



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI NUMERIK PENGARUH LAJU REGANGAN TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN BULK ADHESIVE

Kenny Wiratno
NRP. 02111640000110

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 NUMERIK PENGARUH LAJU REGANGAN TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN *BULK ADHESIVE*

Kenny Wiratno
NRP. 0211164000110

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

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



FINAL PROJECT - TM184835

NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF STRAIN RATE ON THE STRESS-STRAIN RESPONSE OF BULK ADHESIVE

Kenny Wiratno
NRP. 02111640000110

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

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

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENGARUH LAJU REGANGAN TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN BULK ADHESIVE

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:

Kenny Wiratno

NRP. 02111640000110

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. **Dr. Eng. Yohanes, S.T. M.Sc.**
NIP. 198006272012121003  (Pembimbing)
2. **Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.**
NIP. 197805102001121001  (Penguji)
3. **Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.**
NIP. 196807061999031004  (Penguji)
4. **Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA.**
NIP. 195012111985021001  (Penguji)

SURABAYA
AGUSTUS 2020



STUDI NUMERIK PENGARUH LAJU REGANGAN TERHADAP RESPON TEGANGAN-REGANGAN BULK ADHESIVE

Nama Mahasiswa : Kenny Wiratno
NRP : 0211164000110
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRAK

Metode pengujian Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) digunakan untuk mengetahui karakteristik dinamik dari adhesive. Praktiknya, kecepatan tumbukan striker bar harus disesuaikan untuk membangkitkan laju regangan yang ditentukan dan itu sangat sulit untuk dilakukan. Oleh karena itu, data eksperimen hanya menampilkan respon tegangan-regangan spesimen pada nilai tertentu dengan gap yang besar. Maka dari itu, penelitian ini akan menganalisa pengaruh perubahan laju regangan terhadap respon tegangan-regangan pada adhesive yang diuji menggunakan metode elemen hingga (finite element method, FEM).

Penelitian akan dilakukan pada epoxy 3M SW1838 melalui simulasi pada software ANSYS Explicit Dynamics Dengan membandingkan data simulasi dan eksperimen sebelumnya dapat dilakukan validasi data. Untuk validasi material persamaan Johnson-Cook Strength, parameter yang digunakan berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan oleh Iwamoto(2010). Untuk validasi permodelan digunakan grafik strain-time yang diperoleh Yohanes(2018), didapatkan bahwa ada perbedaan pada bentuk grafik yang diduga diakibatkan oleh misalignment yang ada pada eksperimen. Untuk validasi meshing, dilakukan uji konvergensi. Setelah validasi data, dilakukan simulasi pada 25 variasi kecepatan striker bar dan kemudian dilakukan analisa data.

Pengaruh perubahan laju regangan terhadap bentuk kurva tegangan-regangan dapat dibagi menjadi dua berdasarkan deformasi yang dialami oleh spesimen. Deformasi plastis terjadi mulai pada laju regangan 754.3 s^{-1} . Pada deformasi elastis, serapan energi akibat histeresis bertambah besar dengan semakin tingginya laju regangan. Pada deformasi plastis, tegangan yield semakin besar seiring meningkatnya laju regangan dengan peningkatan non-linear. Laju regangan tidak mempengaruhi modulus young epoxy, pada hasil perhitungan dari setiap variasi kecepatan didapatkan nilai modulus young sekitar 2.5 GPa.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi laju regangan maka energi serapan akan meningkat, modulus elastisitas tidak berubah, kurva tegangan-regangan akan semakin besar, dan yield strength akan meningkat.

Kata kunci : epoxy resin, Split-Hopkinson pressure bar, Simulasi, dinamis

NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF STRAIN RATE ON THE STRESS-STRAIN RESPONSE OF BULK ADHESIVE

Student Name : Kenny Wiratno
NRP : 02111640000110
Department : Mechanical Engineering
Advisory Lecturer : Dr. Eng. Yohanes, ST. MSc.

ABSTRACT

Split-Hopkinson Pressure Bar is a method used to find out dynamic characteristic of an adhesive. In practice, the impact velocity of the striker bar has to be precise to produce a certain strain rate and it is very hard to replicate. Experimental data only shows stress-strain response of a specimen on a certain value with significant gap. This research will analyze the effect of strain rate changes on the stress-strain response of epoxy adhesive using finite element method.

The research will be done using epoxy 3M SW1838 through simulation on ANSYS Explicit Dynamics software. Comparing the data obtained from simulation and past experiments, data validation can be done. for material validation using johnson-cook strength equation, the parameter will be used based on the experiment done by Iwamoto (2010). For the simulation model validation the strain-time graph obtained by Yohanes (2018) is used and it is found that there's a difference on the strain-time graph, this difference is caused by misalignment on the experiment. For meshing validation, a convergence test is done. After these validation, the simulation is done with 25 variation of striker bar velocity and the data is analyzed.

Strain rate changes effect on stress-strain curve can be divided based on the deformation the epoxy receives. On plastic deformation that starts from strain rate 754.3 s^{-1} , yield strength increases non-linearly with strain rate received. On elastic deformation, the resilience caused by hysteresis increase non-

linearly with strain rate. Young's Modulus receives little to no changes with the increase of strain rate, the value of Young's Modulus obtained on this research is 2.5 GPa.

Results shows that on high strain rate, resilience will increase, Young's Modulus won't be affected much, stress-strain curve will expand, and yield strength will increase.

Keywords : epoxy resin, Split-Hopkinson pressure bar, simulation, dynamic

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. 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 Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc. 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 kandung penulis yang telah memberikan banyak dukungan, fasilitas serta hiburan kepada penulis.
4. Pak Bobby Oedy Pramodyo Soepangkat dan Ibu Aida Annisa Amin Daman selaku dosen wali yang 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, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Adhesive</i>	5
2.2 <i>Adhesive Joint</i>	5
2.3 Butt Joint	7
2.4 <i>Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB)</i>	7
2.5 Kurva Tegangan-Regangan	11
2.6 Modulus Elastisitas	12
2.7 <i>Resilience</i>	13
2.8 Simulasi ANSYS	13
2.9 Penelitian Terdahulu	16
BAB III	23

METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Flowchart Penelitian.....	23
3.2 Tahap-tahap penelitian	24
3.2.1 Persiapan.....	24
3.2.2 Pengujian <i>Split-Hopkinson Pressure Bar</i>	31
3.2.3 Analisa Data	32
BAB IV	37
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1 Validasi model elemen hingga	37
4.2 Hasil Simulasi.....	38
4.2.1 Sinyal <i>Reflected</i>	38
4.2.2 Sinyal <i>Transmitted</i>	39
4.3 Hasil perhitungan dan pembahasan	40
4.3.1 Perbandingan laju regangan.....	40
4.3.2 Perbandingan kurva tegangan-regangan.....	41
4.3.3 Pembahasan	42
BAB V	47
KESIMPULAN DAN SARAN.....	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
BIODATA PENULIS	50

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Berbagai macam sambungan Adhesive Joint yang umum digunakan (Hudayya, 2019)	5
Gambar 2.2 Bulk adhesive pada butt joint (Hudayya, 2019).....	7
Gambar 2.3 Ilustrasi Split-Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011)	7
Gambar 2.4 Diagram posisi-waktu perambatan gelombang pada SHPB (Chen & Song, 2011).....	8
Gambar 2.5 Area spesimen pada Split-Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011).....	10
Gambar 2.6 Kurva tegangan-regangan (Callister & Rethwisch, 2010).....	12
Gambar 2.7 Gelombang regangan tanpa spesimen (Yohanes, 2018).....	17
Gambar 2.8 Gelombang regangan dengan spesimen(Yohanes, 2018).....	17
Gambar 2.9 Dynamic Stress Equilibrium pada kedua sisi spesimen(Yohanes, 2018).....	18
Gambar 2.10 Kurva tegangan-regangan pada dua spesimen (Yohanes, 2018)	19
Gambar 2.11 Modulus Elastisitas sesuai dengan rasio komposisi silika(Yohanes, 2018).....	19
Gambar 2.12 Schematic of the Kolsky compression test setup (Edmundo Corona, 2015)	20
Gambar 2.13 Incident and transmission bar strains measured 40 in. away from the specimen in the baseline case. (Edmundo Corona, 2015).....	20
Gambar 2.14 Comparison of engineering stress-strain curve calculated via Eqns. (Edmundo Corona, 2015)	21

Gambar 2.15 <i>Yield behavior in uniaxial compression as a function of strain rate for structural adhesives SW1838 and DP-460(Iwamoto, 2010)</i>	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3.2 Perbandingan kurva tegangan-regangan yang didapatkan dari simulasi dan eksperimen.....	26
Gambar 3.3 Dimensi Striker bar yang digunakan.....	26
Gambar 3.4 Dimensi Incident bar dan Transmitted bar yang digunakan	27
Gambar 3.5 Skema Alat Uji Split-Hopkinson Pressure Bar	27
Gambar 3.6 Permodelan pada <i>ANSYS Explicit Dynamic</i>	27
Gambar 3.7 <i>Analysis settings</i> pada <i>ANSYS Explicit Dynamics</i> ..	28
Gambar 3.8 Meshing pada epoxy(a) dan <i>pressure bar</i> (b)	28
Gambar 3.9 Uji Konvergensi <i>pressure bar</i>	29
Gambar 3.10 Uji Konvergensi <i>epoxy</i>	30
Gambar 3.11 Perbandingan sinyal <i>reflected</i>	30
Gambar 3.12 Kalibrasi alat SHPB pada simulasi	31
Gambar 3.13 Grafik hasil simulasi dan perhitungan (a) Grafik regangan-waktu hasil simulasi (b) Grafik regangan-waktu untuk perhitungan (c) Grafik P1-P2 (d) Grafik laju regangan (e) Grafik tegangan-regangan.....	34
Gambar 3.14 <i>Offset yield strength</i>	34
Gambar 4.1 Grafik perbandingan simulasi-eksperimen (a) incident bar (b) transmitted bar	37
Gambar 4.2 Grafik perbandingan simulasi-eksperimen dengan misalignment (a) <i>incident bar</i> (b) <i>transmitted bar</i>	38
Gambar 4.3 Grafik regangan-waktu sinyal <i>reflected</i>	39
Gambar 4.4 Grafik regangan-waktu sinyal <i>transmitted</i>	39
Gambar 4.5 Grafik laju regangan.....	40
Gambar 4.6 Grafik laju regangan pada tiap kecepatan striker bar	41

Gambar 4.7 Grafik tegangan-regangan	42
Gambar 4.8 Grafik laju regangan terhadap modulus elastisitas.	43
Gambar 4.9 Grafik laju regangan terhadap tegangan <i>yield</i>	44
Gambar 4.10 Grafik laju regangan terhadap tegangan yield dari simulasi dan eksperimen.....	44
Gambar 4.11 Grafik laju regangan terhadap energi serapan.....	45

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan <i>adhesive joint</i> dan <i>mechanical joint</i>	6
Tabel 3.1 Parameter material <i>epoxy</i>	25

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Adhesive banyak digunakan untuk sambungan ringan karena kelebihanannya yang tidak dimiliki oleh sambungan konvensional. Namun untuk menggantikan sambungan konvensional, sambungan *adhesive* ini harus memenuhi kriteria keamanan untuk struktur sehingga harus diuji. Salah satu kriteria yang penting adalah respon tegangan-regangan pada beban dengan laju regangan yang tinggi, maka digunakan pengujian dengan alat *Split-Hopkinson Pressure Bar*.

