

# The Overview of Impact Energy Absorber Module on Plastic Deformation Mechanisms

Yuwono Budi Pratiknyo<sup>1,\*</sup> dan Rachman Setiawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung - Bandung

\*Korespondensi: ypratiknyo@gmail.com

**Abstract.** The impact energy absorber module is one of the most important components in the application of crashworthiness technology to improve the safety of transportation facilities. The effective mechanism for absorbing impact energy is through the modular deformation of the module structure. The effect of impact energy absorber, the impact energy and impact force which passed to the main structure of the vehicle will be limited during a collision, so the impact of collision on passengers or cargo can be minimized. Since several decades ago, the various types of module mechanisms for impact energy absorber had been developed through plastic deformation, i.e. flattening tube, tube axial folding, tube inversion, tube expansion, tube axial splitting, honeycomb and tubular rings, with different material and dimensions. In this paper, that mechanisms are compared critically. Specific energy, stroke efficiency/ volumetric efficiency, and crushing force efficiency as a reference parameter. In some cases, re-analysis is required to obtain the value of comparison parameters. The comparison results are presented in a characteristic map, which is expected to be useful in the process of selecting the type of mechanism and module geometry. The characteristic maps are further demonstrated to select the type of impact absorbing energy module for passenger trains.

**Abstrak.** Modul peredam energi tumbukan adalah salah satu komponen paling penting pada aplikasi teknologi crashworthiness untuk meningkatkan keamanan dari fasilitas transportasi. Mekanisme efektif untuk menyerap energi tumbukan adalah melalui deformasi modular dari struktur modul. Pengaruh dari peredam energi tumbukan, energi tumbukan dan gaya tumbuk yang disalurkan menuju struktur utama kendaraan akan dibatasi saat terjadi tabrakan, sehingga dampak dari tabrakan pada penumpang atau muatan dapat diminimalisir. Sejak beberapa dekade lalu, beberapa jenis mekanisme modul untuk peredam energi tumbukan telah dikembangkan melalui deformasi plastis (contoh: flattening tube, tube axial folding, tube inversion, tube expansion, tube axial splitting, honeycomb, dan tubular rings dengan material dan dimensi berbeda). Pada penelitian ini, mekanisme-mekanisme tersebut dibandingkan. Parameter yang digunakan sebagai rujukan adalah energi spesifik, efisiensi langkah/efisiensi volumetrik, dan efisiensi gaya peremuk. Pada beberapa kasus, analisis ulang diperlukan untuk mendapatkan nilai dari beberapa parameter perbandingan. Hasil perbandingan ditunjukkan pada peta karakteristik, yang diharapkan dapat berguna dalam proses pemilihan jenis mekanisme dan geometri modul. Peta karakteristik didemonstrasikan dalam kasus pemilihan modul peredam energi tumbukan untuk kereta penumpang.

**Kata kunci:** penyerap energi, energi impak, crashworthiness

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

## Pendahuluan

Moda transportasi massal, seperti kereta api telah menjadi andalan transportasi baik untuk perkotaan maupun antar kota jarak menengah hingga jauh, dan untuk manusia maupun barang. Kereta api dianggap sebagai sarana transportasi yang relatif lebih aman, nyaman dan efisien. Dengan meningkatkan peran moda kereta api di antara moda angkutan lain, diharapkan berbagai permasalahan kemacetan/beban jalan raya, maupun pencemaran lingkungan dapat diturunkan. Penggunaan moda kereta api juga menurunkan biaya pengangkutan antar kota, terutama untuk pengangkutan barang.

Meskipun dikenal sebagai moda transportasi yang relatif aman, aspek keselamatan tetap perlu terus mendapatkan perhatian baik dengan menggunakan sistem keselamatan aktif maupun sistem keselamatan pasif.

