

repository.ub.ac.id

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

Refqi Kemal Habib, Moch. Agus Choiron, Anindito Purnowidodo

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jalan Mayjen Haryono 167 Malang 65145 -Telp (0341)567886
Email: rkemalhabib@gmail.com

ABSTRAK

Dalam beberapa tahun terakhir, jumlah kendaraan bermotor terutama mobil selalu mengalami peningkatan. Peningkatan jumlah mobil ini juga diikuti dengan peningkatan jumlah kasus kecelekaan dan jumlah korban meninggal. Hal inilah yang membuat penelitian peningkatan sistem keamanan pada kendaraan bermotor gencar dilakukan. Salah satu jenis sistem keamanan yang sedang trend adalah *crash box*. *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*. Dari penelitian ini, diperoleh hasil bahwa pola deformasi yang terbentuk pada semua model *crash box* adalah pola deformasi model *axial axisymmetric* (Concertina) dan energi penyerapan terbesar ada di *crash box* dengan kecepatan 15 mm/s dan model material *bilinear isotropic hardening*.

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

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, jumlah kendaraan bermotor terutama mobil selalu mengalami peningkatan. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) (1), jumlah mobil penumpang dari tahun 2010 hingga 2014 selalu meningkat tiap tahunnya sebesar 9,11 % per tahunnya. Peningkatan jumlah mobil ini juga diikuti dengan peningkatan jumlah kasus kecelekaan dan jumlah korban meninggal. Korlantas POLRI (1) mencatat jumlah kasus kecelekaan dan jumlah korban meninggal dari tahun 2010 hingga 2014

masing-masing meningkat sebesar 9,59% per tahun dan 9,24% per tahun. Dari data tersebut, kita sebagai peneliti harus bisa meningkatkan sistem keamanan pada kendaraan bermotor sehingga jumlah kasus kecelekaan dan jumlah korban meninggal dapat di minimalisir.

Salah satu jenis sistem keamanan yang sedang trend adalah *crash box*. *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.

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 dengan software simulasi berbasis FEM (*finite element method*). *Crash box* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *initial fold crash box*. Pemberian *initial fold* ini memberikan keuntungan terbentuknya *folding* pada letak *initial fold* sehingga mempermudah terbentuknya deformasi pada *crash box* (4).

Dengan perkembangan teknologi yang semakin maju, simulasi numerik dapat digunakan untuk memprediksi besarnya penyerapan energi dan pola deformasi dari *crash box* sebelum dilakukannya penelitian secara eksperimental. Simulasi numerik dilakukan guna mengurangi *trial and error* pada penelitian eksperimental, sehingga dapat mengurangi biaya dalam penelitian.

METODE

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 *crash box* dari jurnal dan buku. Kemudian dilakukan pemodelan dan simulasi

numerik menggunakan software berbasis FEM pada model-model *crash box* yang sudah ditentukan pada tabel 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*.

Dalam penelitian ini, peneliti memvariasikan kecepatan tumbukan (*crosshead*) dan model material dari *crash box*. Kecepatan *crosshead* adalah sebesar 5 mm/s, 10 mm/s, dan 15 mm/s, sedangkan model material yang dipakai adalah model material *bilinear isotropic hardening* dan model material Johnson-Cook.

Tabel 1. Variasi Pemodelan *Crash box*

No	Model <i>Crash box</i>	Kecepatan <i>crosshead</i>	Model Material
1	IFCB B5	5 mm/s	<i>Bilinear isotropic hardening</i>
2	IFCB B10	10 mm/s	<i>Bilinear isotropic hardening</i>
3	IFCB B15	15 mm/s	<i>Bilinear isotropic hardening</i>
4	IFCB JC5	5 mm/s	Johnson-Cook
5	IFCB JC10	10 mm/s	Johnson-Cook
6	IFCB JC15	15 mm/s	Johnson-Cook

Tabel 2. *Material properties crash box* (5)

A36 Steel			
<i>Density</i> ()	7850 kg/m ³	<i>Thermal Softening Exponent</i> (M)	0,323
<i>Modulus Young</i> (E)	200 GPa	<i>Melting Temperature</i> (T _{melt})	1773 K
<i>Poisson's Ratio</i> (ν)	0,2619	<i>Reference Strain Rate</i> ()	1,0 s ⁻¹
<i>Yield Stress Constant</i> (A)	146,7 MPa	<i>Specific Heat</i> (C _p)	486 J/kg.K
<i>Hardening Constant</i> (B)	896,9 MPa	<i>Elongation at Break</i> (in 2 in)	23.0 %
<i>Hardening Exponent</i> (N)	0,320	<i>Yield Strenght</i>	400 MPa
<i>Strain Rate Constant</i> (C)	0,033	<i>Tangent Modulus</i>	1500 MPa

