dengan *bar components* diabaikan.
2. Pengujian dilakukan pada temperatur ruang.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Membuat pemodelan pada *software* berbasis *FEM* untuk pengujian variasi komposisi yang berbeda-beda.
2. Mendapatkan parameter material *Epoxy resin* pada *software* berbasis *FEM* melalui perbandingan dengan data eksperimen.

1.5 Mafaat Penelitian

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian yang berkaitan ataupun penelitian lebih lanjut mengenai *adhesive joint*.
2. Sebagai pengembangan pemahaman terhadap karakteristik *adhesive joint*.
3. Memangkas biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk komposisi *epoxy* dan *hardener* pada *adhesive joint*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Adhesive

Menurut DIN EN 923, *Adhesive* adalah pengikat non logam yang bekerja melalui adhesi dan kohesi atau dapat biasa disebut campuran satu atau dua polimer organik yang mampu bereaksi secara kimia menghasilkan polimer baru serta memiliki kemampuan rekat. Dalam industri, *adhesive* banyak digunakan untuk berbagai macam kebutuhan bergantung kekuatan yang diperlukan, mulai dari yang membutuhkan kekuatan rendah seperti pada kertas dengan sampulnya hingga yang membutuhkan kekuatan tinggi pada struktur mobil dan pesawat terbang.

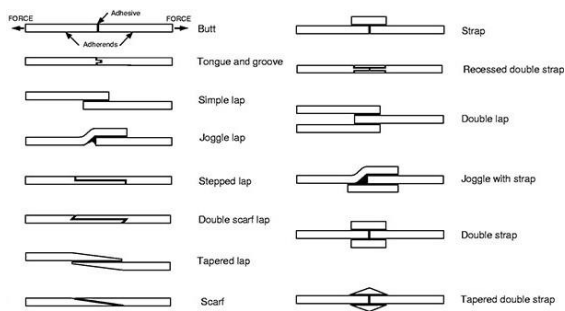
2.2 Adhesive Joint

Adhesive joint merupakan sebuah teknik menyambungkan dua material (*Adherend*) menggunakan perekat. Kelebihan utama dari *adhesive joint* adalah mampu menyambungkan material tidak sejenis yang memungkinkan untuk menjadi solusi pembuatan struktur kendaraan ringan dari berbagai material. Kelebihan lain dari *adhesive joint* adalah distribusi tegangan yang *uniform*. Desain sambungan *adhesive* perlu diperhatikan agar menghasilkan 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.

Tegangan kompresi terjadi apabila 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*.

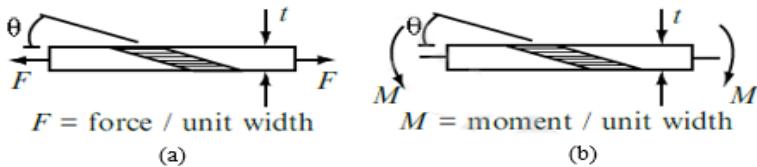
Tegangan geser terjadi apabila beban parallel terhadap bidang sambungan berusaha memisahkan sambungan dengan menggeser elemen sambungan satu terhadap yang lainnya. Tegangan geser terdistribusi merata pada seluruh area sambungan. Sebagian besar beban yang diaplikasikan pada struktur sambungan *adhesive* 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*. Ketebalan *adhesive* bervariasi mulai dari 0.005 mm hingga 0.015 mm.

Sambungan *adhesive* yang ideal harus mampu mencegah kegagalan sambungan. Desain sambungan *adhesive* yang paling umum dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Desain Sambungan Adhesive yang Paling Umum Digunakan

Scarf adhesive joint merupakan tipe sambungan *adhesive* yang paling umum digunakan. Selain itu, *Scarf adhesive joint* merupakan sambungan *adhesive* yang paling mudah untuk dianalisa karena beban yang bekerja berada pada satu garis lurus yang sama dan tidak terdapat *bending*. Untuk tipe sambungan ini, tegangan yang paling penting adalah tegangan tarik yang bekerja normal terhadap permukaan *adherend* dan tegangan geser yang bekerja parallel terhadap permukaan *adherend*. Karena garis sumbu *adhesive* pada *Scarf joint* berada pada sudut terhadap beban yang diberikan, digunakan teori tegangan kombinasi untuk menentukan fungsi sudut untuk menghitung tegangan yang terjadi. Dengan menggunakan *Scarf adhesive joint*, konsentrasi tegangan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan *butt joint*. Gaya yang bekerja pada *Scarf adhesive joint* dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Gaya yang Bekerja Pada Scarf Adhesive Joint Akibat Pembebanan (a) Tarik Kompresi (b) Bending (Messler, 2004)

Dengan asumsi bahwa kedua *adherend* yang digunakan menggunakan material yang sama dan isotropik, tegangan yang terjadi akibat pembebanan tarik atau kompresi yang ditunjukkan pada gambar 2.2 (a) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\tau = \frac{F}{t} \sin \theta \cos \theta \quad (2.1)$$

$$\sigma = \frac{F}{t} \sin^2 \theta \quad (2.2)$$

Dengan asumsi yang sama, tegangan yang terjadi akibat pembebanan *bending* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

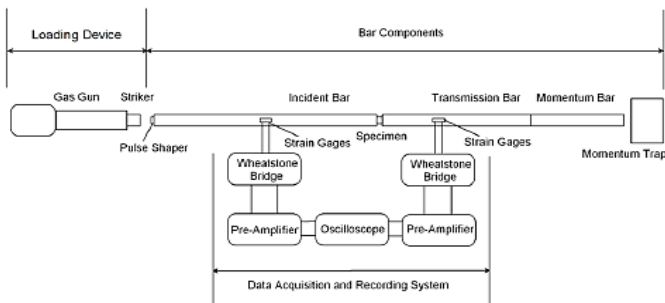
$$\tau = \frac{6M}{t^2} \sin \theta \cos \theta \quad (2.3)$$

$$\sigma = \frac{6M}{t^2} \sin^2 \theta \quad (2.4)$$

dimana τ merupakan tegangan geser dan σ merupakan tegangan normal.

2.3 Split Hopkinson Pressure Bar

Split Hopkinson Pressure Bar merupakan alat karakterisasi untuk respons mekanis dari material yang berdeformasi pada laju regangan tinggi. Herbert Kolsky adalah orang pertama yang menciptakan *Split Hopkinson Pressure Bar* pada tahun 1949, maka dari itu *Split Hopkinson Pressure Bar* biasa disebut juga dengan *Kolsky Bar* yang kemudian dikembangkan oleh Krafft dengan menambahkan *strain gage* pada *Split Hopkinson Pressure Bar* untuk mengukur gelombang regangan. Secara umum *Split Hopkinson Pressure Bar* terdiri dari 3 komponen utama yaitu *loading device*, *bar components*, dan *data acquisition and recording system* seperti pada gambar 2.3 milik percobaan Chen & Song.



Gambar 2. 3 Desain Split Hopkinson Pressure Bar yang Umum Digunakan (Chen & Song, 2011)

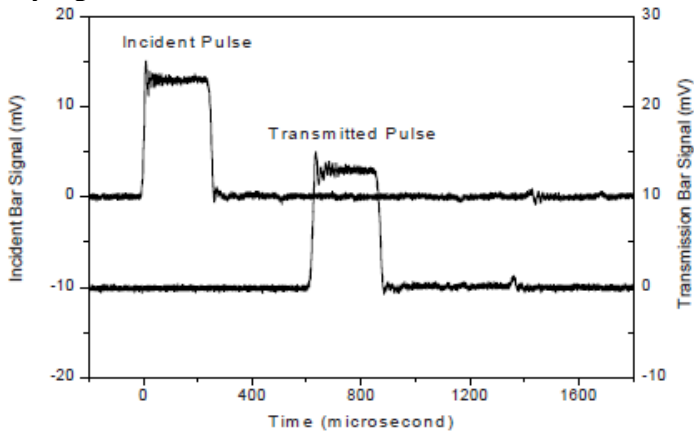
Metode pembebanan yang lebih umum digunakan pada *Split Hopkinson Pressure Bar* saat ini merupakan pembebanan dinamis laju regangan tinggi. dimana penumbuk (*striker bar*) digunakan untuk memberikan gaya tumbukan pada *incident bar*. Gaya tumbukan yang diberikan pada *incident bar* akan menghasilkan 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*.

2.4 Kalibrasi dan Reduksi Data pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

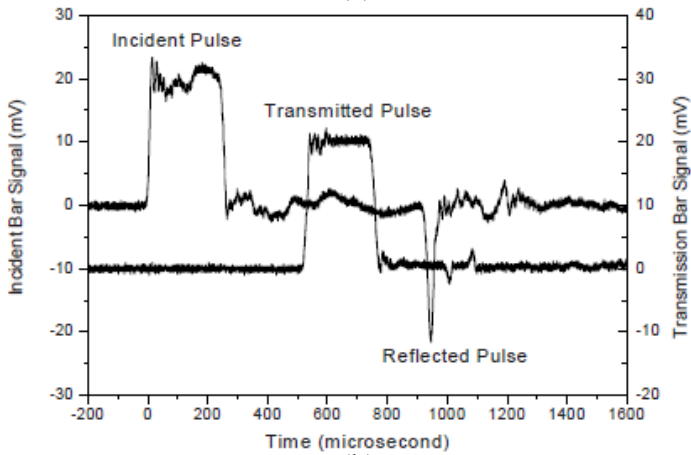
Sebelum pengujian, pada *Split Hopkinson Pressure Bar* dilakukan kalibrasi. Kalibrasi dilakukan agar setiap hasil yang didapatkan pada eksperimen dapat dibandingkan satu sama lain dan hasil yang didapatkan benar. Kalibrasi yang dilakukan adalah dengan membandingkan kecepatan rambat material hasil kalibrasi dengan kecepatan rambat material asli serta untuk menguji apakah ada *misalignment* pada system *bar* yang digunakan.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk memeriksa kesejajaran sistem *bar* adalah dengan meluncurkan penumbuk pada *incident bar* yang bersentuhan langsung dengan *transmission bar* tanpa ada spesimen di antaranya. Penumbuk dan *incident bar* yang sejajar akan menghasilkan sebuah *incident pulse* dengan profil trapesium seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.4(a). Apabila *incident bar* tidak sejajar dengan *striker*, *incident pulse* akan terdistorsi dengan *baseline* yang fluktuatif seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.4(b). Dikarenakan *transmission bar*

bersentuhan langsung dengan *incident bar*, *incident pulse* dalam *incident bar* akan ditransmisikan ke dalam *transmission bar* tanpa adanya pulsa yang direfleksikan. Meskipun begitu, 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)