Berdasarkan studi literatur, sistem keselamatan pasif telah banyak dilakukan pada saat ini, salah satunya melalui penerapan teknologi *crashworthiness*. Teknologi *crashworthiness* telah banyak dikembangkan pada kereta api baik di negara-negara Eropa maupun Amerika. Peningkatan keselamatan pasif pada struktur kereta penumpang dapat dilakukan dengan modul penyerap energi impak (*Impact Energy Absorption*) (IEA). IEA adalah sistem yang mengkonversi, keseluruhan atau

sebagian energi kinetik ke bentuk energi lain. Penyerap energi dikembangkan dengan mengeluarkan /menghamburkan energi karena *friction, fracture, shear, bending, tension, torsion, crushing, cyclic plastic deformation, metal cutting, extrusion* dan *fluid flow* [1]. Penelitian yang berkaitan dengan penyerap energi impact berkembang dan dipublikasikan secara khusus dalam jurnal seperti: *International Journal of Mechanical Science* (9/10, 1983, dan 12, 1993), *International Journal of Impact Engineering* (1983) dan buku seperti *structural impact* oleh Norman Jones [2], *Structural Crashworthiness* oleh Jones dan Wierzbicki [3], *Impact Mechanics* oleh W.J. Stronge [4]. Hingga pada saat ini penelitian dibidang ini mengalami kemajuan yang pesat dan diaplikasikan pada beberapa bidang antara lain adalah kendaraan bermotor, kereta api, pesawat terbang dan peralatan militer.

Pada aplikasinya IEA membutuhkan komponen yang sangat penting yaitu modul penyerap energi impact. Modul penyerap energi impact merupakan salah satu komponen paling penting dalam penerapan teknologi *crashworthiness* untuk meningkatkan keselamatan sarana transportasi. Modul penyerap impact yang ideal adalah modul penyerap impact yang mampu mengatur kekuatan impact maksimum yang diijinkan sepanjang *stroke* selain pengaruh pembebanan elastis [2, p. 410]. Pada penelitian sebelumnya Ezra dan Fay telah mengklasifikasikan *specific energy* ( $S_e$ ) dan *stroke efficiencies* ( $S_{ie}$ ) pada beberapa modul penyerap impact [5]. Alghamdi telah mereview beberapa bentuk modul penyerap energi impact dan menghasilkan beberapa bentuk deformasi [6].

IEA dalam deformasi plastis dapat dikategorikan berdasarkan struktur dan material. Berdasarkan struktur dapat dibagi dalam bentuk *drum* [7], *circular tube* [8] [9], *tubular ring* [10], *square tubes* [11] [12] [13] [14] [15] [16], *corrugated tubes* [17], *multicorner columns* [18], *frusta* [19], *struts* [20], *honeycomb cells* [21], *sand-wich plates* [22], *circular thin-walled tubes* [23], *top-hat thin-walled sections* [24]

Dalam makalah ini, mekanisme-mekanisme tersebut di atas dibandingkan secara kritis dari beberapa parameter antara lain adalah: Energi spesifik, efisiensi *stroke*, dan efisiensi gaya hancur. Parameter tersebut diatas merupakan parameter yang mempengaruhi keberhasilan dari modul penyerap impact.

Modul penyerap impact memiliki keanekaragaman jenis dan bentuk, beragam modul penyerap impact dapat dibandingkan untuk mengetahui kelebihan dan kekurangannya masing-masing, yang

selanjutnya dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari suatu modul penyerap impact.

