ANALISIS POLA DEFORMASI DAN ENERGI PENYERAPAN PADA *CRASH BOX* MENGGUNAKAN METODE *QUASI-STATIC* DENGAN VARIASI KECEPATAN TUMBUKAN DAN MODEL MATERIAL

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



REFQI KEMAL HABIB NIM. 125060200111071

UNIVERSITAS BRAWIJAYA FAKULTAS TEKNIK MALANG 2016

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS POLA DEFORMASI DAN ENERGI PENYERAPAN PADA CRASH BOX MENGGUNAKAN METODE QUASI-STATIC DENGAN VARIASI KECEPATAN TUMBUKAN DAN MODEL MATERIAL

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar sarjana teknik



REFQI KEMAL HABIB NIM. 125060200111071

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing Pada tanggal 19 Agustus 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II Anindito Rurnowidodo, ST., M.Eng., Dr.Eng

Moch. Agus Choiron, ST., MT., Dr.Eng NIP. 19720817 200003 1 001

NIP. 19710310 199802 1 001

Mengetahui, Ketua Program Studi

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. NIP. 19750802 199903 2 002

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundangundangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).



JUDUL SKRIPSI :

ANALISIS POLA DEFORMASI DAN ENERGI PENYERAPAN PADA CRASH BOX MENGGUNAKAN METODE QUASI-STATIC DENGAN VARIASI KECEPATAN TUMBUKAN DAN MODEL MATERIAL

Nama Mahasiswa	: Refqi Kemal Habib
NIM	: 125060200111071
Program Studi	: Teknik Mesin
Konsentrasi	: Teknik Konstruksi

KOMISI PEMBIMBING	

Program Studi	: Teknik Mesin
Konsentrasi	: Teknik Konstruksi
	RSTAS BRAW,
KOMISI PEMBIMBING	
Dosen Pembimbing I	: Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
Dosen Pembimbing II	: Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng.

Dosen Penguji 1

Dosen Penguji 2

Dosen Penguji 3

: Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi, ST., MT. : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng : Nafisah Arina Hidayatin ST., M.Eng

Tanggal Ujian

SK Penguji

: 848/UN10.6/SK/2016

: 20 Juli 2016

JERSITAS BRAWI

Teriring Ucapan Terima Kasih kepada Orang Tua Tercinta, Bapak Mahmudi dan Ibu Khoiriyah yang sudah mendoakan dan membimbing hingga menjadikan saya seperti ini. Mas Reza dan Mbak Nina yang selalu memberi dukungan dan semangat. ~You'll Never Walk Alone~



KATA PENGANTAR

Alhamdulillahi Rabbil 'Alamin, puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan berkah dan rahmatnya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Analisis Pola Deformasi Dan Energi Penyerapan Pada *Crash Box* Menggunakan Metode *Quasi-Static* Dengan Variasi Kecepatan Tumbukan Dan Model Material" sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di jurusan teknik Mesin Universitas Brawijaya.

Selama pembuatan skripsi, penulis juga mendapat banyak dukungan dan juga bantuan dari berbagai pihak, maka dari itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- 1. Kedua orang tua yang penulis sayangi karena selalu mendo'akan dan memberi motivasi selama kuliah dan disaat penulis mengalami kesusahan dalam penulisan skripsi.
- 2. Mas Reza dan Mbak Nina yang sudah memberikan dukungan dan motivasi dikala penulis mengalami kesulitan.
- 3. Bapak Dr.Eng. Moch. Agus Choiron, ST.,MT., dan bapak Dr.Eng Anindito Purnowidodo, ST.,M.Eng., yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penulisan skripsi.
- 4. Teman-teman seperjuangan skripsi yakni Zumratul Ida, Happy Hanifah K, Stefanus Sugiarto, M. Subhan yang saling membantu dalam penyelesaian skripsi.
- 5. Keluarga besar laboratorium komputer yang telah memberikan kenangan dan pembelajaran hidup selama masa perkuliahan.
- 6. Sahabat kos dan ladub.co yang telah memberi dukungan dan hiburan disaat penulis mengalami kebigungan dalam penulisan skripsi.
- 7. Teman-teman PIC KMHE 2015 yang telah memberi kenangan dalam perkuliahan.
- 8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-satu yang telah membantu dan memberi pengarahan dalam penulisan skripsi

Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh karena itu penulis sangat menghargai setiap saran dan masukan untuk kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca sekaligus menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya.

Malang, Juni 2016

Penulis

BRAWIJAYA

i

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix

BAB I PENDAHULUAN SITAS BRA

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Manfaat Penelitian	2

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya	3
2.2. Crash Box	5
2.3. Tegangan dan Regangan	6
2.4. Tekuk (Buckling)	9
2.5. Energi Penyerapan	11
2.6. Pola Deformasi	12
2.6.1. Pola Deformasi Berdasarkan Sumbu	12
2.6.2. Pola Deformasi Berdasarkan Jumlah Sudut	13
2.7. Model Material	14
2.7.1. Material Bilinear Isotropic Hardening	14
2.7.2. Material Johnson-Cook	15
2.8. Quasi-Static Test	16
2.9. Penyelesaian dengan Finite Element Method (Metode Elemen Hingga)	17
2.10. Software Berbasis FEM (Finite Element Method)	20
2.11. Verifikasi dan Validasi Penelitian	21

2.12. Hipotesis	3	22
-----------------	---	----

BAB III METODE

3.1. Metode Penelitian	23
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian	23
3.3. Alat dan Bahan Penelitian	23
3.4. Variabel Penelitian	24
3.5. Data Material dan Dimensi Spesimen	24
3.6. Meshing	26
3.7. Load Setting dan Boundary Condition	27
3.8. Lokasi Pengambilan Data	27
3.9. Procedur Penelitian	28
3.10. Diagram Alir Penelitian	29

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Verifikasi Hasil Simulasi	30
4.2. Pola Deformasi	30
4.3. Energi Penyerapan pada Crash box	36
4.3.1. Energi Penyerapan pada Crash box dengan kecepatan impactor berbeda	38
4.3.2. Energi Penyerapan pada Crash box dengan Model Material berbeda	40
4.4. Grafik Hubungan Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformation dan Energi	
Penyerapan	42

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	х

DAFTAR GAMBAR

No	Judul Hala	aman
Gambar 2.1	Grafik hubungan Impact Velocity terhadap Displacement Crash Box	
	Velmurugan	3
Gambar 2.2	Diagram Besar Sudut Initial Fold Terhadap Energi Penyerapan Pada	
	Variasi Model	4
Gambar 2.3	Grafik Energi Penyerapan pada Crash Box Tarlochan dengan Berbagai	
	Penampang	4
Gambar 2.4	Crash Box dan Frame	5
Gambar 2.5	Tegangan Normal	6
Gambar 2.6	Tegangan Geser	6
Gambar 2.7	Regangan	7
Gambar 2.8	Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan	8
Gambar 2.9	Grafik Tegangan Regangan Pengujian Tekan	9
Gambar 2.1	0 (a) Kolom Dalam Keadaan Aman, (b) Kolom Dalam Kondisi Buckling	10
Gambar 2.1	1 Teori dasar buckling pada crash box	10
Gambar 2.12	2 Pembebanan Aksial Pada Batang	11
Gambar 2.1	3 Grafik Hubungan Load Terhadap Displacement	11
Gambar 2.14	4 Strain Energy	12
Gambar 2.1:	5 Axial Mode	13
Gambar 2.1	6 Bending Mode	13
Gambar 2.1	7 (a) Concertina Mode, (b) Diamond Mode	14
Gambar 2.1	8 Mixed Mode	14
Gambar 2.1	9 Grafik Tegangan-Regangan Material Bilinear Isotropic Hardening	14
Gambar 2.2	0 Alat Uji Quasi-Static	-16
Gambar 2.2	1 (a) Poros, (b) Poros Setelah Didiskretisasi	17
Gambar 2.2	2 (a) Elemen 3 dimensi berbentuk tetrahedral dan hexahedral, (b) Elemen	
	dengan 2 node, (c) Elemen Segitiga dengan 3 node atau 6 node	18
Gambar 3.1	Dimensi Crash Box	26
Gambar 3.2	Meshing	26
Gambar 3.3	Pemodelan Simulasi dengan Software Berbasis Finite Element Method	27
Gambar 3.4	Lokasi Pengambilan Data Deformasi	28
Gambar 3.5	Lokasi Pengambilan Data Force Reaction	28

Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 4.1 Proses deformasi pada Crash box Model IFCB JC15	33
Gambar 4.2 Normal Stress Searah Sumbu x	34
Gambar 4.3 Normal Stress Searah Sumbu y	35
Gambar 4.4 Normal Stress Searah Sumbu z	35
Gambar 4.5 Vector Principal Stress Pada Deformasi Ke-5,75 mm	35
Gambar 4.6 Vector Principal Stress Pada Deformasi Ke-17,25 mm	36
Gambar 4.7 Vector Principal Stress Pada Deformasi Ke-57,5 mm	36
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Force terhadap Deformation	37
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Kecepatan Impactor Terhadap Energi Penyerapan	38
Gambar 4.10 Grafik Hubungan Model Material Terhadap Energi Penyerapan	40
Gambar 4.11 Grafik Tegangan-Regangan Pada Model Material	41
Gambar 4.12 Grafik Hubungan Waktu Pembebanan Terhadap Energi Penyerapan	

dan Pola Deformasi



v



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 3.	1 Variasi Pemodelan Crash Box	
Tabel 3.	2 Material properties crash box	25
Tabel 3.	3 Material Properties Support	25
Tabel 3.	4 Material Properties Impactor	
Tabel 4.	1 Data Validasi Hasil Eksperimental dengan Simulasi	
Tabel 4.	2 Pola Deformasi Crash box 1	31
Tabel 4.	3 Pola Deformasi Crash box 2	32
Tabel 4.	4 Pola Deformasi Crash box 3	33
Tabel 4.	5 Data Energi Penyerapan dan Pmean	

5



BRAWIJAY

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Grafik Tegangan Regangan Material Lampiran 2 *Normal Stress Crash Box* model IFCB B5 Lampiran 3 *Normal Stress Crash Box* model IFCB B10 Lampiran 4 *Normal Stress Crash Box* model IFCB B15 Lampiran 5 *Normal Stress Crash Box* model IFCB JC5 Lampiran 6 *Normal Stress Crash Box* model IFCB JC10 Lampiran 7 *Principel Stress Vector Crash Box* model IFCB B5 Lampiran 8 *Principel Stress Vector Crash Box* model IFCB B10 Lampiran 9 *Principel Stress Vector Crash Box* model IFCB B15 Lampiran 10 *Principel Stress Vector Crash Box* model IFCB B15 Lampiran 10 *Principel Stress Vector Crash Box* model IFCB B15

RINGKASAN

Refqi Kemal Habib, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2016, Analisis Pola Deformasi dan Energi Penyerapan Pada *Crash Box* Menggunakan Metode *Quasi-Static* dengan Variasi Kecepatan Tumbukan dan Model Material, dosen pembimbing: Moch. Agus Choiron dan Anindito Purnowidodo.