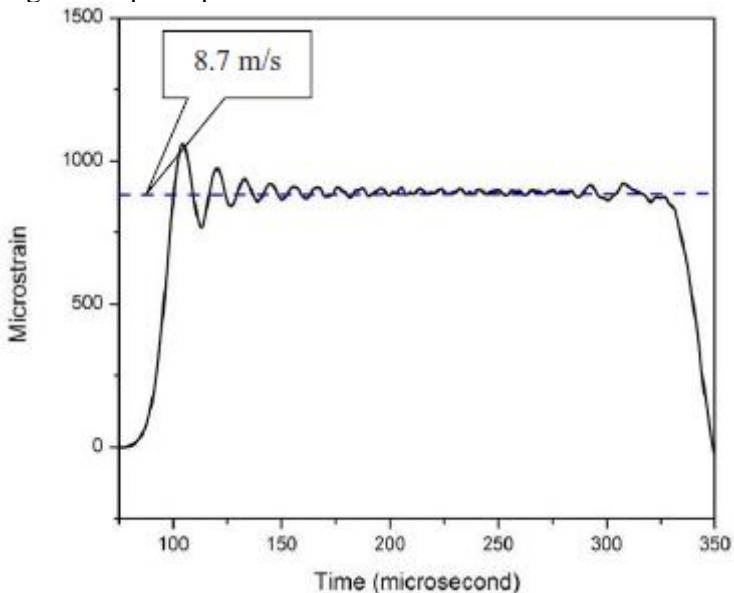
(b)

Gambar 2. 4 Gelombang Tegangan Dalam Bar Components yang (a) Sejajar (b) Tidak Sejajar (Chen & Song, 2011)

Apabila sistem *bar* sudah sejajar, tegangan dan regangan *bar* dapat diprediksi berdasarkan kecepatan tumbukan. 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:

$$C_B = \frac{2l}{\Delta t} \quad (2.5)$$

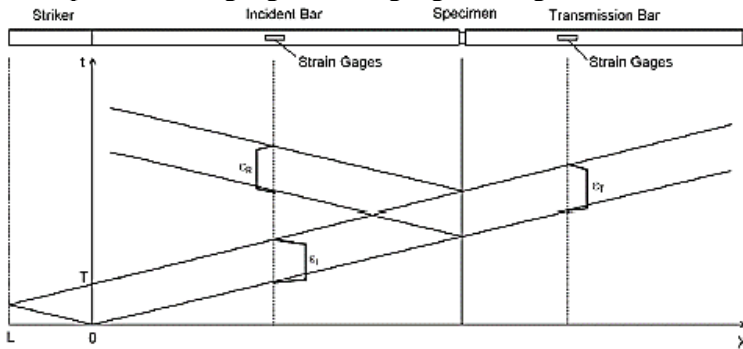
dimana l merupakan jarak antara *strain gage* dengan ujung spesimen, dan Δt merupakan interval waktu antara *incident pulse* dengan *reflected pulse*. Gambar 2.5 menunjukkan regangan aktual yang diukur dalam *incident bar* dan amplitudo yang diprediksikan dengan kecepatan penumbukan 8.7 m/s.



Gambar 2. 5 Kalibrasi Amplitudo Incident Pulse (Chen & Song, 2011)

2.5 Perambatan Gelombang dalam *Split Hopkinson Pressure Bar*

Gambar 2.6 menunjukkan diagram posisi perambatan gelombang di dalam *bar* terhadap waktu. Dapat dilihat penurunan rumus persamaan tegangan dan regangan sebagai berikut.



Gambar 2. 6 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 impact penumbuk bergantung pada kecepatan tumbukan, v_{st} ,

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

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

dimana ρ_B dan C_B merupakan massa jenis dan kecepatan gelombang material *bar*, secara berurutan.

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

$$v_1 = C_B (\epsilon_I - \epsilon_R) \quad (2.8)$$

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

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:

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

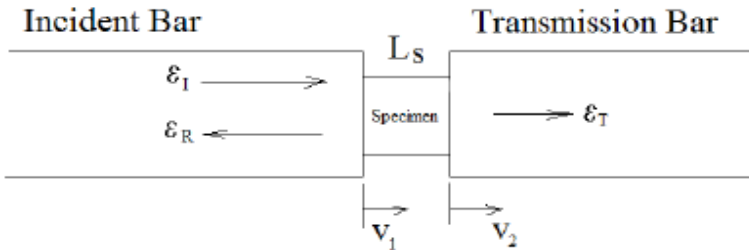
$$\varepsilon = \frac{C_B}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (2.11)$$

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 dan A_S merupakan luas permukaan *bar* dan spesimen secara berurutan, dan E_B merupakan modulus Young material *bar*.



Gambar 2. 7 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 dapat diperoleh:

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

Dengan begitu, 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, tegangan dalam spesimen dapat dihitung dengan mengambil nilai rata-rata tegangan pada kedua ujung spesimen yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

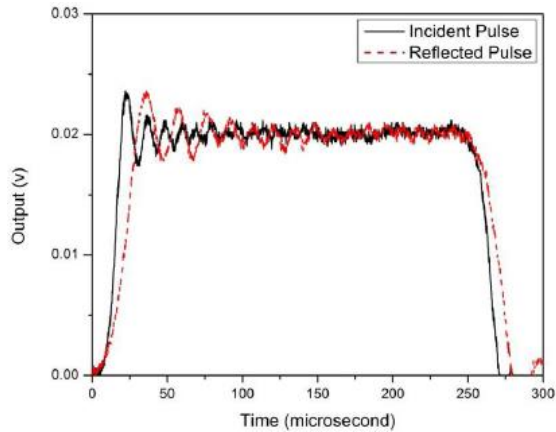
$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_B}{A_s} \cdot E_B (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (2.19)$$

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

2.6 Penyebaran Gelombang pada *Split Hopkinson Pressure Bar*

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. Solusi Pochhammer-Chree menunjukkan bahwa kecepatan perambatan gelombang tegangan berkurang dengan berkurangnya panjang gelombang. Dengan kata lain, gelombang frekuensi tinggi merambat lebih lambat dibandingkan dengan gelombang frekuensi rendah.

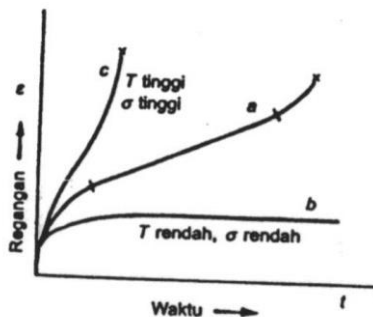
Dalam eksperimen menggunakan *Split Hopkinson Pressure Bar*, pulsa ideal yang dihasilkan oleh tumbukan pada *incident bar* terdiri dari spektrum frekuensi. Setiap komponen frekuensi memiliki kecepatan perambatannya masing-masing. Komponen pulsa dengan frekuensi yang lebih tinggi tertinggal oleh komponen pulsa dengan frekuensi yang lebih rendah setelah merambat dengan jarak tertentu. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya penyebaran gelombang seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8. *Incident pulse* dan *reflected pulse* pada gambar 2.13 diukur dengan menggunakan *strain gage* yang sama pada pertengahan *incident bar*, sehingga perbedaan yang ditunjukkan merupakan akibat dari penyebaran gelombang.



Gambar 2. 8 Penyebaran Gelombang Pada Eksperimen Split Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011)

2.7 Pengujian Mulur (*creep*)

Definisi creep adalah aliran plastis yang dialami material pada tegangan tetap. Kurva a pada gambar 2.9 menampilkan karakteristik kurva creep dan setelah regangan seketika akibat pembebanan tiba-tiba, proses creep dapat dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu creep primer atau creep transien, creep sekunder atau creep keadaan-stasioner dan creep tersier atau creep dipercepat.



Gambar 2. 9 Kurva creep

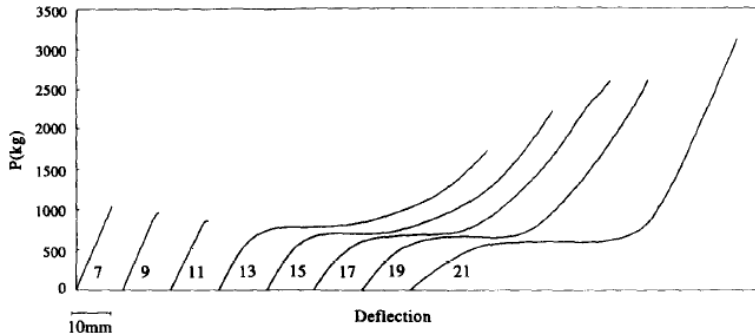
2.8 Penelitian Terdahulu

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 2.14. Jumlah *resin* dan *hardener* ditimbang ± 0.0002 g dengan *standart deviasi* 0.5%.

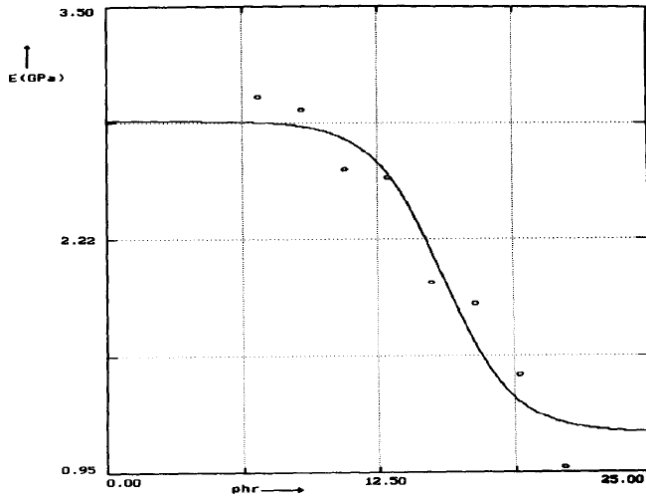
Sistem pencampuran *resin-hardener* menggunakan acuan rasio *stoichiometric* dengan nilai setimbangannya pada angka 13 phr. Pada eksperimen ini dilakukan dengan rentang kaya akan *epoxy* dan kaya akan *amine*, untuk yang kaya *epoxy* nilainya berkisar phr < 13 dan yang kaya akan *amine* nilainya berkisar 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.

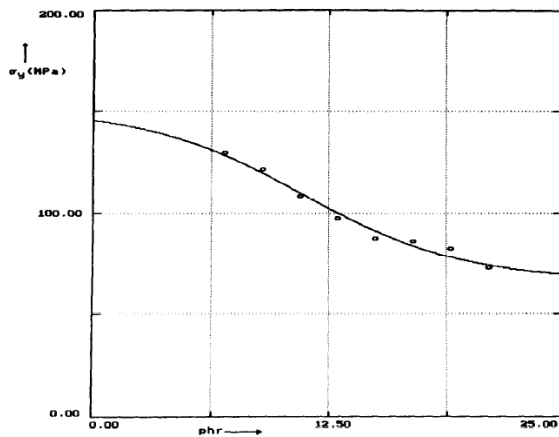


Gambar 2. 10 Grafik Load-Deflection Hasil Compression Tests (Almeida & Monteiro, 1995)

Setelah dilakukan pengujian terhadap spesimen dengan rasio resin-hardener didapatkan kurva *load-deflection* pada gambar 2.14. Melalui kurva ini dapat disimpulkan bahwa semakin banyak kandungan epoxy pada *adhesive* mengakibatkan semakin rendah nilai *load-deflection* daripada spesimen yang menggunakan sambungan 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 2.15, dimana nilai-nilai *modulus young* menurun seiring bertambahnya nilai phr. Pada gambar 2.16 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 2.17.



