

**ANALISIS POLA DEFORMASI DAN *ENERGY ABSORPTION*  
PADA *INITIAL FOLD CRASH BOX*  
MENGUNAKAN METODE *FRONTAL CRASH TEST***

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



**Disusun oleh:**

**ILMAN FAUZA  
NIM. 115060213111005-62**

**KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2015**

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**ANALISIS POLA DEFORMASI DAN *ENERGY ABSORPTION*  
PADA *INITIAL FOLD CRASH BOX*  
MENGUNAKAN METODE *FRONTAL CRASH TEST***

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**ILMAN FAUZA  
NIM. 115060213111005-62**

**Telah diperiksa dan disetujui oleh:**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.**  
NIP. 19720817 200002 1 001

**Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi, ST., M. Eng.**  
NIP. 19731124 199802 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS POLA DEFORMASI DAN *ENERGY ABSORPTION*  
PADA *INITIAL FOLD CRASH BOX*  
MENGUNAKAN METODE *FRONTAL CRASH TEST*

**SKRIPSI**  
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

**ILMAN FAUZA**  
NIM. 115060213111005-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 17 Juni 2015

**Majelis Penguji**

Skripsi I



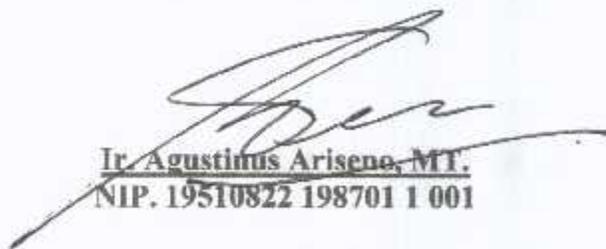
Prof. Ir. Sudjito, Ph.D.  
NIP. 19470330 198002 1 001

Skripsi II



Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph. D.  
NIP. 19710321 199802 1 001

Skripsi III



Ir. Agustinus Ariseno, MT.  
NIP. 19510822 198701 1 001

Mengetahui,  
Ketua Program Studi S1  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya



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

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul, “**Analisis Pola Deformasi dan *Energy Absorption* Pada Initial Fold Crash Box Menggunakan Metode Frontal Crash Test**” dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita, Rasulullah Muhammad SAW.

Dalam penyusunan skripsi penulis telah mendapatkan bantuan, petunjuk, semangat, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut, antara lain:

1. Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M. Eng. selaku Ketua Jurusan dan Purnami, ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
2. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph. D. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konstruksi.
4. Dr. Eng. Moch Agus Choiron, ST., MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberi banyak pengetahuan, bimbingan, dan motivasi selama penyusunan skripsi.
5. Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi, ST., M. Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan motivasi, bimbingan, dan arahan demi kesempurnaan penulisan skripsi.
6. Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng. selaku dosen wali yang tiada henti memberikan bimbingan selama penulis menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
7. Dosen dan staf Jurusan Teknik Mesin.
8. Kedua orang tua tercinta, Bapak Suwardi dan Ibu Susmiati yang tiada henti mendoakan, memberi bimbingan, dan motivasi kepada penulis.
9. Kakak kandung Dyah Sustiningsih, Edi Waluyo, dan Lina Agustina yang senantiasa mendoakan dan memotivasi penulis.

10. Kawan Konstruksi: A. Wahyu P., Yogi F., A. Abrari K., Yuzvari H. I., Tuetzika A., dan Luthfi F. B. terima kasih telah menemani berjuang di konsentrasi Teknik Konstruksi.
11. Keluarga Besar Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem, Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT. selaku Kepala Laboratorium, Khairul Anam, ST., M. Sc., Fikrul Akbar Alamsyah, ST., dan Nafisah Arina Hidayati, ST., M. Eng. selaku *Member* Laboratorium, Asisten Laboratorium: Redyarsa D. B., A. Wahyu P., M. Subhan, Stefanus S., Zumrotul Ida, A. Syafi'udin, dan Kamaruddin.
12. Saudara seperjuangan "KAMI11KAZE" M'11, terima kasih atas doa, kebersamaan, dan solidaritas selama masa kuliah.
13. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyusunan yang lebih baik.

Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut dan kemajuan kita bersama.

Malang, Juni 2015

Penulis

**DAFTAR ISI**

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	1
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	3
2.2 <i>Crash Box</i> .....	5
2.3 <i>Energy Absorption</i> .....	6
2.4 Pola Deformasi .....	8
2.4.1 Pola Deformasi Berdasarkan Sumbu .....	8
2.4.2 Pola Deformasi Berdasarkan Jumlah Sudut .....	9
2.5 Beban <i>Impact</i> .....	10
2.5.1 Impuls .....	11
2.5.2 Momentum .....	11
2.6 Analisis Tegangan dan Regangan .....	11
2.7 Metode Elemen Hingga .....	13
2.8 <i>Software</i> Berbasis FEM .....	15
2.9 Hipotesis .....	16
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>18</b>
3.1 Metode Penelitian .....	18
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian .....	18
3.3 Variabel Penelitian .....	18
3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian .....	19
3.5 Prosedur Penelitian .....	21

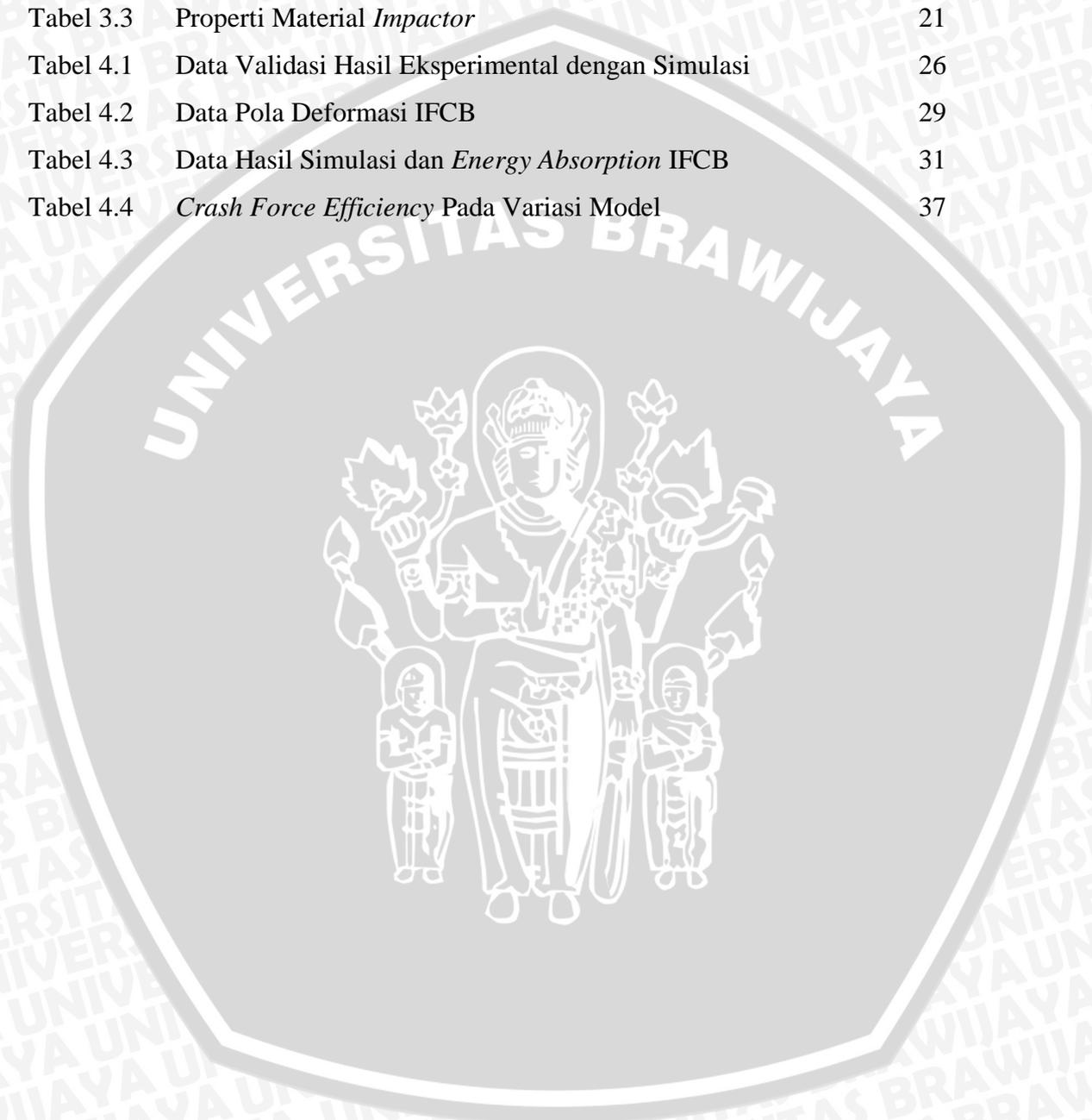


3.6	<i>Meshing</i> .....	22
3.7	Langkah Simulasi Pada <i>Software</i> Berbasis FEM .....	23
3.7.1	<i>Pre-processing</i> .....	23
3.7.2	<i>Solution</i> .....	23
3.7.3	<i>Post-processing</i> .....	23
3.8	Validasi Penelitian .....	24
3.9	Diagram Alir Penelitian .....	24
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....		<b>26</b>
4.1	Validasi Hasil Simulasi dengan Eksperimental .....	26
4.2	Pola Deformasi Pada <i>Initial Fold Crash Box</i> .....	28
4.3	Hubungan <i>Force Reaction</i> dan <i>Displacement</i> .....	30
4.4	Diagram Besar Sudut <i>Initial Fold</i> Terhadap <i>Energy Absorption</i> Pada <i>Crash Box</i> .....	32
4.5	Diagram Rasio Peletakan <i>Initial Fold</i> Terhadap <i>Energy Absorption</i> Pada <i>Crash Box</i> .....	33
4.6	Diagram Besar Sudut <i>Initial Fold</i> Terhadap <i>Energy Absorption</i> Pada Variasi Model .....	34
4.7	Grafik Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformasi dan <i>Energy Absorption</i> ... ..	35
4.8	<i>Crash Force Efficiency</i> .....	36
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....		<b>39</b>
5.1	Kesimpulan .....	39
5.2	Saran .....	39
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		<b>ix</b>



## DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Variasi Pemodelan IFCB	18
Tabel 3.2	Properti Material <i>Crash Box</i>	20
Tabel 3.3	Properti Material <i>Impactor</i>	21
Tabel 4.1	Data Validasi Hasil Eksperimental dengan Simulasi	26
Tabel 4.2	Data Pola Deformasi IFCB	29
Tabel 4.3	Data Hasil Simulasi dan <i>Energy Absorption</i> IFCB	31
Tabel 4.4	<i>Crash Force Efficiency</i> Pada Variasi Model	37



## DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Hasil Pengujian Dinamik Terhadap <i>Crash Box</i> Berpenampang Lingkaran	3
Gambar 2.2	Grafik <i>Load - Displacement Crash Box</i> Berpenampang Lingkaran	3
Gambar 2.3	<i>Crash Box</i> Talib	4
Gambar 2.4	Grafik Hubungan Gaya Terhadap Deformasi <i>Crash Box</i> Talib	4
Gambar 2.5	Dimensi <i>Hydroformed Bumper Stay</i>	5
Gambar 2.6	<i>Hydroformed Bumper Stay</i> Setelah Diuji	5
Gambar 2.7	<i>Crash Box</i> dan <i>Frame</i>	5
Gambar 2.8	<i>Crash box</i> (a) Honda Accord-2005 Steel, (b) Opel Astra-2006 Steel, (c) Renault Meganne/2-2008 Aluminum	6
Gambar 2.9	Pembebanan Aksial Pada Batang	6
Gambar 2.10	Grafik Hubungan <i>Load</i> Terhadap <i>Displacement</i>	7
Gambar 2.11	<i>Strain Energy</i>	7
Gambar 2.12	<i>Axial Mode</i>	8
Gambar 2.13	<i>Bending Mode</i>	8
Gambar 2.14	(a) <i>Concertina Mode</i> , (b) <i>Diamond Mode</i>	9
Gambar 2.15	<i>Mixed Mode</i>	9
Gambar 2.16	Beban <i>Impact</i> Pada Batang Horizontal	10
Gambar 2.17	Tegangan Normal Pada Batang	11
Gambar 2.18	Regangan Pada Batang	12
Gambar 2.19	Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan	12
Gambar 3.1	Dimensi Variabel Bebas	19
Gambar 3.2	Komponen Pemodelan IFCB	20
Gambar 3.3	Dimensi IFCB	20
Gambar 3.4	Pemodelan Pembebanan IFCB	21
Gambar 3.5	Lokasi Pengambilan Data <i>Displacement</i>	22
Gambar 3.6	Lokasi Pengambilan Data Gaya Reaksi	22
Gambar 3.7	<i>Mesh</i> Pemodelan IFCB	23

Gambar 3.8	Geometri Validasi Penelitian Velmurugan	24
Gambar 4.1	Validasi <i>Crash Box</i> Hasil (a) Eksperimental, (b) Simulasi	26
Gambar 4.2	Grafik Hubungan <i>Force Reaction</i> Terhadap <i>Displacement</i>	27
Gambar 4.3	Pola Deformasi IFCB Model Ke- (a) 1, (b) 2, dan (c) 3	28
Gambar 4.4	Pola Deformasi IFCB Model Ke- (a) 4, (b) 5, dan (c) 6	28
Gambar 4.5	Pola Deformasi IFCB Model Ke- (a) 7, (b) 8, dan (c) 9	28
Gambar 4.6	Grafik Hubungan <i>Force Reaction</i> Terhadap <i>Displacement</i>	30
Gambar 4.7	Diagram Besar Sudut Terhadap <i>Energy Absorption</i> Pada Rasio Peletakan <i>Initial Fold</i> 1/2	32
Gambar 4.8	Diagram Rasio Peletakan Terhadap <i>Energy Absorption</i> Pada Sudut <i>Initial Fold</i> 90°	33
Gambar 4.9	Diagram Besar Sudut <i>Initial Fold</i> Terhadap <i>Energy Absorption</i> Pada Variasi Model	34
Gambar 4.10	Grafik Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformasi dan <i>Energy Absorption</i> Pada Model Ke-8	35
Gambar 4.11	Proses <i>Folding</i> Pada Model Ke-8	36
Gambar 4.12	Diagram Variasi Model Terhadap CFE	38



## RINGKASAN

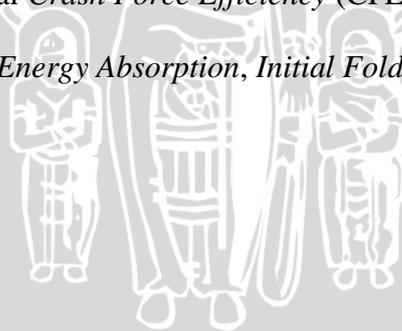
**Ilman Fauza**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2015, *Analisis Pola Deformasi dan Energy Absorption Pada Initial Fold Crash Box Menggunakan Metode Frontal Crash Test*, Dosen Pembimbing: Moch. Agus Choiron dan Sofyan Arief Setyabudi.

Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (2014) pada tahun 2012 mobil penumpang tercatat sebanyak 10.432.259 unit dan tahun 2013 sebanyak 11.484.514 unit, mengindikasikan bahwa jumlah mobil penumpang mengalami peningkatan sebesar 10,09%. Jumlah kecelakaan lalu lintas tahun 2013 mencapai angka 100.106 dengan jumlah korban meninggal sebanyak 26.416 jiwa. *Crash box* merupakan komponen keselamatan pasif antara *bumper* dan *frame* yang dikembangkan untuk tujuan mengurangi dampak tumbukan dengan menyerap energi *impact*-nya.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *energy absorption* yang terjadi pada *crash box* dengan penambahan *initial fold* (lipatan awal yang didesain pada geometri *crash box* untuk mempermudah terjadinya deformasi ketika menyerap energi *impact*) dengan harapan *crash box* membentuk *axial mode* yang dapat meningkatkan *energy absorption* sehingga mengurangi dampak tumbukannya.

Metode penelitian yang digunakan dalam adalah eksperimental semu menggunakan *software* berbasis *Finite Element Method* (FEM). Model *Initial Fold Crash Box* (IFCB) dengan ini merupakan satu komponen yang tidak terpisah. Variabel bebas dari penelitian ini adalah besar sudut *initial fold* ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ) dan rasio peletakan *initial fold* (1/2, 1/1, 2/1) sehingga terdapat 9 model IFCB. Berdasarkan hasil pemodelan, diperoleh pola deformasi dengan *axial mode* tipe *concertina* pada semua model. *Energy absorption* paling tinggi terdapat pada model ke-8 dengan nilai sebesar 1.886,40 J dan mempunyai nilai *Crash Force Efficiency* (CFE) sebesar 78,54%.

Kata Kunci: Pola Deformasi, *Energy Absorption*, *Initial Fold*, *Frontal Crash Test*



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia semakin pesat, khususnya mobil penumpang. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (2014) pada tahun 2012 mobil penumpang tercatat sebanyak 10.432.259 unit dan tahun 2013 sebanyak 11.484.514 unit, mengindikasikan bahwa jumlah mobil penumpang mengalami peningkatan sebesar 10,09%. Jumlah kecelakaan lalu lintas tahun 2013 mencapai angka 100.106 dengan jumlah korban meninggal sebanyak 26.416 jiwa.

*Crash box* yang merupakan perangkat keselamatan pasif antara *bumper* dan *frame* dikembangkan untuk tujuan mengurangi dampak tumbukan dengan menyerap energi *impact*-nya. *Crash box* dapat berupa *thin walled structure* (struktur berdinding tipis) dengan harapan mengalami deformasi permanen ketika mengalami tumbukan.

Velmurugan (2009) melakukan penelitian tentang perbandingan bentuk penampang *crash box* yang menghasilkan bahwa bentuk penampang yang paling optimal adalah lingkaran. Menurut Paul *et al* (2004) terdapat dua mode dasar atau mekanisme yang terjadi pada *crash box* yang biasa ditemukan dalam mobil, yaitu *axial* dan *bending mode*, dimana *axial mode* ternyata mempunyai karakter menyerap energi lebih efektif. Talib (2013) melakukan penelitian tentang variasi diameter dan panjang *crash box* terhadap *energy absorption* dan deformasi memberikan hasil bahwa diameter dan panjang optimal berturut-turut adalah 115 mm dan 97,34 mm.

Berdasarkan latar belakang, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola deformasi dan *energy absorption* yang terjadi pada *crash box* dengan penambahan *initial fold* dengan harapan *crash box* membentuk *axial mode* tipe *concertina* yang dapat meningkatkan *energy absorption* sehingga mengurangi dampak tumbukannya.

### 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan desain *crash box* dengan penambahan *initial fold* dapat dirumuskan sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh besar sudut *initial fold* terhadap pola deformasi dan *energy absorption* pada *crash box*?
- Bagaimana pengaruh rasio penempatan *initial fold* terhadap pola deformasi dan *energy absorption* pada *crash box*?

### 1.3 Batasan Masalah

Penentuan batasan masalah dilakukan untuk mempersempit ruang lingkup permasalahan yang dibahas agar penelitian terarah antara lain:

- a. Material *crash box* yang digunakan diasumsikan *bilinear isotropic hardening*.
- b. Penelitian difokuskan pada pola deformasi dan *energy absorption* pada *crash box*.
- c. *Impactor* diasumsikan sebagai *rigid* dan *crash box* sebagai *deformable body*.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian antara lain:

- a. Untuk menganalisis pengaruh besar sudut *initial fold* terhadap pola deformasi dan *energy absorption* pada *crash box*.
- b. Untuk menganalisis pengaruh rasio penempatan *initial fold* terhadap pola deformasi dan *energy absorption* pada *crash box*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian sebagai berikut:

- a. Memberikan gambaran tentang desain awal apabila akan dilakukan eksperimental nyata untuk menghindari *trial and error* guna mereduksi *cost*.
- b. Menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya mengenai *crash box*.
- c. Meningkatkan performa sistem keselamatan kendaraan bermotor roda empat.

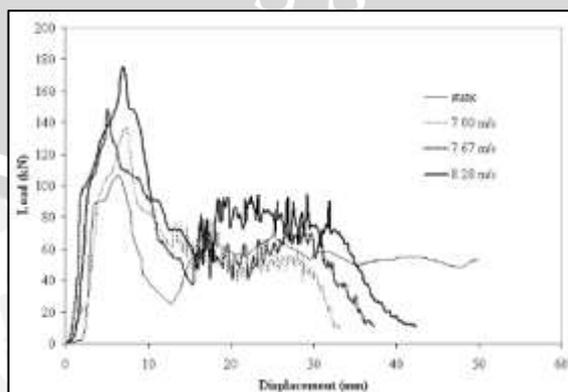
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Velmurugan (2009) telah melakukan penelitian *crash box* dengan material *mild steel* ASTM E-04 pada variasi bentuk penampangnya guna menganalisis karakteristik pola deformasi dan *energy absorption*. Pengujian dilakukan dengan pembebanan statik dan dinamik. Bentuk penampang yang diuji untuk dibandingkan adalah lingkaran, persegi, dan persegi panjang. Pengujian statik *crash box* dilakukan dengan *Universal Testing Machine* dengan pembebanan maksimal 20 ton, sedangkan pengujian dinamik menggunakan metode *drop weight test* dengan massa *impactor* sebesar 103 kg. Gambar 2.1 menunjukkan hasil pengujian *crash box* berpenampang lingkaran diameter 75 mm dan panjang 150 mm dengan variasi kecepatan 7,00 m/s, 7,67 m/s, dan 8,28 m/s. Hubungan antara *load* dan *displacement* yang terjadi pada *crash box* disajikan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. *Energy absorption* pada masing-masing *crash box* dapat ditentukan dengan menghitung luasan di bawah kurva pada grafik hubungan *load* dan *displacement*.

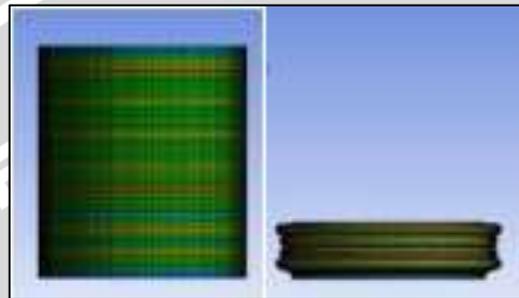


Gambar 2.1 Hasil Pengujian Dinamik Terhadap *Crash Box* Berpenampang Lingkaran  
Sumber: Velmurugan (2009: 395)

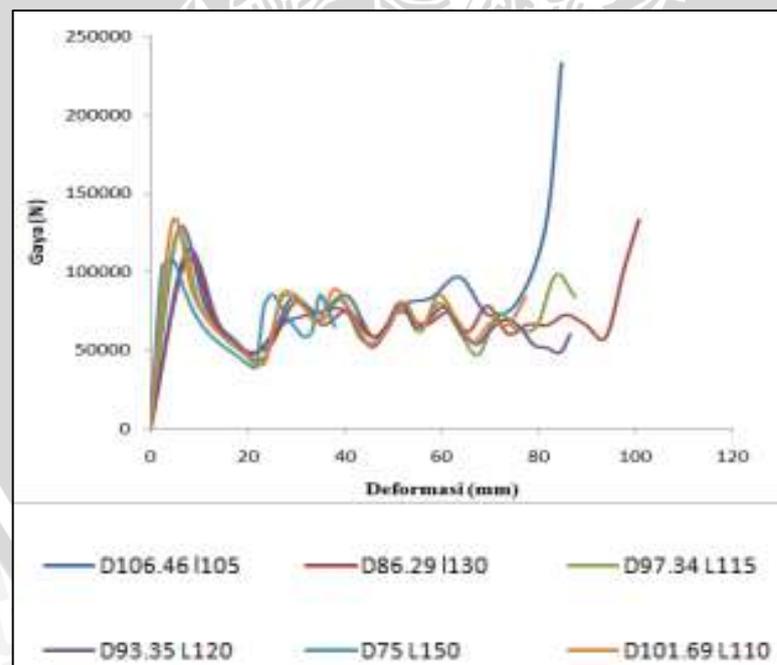


Gambar 2.2 Grafik *Load - Displacement* *Crash Box* Berpenampang Lingkaran  
Sumber: Velmurugan (2009: 395)

Talib (2013) melakukan penelitian mengenai optimasi desain *crash box* berpenampang lingkaran dengan menganalisis variasi panjang dan diameter. Pemodelan beban dinamik dilakukan dengan memasukkan kecepatan *impactor* 7,67 m/s. *Impactor* mempunyai massa 103 kg dan *crash box* sebesar 0,447 kg. Gambar 2.3 menunjukkan hasil pengujian *crash box* mempunyai nilai *energy absorption* optimum dengan panjang 115 mm dan diameter 97,34 mm. Hubungan gaya terhadap deformasi berbagai variasi dapat dilihat pada Gambar 2.4.



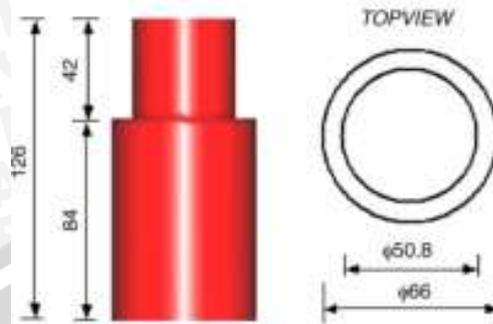
Gambar 2.3 *Crash Box* Talib  
Sumber: Talib (2013: 6)



Gambar 2.4 Grafik Hubungan Gaya Terhadap Deformasi *Crash Box* Talib  
Sumber: Talib (2013: 6)

Sohn (2007) melakukan penelitian mengenai *hydroformed bumper stay* yang digunakan untuk lebih meningkatkan *energy absorption* pada saat terjadi tumbukan daripada *conventional bumper stay*. Rasio panjang profil atas dan bawah pada

*hydroformed bumper stay* adalah 1/2 dengan panjang total 126 mm seperti yang ditunjukkan Gambar 2.5 dan hasil pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.6.



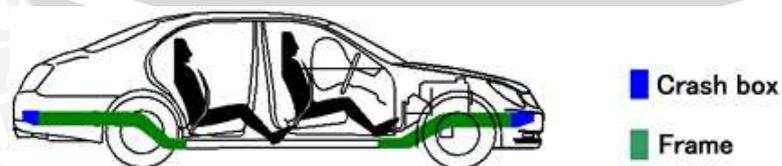
Gambar 2.5 Dimensi *Hydroformed Bumper Stay*  
Sumber: Sohn (2007: 2)



Gambar 2.6 *Hydroformed Bumper Stay* Setelah Diuji  
Sumber: Sohn (2007: 3)

## 2.2 *Crash Box*

*Crash box* merupakan salah satu perangkat keselamatan pasif dalam kendaraan bermotor yang terletak di depan dan belakang di antara *bumper* dan *frame* yang dapat dilihat pada Gambar 2.7, berfungsi sebagai penyerap energi *impact* ketika terjadi tumbukan ditandai dengan terjadinya deformasi plastis pada *crash box*.



Gambar 2.7 *Crash Box* dan *Frame*  
Sumber: Sumitomo (2005: 5)

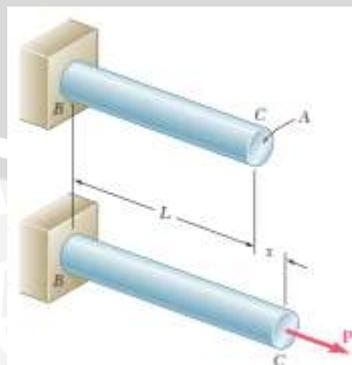
Ketika terjadi tumbukan, *crash box* akan menyerap energi melalui deformasi plastis dengan menurunkan gaya maksimalnya untuk didistribusikan secara merata sehingga komponen yang berada menjauhi tumbukan *crash box* diharapkan tidak mengalami kerusakan berat. Kriteria yang harus dipenuhi *crash box* untuk mendapatkan keamanan yang optimal antara lain:

- Crash box* merupakan salah satu komponen habis sekali pakai yang membuatnya harus mudah diproduksi dan mudah dalam pengantiannya. Macam-macam *crash box* yang telah dipasarkan ditunjukkan Gambar 2.8.
- Energi *impact* akibat tumbukan sebesar mungkin harus dapat didistribusikan dan diubah menjadi deformasi plastis.
- Panjang *crash box* harus optimal yaitu dengan panjang maksimal tetapi tidak terlalu menempati banyak ruang pada bagian depan atau belakang kendaraan bermotor agar langkah deformasi untuk menyerap energi *impact* semakin panjang.