### Parameter Pada Modul Penyerap Energi Impact

Parameter-parameter modul penyerap energi impact yang dapat digunakan antara lain:

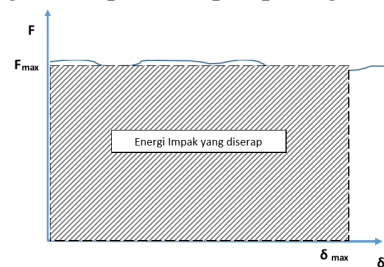
a. Energi spesifik (*specific energy* ( $S_e$ ))

Energi spesifik didefinisikan sebagai energi yang diserap per unit massa. Pada modul penyerap energi impact terjadi perubahan bentuk energi dari energi kinetik (impact) menjadi bentuk energi yang lain. Dalam kasus modul penyerap energi impact, perubahan energi terjadi secara *irreversible*. Perubahan energi yang terjadi adalah energi kinetik menjadi disipasi energi plastis. Akibat dari perubahan energi ini, modul akan terdeformasi secara permanen. Besar dari energi yang terserap oleh modul merupakan besar dari disipasi energi plastis.

Penyerapan yang terjadi pada modul penyerap impact dapat diketahui besarnya melalui hubungan antara gaya hancur ( $P$ ) dengan perpindahan ( $\delta$ ) pada arah aksial. Total energi terserap ( $EA$ ) merupakan jumlah keseluruhan hasil kali antara gaya hancur dengan perpindahan. Hubungan antara ketiga variabel tersebut terdapat pada persamaan 1.

$$EA = \int P(\delta)d\delta \quad (1)$$

Pada hasil simulasi atau pengujian modul penyerap impact, data yang didapatkan berupa grafik *force-displacement*. Untuk mengetahui nilai energi yang terserap maka perlu dilakukan pengolahan data. Secara sederhana, besar total energi yang terserap merupakan luas daerah terarsir dibawah grafik seperti tampak pada gambar 1.



Gambar 1. Grafik Gaya Terhadap Perpindahan

Untuk mendapatkan total energi terserap dapat didekati dengan cara integrasi numerik seperti *trapezoidal rule*. Persamaan yang dapat digunakan untuk mencari nilai total energi terserap seperti pada persamaan 2 di bawah ini.

$$EA = \sum_{i=1}^n (P_i + P_{i+1}) \left( \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{2} \right) \quad (2)$$

b. Efisiensi stroke (*stroke efficiency /volumetric efficiency*)

Effisiensi *stroke* (*stroke efficiency*) atau disebut juga *volumetric efficiency* ( $V_e$ ) adalah besar panjang/volume dari energy yang diserap setelah tabrakan per panjang/volume total sebelum tabrakan.

c. Effisiensi gaya hancur (*crushing force efficiency*)

Effisiensi gaya hancur merupakan suatu parameter yang membandingkan antara *mean crushing force* dengan gaya puncak. Parameter ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kemampuan penyerapan energi modul. Nilai CFE yang rendah menunjukkan bahwa terjadi gaya puncak yang bernilai tinggi saat terjadi impact. Nilai CFE yang rendah juga dapat menunjukkan adanya akselerasi yang tinggi dan potensi kerusakan saat terjadi impact [25] Nilai CFE dapat ditingkatkan dengan menurunkan gaya puncak pada modul. Untuk mencari nilai CFE dapat menggunakan persamaan 3 berikut.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{peak}} \quad (3)$$

*Mean crushing force* ( $P_m$ ) merupakan gaya rata-rata yang dibutuhkan untuk membuat suatu modul terdeformasi. Parameter ini digunakan untuk mengetahui kemampuan dan karakteristik dari suatu modul penyerap impact. Parameter ini juga dapat digunakan untuk mengetahui indikasi perlambatan yang muncul akibat adanya kejadian impact. Jika nilai *mean crushing force* tinggi maka ada indikasi deselerasi yang terjadi pada struktur juga akan tinggi. Maka, *mean crushing force* dapat dijadikan suatu acuan apakah suatu modul dapat dijadikan penyerap impact yang baik atau tidak.