Split-Hopkinson Pressure Bar merupakan metode pengujian yang digunakan untuk memperoleh data regangan yang dialami material pada laju regangan tinggi. Prinsip kerja alat ini adalah merekam gelombang regangan pada *incident* dan *transmitted bar* yang ditimbulkan oleh tumbukkan *striker bar*. Data regangan tersebut kemudian dapat diolah menjadi kurva tegangan-regangan. Pada umumnya, saat eksperimen dilakukan interpolasi data untuk mengetahui respon material pada laju regangan yang tidak dapat diperoleh dengan alat di laboratorium, tetapi ada kemungkinan material memberikan respon yang berbeda dari yang didapatkan dengan interpolasi. Maka dari itu perlu diketahui apa respon kurva tegangan-regangan pada laju regangan yang tidak dapat dilakukan saat eksperimen.

Digunakan studi numerik melalui software *ANSYS Explicit Dynamics* untuk mengetahui pengaruh kecepatan *striker bar* terhadap respon *epoxy* yang diuji. Permodelan numerik dapat divalidasi dengan membandingkan data simulasi dan eksperimen dengan parameter yang sama.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana cara membuat model numerik pengujian *Split-Hopkinson Pressure Bar* menggunakan FEM untuk uji spesimen *Bulk adhesive*?
2. Bagaimana respon kurva tegangan-regangan dari *bulk adhesive* ketika ditumbuk dengan beban pada pengukuran dengan laju regangan yang tidak dapat dilakukan saat eksperimen?
3. Bagaimana perubahan modulus elastisitas dan *resilience* *bulk adhesive* pada pengukuran dengan laju regangan yang sulit diaplikasikan menggunakan alat yang ada pada laboratorium?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dirumuskan, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui cara membuat model numerik *Split-Hopkinson Pressure Bar* menggunakan FEM untuk menguji spesimen *epoxy bulk adhesive*, mengetahui respon tegangan-regangan dan perubahan modulus elastisitas dan *resilience* pada *bulk epoxy adhesive* pada laju regangan yang sulit diaplikasikan menggunakan alat yang ada pada laboratorium.

1.4 Batasan Masalah

Batasan Masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pergerakan *striker Bar*, *incident Bar*, dan *transmitted Bar* dianggap hanya pada satu sumbu sehingga gelombang tidak terdispersi.
2. Simulasi dilakukan pada temperatur ruangan.
3. Gaya gesek pada tumbukan diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Digunakan untuk membantu perancangan eksperimen.
2. Sebagai pembandingan hasil eksperimen yang telah dilakukan.
3. Untuk memperdalam analisa hasil pengujian.

4. Sebagai referensi kepada orang yang ingin menggunakan *adhesive* untuk keperluan tertentu.
5. Sebagai referensi untuk simulasi pada variasi percobaan yang berbeda.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

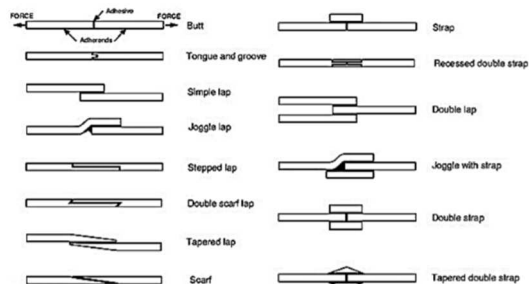
2.1 *Adhesive*

Adhesive merupakan material polimer yang memiliki daya rekat yang tinggi dan biasanya digunakan untuk menyambungkan dua benda dengan material yang sama ataupun berbeda. Untuk mencapai fase padat dengan daya rekat tinggi ada beberapa proses yang harus dilakukan terlebih dahulu.

Hal pertama yang dilakukan adalah epoxy dicampur dengan hardener, kemudian campuran tersebut akan mengering dalam rentang waktu tertentu. Dalam rentang waktu tersebut, campuran *adhesive* harus segera diaplikasikan ke benda yang ingin direkatkan. Jenis *adhesive* yang digunakan pada simulasi ini adalah *Resin Epoxy* karena sifatnya yang tahan terhadap temperatur dan bahan kimia.

2.2 *Adhesive Joint*

Penggunaan *adhesive joint* semakin berkembang karena kelebihan unik *adhesive* yang dapat merekatkan rangkaian tertentu yang tidak dapat direkatkan dengan metode sambung mekanis yang konvensional (Richard G Budynas, 2010). Cara pengaplikasian *adhesive* memiliki banyak variasi, contoh sambungan-sambungan *adhesive joint* ada pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Berbagai macam sambungan Adhesive Joint yang umum digunakan (Hudayya, 2019)

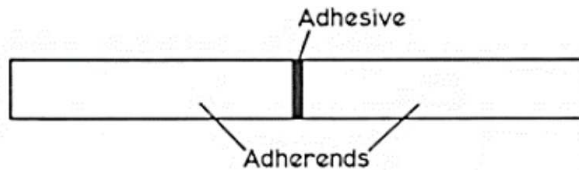
Adhesive joint merupakan pengganti dari sambungan konvensional yaitu *mechanical joint*. Sambungan yang dapat disebut *mechanical joint* seperti *bolt*, *riveting*, *brazing*, atau *welding*. *Adhesive joint* memiliki banyak keunggulan dibanding *mechanical joint* yang konvensional, perbandingan kedua tipe sambungan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan *adhesive joint* dan *mechanical joint*

<i>Adhesive Joint</i>	<i>Mechanical Joint</i>
Tidak melubangi benda	Melubangi benda yang akan menyebabkan konsentrasi tegangan pada lubang tersebut
Bisa merekatkan dua material yang berbeda tanpa adanya kerugian	Tidak bisa menyambung material besi dan plastik dengan baik, bisa menyebabkan korosi saat menyambung dua material besi yang berbeda jenis
Menerima dan meredam hentakan lebih baik karena sifat mekanisnya yang lebih elastis dari <i>mechanical joint</i>	Tidak bisa menerima hentakan dengan baik
Metode aplikasi sangat sederhana	Metode aplikasi butuh peralatan khusus dan ahli
Biaya sangat murah	Biaya mahal
Daya rekatnya relatif lebih lemah dibanding <i>mechanical joint</i>	Daya rekatnya relatif lebih kuat dibanding <i>adhesive joint</i>
Distribusi tegangan yang lebih merata	Distribusi tegangan kurang merata
Tidak menghantarkan panas antar material yang direkatkan	Menghantarkan panas antara material yang disambungkan
Dapat menyambungkan permukaan yang tebal	Hanya bisa menyambung jika salah satu material tipis

2.3 Butt Joint

Sambungan *adhesive* tipe *butt joint* adalah teknik sambungan yang merekatkan dua material dengan menempelkan kedua ujung material tersebut. *Butt joint* ini merupakan tipe sambungan yang paling sederhana dan efisien, tipe sambungan ini merupakan salah satu tipe yang sangat sering digunakan.

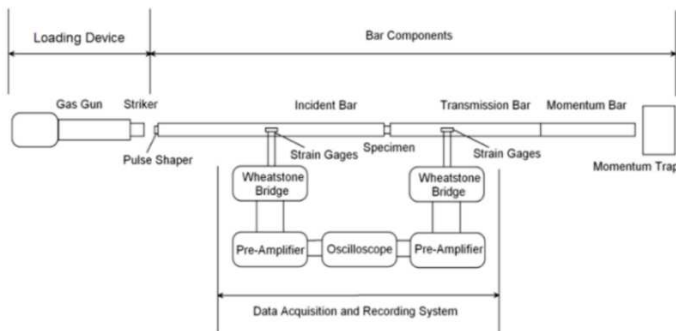


Gambar 2.2 Bulk adhesive pada butt joint (Hudayya, 2019)

2.4 Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

2.4.1 Komponen dan Susunan Split-Hopkinson Pressure Bar

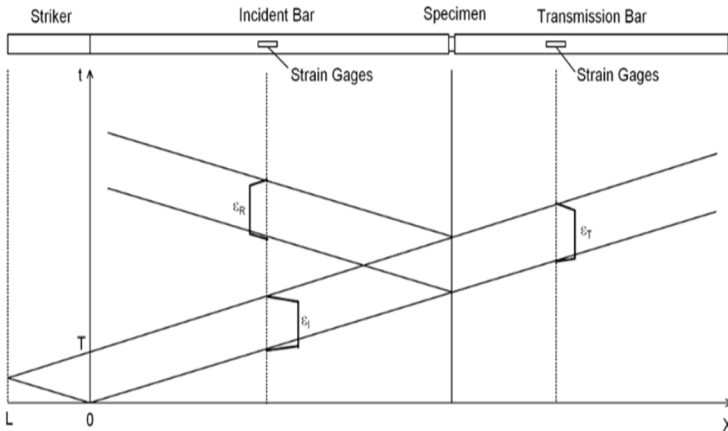
Split-Hopkinson pressure bar (SHPB) merupakan alat pengujian untuk mengetahui sifat mekanis dan karakteristik suatu material. Susunan SHPB yang utama terdiri dari 5 komponen yaitu *striker bar*, *incident bar*, *specimen*, *transmitted bar*, dan *strain gage*. *Strain gage* sebanyak dua buah diletakkan pada *incident bar* dan *transmitted bar*. Ilustrasi SHPB dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ilustrasi Split-Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011)

Menurut Kolsky (1949), inersia radial menjadi hal yang penting hanya saat benda menerima laju regangan yang berubah-ubah dalam waktu singkat. inersia radial ini proporsional dengan diameter spesimen, dan dapat diatasi dengan menggunakan rasio panjang-diameter (L/D) paling kecil senilai 20. Pada penelitian ini digunakan panjang striker bar 2000mm dan diameter 20mm, sehingga rasio L/D yang digunakan adalah 100. Maka geometri yang digunakan pada penelitian ini telah memenuhi syarat untuk menghindari pengaruh inersia radial terhadap hasil pengukuran.