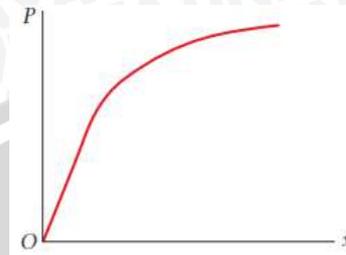
Gambar 2.8 *Crash box* (a) Honda Accord-2005 Steel, (b) Opel Astra-2006 Steel, (c) Renault Meganne/2-2008 Aluminum  
Sumber: Toksoy (2009: 4)

### 2.3 Energy Absorption



Gambar 2.9 Pembebanan Aksial Pada Batang  
Sumber: Beer (2012: 694)

Gambar 2.9 menunjukkan batang BC mempunyai luas penampang  $A$  dan panjang  $L$  dengan kondisi B pada tumpuan jepit dan C diberi pembebanan aksial  $P$ . Apabila pembebanan aksial dilakukan selama waktu tertentu maka hubungan antara beban dan deformasi pada batang digambarkan dalam grafik seperti Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Grafik Hubungan *Load Terhadap Displacement*  
Sumber: Beer (2012: 695)

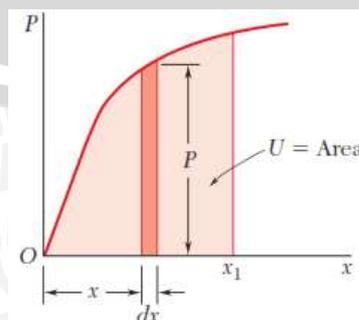
Deformasi plastis yang terjadi akibat tumbukan antara *impactor* dan *crash box* terjadi karena adanya penyerapan energi *impact* yang bisa disebut sebagai energi kinetik karena dipengaruhi oleh fungsi massa dan kecepatan. Akibat peredaman tersebut maka terjadi konversi energi dari energi *impact* menjadi 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 2.11.

Kerja ( $dU$ ) pada deformasi yang kecil ( $dx$ ) akibat beban  $P$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$dU = P dx \quad (\text{Beer, 2012: 695}) \quad (2-1)$$

Sehingga kerja total yang terjadi pada luasan di bawah kurva *load-displacement* antara titik 0 sampai  $x_1$  dapat dituliskan dalam persamaan:

$$U = \int_0^{x_1} P dx \quad (\text{Beer, 2012: 695}) \quad (2-2)$$



Gambar 2.11 *Strain Energy*  
Sumber: Beer (2012: 695)

Keterangan:

$U$  = energi regangan (J)

$P$  = beban (N)

$x$  = perpindahan (m)

## 2.4 Pola Deformasi

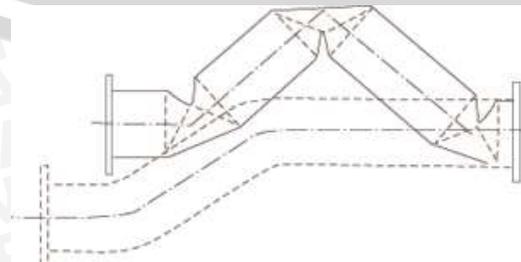
### 2.4.1 Pola Deformasi Berdasarkan Sumbu

Terdapat dua pertimbangan utama dalam mendesain struktur kendaraan untuk mengatur energi akibat tumbukan, yaitu *impact energy absorption* oleh kendaraan dan menghambat dampak tumbukan atau kekuatan komponen untuk mempertahankan keselamatan penumpang. Untuk *energy absorption*, terdapat dua mekanisme dasar untuk mendeformasi *crash box* yaitu *axial* dan *bending mode*. *Axial mode* murni dapat terjadi pada kondisi tumbukan *frontal/rear* dan mempunyai karakter simetris terhadap garis sumbu. Jenis *axial mode* ditunjukkan Gambar 2.12.



Gambar 2.12 *Axial Mode*  
Sumber: Paul (2004: 42)

*Bending mode* melibatkan pembentukan mekanisme sendi lokal dengan energi yang lebih rendah. Struktur *front-end* akan selalu memiliki kecenderungan untuk terdeformasi pada sendinya dan mempunyai karakter tidak simetris terhadap garis sumbu. Struktur yang dirancang untuk runtuhnya aksial akan gagal dengan cara ini, kecuali aturan yang sangat spesifik diikuti untuk meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap sudut pembebanan. Mekanisme *bending mode* ditunjukkan Gambar 2.13.

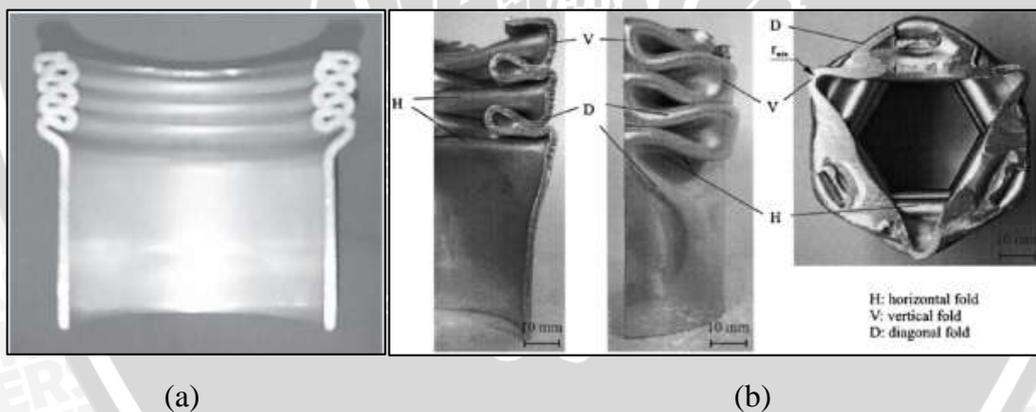


Gambar 2.13 *Bending Mode*  
Sumber: Paul (2004: 43)

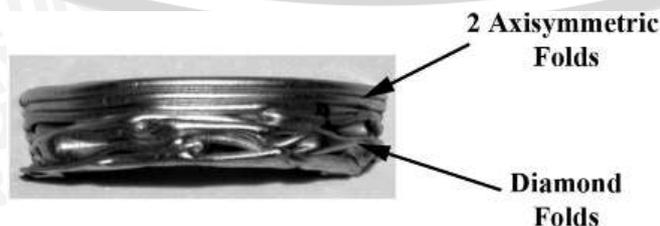
Pola deformasi yang diharapkan terjadi pada saat *crash box* mengalami beban *impact* adalah *axial mode*, karena energi yang diserap oleh *crash box* akan semakin besar. Han (1999) melakukan penelitian pola deformasi struktur berdinding tipis yang mengalami beban *impact* miring menunjukkan bahwa *bending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

#### 2.4.2 Pola Deformasi Berdasarkan Jumlah Sudut

*Crash box* dengan penampang lingkaran ketika diberi pembebanan aksial mempunyai tiga peluang *mode* kegagalan yang mampu mempengaruhi kapasitas penyerapan energi, 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 2.14 dan 2.15.



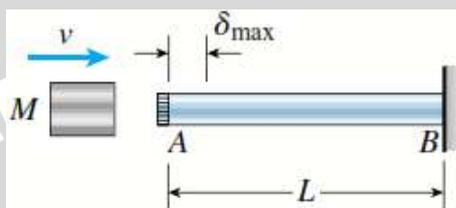
Gambar 2.14 (a) *Concertina Mode*, (b) *Diamond Mode*  
Sumber: Toksoy (2009: 33)



Gambar 2.15 *Mixed Mode*  
Sumber: Toksoy (2009: 33)

## 2.5 Beban *Impact*

Beban (*load*) dibagi menjadi dua, yaitu beban statik dan dinamik. Beban statik diberikan secara perlahan, bertahap dari nol menuju nilai maksimalnya kemudian konstan, sehingga fungsi waktu diabaikan. Beban dinamik diberikan secara tiba-tiba (*impact load*), sedangkan satu lagi diberikan dalam jangka waktu panjang dan intensitas variasi beban secara kontinyu (*fluctuating load*). Beban *impact* terjadi ketika dua objek bertumbukan atau dijatuhkan dari ketinggian tertentu sehingga menumbuk struktur lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Beban *Impact* Pada Batang Horizontal  
Sumber: Gere (2004: 135)

Perpendekan maksimum pada batang dapat dianalisis dengan metode yang sama dengan pembahasan sebelumnya, yaitu dengan mengabaikan semua kerugian energi dan mengasumsikan energi *impact* ditransformasi menjadi *strain energy* pada batang. Energi *impact* pada *impactor* dirumuskan dengan energi kinetik  $mv^2/2$ . Besarnya *strain energy* pada batang ketika *impactor* berhenti pada perpendekan maksimum adalah  $EA\delta_{max}^2/2L$ , sehingga dua persamaan tersebut dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{EA\delta_{max}^2}{2L} \quad (\text{Gere, 2004: 135}) \quad (2-3)$$

Untuk menentukan  $\delta_{max}$ , maka:

$$\delta_{max} = \sqrt{\frac{mv^2L}{EA}} \quad (\text{Gere, 2004: 135}) \quad (2-4)$$

Untuk menentukan *impact factor* maka harus mengetahui nilai *static displacement* dari batang. Pada kasus ini, *static displacement* adalah perpendekan terhadap berat *impactor* yang diterapkan sebagai beban kompresi pada batang, sehingga dapat dirumuskan pada persamaan:

$$\delta_{st} = \frac{WL}{EA} = \frac{mgL}{EA} \quad (\text{Gere, 2004: 135}) \quad (2-5)$$

Selanjutnya *impact factor* dapat dirumuskan sebagai berikut:

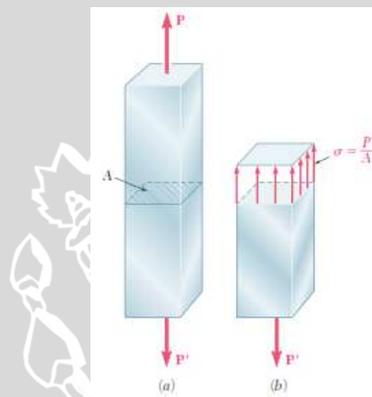
$$\text{Impact Factor} = \frac{\delta_{max}}{\delta_{st}} = \sqrt{\frac{EA v^2}{mg^2 L}} \quad (\text{Gere, 2004: 135}) \quad (2-6)$$

Tegangan kompresi maksimum pada batang ditentukan dari perpindahan maksimum yang dapat dituliskan pada persamaan:

$$\sigma_{max} = \frac{E \delta_{max}}{L} = \frac{E}{L} \sqrt{\frac{mv^2 L}{EA}} = \sqrt{\frac{mv^2 E}{AL}} \quad (\text{Gere, 2004: 135}) \quad (2-7)$$

## 2.6 Analisis Tegangan dan Regangan

Tegangan (*stress*) dapat didefinisikan sebagai 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 secara tegak lurus luas permukaan benda seperti pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Tegangan Normal Pada Batang  
Sumber: Beer (2012: 5)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2-8)$$

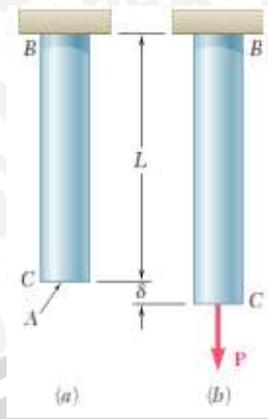
Keterangan:

$\sigma$  = tegangan normal (N/m<sup>2</sup>)

$P$  = gaya normal (N)

$A$  = luas permukaan gaya bekerja (m<sup>2</sup>)

Bila suatu benda diberi gaya maka akan terjadi tegangan pada elemen-elemen benda tersebut. Tegangan yang terjadi akan menimbulkan regangan. Regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang awal suatu benda. Regangan pada suatu batang dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Regangan Pada Batang  
 Sumber: Beer (2012: 66)

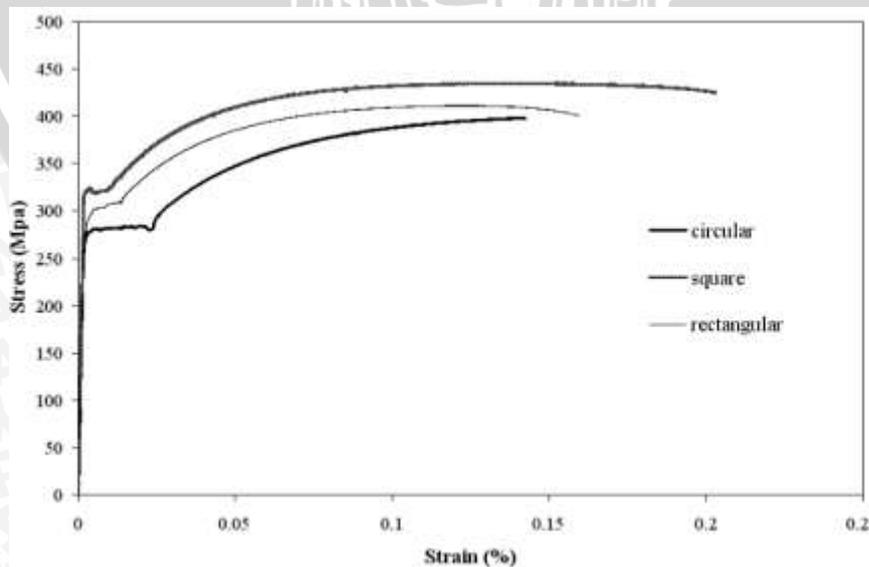
Regangan dibagi menjadi dua, yaitu regangan normal dan regangan geser.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2-9)$$

Keterangan:

- $\epsilon$  = regangan normal
- $\delta$  = perubahan panjang ( $m$ )
- $L_0$  = panjang awal ( $m$ )

Rasio antara tegangan normal dan regangan normal disebut modulus elastisitas ( $E$ ) atau *Young's Modulus*. Modulus ini berlaku pada garis lurus sebelum batas proporsional atau daerah elastis material. Hubungan antara tegangan dan regangan *mild steel* ASTM E-04 ditampilkan dalam kurva tegangan dan regangan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan  
 Sumber: Velmurugan (2009: 389)

Sehingga dapat ditulis rumusan untuk modulus elastisitas:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2-10)$$

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

$$\nu = -\frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \quad (2-11)$$

## 2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu prosedur numerik dengan konsep dasar adalah pembagian (diskritisasi) suatu kontinum menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dari kontinumnya yang disebut elemen hingga. Analisis metode elemen hingga dilakukan untuk mendapatkan suatu nilai pendekatan berdasarkan asumsi perpindahan atau asumsi tegangan atau dapat juga berdasarkan kombinasi keduanya.

