

## Pengembangan Pengujian *Crashworthiness* dengan Simulasi Numerik Menggunakan Model *Impact Transferability*

Felix Dionisius<sup>1</sup>, Jos Istiyanto<sup>2</sup>, Suliono<sup>3</sup>, Yusup Nur Rohmat<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Indramayu, <sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia  
<sup>1,3,4</sup> Jl. Raya Lohbener Lama No.08 Indramayu 45252 Fax/Telp. (0234)5746464, <sup>2</sup>Depok, Jawa Barat, Indonesia.  
16424. Telp : (021) 7270032. Fax : (021) 7270033

E-mail : dionisiusfelix@gmail.com<sup>1</sup>, josist@eng.ui.ac.id<sup>2</sup>, sulionolee@gmail.com<sup>3</sup>, yusupnurrohmat@gmail.com<sup>4</sup>

### Abstrak

Uji tabrakan sangat diperlukan dalam moda transportasi dalam mengantisipasi cedera pada penumpang saat terjadi kecelakaan. Oleh karena itu, diperlukan pengujian agar mencapai hal yang diinginkan yang dikenal dengan *crashworthiness*. Dalam *paper* ini membahas tentang pengembangan pengujian *crashworthiness* dengan penggunaan *Impact Transferability* pada pengujian virtual yang dikenal dengan simulasi numerik, dengan tujuan untuk mengetahui *error* hasil *crashworthiness* seperti deformasi ( $\delta$ ) maksimum yang terjadi saat tabrakan antara simulasi numerik dan eksperimental. Selain itu untuk menambah validasi diperlukan waktu rambatn tegangan dengan membandingkan pengujian simulasi numerik dengan analitik. Simulasi numerik ini menggunakan metode elemen hingga eksplisit dengan bantuan perangkat lunak PAM-Crash. Pengujian ini terdiri dari Impaktor dan *Impact Transferability* dengan massa 80 kg dan 27 kg. Spesimen yang digunakan merupakan tube persegi berdinding tipis yang mempunyai *crush initiator* berbentuk lubang lingkaran berdiameter 3 mm. Hasil yang dicapai menunjukkan *error* deformasi maksimum sebesar 3,90 % dan *error* maksimum waktu rambatan tegangan sebesar 14,89 %.

**Kata Kunci:** *crashworthiness*, error deformasi maksimum, *impact transferability*, metode elemen hingga, PAM-Crash.

### Abstract

*Collision test is needed in transportation area in order to anticipate injuries of passengers when the accident occurred. Therefore, this test must be done for achieving standar requirements which is known by crashworthiness. This paper discussed about development of crasworthiness test by using modelling impact transferability by numerical simulation. The goal is to know the error of maximum deformation when given axial dynamic loading between numerical simulation and real experiment. Furthermore, analitic was used to validate duration of stress wave propagation from result of numerical simulation. This simulation used explicit finite element method by using PAM-Crash. The component of this research was impactor and impact of transferability with 80 and 27 kg of mass. The square tube-thin walled structure with holes as crush initiator 3 mm of diameter was used as specimen. The result shows maximum deformation and duration of stress propagation error which are 3.90 % and 14.89 %.*

**Keywords:** *crashworthiness*, finite element method, *impact transferability*, maximum deformation error, PAM-Crash.

## I. PENDAHULUAN

Dalam dunia transportasi, hal yang paling diutamakan adalah kriteria keselamatan penumpang dalam berkendara yang berfungsi untuk mengurangi cedera saat berkendara. Hal ini dikenal dengan kriteria *crashworthiness* yang salah satunya deformasi struktur kendaraan saat terjadi tabrakan. Untuk mengetahui deformasi ( $\delta$ ) yang terjadi, diperlukan pengujian tabrakan yang dapat memberikan keselamatan penumpang dalam berkendara. Pengujian tersebut antara lain adalah pengujian virtual seperti simulasi numerik dan pengujian riil yang disebut eksperimental. Salah satu kelebihan dari pengujian

simulasi numerik ini adalah dapat menghemat biaya, waktu dan sebagai awal pengujian, sedangkan pengujian eksperimental ditujukan untuk mengetahui pengujian secara nyata dimana pada kasus ini bersifat *destructive test* (pengujian bersifat merusak). Pengembangan pengujian simulasi numerik ini menggunakan *Impact Transferability* yang berfungsi untuk meneruskan gaya aksial dinamik yang terjadi saat tabrakan dimana mengoptimalkan hasil *crashworthiness* dengan pengujian eksperimental. *Impact Transferability* ini juga dapat dimodelkan sebagai ruang penumpang yang mempunyai kekakuan yang cukup tinggi dan dapat melindungi penumpang saat tabrakan. Sedangkan spesimen yang