Untuk menghasilkan bentuk sinyal yang identik, pada *striker bar*, *incident bar*, dan *transmitted bar* digunakan material dan diameter yang sama. Untuk menghindari sinyal yang tertangkap bertumpang tindih, peletakkan *strain gage* harus tepat, grafik perambatan gelombang dapat dilihat pada gambar 2.4. Untuk menghindari perbedaan laju regangan yang disebabkan oleh *bending stress*, semua komponen yang digunakan pada Eksperimen SHPB harus lurus secara fisik sepanjang sumbu tumbukan.



Gambar 2.4 Diagram posisi-waktu perambatan gelombang pada SHPB (Chen & Song, 2011)

2.4.2 Prinsip Kerja *Split-Hopkinson Pressure Bar*

Saat *striker bar* bertumbukan dengan *incident bar* terjadi pembebanan dinamis, pembebanan dinamis yang diberikan akan menghasilkan tegangan yang merambat sepanjang *incident bar*. Gelombang tegangan kompresi tersebut sebagian dipantulkan oleh spesimen dan sisanya diteruskan ke *transmitted bar*. Gelombang tersebut dibaca dan disimpan oleh *strain gage* yang telah dipasang pada titik tengah kedua batang.

Gelombang yang dipantulkan oleh spesimen akan memiliki perbedaan bentuk karena laju regangan yang dimiliki oleh spesimen berbeda dengan *pressure bar*. Dari ketiga gelombang yang direkam, dilakukan perbandingan data dan perhitungan untuk mendapatkan respon tegangan-regangan dari material yang diuji. Data yang diperoleh dapat di *plot* menjadi grafik regangan terhadap waktu yang kemudian dapat diolah menjadi kurva tegangan-regangan.

2.4.3 Pengolahan Data

Saat menggunakan metode *Split-Hopkinson pressure bar* perlu ditentukan durasi pembebanan yang dapat dihitung dari panjang *striker* dengan rumus sebagai berikut

$$T = \frac{2L}{C_{st}} \quad (2.1)$$

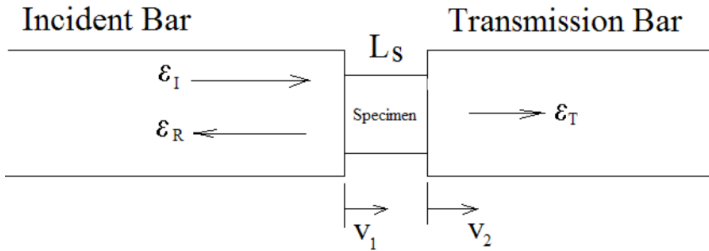
dimana: T = Durasi pembebanan
 L = Panjang *striker bar*
 C_{st} = Kecepatan gelombang material *striker bar*

jika *striker bar* memiliki material dan diameter yang sama dengan *incident bar*, regangan dan tegangan dari pulsa yang dihasilkan oleh tumbukan *striker bar* bergantung pada kecepatan *striker bar* saat bertumbukan.

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \rho_B C_B v_{st} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{C_B} \quad (2.3)$$

dimana: σ_I = Tegangan pada *incident bar*
 ε_I = Regangan pada *incident bar*
 ρ_B = Massa jenis dari material *bar*
 C_B = Kecepatan gelombang material *incident bar*
 v_{st} = Kecepatan *striker bar* saat tumbukan



Gambar 2.5 Area spesimen pada Split-Hopkinson Pressure Bar (Chen & Song, 2011)

Terdapat tiga pulsa regangan yang dapat dibaca oleh strain gage (gambar 2.5). Tiga pulsa regangan tersebut berhubungan dengan kecepatan partikel di kedua sisi spesimen yang secara matematis dapat dinyatakan:

$$v_1 = C_B(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (2.4)$$

$$v_2 = C_B \varepsilon_T \quad (2.5)$$

dimana: v_1 = Kecepatan *incident bar*
 v_2 = Kecepatan *transmitted bar*
 C_B = Cepat rambat gelombang
 ε_I = Sinyal *incident*
 ε_R = Sinyal *reflected*
 ε_T = Sinyal *transmitted*

jika diasumsikan gelombang tegangan tidak mengalami dispersi, sinyal yang terbaca oleh *strain gage* dapat mewakili ujung *bar* yang bersentuhan dengan spesimen. Keseimbangan tegangan juga

diasumsikan pada eksperimen *Split-Hopkinson pressure bar* dan dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (2.7)$$

dimana: σ_1 = Tegangan pada *incident bar*
 σ_2 = Regangan pada *transmitted bar*

sehingga laju regangan rata-rata dan regangan pada spesimen dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = -2 \frac{C_B}{L_s} \varepsilon_R \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon} dt = -2 \frac{C_B}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (2.9)$$

dimana: L_s = Panjang awal spesimen
 $\dot{\varepsilon}$ = Laju regangan rata-rata
 ε = Regangan pada spesimen

tegangan pada kedua ujung spesimen dapat dirumuskan sebagai berikut:

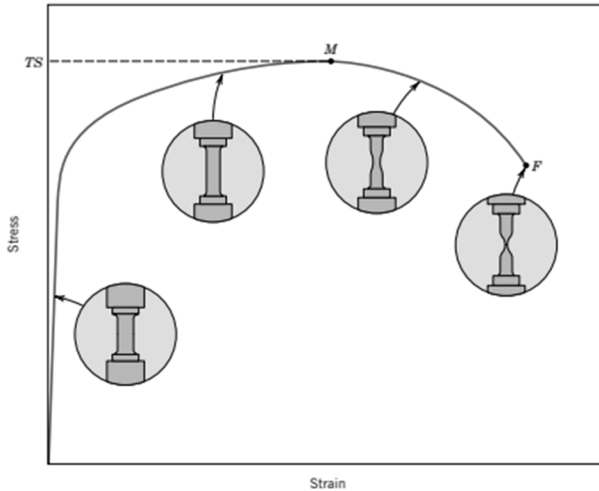
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{A_B}{A_s} \cdot E_B \cdot \varepsilon_T \quad (2.10)$$

dimana: A_B = Luas penampang *bar*
 A_s = Luas penampang spesimen
 E_B = Modulus young *bar*

2.5 Kurva Tegangan-Regangan

Dengan melakukan *plotting* data yang diperoleh dari hasil perhitungan dengan persamaan 2.9 dan 2.10, akan didapatkan kurva tegangan-regangan yang menggambarkan deformasi yang dialami oleh spesimen. Berdasarkan grafik yang terbentuk, jika tegangan-regangan kembali ke awal, maka deformasi yang terjadi

termasuk deformasi elastis dengan luas daerah yang terbentuk menggambarkan besarnya energi yang diserap oleh material.



Gambar 2.6 Kurva tegangan-regangan (Callister & Rethwisch, 2010)

2.6 Modulus Elastisitas

Kekakuan adalah kemampuan suatu material untuk menahan tegangan sebelum terjadi deformasi atau defleksi. Untuk mengetahui kekakuan suatu material dapat diukur melalui modulus elastisitas yang ada pada kurva tegangan-regangan. Perhitungan pada *initial slope* pada bagian elastis kurva tegangan-regangan akan mendapatkan nilai dari modulus elastisitas.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

dimana: E = Modulus Elastisitas
 σ = Tegangan
 ε = Regangan

2.7 Resilience

Ketahanan (*resilience*) adalah kemampuan suatu material untuk menyerap energi saat menahan terjadinya kerusakan. Kemampuan ini dapat dihitung melalui *modulus of resilience* (energi regangan per unit volume dan tegangan yang diberikan pada spesimen dari tegangan nol ke tegangan yield). Energi regangan per unit volume dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$U_o = \frac{1}{2} \sigma_x \varepsilon_x \quad (2.13)$$

dimana: U_o = Energi regangan per unit volume
 σ_x = Tegangan yang diberikan ke spesimen dari nol ke yield
 ε_x = Regangan dari tegangan nol ke yield

2.8 Simulasi ANSYS

Untuk mengetahui pengaruh berbagai parameter yang tidak dapat terdeteksi oleh SHPB, dilakukan simulasi pada ANSYS. Menggunakan *explicit dynamics analysis system*, analisa menggunakan *explicit dynamics* digunakan karena metode integrasi yang dilakukan berdasarkan waktu. Jika menggunakan analisa *implicit* maka integrasi yang akan dilakukan berdasarkan posisi, dapat dilihat pada rumus berikut.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.14)$$

dimana: m = Matriks massa
 c = Matriks redaman
 k = Matriks kekakuan
 $F(t)$ = Vektor beban

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

2.8.1 *Finite Element Analysis*

Metode elemen hingga merupakan metode terkomputerisasi untuk memprediksi peristiwa tegangan, getaran, panas, aliran fluida, dan efek fisik dunia nyata. Metode elemen hingga menunjukkan apakah benda akan pecah, terkikis, atau bekerja semestinya. Prinsip kerja FEA adalah menguraikan benda asli menjadi elemen hingga dengan jumlah yang sangat besar. Persamaan matematis membantu memprediksi respon suatu material pada tiap elemen. Kemudian komputer menyatukan semua perhitungan pada tiap *node* dan memprediksi respon dari benda yang dianalisa.

2.8.2 *Explicit Dynamics*

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

Persamaan sederhana yang digunakan pada metode analisa ini mengekspresikan konservasi massa, momen, dan energi. Konservasi massa sudah terpenuhi karena berat jenis dari material pada setiap titik waktu bisa ditentukan dari volume dan massa inisial, dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (2.15)$$

untuk konservasi momentum, digunakan untuk merelasikan percepatan dengan beban dan dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \rho \ddot{x} &= b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{y} &= b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{z} &= b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.16)$$

sedangkan untuk konservasi energi digunakan rumus sebagai berikut

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (2.17)$$

Pada tiap jeda waktu, ketiga persamaan tersebut akan diselesaikan pada setiap elemen di model. Setelah mendapatkan gaya di tiap *node*, percepatan *node* dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \quad (2.18)$$

dimana: \ddot{x}_i = Percepatan *node* ($i = 1, 2, 3$)
 F_i = Gaya yang bekerja pada *node*
 b_i = Percepatan benda
 m = Massa *node*

setelah diperoleh percepatan pada $n - 1/2$, kecepatan pada $n + 1/2$ dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \quad (2.19)$$

setelah itu dilakukan perhitungan posisi pada $n + 1$ dengan rumus sebagai berikut

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (2.20)$$

Metode analisa ini memiliki kelebihan yaitu tidak membutuhkan iterasi saat mengintegrasikan waktu, tidak membutuhkan uji konvergensi, dan tidak melakukan invers matriks kekakuan.