Gambar 2. 11 Grafik Compression Modulus Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995)



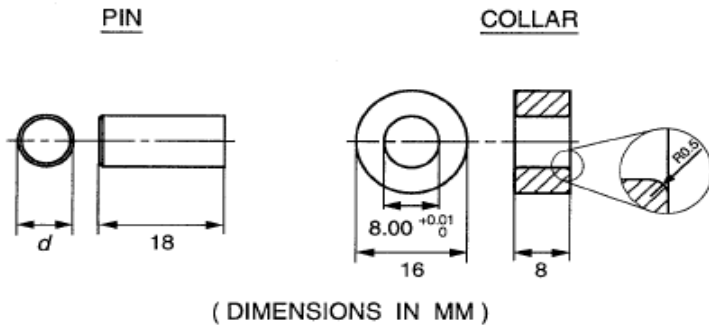
Gambar 2. 12 Grafik Yield Strength Hasil Eksperimen dari Variasi 7 hingga 21 phr (Almeida & Monteiro, 1995)

Experimental Results

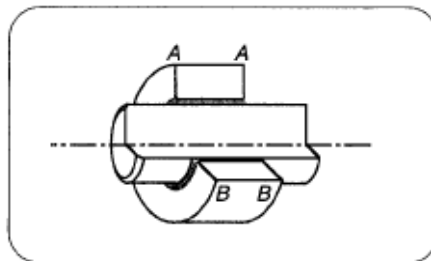
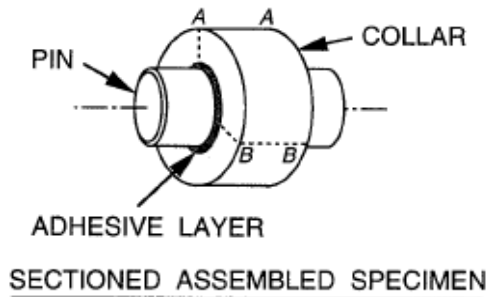
<i>phr</i>	<i>E</i> (GPa)	σ_y (MPa)
7	3.00 ± 0.1	129.4 ± 3.0
9	2.93 ± 0.1	121.0 ± 5.3
11	2.60 ± 0.1	108.1 ± 4.0
13	2.55 ± 0.3	97.0 ± 7.1
15	1.98 ± 0.1	87.2 ± 8.1
17	1.86 ± 0.2	85.7 ± 3.5
19	1.48 ± 0.1	82.0 ± 5.0
21	0.97 ± 0.2	72.5 ± 2.8

Gambar 2. 13 Hasil Eksperimen (Almeida & Monteiro, 1995)

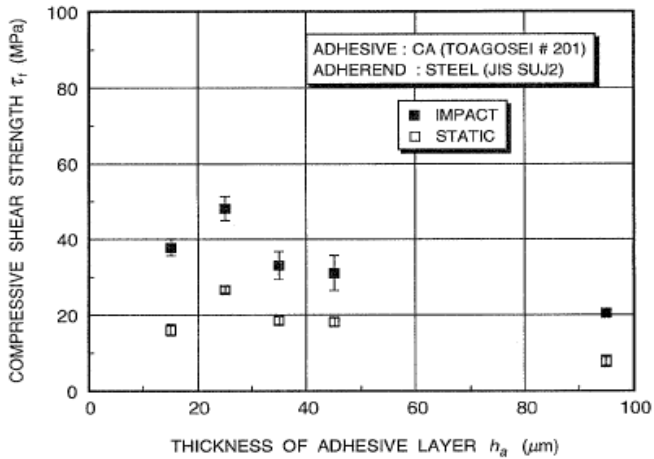
Penelitian dilakukan oleh Yokoyama dan Shimizu untuk melihat pengaruh ketebalan *adhesive* sianokrilat terhadap kekuatan geser pada laju pembebanan tinggi dengan menggunakan *split hopkinson pressure bar*. Spesimen memiliki bentuk berupa *pin* dan *collar* dengan dimensi yang dapat dilihat pada gambar 2.14. Kedua spesimen kemudian disambungkan dengan konfigurasi yang dapat dilihat pada gambar 2.15. Dari gambar 2.16 dan 2.17, dapat dilihat bahwa kekuatan geser statis dan impak dari sambungan kedua spesimen bertambah hingga mencapai nilai maksimum pada ketebalan *adhesive* 25 μ m. Kekuatan geser keduanya kemudian berkurang terlepas dari laju pembebanan yang diberikan (Yokoyama & Shimizu, 1998). Pada penelitian yang akan dilakukan, spesimen yang akan diuji berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Yokoyama dan Shimizu. Spesimen yang akan diuji pada penelitian ini berupa *Butt adhesive joint* dengan *steel-filled epoxy adhesive*.



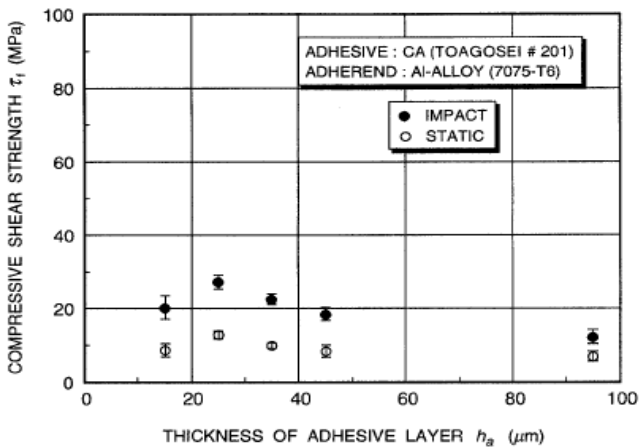
Gambar 2. 14 Dimensi Spesimen Pin dan Collar (Yokoyama & Shimizu, 1998)



Gambar 2. 15 Konfigurasi Spesimen Pin dan Collar (Yokoyama & Shimizu, 1998)

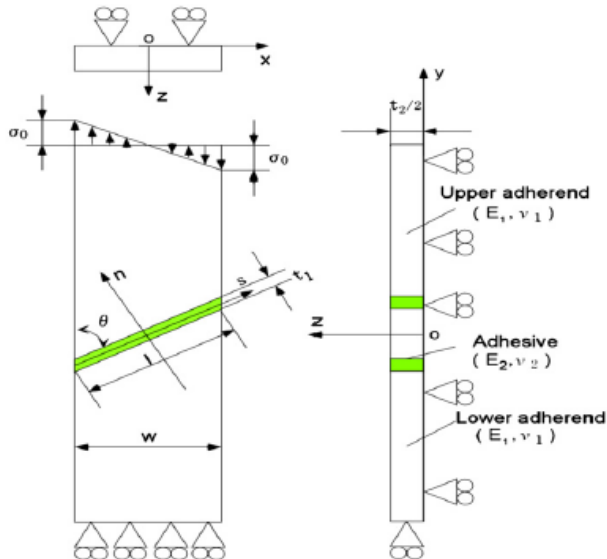


Gambar 2. 16 Pengaruh Ketebalan Adhesif Terhadap Kekuatan Geser Untuk Material Adherend Steel (JIS SUJ2) (Yokoyama & Shimizu, 1998)

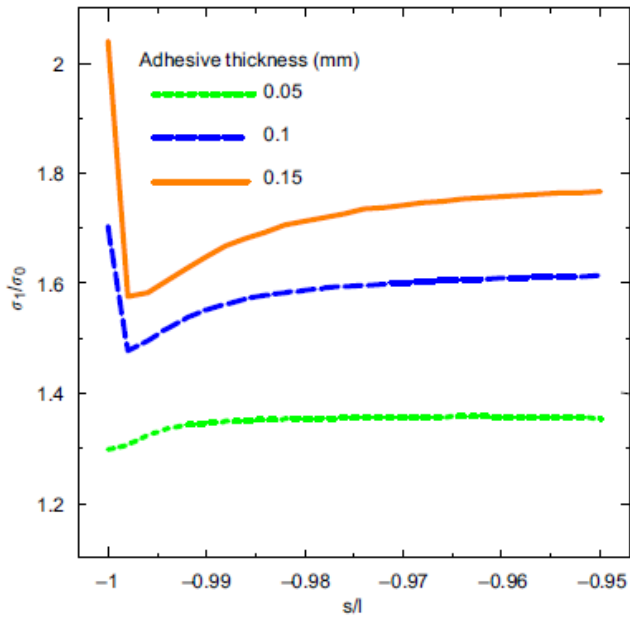


Gambar 2. 17 Pengaruh Ketebalan Adhesif Terhadap Kekuatan Geser Untuk Material Adherend Al-Alloy (7075-T6) (Yokoyama & Shimizu, 1998)

Penelitian lain dilakukan oleh Nakano, Sawa, dan Sekiguchi untuk menganalisa pengaruh sudut *scarf*, modulus Young *adhesive*, dan ketebalan *adhesive* terhadap distribusi tegangan pada *scarf adhesive joint* akibat beban momen *bending* statis dengan metode elemen hingga. Spesimen yang diuji oleh Nakano, Sawa, dan Sekiguchi dapat dilihat pada gambar 2.18. Pada gambar 2.19 dapat dilihat bahwa distribusi tegangan *principal* maksimum bertambah dengan bertambahnya ketebalan *adhesive*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kekuatan *scarf adhesive joint* bertambah dengan berkurangnya ketebalan *adhesive*. Pada penelitian yang akan dilakukan, metode pembebanan yang digunakan berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Nakano, Sawa, dan Sekiguchi. Selain itu, analisa yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah dengan melakukan eksperimen.



Gambar 2. 18 Model Butt Adhesive Joint Dalam Pembebanan Momen Bending (Nakano, Sawa, & Sekiguchi, 2013)



Gambar 2. 19 Pengaruh Ketebalan Adhesive Terhadap Distribusi Tegangan Principal Maksimum (Nakano, Sawa, & Sekiguchi, 2013)

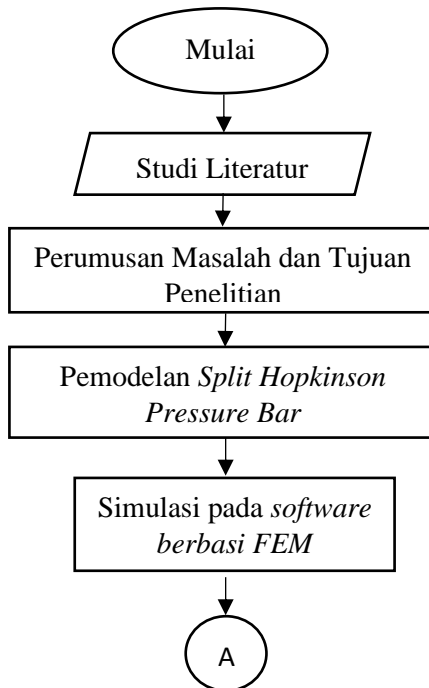
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