digunakan merupakan *tube* persegi berding tipis yang digunakan pada bagian *front rail* dari kendaraan. *Front rail* kendaraan ini berfungsi untuk menyerap energi yang dihasilkan saat tabrakan dari depan dan dikhususkan untuk area penghancuran. *Front rail* ini juga tidak boleh terlalu lemah karena dapat mengenai penumpang yang ada dalam kendaraan. Jika *front rail* mempunyai kekakuan yang tinggi maka penumpang akan terlempar ke luar.

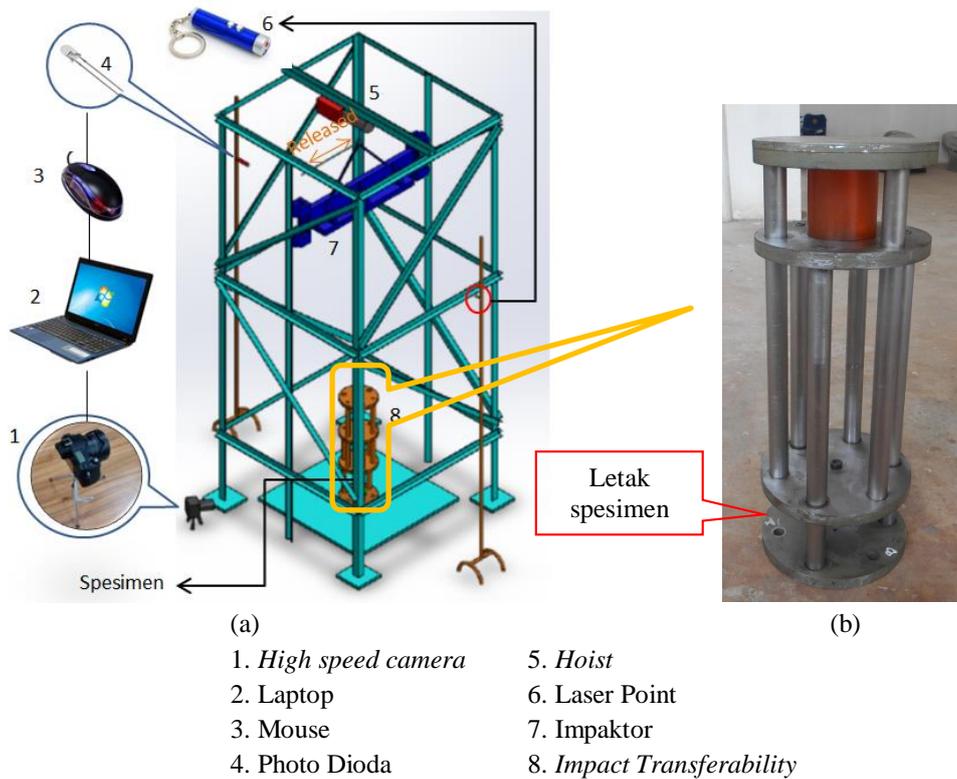
Peroni et al [1] melakukan eksperimen mengenai kemampuan penyerapan energi pada *beam* berbentuk kotak secara kuasi statik dan kuasi dinamik saat diberikan beban aksial dinamik. *Beam* tersebut dibentuk dengan melakukan flanging dan dilas berbentuk *spot* dengan berbagai posisi jika dilihat dari *cross section* kolom persegi.

Peroni et al [2] juga melakukan penelitian mengenai kemampuan penyerapan energi pada berbentuk *beam*

Danardono et al [4] meneliti pengembangan penyerapan energi berbasis jarak *crush initiator* berbentuk lingkaran antara pusat diameter dengan sisi ujung spesimen *hollow* persegi berding tipis. Pengujian ini dilakukan dengan metode eksperimental dimana alat yang digunakan berupa impaktor, *impact rig* dan spesimen dalam keadaan kuasi dinamik.