2.8.3 Johnson-Cook Strength

Permodelan *Johnson-Cook strength* digunakan untuk merepresentasikan respon dari material di daerah plastis saat menerima regangan, laju regangan, dan temperatur yang tinggi. Respon tersebut akan muncul pada peristiwa pembebanan impuls akibat tumbukan dengan kecepatan tinggi. Dengan permodelan ini, *yield stress* bergantung pada regangan, laju regangan, dan temperatur. Permodelan *Johnson-Cook strength* dapat ditulis sebagai rumus berikut

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n] [1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*] [1 - T_H^m] \quad (2.21)$$

dimana: Y = Yield stress
 A = Initial yield stress
 B = Hardening constant
 ε = Effective plastic strain
 n = Hardening exponent
 C = Strain rate constant
 $\dot{\varepsilon}^*$ = Normalized effective plastic strain
 T_H = Homologous Temperature

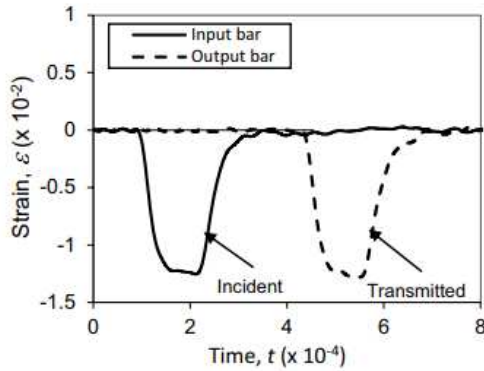
parameter pada persamaan *Johnson-Cook Strength* didapatkan dari eksperimen. Untuk eksperimen pada temperatur ruangan dapat digunakan *Homologous temperature* dengan nilai 0.

2.9 Penelitian Terdahulu

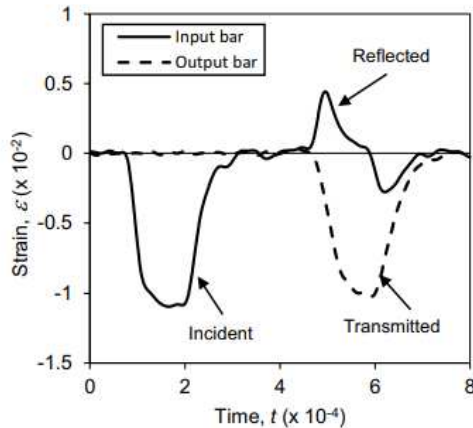
2.9.1 Synergistic Effects of Mixed Silica Micro-nanoparticles on Compressive Dynamic Stiffness and Damping of Epoxy Adhesive

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yohanes(2018), dilakukan kalibrasi alat dengan melakukan pengujian *Split-Hopkinson pressure bar* tanpa spesimen. Dari hasil eksperimen, dapat dilihat pada gambar 2.7 bahwa gelombang *incident* dan *transmitted* memiliki bentuk yang sama. Sedangkan saat

menggunakan spesimen gelombang yang dihasilkan memiliki *reflected Pulse*



Gambar 2.7 Gelombang regangan tanpa spesimen (Yohanes, 2018)



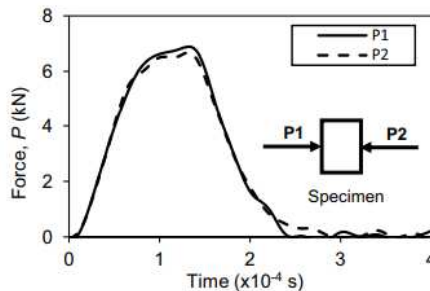
Gambar 2.8 Gelombang regangan dengan spesimen (Yohanes, 2018)

dari data yang didapat pada eksperimen dengan spesimen, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_1 = A_b E \{ \varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) \} \quad (2.21)$$

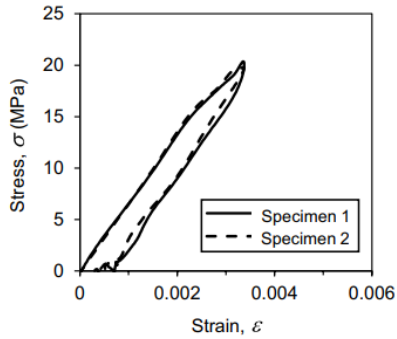
$$P_1 = A_b E \varepsilon_T(t) \quad (2.22)$$

maka didapatkan grafik P1-P2 yang melambangkan kesetimbangan tegangan dinamis pada kedua sisi spesimen yang bisa dilihat pada gambar 2.9.

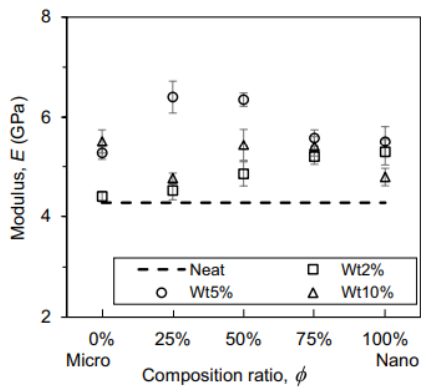


Gambar 2.9 Dynamic Stress Equilibrium pada kedua sisi spesimen(Yohanes, 2018)

setelah itu dilakukan perhitungan untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan dan kekakuan yang bisa dilihat pada gambar 2.10 dan 2.11



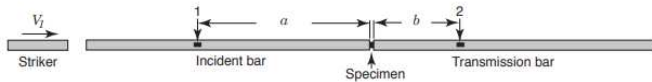
Gambar 2.10 Kurva tegangan-regangan pada dua spesimen (Yohanes, 2018)



Gambar 2.11 Modulus Elastisitas sesuai dengan rasio komposisi silika (Yohanes, 2018)

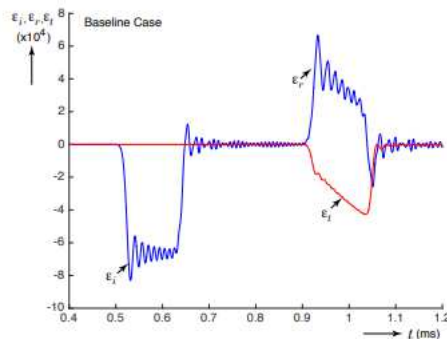
2.9.2 Numerical Simulations of the Kolsky Compression Bar Test

Dari penelitian yang dilakukan oleh Edmundo Corona tentang simulasi numerik pada *Split-Hopkinson Pressure Bar (Kolsky Bar)*, digunakan geometri permodelan yang dapat dilihat pada gambar 2.12.



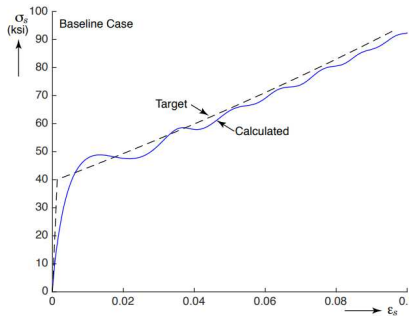
Gambar 2.12 Schematic of the Kolsky compression test setup (Edmundo Corona, 2015)

dengan menggunakan kecepatan 267 in/s, gelombang regangan yang terbaca pada *Incident Bar* dan *Transmitted Bar* dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Incident and transmission bar strains measured 40 in. away from the specimen in the baseline case. (Edmundo Corona, 2015)

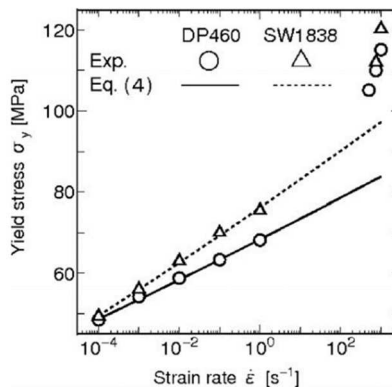
melalui perhitungan, didapatkan grafik tegangan-regangan sebagai berikut.



Gambar 2.14 Comparison of engineering stress-strain curve calculated via Eqns. (Edmundo Corona, 2015)

2.9.3 Experimental and computational investigations on strain rate sensitivity and deformation behavior of bulk materials made of epoxy resin structural adhesive

Pada Penelitian yang telah dilakukan oleh Iwamoto Takeshi pada tahun 2010 didapatkan bahwa *yield stress epoxy 3M SW1838* sensitif terhadap perubahan laju regangan yang diterima. Grafik laju regangan terhadap *yield stress* dapat dilihat pada gambar 2.15



Gambar 2.15 Yield behavior in uniaxial compression as a function of strain rate for structural adhesives SW1838 and DP-460(Iwamoto, 2010)

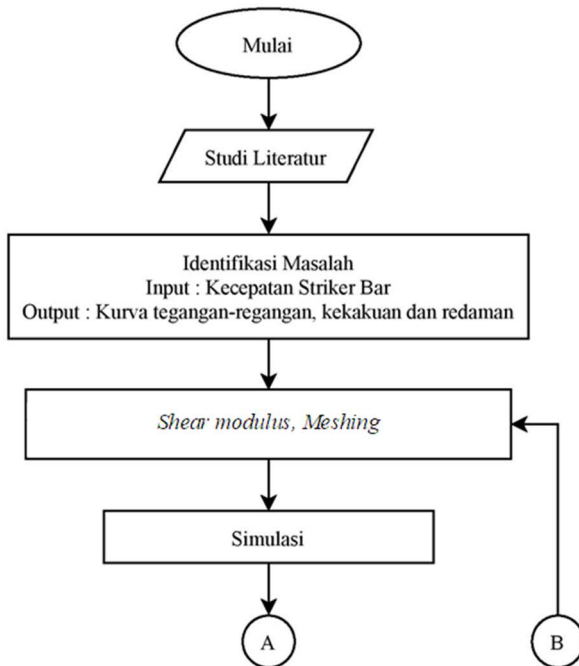
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