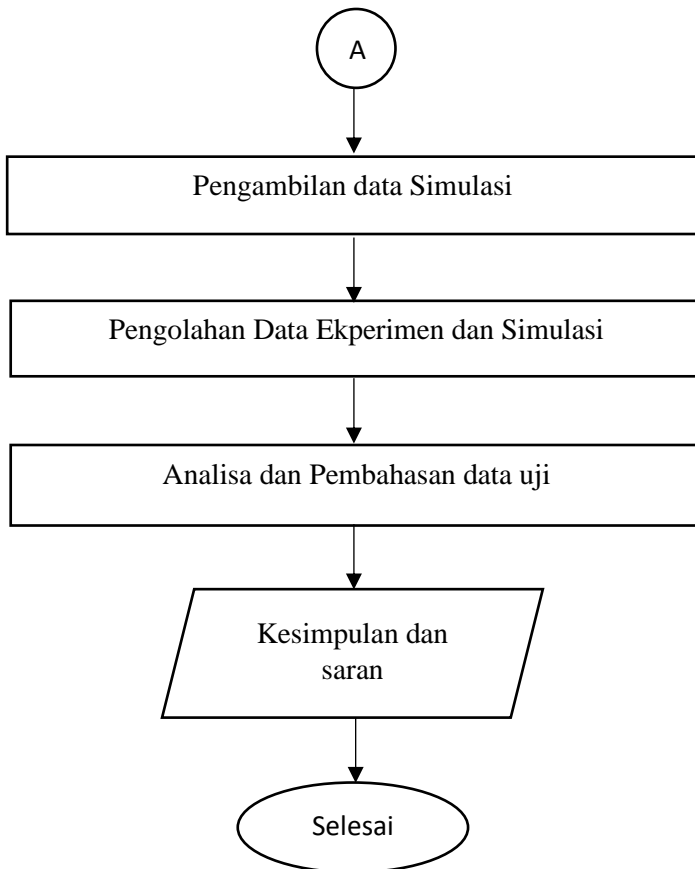
BAB III METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter pada model material epoxy adhesive untuk komposisi resin/hardener yang bervariasi yaitu 1:1, 2:1, 1:2, 3:2, 2:3. Parameter-parameter tersebut ditentukan *secara trial-error* sehingga menghasilkan respon tegangan-regangan yang sama dengan yang diperoleh dari eksperimen SHPB. Pengujian ini akan dijelaskan secara rinci sebagai berikut.

3.1 *Flowchart* Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan. Tahapan penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian ini digambarkan melalui flowchart gambar 3.1 sebagai berikut:





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

a) Studi Literatur

Untuk mencari referensi yang berkaitan dengan penelitian melalui buku teks dan jurnal ilmiah. Materi yang di pelajari adalah dasar teori dari *adhesive joint*, prinsip kerja dari *split hopkinson pressure bar*, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini. Tujuan dari studi literatur adalah mendapatkan rumusan masalah penelitian.

b) Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Identifikasi masalah pada penelitian ini dibagi menjadi perumusan masalah dan tujuan penelitian. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan parameter pada model material epoxy adhesive untuk komposisi resin/hardener yang bervariasi. Kemudian akan dianalisa korelasi antara komposisi tersebut dengan parameter material viscoelastic yaitu, instantaneous shear modulus, shear modulus, dan decay time serta C1 (cepat rambat).

c) Pemodelan *Split Hopkinson Pressure Bar* dan Simulasi

Simulasi yang dilakukan menggunakan *numerik explicit dynamic (ANSYS)* dengan membuat pemodelan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* dan spesimen *Butt Adhesive Joint* seperti yang dibuat pada eksperimen Kenny Varian. Variasi komposisi dilakukan dengan merubah *properties* dari Resin Epoxy yang digunakan.

d) Pengolahan Data Hasil Simulasi

Data yang didapatkan berupa sinyal regangan terhadap waktu yang akan diolah menjadi kurva tegangan-regangan memakai rumus yang sudah dijelaskan pada dasar teori. Dari kurva tegangan-regangan akan didapatkan nilai *young modulus* yang akan dibandingkan hasilnya dengan eksperimen.

e) Analisa dan Pembahasan data

Analisa dan pembahasan data dilakukan untuk mengetahui mendapatkan parameter pada model material epoxy adhesive untuk komposisi resin/hardener yang bervariasi. Korelasi yang diperoleh dapat digunakan untuk memprediksi nilai parameter material adhesive pada komposisi resin/hardener lainnya. Parameter didapatkan dengan uji cara *trial and error* pada simulasi *numerik explicit dynamic (ANSYS)* dengan pemodelan finite element uji SHPB. Setelah mengetahui hubungannya analisa dan pembahasan data akan digunakan sebagai acuan menarik kesimpulan.

f) Kesimpulan dan saran

Penarikan kesimpulan berdasarkan analisa yang dilakukan dengan menjawab tujuan penelitian yang sudah ditentukan serta

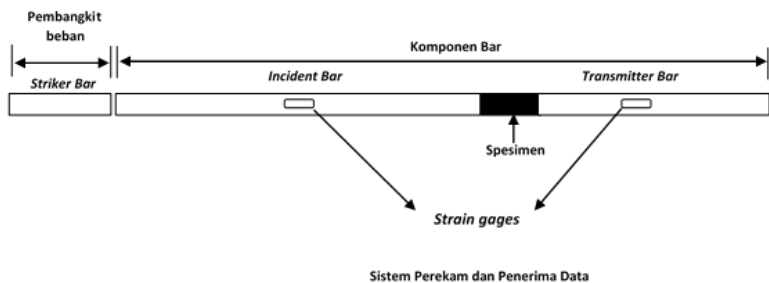
memberikan saran untuk penelitian selanjutnya agar hasil yang didapatkan lebih baik.

3.2 Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar

Penelitian ini pemodelan alat yang digunakan adalah *split hopkinson preassure bar*. *Split hopkinson preassure bar* terdiri dari beberapa komponen yaitu *striker*, *incident bar* dan *transmission bar* dengan material AL 6061-T6. Alat ukur yang digunakan adalah *strain gage* yang berfungsi untuk mengubah regangan yang melewati *incident bar* dan *transmission bar* menjadi sinyal digital yang diletakkan pada *incident bar* dan *transmission bar* seperti yang terdapat papda gambar 3.2. Pada tabel 3.1 adalah spesifikasi komponen *bar* pada *Split Hopkinson Pressure Bar* yang saya gunakan pada penelitian:

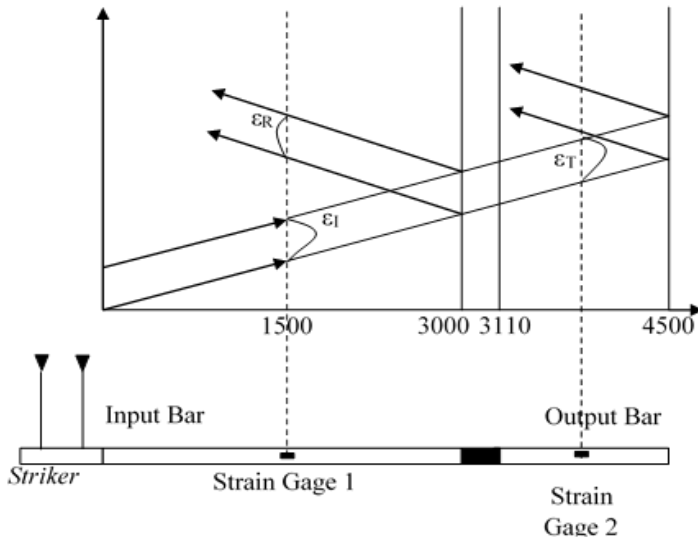
Tabel 3. 1 Komponen bar pada Split Hopkinson Pressure Bar

Nama Part	Material	Geometri	Panjang (mm)	Diameter (mm)
<i>Incident Bar</i>	AL 6061-T6	Silinder Pejal	3000	20
<i>Transmitter Bar</i>			1500	20
<i>Striker Bar</i>		Silinder Pejal dengan <i>chamfer</i>	250	20



Gambar 3. 2 Skema Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar

Peletakan *strain gage* pada alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* harus diperhatikan, karena akan terjadi tumpang tindih sinyal jika jarak *strain gage* pada *incident bar* dan *transmission bar* terlalu dekat. Melalui gambar 3.3 diagram lagrangian berikut posisi *strain gage* dapat ditentukan.



Gambar 3. 3 Diagram Lagrangian Alat Uji Split Hopkinson Pressure Bar

3.3 Kalibrasi Alat Uji *Split Hopkinson Pressure Bar*

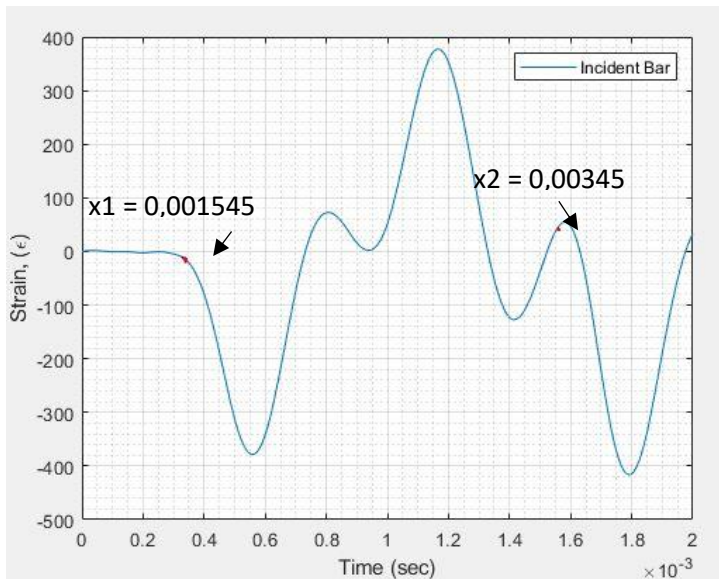
Kalibrasi yang dilakukan bertujuan untuk memastikan akurasi data yang didapatkan saat eksperimen dengan menguji kecepatan rambat dan *misalignment* pada alat ukur. Dalam kalibrasi ini dilakukan dengan melakukan pembebanan pada *input bar* tanpa menggunakan spesimen pada alat uji SHPB. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan cepat rambat material hasil pengujian dengan cepat rambat material sebenarnya. Cepat rambat gelombang pada material dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut:

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

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

Pada cepat rambat gelombang elastis hasil pengujian didapatkan dari persamaan berikut:

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



Gambar 3. 4 Gelombang Regangan terhadap waktu pada Incident Bar hasil kalibrasi

Dengan data gelombang pada gambar 3.4 didapatkan cepat rambat gelombang sebesar:

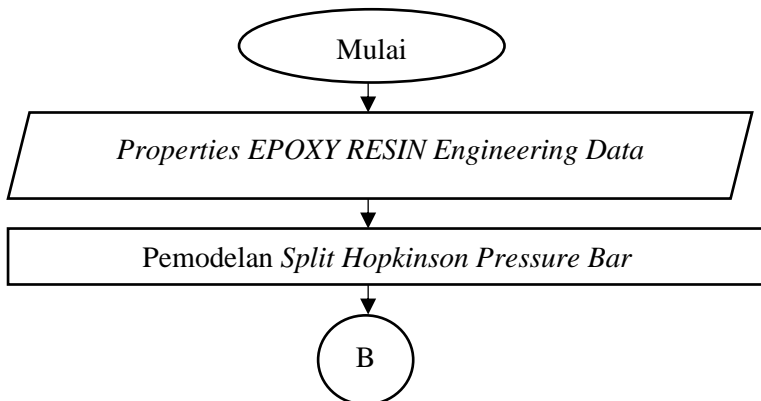
$$C_b = \frac{L}{\Delta t} = \frac{2.3 \text{ m}}{(0.001545 - 0.000345)\text{s}} = \frac{6 \text{ m}}{0.0012\text{s}} = 5000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