Istiyanto et al [5] kemudian meneliti tentang pengaruh diameter *crush initiator* berbentuk lingkaran terhadap *crashworthiness* pada spesimen *hollow box beam*. Penelitian tersebut menggunakan metode elemen hingga eksplisit kuasi dinamik dengan bantuan perangkat lunak. Model yang digunakan hanya impaktor 80 kg dan spesimen dimana sisi ujung spesimen diberikan *fix support*.

Istiyanto et al [6] juga meneliti tentang perubahan sudut *crush initiator* berbentuk lubang lingkaran terhadap



Gambar 1. Konsep Pengujian Eksperimental : a) Komponen , b) *Impact Transferability*

kotak dengan menyambung spesimen secara berkelanjutan yang menggunakan pengelasan laser. Penelitian tersebut dilakukan dengan kuasi statik dan dinamik. Adapun metode kuasi dinamik dilakukan dengan menggunakan *impact test rig* sebagai penerus gaya dari beban aksial dinamik.

Istiyanto et al [3] meneliti tentang pengaruh *crush initiator* pada *beam* berbentuk kotak berding tipis dengan melakukan pengujian kuasi statik dan dinamik dengan metode eksperimental dan simulasi numerik menggunakan ANSYS-LS DYNA. Metode eksperimental menggunakan *impaktor*, *impact test rig*, dan spesimen pada kuasi dinamik, sedangkan model pada simulasi numerik hanya menggunakan spesimen dan impaktor.

kriteria *crashworthiness* pada spesimen tabung persegi berding tipis dengan menggunakan metode elemen hingga eksplisit dengan bantuan perangkat lunak PAM-Crash. Penelitian ini menggunakan beban aksial kuasi dinamik dengan model impaktor dan spesimen.

Sun et al [7] meneliti tentang tailor welded blanks berbentuk *hollow* dengan penyambungan material yang berbeda. Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga eksplisit non-linear LS-DYNA dan eksperimen. Model yang digunakan adalah spesimen *hollow* dan *sled car* pada kedua pengujian tersebut.

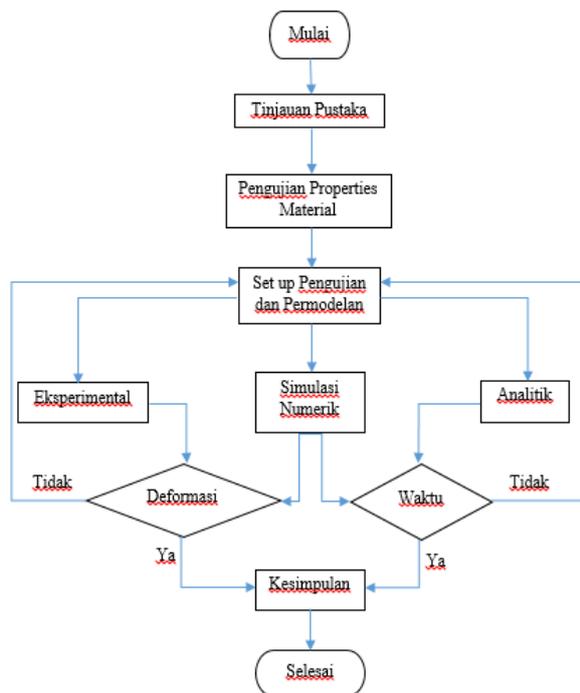
Oleh karena itu, pengujian simulasi numerik diperlukan untuk memprediksi suatu pengujian *crashworthiness* yang salah satunya deformasi ( $\delta$ ) saat tabrakan terjadi serta waktu rambatan tegangan yang

ditujukan untuk menambah validasi simulasi numerik dalam pengembangan investigasi simulasi numerik menggunakan *impact transferability*.

**II. METODE**

**Konsep pengujian**

Pengujian tabrakan dengan metode eksperimental ini menggunakan impaktor, *Impact Transferability*, spesimen, serta *high speed camera* dengan 1000 fps seperti pada Gambar 1. Impaktor berfungsi sebagai beban tumbukan aksial dinamik. *Impact Transferability* berfungsi untuk meneruskan gaya yang diberikan beban tumbukan terhadap spesimen yang merupakan bagian dari kendaraan, dan menjaga agar spesimen tidak keluar dari area tabrakan dengan memberikan *initial load* secara statik pada spesimen. *Impact Transferability* ini mirip dengan pengujian Peroni et al [2] yang melakukan pengujian eksperimental dimana terdiri dari 2 bagian yaitu aktuator dan pengarah. Beban jatuh berupa impaktor dari ketinggian 1500 mm akan mengenai permukaan aktuator *Impact Transferability* dimana akan mendorong spesimen yang berada di tengah *flange* seperti Gambar 1b, mengalami perubahan bentuk saat mengalami tabrakan, dan pada saat keadaan tersebut, *high speed camera* merekam deformasi ( $\delta$ ) spesimen setiap 1 ms. Adapun digram alir penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