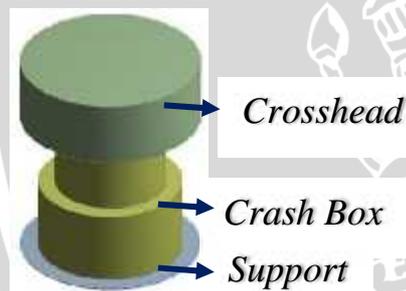
Tabel 3. *Material properties support*

<i>Density</i> ()	7850 kg/m ³
<i>Modulus Young</i> (E)	200 GPa
<i>Poisson's Ratio</i> (ν)	0,3
<i>Yield Strenght</i>	434 MPa
<i>Tangent Modulus</i>	1450 MPa
<i>Specific Heat</i> (C _p)	486 J/kg.K

Tabel 4. *Material properties crosshead* (5)

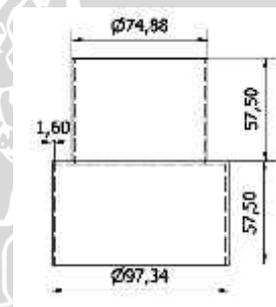
<i>Density</i> ()	182140 kg/m ³
<i>Modulus Young</i> (E)	200 GPa
<i>Poisson's Ratio</i> (ν)	0,3
<i>Yield Strenght</i>	434 MPa
<i>Tangent Modulus</i>	1450 MPa
<i>Specific Heat</i> (C _p)	486 J/kg.K

1. Simulation Setup



Gambar 1. Pemodelan *Crash Box*

Dalam penelitian ini, *crash box* ditumpu oleh sebuah plat yang selanjutnya disebut *support* dan di tekan oleh *crosshead*. *crosshead* ini memiliki berat sebesar 275 kg. *crosshead* ini akan menekan *crash box* dengan kecepatan yang telah ditentukan pada tabel 1 hingga *crash box* terdeformasi. Untuk gambarannya, dapat dilihat pada gambar 1. *Crash box* yang digunakan dalam penelitian adalah *crash box* dengan initial fold dengan sudut antar segmen 90° dan rasio panjang antar segmen 1:1 (2). Dimensi *crash box* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Dimensi *Crash Box*

Material *crash box* yang digunakan dalam penelitian ini adalah A36 Steel dengan *properties* material seperti yang di sebutkan di tabel 2, Untuk *support* material *properties*nya seperti yang disebutkan pada tabel 3, dan untuk *crosshead* material *properties*nya seperti yang disebutkan pada tabel 4.

2. Meshing

Pada penelitian, ukuran meshing (elemen) yang digunakan adalah sebesar 1 mm untuk *crash box* dan *automeshing* untuk *crosshead* dan *support*.

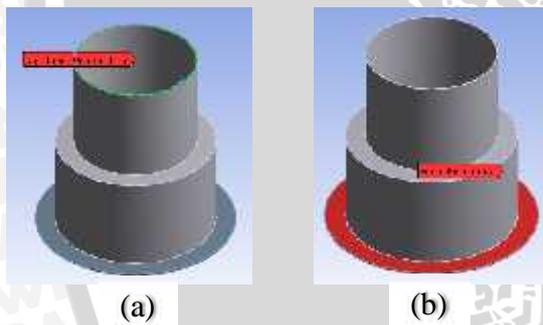
3. Pemodelan Pembebanan

Posisi *crosshead* dalam simulasi ini terpisah dengan jarak 1 mm. *crosshead*

dan support dimodelkan rigid body sedangkan *crash box* sebagai elastic body. *crosshead* dengan masa 275kg bergerak dengan kecepatan sesuai dengan tabel 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 1.

4. Lokasi pengambilan data

Besarnya nilai deformasi dan *force* / gaya diambil pada tempat seperti yang dapat dilihat pada gambar 3. 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.