Gaya inisiasi puncak ( $P_{peak}$ ) merupakan gaya yang terjadi saat pertama kali modul terdeformasi. Untuk modul *axial folding*, gaya inisiasi memiliki nilai gaya tertinggi pada grafik *force-displacement*. Gaya ini dapat dijadikan suatu batasan untuk mengetahui apakah modul penyerap impact dapat berfungsi dengan baik sebelum struktur pendukung ikut terdeformasi atau gagal. Bila gaya inisiasi puncak memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan kekuatan struktur, maka modul tidak dapat berfungsi karena struktur sudah hancur terlebih dahulu.

Kriteria modul penyerap yang baik dapat dilihat dari beberapa kriteria antara lain adalah sebagai berikut :

1. Memiliki Energi spesifik yang besar, Energi spesifik yang besar terjadi apabila semakin besar gaya yang diperlukan untuk menghancurkan modul pada kondisi *elastic-plastic*.
2. Effisiensi *stroke* yang besar akan menguntungkan dari sisi ketersediaan tempat, semakin besar effisiensi panjang langkah maka semakin

berkurang dimensi yang dibutuhkan modul penyerap impact.

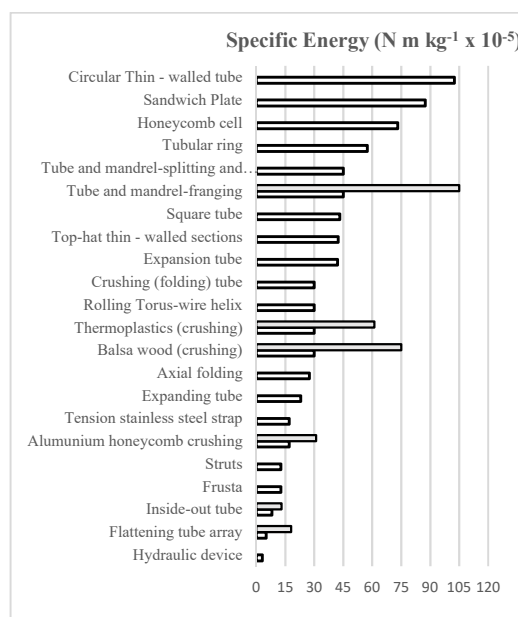
3. Effisiensi gaya hancur semakin tinggi semakin baik, effisiensi gaya hancur dipengaruhi oleh gaya inisiasi puncak dan *mean crushing force*.

Gaya inisiasi puncak dari suatu modul merupakan batasan dimana modul dapat diaplikasikan pada suatu struktur atau tidak. Apabila gaya inisiasi puncak memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan kekuatan struktur, maka modul tidak dapat berfungsi karena struktur sudah hancur terlebih dahulu.

*Mean crushing force* ( $P_m$ ) merupakan gaya rata-rata yang dibutuhkan untuk membuat suatu modul terdeformasi, semakin tinggi nilai *mean crushing force* maka ada indikasi deselerasi yang terjadi pada struktur juga akan tinggi.

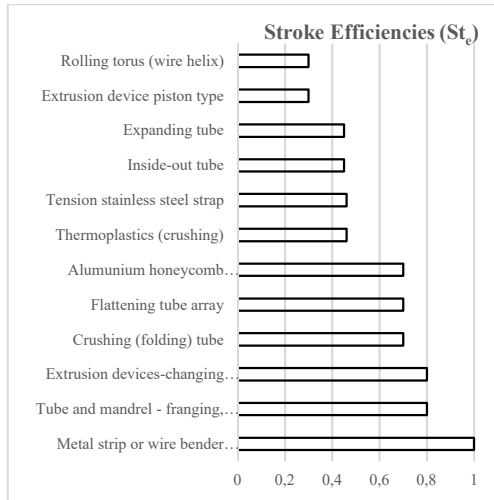
Effisiensi gaya hancur akan semakin baik apabila perbedaan nilai *mean crushing force* dan gaya puncak tidak terlalu besar. Sebaliknya, apabila perbedaan antara *mean crushing force* dan gaya puncak terlalu besar, maka saat terjadi impact deselerasi akan tinggi dan potensi kerusakan saat terjadi impact akan semakin besar.