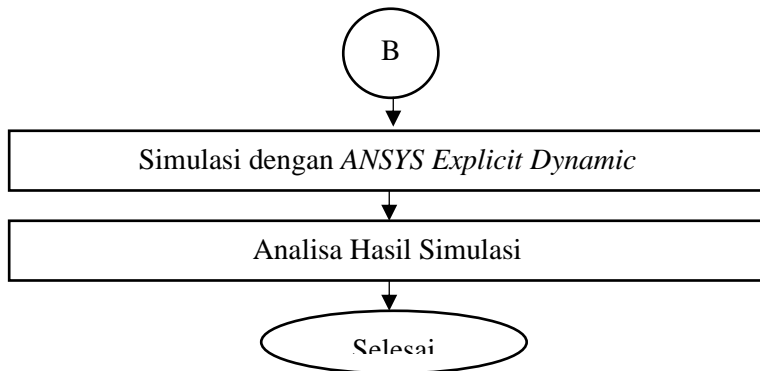
Kemampuan Cepat rambat gelombang pada material sebesar 5051.585 m/s, sedangkan cepat rambat gelombang pada material dari hasil pengujian kalibrasi sebesar 5000 m/s. Selisih perhitungan dan pengujian sebesar 1.02%. Hal ini bisa terjadi dikarenakan material dari *incident bar* tidak sama persis dengan material aslinya. Oleh karena itu, alat dapat dinyatakan terkalibrasi sehingga data yang akan didapatkan dari pengujian menggunakan alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* dapat diterima.

3.4 Pemodelan Split Hopkinson Pressure Bar dan Simulasi

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *ANSYS Explicit Dynamic*. Tipe dari material yang digunakan dibuat sama dengan eksperimen. Untuk material SPHB menggunakan Aluminium AL 6061-T6 dan *Adhesive* menggunakan *EPOXY RESIN*. Tahapan simulasi dijelaskan melalui diagram alir pada gambar 3.5.

3.4.1 Flowchart Simulasi





Gambar 3. 5 Diagram Alir Simulasi

3.4.2 Pengambilan Data pada Simulasi

Pengambilan data simulasi didapatkan dari pemodelan *Split Hopkinson Pressure Bar* pada *ANSYS Explicit Dynamic*. Spesimen uji menggunakan *adherend Butt joint* dengan material AL 6061-T6. *Adhesive* yang digunakan bertipe *EPOXY RESIN*. Variasi komposisi pada simulasi dilakukan dengan merubah variasi nilai *viscolastic* dan *CI* (cepat rambat) pada *adhesive* karena kedua parameter tersebut diduga mempengaruhi kekerasan pada *adhesive* sama seperti memvariasikan komposisi. Rentang nilai dari variasi nilai *viscolastic Instantaneous Shear Modulus* dan *CI* (cepat rambat) didapatkan melalui *properties adhesive* pada MATWEB.

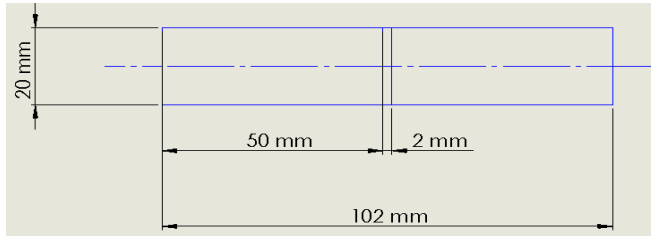
Berikut adalah batas rentang nilai *viscoelastic properties adhesive* pada MATWEB dan rentang nilai *C1* pada jurnal:

$$\begin{aligned}
 \text{Shear Modulus} &= 3.42 \times 10^8 - 5.18 \times 10^9 \text{ Pa} \\
 \text{Instantaneous Shear Modulus} &= 3.42 \times 10^8 - 5.18 \times 10^9 \text{ Pa} \\
 \text{Parameter C1} &= 1250 - 2270 \text{ ms}^{-1}
 \end{aligned}$$

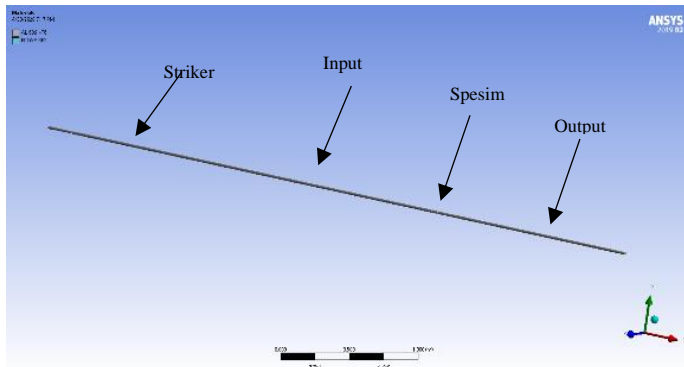
Dari batas rentang nilai tersebut, parameter material *adhesive* yang dipakai pada penelitian ini dapat ditentukan, spesimen *adhesive butt joint* seperti pada gambar 3.6 akan digunakan dengan nilai *properties* pada material sebagai berikut:

1. *Data adhesive*

Tipe adhesive	= EPOXY RES 1
Shear Modulus adhesive	= $8,9 \times 10^8 - 1,4 \times 10^9$ Pa
Instantaneous Shear Modulus	= $1,4 \times 10^9 - 2,4 \times 10^9$ Pa
Parameter C1	= $1250 - 2270$ ms ⁻¹
Ketebalan adhesive (L_s)	= $2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$
2. Data adherend dan bar	
Tipe adherend dan bar	= AL 6061-T6
Geometri	= Silinder Pejal
Parameter C1	= 4898.7 s ⁻¹
Tipe joint	= Butt Joint
Panjang	= 100 mm
Diameter	= 20 mm



Gambar 3. 6 Geometri Spesimen pada Simulasi



Gambar 3. 7 Permodelan Split Hopkinson Pressure Bar pada ANSYS Explicit Dynamics

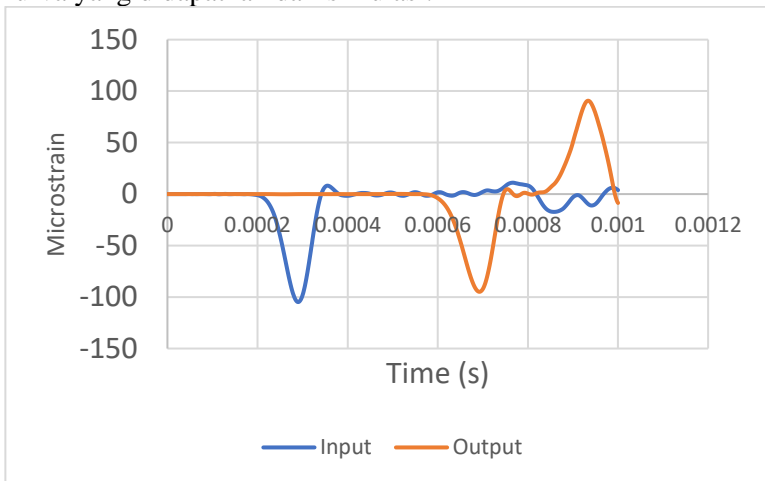
Setelah membuat pemodelan dari pengujian lalu pemodelan dimasukkan kedalam *setup ANSYS Explicit Dynamic*. Gambar 3.7 merupakan hasil dari pemodelan *split Hopkinson pressure bar* yang akan dilakukan Pengambilan data dilakukan dengan tipe *Analysis setting Low velocity* dengan nilai *Minimum CFL Time Step* diatur 0,01 s. Kecepatan *striker bar* diatur 1,21 m/s. *Output* dari simulasi dibuat 1000 *Number of points*.

3.5 Pengolahan Data

Kurva regangan terhadap waktu yang didapatkan, diolah menggunakan Excel untuk mendapatkan grafik tegangan-regangan. Berikut adalah proses pengolahan grafik tegangan-regangan pada penelitian ini:

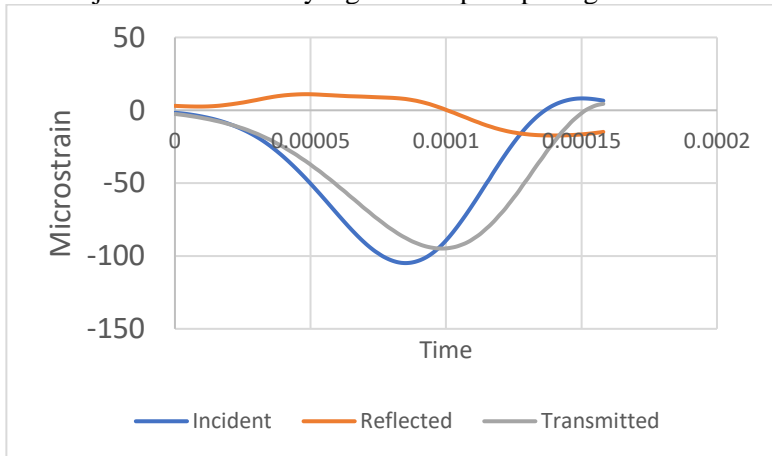
1. Data hasil pengujian

Dari simulasi yang dilakukan menggunakan pemodelan *Split Hopkinson Pressure Bar* didapatkan grafik regangan terhadap waktu pada *incident* dan *transmitted bar*. Gambar 3.8 merupakan kurva yang didapatkan dari simulasi.