Crash box merupakan sitem keamanan pasif yang diletakkan pada ujung rangka kendaraan yang berfungsi menyerap energi yang diakibatkan tabrakan baik dari depan kendaraan atau dari belakang kendaraan. Dalam penelitian ini, peneliti ingin mengetahui pengaruh besarnya kecepatan tumbukan (*crosshead*) dan model material terhadap besarnya penyerapan energi dan pola deformasi dari *crash box* saat dilakukan pengujian *quasi-static* ketika dikenai beban aksial secara simulasi numerik.

Crash box yang digunakan dalam penelitian ini adalah *intial fold tube crash box*. Kecepatan tumbukan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 5 mm/s, 10 mm/s, dan 15 mm/s, sedangkan untuk model material yang digunakan adalah model material *biliniear isotropic hardening* dan model material Johnson-Cook. Metode penelitian yang digunakan adalah simulasi numerik dengan menggunakan *software* berbasis Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM).

Dari penelitian ini, diperoleh hasil bahwa pola deformasi yang terbentuk pada semua model *crash box* baik dengan variasi kecepatan tumbukan atau dengan variasi model material adalah pola deformasi model *axial axysimetric* (Concertina). Dari penelitian ini juga diperoleh hasil bahwa: 1. semakin tinggi kecepatan tumbukan, maka nilai energi penyerapan juga semakin tinggi. 2. Nilai energi penyerapan crash box dengan model material bilinear isotropic harding lebih besar dibandingkan dengan crash box dengan model material Johnson-Cook.

Kata Kunci: *crash box*, *quasi-static*, kecepatan tumbukan, model material, pola deformasi, energi penyerapan.



SUMMARY

Refqi Kemal Habib, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, June 2016, Analysis of Crash Box Deformation Pattern and Energy Absorption Using Quasi-Static Method with Various Impactor Velocity and Material Models, Advisors: Moch. Agus Choiron and Anindito Purnowidodo.

Crash box is a passive safety system that placed on the end of the vehicle frame which aims to absorb the energy resulted from the vehicles collision. In this study, researcher wanted to know the influence of collision speed (impactor) and material models to the amount of energy absorption and deformation pattern of the crash box when testing using quasi-static method with axial load in numerical simulation.

Crash Box used in this study is Intial fold tube crash box. 5 mm / s, 10 mm / s and 15 mm / s of collision speed was used and isotropic hardening material model biliniear and Johnson-Cook material model was used. The Method used in this study is a numerical simulation using software based on the Finite Element Method or the Finite Element Method (FEM).

From this study, we got a result that deformation pattern of all crash box models either with variation of speed collision or with variation of material models are axysimetric deformation pattern (Concertina). From this study also we get a result that: 1. If collision speed increase, then the amount of energy absorption will increase too. 2. Crash box with biliniear isotropic hardening material model has a bigger energy absorption than crash box with johnson-cook material models.

Keywords: crash box, quasi-static, collision speed, material models, deformation pattern, energy absorption.



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Crash box merupakan sitem keamanan pasif yang diletakkan pada ujung rangka kendaraan yang berfungsi menyerap energi yang diakibatkan tabrakan baik dari depan kendaraan atau dari belakang kendaraan. *Crash box* ini diharapkan terderformasi terlebih dahulu karena menyerap energi *impact* sehingga energi *impact* yang akan diterima oleh penumpang atau pengemudi sudah diminimalisir.

Crash box sebagai sistem keamanan pasif pada kendaraan memiliki jenis yang beragam diantaranya *crash box* berbentuk tabung dengan penampang lingkaran (*circular tubes*) atau penampang persegi (*square tubes*), *crash box* berbentuk *corrugated tubes*, *crash box multicorner columns*, *crash box* frusta, *crash box struts*, *crash box honeycomb cells*, *crash box sandwich plates*, dll. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Velmurugan dkk (2009), energi penyerapan spesifik untuk tabung dengan penampang lingkaran (*circular*) lebih tinggi daripada tabung dengan penampang persegi (*square*) dan persegi panjang (*rectangular*).

Metode pengujian crash box ada banyak macamnya seperti *high-velocity impact*, *dynamic-high, dynamic-low, quasi static*, dll. Metode pengujian ini dibedakan berdasarkan nilai *strain rate*-nya atau dalam kata lain jika dilakukan pengujian pada *crash box* dengan dimensi yang sama, maka yang membedakannya adalah kecepatan pengujiannya. Untuk metode pengujian *quasi static*, pengujiannya dilakukan pada kisaran *strain rate* 10⁻⁴/s hingga 10⁰/s (Lu dan Yu, 2003, p.86). Velmurugan dkk (2009) melakukan penelitian eksperimental menggunakan metode *dynamic test (drop hammer)* pada *crash box* dengan memvariasikan kecepatan tumbukan. Kecepatan tumbukan yang digunakan sebesar 7 m/s, 7,67 m/s, dan 8,28 m/s. Dari penelitian ini diperoleh bahwa semakin tinggi kecepatan tumbukan maka nilai energi penyerapan spesifik *crash box* akan semakin tinggi.

Dengan perkembangan teknologi yang semakin maju, simulasi numerik dapat digunakan untuk memprediksi besarnya energi penyerapan dan pola deformasi dari *crash box* sebelum dilakukan penelitian secara eksperimental. Simulasi numerik bertujuan mengurangi *trial and error* pada penelitian eksperimental, sehingga dapat mengurangi biaya. Dalam penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan metode *quasi-static*, belum

pernah dilakukan penelitian dengan memvariasikan kecepatan tumbukan dan dalam simulasi numerik, banyak macam model material yang digunakan untuk mendiskripsikan kekuatan dari material. Pemilihan model material ini akan mempengaruhi hasil akhir dari simulasi numerik yang dilakukan khususnya pada hasil tegangan, reganngan, dan *displacement* (Ruggiero dkk, 2014). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh kecepatan tumbukan dan model material terhadap pola deformasi dan energi penyerapan saat dilakukan pengujian dengan metode *quasi-static*.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut: Bagaimanakah pengaruh besarnya kecepatan tumbukan (*crosshead*) dan model material terhadap besarnya energi penyerapan dan pola deformasi dari *intial fold tube crash box* saat dilakukan pengujian *quasi static* ketika dikenai beban aksial secara simulasi numerik.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang penulis tentukan dalam penelitian ini adalah:

- 1. Crash box yang diteliti adalah jenis *initial fold crash box* berpenampang lingkaran (*circular tube*).
- 2. Pengujian dilakukan dengan pengujian quasi static.
- 3. Software simulasi yang digunakan adalah *software* simulasi berbasis FEM (*finite element method*).

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh besarnya kecepatan tumbukan (*crosshead*) dan model material terhadap besarnya energi penyerapan dan pola deformasi dari *intial fold tube crash box* saat dilakukan pengujian *quasi static* ketika dikenai beban aksial secara simulasi numerik.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah

- 1. Mengurangi *trial and error* saat akan dilakukan penelitian eksperimental sehingga dapat mengurangi biaya penelitian.
- 2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya khususnya untuk penelitian *crash box* jenis *initial fold crash box* dengan metode uji *quasi static*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

Velmurugan dkk (2009) telah melakukan penelitian eksperimental *crash box* satu segmen dengan variasi bentuk penampang dan kecepatan tumbukan untuk memperoleh karakteristik pola deformasi dan energi penyerapan. Pengujiannya dilakukan dengan pembebanan secara statik dan dinamik. Bentuk penampang *crash box* yang diuji adalah lingkaran, persegi, dan persegi panjang. Dari pengujian ini baik secara statik dan dinamik diperoleh hasil bahwa *crash box* dengan penampang lingkaran memiliki *specific energy absorbtion* yang lebih besar dibandingkan dengan *crash box* dengan penampang persegi atau persegi panjang dan semakin tingginya kecepatan tumbukan maka akan meningkatkan nilai *spesific energy absorption*. Hasil penelitian velmurugan dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Grafik hubungan *Impact Velocity* terhadap *Displacement Crash Box* Velmurugan Sumber : Velmurugan (2009 : 395)

Ilman (2015) telah melakukan penelitian eksperimental semu pada *initial fold crash box* dengan variasi sudut *initial fold* dan rasio peletakan *initial fold*. Besar sudut *initial fold* adalah 45°, 60°, dan 90°, sedangkan rasio peletakan *initial fold* (segmen atas : segmen bawah) adalah 1:1, 1:2, dan 2:1. Model material yang dipakai adalah model material *bilinear isotropic hardening*. Penelitian memperoleh hasil bahwa *initial fold crash box* dengan sudut

initial fold 90° dengan rasio peletakan *initial fold* 1:1 memiliki energi penyerapan yang paling besar. Hasil Penelitian yang dilakukan Ilman dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram Besar Sudut *Initial Fold* Terhadap Energi Penyerapan Pada Variasi Model Sumber: Ilman (2015)

Tarlochan dkk (2013) telah melakukan penelitian eksperimental semu karakteristik *energi penyerapan* pada struktur berdinding tipis dengan material baja A36 dengan model material Johnson-Cook yang mengalami beban impak aksial dan miring dengan berbagai macam penampang diantaranya lingkaran, persegi, segi enam (*hexagonal*), segi delapan (*octagonal*) dan *elips*. Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa struktur dengan penampang segi enam memiliki kemampuan *energi penyerapan* tertinggi. Hasil penelitian Tarlochan dkk dapat dilihat pada gambar 2.3.