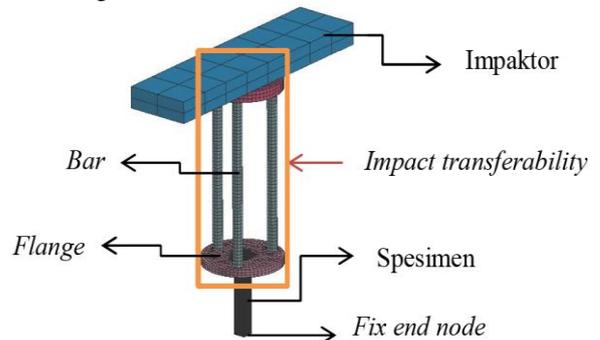
Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Sedangkan pengujian virtual berupa simulasi numerik hanya menggunakan 3 bagian utama model di antaranya model impaktor, aktuator yang merupakan bagian *Impact Transferability* dan spesimen. Ini ditujukan untuk memudahkan simulasi numerik dengan metode elemen hingga eksplisit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Aktuator *Impact Transferability* terdiri dari *flange* atas dan bawah serta 3 *beam bar* yang mempunyai ukuran

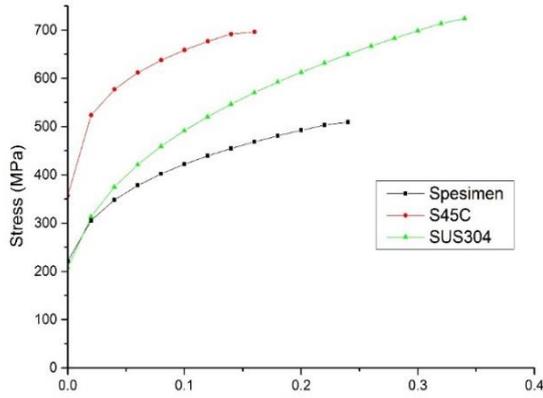
$\Phi 250 \times 30$  mm dan  $\Phi 250 \times 20$  mm serta  $\Phi 30 \times 490$  mm. Hal ini sesuai dengan konsep eksperimental, *Impact Transferability* yang ada pada Gambar 1b. Sedangkan spesimen baik pengujian secara simulasi maupun eksperimental mempunyai dimensi  $36,5 \times 36,5 \times 200$  (mm) dengan ketebalan 0,6 mm dan diberikan *crush initiator* berbentuk lingkaran berdiameter 3 mm. Saat mengenai permukaan aktuator, kecepatan impaktor sebesar 5,47 mm/ms.

**Model Elemen Hingga**

Cara kerja *Impact Transferability* adalah meneruskan gaya yang diberikan impaktor dimana mengakibatkan terjadinya deformasi pada spesimen. Dari penjelasan sebelumnya dimana *Impact Transferability* mempunyai 2 bagian, maka permodelan elemen hingga hanya menyangkut impaktor, aktuator dan spesimen yang diberikan *fix support* seperti pada Gambar 4. *Flange* dan *bar* dimodelkan *solid body* dengan ukuran mesh yang diberikan antara 2 hingga 100 mm. Sedangkan spesimen dimodelkan dengan tipe *shell* Belytschko-Tsay dengan ukuran mesh 2 mm. Impaktor  $200 \times 800 \times 63$  mm dimodelkan sebagai *rigid body* dengan beban 80 kg yang mempunyai kecepatan 5,47 mm/ms saat mengenai permukaan *Impact Transferability* dimana sebelumnya spesimen mengalami beban statik yang diakibatkan oleh massa dari *Impact Transferability* sebesar 28,78 kg. Kontak antara impaktor-*Impact Transferability*-spesimen dimodelkan sebagai kontak NON-SYMETRIC NODE TO SEGMENT WITH EDGE TREATMENT [8] dengan koefisien gesekan 0.5. Sedangkan untuk spesimen, kontak dimodelkan sebagai kontak SELF-IMPACTING NODE-TO-SEGMENT WITH EDGE TREATMENT [8] dengan koefisien gesekan 0,16.