Gambar 3. Lokasi Pengambilan Data (a) *Deformation* dan (b) *Force Reaction*

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pola Deformasi

Tabung berdinding tipis atau *crash box* memiliki empat kemungkinan pola deformation jika dikenai pembebanan *quasi-static* yakni Concertina, Diamond, mixed mode, dan Euler buckling. Pola deformation dari masing-masing model *crash box* (tabel 1) dapat dilihat pada tabel 5.

Dari pengamatan secara visual pada tabel 5, dapat kita lihat bahwa semua

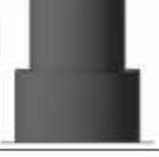
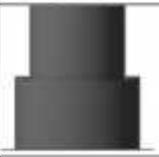
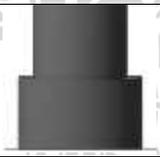
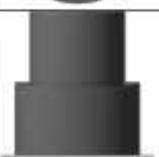
model *crash box* mengalami *folding* / deformasi pertama kali di bagian *initial fold*-nya pada saat deformation mencapai 2,30 mm. Dari keseluruhan pola deformasi yang terbentuk adalah jenis deformasi *axial mode concertina*. Hal ini dikarenakan nilai *normal stress* searah sumbu x, *normal stress* searah sumbu y, dan *normal stress* searah sumbu z yang hampir sama pada tiap titik yang saling simetris atau saling berhadapan, sehingga *crash box* terdeformasi secara *axysimetric*. Hal ini dapat dilihat dari data hasil simulasi (tabel 6) yang diambil dari titik-titik yang ditunjukkan pada gambar 4. 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*. Vector principal stress dapat dilihat pada gambar 5.

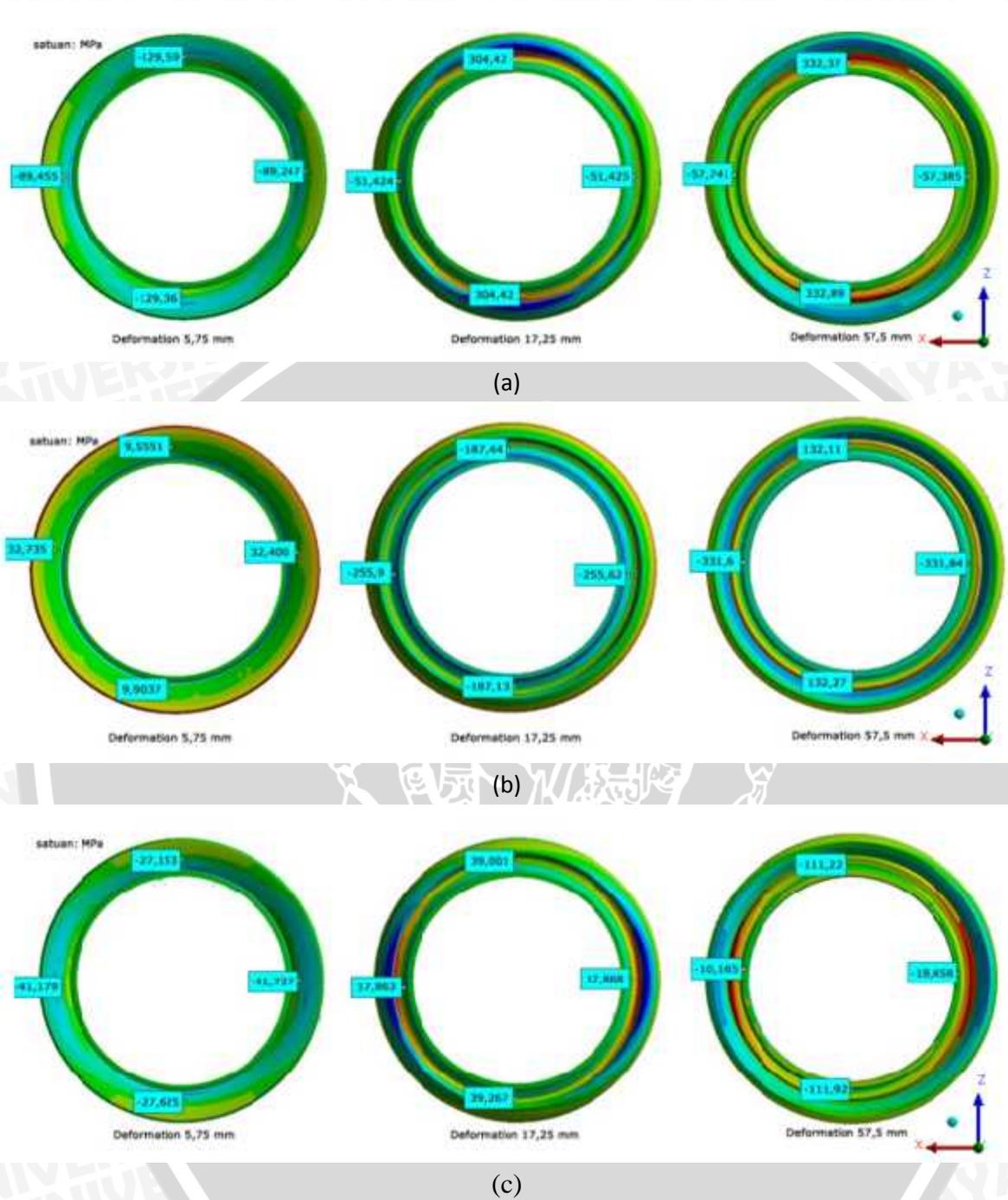
Proses deformasi *crash box*, dapat dilihat pada gambar 6. Mula-mula *crash box* mengalami deformasi di *initial fold* bagian dalamnya (Proses 2). Hal ini dikarenakan adanya perubahan penampang pada *crash box* sehingga tegangan terbesar terjadi pada bagian *initial fold*. Kemudian *Crash box* terdeformasi 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 maksimum 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*