Jandaghi dan Marzbanrad (2012) telah melakukan penelitian *energi penyerapan* pada *thin-walled tailor-made aluminum tubes* dan *simple tube* dengan metode *quasi-static*. *Thin-walled tailor-made aluminum tubes* diberi beban aksial dengan kecepatan *compression platen* sebesar 5 mm/min. Hasil menunjukkan bahwa *Thin-walled tailor-made aluminum tubes* memiliki *energy absorption* lebih besar dibandingkan dengan *simple tube*.

2.2. Crash Box

Crash box merupakan sitem keamanan pasif yang diletakkan pada ujung rangka (*frame*) depan atau rangka (*frame*) belakang kendaraan seperti pada gambar 2.4. *Crash box* berfungsi menyerap energi yang diakibatkan tabrakan baik dari depan kendaraan atau dari belakang kendaraan. *Crash box* ini diharapkan terderformasi terlebih dahulu karena menyerap energi *impact* sehingga energi *impact* yang akan diterima oleh penumpang atau pengemudi sudah diminimalisir.



Gambar 2.4 *Crash Box* dan *Frame* Sumber : Sumitomo (2005 : 5)

Ketika terjadi tabrakan, *crash box* akan menyerap energi yang diakibatkan tabrakan tersebut melalui deformasi plastis dengan menurunkan gaya maksimalnya untuk didistribusikan secara merata sehingga meminimalisir energi *impact* yang akan diterima oleh penumpang atau pengemudi. Kriteria yang harus dipenuhi *crash box* untuk mendapatkan keamanan yang optimal antara lain :

- 1. *Crash box* harus mudah diproduksi dan mudah dalam penggantiannya karena c*rash box* merupakan salah satu komponen yang sekali pakai.
- 2. Energi *impact* akibat tabrakan, harus sebesar mungkin bisa didistribusikan ke bagian lain dan diubah menjadi deformasi plastis.
- 3. Dimensi *crash box* harus optimal yaitu dengan panjang atau lebar maksimal tetapi tidak terlalu menempati banyak ruang pada bagian depan atau belakang kendaraan.

2.3. Tegangan dan Regangan

Tegangan (*stress*) dapat didefinisikan sebagai besarnya gaya yang terdistribusi pada setiap satuan luas penampang (*cross section*). Secara umum tegangan dibagi menjadi dua yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal adalah tegangan yang disebabkan oleh gaya yang bekerja tegak lurus terhadap luas permukaan benda seperti pada Gambar 2.5.

BRAWIJAL

Gambar 2.5 Tegangan Normal Sumber : Beer (2012 : 5)

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (2-1)$$

Keterangan :

- = tegangan normal (N/m^2)
- P =gaya normal (N)
- A = luas permukaan gaya bekerja (m²)

Sedangkan tegangan geser adalah tegangan yang disebabkan oleh gaya yang bekerja searah dengan luas permukaan benda. Tegangan geser dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Tegangan Geser Sumber: Beer (2012: 10)

$$\tau = \frac{F_S}{A} \qquad (2-2)$$

Dengan :

- = Tegangan geser (N/m^2)
- $F_s = Gaya \text{ geser } (N)$
- A = Luas permukaan benda dimana gaya bekerja (m^2)

Bila suatu benda diberi gaya maka akan terjadi tegangan pada elemen-elemen benda tersebut. Tegangan yang terjadi dapat menimbulkan regangan. Regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang mula-mula suatu benda. Regangan pada suatu batang dapat dilihat pada Gambar 2.7.

L

(a)

(b)

Gambar 2.7 Regangan Sumber : Beer (2012 : 66)

Regangan dirumuskan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \tag{2-3}$$

Keterangan :

- = regangan
- = perubahan panjang (m)
- $L_0 = \text{panjang awal (m)}$

Perbandingan antara tegangan dan regangan disebut modulus elastisitas (E) atau Modulus Young. Modulus elastisitas ini berlaku pada garis lurus sebelum batas proporsional atau berlaku pada daerah elastis material saja. Hubungan antara tegangan dan regangan dapat dilihat pada kurva tegangan dan regangan seperti pada Gambar 2.8.

RAWIUAL





Sehingga dapat ditulis rumusan untuk modulus elastisitas sebagai berikut:

$$E = \frac{\sigma}{r} \qquad (2-4)$$

Keterangan:

- E = Modulus Elastisitas (MPa)
- σ = Tegangan (MPa)

 ε = Regangan (%)

Material yang mengalami pembebanan secara aksial akan mengalami regangan searah maupun tegak lurus arah pembebanan. Konstanta yang menyatakan hubungan regangan yang tegak lurus dengan arah pembebanan (*lateral*) dengan regangan yang sejajar dengan arah gaya (aksial) disebut *Poisson's ratio*.

$$v = -\frac{regangan\, lateral}{regangan\, aksial} \tag{2-5}$$

Kurva tegangan pada gambar 2.8 merupakan grafik hubungan tegangan dan regangan yang umum untuk material dengan pengujian tarik. Sedangkan untuk pengujian tekan memiliki grafik tegangan-regangan yang berbeda dari grafik tegangan-regangan pengujian tarik, namun pada logam-logam liat seperti baja, aluminium dan tembaga memiliki bentuk grafik hampir sama seperti pada pengujian tarik. Oleh karena itu, daerah permulaan dari grafik tegangan dan regangan dalam keadaan tekan pada logam-logam tersebut mirip sekali dengan grafik dalam keadaan tarik. Tetapi, ketika mulai terjadi pelelehan, maka sifatnya akan sangat berbeda. Dalam uji tarik, bahan ditarik sehingga terjadi peregangan yang menyebabkan kontraksi luas dan pada akhirnya terjadi patahan. Apabila suatu bahan ditekan, maka bagian samping dari bahan akan mengembang ke luar. Dengan penambahan beban secara terus menerus maka bahan tersebut akan menjadi rata, sehingga secara tidak langsung bahan tersbeut memberikan perlawanan terhadap pemendekan bahan (menyebabkan kurva yang terbentuk non linier mengarah ke atas. Gambar 2.10). Bahan-bahan yang mengalami uji tekan memiliki daerah awal yang linier kemudian diikuti dengan terjadinya pemendekan akibat beban yang terus ditambahkan. Biasanya, suatu bahan memiliki tegangan batas tekan yang lebih tinggi daripada dalam keadaan tarik.



Gambar 2.9 Grafik Tegangan Regangan Pengujian Tekan Sumber : Gere (2004 : 20)

2.4. Tekuk (Buckling)

Misalkan kita akan merancang sebuah kolom AB dengan panjang L dan diberi beban P (Gambar 2.10a). Kolom dihubungkan dengan pin pada kedua ujungnya dan beban P dianggap *centric axial load*. Jika penampang kolom A maka nilai $\sigma = P/A$. Jika nilai σ kurang dari tegangan ijin, maka struktur didesain dengan baik. Namun, jika nilai σ lebih dari tegangan ijin, maka kolom akan mengalami buckling atau kolom akan melengkung (Gambar 2.10b).



Gambar 2.10 (a) Kolom Dalam Keadaan Aman, (b) Kolom Dalam Kondisi *Buckling* Sumber: Beer (2012: 635)

Crash box merupakan sebuah komponen yang memiliki cara kerja menyerap energi kinetik dan mengubahnya menjadi deformasi plastis dengan membentuk tekukan-tekukan yang disebut *buckling*, sehingga dengan adanya *buckling* pada *crash box* tersebut energi kinetik akibat tabrakan diminimalisir sehingga energi tidak tersalurkan sampai ke penumpang.



Gambar 2.11 Teori dasar *buckling* pada *crash box* Sumber : Gere (2003: 765)

Struktur kolom yang ideal saat diberi beban aksial akan memberikan tiga perilaku (Gambar 2.11) yaitu :

- Jika $P > P_{cr}$, maka struktur kolom dalam kondisi setimbang yang tidak stabil sehingga terjadi *buckling*.
- Jika $P=P_{cr}$, maka struktur kolom dalam kondisi setimbang baik dalam posisi sedikit membengkok atau posisi tegak.
- Jika $P < P_{cr}$, maka struktur kolom dalam keadaan stabil dan setimbang dengan posisi tegak lurus.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{4L^2}$$
 (2-6)

Dengan:

 P_{cr} = Beban kritis (N)

E = Modulus Elastisitas (Pa)

I = Momen inersia penampang (m⁴)

2.5. Energi Penyerapan

Gambar 2.12 Pembebanan Aksial Pada Batang Sumber : Beer (2012 : 694)

Gambar 2.12 menunjukkan batang BC mempunyai luas penampang A dan panjang L dengan tumpuan jepit dan diberi pembebanan aksial P. Apabila pembebanan aksial dilakukan selama waktu tertentu maka hubungan antara beban dan deformasi pada batang digambarkan dalam grafik hubungan *load* terhadap *displacement* seperti Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Grafik Hubungan *Load* Terhadap *Displacement* Sumber : Beer (2012 : 695)

Deformasi plastis yang terjadi akibat tumbukan antara *compression platen* dan *crash box* terjadi karena adanya usaha (*work*) yang dilakukan oleh *compression platen*. Usaha (*work*) ini kemudian diubah menjadi energi regangan dengan mengabaikan perubahan energi

ke bentuk lainnya. Besarnya energi regangan diperoleh berdasarkan luasan di bawah kurva pada grafik hubungan *load* terhadap *displacement* yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.