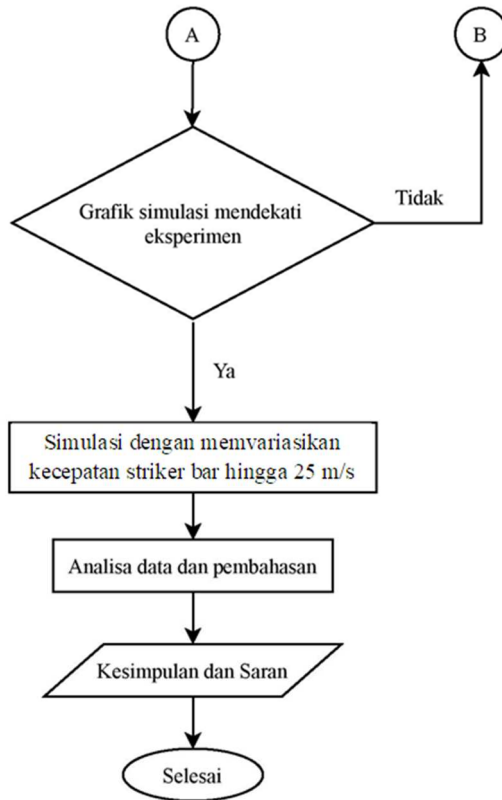
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Flowchart Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa elemen hingga pada alat uji *Split-Hopkinson pressure bar* untuk mengetahui pengaruh kecepatan terhadap respon tegangan-regangan *adhesive* pada beban dengan laju regangan tinggi karena kecepatan *striker bar* sangat sulit untuk dijaga konsisten pada pengujian secara langsung. Analisa akan dilakukan dengan mengukur regangan pada titik tengah *incident bar* dan *transmitted bar* yang kemudian akan diolah menjadi kurva tegangan-regangan. Untuk menyelesaikan masalah yang ada pada penelitian akan dilakukan tahapan yang dapat dilihat pada gambar 3.1 diagram alir penelitian.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahap-tahap penelitian

















3.2.1 Persiapan

Untuk menentukan ruang lingkup permasalahan dilakukan studi literatur dan pencarian referensi yang berkaitan dengan penelitian ini. Kemudian, dilakukan perumusan masalah yang akan diteliti. Input dari perumusan masalah ini berupa kecepatan *striker bar*. Perubahan kecepatan *striker bar* akan mempengaruhi laju regangan yang akan mempengaruhi respon dari *epoxy*. output yang

diharapkan dari penelitian ini berupa kurva tegangan-regangan, kekakuan, dan redaman dari *epoxy*

Selanjutnya, dimodelkan alat uji *Split-Hopkinson pressure bar* di *ANSYS* dengan ukuran dan material yang sesuai dengan alat SHPB yang digunakan pada eksperimen yang telah dilakukan oleh Yohanes. Material yang digunakan pada *striker bar*, *incident bar*, dan *transmitted bar* adalah *STNL.STEEL* pada *Explicit Materials*. Penggunaan material dapat diatur pada *Engineering Data*, untuk *epoxy* digunakan *EPOXY RES* pada *Explicit Materials* dan menambahkan persamaan *Johnson-Cook Strength* untuk menetapkan *yield strength* dari *epoxy* tersebut

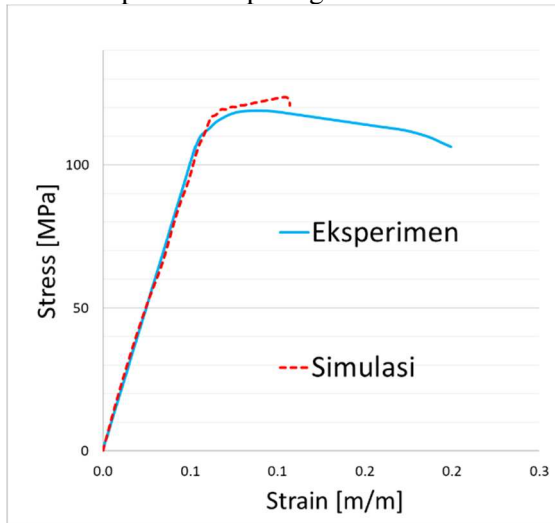
Tabel 3.1 Parameter material *epoxy*

1	Property	Value	Unit
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Density	1180	kg m... 
4	 Specific Heat, C_p	1100	J kg... 
5	 Johnson Cook Strength		
6	Strain Rate Correction	Firs... 	
7	Initial Yield Stress	76.2	MPa 
8	Hardening Constant	324.2	MPa 
9	Hardening Exponent	6.638	
10	Strain Rate Constant	0.07297	
11	Thermal Softening Exponent	100	
12	Melting Temperature	200	C 
13	Reference Strain Rate (/sec)	1	
14	 Shear Modulus	600	MPa 
15	 Shock EOS Linear		
16	Gruneisen Coefficient	1.13	
17	Parameter C1	2730	m s ⁻¹ 
18	Parameter S1	1.493	
19	Parameter Quadratic S2	0	s m ⁻¹ 

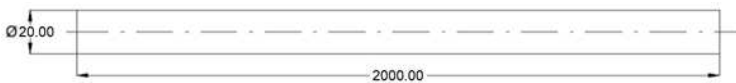
Density pada material menandakan massa per volume benda. *Specific heat* menandakan jumlah panas per unit massa yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur sebesar 1 derajat *celcius*. Shock EOS Linear digunakan untuk mendefinisikan hubungan antara variabel *density*, tekanan, energi, kecepatan

partikel, dan kecepatan tumbukan. *Gruneisen Coefficient* mendeskripsikan efek perubahan temperatur terhadap ukuran atau dinamika pada kisi kristal.

Dapat dilihat tabel 3.1 merupakan parameter yang digunakan untuk simulasi, parameter yang digunakan berdasarkan material *3M Scotch-Weld 1838* pada penelitian *Takeshi Iwamoto* pada tahun 2010. Perbandingan grafik *stress-strain* eksperimen dengan simulasi dapat dilihat pada gambar 3.2

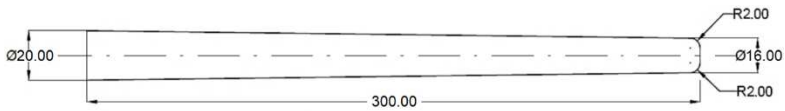


Gambar 3.2 Perbandingan kurva tegangan-regangan yang didapatkan dari simulasi dan eksperimen

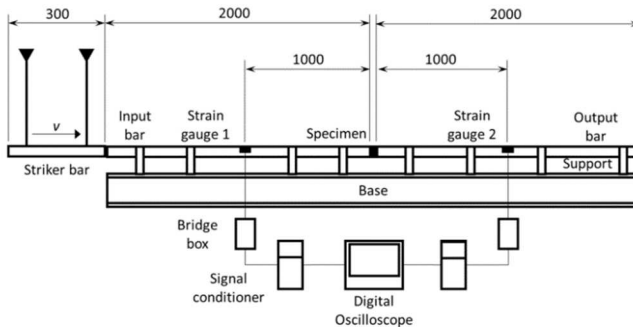


Gambar 3.3 Dimensi Striker bar yang digunakan

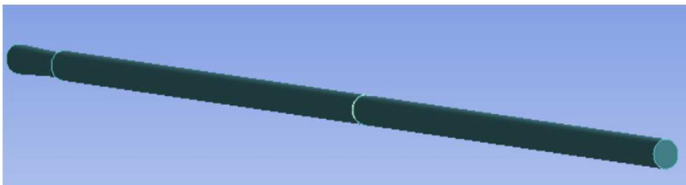
untuk dimensi *striker bar*, *incident bar*, dan *Transmitted bar* dapat dilihat pada gambar 3.3 dan 3.4 (satuan dalam mm).



Gambar 3.4 Dimensi Incident bar dan Transmitted bar yang digunakan



Gambar 3.5 Skema Alat Uji Split-Hopkinson Pressure Bar



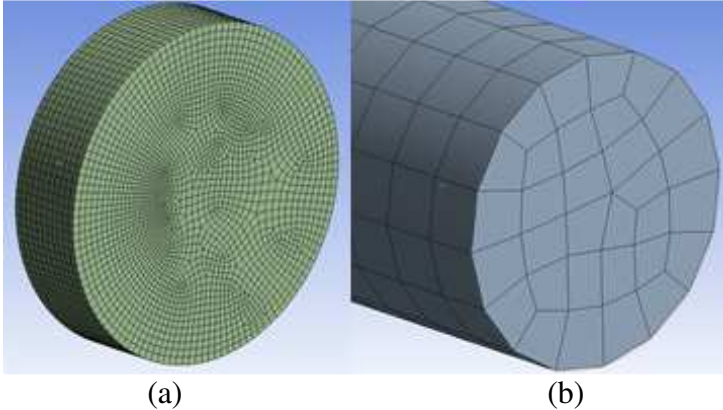
Gambar 3.6 Permodelan pada *ANSYS Explicit Dynamic*

Geometri yang digunakan sesuai dengan susunan alat uji *Split-Hopkinson Pressure Bar* yang digunakan pada eksperimen yang dilakukan Yohanes yang dapat dilihat pada gambar 3.5. Tumpuan yang digunakan pada eksperimen merupakan plat logam bentuk V.

Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
End Time	7.e-004
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e-07
Maximum Energy Error	0.1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0.9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No

Gambar 3.7 Analysis settings pada ANSYS Explicit Dynamics

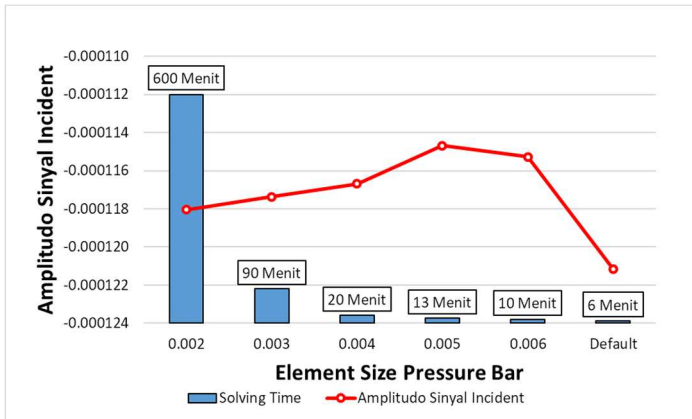
Pada konfigurasi analysis settings *End time* merupakan durasi berjalannya simulasi dan digunakan nilai sebesar 0.0007 detik karena sinyal *incident*, *reflected*, dan *transmitted* telah muncul dan terekam pada selang waktu tersebut. Time step adalah langkah waktu diantara setiap persamaan yang diselesaikan.



Gambar 3.8 Meshing pada epoxy(a) dan *pressure bar*(b)

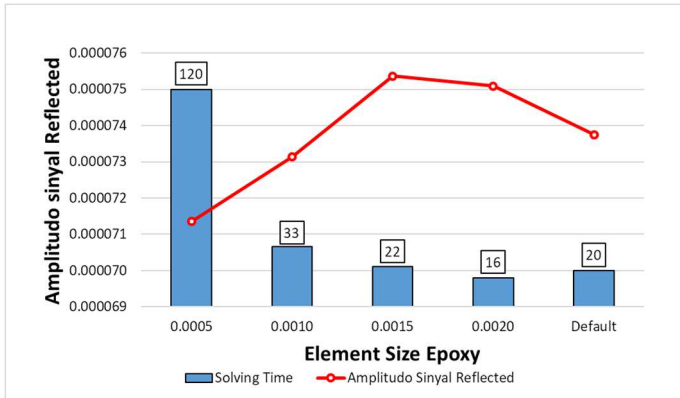
Untuk menentukan jumlah elemen *meshing* yang digunakan, Dilakukan uji konvergensi pada *incident bar* dengan mempertimbangkan Amplitudo sinyal *incident* dan *computational*

cost, digunakan *mesh sizing* sebesar 0.004 m untuk *pressure bar*. Grafik uji konvergensi *pressure bar* dapat dilihat pada gambar 3.9.