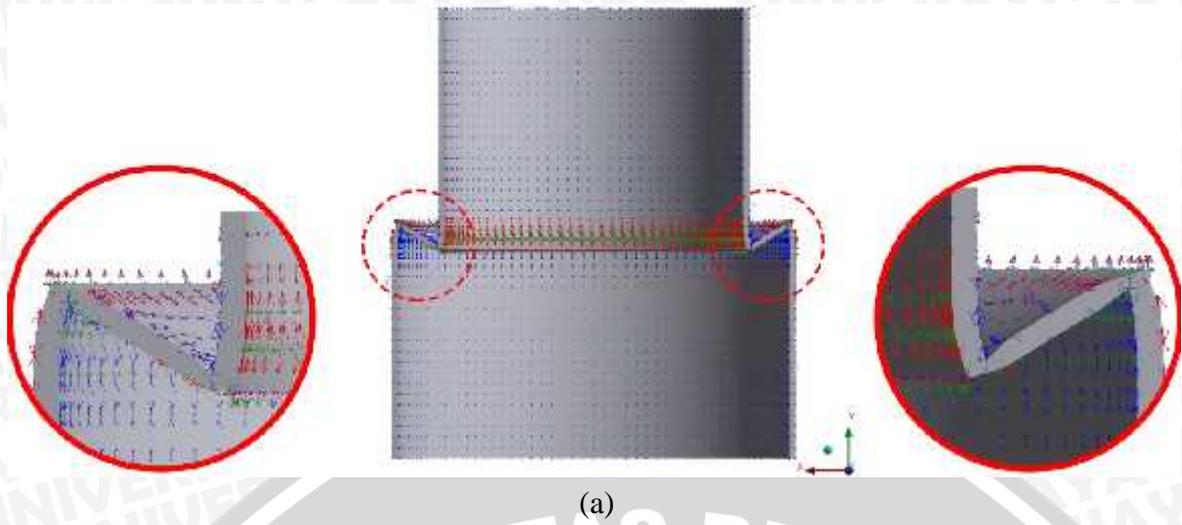
membentuk lekukan ke dalam pada segmen ke-1. Kemudian pada proses ke-5, *crash box* mulai membentuk lekukan ke luar pada segmen ke-2 dan pada proses ke-5, lekukan ke luar pada segmen ke-2 semakin terlihat jelas.