Besarnya energi regangan (dU) pada deformasi yang kecil (dx) akibat beban P dapat dirumuskan sebagai berikut :

W = dU = P dx (Beer, 2012 : 695) (2-7)

sehingga total energi regangan yang terjadi pada luasan di bawah kurva *load-displacement* antara titik 0 sampai x₁ dapat dituliskan dalam persamaan :

 $W = U = {x_1 \over 0} P dx$ (Beer, 2012 : 695) (2-8)



Gambar 2.14 *Strain Energy* Sumber : Beer (2012 : 695)

Keterangan :

- W =Usaha (*work*)
- U = energi regangan (J)
- P = beban (N)
- x = perpindahan (m)

2.6. Pola Deformasi

2.6.1. Pola Deformasi Berdasarkan Sumbu

Ada dua pertimbangan utama dalam desain struktur otomotif untuk manajemen energi kecelakaan yaitu *energi penyerapan* kinetik kendaraan dan kekuatan untuk mempertahankan bentuk akibat tumbukan dan / atau menjaga penumpang agar tetap aman dan selamat. Untuk *energi penyerapan*, terdapat dua mekanisme dasar untuk mendeformasi *crash box* yaitu *axial* dan *bending mode*. *Axial mode* dapat terjadi pada kondisi tumbukan *frontal/rear* atau tumbukan dengan sudut antara 5°-10°. Jenis *axial mode* ditunjukkan Gambar 2.15.



Gambar 2.15 *Axial Mode* Sumber : Paul (2004 : 42)

Bending mode melibatkan mekanisme pembentukan sendi lokal dengan energi yang lebih rendah. Struktur *front-end* akan selalu memiliki kecenderungan untuk terdeformasi pada sendinya. Bahkan struktur yang dirancang untuk terdeformasi secara aksial akan gagal, kecuali aturan yang sangat spesifik diikuti untuk meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap sudut pembebanan. Mekanisme *bending mode* ditunjukkan Gambar 2.16.

Gambar 2.16 *Bending Mode* Sumber : Paul (2004 : 43)

Pola deformasi yang diharapkan terjadi pada saat *crash box* mengalami beban *impact* adalah *axial mode*, karena energi yang diserap oleh *crash box* akan semakin besar. Han (1999) melakukan penelitian pola deformasi struktur berdinding tipis yang mengalami beban *impact* miring menunjukkan bahwa *bending mode* mendominasi pola deformasi yang terjadi pada *crash box* bila sudut kemiringan beban lebih dari 8° dan besar energi yang diserap *crash box* berkurang sampai 40 % dari *crash box* yang terdeformasi secara aksial.

2.6.2. Pola Deformasi Berdasarkan Jumlah Sudut

Crash box dengan penampang lingkaran ketika diberi pembebanan aksial mempunyai tiga *mode* kegagalan yang mampu mempengaruhi kapasitas *energi penyerapan*, yaitu *concertina (axisymmetric), diamond*, atau *mixed mode (axisymmetric-diamond)*. Pada *concertina mode*, lipatan dengan bentuk simetris akan terbentuk, sedangkan pada *diamond mode* mempunyai lipatan dengan bentuk yang tidak simetris yang mengakibatkan terbentuknya sudut berjumlah-n. *Mixed mode* mempunyai bentuk gabungan antara dua

mode, biasanya didahului dengan lipatan *axisymmetric* selanjutnya *diamond mode*. Ketiga jenis *mode* dapat dilihat pada Gambar 2.17 dan 2.18.



2

2 Axisymmetric Folds

> Diamond Folds

Gambar 2.17 (a) *Concertina Mode*, (b) *Diamond Mode* Sumber : Toksoy (2009 : 33)

Gambar 2.18 *Mixed Mode* Sumber : Toksoy (2009 : 33)

2.7. Model Material

2.7.1. Model Material Bilinear Isotropic Hardening

Model material *bilinear isotropic hardening* merupakan sebuah pemodelan material yang mana memiliki 2 buah garis linier yakni pada daerah elastis dan daerah plastik; mengalami peningkatan nilai tegangan jika diberikan regangan secara terus menerus namun tidak terjadi pergeseran titik *yield*. Dalam model material *bilinear isotropic hardening*, dibutuhkan dua nilai yang harus diketahui, yaitu *yield strength* dan *tangent modulus*. *Yield strenght* adalah nilai di mana tegangan plastik mulai terjadi, sedangkan *tangent modulus* adalah kemiringan kurva tegangan-regangan setelah *yield strength*. Grafik tegangan-regangan untuk material *bilinear isotropic hardening* dapat dilihat pada gambar 2.19.





Untuk menghitung tangent modulus dapat menggunakan rumus berikut:

 $\sigma_{eq} = E_T \times \frac{\varepsilon}{100} - \varepsilon_{yield} + \sigma_{yield}$ (2-9) $\sigma_{yield} = E \times \varepsilon_{yield}$ (2-10)

dimana:

$$E_T = tangent modulus (Pa)$$

$$\varepsilon_{yield} = yield strain$$

$$E = modulus elastisitas (Pa)$$

$$\sigma_{yield} = yield strenght (Pa)$$

$$\varepsilon = equivalent strain$$

2.7.2. Model Material Johnson-Cook

Model ini dikembangkan oleh Gordon Johnson dan William Cook. Model ini memperhitungkan *strain hardening*, laju regangan *(strain rate)*, dan pelunakan termal *(thermal softening)* (Johnson dan Cook, 1984: 5). Model material Johson-Cook dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_{eq} = A + B \varepsilon^{N} 1 + C \ln \varepsilon^{*} 1 - \frac{T - T_{0}}{T_{melt} - T_{0}}^{M}$$
(2-11)

dimana:

 $\sigma_{eq} = equivalent stress (Pa)$

A = yield stress constant (Pa)

B = hardening constant (Pa)

 ε = equivalent strain

C = strain rate constant

N = hardening exponent

 $M = thermal \ softening \ exponent$ $\varepsilon^* = plastic \ strain \ rate = \frac{Strain \ Rate \ uji}{Reference \ Strain \ Rate}$ $T_{melt} = temperatur \ leleh \ material \ (K)$ $T_0 = temperatur \ ruang \ (K)$ $T = temperatur \ uji$

2.8. Quasi-Static Test

Quasi-Static Test dapat digunakan untuk menguji kekuatan *crash box*. Dalam *Quasi-Static Test*, beban dan / atau *displacement* diterapkan pada kecepatan yang konstan dan lambat serta laju regangannya juga sangat rendah. Yang membedakannya dengan *dynamic test* adalah pada *dynamic test* diberikan beban dinamis, pemberian bebannya diterapkan pada kecepatan yang tinggi sehingga dapat menyebabkan struktur bergetar dan gaya inersia cukup besar. Prosedur pengujiannya dengan cara *crash box* diletakkan di dasar mesin uji dengan tumpuan baja dan kemudian diberi beban kompresi dengan kecepatan konstan dengan strain rate sekitar 0.001 - 1.0s⁻¹ (Bardelcik dan Worswick). Alat uji quasi-static dapat dilihat pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Alat Uji Quasi-Static Sumber: Jandaghi dan Marzbanrad (2012)

Kecepatan yang lambat pada saat tes memiliki keuntungan yaitu memberikan gambaran mengenai perilaku struktur setelah terjadinya tegangan yield. Biasanya, tes ini dilakukan untuk mempelajari kinerja struktural suatu struktur dan bidang struktural lain seperti tingkat propagasi retak, *hierarchy of collapse* dan tingkat kerusakan suatu struktur, dll.

2.9. Penyelesaian dengan *Finite Element Method* (Metode Elemen Hingga)

Metode elemen hingga atau *Finite Element Method* merupakan suatu metode numerik dengan cara membagi suatu elemen besar atau struktur yang tak hingga menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga. Analisa dengan metode elemen hingga atau *Finite Element Method* dilakukan untuk mendapatkan nilai pendekatan bukan nilai sebenarnya.

Ada dua pendekatan langsung yang digunakan untuk menyelesaikan persoalanpersoalan mekanika struktur dengan metode elemen hingga. Pendekatan pertama adalah metode perpindahan atau kekakuan. Metode ini mengasumsikan perpindahan pada node sebagai harga yang tidak diketahui dan selanjutnya dipecahkan. Metode yang kedua adalah metode gaya atau fleksibelitas. Metode ini menggunakan gaya internal sebagai harga yang tidak diketahui dan selanjutnya dipecahkan. Dari kedua metode ini, metode kekakuan atau perpindahan banyak digunakan, karena formulasinya lebih sederhana untuk analisa struktur.

Prosedur umum untuk melakukan perhitungan dengan metode elemen hingga dengan metode perpindahan atau kekakuan adalah sebagai berikut:

1. Diskretisasi dan pemilihan jenis elemen

Diskretisasi merupsksn proses membagi suatu elemen besar atau struktur yang tak hingga menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga. Elemen-elemen ini berhubungan dengan titik-titik simpul atau node membentuk rangkaian secara bersama dan keseluruhan mendekati bentuk struktur sebenarnya. Di dalam pendiskritan ini, memungkinkan ukuran elemen berbeda sesuai dengan kondisi geometri dari suatu struktur. Gambar 2.21 merupakan contoh dari diskritisasi dari suatu bodi dengan elemen. Gambar 2.21a merupakan suatu bodi poros yang belum didiskritisasi, dan Gambar 2.21b menunjukkan diskritisasi dari bodi poros.