Gambar 3. 8 Kurva Regangan Terhadap Waktu Hasil Simulasi

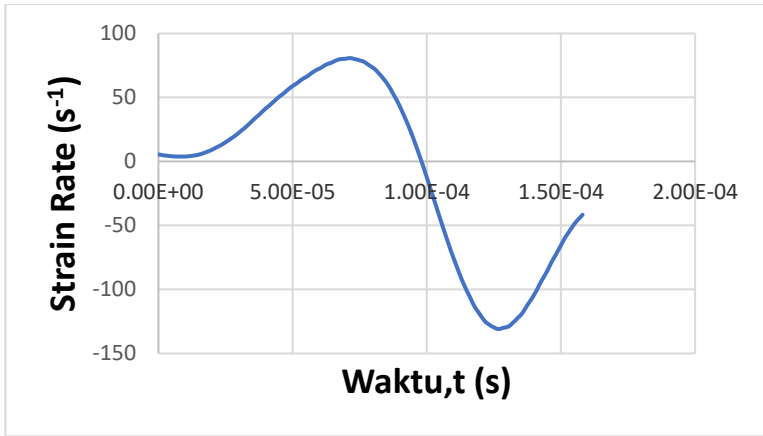
Pada simulasi juga dilakukan *Trim* dengan tujuan kurva *incident strain*, *reflected strain*, dan *transmitted strain* yang semula pada rentang waktu berbeda menjadi satu rentang waktu yang sama. Selanjutnya hasil pemotongan tersebut dilakukan pergeseran sinyal, sehingga sinyal *incident*, *reflected*, dan *transmitted* seolah-olah terjadi dalam waktu yang sama seperti pada gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Kurva Hasil Pemotongan Kurva *Incident*, *Reflected*, dan *Transmitted Strain* pada Simulasi

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

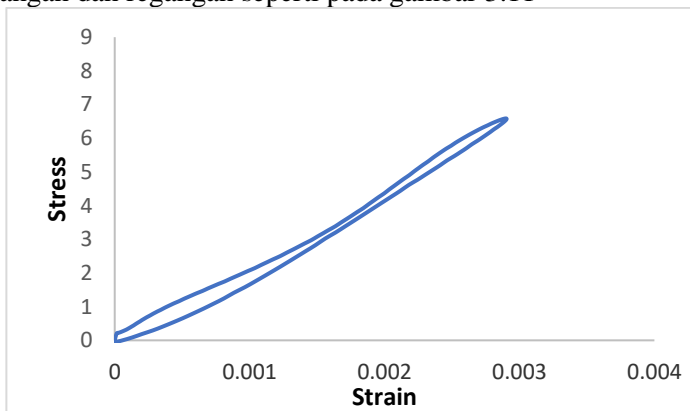
Kecepatan *striker bar* diatur 1,21 m/s terhadap sumbu x. Pada Simulasi ini dilakukan dengan meninjau pembebanan dinamis yang berupa kompresi saja, dapat dilihat dari gambar 3.10 menunjukkan laju regangan yang naik dan kemudian turun, saat naik ini menunjukkan adanya pembebanan kompres pada spesimen akibat tumbukan *striker bar*, sedangkan saat turun adalah ekspansi pada spesimen setelah menerima pembebanan. sehingga pada kurva laju regangan hanya laju regangan yang bernilai positif yang dibandingkan.



Gambar 3.10 Grafik Laju Regangan terhadap Waktu pada Simulasi

3. Grafik Tegangan-Regangan

Data yang sudah di-*trim* akan diolah menjadi grafik tegangan-regangan melalui persamaan 2.16 dan 2.18. Dengan perhitungan besar tegangan (σ_n) menggunakan persamaan tegangan dan regangan pada dasar teori sehingga didapatkan grafik tegangan dan regangan seperti pada gambar 3.11



Gambar 3.11 Kurva Tegangan terhadap Regangan pada Simulasi

Nilai *young modulus* pada kurva Tegangan terhadap regangan pada simulasi diambil dari *slope* kurva karena parameter *viscoelasticity*. Nilai dari *young modulus* yang didapatkan adalah 2,25 Gpa.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter pada model material *epoxy adhesive* untuk komposisi resin/hardener yang bervariasi. Dari hasil yang didapatkan kemudian akan dianalisa korelasi antara variasi komposisi milik penelitian Kenny Varian dengan perubahan parameter material *viscoelastic* yaitu, *instantaneous shear modulus (ISM)*, *shear modulus (SM)*, dan *decay time*. Didapatkan juga parameter cepat rambat gelombang (C1) pada material adhesive dari model *equation of shock (EOS)*. Analisa dilakukan untuk menentukan korelasi antara nilai parameter material dengan komposisi *resin/hardener*. Hasil pengujian dan pembahasan akan dipaparkan pada bab ini.

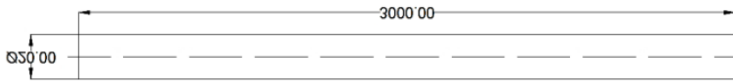
4.1 Pemodelan Simulasi

Software berbasis *FEM* yang digunakan pada pemodelan simulasi tugas akhir ini adalah *numerik explicit dynamic (ANSYS)*. *Explicit dynamic* dipilih karena dapat merekam data dari fenomena tumbukan pada durasi waktu yang singkat, hal ini sesuai dengan cara kerja dari alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)*. Ada tiga tahap dalam pemodelan simulasi yang akan dilakukan yaitu, *Pre-processing*, *simulation*, dan *post-processing*. Berikut merupakan tahapan simulasi yang akan dilakukan.

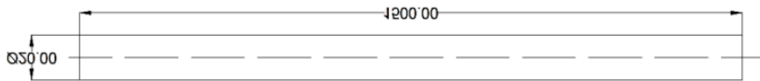
4.1.1 Pre-processing

Tahap ini dilakukan untuk menentukan geometri dan bahan yang digunakan pada alat uji dan benda uji. Dalam hal ini adalah alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)* dan *butt adhesive joint*. Geometri dan bahan yang digunakan pada penelitian ini sebagaimana sudah dijelaskan pada tabel 3.1 dimana bahan material dari *incident bar*, *transmitter bar*, *striker bar* dan *adherend* dari *butt joint* adalah aluminium 6061. Gambar 4.1, 4.2

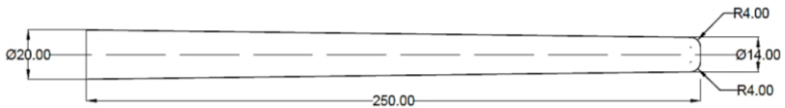
4.3 merupakan gambar geometri dari alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)*.



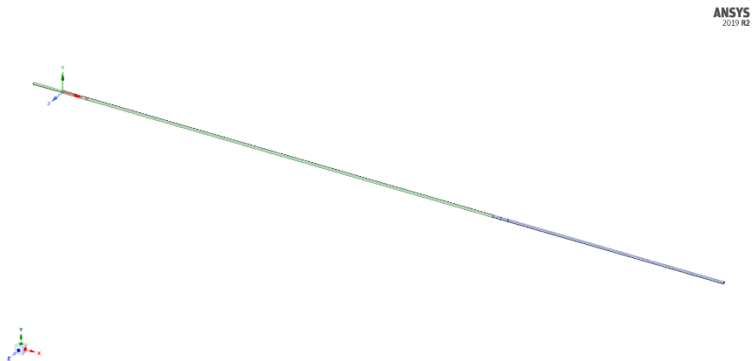
Gambar 4. 1 Geometri *Input Bar* pada *Split Hopkinson Pressure Bar*



Gambar 4. 2 Geometri *Output Bar* pada *Split Hopkinson Pressure Bar*



Gambar 4. 3 Geometri *Striker Bar* pada *Split Hopkinson Pressure Bar*



Gambar 4. 4 Geometri pemodelan *Split Hopkinson Pressure Bar* pada ANSYS

Gambar 4.4 merupakan geometri pemodelan dari alat uji *Split Hopkinson Pressure Bar* yang akan digunakan untuk simulasi. Geometri emodelan ini dibuat dengan geometri yang sudah ditentukan pada gambar 4.1, 4.2 dan 4.3.

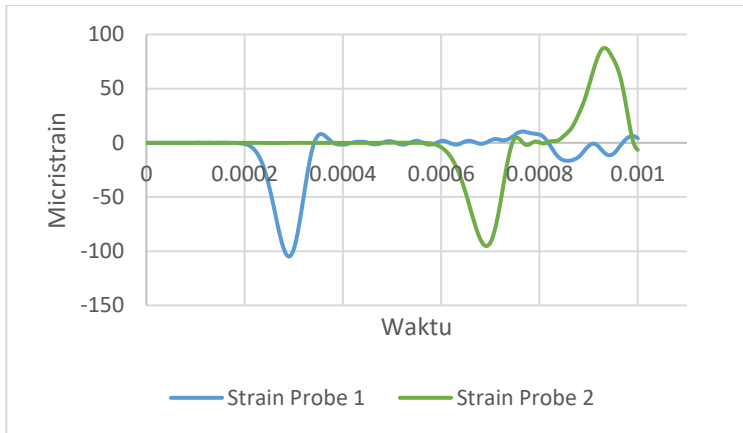
Setelah menentukan material yang akan digunakan pada simulasi, pada *engineering data* dipilih AL 6061-T6 untuk material aluminium dan *Epoxy Res* untuk material *adhesive* pada *explicit materials*. Pada *Epoxy res* terdapat parameter yang dapat mempengaruhi *youong modulus* seperti pengaruh dari variasi komposisi *epoxy* dan *hardener* yaitu nilai *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus* serta C1. Pada simulasi ini akan divariasikan nilai *Instantaneous Shear Modulus* pada *viscoelastic* dan *Shear Modulus* serta C1 untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *young modulus butt adhesive joint*.

4.1.2 Simulation

Pada tahap ini dibuatlah pemodelan dari simulasi yang akan dilakukan, dengan memasukkan geometri yang sudah dibuat kedalam *Explicit Dynamic* pada *ANSYS*. Pada *striker bar* diberikan kecepatan pada sumbu x dengan tipe *analysis settings low velocity*. Nilai *CFL time step* yang digunakan adalah 0.01 s dengan *end time* 0.001 s. Untuk mendapatkan sinyal regangan terhadap waktu *Strain Probe* dipasang ditengah *Input bar* dan *Output bar* pada permukaan. Hasil dari jumlah titik yang didapatn diatur sebanyak 1000 titik agar data yang didapatkan teliti. Setelah itu pemodelan diselesaikan dan akan mendapatkan data regangan terhadap waktu.

4.1.3 Post-Processing

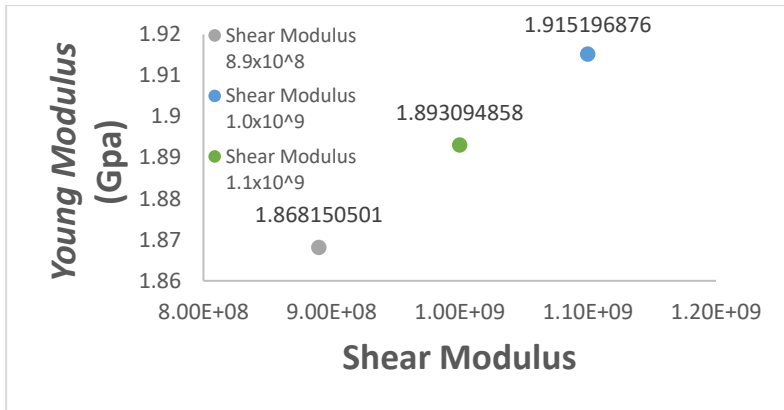
Tahap ini adalah perekaman hasil yang didapatkan, seperti yang sudah disebutkan bahwa hasil yang didapatkan adalah grafik regangan terhadap waktu pada *strain probe 1* dan *strain probe 2*. Gambar 4.5 merupakan hasil yang didapatkan dari *strain probe*.



Gambar 4.5 Grafik tegangan – waktu pada pada strain probe 1 dan strain probe 2

4.2 Analisa Hasil Simulasi

Uji *creep* atau yang biasa dikenal dengan mulur adalah deformasi perubahan bentuk permanen material fungsi terhadap waktu jika material tersebut diberikan beban tegangan konstan. Sebelum beban tegangan menjadi konstan, material mengalami regangan seketika akibat pembebanan tiba-tiba terjadi. Pada parameter *viscoelastic*, nilai pembebanan tiba-tiba ini disebut *Instantaneous Shear Modulus* dan nilai beban tegangan konstan disebut *shear modulus*. Jarak waktu antara pembebanan tiba-tiba sampai beban tegangan menjadi konstan biasa disebut *decay time*. Pada uji *creep*, besaran nilai dari kedua parameter tersebut mempengaruhi kekakuan/kekenyalan dari material. Hal ini juga berlaku untuk material *adhesive*, Maka dari itu pada penelitian ini parameter yang akan divariasikan nilainya adalah *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus*. Di sisi lain, hal tersebut didukung dengan hasil simulasi yang telah dilakukan pada gambar 4.6, bahwa penambahan nilai *Shear Modulus* membuat nilai dari *young modulus adhesive* bertambah yang mengartikan bahwa *adhesive* semakin kaku.