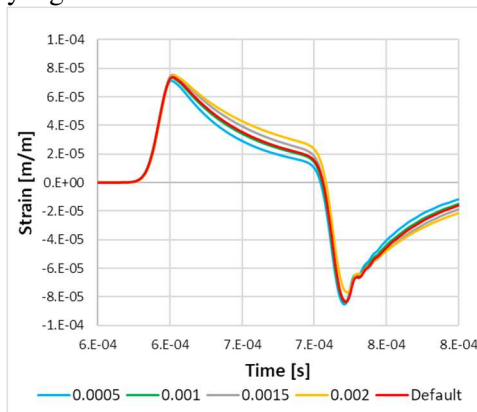
Gambar 3.9 Uji Konvergensi *pressure bar*

Mesh size 0.004 m dipilih karena dengan mengurangi *mesh size*, waktu yang diperlukan untuk *running* semakin signifikan tetapi hasil yang diperoleh tidak memiliki perubahan yang signifikan. Kemudian dengan *mesh size* 0.004 m pada *pressure bar* dilakukan uji konvergensi pada *epoxy* untuk mengetahui *mesh size* yang optimal.



Gambar 3.10 Uji Konvergensi *epoxy*

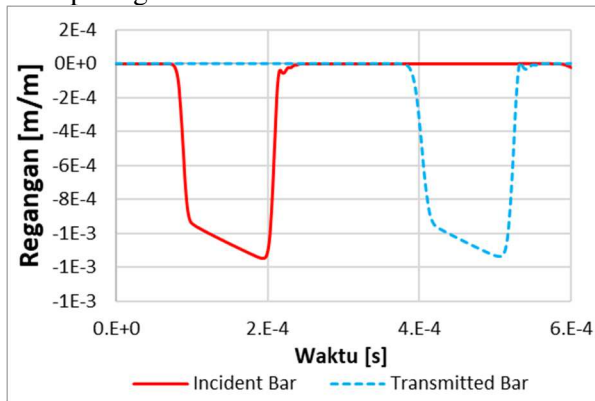
Dapat dilihat pada gambar 3.10 bahwa variasi ukuran *mesh* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap amplitudo sinyal *reflected*, tetapi ada perbedaan pada bentuk sinyal *reflected* yang didapatkan. Grafik regangan-waktu sinyal *reflected* dapat dilihat pada gambar 3.11. Dengan mempertimbangkan *solving time* dan bentuk sinyal *reflected* dipilih ukuran *mesh default* karena memiliki bentuk yang mendekati ukuran *mesh* yang kecil dengan *solving time* yang rendah.



Gambar 3.11 Perbandingan sinyal *reflected*

3.2.2 Pengujian *Split-Hopkinson Pressure Bar*

Pada permodelan alat uji SHPB dengan *ANSYS Explicit Dynamics*, dipasang *strain probe* pada titik tengah *incident bar* dan titik tengah *transmitted bar*. Dengan pengaturan *Body Interaction* antara *striker bar* dan *incident bar* menjadi *frictionless* dan *Body Interaction* antara kedua *pressure bar* dan *adhesive* menjadi *Bonded*. *Velocity Constraint* diberikan terhadap *striker bar*, *incident bar*, dan *transmitted bar* agar pergerakan hanya terjadi pada sumbu x. Simulasi dilakukan pada temperatur ruangan. Untuk mengetahui apakah konfigurasi alat SHPB sudah benar, dilakukan kalibrasi alat dengan membandingkan gelombang *incident* dan *transmitted* pada pengujian tanpa spesimen. Grafik perbandingan dapat dilihat pada gambar 3.12



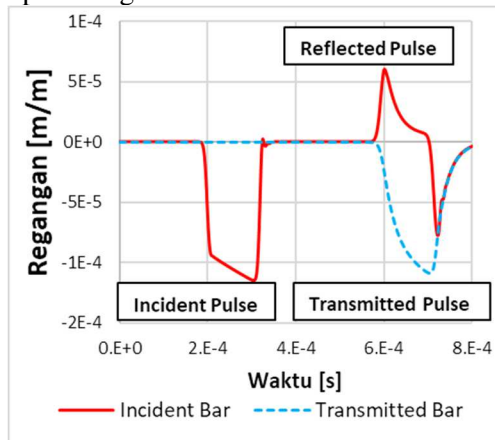
Gambar 3.12 Kalibrasi alat SHPB pada simulasi

parameter yang digunakan pada pengukuran ini adalah sebagai berikut:

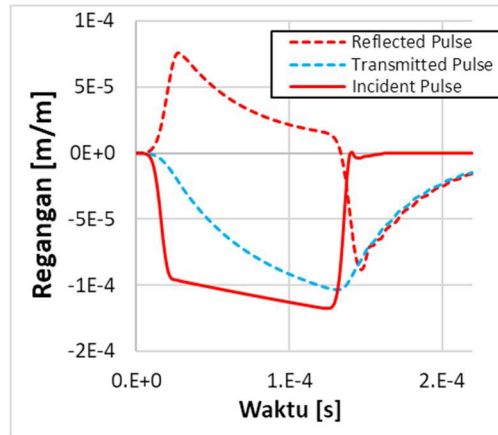
Diameter <i>Pressure Bar</i>	= 20 mm
Luas Permukaan <i>Pressure Bar</i>	= 314 mm ²
Diameter Spesimen	= 20 mm
Luas Permukaan Spesimen	= 314 mm ²
Ketebalan <i>Adhesive</i>	= 5 mm
Temperatur pengujian	= 22 ^o C

3.2.3 Analisa Data

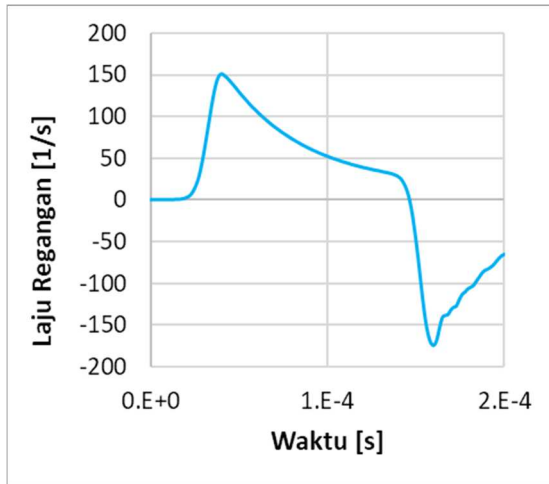
Untuk validasi hasil yang didapatkan dari simulasi, akan dibandingkan data simulasi dengan data yang diperoleh dari eksperimen yang telah dilakukan oleh Yohanes dengan parameter yang sama. Berikut ini adalah contoh grafik yang didapatkan dari simulasi dan perhitungan.



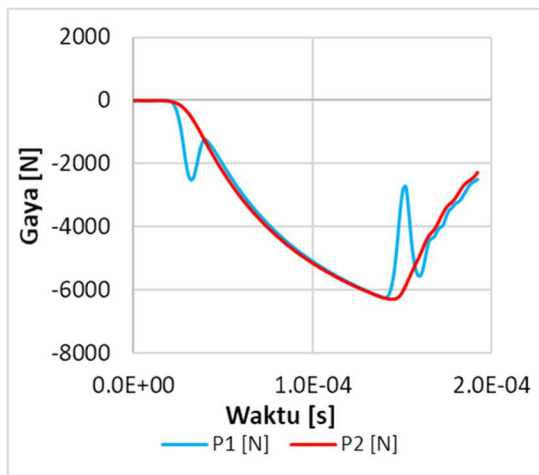
(a)



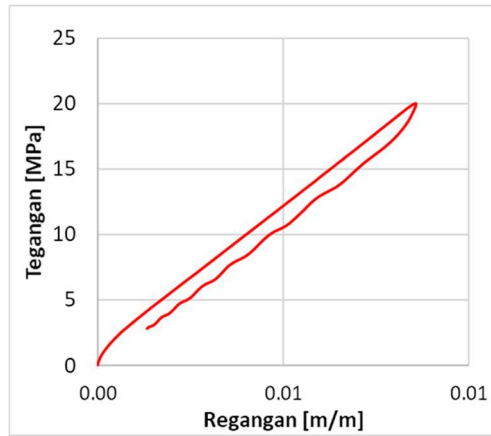
(b)



(c)



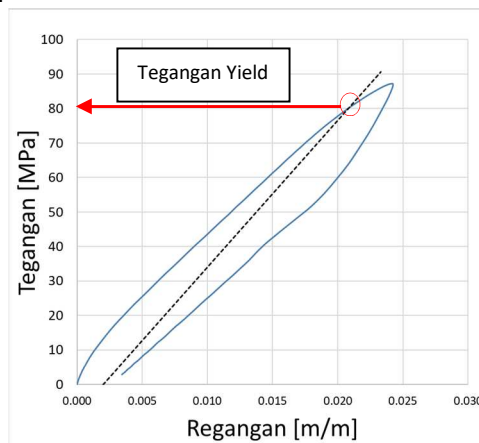
(d)



(e)

Gambar 3.13 Grafik hasil simulasi dan perhitungan (a) Grafik regangan-waktu hasil simulasi (b) Grafik regangan-waktu untuk perhitungan (c) Grafik P1-P2 (d) Grafik laju regangan (e) Grafik tegangan-regangan

untuk menentukan yield strength pada kurva tegangan-regangan, digunakan metode *offset yield strength 0.2%* dan dapat dilihat pada gambar 3.14



Gambar 3.14 *Offset yield strength*

Setelah dilakukan validasi, data yang telah didapat dari hasil simulasi dan eksperimen akan di analisa dan dibahas. Analisa dan pembahasan akan dilakukan berdasarkan pada teori yang ada, dari hasil analisa dan pembahasan data akan diketahui pengaruh laju regangan terhadap kurva tegangan-regangan, energi serapan, dan kekakuan *epoxy*. Dari analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan dan saran dari penelitian ini. Kesimpulan tersebut akan menjawab tujuan penelitian ini dilakukan dan mencantumkan beberapa poin penting yang didapat saat penelitian ini dilakukan. Saran juga akan dibuat agar penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan penelitian ini akan mendapatkan hasil yang lebih baik.