Gambar 2.21 (a) Poros, (b) Poros Setelah Didiskretisasi Sumber: Choiron dkk (2014, 7)

Pemilihan jenis suatu elemen dan dimensi (satu, dua, atau tiga dimensi) pada saat melakukan analisis dengan metode elemen hingga tergantung dari beberapa faktor misalnya, kondisi pembebanan. Pemilihan ini harus dilakukan dengan tepat oleh seorang analisis sehingga hasilnya mendekati nilai sebenarnya. Di samping itu, sering dijumpai untuk suatu kasus tertentu dimana ada jenis elemen yang paling sesuai untuk menyelesaikan suatu kasus tersebut. Yang dimaksud sesuai disini adalah efektifitas yang berkenaan dengan pemrograman pada komputer, efisiensi, dan keakurasian hasil. Gambar 2.22 berikut menunjukkan contoh dari beberapa jenis elemen. Gambar 2.22a adalah menunjukkan contoh elemen 3 dimensi berbentuk tetrhedral dan hexahedral. Gambar 2.22b adalah elemen dengan dua node yang digunakan untuk merepresntasikan beam atau batang. Elemen jenis ini biasa digunakan untuk menganalisa komponen dalam bentuk bidang. Gambar 2.21c elemen dua dimensi yang mana node terletak pada masing-masing sudutnya atau dapat juga terdapat node tambahan diantara sudut-sudutnya.



Gambar 2.22 (a) Elemen 3 dimensi berbentuk tetrahedral dan hexahedral, (b) Elemen dengan 2 node, (c) Elemen Segitiga dengan 3 node atau 6 node Sumber: Choiron dkk (2014, 8)

2. Mendefinisikan Fungsi Perpindahan

Pada langkah ini kita mendifinisikan harga perpindahan dari tiap-tiap node dan jenis fungsinya tergantung dari jumlah node yang digunakan di dalam elemen. Jenis fungsi yang sering digunakan adalah kwadratik, fungsi linier, dan kubik polynomial. Jenis fungsi tersebut sering digunakan karena sederhana untuk memformulasikan elemen .

Mendefinisikan Hubungan Antara Tegangan dengan Regangan dan Regangan dengan Perpindahan

Hubungan tegangan dengan regangan dan regangan dengan perpindahan sangatlah penting untuk menurunkan tiap-tiap rumus elemen hingga. Untuk kasus deformasi elastis (kecil) pada satu dimensi, misalnya, pada arah x dengan perpindahan u, dinyatakan dengan regangan ε_x , sebagai berikut:

$$\mathcal{E}_{x} = \frac{du'}{dx'} = \frac{d'_{2x} - d'_{1x}}{L}$$
(2-12)

selanjutnya hubungan tegangan dan regangan dapat dinyatakan sesuai dengan hukum Hook, yang ditunjukkan pada rumus 1-6, yang mana σ_x menyatakan tegangan ke arah sumbu x dan E adalah modulus elastisitas.

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \qquad (2-13)$$

4. Menurunkan Rumus Matriks Kekakuan Elemen

Ada beberapa metode untuk menurunkan rumus kekakuan suatu elemen, yaitu yang pertama adalah metode *Direct Equilibrium Method*. Menurut metode ini, kekakuan matrik dan rumus elemen yang berhubungan dengan gaya dan perpindahan pada node diperoleh dengan menggunakan kondisi kesetimbangan gaya (lihat rumus 2-14). Karena rumus ini sederhana dan mudah, maka digunakan untuk menurunkan matrik kekakuan untuk elemen-elemen garis atau satu dimensi, misalanya untuk elemen pegas atau batang.

$$k' = \frac{AE}{L} \begin{cases} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{cases}$$
(2-14)

5. Menggabungkan Rumus Elemen Untuk Mendapat Rumus Global Dan Menentukan Kondisi Batas

Pada langkah ini, rumus untuk satu elemen yang diturunkan pada langkah 4, digabung menjadi rumus global. Rumus global ini mencakup seluruh node yang ada pada suatu bodi.

6. Menyelesaikan Derajat Kebebasan Yang Tidak Diketahui

Rumus 2-15 menunjukkan matriks kekakuan global dengan jumlah derajat kebebasan sebanyak n. Di sini kita mencari harga-harga d yang tidak diketahui, dan menentukan harga d sebagai kondisi batas. Contoh kondisi batas, misalnya pada suatu node dimodelkan jenis tumpuan jepit, maka nilai perpindahan pada node tersebut ke arah sumbu x, y, z mempunyai harga nol. Sehingga kita bisa menentukan harga d pada node tersebut. Untuk mencari harga d yang tidak diketahui kita bisa menggunakan beberapa metode eleiminasi seperti metode eliminasi *Gauss*, atau iterasi *Gauss-Seidel*. Untuk menyelsaikan jumlah node yang banyak atau dimensi matrik yang besar maka penyelesain menggunakan program komputer lebih efektif.

7. Menghitung Nilai Tegangan Dan Regangan Pada Elemen

Setelah dapat mengetahui harga-harga perpindahan pada masing masing node pada langkah ke 6, maka selanjutnya harga tegangan dan regangan dapat diketahui.

8. Menginterprestasikan Hasil

Pada langkah ini kita bisa melakukan analisa hasil pada model untuk menentukan dimana terjadi tegangan atau regangan yang terbesar pada model. Dari sini kita bisa mengambil keputusan misalnya, bahwa suatu struktur mempunyai kekuatan atau tidak karena kondisi suatu pembebanan tertentu.

2.10. Software Berbasis FEM (Finite Element Method)

Software yang berbasis *Finite Element Method* (FEM) mempunyai kelebihan yaitu kemampuan untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, mampu bekerja dengan elemen lebih banyak dan menghasilkan *output* dengan ketelitian tinggi, juga dapat digunakan untuk menganalisis antara lain : struktural, termal, elektromagnetik, dan fluida.

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan *software* berbasis FEM dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. *Preprocessing* (proses awal)

Tahap-tahap penting dalam preprocessing :

- *Material properties : input* data material yang digunakan.
- Pemodelan geometri : dilakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D.
- Pemilihan tipe elemen : digunakan untuk mendiskritisasikan model
- *Meshing* : pembagian struktur menjadi elemen hingga.
- Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (analysis type).
- Memasukkan kondisi batas (constraint).
- Menerapkan pembebanan.
- 2. Solution (proses solusi)

Tahap-tahap dalam solution adalah :

- Penyelesaian (*solving*).
- BRAWIN 3. General postprocessing (proses pembacaan hasil)
 - Plot result

Dengan menggunakan contour plot akan tampak distribusi tegangan atau variabel lainnya pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang disajikan. Model digambarkan dengan sebaran warna yang menunjukkan nilai besaran yang terjadi.

• List result

Hasil analisis dalam bentuk *list result* berupa tabel yang memberikan informasi secara detail mengenai perpindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

Animation

Hasil analisis yang diperoleh juga ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi).

2.11. Verifikasi dan Validasi Penelitian

Verifikasi dan validasi merupakan suatu hal yang sangat berbeda. Definisi verifikasi dalam standar SNI ISO 9000:2008 yakni sebuah konfirmasi, melalui penyediaan bukti obyektif dan persyaratan yang ditentukan telah dipenuhi. Untuk definisi dalam standar SNI ISO 9000:2008 yakni sebuah konfirmasi, melalui penyediaan bukti obyektif dan persyaratan bagi pemakaian atau aplikasi dimaksud telah dipenuhi.

Dari pengertian di atas, dapat kita ketahui bahwa verifikasi dan validasi merupakan sebuah konfirmasi dengan cara menyediakan bukti yang objektif untuk membuktikan penelitian kita memiliki hasil yang valid, namun yang membedakan verifikasi dan validasi

yakni pada validasi terdapat sebuah proses pengujian untuk mendapatkan bukti yang objektif.

2.12. Hipotesis

22

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, maka diperoleh hipotesis sebagai berikut: semakin meningkatnya kecepatan tumbukan maka akan meningkatkan energi penyerapan dikarenakan dengan meningkatnya kecepatan tumbukan, nilai *mean load* juga meningkat dan bentuk pola deformasi yang terbentuk adalah *axial mode* dengan tipe *axisymmetric* (*Concertina*).
3.1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah simulasi numerik dengan menggunakan software berbasis Metode Elemen Hingga atau Finite Element Method (FEM). Mula-mula peneliti mencari informasi data-data seperti material properties dan geometri spesimen dari jurnal dan buku. Kemudian dilakukan pemodelan dan simulasi numerik menggunakan software berbasis FEM pada model-model crash box yang sudah ditentukan pada tabel 3.1 dan diperoleh output berupa data waktu tumbukan, force / gaya, dan deformasi. Kemudian output tersebut diolah menggunakan software pengolah angka untuk dijadikan grafik. Grafik yang dibuat adalah grafik hubungan antara deformasi terhadap force / gaya. Setelah itu, dihitung luasan di bawah kurva grafik deformasi – force / gaya dengan menggunakan metode trapezoidal rule untuk memperoleh besar energi penyerapan pada crash box. Untuk memperoleh hasil pola deformasi, dilakukan pengamatan visual dari hasil deformasi crash box dan disebutkan jenis deformasi yang terjadi dari setiap model crash box.

3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium komputer jurusan teknik mesin fakultas teknik universitas brawijaya malang pada bulan 4 April – 20 mei 2016

3.3. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah *initial fold crash box* yang divariasikan seperti pada tabel 3.1 dan *crosshead* yang dimodelkan dengan bantuan *design* modeler, sedangkan alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah software berbasis *finite element method* dan komputer dengan spesifikasi sebagai berikut:

- *Processor* : AMD FXTM 6300 six cores processor @ 3.50 GHz
- RAM : 8 GB
- Sistem Operasi : Microsoft[®] Windows 7 Ultimate

3.4. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian antara lain :

a. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang nilainya ditentukan oleh peneliti. Nilainya dapat diubah untuk mendapatkan nilai varibel terikat dari objek penelitian sehingga dapat diperoleh hubungan antara variabel bebas dan terikat. Varibel bebas dari penelitian ini adalah besar kecepatan *crosshead* dan model material.