Gambar 4. 6 Pengaruh Penambahan Nilai *Shear Modulus* terhadap *Young Modulus*

Penambahan nilai cepat rambat (C1) pada *adhesive* juga dilakukan, karena parameter C1 didapatkan melalui hasil dari perhitungan *young modulus* dan *density* dari *properties adhesive* sehingga mempengaruhi kekakuan/kenyalan dari *adhesive*. Semakin kecil nilai dari cepat rambat dari *adhesive*, maka *adhesive* akan semakin lunak. Berikut merupakan nilai *properties* yang digunakan pada setiap variasi parameter:

- Pengujian variasi nilai *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus*

Tipe *adhesive*

= EPOXY RES 1

Instantaneous Shear Modulus

dan *Shear Modulus*

= 2,4x10⁹ Pa dan 1,4x10⁹ Pa;

2,1x10⁹ Pa dan 1,1x10⁹ Pa;

1,4x10⁹ Pa dan 1,0x10⁹ Pa;

1,1x10⁹ Pa dan 8,9x10⁸ Pa;

0,6x10⁸ Pa dan 0,4x10⁸ Pa;

Parameter C1

= 2270 ms⁻¹

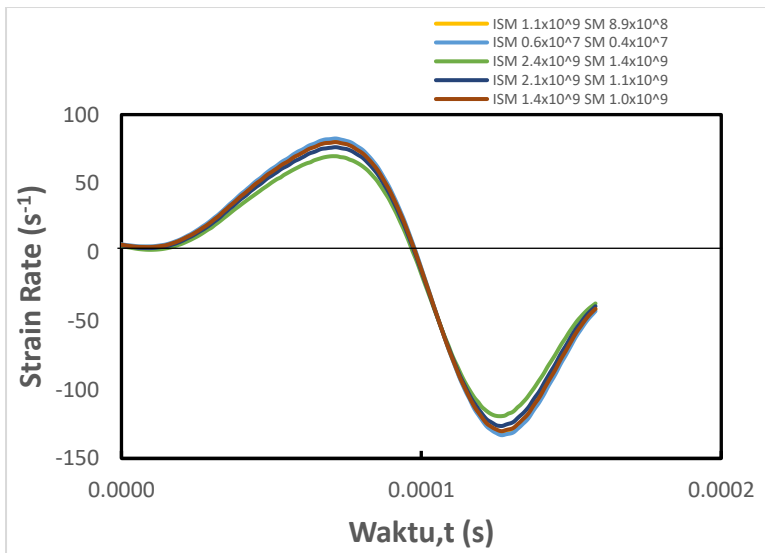
Decay time

= 0.001 s

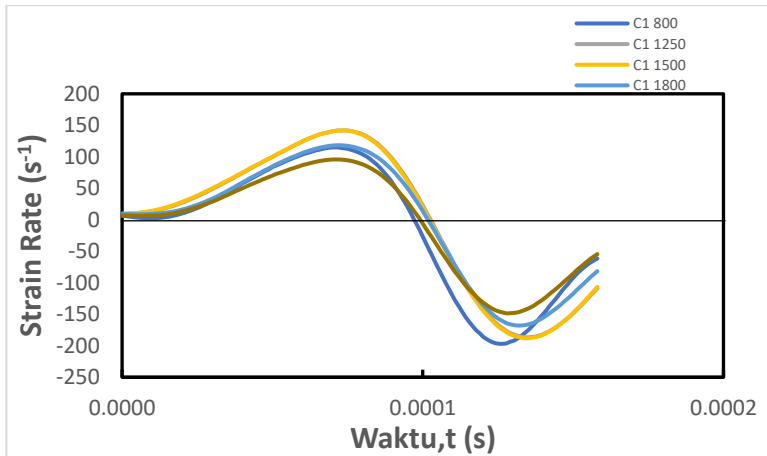
- Pengujian variasi nilai Cepat Rambat (C_1)
 Tipe adhesive = EPOXY RES 1
 Instantaneous Shear Modulus
 dan Shear Modulus = $1,4 \times 10^9$ Pa dan $1,0 \times 10^9$;
 Parameter C_1 = 800 ms^{-1} ; 1250 ms^{-1} ; 1500 ms^{-1} ;
 1800 ms^{-1} ; 2200 ms^{-1} ;
 Decay time = 0.001 s

4.2.1 Perbandingan Laju Regangan pada Tiap Variasi

Dalam penelitian *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)* yang ideal setiap percobaan yang dilakukan mempunyai laju regangan yang konsisten, maka setiap simulasi yang dilakukan dilakukan perbandingan laju regangannya agar data yang didapatkan dapat dibandingkan satu sama lain. Perhitungan laju regangan dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 dan 2.11



Gambar 4. 7 Grafik Laju Regangan terhadap Waktu untuk tiap Variasi ISM dan SM

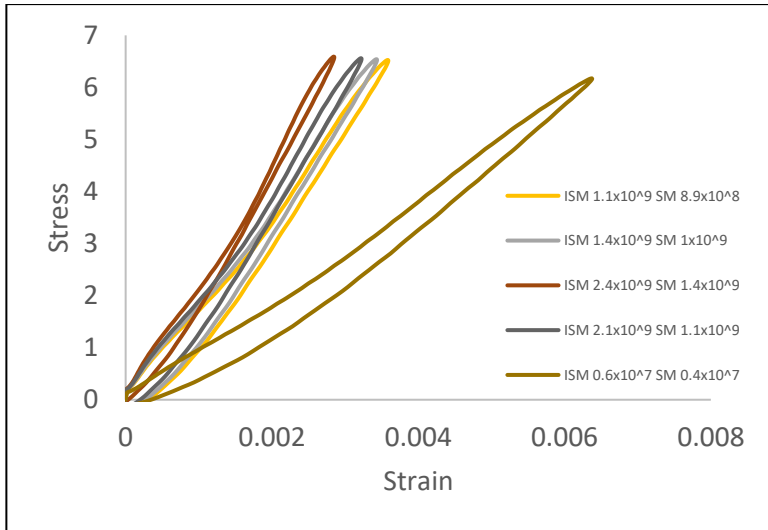


Gambar 4. 8 Grafik Laju Regangan terhadap Waktu untuk tiap Variasi C1

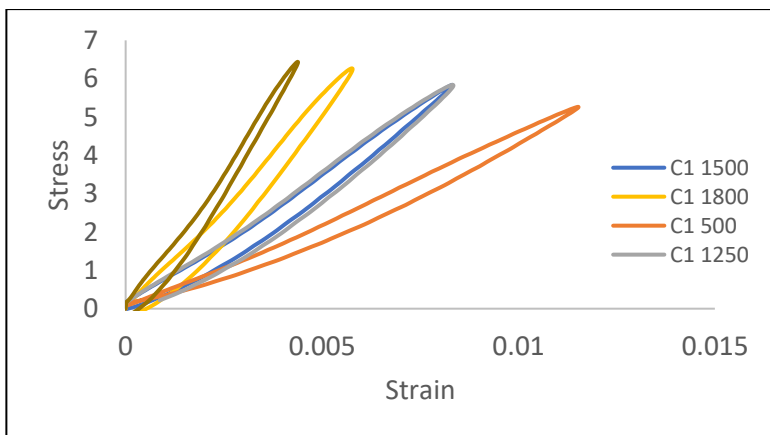
Dalam membandingkan kurva tegangan-regangan, laju regangan yang konsisten perlu didapatkan. Pada Gambar 4.7 dan gambar 4.8 didapatkan nilai laju regangan yang mendekati konsisten seiring dengan perubahan nilai *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus* serta penambahan nilai C1. Dapat dilihat pada gambar 4.6 dan 4.7 bahwa titik maksimum saat spesimen mengalami kompresi di setiap variasi yang dilakukan memiliki nilai yang konsisten.

4.2.2 Perbandingan Kurva Tegangan - Regangan pada Tiap Variasi

Melalui persamaan 2.12 dan 2.13 dengan kecepatan rambat (C_0) sebesar 4898 m/s didapatkan kurva tegangan dan regangan tiap variasi sebagai berikut.



Gambar 4. 9 Kurva Tegangan-Regangan untuk tiap Variasi nilai ISM dan SM

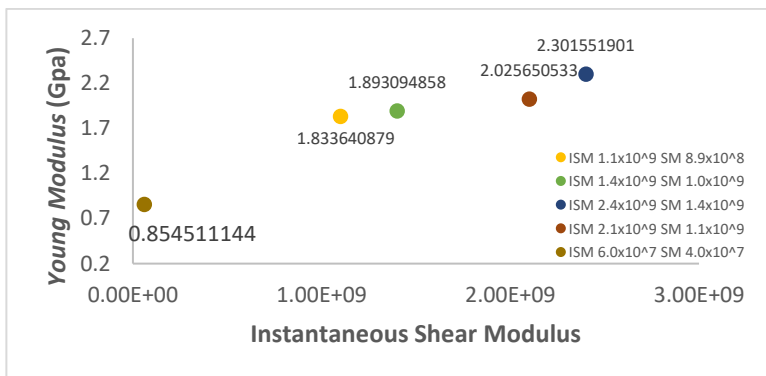


Gambar 4. 10 Kurva Tegangan-Regangan untuk tiap Variasi nilai C1

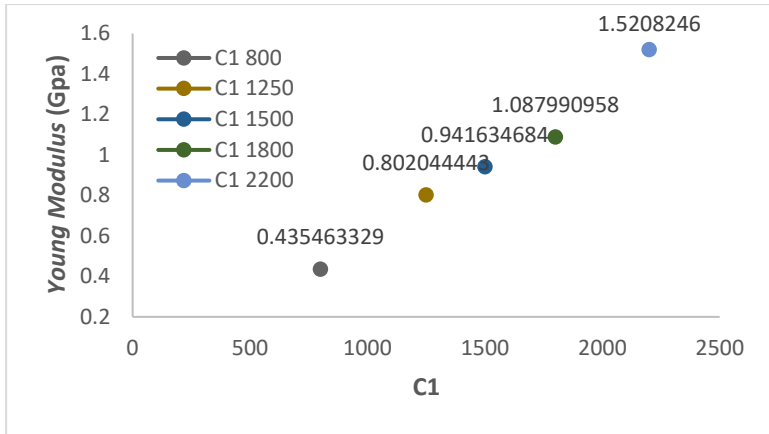
Dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10 kurva tegangan-regangan disetiap variasi nilai ISM dan SM serta C1 mempunyai bentuk yang mirip dan mendekati *close loop* tetapi terdapat pergeseran nilai *strain* maupun *stress* pada tiap variasi, hal ini menunjukkan variasi nilai variasi nilai ISM dan SM serta C1 mempengaruhi *young modulus* pada *adhesive* terhadap karakteristik kurva tegangan-regangan. Kurva tegangan-regangan yang mula-mula naik akibat pembebanan yang diberikan berupa kompresi pada spesimen hingga mencapai tegangan maksimum, lalu kurva turun akibat terjadinya ekspansi pada spesimen hingga nilai dari *stress* akan menjadi 0 Mpa. Hal ini terjadi karena pengujian dilakukan didaerah elastis *adhesive*, sehingga kurva akan menjadi *close loop*.