Pemetaan *specific energy* pada berbagai modul penyerap impact dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Specific Energy

Sedangkan pemetaan *stroke efficiencies* ( $St_e$ ) pada beberapa modul penyerap impact dapat dijelaskan pada gambar 3. Pada pemetaan effisiensi gaya hancur, parameter yang berpengaruh adalah  $P_m$ . Dari berbagai referensi berbagai modul penyerap impact, harga  $P_m$  ditabulasikan pada tabel 1.



Gambar 3. Stroke efficiencies

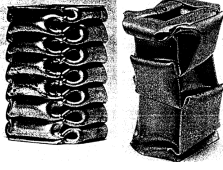
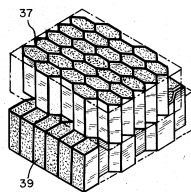
### Studi Kasus

Pada makalah ini diambil studi kasus pada perancangan modul penyerap energi impact skala laboratorium yang memiliki persyaratan perancangan sebagai berikut.

1. *Collapse* ketika terkena beban impact dengan gaya *collapse* maksimum yang diijinkan 60 kN. Penentuan gaya maksimum berkaitan dengan kapasitas alat pengujian yang akan digunakan.
2. Terlindung dari karat sehingga performa modul tidak berkurang.
3. Tidak diperlukan *maintenace* sehingga modul tidak membutuhkan biaya perawatan.
4. Modul yang telah *collapse* karena tumbukan dapat dilepas dan diganti dengan yang baru.

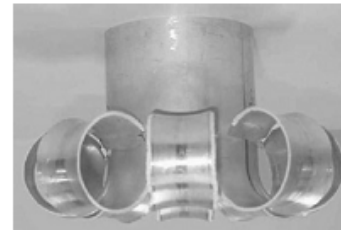
Table 1. Perbandingan Mean Force berbagai parameter modul penyerap impact

No	Modul Penyerap Impact dan Mean Force	No	Modul Penyerap Impact dan Mean Force
1	<p><i>Expansion Tube</i> [6]</p> $P_m = [\pi t (D_1 + t) \sigma_0] \times \left\{ \left( 1 + \frac{t}{AD_1} \right) - \left[ \left( \frac{D_2}{D_1} + \frac{t}{AD_1} \right) e^{\frac{AD_1(D_1 - D_2)}{t}} \right] \right\}$	5	<p><i>Lateral Flatening Tubes</i> [6]</p> $P = \frac{4Yt^2L}{\sqrt{3D(1 - (\delta/D)^2)^{1/2}}}$
2	<p><i>Axial crushing</i> [2]</p> $P_m = 2(\pi H)^{3/2} R^{1/2} \sigma_0 / 3^{1/4}$	6	<p><i>Top Hat</i> [24]</p> <p>(Sumber : M.D White, N Jones)</p> $P_m = \frac{t^2}{4} \left\{ \sigma_0^{(1)} A_1 \frac{r}{t} + \sigma_0^{(2)} A_2 \frac{C}{H} + \sigma_0^{(3)} A_3 \frac{H}{r} + \sigma_0^{(4)} A_4 \frac{H}{t} + \sigma_0^{(5)} A_5 \right\} \frac{2H}{\delta_e}$
3	<p><i>Frusta</i> [6]</p> $P_{av} = 6Yt^{3/2} (\sqrt{d} + 0.95 \sqrt{t \tan(\phi)})$	7	<p><i>Double Hat</i> [24]</p> <p>(Sumber : M.D White, N Jones)</p> $P_m = \frac{t^2}{4} \left\{ \sigma_0^{(1)} 17.76 \frac{r}{t} + \sigma_0^{(2)} \pi \frac{L}{H} + \sigma_0^{(3)} 9.184 \frac{H}{r} \right\} \frac{2H}{\delta_e}$