Gambar 3. Model Pengujian Simulasi Numerik



Gambar 4. Properties material pengujian

**Material**

Material yang digunakan pada pengujian ini mempunyai properties yang berbeda untuk setiap bagian dimana untuk *flange* baja karbon S45C dan *beam* bar stainless steel SUS 304. Sedangkan untuk spesimen menggunakan material lokal yang tersedia banyak di pasaran. Adapun properties ketiga material tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 3. Massa jenis dari ketiga spesimen ini sebesar 7850 kg/m<sup>3</sup>. Shear dan Bulk Modulus untuk material *Impact Transferability* sebesar 80 dan 160 GPa. Sedangkan Young Modulus spesimen 210 GPa. Sedangkan parameter *strain rate* pada material *flange* dan spesimen adalah 40,4 dan 5 [9, 10], sedangkan untuk stainless steel 100 dan 10 [9, 10].

**Rambatan Tegangan (*Stress wave propagation*)**

Setiap struktur yang menerima beban dinamik akan mengalami rambatan tegangan seperti gelombang berkelanjutan yang dikenal dengan *stress wave propagation*. *Tube* yang diberikan beban aksial dinamik akan mengalami lipatan awal (*buckling initiation*) pada waktu tertentu setelah mengalami *stress wave propagation*. Konsep ini akan dipakai untuk membandingkan hasil simulasi numerik dengan analitik yang dikenal dengan *stress wave attenuation*.

Kecepatan rambat stress ini terdiri dari 2 yaitu *dilatational wave velocity* untuk *plane stress* ( $C_D$ ) dan *shear wave velocity* ( $C_S$ ) yang ditunjukkan pada Persamaan 1 dan 2 [11].

$$C_D = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \tag{1}$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \tag{2}$$

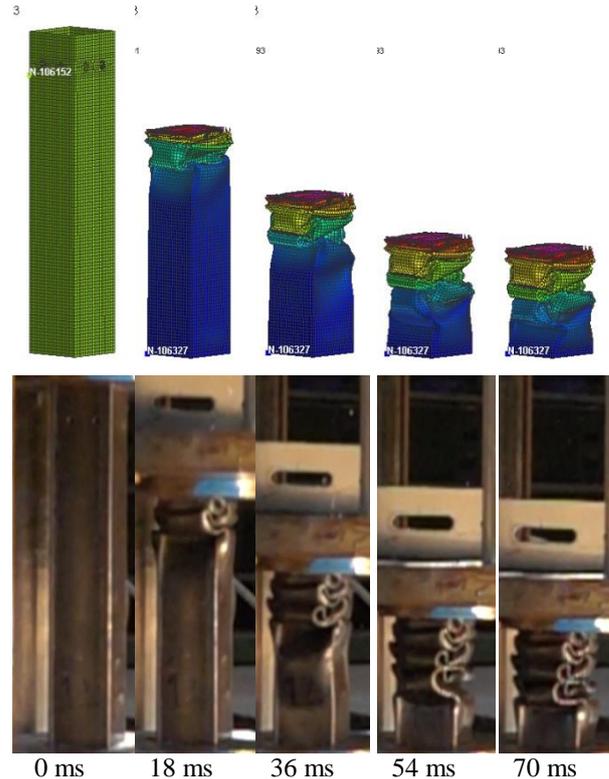
Dimana :

- E = Young Modulus (Mpa)
- $\rho$  = massa jenis (kg/mm<sup>3</sup>)
- $\nu$  = poisson's ratio

Waktu pada saat beban dinamik mengenai seluruh elemen spesimen disebut dengan *half transient loading*

(T/2) diman cepat rambat tegangan mengenai seluruh elemen dengan menggunakan persamaan 3 [12].

$$\frac{T}{2} = \frac{R_\lambda}{C_S} \tag{3}$$



Gambar 5. Perbandingan uji simulasi numerik dan eksperimental

Dimana :  $R_\lambda$  = rasio panjang gelombang atau rasio antara panjang gelombang *half-sine pulse* terhadap panjang horisontal dari spesimen.