### 1. Diskritisasi dan pemilihan elemen

Diskritisasi adalah proses membagi suatu struktur menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki geometri yang lebih sederhana. Elemen-elemen berhubungan pada titik simpul (*node*) membentuk rangkaian bersama dan keseluruhan mendekati bentuk struktur sebenarnya. Jadi bentuk geometri struktur yang kompleks dapat disederhanakan dengan diskritisasi untuk lebih mempermudah analisis.

Pemilihan jenis elemen tergantung pada karakteristik rangkaian kesatuan dan idealisasi yang dipilih. Idealisasi struktur dua dimensi dapat menggunakan elemen segitiga, segiempat maupun *quadrilateral*, sedangkan struktur tiga dimensi dapat menggunakan elemen *hexahedron*.

### 2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan sulitnya mencari jawaban tertutup, sehingga dipilih suatu bentuk jawaban, yaitu distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan.

### 3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan

Prinsip usaha menghasilkan persamaan matrik kekakuan elemen, yang dinyatakan sebagai:

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad (\text{Grandin, 1986})(2-12)$$

Keterangan:

$[k]$  = matrik kekakuan elemen

$[B]$  = matrik konstitutif hubungan regangan-perpindahan

$[C]$  = matrik konstitutif hubungan tegangan-regangan

$V$  = volume

### 4. Menghitung matrik beban total

Beban didefinisikan menjadi tiga macam, sehingga beban total adalah:

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad \text{Grandin, 1986)(2-13)}$$

Keterangan:

$F$  = gaya total

$Q_{NF}$  = beban pada konsentrasi node

$Q_{BF}$  = beban akibat beban sendiri (*body force*)

$Q_T$  = beban traksi (*surface traction*)

### 5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen ke bentuk persamaan global. Prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan bersambung, yaitu titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen:

$$\{R\} = [K]\{q\} \quad (\text{Grandin, 1986})(2-14)$$

Keterangan:

$[K]$  = matrik sifat/kekakuan elemen

$\{q\}$  = vektor perpindahan *node*

$\{R\}$  = vektor beban total

Setelah matrik kekakuan global diperoleh dan syarat-syarat batasnya dimasukkan maka perpindahan simpul ( $q$ ) dapat dicari. Suatu syarat batas memberikan informasi bagaimana struktur ditopang dalam ruang, dengan memasukkan nilai perpindahan yang telah ditetapkan sesuai kondisi pada struktur.

## 6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang mendapatkan syarat batas merupakan kumpulan persamaan linier yang dapat diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer, yaitu  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ .

$$\begin{aligned} k_{1,1} q_1 + k_{1,2} q_2 + \dots + k_{1,n} q_n &= R_1 \\ k_{2,1} q_1 + k_{2,2} q_2 + \dots + k_{2,n} q_n &= R_2 \\ &\dots \\ k_{n,1} q_1 + k_{n,2} q_2 + \dots + k_{n,n} q_n &= R_n \end{aligned} \quad (\text{Grandin, 1986}) (2-15)$$

## 7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang berupa tegangan atau regangan, dengan menggunakan hubungan antar keduanya. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-16)$$

Hubungan tegangan-regangan:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (\text{Grandin, 1986})(2-17)$$

Hubungan regangan-perpindahan:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (\text{Grandin, 1986})(2-18)$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai:

$$\{\sigma\} = [C][B]\{d\} \quad (\text{Grandin, 1986})(2-19)$$

Hasil akhir perhitungan metode elemen hingga berupa harga distribusi tegangan di sepanjang struktur untuk dianalisis sesuai dengan rumusan masalah.

## 2.8 Software Berbasis FEM

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*:

- Pemodelan geometri: dilakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D.
- Pemilihan tipe elemen: digunakan untuk mendiskritisasikan model
- *Material properties*: input data material yang digunakan.
- *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*).

### 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).

## 2.9 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka, maka muncul hipotesis dari permasalahan yang diamati. Peningkatan nilai besar sudut dan penurunan nilai rasio peletakan *initial fold* pada *crash box* meningkatkan *energy absorption* dan membentuk pola deformasi *axial mode* dengan tipe *axisymmetric/concertina*. Hal tersebut disebabkan oleh besar sudut dan rasio peletakan *initial fold* membuat struktur *crash box* mengalami penurunan beban kritis ( $P_{cr}$ ) akibat nilai panjang yang semakin besar dan nilai momen inersia

semakin kecil, sehingga membuat *crash box* mudah untuk mengalami *folding*. Hal itu mengakibatkan *peak load* rendah, apabila bilangan pembagi dari *mean load* untuk mendapatkan *Crash Force Efficiency* (CFE) rendah, maka nilai CFE akan meningkat.



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental semu yaitu metode simulasi menggunakan *software* berbasis *Finite Element Method* (FEM). Metode simulasi bertujuan untuk memprediksi fenomena yang terjadi sehingga dapat digunakan sebagai acuan eksperimental nyata. Informasi tambahan diperoleh melalui studi literatur seperti buku pustaka, jurnal penelitian, dan internet.

### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang pada bulan Maret-April 2015.

### 3.3 Variabel Penelitian

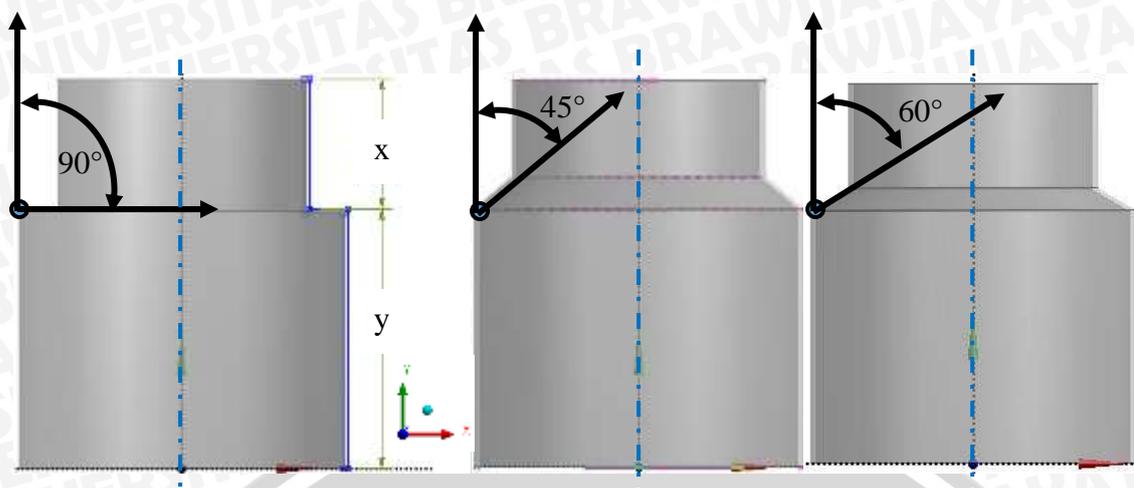
Variabel yang digunakan dalam penelitian antara lain:

#### a. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti, nilainya dapat diubah untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari objek penelitian sehingga dapat diperoleh hubungan antara variabel bebas dan terikat. Variabel bebas dari penelitian ini adalah besar sudut *initial fold* dan rasio peletakan *initial fold*.

Tabel 3.1 Variasi Pemodelan IFCB

Model ke-n	Sudut <i>Initial Fold</i> (°)	Rasio Peletakan <i>Initial Fold</i> (x : y)
1	45	1 : 2
2	45	1 : 1
3	45	2 : 1
4	60	1 : 2
5	60	1 : 1
6	60	2 : 1
7	90	1 : 2
8	90	1 : 1
9	90	2 : 1



Gambar 3.1 Dimensi Variabel Bebas

b. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yang nilainya telah ditentukan dan diperoleh setelah dilakukan penelitian. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel terikat adalah pola deformasi dan *energy absorption* pada *crash box*.

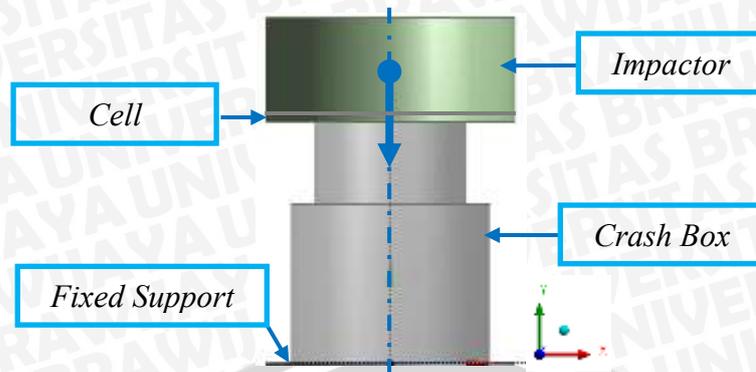
c. Variabel Terkontrol

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

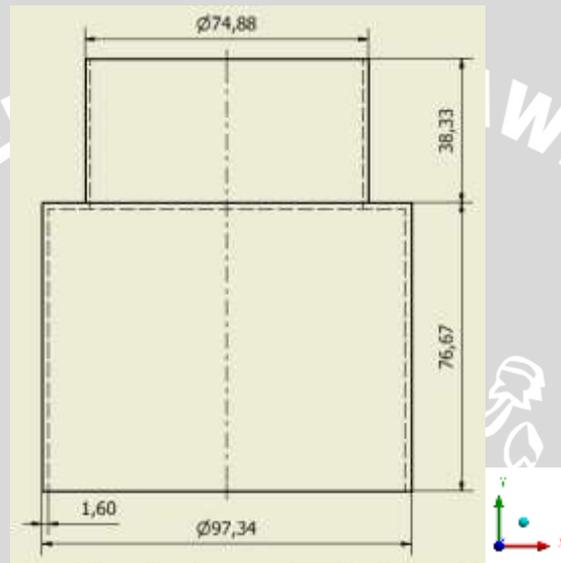
- Kecepatan tumbukan 7,67 m/s berdasarkan penelitian Velmurugan.
- Jarak antara *impactor* dan *crash box* sebesar 1 mm.
- Ketebalan *crash box* sebesar 1,6 mm.

### 3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah model *Initial Fold Crash Box* (IFCB) yang merupakan satu komponen yang tidak terpisah, *impactor*, dan *cell* yang dimodelkan dengan bantuan *Design Modeler*. *Initial fold* merupakan lipatan awal yang didesain pada geometri *crash box* untuk mempermudah terjadinya deformasi ketika menyerap energi *impact*. Pemodelan IFCB ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan dimensi model uji pada Gambar 3.3 (satuan dalam mm).



Gambar 3.2 Komponen Pemodelan IFCB



Satuan: mm

Gambar 3.3 Dimensi IFCB

Peralatan yang digunakan untuk menunjang penelitian ini adalah satu unit komputer dan *software* berbasis FEM. Pemodelan *crash box* dengan penambahan *initial fold* menggunakan material *mild steel* ASTM E-04, *structural steel* untuk *impactor* dengan massa 103 kg. *Impactor* bergerak dengan kecepatan 7,67 m/s searah sumbu  $-y$  yang membentuk sudut  $90^\circ$  terhadap sumbu  $x$ .

Tabel 3.2 Properti Material *Crash Box*

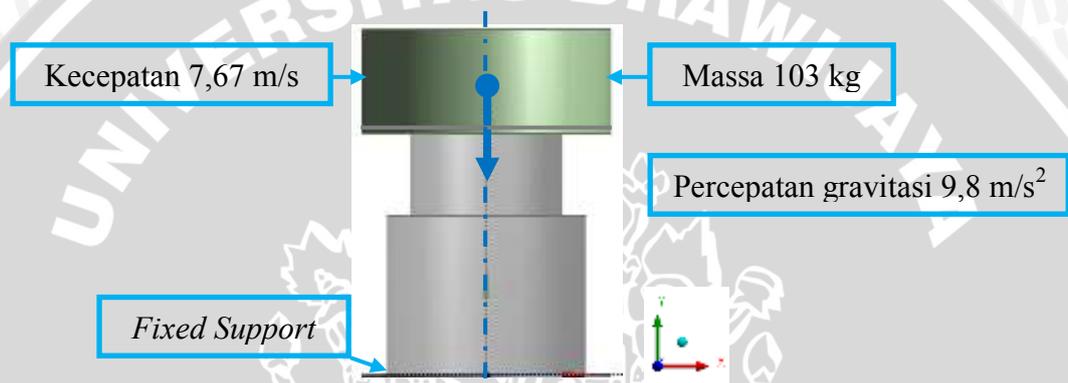
Material	<i>Crash Box</i>
$E$ (MPa)	$2,05 \times 10^5$
$\nu$	$2,9 \times 10^{-1}$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$8,077 \times 10^3$
$\sigma_y$ (MPa)	$2,6694 \times 10^2$
$\sigma_T$ (MPa)	$2,6667 \times 10^3$

Tabel 3.3 Properti Material *Impactor*

Material	<i>Impactor</i>
$E$ (MPa)	$2 \times 10^9$
$\nu$	$3 \times 10^{-1}$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$1,8214 \times 10^5$

Pemodelan pembebanan menggunakan metode seperti pada referensi yaitu *frontal crash test*. *Impactor* dimodelkan *frictionless* tanpa jarak dengan *cell* sehingga dimasukkan kecepatan akhir sebesar 7,67 m/s yang dilakukan selama 0,00485 detik.