Tabel 5. Pola Deformasi *Crash box* 1

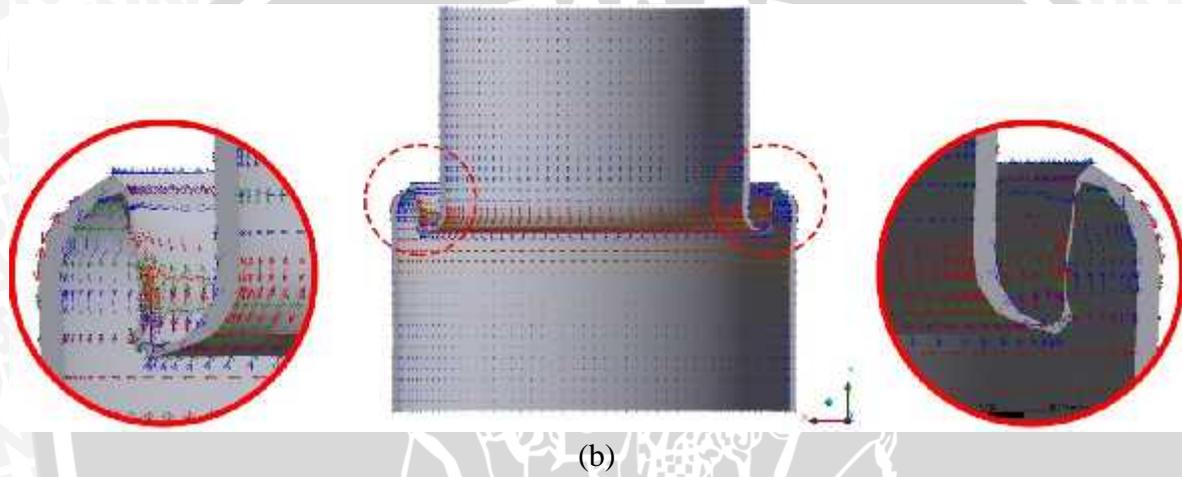
<i>Crash box</i>	Deformation ke-			<i>Crash box</i>	Deformation ke-			
	2,30 mm	17,25 mm	47,50 mm		2,30 mm	17,25 mm	47,50 mm	
IFCB B5				IFCB B5				
					IFCB B5			
	Concertina	Concertina	Concertina			IFCB B5	Concertina	Concertina
IFCB B10				IFCB B10				
					IFCB B10			
	Concertina	Concertina	Concertina			IFCB B10	Concertina	Concertina
IFCB B15				IFCB B15				
					IFCB B15			
	Concertina	Concertina	Concertina			IFCB B15	Concertina	Concertina



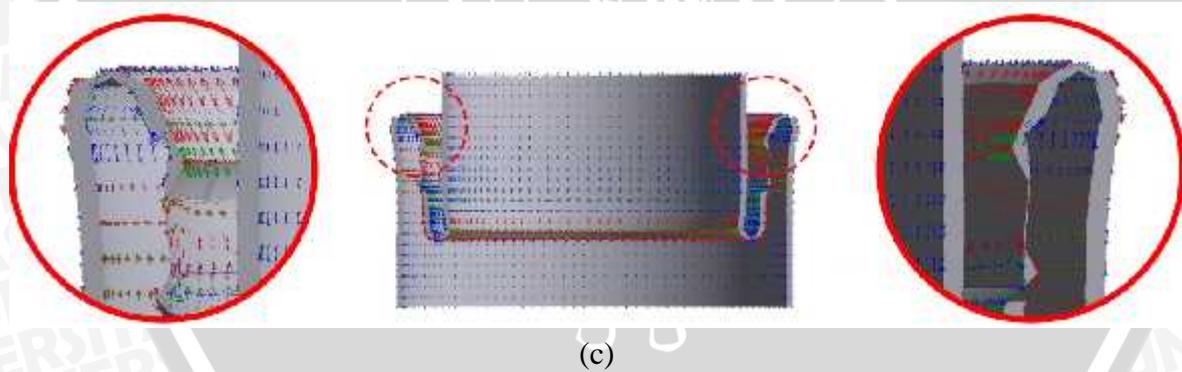
Gambar 4. Normal Stress (a) searah sumbu x, (b) searah sumbu y, (c) searah sumbu z



(a)