<p>4 <i>Multi Corner</i> [6]</p>  <p>Wierzbicki and Abramowics</p> $P_{av} = 9.56 Y t^{5/3} C^{1/3}$ <p>Abramowicz and Jones</p> $P_{av} = Yt(9.69C^{1/3}t^{2/3} + 0.84C^{2/3}t^{1/3} + 0.58t^2)$	<p>8 <i>Honeycomb cell</i> [6]</p>  $P_{av} = 8.61 \sigma_o^{5/3} C^{1/3}$
--	---

5. Modul memiliki dimensi panjang langkah maksimum 350 mm dengan penampang maksimum 200 mm × 75 mm dimana spesimen modul penyerap energi impact dapat dibuat dan diuji

Dari persyaratan ini maka dipilih gabungan modul tipe *expansion tube-axial splitting*. Modul penyerap impact *expansion tube* memiliki konstruksi pipa dan *dies* berbentuk silinder pejal. Ketika pipa mendapatkan beban aksial, diameter dalam pipa akan berdeformasi menjadi lebih besar daripada sebelumnya mengikuti diameter silinder pejal yang mengenainya. Keuntungan menggunakan modul penyerap energi impact tipe *expansion tube* memiliki karakteristik yang bagus. Hal tersebut dikarenakan karakteristik respon gaya yang didapatkan mendekati karakteristik ideal. Akan tetapi tipe modul *expansion tube* masih memiliki beberapa kekurangan. Salah satu kekurangan dari modul penyerap impact tipe *expansion tube* adalah terbatasnya panjang langkah deformasi. Pada peta karakteristik *expansion tube* memiliki energi spesifik 42 Nmkg<sup>-1</sup> x 10<sup>-5</sup> dan efisiensi stroke 0,45. Untuk mengurangi efisiensi strike yang rendah maka di modifikasi dengan menambahkan modul penyerap impact tipe *axial splitting*.



(b)  
Gambar 4. a) Konstruksi pipa dan *dies* pada modul *Axial Splitting* [2]. b) Deformasi pipa.

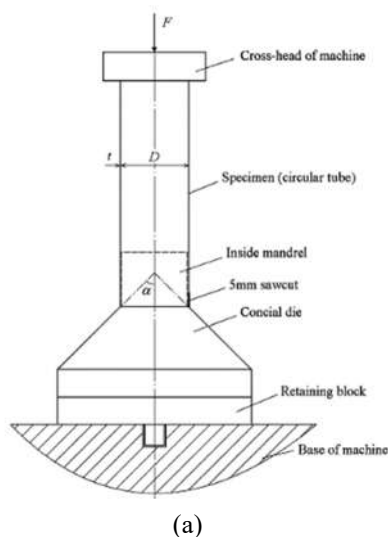
Modul penyerap impact *axial splitting* memiliki konstruksi dasar yang pipa dan *dies*. *Dies* pada modul ini berbentuk kerucut dengan sudut tertentu. Arah deformasi pipa jika terkena beban aksial adalah akan membelah mengikuti bentuk *dies* (gambar 4). Pada peta karakteristik *axial splitting* memiliki energi spesifik sekitar 28 Nmkg<sup>-1</sup> x 10<sup>-5</sup>. Dengan kombinasi ini, maka persyaratan perancangan dapat terpenuhi.

### Kesimpulan

Dari beberapa karakteristik parameter modul penyerap impact tersebut diatas maka dapat kita gunakan sebagai panduan dalam memilih modul sesuai dengan aplikasi yang dibutuhkan.

### Referensi

- [1] N. Jones, dalam *Structural Impact*, Melbourne, Cambridge University Press, 1997, p. 408.
- [2] N. Jones, dalam *Structure Impact*, Melbourne, Cambridge University Press, 1997, p. 410.
- [3] N. Jones dan T. Wierzbicki, *Structural Crashworthiness*, Butterwoth, 1983.
- [4] W. J. Stronge, *Impact Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] E. A. A dan R. J. Fay, "An Assessment of energy absorbing devices for prospective use in aircraft impact situation," *Dynamic response of structure*, vol. 225, p. 46, 1975.