Model Material	Kecepatan Crosshead		
Model Materia	5 mm/s	10 mm/s	15 mm/s
Bilinear Isotropic Hardening	IFCB B5	IFCB B10	IFCB B15
Johnson-Cook	IFCB J5	IFCB J10	IFCB J15

Tabel 3.1 Variasi Pemodelan Crash Box

b. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh varibel bebas dan diperoleh setelah dilakukan penelitian. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel terikat adalah *force reaction*, *displacement*, dan pola deformasi pada *crash box*.

c. Variabel Terkontrol

Varibel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian, antara lain :

- Ketebalan *crash box* sebesar 1,6 mm.
- Crash box yang digunakan adalah *initial fold crash box*: Segmen 1 (bagian atas) sebesar 74,88 mm dan segmen 2 (bagian bawah) sebesar 97,34 mm
- Crosshead yang digunakan adalah seberat 103 kg.

3.5. Data Material dan Dimensi Spesimen

Dalam penelitian ini, *crash box* ditumpu oleh sebuah plat yang selanjutnya disebut *support* dan di tekan oleh *crosshead*. *Crosshead* ini memiliki berat sebesar 103 kg. *Crosshead* ini akan menekan *crash box* dengan kecepatan yang telah ditentukan pada tabel 3.1 hingga *crash box* terdeformasi. *Crash box* yang digunakan dalam penelitian adalah *crash box* dengan *initial fold* dengan sudut antar segmen 90° dan rasio panjang antar segmen 1:1. Dimensi *crash box* dapat dilihat pada gambar 3.1.

Material *crash box* yang digunakan dalam penelitian ini adalah A36 *Steel* dengan properties material seperti yang di sebutkan di tabel 3.2. Untuk *support*, material propertiesnya seperti yang ada pada tabel 3.3, sedangkan untuk *crosshead*, material propertiesnya seperti yang ada pada tabel 3.4.

A36 Steel	
Density ()	7850 kg/m ³
Modulus Young (E)	200 GPa
Poisson's Ratio (v)	0,2619
Yield Stress Constant (A)	146,7 MPa
Hardening Constant (B)	896,9 MPa
Hardening Exponent (N)	0,320
Strain Rate Constant (C)	0,033
Thermal Softening Exponent (M)	0,323
Melting Temperature (T _{melt})	1773 K
Reference Strain Rate ()	1,0 s ⁻¹
Specific Heat (C_p)	486 J/kg.K
Elongation at Break	32,4 %
Yield Strenght	400 MPa
Tangent Modulus	1500 MPa

Tabel 3.2 Material properties crash box

Tabel 3	.3 Material	Properties	Support	

Density ()	7850 kg/m ³
Modulus Young (E)	200 GPa
Poisson's Ratio (v)	0,3
Yield Strenght	434 MPa
Tangent Modulus	1450 MPa
Specific Heat (C_p)	486 J/kg.K

Tabel 3.4 Material Properties Crosshead

5	Density ()	182140 kg/m ³
Q	Modulus Young (E)	200 GPa
ī	Poisson's Ratio (v)	0,3
	Yield Strenght	434 MPa
	Tangent Modulus	1450 MPa
Ę	Specific Heat (C_p)	486 J/kg.K

26

Dimensi untuk *crash box* yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada desain *crash box* dari pemenelitian Ilman (2015). Dimensi *crash box* adalah sebagai berikut:



AUD

Gambar 3.1 Dimensi Crash Box. Satuan: mm

3.6. Meshing

Meshing merupakan pembagian (diskritisasi) suatu objek menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dari objeknya yang disebut elemen hingga. Semakin kecil elemen yang dibentuk maka hasil analisis yang diperoleh akan lebih akurat namun beban komputer semakin berat karena semakin banyak persamaan yang harus diselesaikan. Pada penelitian, ukuran *meshing* (elemen) yang digunakan adalah sebesar 1 mm untuk *crash box* dan *automeshing* untuk *crosshead* dan *support*.





3.7. Load Setting dan Boundary Condition

Crosshead dan support dimodelkan rigid body sedangkan crash box sebagai elastic body. Crosshead dengan masa 103 kg bergerak dengan kecepatan sesuai dengan table 3.1. Tumpuan tipe fixed support didefinisikan pada support. Standard earth gravity sebesar 9,8066 m/s diterapkan pada simulasi ini. Untuk gambarannya dapat dilihat pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Pemodelan Simulasi dengan Software Berbasis Finite Element Method

3.8. Lokasi Pengambilan Data

Besarnya nilai deformasi dan *force* / gaya diambil pada tempat secara berurutan dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5. Data deformasi diperoleh dari bagian atas *crash box*. Data *force* / gaya diperoleh dari besarnya *force reaction* di *support*. Pola deformasi dapat dilihat secara visual pada hasil simulasi dalam kondisi komponen utuh maupun potongan.

28



Gambar 3.4 Lokasi Pengambilan Data Deformasi

RAWINAL co-least on Gambar 3.5 Lokasi Pengambilan Data Force Reaction

3.9. Procedur Penelitian

Prosedur penilitian dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Melakukan observasi data-data yang dibutuhkan dalam penelitian dari buku, jurnal-jurnal penelitian, dan internet.
- 2. Melakukan verifikasi penelitian dengan menyamakan proses simulasi dalam penelitian Ilman (2015).
- 3. Analisis yang digunakan pada software berbasis FEM adalah analisis tipe explicit dynamics. Pendefinisian propertis material tiap model crash box disesuaikan dengan tabel 3.2, tabel 3.3, dan tabel 3.4. pembuatan geometri tiap model crash box dilakukan dengan design modeler. Meshing tiap crash box sebesar 1 mm (gambar 3.2). Pendefinisian beban

dan *boundary condition* dapat dilihat pada gambar 3.3. Jika langkah di atas sudah selesai maka dapat dilakukan proses *solution*.

- 4. Besarnya nilai gaya reaksi dan *diformation* dari tiap model *crash box* diolah dengan *software* Ms. Excel dengan tujuan mendapatkan grafik hubungan antara gaya reaksi terhadap *displacement* untuk masing-masing model. Perhitungan besarnya energi yang diserap oleh *crash box* menggunakan metode pengukuran luasan di bawah kurva pada grafik hubungan gaya terhadap *deformation* dengan metode *trapezoidal rule*. Pola deformasi dapat dilihat secara visual pada hasil simulasi dalam kondisi komponen utuh maupun potongan.
- 5. Analisa dan pembahasan dari hasil simulasi dari tiap model *crash box*. Hasil dari analisa ini kemudian ditarik kesimpulan dari penelitian yang dilakukan



3.10. Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Verifikasi Hasil Simulasi

Verifikasi dalam penelitian dilakukan dengan cara membandingkan proses simulasi dalam penelitian ini dengan proses simulasi Ilman (2015). Ilman (2015) melakukan penelitian yamg merujuk pada penelitian Velmurugan (2009) dengan melakukan validasi penelitian yakni membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimental sehingga dapat diketahui besarnya galat / *error*. Dari hasil simulasi diperoleh hasil penelitian seperti tabel 4.1. Dari hasil perhitungan didapatkan galat / *error* 5,38 x 10-4 % untuk deformasi dan 5,24% untuk energi penyerapan. Terjadinya galat / *error* pada simulasi dapat dikarenakan ukuran elemen saat *meshing* atau tipe kontak pada penumbuk dengan *crash box*. Nilai galat / *error* yang kecil ini menandakan bahwa hasil simulasi yang dilakukan mendekati nilai sebenarnya / eksperimental. Dari hasil perhitungan simulasi yang mendekati eksperimental, maka prosedur langkah-langkah penggunaan *software* simulasi dapat digunakan pada pemodelan simulasi dengan variabel penelitian yang berbeda.

Variabel	Eksperimental	Simulasi	
Ø (mm)	75	75	
<i>L</i> (mm)	150	150	
<i>m</i> (kg)	103	103	
<i>t</i> (mm)	1,6	1,6	
<i>v</i> (m/s)	7,67	7,67	
L (mm)	37,2	37,2002	
Ea (J)	2.395,30	2.527,71	
δ_{error}	5, 38. 10 ⁻⁴ %		
Ea _{error}	5, 24 %		

Tabel 4.1 Data Validasi Hasil Eksperimental dengan Simulasi

4.2. Pola Deformasi

Tabung berdinding tipis atau *crash box* memiliki empat kemungkinan pola deformasi jika dikenai pembebanan *quasi-static* yakni concertina (*axisymetric*), *diamond* (*non-axisymetric*), *mixed mode*, dan euler *buckling*. Pola deformasi dari masing-masing model *crash box* (tabel 3.1) dapat dilihat pada tabel 4.2, tabel 4.3 dan tabel 4.4.



Concertina

Concertina

50

Sumbu

Tabel 4.2 Pola Deformasi Crash box 1

Concertina

31



Tabel 4.3 Pola Deformasi Crash box 2

33

Tabel 4.4 Pola Deformasi Crash box 3



Dari pengamatan secara visual pada tabel 4.1, tabel 4.2 dan tabel 4.3, dapat kita lihat bahwa semua model *crash box* mengalami *folding* / deformasi pertama kali di bagian *initial fold*-nya pada saat deformation mencapai 5,75 mm. Dari keseluruhan pola deformasi yang terbentuk adalah jenis deformasi *axial mode* concertina, baik pada *crash box* dengan model material yang berbeda ataupun pada model dengan variasi kecepatan tumbukan. Proses deformasi *crash box*, dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Proses deformasi pada Crash box Model IFCB JC15

Gambar 4.1 merupakan proses deformasi pada *crash box* model IFCB B15. Warnawarna pada gambar 4.1 menunjukkan nilai tegangan pada *body crash box*. Keseluruhan model *crash box* mengalami deformasi seperti gambar 4.1. Mula-mula *crash box* mengalami deformasi di *initial fold* bagian dalamnya (Proses 2). Hal ini dikarenakan adanya lekukan pada *crash box* sehingga tegangan terbesar terjadi pada bagian *initial fold*. Kemudian *Crash box* terdeformasi pada *initial fold* bagian luarnya (Proses 3) dengan membentuk lekukan ke dalam pada segmen ke-2. Hal ini dikarenakan *initial fold* bagian dalam yang ditunjuk lingkaran kuning (proses ke-3) mengalami tegangan maksimal dan mengalami deformasi aksial sehingga *initial fold* bagian dalam menarik *initial fold* bagian luar (yang ditunjuk lingkaran orange) ke dalam dan segmen ke-2 ikut tertarik ke dalam sehingga terbentuk lekukan kedalam pada pada segmen ke-2. *Crash box* terus mengalami deformasi aksial hingga pada proses ke-4, *crash box* membentuk lekukan ke dalam pada segmen ke-1. Kemudian pada proses ke-5, lekukan ke luar pada segmen ke-2 semakin terlihat jelas.