Gambar 3.4 menunjukkan pemodelan pembebanan pada IFCB.



Gambar 3.4 Pemodelan Pembebanan IFCB

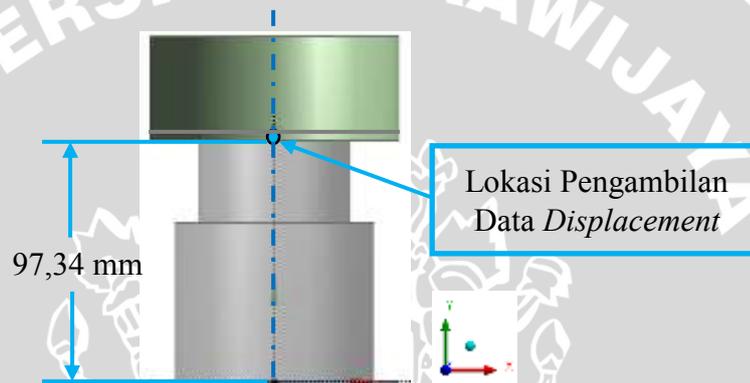
### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan mempunyai urutan sebagai berikut:

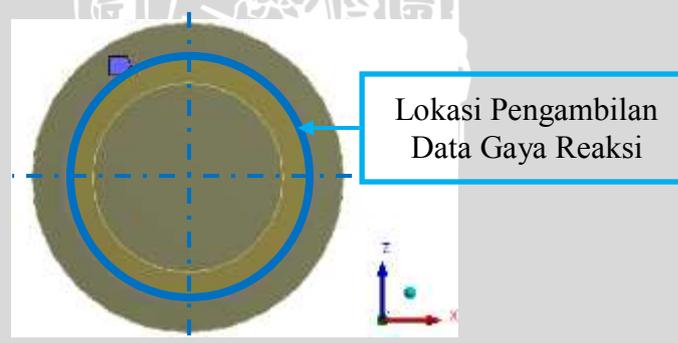
- Sistem analisis yang digunakan pada *software* berbasis FEM adalah *explicit dynamics*. Pendefinisian properti material untuk tiap komponen sesuai dengan Tabel 3.2 dan Tabel 3.3. Membuat geometri model Velmurugan yang telah dibuat pada *Design Modeler*. Pengaturan *boundary condition* sesuai dengan Gambar 3.4 dengan keadaan komponen sudah di-*mesh*. Apabila proses di atas sudah selesai, maka dilakukan proses *solution*.
- Besarnya nilai *energy absorption* dan *displacement* model Velmurugan divalidasi terlebih dulu dengan penelitian Velmurugan (2009). Apabila nilai *energy absorption* dan *displacement* mempunyai *trendline* data yang sama, maka dilanjutkan dengan pengujian pada model IFCB ke-1 hingga model ke-9.
- Besarnya nilai gaya reaksi dan *displacement* dengan tempat pengambilan data secara berurutan dapat dilihat pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6 dari model

Velmurugan hingga model IFCB ke-9 diolah pada *software* Ms. Excel dengan tujuan mendapatkan grafik hubungan antara gaya reaksi terhadap *displacement* untuk masing-masing model. Perhitungan besarnya *energy absorption* oleh *crash box* menggunakan metode pengukuran luasan di bawah kurva pada grafik hubungan gaya reaksi terhadap *displacement*. Pola deformasi dapat dilihat secara visual pada hasil simulasi dalam kondisi komponen utuh maupun potongan.

- d. Analisis dan pembahasan hasil pengujian dari masing-masing model.
- e. Hasil analisis dan pembahasan merupakan dasar untuk menarik kesimpulan mengenai penelitian yang dilakukan.



Gambar 3.5 Lokasi Pengambilan Data *Displacement*

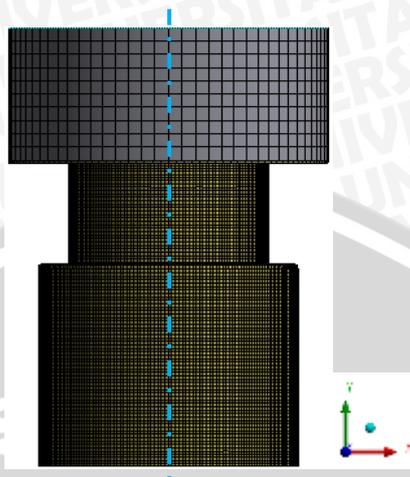


Gambar 3.6 Lokasi Pengambilan Data Gaya Reaksi

### 3.6 Meshing

*Meshing* merupakan proses pembagian objek yang semula berupa elemen tak hingga (*infinite*) menjadi elemen hingga (*finite*) yang dapat dihitung. Setiap elemen terdiri dari simpul-simpul penyusun (*node*). Proses perhitungan numerik dilakukan pada setiap *node*. Semakin banyak pembagian elemen maka akan semakin banyak *node* terbentuk yang membuat kinerja komputer semakin berat karena semakin banyak

persamaan matematis yang harus diselesaikan *software*. *Mesh* untuk *crash box* sebesar 1,3 mm dan *default* dari *software* untuk komponen lainnya.



Gambar 3.7 *Mesh* Pemodelan IFCB

### 3.7 Langkah Simulasi Pada *Software* Berbasis FEM

#### 3.7.1 *Pre-processing*

- a. Menentukan jenis tipe analisis yang dalam penelitian ini menggunakan *explicit dynamics*.
- b. Memasukkan properti material untuk komponen *crash box*, *cell*, dan *impactor*.
- c. Membuat geometri sesuai masing-masing model pada *Design Modeler*.
- d. Melakukan *meshing* pada setiap komponen pada masing-masing model.
- e. Menentukan *boundary condition* sesuai dengan Gambar 3.4.

#### 3.7.2 *Solution*

Pada proses *solution*, semua data masukan dari *pre-processing* akan diolah oleh komputer. *Solution* memberikan informasi mengenai estimasi waktu yang digunakan untuk menyelesaikan prosesnya.

#### 3.7.3 *Post-processing*

Visualisasi dari hasil *solution* dapat dilihat pada *post-processing*. Hasilnya dapat berupa *contour plot*, *grafik*, dan tabel. Pada penelitian ini akan menganalisis *energy absorption* dan pola deformasi sehingga yang diperlukan adalah memasukkan grafik *directional deformation*, *force reaction*, dan *directional deformation contour*.

### 3.8 Validasi Penelitian

Validasi penelitian dilakukan dengan penelitian Velmurugan (2009) dengan *crash box* satu segmen berpenampang lingkaran yang mempunyai dimensi (satuan dalam mm) sebagai berikut:

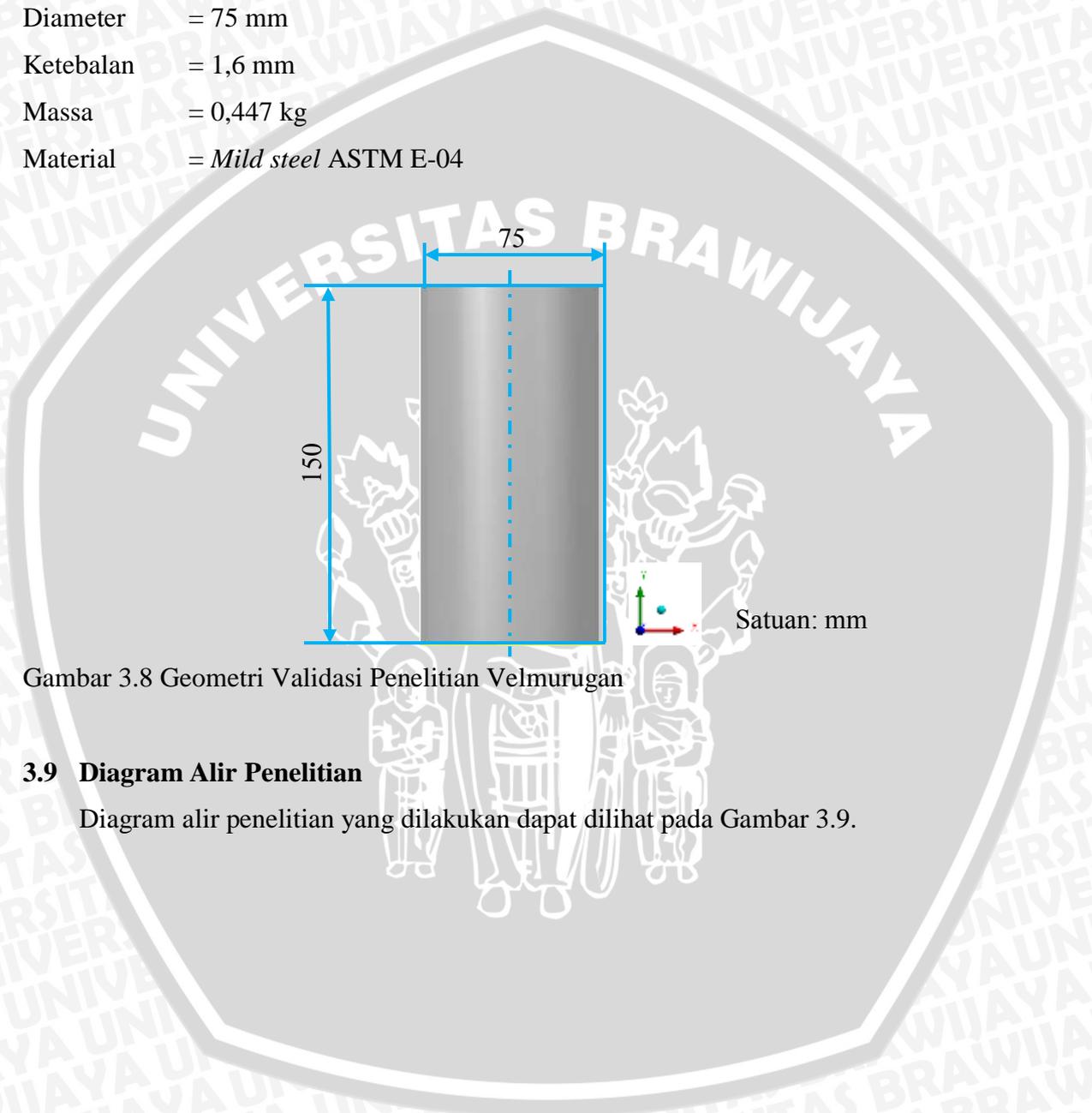
Panjang = 150 mm

Diameter = 75 mm

Ketebalan = 1,6 mm

Massa = 0,447 kg

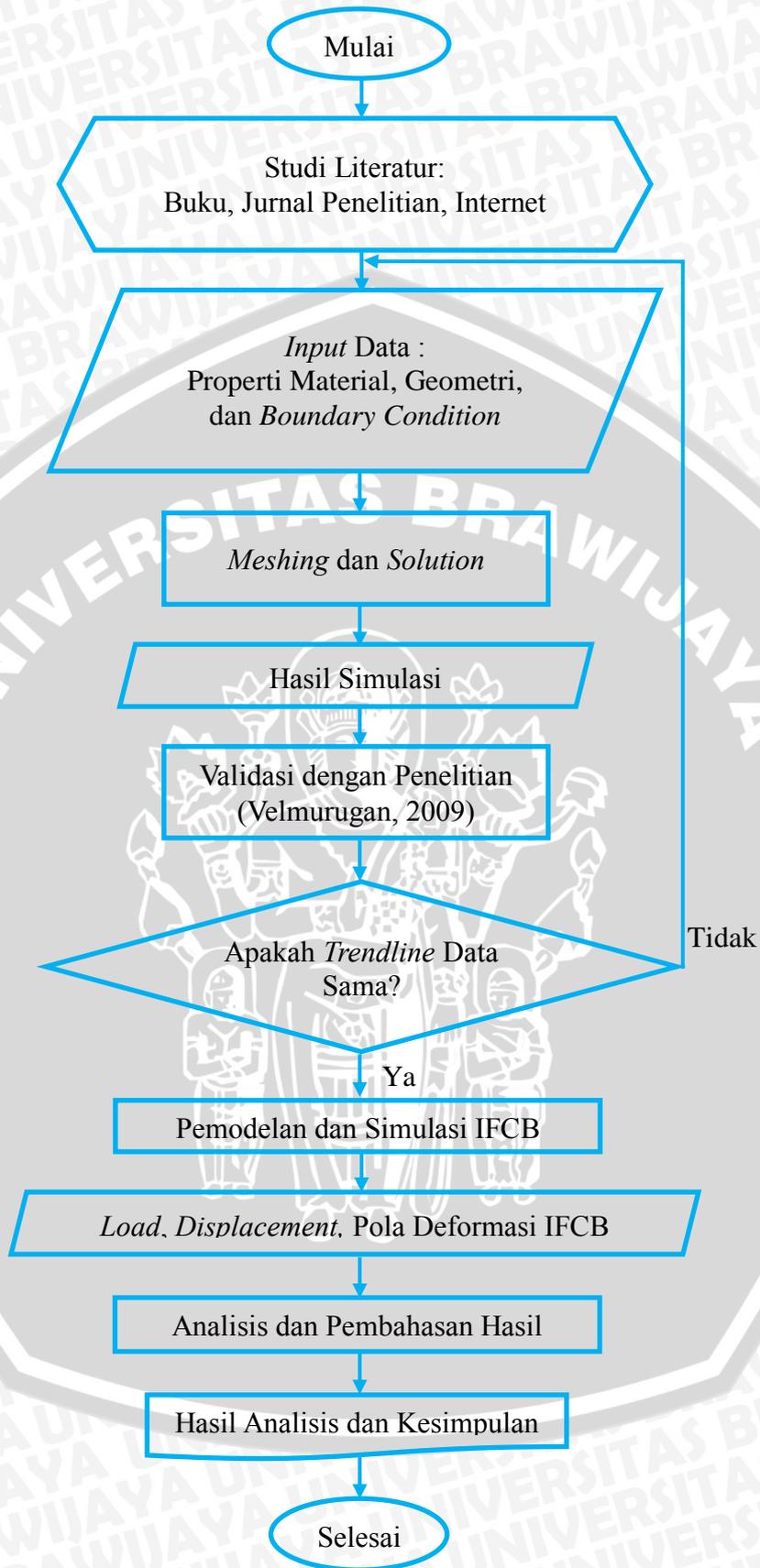
Material = *Mild steel* ASTM E-04



Gambar 3.8 Geometri Validasi Penelitian Velmurugan

### 3.9 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Diagram Alir Penelitian

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Validasi Hasil Simulasi dengan Eksperimental

Validasi pemodelan dilakukan untuk membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimental sehingga dapat diketahui besarnya *error*. Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan antara eksperimental (Velmurugan, 2009) dan hasil simulasi pengujian *crash box* dengan ukuran  $\varnothing = 75$  mm dan  $L = 150$  mm. Gambar 4.1 (a) adalah eksperimental *crash box* dengan *frontal crash test*, beban yang diberikan sebesar 103 kg dengan kecepatan 7,67 m/s dan gambar 4.1 (b) adalah hasil simulasi menggunakan *software* berbasis FEM.