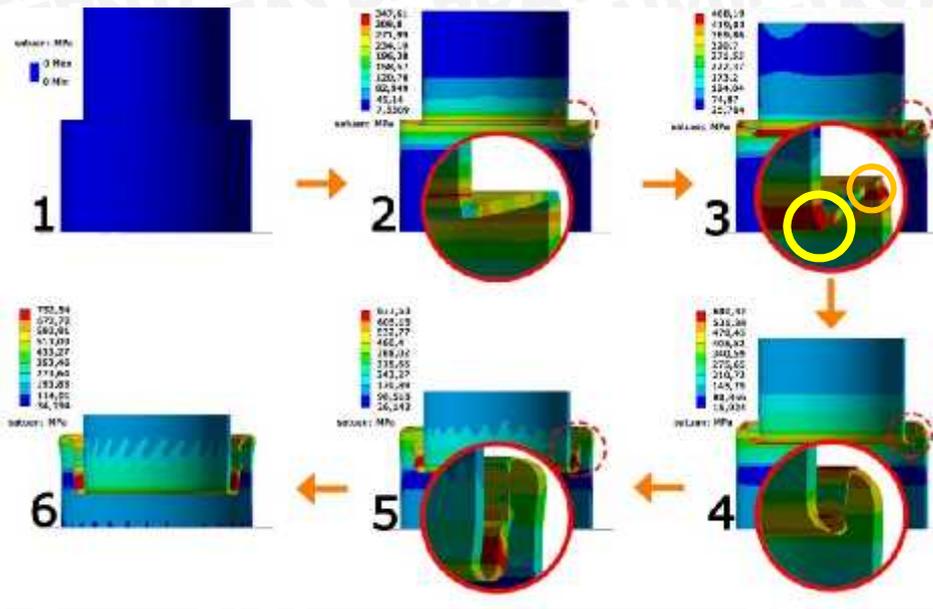


(b)



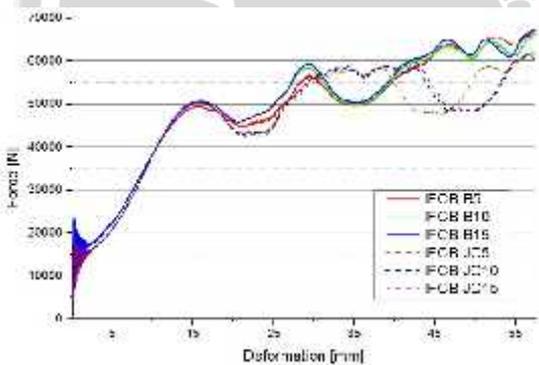
(c)

Gambar 5. *Vector Principal Stress* (a) Pada Deformasi Ke-5,75 mm, (b) Pada Deformasi Ke-17,25 mm, (c) Pada Deformasi Ke-57,5 mm



Gambar 6. Proses deformasi pada *Crash box* Model IFCB JC15

2. Energi Penyerapan



Gambar 7. Grafik Hubungan Force terhadap Deformation

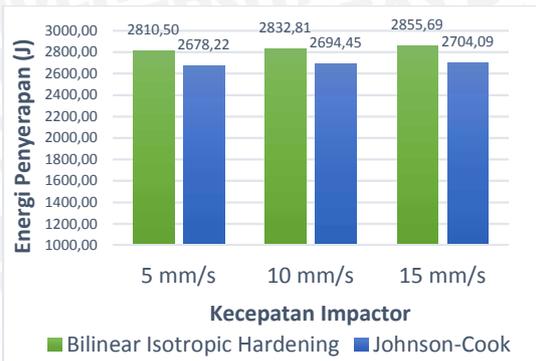
Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan force terhadap *deformation* pada semua model *crash box*. Grafik ini diperoleh dengan menggabungkan grafik hubungan *force* terhadap waktu dan grafik hubungan *deformation* terhadap waktu yang diperoleh dari *software* simulasi berbasis FEM. Dari gambar 6 dapat dilihat 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 *deformation* yang sedikit dibutuhkan *force* yang sangat besar untuk melakukan *deformation*.

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 grafik hubungan antara *force* dan *deformation*. Besarnya nilai energi penyerapan pada semua model *crash box* dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Data Energi Penyerapan

Model Material	Energi Penyerapan (kJ)
IFCB B5	2810,50
IFCB B10	2832,81
IFCB B15	2855,69
IFCB JC5	2678,22
IFCB JC 10	2694,45
IFCB JC15	2704,09



Gambar 8. Grafik Hubungan Kecepatan Crosshead Terhadap Energi Penyerapan

Gambar 8 merupakan grafik hubungan antara kecepatan *crosshead* terhadap energi penyerapan. Dari gambar 8 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 *crosshead*, maka nilai force yang dilakukan semakin tinggi sehingga nilai P_{mean} akan semakin tinggi pula. P_{mean} yang semakin tinggi akan mengakibatkan nilai energi penyerapan akan semakin tinggi pula. Hal ini sesuai dengan persamaan (1), (2), dan (3),

$$F_l = m \cdot \frac{v}{t} + c \cdot v + k \cdot \delta \quad (1)$$

$$P_{mean} = \frac{\sum F_l}{\sum t} \quad (2)$$

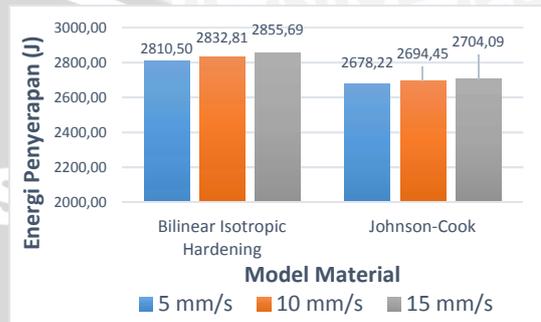
atau

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

dimana:

- F = force (N)
- m = massa *crosshead* (kg)
- v = kecepatan tumbukan (mm/s)
- t = waktu pembebanan (s)
- c = damping coefficient (kg/s)
- k = spring constant (N/m)

- $\sum F_l$ = jumlah gaya pada siklus perhitungan ke-i (N)
- i = total siklus perhitungan
- P = force reaction (N)
- δ_{max} = total deformation (mm)
- δ = deformation (mm)
- E_{abs} = Energi penyerapan (J).



Gambar 9. Grafik Hubungan Model Material Terhadap Energi Penyerapan

Gambar 9 merupakan grafik hubungan antara model material *crash box* terhadap energi penyerapan. Dari gambar 9 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 kondisi quasi-static, pengujian dilakukan 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 10) yang diperoleh dari hasil plot rumus persamaan (4) dan (5). Dari gambar 10, 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 (6), (1), (2), dan (3).

$$\sigma_{eq} = \left[E_T \times \left(\frac{Elongationat2.in}{100} - \epsilon_{yield} \right) \right] + \sigma_{yield} \quad (4)$$

$$\sigma_{eq} = \left[A + B(\epsilon_{eff})^N \right] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^M \right] \quad (5)$$

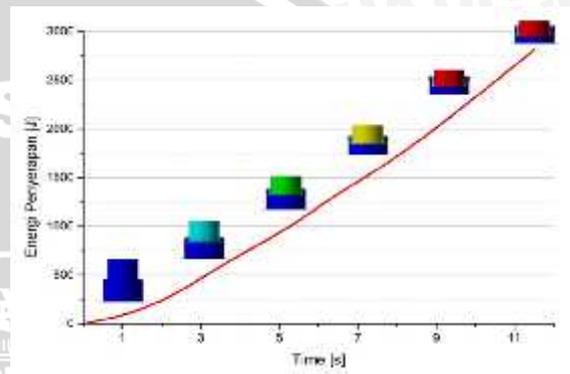
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

dimana:

- E_T = Tangent modulus (Pa)
- ϵ_{yield} = yield strain (%)
- $\sigma_{ultimate}$ = ultimate strenght (Pa)
- σ_{yield} = yield strenght (Pa)
- σ_{eq} = *equivalent stress* (Pa)
- A = *yield stress constant* (Pa)
- B = *hardening constant* (Pa)
- ϵ_{eff} = regangan plastis efektif
- C = *strain rate constant*
- $\dot{\epsilon}^*$ = laju regangan plastis
- T_{melt} = titik leleh material (K)
- T_0 = suhu ruang (K)
- σ = Tegangan (Pa)
- A = Luas Penampang (m²)



Gambar 10. Grafik Tegangan-Regangan Pada Model Material



Gambar 11. Grafik Hubungan Waktu Pembebanan Terhadap Energi Penyerapan dan Pola Deformasi

Gambar 11 menunjukkan grafik hubungan waktu pembebanan terhadap energi penyerapan dan pola *deformation* pada delapan 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 6.

KESIMPULAN DAN SARAN

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 axisymmetric (Concertina)*.

2. Saran

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

DAFTAR PUSTAKA

- (1) Badan Pusat Statistik. 2015. *Statistik Transportasi Darat 2014*. Indonesia: Badan Pusat Statistik.
- (2) Fauza, Ilman. 2015. Analisis Pola Deformasi dan Energi Penyerapan Pada *initial Fold Crash box* Menggunakan Metode Frontal Crash Test. Malang : Jurnal Rekayasa Mesin.
- (3) 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
- (4) Sohn, S.M. et al. 2007. *Evaluation of The Crash Energy Absorption of Hydroformed Bumper Stays*. *Journal of Material Processing Technology* 187 : 283-286.
- (5) 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