Dari keseluruhan model *crash box*, pola deformasi yang terbentuk pada deformasi 5,75 mm, deformasi 17,25 mm, dan deformasi 57,50 mm adalah deformasi aksial dengan jenis concertina, baik pada model dengan model material yang berbeda ataupun pada model dengan kecepatan *crosshead* berbeda. Hal ini dikarenakan nilai *normal stress* searah sumbu x, *normal stress* searah sumbu y, dan *normal stress* searah sumbu z yang hampir sama pada tiap titik yang saling simetris atau saling berhadapan dan karena penampang *crash box* berbebentuk lingkaran, sehingga *crash box* terdeformasi secara *axysimetric*. Hal ini dapat dilihat dari data hasil simulasi yang ditunjukkan gambar 4.2, gambar 4.3, dan gambar 4.4. *Normal stress* tiap model *crash box* dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.2 Normal Stress Searah Sumbu x

35







Gambar 4.4 Normal Stress Searah Sumbu z

Penyebab terjadinya deformasi jenis concertina juga dapat dilihat dari vector principal stress. Dari vector principal stress pada deformasi ke-5,75 mm (Gambar 4.5), vector principal stress pada deformasi ke-17,25 mm (Gambar 4.6), dan vector principal stress pada deformasi ke-57,5 mm (Gambar 4.7), dapat dilihat bahwa vector sisi kiri simetris dengan vector sisi kanan. Hal ini juga dapat menyebabkan crash box terdeformasi secara axy-simetric. Untuk vector principal stress tiap model crash box dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.5 Vector Principal Stress Pada Deformasi Ke-5,75 mm



Gambar 4.6 Vector Principal Stress Pada Deformasi Ke-17,25 mm



Gambar 4.7 Vector Principal Stress Pada Deformasi Ke-57,5 mm

4.3. Energi Penyerapan pada Crash box

Energi penyerapan pada *crash box* didefinisikan sebagai besarnya usaha (*work*) yang dibutuhkan untuk menghasilkan *deformation* pada *crash box* atau bisa disebut energi regangan (*strain energy*). Besarnya energi penyerapan dapat dihitung dengan menghitung luas daerah yang dibentuk oleh kurva grafik hubungan antara *force reaction* dan *deformation*.

Pada saat *crosshead* menumbuk *crash box*, terjadi gaya aksi yang dilakukan oleh *crosshead* ke *crash box* dan akan menimbulkan gaya reaksi pada tumpuan (*support*) *crash box*. Gaya aksi *crosshead* akan membuat *crash box* mengalami deformasi. Jumlah gaya yang diberikan *crosshead* selama terjadinya deformasi akan menghasilkan energi regangan pada *crash box*. Grafik hubungan *force* terhadap *deformation* masing-masing model *crash box* dapat dilihat pada gambar 4.8.

37



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Force terhadap Deformation

Gambar 4.8 menunjukkan grafik hubungan *force* terhadap *deformation*. Grafik ini diperoleh dengan menggabungkan grafik hubungan *force* terhadap waktu dan grafik hubungan *deformation* terhadap waktu yang diperoleh dari *software* simulasi berbasis FEM. Dari gambar 4.8 dapat dilihat bahwa pada awal grafik dari *deformation* 0 mm – 0,3 mm, *force* naik drastis kemudian turun dan kemudian naik perlahan-lahan hingga *deformation* mencapai 57,5 mm. Hal ini dikarenakan untuk membentuk folding awal, dibutuhkan energi yang sangat besar dan dikarenakan pada range ini, material masih di daerah elastis sehingga

dengan nilai deformasi yang sedikit dibutuhkan *force* yang sangat besar untuk melakukan deformasi.

Nilai energi penyerapan pada *crash box* sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai Pmean (*mean force*), hal ini sesuai dengan rumus (4-3). Dalam penelitian ini, *crash box* model IFCB B15 (*crash box* dengan kecepatan impaktor 15 mm/s dan model material bilinear isotropic hardening) memiliki nilai energi penyerapan terbesar yakni 2855,69 Joule. Hal ini dikarenakan *crash box* model IFCB B15 juga memiliki nilai Pmean terbesar. Sedangkan *crash box* model IFCB JC5 (*crash box* dengan kecepatan impaktor 5 mm/s dan model material Johnson-Cook) memiliki nilai energi penyerapan terkecil yakni sebesar 2678,22 Joule. Besarnya nilai energi penyerapan dan Pmean masing-masing model *crash box* dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data Energi Penyerapan dan Pmean			
Model Material	Energi Penyerapan (kN)	Pmean (kN)	
IFCB B5	2810,50	48,99	
IFCB B10	2832,81	49,38	
IFCB B15	2855,69	49,78	
IFCB JC5	2678,22	46,69	
IFCB JC 10	2694,45	46,98	
IFCB JC15	2704,09	47,15	





Gambar 4.9 Grafik Hubungan Kecepatan Crosshead Terhadap Energi Penyerapan

39

Gambar 4.9 merupakan grafik hubungan antara kecepatan crosshead terhadap energi penyerapan. Dari gambar 4.9 dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan crosshead maka nilai energi penyerapan semakin tinggi baik itu pada *crash box* dengan pemodelan material bilinear isotropic hardening maupun crash box dengan pemodelan material Johnson-Cook. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan *compression crosshead*, maka nilai force yang dilakukan semakin tinggi sehingga nilai Pmean akan semakin tinggi pula. Pmean yang semakin tinggi akan mengakibatkan nilai energi penyerapan akan semakin tinggi pula. Hal ini sesuai dengan persamaan (4-1), (4-2), dan (4-3), S BRAWIUAL

 $F_i = m.\frac{v}{t} + c.v + k.\delta$ (4-1) $P_{mean} = \frac{\sum F_i}{\sum i}$ (4-2)

atau

$$E_{abs} = P_{mean} \times \delta_{max} (4-3)$$

dimana:

F = force (N) = massa *crosshead* (kg) m = kecepatan *crosshead* (mm/s) v = waktu pembebanan (s) t = *damping coefficient* (kg/s) С = *spring constant* (N/m) k $\sum F_{i}$ = jumlah gaya pada siklus perhitungan ke-i (N) i = total siklus perhitungan Р = force reaction (N) δmax. = total *deformation* (mm) δ *= deformation* (mm) = Energi penyerapan (J) Eabs

4.3.2. Energi Penyerapan pada Crash box dengan Model Material berbeda

Gambar 4.10 Grafik Hubungan Model Material Terhadap Energi Penyerapan

Gambar 4.10 merupakan grafik hubungan antara model material *crash box* terhadap energi penyerapan. Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai energi penyerapan pada *crash box* dengan model material *bilinear isotropic hardening* memiliki nilai energi penyerapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *crash box* dengan model material Johnson-Cook. Hal ini dikarenakan pada regangan yang sama, model material *bilinear isotropic hardening* membutuhkan *force* yang lebih besar dibandingkan dengan model material Johnson-Cook untuk melakukan deformasi. Hal ini juga dikarenakan pada kecepatan rendah dan konstan, sehingga efek *strain-rate* diabaikan (Guo dan Lee, 2007). Sehingga nilai tegangan dari model material johnson-cook lebih rendah dari model material *bilinear isotropic hardening*. Hal ini dapat dilihat pada grafik tegangan-regangan tiap model material (gambar 4.11) yang diperoleh dari hasil plot rumus persamaan (2-10) dan (2-11).

Dari gambar 4.11, dapat dilihat dengan regangan sebesar 32,4%, model material *bilinear isotropic hardening* memiliki nilai tegangan sebesar 978,520 MPa, sedangkan model material Johnson-Cook, memiliki nilai tegangan sebesar 719,690 MPa. Hal Ini menunjukkan bahwa *crash box* dengan model material *bilinear isotropic hardening* memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan *crash box* dengan dengan model material

Johnson-Cook sehingga *force* yang dibutuhkan untuk mendeformasi *crash box* menjadi lebih besar, sehingga nilai energi penyerapan juga menjadi besar. Hal ini sesuai dengan rumus persamaan (4-4), (4-1), (4-2), dan (4-3).

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad (4-4)W$$

dimana:

41

 σ = Tegangan (Pa)

A = Luas Penampang (m²)

4.4. Grafik Hubungan Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformation dan Energi Penyerapan

Gambar 4.12 Grafik Hubungan Waktu Pembebanan Terhadap Energi Penyerapan dan Pola Deformasi

Gambar 4.12 menunjukkan grafik hubungan waktu pembebanan terhadap energi penyerapan dan pola *deformation* pada enam titik pada model *crash box* IFCB B5. Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin lama waktu pembebanan maka nilai energi penyerapan juga semakin tinggi. Dari titik ke-0 hingga titik ke-1, kemiringan grafik lebih landai. Hal ini dikarenakan pada titik ke-1 merupakan titik awal terbentuknya *folding* pada *initial fold* dan masih dalam daerah plastis sehingga energi yang diserap masih rendah. Kemudian setelah titik ke-1 hingga titik ke-6, kecenderungan grafik lebih meningkat tajam dari sebelumnya, hal ini dikarenakan *crash box* sudah terdeformasi sehingga dibutuhkan waktu yang lebih cepat dan energi yang lebih besar untuk melakukan folding. Untuk proses yang lebih jelas tentang *folding* pada *crash box*, dapat dilihat pada gambar 4.1.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis Pembahasan dari penelitian yang dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- 1. Peningkatan kecepatan tumbukan (*crosshead*) dapat mengakibatkan meningkatnya energi penyerapan pada *crash box*.
- 2. *Crash box* dengan model material *bilinear isotropic hardening* memiliki nilai energi penyerapan yang lebih besar dari *crash box* dengan model material johnson-cook, namun model material johnson-cook memiliki nilai energi penyerapan yang mendekati nilai nyata.
- 3. Pola deformasi yang terbentuk pada seluruh *crash box* baik dengan kecepatan yang berbeda dan model material yang berbeda adalah model *axial axysimetric (Concertina)*.