Gambar 4.1 Validasi *Crash Box* Hasil (a) Eksperimental, (b) Simulasi

Tabel 4.1 Data Validasi Hasil Eksperimental dengan Simulasi

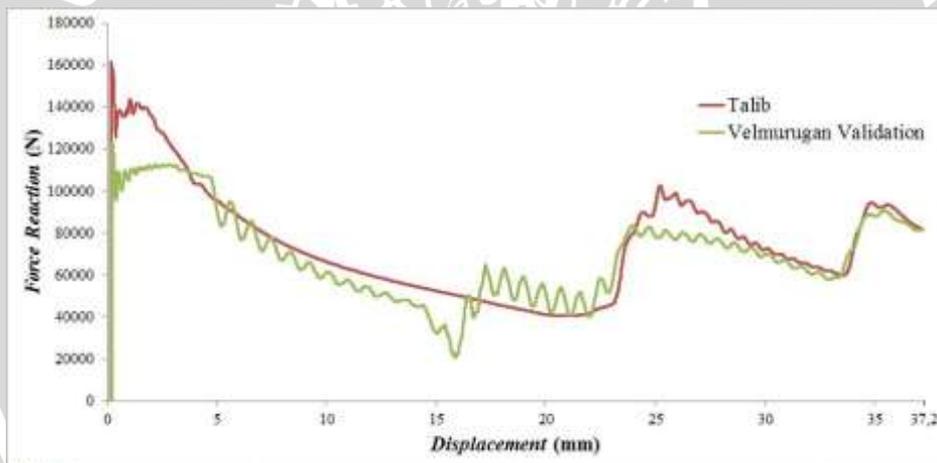
Variabel	Eksperimental	Simulasi
$\varnothing$ (mm)	75	75
$L$ (mm)	150	150
$m$ (kg)	103	103
$t$ (mm)	1,6	1,6
$v$ (m/s)	7,67	7,67
$\delta L$ (mm)	37,2	37,2002
$Ea$ (J)	2.395,30	2.527,71

$$\delta_{error} = \left[ \frac{(\ddot{a}-a)}{\ddot{a}} \right] \times 100 \% = \frac{(37,2002-37,2)}{37,2002} \times 100 \% = 5,38 \times 10^{-4} \% \quad (4-1)$$

$$Ea_{error} = \left[ \frac{(\ddot{a}-a)}{\ddot{a}} \right] \times 100 \% = \frac{(2.527,71-2.395,30)}{2.527,71} \times 100 \% = 5,24 \% \quad (4-2)$$



Berdasarkan hasil perhitungan (4-1) dan (4-2) maka diperoleh persentase *error* dari deformasi dan *energy absorption* pada *crash box* secara berurutan adalah  $5,38 \cdot 10^{-4} \%$  dan  $5,24 \%$  ( $a$  = nilai sejati,  $\tilde{a}$  = nilai hampiran). Penyimpangan dapat disebabkan dua hal yaitu asumsi ukuran elemen (*mesh*), gesekan yang terjadi pada dinding *impactor* terhadap *guide pipe*, dan pemodelan material *crash box*. Pengaturan ukuran elemen mempunyai pengaruh yang signifikan pada hasil simulasi, semakin kecil ukuran elemen maka geometri semakin mendekati struktur sebenarnya sehingga penyimpangan yang terjadi semakin kecil. Besarnya koefisien gesek pada simulasi diasumsikan *frictionless* karena informasi pada referensi tidak ditentukan. Pemodelan material pada *crash box* menggunakan *bilinear isotropic hardening*, sehingga deformasi hanya sampai pada daerah plastis, belum sampai *failure*. Apabila semakin kompleks pemodelan material, maka hasil simulasi semakin mendekati struktur sebenarnya.

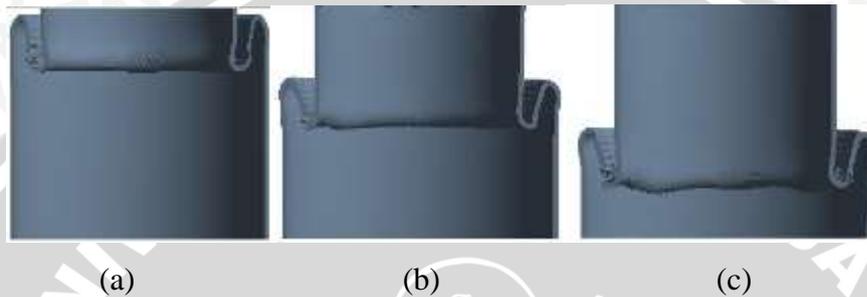


Gambar 4.2 Grafik Hubungan *Force Reaction* Terhadap *Displacement*

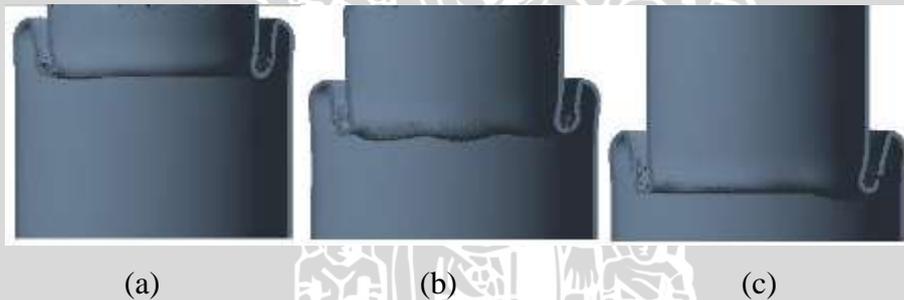
Gambar 4.2 merupakan grafik hubungan *force reaction* terhadap *displacement*, khususnya kurva *Velmurugan Validation* yaitu kecepatan  $7,67 \text{ m/s}$  yang digunakan sebagai acuan validasi *trendline* data hasil simulasi pertama. Kurva *Velmurugan Validation* pada Gambar 4.2 mempunyai *trendline* yang sama dibandingkan kurva dengan kecepatan  $7,67 \text{ m/s}$  pada Gambar 2.2. Hal itu menunjukkan bahwa hasil simulasi pertama sesuai dengan referensi, sehingga dapat dilakukan pemodelan dan simulasi *crash box* pada langkah selanjutnya dengan *setup* yang sama dengan proses validasi.

#### 4.2 Pola Deformasi Pada *Initial Fold Crash Box*

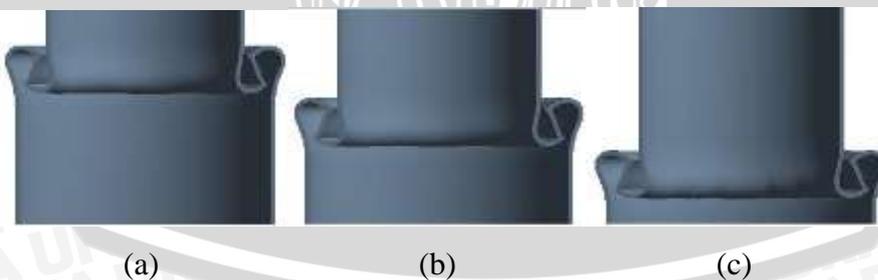
Berdasarkan pada tinjauan pustaka, pola deformasi *crash box* dibagi menjadi 3 macam, yaitu *concertina*, *diamond*, dan *mixed mode*. Pada penelitian ini dilakukan analisis visual terhadap pola deformasi *crash box* dengan cara mengamati bentuk deformasi hasil simulasi. Pola deformasi hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5.



Gambar 4.3 Pola Deformasi IFCB Model Ke- (a) 1, (b) 2, dan (c) 3



Gambar 4.4 Pola Deformasi IFCB Model Ke- (a) 4, (b) 5, dan (c) 6



Gambar 4.5 Pola Deformasi IFCB Model Ke- (a) 7, (b) 8, dan (c) 9

Berdasarkan analisis pola deformasi IFCB yang dilakukan secara visual pada hasil simulasi, maka didapat data yang menunjukkan bahwa semua variasi model memiliki pola deformasi *axial mode tipe concertina*. Data pola deformasi variasi

model dapat dilihat pada Tabel 4.2. Hal ini disebabkan oleh pemberian *initial fold* pada *crash box* mengakibatkan nilai momen inersia ( $I$ ) semakin kecil. Nilai momen inersia berbanding lurus dengan nilai beban kritis ( $P_{cr}$ ), ketika nilai momen inersia mengalami penurunan, maka nilai beban kritis juga akan menurun, sehingga membuat *crash box* mudah untuk mengalami *folding*. Hal ini sesuai dengan persamaan (4-1) mengenai momen inersia dengan penampang lingkaran :

$$I_x = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{64} \quad (\text{Budynas, 1977})(4-1)$$

Keterangan :

- $I_x$  = momen inersia terhadap sumbu x ( $\text{m}^4$ )  
 $d_o$  = diameter lingkaran luar (m)  
 $d_i$  = diameter lingkaran dalam (m)

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai beban kritis dapat dituliskan pada persamaan (4-2) sebagai berikut :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (\text{Budynas, 1977})(4-2)$$

Keterangan :

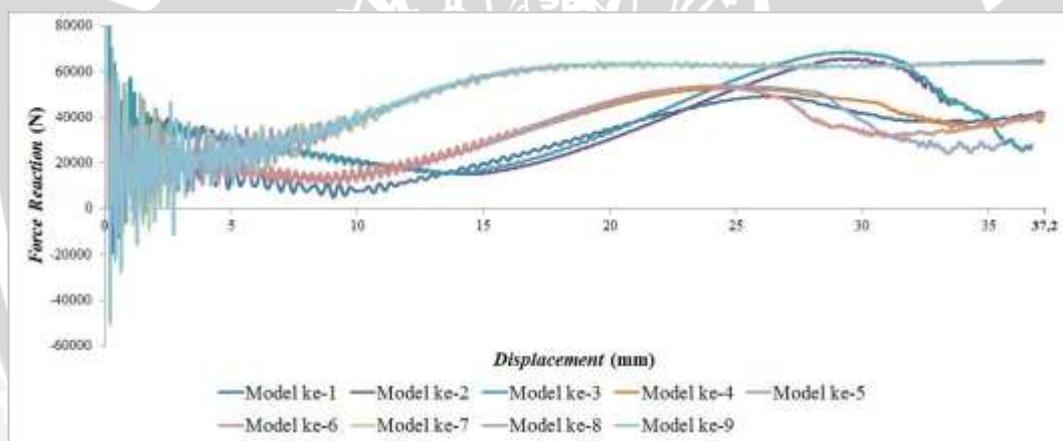
- $P_{cr}$  = beban kritis (N)  
 $E$  = modulus elastisitas ( $\text{N}/\text{m}^2$ )  
 $L$  = panjang kolom (m)

Tabel 4.2 Data Pola Deformasi IFCB

Model ke-n	Axial Mode			Bending Mode		
	Concertina	Diamond	Mixed	Concertina	Diamond	Mixed
1	√	-	-	-	-	-
2	√	-	-	-	-	-
3	√	-	-	-	-	-
4	√	-	-	-	-	-
5	√	-	-	-	-	-
6	√	-	-	-	-	-
7	√	-	-	-	-	-
8	√	-	-	-	-	-
9	√	-	-	-	-	-

### 4.3 Hubungan *Force Reaction* dan *Displacement*

Pada saat *impactor* menumbuk *crash box* maka terjadi adanya gaya pada masing-masing komponen, yaitu gaya aksi merupakan gaya yang dilakukan oleh *impactor* dan gaya reaksi yang ditimbulkan oleh tumpuan *crash box* yang merupakan dampak dari gaya aksi *impactor*. Deformasi plastis yang terjadi akibat tumbukan antara *impactor* dan *crash box* terjadi karena adanya penyerapan energi *impact* yang bisa disebut sebagai energi kinetik karena dipengaruhi oleh fungsi massa dan kecepatan. Akibat peredaman tersebut maka terjadi konversi energi dari energi *impact* menjadi energi regangan dengan mengabaikan perubahan energi ke bentuk lainnya. Besarnya energi regangan diperoleh berdasarkan luasan di bawah kurva pada grafik hubungan gaya reaksi terhadap *displacement*, sesuai dengan persamaan (2-2). Grafik mengenai hubungan *force reaction* dan *displacement* untuk berbagai variasi dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan *Force Reaction* Terhadap *Displacement*

Penentuan *energy absorption* pada IFCB berdasarkan luasan di bawah kurva grafik hubungan gaya reaksi terhadap *displacement* ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi dan *Energy Absorption* IFCB