4.3 Pembahasan

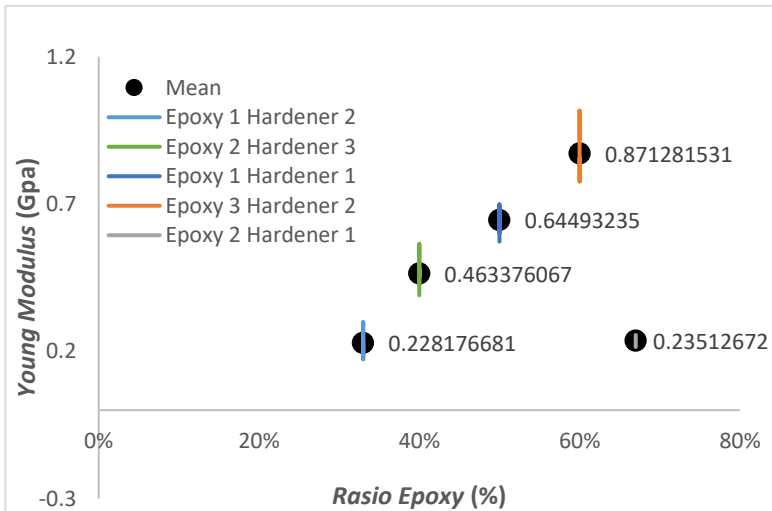
Setelah proses pengambilan data melalui simulasi dan perhitungan dilakukan, didapatkan nilai *young modulus* pada tiap variasi nilai ISM dan SM serta C1 dari *adhesive butt joint* pada uji *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)*. Berikut merupakan hasil *plot young modulus* yang akan dianalisa:



Gambar 4. 11 Pengaruh Penambahan Nilai *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus* terhadap *Young Modulus Adhesive Butt Joint*



Gambar 4. 12 Pengaruh Penambahan Nilai C1 terhadap *Young Modulus Adhesive Butt Joint*



Gambar 4. 13 Pengaruh Komposisi *Epoxy* dan *Hardener* terhadap *Young Modulus Adhesive Butt Joint*

Pada gambar 4.10 menunjukkan pengaruh penambahan nilai *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus* terhadap nilai *young modulus*. Dapat dilihat bahwa nilai *young modulus* meningkat mendekati linier seiring penambahan nilai *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus* pada *Epoxy res*, saat nilai dari *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus* ditambahkan dalam *Epoxy res*. Pada nilai ISM 2.4×10^9 Pa dan SM 1.4×10^9 Pa didapatkan *young modulus* sebesar 2.31 GPa, ISM 2.1×10^9 dan SM 1.1×10^9 senilai 2.02 GPa, ISM 1.4×10^9 Pa dan SM 1.0×10^9 Pa senilai 1.89 GPa, ISM 1.1×10^9 Pa dan SM 8.9×10^8 Pa senilai 1.833 GPa, dan ISM 0.6×10^7 Pa dan SM 0.4×10^7 Pa senilai 0.85 GPa.

Pada gambar 4.11 menunjukkan pengaruh penambahan nilai C1 terhadap nilai *young modulus*. Dapat dilihat bahwa nilai *young modulus* meningkat mendekati linier seiring penambahan nilai C1 pada *Epoxy res*, Pada nilai C1 2200 m/s didapatkan *young modulus* sebesar 1.5 GPa, C1 1800 m/s senilai 1.08 GPa, C1 1500 m/s senilai 0.94 GPa, C1 1250 m/s senilai 0.8 GPa, dan C1 800 m/s senilai 0.43 GPa.

Gambar 4.12 menunjukkan pengaruh komposisi *epoxy* dan *hardener* pada *adhesive butt joint* terhadap nilai *young modulus* dari penelitian Kenny Varian. 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.

Hasil yang didapatkan pada penelitian ini yaitu kenaikan nilai *young modulus* sama dengan penelitian yang dilakukan Almeida dan Monteiro, dimana nilai dari *young modulus*

meningkat seiring kerasnya *adhesive* dalam penelitian Almeida dan Monteiro sama dengan bertambahnya komposisi *epoxy*. Walaupun tipe pembebanan yang dilakukan Almeida dan Monteiro menggunakan pembebanan statik (*mechanically driven test machine*) sedangkan pada penelitian ini menggunakan pembebanan dinamik (*Split Hopkinson Pressure Bar*), tipe *joint* yang digunakan juga berbeda. tetapi hasil yang didapatkan memiliki pola yang sama.

Untuk validasi simulasi pada penelitian ini, dilakukan perbandingan *young modulus* hasil simulasi dengan *young modulus* yang didapatkan dari eksperimen *adhesive butt joint* milik penelitian Kenny Varian 2020. Jika dilihat secara kualitatif, penambahan nilai *Instantaneous Shear Modulus* akan membuat nilai *young modulus* dari *adhesive* akan semakin naik. Sama halnya dengan penambahan presentase dari *epoxy* didalam *adhesive* pada penelitian Kenny Varian. Tetapi disisi lain perbandingan nilai dari *young modulus* tiap variasi nilai parameter yang dilakukan berbeda dengan variasi *epoxy/hardener* milik Kenny, kecuali dua variasi nilai parameter yaitu pada variasi ISM 0.6×10^7 Pa dan SM 0.4×10^7 Pa. Variasi ini memiliki nilai *young modulus* yang mirip dengan nilai *young modulus* eksperimen pada komposisi *epoxy* 3 dan *hardener* 2, dan *young modulus* pada variasi C1 sebesar 800 mirip dengan *young modulus* eksperimen pada komposisi *epoxy* 2 dan *hardener* 3. Tetapi hasil simulasi pada variasi ISM 0.6×10^7 dan SM 0.4×10^7 serta pada variasi C1 800 m/s ini dinyatakan tidak valid karena tidak berada direntang nilai yang berlaku untuk *properties adhesive* yang digunakan di jurnal dan MATWEB. Penelitianan Kenny menyatakan bahwa hasil dari eksperimen yang dilakukan tidak dapat dinilai secara kuantitatif melainkan berdasarkan kualitatif, hal ini disebabkan karena keterbatasan alat yang digunakan dan sensitivitas dari alat ukur yang digunakan sehingga nilai kuantitatif yang dihasilkan tidak dapat dipastikan kebenarannya. Maka dari itu untuk mengetahui model *finite element* pada penelitian ini benar atau tidak dibutuhkan validasi dengan hasil eksperimen yang valid secara kuantitatif.

Melalui penelitian ini dapat diketahui bahwa pemodelan Split Hopkinson Pressure Bar untuk pengujian variasi komposisi resin/hardener yang berbeda-beda membutuhkan hasil eksperimen yang diuji pada alat yang memadai dan valid agar simulasi pada penelitian ini dapat tervalidasi secara kuantitatif maupun kualitatif.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan antara lain:

1. Melalui penelitian ini dapat diketahui bahwa pemodelan *Split Hopkinson Pressure Bar* untuk pengujian variasi komposisi *resin/hardener* yang berbeda-beda membutuhkan hasil eksperimen yang diuji pada alat yang memadai dan valid agar simulasi pada penelitian ini dapat tervalidasi secara kuantitatif maupun kualitatif.
2. Nilai *young modulus* meningkat mendekati linier seiring penambahan nilai *Instantaneous Shear Modulus* dan *Shear Modulus* serta C1 pada *properties epoxy resin*.
3. Nilai *young modulus* pada variasi nilai parameter *Instantaneous Shear Modulus* 6.0×10^7 Pa dan *Shear Modulus* 4.0×10^7 Pa mendekati nilai *young modulus* eksperimen pada komposisi *epoxy* dan *hardener* 3:2.
4. Nilai *young modulus* pada variasi nilai parameter cepat rambat (C1) 800 m/s mendekati nilai *young modulus* eksperimen pada komposisi *epoxy* dan *hardener* 2:3, dan Nilai *young modulus* pada variasi nilai parameter cepat rambat (C1) 1250 m/s mendekati nilai *young modulus* eksperimen pada komposisi *epoxy* dan *hardener* 3:2.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian, adapun saran dari peneliti antara lain:

1. Dibutuhkan hasil eksperimen yang diuji pada alat yang memadai dan valid agar dapat simulasi yang dilakukan tervalidasi secara kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Banea, MD., da silva, LFM. 2009. **Adhesively Bonded Joint in Composite Materials : An Overview**. J. Materials : Design and Applocation
- [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]. Sawa, T., Ichikawa, K., Shin, Y. and Kobayashi, T., 2010. **A three-dimensional finite element stress analysis and strength prediction of stepped-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to bending moments**. *International Journal of Adhesion and Adhesives*,
- [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] A. S. Pramono, "Split Bar Hopkinson with Springs Striker Bar Launcher," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 493, pp. 383–387, 2014.

- [10] Yohanes and Y. Sekiguchi, “**Synergistic Effects of Mixed Silica Micro-nanoparticles on Compressive Dynamic Stiffness and Damping of Epoxy Adhesive**,” *J. Dyn. Behav. Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 190–200, Jun. 2018.
- [11] Yohanes, A. S. Pramono, A. B. Hidayya. 2019. “**Non-monotonous Effect of Adhesive Thickness on The Dynamic Stiffness of Adhesive Butt Joint**,”
- [12] George E. Dieter, 1992, **Metalurgi Mekanik**, Jilid 2, Jakarta: Erlangga
- [13] J. Kuczmaszewski. 2004. “**Fundamentals of metal-metal Adhesive Joint Design**”. Lublin: Lublin University of Technology
- [14] 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.
- [15] 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.
- [15] Yohanes., dan Kenny Varian. 2020. “**Studi Eksperimental Untuk Analisa Pengaruh Komposisi Epoxy/Hardener Terhadap Young Modulus Bulk Epoxy Adhesive Pada Pembebanan Dengan Laju Regangan Tinggi**”. Department Mechanical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

BIODATA PENULIS



Naufal Alfi Arzaki lahir di Blitar pada 23 Oktober 1997, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Agus Prayitno dan Palupi Puspitorini. Riwayat pendidikan penulis diawali dari SD Gayam 1 Sukoharjo. Penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Blitar, kemudian melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Blitar. Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan pendidikan ke Surabaya untuk menempuh studi S1

Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SBMPTN. Penulis mengambil tugas akhir pada Laboratorium Otomotif. Dalam bidang kemahasiswaan/organisasi, penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) ITS. Di HMM ITS, penulis aktif sebagai Staff Departemen Organisasi pada tahun 2017/2018, sebagai Kepala Departemen Organisasi pada tahun 2018/2019. Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan yaitu kepanitiaan seperti Mechanical City 2016, Engine Tune Up 2017, 2018, GERIGI 2018. Untuk informasi dan saran dapat menghubungi penulis melalui email naufalalfiarzaki@gmail.com.