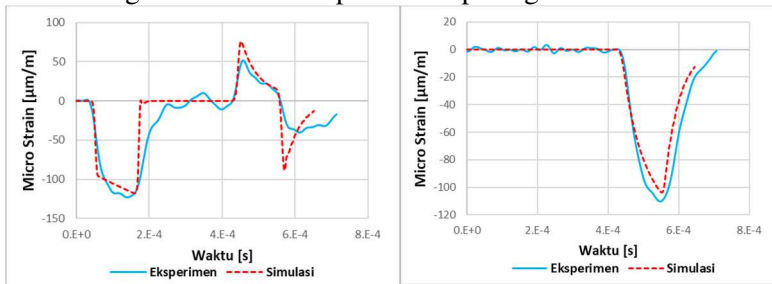
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi model elemen hingga

Untuk mengetahui apakah model elemen hingga yang digunakan, perlu dilakukan validasi data dengan cara membandingkan data simulasi dengan eksperimen. Data yang dibandingkan adalah grafik regangan-waktu yang dibaca oleh *strain gage* pada *incident bar* dan *transmitted bar*. Dari data yang didapatkan melalui simulasi dilakukan perbandingan dengan data eksperimen pada kecepatan *striker bar* yang sama yaitu 1,4 m/s. Perbandingan kedua data dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2.

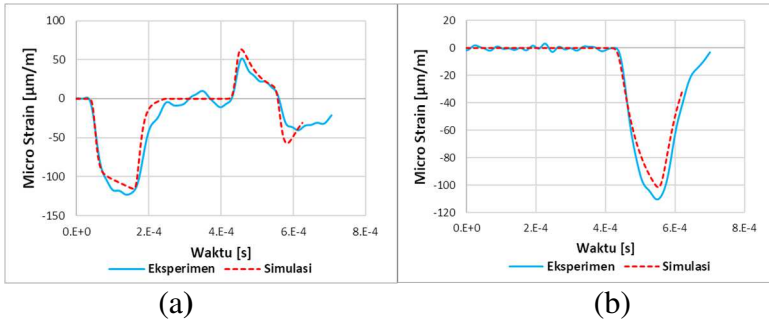


(a)

(b)

Gambar 4.1 Grafik perbandingan simulasi-eksperimen (a) incident bar (b) transmitted bar

Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa puncak dari sinyal *reflected* mempunyai perbedaan yang signifikan serta periode pembebanan pada eksperimen lebih besar dibandingkan pada simulasi, periode pembebanan pada hasil eksperimen juga lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi. Kedua perbedaan tersebut diduga disebabkan karena adanya dispersi sinyal dan *misalignment* pada *striker bar* saat menumbuk *incident bar*. Peristiwa *misalignment* dapat dibuktikan dengan melakukan simulasi dengan *misalignment* pada *striker bar* saat menumbuk *incident bar*, perbandingan grafik eksperimen dan simulasi dengan *misalignment* dapat dilihat pada gambar 4.2.



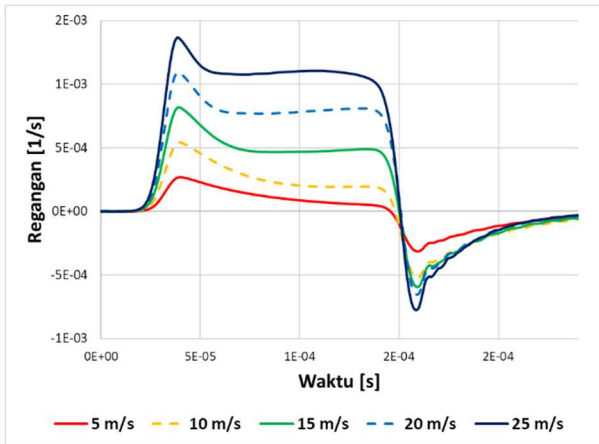
Gambar 4.2 Grafik perbandingan simulasi-eksperimen dengan misalignment (a) *incident bar* (b) *transmitted bar*

Dengan menggunakan *misalignment* pada *striker bar* sebesar 0,15 derajat, didapatkan grafik yang menyerupai eksperimen dengan periode pembebanan yang sedikit lebih singkat yang diduga disebabkan oleh faktor lain yang ada pada eksperimen. Dari perbandingan kedua grafik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa model elemen hingga yang digunakan sudah mendekati eksperimen. Dengan model elemen hingga ini akan dilakukan simulasi dengan kecepatan *striker bar* yang berbeda untuk mengetahui pengaruh kecepatan *striker bar* terhadap respon *adhesive*.

4.2 Hasil Simulasi

4.2.1 Sinyal Reflected

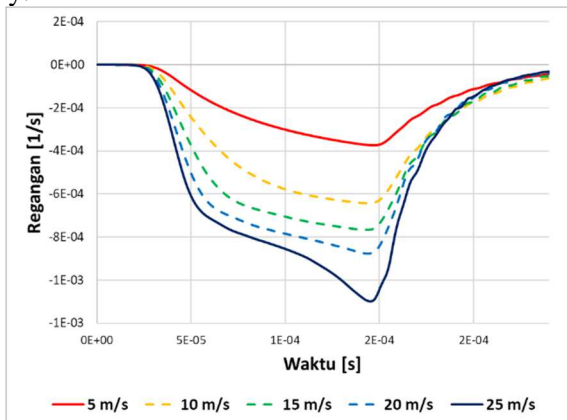
Saat epoxy resin menerima gelombang tumbukkan dari *incident bar*, sebagian dari gelombang tersebut akan dipantulkan kembali ke *incident bar*. Gelombang pantulan ini adalah sinyal *reflected*. Gambar 4.3 merupakan sinyal *reflected* dengan kecepatan tumbukan *striker bar* yang berbeda. Sinyal ini merupakan gelombang yang dipantulkan kembali ke *incident bar* yang dipantulkan kembali oleh epoxy. Sinyal ini menggambarkan laju regangan yang dialami oleh epoxy.



Gambar 4.3 Grafik regangan-waktu sinyal *reflected*

4.2.2 Sinyal *Transmitted*

Sinyal transmitted merupakan sisa gelombang yang tidak dipantulkan oleh epoxy dan diteruskan ke Transmitted Bar. Sinyal transmitted dapat dilihat pada gambar 4.4. Dapat dilihat pada kedua grafik regangan-waktu bahwa dengan bertambahnya kecepatan tumbukan, sinyal ini merepresentasikan tegangan yang dialami oleh epoxy.

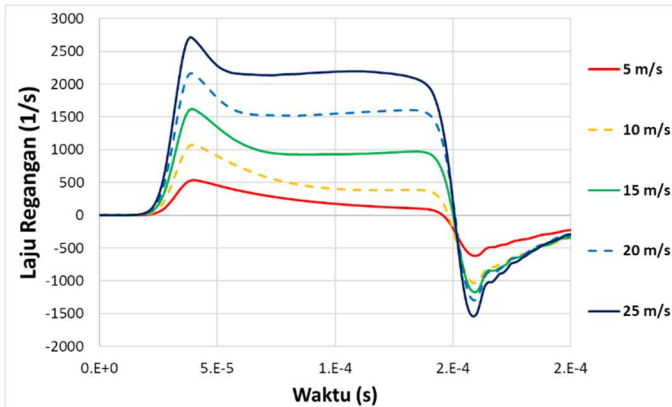


Gambar 4.4 Grafik regangan-waktu sinyal *transmitted*

4.3 Hasil perhitungan dan pembahasan

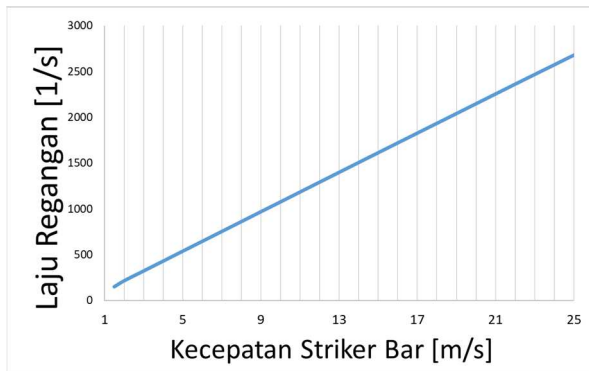
4.3.1 Perbandingan laju regangan

Dilakukan pengolahan pada data yang telah diperoleh dari simulasi dengan persamaan 2.8 pada tiap variasi kecepatan *striker bar* dan didapatkan grafik laju regangan-waktu. Dapat dilihat pada gambar 4.5 laju regangan yang naik menunjukkan adanya kompresi pada spesimen yang disebabkan oleh tumbukkan *striker bar*. Kemudian pada bagian puncak yang menurun menunjukkan bahwa terjadinya ekspansi pada spesimen yang artinya pembebanan dilepaskan. Sama halnya dengan sinyal *reflected* puncak grafik yang landai pada laju regangan tinggi menunjukkan bahwa *epoxy* sudah mengalami deformasi plastis.



Gambar 4.5 Grafik laju regangan

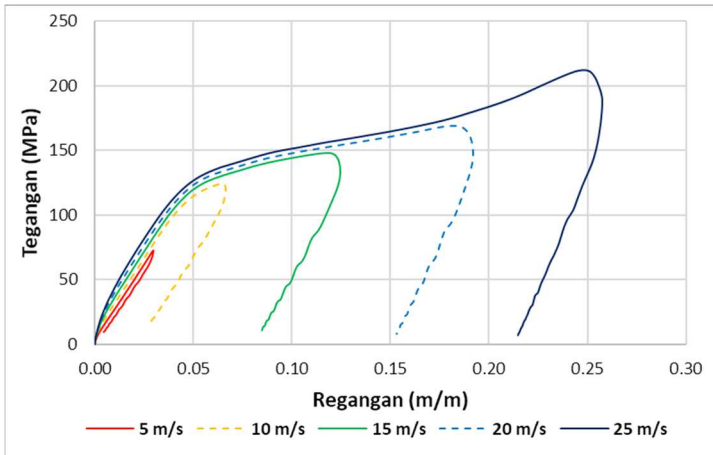
nilai puncak kompresi laju regangan terhadap kecepatan striker bar mengalami peningkatan yang linear, grafik laju regangan pada tiap kecepatan *striker bar* dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.6 Grafik laju regangan pada tiap kecepatan striker bar

4.3.2 Perbandingan kurva tegangan-regangan

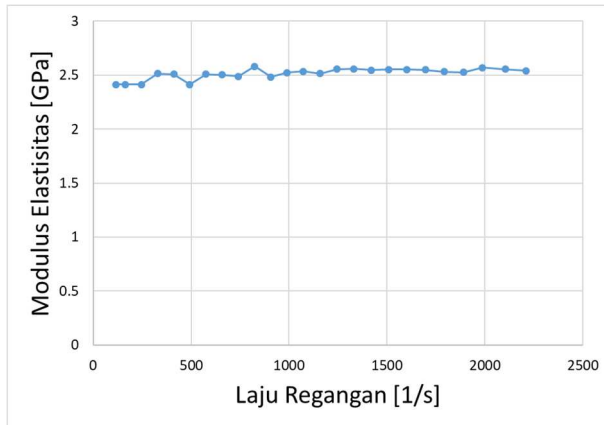
Dilakukan juga pengolahan pada data yang telah diperoleh dari simulasi dengan persamaan 2.9 dan 2.10 pada tiap variasi kecepatan *striker bar* dan didapatkan perbandingan grafik kurva tegangan-regangan. Dapat dilihat pada gambar 4.7 kurva mula-mula naik, hal ini menandakan adanya pembebanan pada spesimen yaitu kompresi yang disebabkan oleh tumbukkan *striker bar*. Setelah itu kurva menurun yang menandakan pembebanan telah dilepaskan. Kurva yang turun ditentukan dengan deformasi yang diterima oleh spesimen. Saat spesimen menerima deformasi elastis maka kurva akan kembali ke titik awal, sedangkan jika spesimen menerima deformasi plastis maka kurva tidak bisa kembali ke titik awal. *Epoxy* mulai mengalami deformasi plastis pada kecepatan *striker bar* 7 m/s dengan laju regangan sebesar 754.3 s^{-1} .