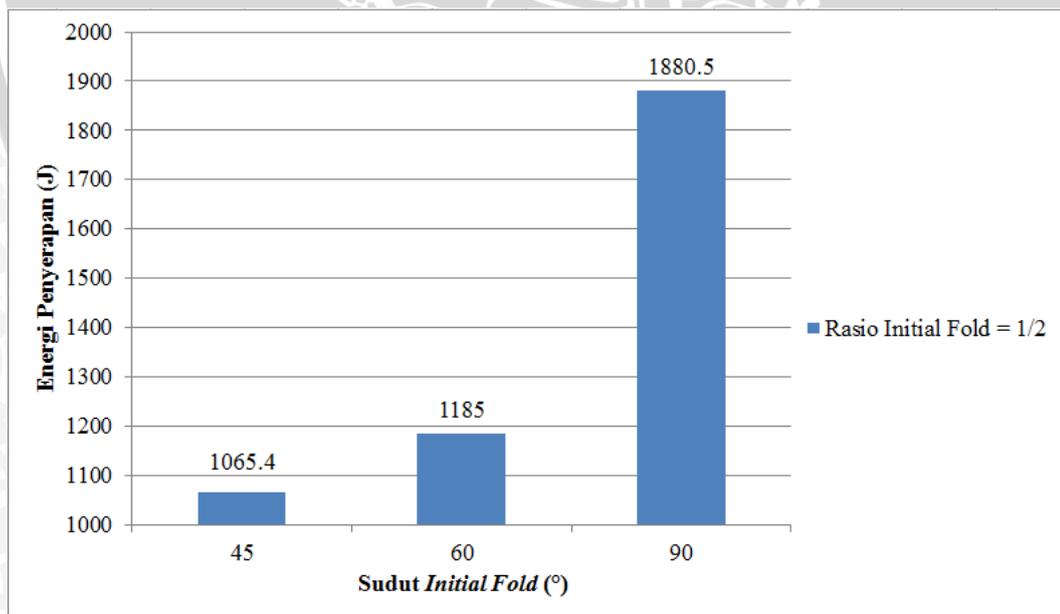
Model ke-n	$\delta$ (mm)	$P_{max}$ (N)	$P_{mean}$ (N)	$E_a$ (J)
1	<b>37,1997</b>	<b>85.325</b>	<b>28.640,02</b>	<b>1.065,40</b>
2	33,4373	69.860	44.887,00	1.500,90
3	<b>36,7029</b>	<b>108.240</b>	<b>41.340,06</b>	<b>1.517,30</b>
4	37,1893	52.593	31.864,00	1.185,00
5	35,5792	53.775	38.960,97	1.386,20
6	37,2001	58.914	31.077,88	1.156,10
7	<b>37,2001</b>	<b>65.107</b>	<b>50.550,94</b>	<b>1.880,50</b>
8	<b>37,2002</b>	<b>64.569</b>	<b>50.709,40</b>	<b>1.886,40</b>
9	<b>37,2002</b>	<b>70.422</b>	<b>50.695,97</b>	<b>1.885,90</b>

Berdasarkan data pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa 3 nilai  $P_{max}$  dari yang terbesar adalah model 3, 1, dan 9. Nilai  $P_{max}$  dari ketiga model tersebut secara berurutan yaitu 108.240 N, 85.325 N, dan 70.422 N. Besarnya nilai  $P_{max}$  dipengaruhi oleh nilai diameter yang berdampak pada besar kecilnya nilai momen inersia dan panjang masing-masing spesimen. Hal ini sesuai dengan persamaan (4-1) dan (4-2) bahwa semakin besar nilai momen inersia dan semakin kecil nilai panjang spesimen menyebabkan nilai  $P_{max}$  atau  $P_{cr}$  akan semakin besar dan sebaliknya, semakin kecil nilai momen inersia dan semakin besar nilai panjang spesimen menyebabkan nilai  $P_{max}$  semakin kecil.

Nilai *energy absorption* ( $E_a$ ) berdasarkan pada Tabel 4.3 dapat diurutkan 3 model dari yang terbesar yaitu model 8, 9, dan 7. Nilai *energy absorption* dari ketiga model tersebut secara berurutan dapat ditulis sebagai berikut 1.886,40 J, 1.885,90 J, dan 1.880,50 J. Besarnya nilai *energy absorption* dipengaruhi oleh nilai  $P_{mean}$  dan perubahan panjang pada spesimen. Hal ini sesuai dengan persamaan (2-2). Nilai  $P_{mean}$  pada ketiga model secara berurutan adalah 50.709,40 N, 50.695,97 N, dan 50.550,94 N yang menunjukkan bahwa urutan besarnya *energy absorption* sesuai dengan urutan nilai  $P_{mean}$ . Nilai perubahan panjang juga berpengaruh pada nilai *energy absorption*, tetapi karena nilai perubahan panjang pada ketiga model tidak ada perbedaan yang signifikan maka perubahan panjang bisa diasumsikan sama.

#### 4.4 Diagram Besar Sudut *Initial Fold* Terhadap *Energy Absorption* Pada *Crash Box*

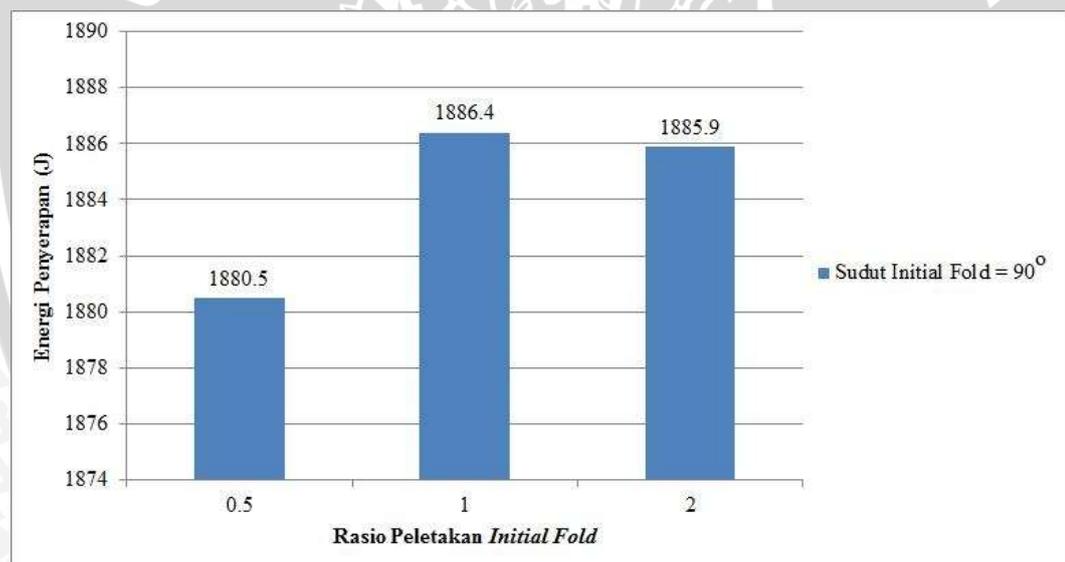
Besar sudut *initial fold* pada model *crash box* berpengaruh pada besar *energy absorption* yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh sudut yang terbentuk pada geometri *crash box* mempengaruhi besar atau kecilnya nilai momen inersia. Pada model Velmurugan dan Talib mempunyai nilai momen inersia yang lebih besar daripada kesembilan model lainnya. Hal ini disebabkan oleh diameter yang *uniform*, sedangkan pada kesembilan model lainnya yaitu model ke-1 sampai ke-9 mempunyai nilai diameter yang tidak *uniform* karena adanya penambahan *initial fold* dengan diameter bagian atas *crash box* yang lebih kecil daripada bagian bawah. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (4-1) bahwa perubahan nilai diameter akan berpengaruh pada nilai momen inersia. Sesuai dengan persamaan (4-2), nilai momen inersia akibat perubahan nilai diameter akan berpengaruh pada besarnya *energy absorption*, meskipun semua model mempunyai bentuk penampang yang sama yaitu lingkaran. Besarnya *energy absorption* pada *crash box* variasi sudut dengan rasio peletakan *initial fold* 1/2 dapat ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Diagram Besar Sudut Terhadap *Energy Absorption* Pada Rasio Peletakan *Initial Fold* 1/2

Gambar 4.7 menunjukkan besarnya *energy absorption* pada rasio peletakan *initial fold* 1/2 dengan variasi sudut 45°, 60°, dan 90°. Nilai *energy absorption* dengan variasi sudut secara berurutan yaitu 1.065,4 J, 1.185 J, 1.880,5 J. Momen inersia pada *crash box* dengan sudut *initial fold* sebesar 90° lebih kecil daripada *crash box* dengan sudut *initial fold* 45° dan 60°. Apabila diurutkan berdasarkan besarnya nilai momen inersia dari yang tertinggi yaitu *crash box* dengan sudut *initial fold* 45°, 60°, dan 90°. Semakin kecil nilai momen inersia membuat nilai  $P_{max}$  semakin kecil karena terjadi konsentrasi tegangan di daerah *initial fold* yang mengakibatkan *crash box* mudah mengalami *folding* sehingga nilai *energy absorption* meningkat.

#### 4.5 Diagram Rasio Peletakan *Initial Fold* Terhadap *Energy Absorption* Pada *Crash Box*



Gambar 4.8 Diagram Rasio Peletakan Terhadap *Energy Absorption* Pada Sudut *Initial Fold* 90°

Gambar 4.8 menunjukkan besarnya *energy absorption* pada sudut *initial fold* 90° dengan variasi rasio peletakan *initial fold* 1/2, 1/1, dan 2/1. Nilai *energy absorption* dengan variasi sudut secara berurutan yaitu 1.880,5 J, 1.886,4 J, 1.885,9 J. Nilai momen inersia dan panjang yang bervariasi mempengaruhi nilai kekakuan yang sesuai dengan persamaan (4-3). Kekakuan pada struktur juga dapat

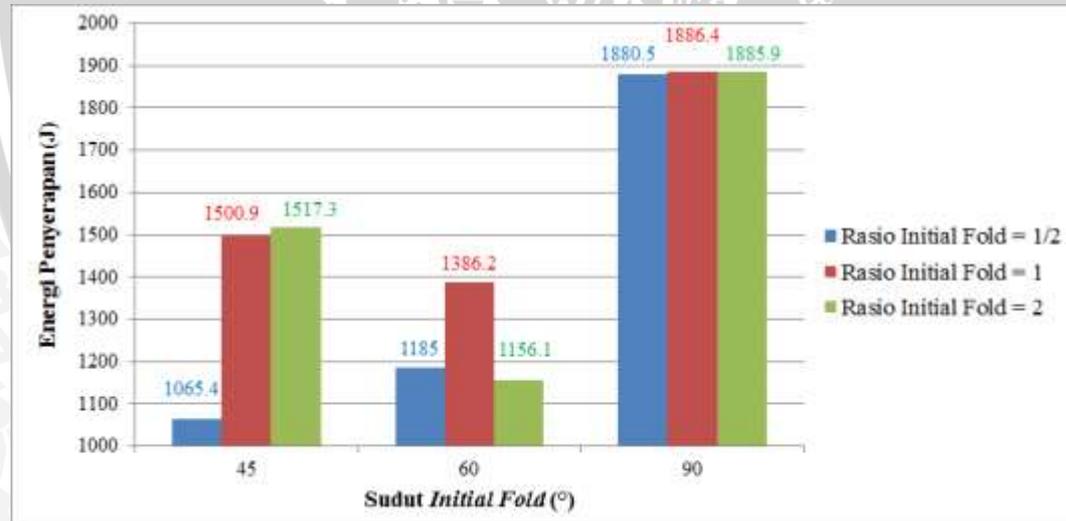
mempengaruhi besarnya nilai *energy absorption* yang dapat dituliskan dalam persamaan (4-4) sebagai berikut :

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (\text{Gere, 2004})(4-3)$$

$$P = k\delta \quad (\text{Sears, 1962})(4-4)$$

*Crash box* dengan rasio peletakan *initial fold* 1/2 mempunyai nilai kekakuan paling besar karena bagian bawah yang panjang, sehingga *crash box* mengalami deformasi yang tidak sempurna, sedangkan rasio 2/1 mempunyai nilai kekakuan yang paling kecil karena bagian bawah paling pendek yang menyebabkan *crash box* mengalami deformasi dalam *bending mode*. *Crash box* dengan rasio peletakan *initial fold* 1/1 mempunyai nilai kekakuan di antara rasio 1/2 dan rasio 2/1, yang dapat mengalami deformasi sempurna dan *axial mode* sehingga mampu menghasilkan *energy absorption* paling tinggi di antara lainnya.