(a)

- [6] A. Alghamdi, "Collapsible impact energy absorber: an overview," *Thin Walled Structures*, vol. 39, pp. 189-213, 2001.
- [7] C. JF dan P. S, "Energy Dissipation in Braced Cylindrical shell," *International Jurnal Mech Sci*, vol. 30, pp. 203-16, 1988.
- [8] A. JM, "An Approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shell under axial loading," *Quart J Mech Appl Math*, vol. 13, pp. 10-5, 1960.
- [9] M. Langseth, O. Hopperstad dan A. Hanssen, "Crash behaviour of thin-walled aluminium," *Thin-Walled Structure*, vol. 32, pp. 127-150, 1998.
- [10] S. Reid, C. Austin dan R. Smith, "Tubular Ring as impact energy absorber," dalam *Structural impact and crashworthiness*, New York, Elsevier, 1984, p. 555.
- [11] M. Langseth dan O. Hopperstand, "Static and Dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions," *International Journal Impact Engineering*, vol. 18, pp. 949-68, 1996.
- [12] M. Langseth, O. Hopperstand dan T. Berstad, "Crashworthiness of aluminium extrusions; validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity," *International Journal Impact Engineering*, vol. 22, pp. 829-54, 1999.
- [13] P. Nannucci, N. Mashall dan G. Nurick, "A Computational investigation of the progressive buckling of square tubes with geometric imperfection," dalam *3rd Asia-Pacific Conference on shock and impact Loads on Structure*, Singapore, 1999.
- [14] E. Markiewicz, P. Ducrocq dan P. Drazetic, "An inverse approach to determine the constitutive model parameters from axial crushing of thin walled square tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 21, pp. 433-449, 1998.
- [15] M. Langseth, O. Hopperstad dan T. Berstad, "Crashworthiness of Aluminium Extrusion: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 22, pp. 829-854, 1999.
- [16] H. Huh, K.-P. Kim dan H. S. Kim, "Collapse simulation of tubular structures using a finite element limit analysis approach and shell elements," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, pp. 2171-2187, 2001.
- [17] A. Singace dan H. El-Sobky, "Behaviour of axially crushed corrugated tubes," *International Journal Mech Sci*, vol. 39 (3), pp. 249-68, 1997.
- [18] T. Weirzbicki dan W. Abramowich, "On the crushing mechanics of thin-walled structure," *J Appl Mech*, vol. 50(4), pp. 727-34, 1983.
- [19] W. Mamalis dan W. Johnson, "The Quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression," *Int J Mech Sci*, vol. 25(9/10), pp. 713-32, 1983.
- [20] J. Harris dan R. Adams, "An assesment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures," dalam *Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers*, 1985.
- [21] T. Weirzbicki, "Crashing analysis of metal honeycoms," *International Journal Impact Engineering*, vol. 1(2), pp. 157-74, 1983.
- [22] G. Corbett dan S. Reid, "Local Loading of simply-supported steel-grout sandwich plates," *International Journal Impact Engineering*, vol. 13(3), pp. 433-61, 1993.
- [23] P. Stangl dan S. Meguid, "Experimental and theoretical of a Novel shock absorber for an electrically powered vehicle," *International Journal Impact Engineering*, vol. 11(1), pp. 41-59, 1991.
- [24] M. White dan N. Jones, "Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled section," *International Journal Mechanical Science*, vol. 41, pp. 179-208, 1999.
- [25] F. Samer, F. Tarlochan, P. Khalili dan H. Samaka, "International Journal of Research in Engineering and Technology," *Enhancement of Energy Absorption oh Thin Walled Hexagonal Tube by Using Trigger Mechanisms*, Vol. 1 dari 2, No 8, 2013.