Gambar 4.7 Grafik tegangan-regangan

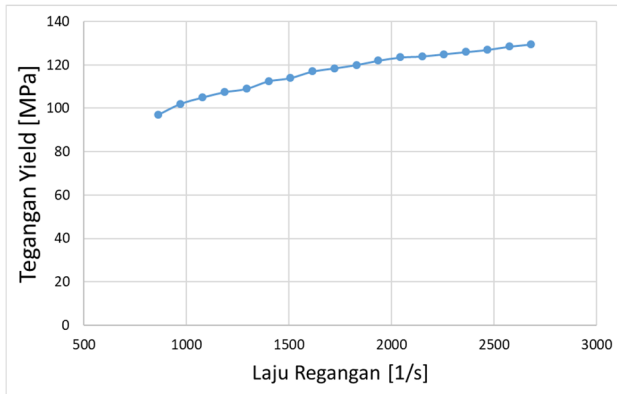
4.3.3 Pembahasan

Meningkatnya laju regangan tidak mempengaruhi nilai modulus elastisitas dari *epoxy*. Hal ini dapat dilihat kurva tegangan regangan pada gambar 4.7. *Slope* kemiringan kurva tidak memiliki perubahan yang signifikan, sehingga Modulus Elastisitas pada tiap variasi kecepatan tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena keterbatasan pada ANSYS dalam mendefinisikan material yang digunakan. Parameter viscoelastic dan parameter johnson-cook tidak bisa digunakan secara bersamaan, parameter isotropic elasticity dan Shock EOS Linear juga tidak bisa digunakan secara bersamaan. Pada penelitian ini, didapatkan nilai modulus elastisitas sebesar 2.5 GPa. Grafik laju regangan terhadap modulus elastisitas dapat dilihat pada gambar 4.8

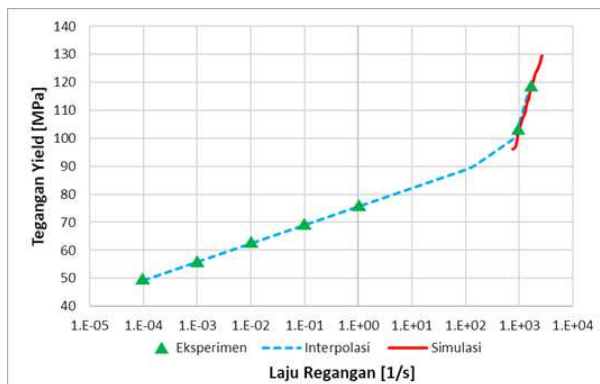


Gambar 4.8 Grafik laju regangan terhadap modulus elastisitas

Didapatkan bahwa *yield strength epoxy* bertambah besar seiring meningkatnya laju regangan yang diterima, hal ini disebabkan oleh sifat *strain hardening* yang dimiliki epoxy. *Strain hardening* adalah peristiwa meningkatnya kekuatan material akibat menerima deformasi plastis. Hal ini sudah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Takeshi Iwamoto. Grafik pengaruh laju regangan terhadap yield strength epoxy dapat dilihat pada gambar 4.9 dan grafik perbandingan data eksperimen dan simulasi dapat dilihat pada gambar 4.10.



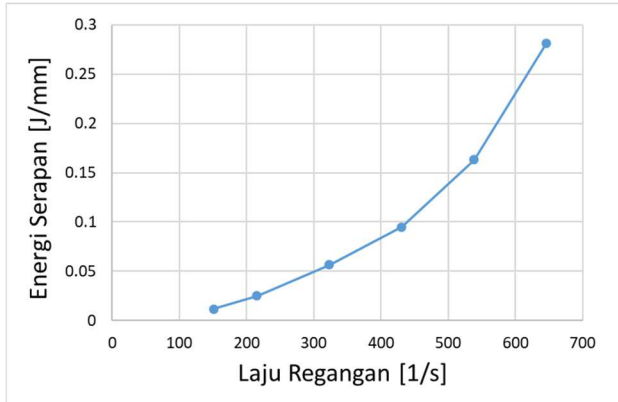
Gambar 4.9 Grafik laju regangan terhadap tegangan *yield*



Gambar 4.10 Grafik laju regangan terhadap tegangan *yield* dari simulasi dan eksperimen

Semakin tinggi laju regangan yang diterima oleh *epoxy* maka daerah dibawah kurva tegangan-regangan semakin besar juga. Untuk mengetahui nilai energi yang diserap oleh *epoxy* dapat dilakukan perhitungan luas daerah dibawah kurva dengan metode *trapezoidal rule*. Dapat dilihat pada gambar 4.11 bahwa energi yang diserap oleh *epoxy* mengalami peningkatan seiring meningkatnya laju regangan yang dialami. Peningkatan ini

disebabkan oleh sifat viskoelastis *epoxy* yang dapat menyerap energi lebih banyak seiring meningkatnya laju regangan yang diterima.



Gambar 4.11 Grafik laju regangan terhadap energi serapan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan antara lain:

1. Pada permodelan FEM, digunakan *mesh size* sebesar 0,004 m untuk *pressure bar* dan *default size* untuk *epoxy*. Untuk parameter material digunakan berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya.
2. Slope kurva tegangan-regangan tidak dipengaruhi oleh perubahan laju regangan, hal ini disebabkan karena keterbatasan ANSYS dalam mendefinisikan material yang digunakan.
3. Modulus elastisitas tidak dipengaruhi laju regangan yang dialami karena *initial slope* kurva tegangan-regangan tidak dipengaruhi oleh perubahan laju regangan, nilai modulus elastisitas yang didapatkan pada penelitian ini adalah 2.5 Gpa. Energi yang diserap oleh *epoxy* meningkat secara non-linear seiring meningkatnya laju regangan yang dialami. Hal ini menandakan bahwa *epoxy* dapat menyerap energi lebih banyak pada laju regangan yang lebih tinggi.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat diberikan sebagai berikut:

1. Melakukan validasi data dengan membandingkan data simulasi dan eksperimen pada tiap variasi pengukuran.
2. Melakukan penelitian pada pengaruh faktor-faktor ketidakpastian pada eksperimen terhadap data yang diperoleh.
3. Melakukan penelitian numerik pada tipe *adhesive joint* lainnya.
4. Melakukan penelitian numerik menggunakan aplikasi lainnya

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, Weinong dan Bo Song. 2011. **Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications**. New York: Springer Science Business Media.
- Corona, Edmundo. 2015. **Numerical Simulations of the Kolsky Compression Bar Test**. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- Hudayya, Adib Burhan. 2019. **Studi Eksperimen dan Analisa Pengaruh Ketebalan Adhesive Pada Sambungan Aluminium Tipe Butt Joint Terhadap Kekakuan Dengan Pembebanan Dinamis**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Callister, Jr., William D., dan David G. Rethwisch. 2010. **Materials Science and Engineering and Introduction 8th edition**. United States of America: World Color USA.
- Budynas, Richard G., dan J. Keith Nisbett. 2010. **Shigley's Mechanical Engineering Design 9th Edition**. New York: McGraw-Hill.
- Marcos, Juan Carlos. 2019. **Studi Eksperimen dan Analisa Pengaruh Ketebalan Adhesive Terhadap Kekakuan Scarf Adhesive pada Laju Regangan Tinggi**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sekiguchi, Y. dan Yohanes. 2018. **Synergistic Effect of Mixed Silica Micro-nanoparticles on compressive Dynamic Stiffness and Damping of Epoxy Adhesive**, <URL:https://www.researchgate.net/publication/323787904_Synergistic_Effects_of_Mixed_Silica_Micro-nanoparticles_on_Compressive_Dynamic_Stiffness_and_Damping_of_Epoxy_Adhesive>.

Gilat, Amos. 2005. **Strain Rate Sensitivity of Epoxy Resin in Tensile and Shear Loading**, <URL:https://www.researchgate.net/publication/24329670_Strain_Rate_Sensitivity_of_Epoxy_Resin_in_Tensile_and_Shear_Loading>.

Iwamoto, Takeshi. 2010. **Experimental and computational investigations on strain rate sensitivity and deformation behavior of bulk materials made of epoxy resin structural adhesive**, <URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309003680>>.

BIODATA PENULIS



Kenny Wiratno dilahirkan di Jakarta, 10 September 1998 anak kedua yang terlahir dari orangtua bernama Steven Wiratno dan Mida Husada. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di SD Tunas Karya II, SMP Don Bosco II, dan SMA Don Bosco II. Setelah lulus dari SMA Don Bosco II pada tahun 2016 penulis melanjutkan ke jenjang perkuliahan S1 di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2016 dengan NRP. 02111640000110. Di Jurusan

Teknik Mesin ini Penulis mengambil Bidang Studi Kekuatan Struktur. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan akademik maupun non-akademik yang diselenggarakan oleh Keluarga Mahasiswa Katolik (KMK), Jurusan, dan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HMM) dan aktif sebagai Asisten Praktikum maupun Grader mata kuliah. Pada tahun terakhir, penulis mulai fokus pada penelitian tentang *adhesive joint* yang dibimbing oleh Dr. Eng. Yohanes, S.T.,M.Sc. Semua pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis melalui email wiratnokenny@gmail.com.