**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Deformasi dari simulasi numerik yang diperoleh dari bantuan perangkat lunak PAM-Crash dan eksperimental dapat dihasilkan dan kemudian dibandingkan dengan memperoleh error antar kedua metode seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Error terbesar pada kedua pengujian ini sebesar 3,9%. Hasil ini diperoleh dari pergerakan spesimen terhadap waktu seperti pada Gambar 5 dan Gambar 7. Deformasi pada eksperimen ini didapat dari *frame* pada *high speed camera* per 1 ms. Gambar tersebut menunjukkan kecenderungan deformasi yang hampir sama dan dapat diperoleh berupa persamaan polinomial pangkat 2 dimana koefisiennya bernilai negatif seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Ini menunjukkan adanya perlambatan pergerakan deformasi pada saat diberikan beban jatuh yang termasuk dalam kategori gerak vertikal berubah beraturan.

Spesimen *tube* akan mengalami lipatan awal yang dikenal dengan *buckling initiation*. Gambar 6 menunjukkan awal terjadinya rambatan tegangan pada

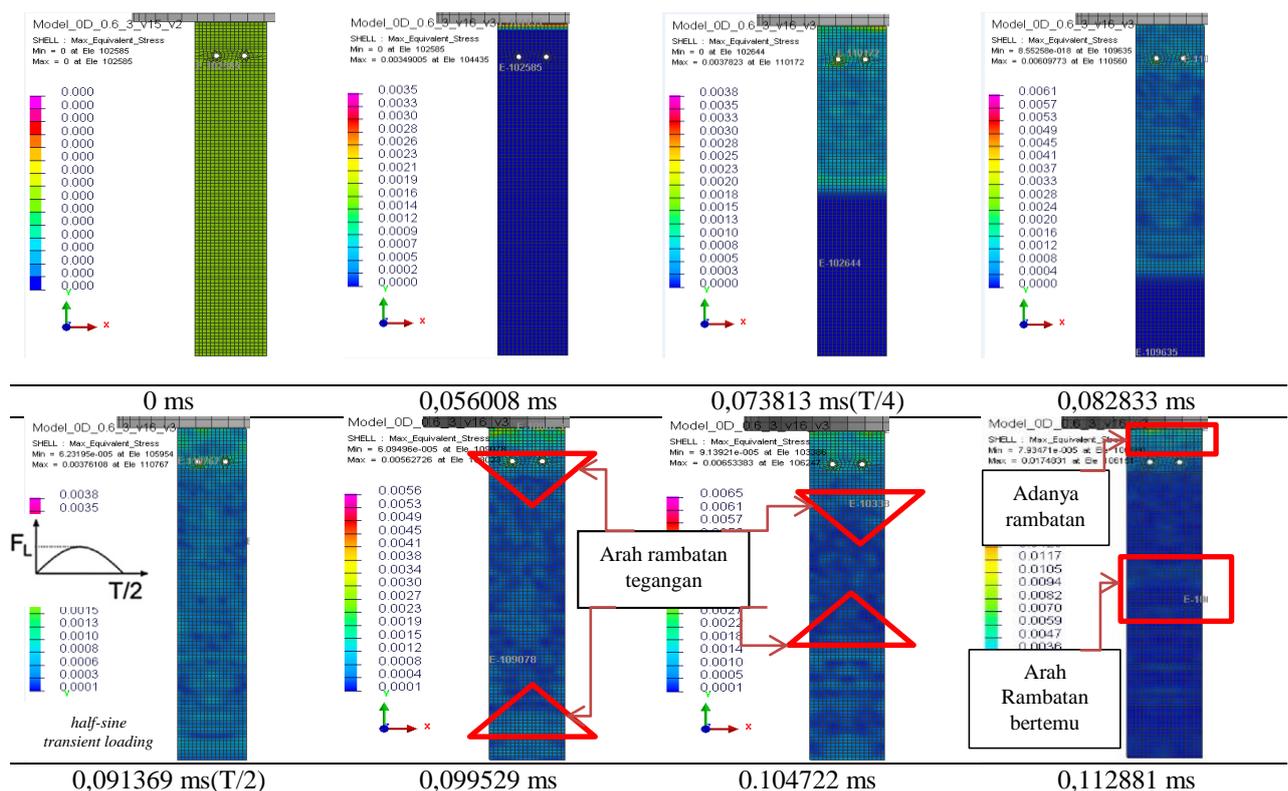
waktu 0,056008 ms. Lalu perambatan berlanjut kembali hingga ke seluruh elemen spesimen pada waktu 0,091369 ms yang menunjukkan bahwa spesimen tersebut mengalami beban aksial dinamik. Setelah kejadian tersebut, arah rambatan tegangan datang dari 2 arah yaitu dari kedua sisi ujung spesimen pada waktu 0,099529 ms dan rambatan tersebut akan bertemu di tengah pada waktu 0,112881 ms. Fenomena inilah yang dikenal dengan *stress wave propagation*.