5.2. Saran

- 1. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan metode eksperimental nyata untuk membuktikan hasil penilitian ini.
- 2. Pengembangan penelitian dengan variasi material dan bentuk *initial fold* yang lain pada *crash box*.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. 2015. *Statistik Transportasi Darat 2014*. Indonesia: Badan Pusat Statistik.
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. Sistem manajemen mutu Dasar-dasar dan kosakata. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- Bardelcik, Alexander dan Michael worswick. 2015. High Strain Rate Material Behaviour. University of Waterloo: Waterloo. <u>http://www.formingandimpact.uwaterloo.ca/</u><u>Research/strain.html</u>. (diakses: 23 April 2016)
- Beer, F. P. dkk. 2012. Mechanics of Materials, 6th Edition. New York : McGraw-Hill.
- Choiron, Agus dkk. 2014. Modul Ajar Metode Elemen Hingga. Malang: Universitas Brawijaya
- Fauza, Ilman. 2015. Analisis Pola Deformasi Dan Energi Penyerapan Pada Initial Fold Crash Box Menggunakan Metode Frontal Crash Test. Malang: Universitas Brawijaya
- Gere, J.M. 2004. Mechanics of Materials, 6th Edition. New York : Thomson Learning, Inc.
- Guo, Yazhou dan Yulong Li. 2007. *Quasi-static/dynamic response of SiO2-epoxy* nanocomposites. Materials Science and Engineering A 458 (2007) 330-335.
- Jandaghi dan Marzbanrad. 2012. Analytical and experimental studies on quasi-static axial crush behavior of thin-walled tailor-made aluminum tubes. Journal of Thin-Walled Structures 60: 24–37
- Lu, G. dan Yu T. X. 2003. *Energy absorption of structures and materials*. Australia: Swinburne university of technoogy
- Paul, P. dkk. 2004. Vehicle Crashworhthiness and Occupant Protection. Michigan : American Iron and Steel Institute.
- Sohn, S.M. et al. 2007. Evaluation of The Crash Energy Absorption of Hydroformed Bumper Stays. Journal of Material Processing Technology 187: 283-286.
- Sumitomo. 2005. Sumitomo Metals and Toyota Iron Works Co., Ltd. : New Mazda Incorporates High-Efficiency Cras Box from Sumitomo Metals. Japan : Azom.
- Ruggiero, Leonardo dkk. 2014. The effect of material modeling on finite element analysis of human breast biomechanics. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials 2014; 12 (1): 27-34
- Tarlochan, F dkk. 2013. Design of Thin Wall Structures for Energy Absorption Application: Enhancement of Crashworthiness Due to Axial and Oblique Impact Forces, Journal of Thin-Walled Structures 71: 7-17
- Toksoy, A.K. 2009. Optimization of The Axial Crushing Behavior of Closed-Cell Aluminum Foam Filled Welded 1050 Al Square-Cross Section Crash Boxes. Thesis. Izmir : Izmir Institute of Technology.
- Velmurugan, R. dkk. 2009. Energy Absorption Characteristics of Annealed Steel Tubes of Various Cross Section in Static and Dynamic Loading. Latin American Journal of Solid and Structures, V. 6, p. 385-412.

SHIVERSITAS BRAWING

LAMPIRAN

Lampiran 1

Data Grafik Tegangan Regangan Material

Johnson-Cook		Bilinear Isotropic Hardening		
Regangan [%]	Tegangan [MPa]	Regangan [%]	Tegangan [MPa]	
0,00	0,00	0,00	0,00	
0,12	242,86	0,12	242,86	
0,33	270,58	0,33	402,34	
0,67	305,01	0,67	408,46	
1,01	328,77	C 1,01	414,58	
1,35	347,53	1,35	420,70	
1,69	363,29	1,69	426,82	
2,03	377,00	2,03	432,94	
2,37	389,23	2,37	439,06	
2,71	400,32	2,71	445,18	
3,05	410,49	3,05	451,30	
3,39	419,92	3,39	457,42	
3,73	428,73	3,73	463,54	
4,07	437,00	4,07	469,66	
4,74	452,02	4,74	481,72	
5,08	459,09	5,08	487,84	
5,42	465,85	5,42	493,96	
5,76	472,32	5,76	500,08	
6,10	478,54	6,10	506,20	
6,44	484,53	6,44	512,32	
6,78	490,30	6,78	518,44	
7,12	495,89	7,12	524,56	
7,46	501,29	7,46	530,68	
7,80	506,53	7,80	536,80	
8,14	511,61	8,14	542,92	
8,48	516,56	8,48	549,04	
8,82	521,37	8,82	555,16	
9,16	526,05	9,16	561,28	
9,50	530,62	9,50	567,40	
9,84	535,08	9,84	573,52	
10,18	539,43	10,18	579,64	
10,52	543,69	10,52	585,76	
10,86	547,86	10,86	591,88	
11,20	551,93	11,20	598,00	
11,54	555,93	11,54	604,12	

1	1,88	559,84	11,88	610,24
1	2,22	563,68	12,22	616,36
1	2,56	567,44	12,56	622,48
	2,90	571,14	12,90	628,60
1	3,24	574,77	13,24	634,72
1	3,58	578,34	13,58	640,84
1	3,92	581,85	13,92	646,96
1	4,26	585,30	14,26	653,08
1	4,60	588,70	14,60	659,20
1	4,94	592,04	14,94	665,32
1	5,28	595,33	15,28	671,44
1121	5,62	598,57	15,62	677,56
1	5,96	601,77	15,96	683,68
1	6,30	604,92	16,30	689,80
1	6,64	608,02	16,64	695,92
1	6,98	611,08	16,98	702,04
1	7,32	614,10	17,32	708,16
1	7,66	617,08	17,66	714,28
1	8,00	620,02	18,00	720,40
1	8,34	622,92	18,34	726,52
1	8,68	625,79	18,68	732,64
1	9,02	628,62	19,02	738,76
1	9,36	631,42	19,36	744,88
1	9,70	634,18	19,70	751,00
2	0,04	636,91	20,04	757,12
2	0,38	639,61	20,38	763,24
2	0,72	642,28	20,72	769,36
2	1,06	644,92	21,06	775,48
2	1,40	647,53	21,40	781,60
2	1,74	650,12	21,74	787,72
2	2,08	652,67	22,08	793,84
2	2,42	655,20° L	22,42 00	799,96
2	2,76	657,70	22,76	806,08
2	3,10	660,18	23,10	812,20
2	3,44	662,64	23,44	818,32
2	3,78	665,06	23,78	824,44
2	4,12	667,47	24,12	830,56
2	4,46	669,85	24,46	836,68
2	4,80	672,21	24,80	842,80
2	5,14	674,55	25,14	848,92
2	.5,48	676,87	25,48	855,04
2	5,82	679,16	25,82	861,16
2	6,16	681,44	26,16	867,28
2	6,50	683,70	26,50	873,40
2	6,84	685,93	26,84	879,52

27,18	688,15	27,18	885,64
27,52	690,35	27,52	891,76
27,86	692,53	27,86	897,88
28,20	694,69	28,20	904,00
28,54	696,83	28,54	910,12
28,88	698,96	28,88	916,24
29,22	701,07	29,22	922,36
29,56	703,16	29,56	928,48
29,90	705,24	29,90	934,60
30,24	707,30	30,24	940,72
30,58	709,34	30,58	946,84
30,92	711,37	30,92	952,96
31,26	713,39	31,26	959,08
31,60	715,39	31,60	965,20
31,94	717,37	31,94	971,32
32,28	719,34	32,28	977,44
32,41	720,09	32,41	979,78
	-24		
	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		

BRAWIJAY

### Lampiran 2

Normal Stress Crash Box Model IFCB B5

![](_page_62_Figure_3.jpeg)

### Lampiran 3

Normal Stress Crash Box Model IFCB B10

![](_page_63_Figure_3.jpeg)

### Lampiran 4

Normal Stress Crash Box Model IFCB B15

![](_page_64_Figure_3.jpeg)

### Lampiran 5

Normal Stress Crash Box Model IFCB JC5

![](_page_65_Figure_3.jpeg)

### Lampiran 6

Normal Stress Crash Box Model IFCB JC10

![](_page_66_Figure_3.jpeg)

### Lampiran 7

Principal Stress vector Crash Box Model IFCB B5

![](_page_67_Figure_3.jpeg)

Deformasi ke 57,5 mm

### Lampiran 8

Principal Stress vector Crash Box Model IFCB B10

![](_page_68_Figure_3.jpeg)

Deformasi ke 57,5 mm

### Lampiran 9

Principal Stress vector Crash Box Model IFCB B15

![](_page_69_Figure_3.jpeg)

Deformasi ke 57,5

### Lampiran 10

Principal Stress vector Crash Box Model IFCB JC5

![](_page_70_Figure_3.jpeg)

Deformasi ke 57,5 mm

### Lampiran 11

Principal Stress vector Crash Box Model IFCB JC10

![](_page_71_Figure_3.jpeg)

Deformasi ke 57,5 mm