#### 4.6 Diagram Besar Sudut *Initial Fold* Terhadap *Energy Absorption* Pada Variasi Model

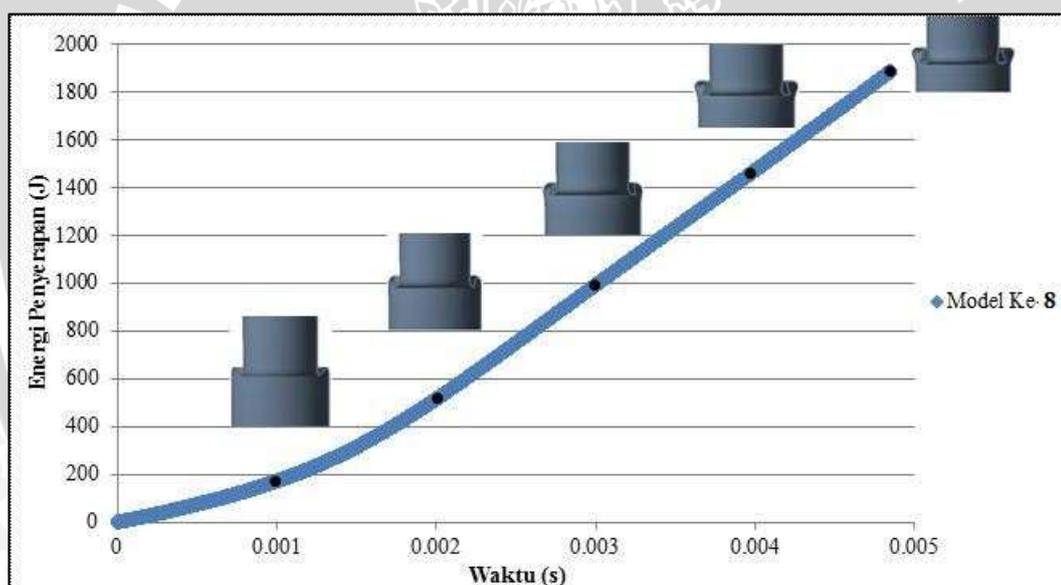


Gambar 4.9 Diagram Besar Sudut *Initial Fold* Terhadap *Energy Absorption* Pada Variasi Model

Gambar 4.9 menunjukkan besarnya *energy absorption* pada variasi model dengan variasi sudut 45°, 60°, dan 90°. Tiga nilai *energy absorption* dari terbesar dengan variasi sudut secara berurutan yaitu 1.886,4 J, 1.885,9 J, 1.880,5 J. Ketiga nilai terletak pada *crash box* dengan sudut *initial fold* 90°. Momen inersia pada

*crash box* dengan sudut *initial fold* sebesar  $90^\circ$  lebih kecil daripada *crash box* dengan sudut *initial fold*  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ . Apabila diurutkan berdasarkan besarnya nilai momen inersia dari yang tertinggi yaitu *crash box* dengan sudut *initial fold*  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$ . Model ke-10 merupakan *crash box* dengan besar sudut *initial fold*  $90^\circ$  dan rasio peletakan *initial fold* 1/1 sehingga dapat mengalami deformasi sempurna dan *axial mode*. Dengan nilai momen inersia kecil membuat nilai  $P_{max}$  semakin kecil karena terjadi konsentrasi tegangan di daerah *initial fold* yang mengakibatkan model ke-8 mudah mengalami *folding* sehingga nilai *energy absorption* meningkat.

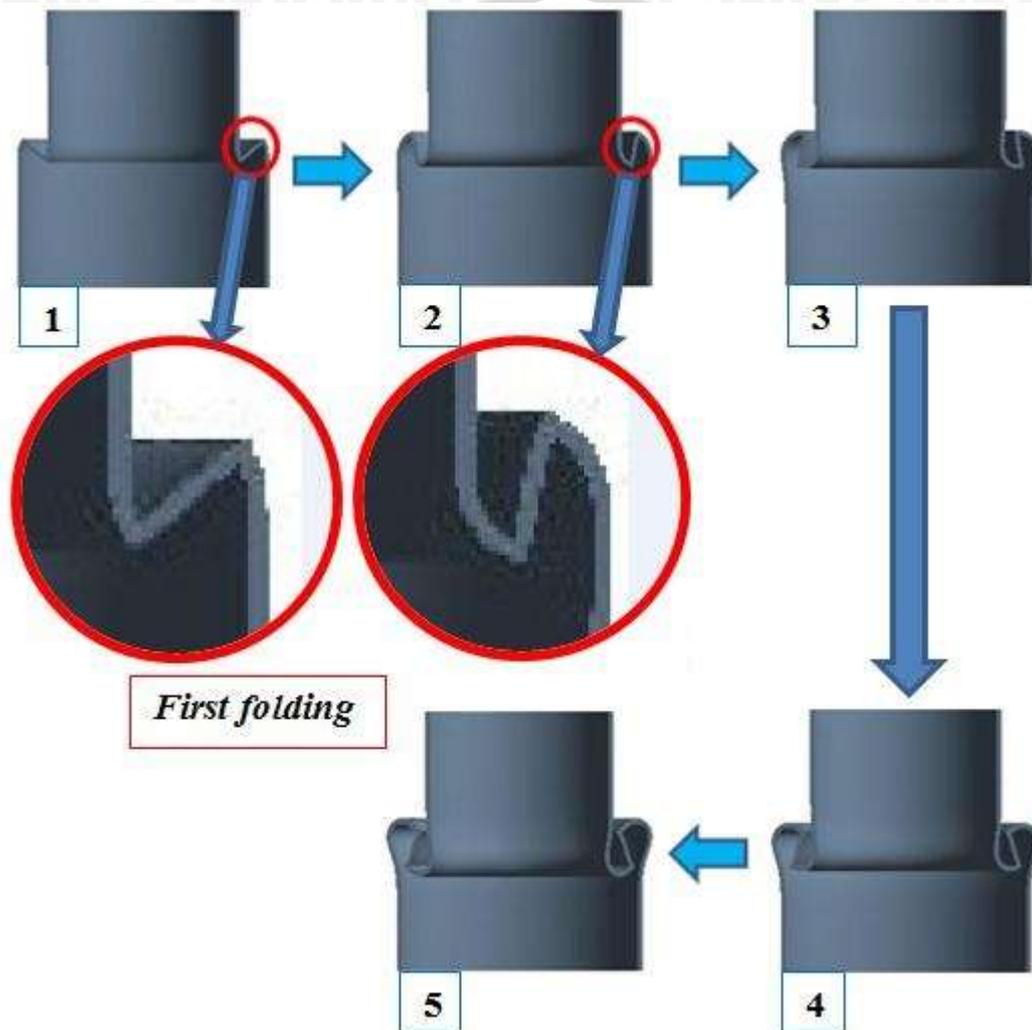
#### 4.7 Grafik Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformasi dan *Energy Absorption*



Gambar 4.10 Grafik Waktu Pembebanan Terhadap Pola Deformasi dan *Energy Absorption* Pada Model Ke-8

Gambar 4.10 menunjukkan grafik waktu pembebanan terhadap pola deformasi dan *energy absorption* pada model ke-8 bahwa pola deformasi dapat diamati pada setiap waktu (pada data ini diambil selang waktu 0,001 s) dan semakin meningkatnya waktu pembebanan, maka *energy absorption* semakin meningkat. Kurva waktu-*energy absorption* cenderung meningkat dengan garis lurus, tetapi ada lekukan yang terjadi pada selang waktu 0-0,002 s. Hal ini

disebabkan oleh besarnya gaya yang dibutuhkan untuk melakukan *folding* pertama sangat besar. *Folding* pertama terjadi pada *initial fold* bagian dalam yang selanjutnya diikuti oleh *folding* pada *initial fold* bagian luar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Proses *Folding* Pada Model Ke-8

#### 4.8 *Crash Force Efficiency*

$P_{mean}$  dan  $P_{max}$  merupakan dua parameter utama untuk mendeskripsikan karakteristik *energy absorption*. Semakin besar nilai  $P_{mean}$  maka semakin besar *energy absorption*. Di lain sisi untuk memperbesar nilai *energy absorption* harus memperkecil nilai  $P_{max}$ . Hal ini sesuai dengan persamaan (4-4). *Crash Force Efficiency* (CFE) merupakan besarnya persentase hasil perbandingan dari dua

parameter utama di atas. Semakin besar nilai CFE menunjukkan bahwa *crash box* memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap energi. Pengolahan data hasil simulasi mengenai CFE ditunjukkan pada Tabel 4.4.

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \times 100\% \text{ (Marzbanrad, 2014 : 5)(4-4)}$$

Keterangan :

CFE = efisiensi gaya tumbukan (%)

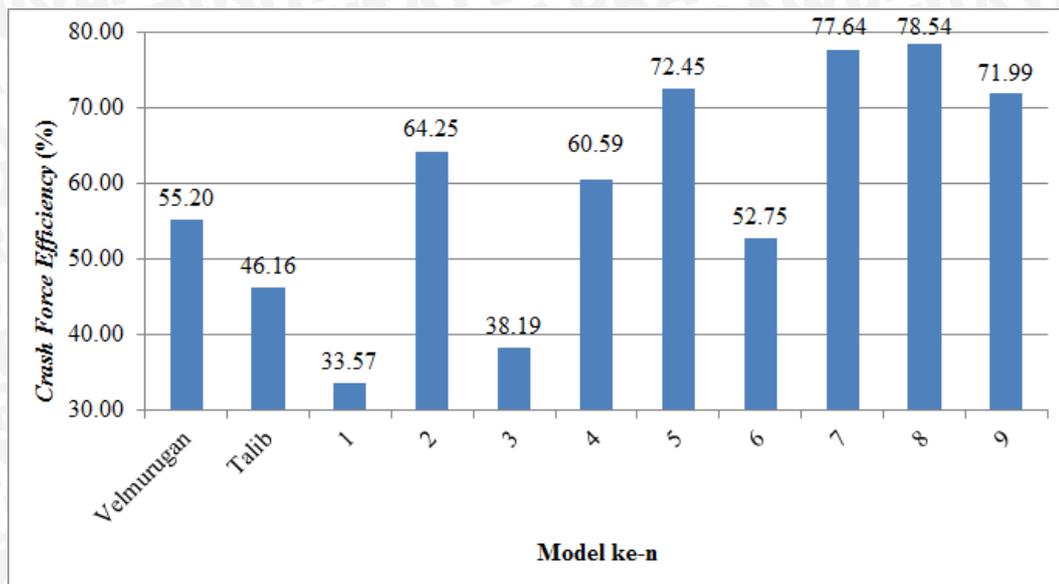
$P_{mean}$  = gaya rata-rata (N)

$P_{max}$  = gaya maksimal (N)

Tabel 4.4 *Crash Force Efficiency* Pada Variasi Model

Model ke-n	$\delta$ (mm)	$P_{max}$ (N)	$P_{mean}$ (N)	CFE (%)
Velmurugan	37,2002	123.100	67.948,56	55,20
Talib	37,2003	161.890	74.727,90	46,16
1	37,1997	85.325	28.640,02	33,57
2	33,4373	69.860	44.887,00	64,25
3	36,7029	108.240	41.340,06	38,19
4	37,1893	52.593	31.864,00	60,59
5	<b>35,5792</b>	<b>53.775</b>	<b>38.960,97</b>	<b>72,45</b>
6	37,2001	58.914	31.077,88	52,75
7	<b>37,2001</b>	<b>65.107</b>	<b>50.550,94</b>	<b>77,64</b>
8	<b>37,2002</b>	<b>64.569</b>	<b>50.709,40</b>	<b>78,54</b>
9	37,2002	70.422	50.695,97	71,99

Data dari Tabel 4.4 dapat dibuat dalam bentuk diagram batang yang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Diagram Variasi Model Terhadap CFE

Berdasarkan data pada Gambar 4.12 menunjukkan diagram variasi model terhadap CFE bahwa 3 nilai CFE dari yang terbesar adalah model ke-8, 7, dan 5. Nilai CFE dari ketiga model tersebut secara berurutan yaitu 78,54%, 77,64%, dan 72,45%. Besarnya nilai CFE dipengaruhi oleh  $P_{mean}$  dan  $P_{max}$ . Hal ini sesuai dengan persamaan (4-4) bahwa semakin besar nilai  $P_{mean}$  dan semakin kecil nilai  $P_{max}$  menyebabkan nilai CFE akan semakin besar dan sebaliknya, semakin kecil  $P_{mean}$  dan semakin besar nilai  $P_{max}$  menyebabkan nilai CFE semakin kecil.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

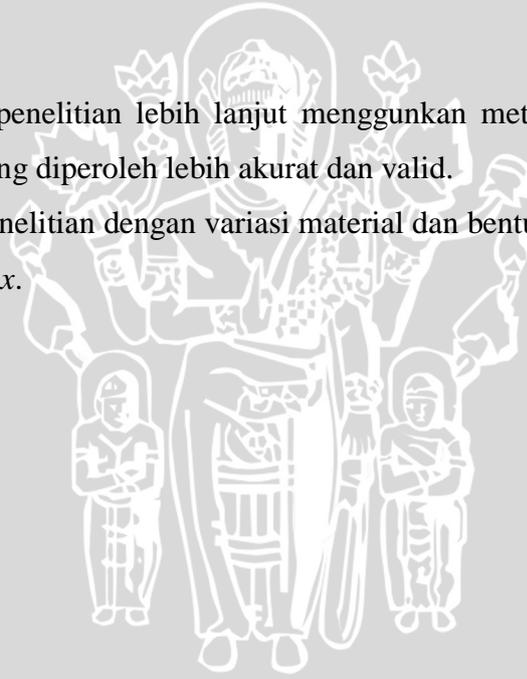
### 5.1 Kesimpulan

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

1. Peningkatan besar sudut *initial fold* dapat mengakibatkan pola deformasi *concertina* pada *axial mode* dan meningkatkan energi penyerapan pada *crash box*.
2. Peningkatan rasio peletakan *initial fold* dapat mengakibatkan pola deformasi *concertina* pada *axial mode* dan meningkatkan energi penyerapan pada *crash box*.

### 5.2 Saran

- a. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan metode eksperimental nyata agar data yang diperoleh lebih akurat dan valid.
- b. Pengembangan penelitian dengan variasi material dan bentuk *initial fold* yang lain pada *crash box*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. 2014. *Jumlah Kecelakaan, Korban Mati, Luka Berat, Luka Ringan, dan Kerugian Materi yang Diderita Tahun 1992-2013*. Indonesia : Badan Pusat Statistik.
- Beer, F. P. et al. 2012. *Mechanics of Materials, 6<sup>th</sup> Edition*. New York : McGraw-Hill.
- Gere, J.M. 2004. *Mechanics of Materials, 6<sup>th</sup> Edition*. New York : Thomson Learning, Inc.
- Grandin, Hartley. 1986. *Fundamentals of The Finite Element Method*. New York : Macmillan Publishing Company.
- Han, D.C. and S.H. Park. 1999. *Collapse Behaviour of Square Thin-Walled Columns Subjected to Oblique Loads, Journal of Thin-Walled Structures* 35 : 167-184.
- Marzbanrad, J. and A. Keshavarzi. 2014. *A Numerical and Experimental Study on The Crash Behavior of The Extruded Aluminum Crash Box With Elastic Support. Latin American Journal of Solid and Structures*, V. 11, n. 8.
- Paul, P. et al. 2004. *Vehicle Crashworthiness 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.
- Talib, N. Y. 2013. *Analisis Penyerapan Energi dan Deformasi Crash Box dengan Variasi Diameter dan Panjang Pada Uji Dropped Weight Impact*. Malang : Jurnal Rekayasa Mesin.
- 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. and R. Muralikannan. 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.