Fenomena yang dihasilkan dari simulasi numerik ini akan dianalisa dengan menggunakan metode analitik yang dikenal dengan *stress wave attenuation* seperti pada Persamaan 1-3 Pada waktu 0,091369 ms, spesimen mengalami fenomena *half-sine transient loading* atau T/2. Dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 didapat  $C_D$  dan  $C_S$  sebesar 5492,35 mm/ms dan 3249,32 mm/ms. Untuk mendapatkan T/2, rasio panjang gelombang menggunakan 0,25 dan T/4 menggunakan rasio 0,5 [12]. Rasio ini menggunakan panjang gelombang *half-sine*-

minimum ( $C_{min}$ ) yang merupakan nilai paling kecil antara  $C_D$  dan  $C_S$ . Persamaan 3 akan digunakan untuk memperoleh T/4 dan T/2 sebesar 0,015388 ms dan 0,030766 ms.

Dikarenakan awal rambatan pada simulasi numerik terjadi pada waktu 0,056008 ms, T/4 dan T/2 terjadi pada 0,073813 ms dan 0,091369 ms, perlu dianalisa waktu terjadinya T/4 dan T/2 secara perhitungan memperoleh selisih antara *transient loading* dengan awal rambatan terjadinya tegangan. Hasil selisih tersebut untuk T/4 dan T/2 pada simulasi numerik menunjukkan 0,017434 ms dan 0,035361 ms. Sehingga error T/4 dan T/2 antara simulasi numerik dan analitik yang menggunakan konsep *stress wave attenuation* sebesar 13,29 % dan 14,89 %.

Dikarenakan awal rambatan pada simulasi numerik terjadi pada waktu 0,056008 ms, T/4 dan T/2 terjadi pada 0,073813 ms dan 0,091369 ms, perlu dianalisa waktu terjadinya T/4 dan T/2 secara perhitungan memperoleh selisih antara *transient loading* dengan awal rambatan

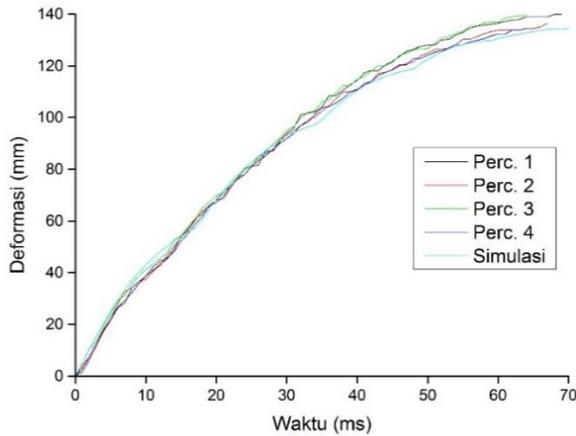


Gambar 6. Bentuk aliran *stress wave propagation*

*pulse* yang merupakan hasil panjang gelombang minimum ( $C_{min}$ ) yang merupakan nilai paling kecil antara  $C_D$  dan  $C_S$ . Persamaan 3 akan digunakan untuk memperoleh T/4 dan T/2 sebesar 0,015388 ms dan 0,030766 ms.

Persamaan 1-3 Pada waktu 0,091369 ms, spesimen mengalami fenomena *half-sine transient loading* atau T/2. Dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 didapat  $C_D$  dan  $C_S$  sebesar 5492,35 mm/ms dan 3249,32 mm/ms. Untuk mendapatkan T/2, rasio panjang gelombang menggunakan 0,25 dan T/4 menggunakan rasio 0,5 [12]. Rasio ini menggunakan panjang gelombang *half-sine-pulse* yang merupakan hasil panjang gelombang

terjadinya tegangan. Hasil selisih tersebut untuk T/4 dan T/2 pada simulasi numerik menunjukkan 0,017434 ms dan 0,035361 ms. Sehingga error T/4 dan T/2 antara simulasi numerik dan analitik yang menggunakan konsep *stress wave attenuation* sebesar 13,29 % dan 14,89 %.



Gambar 7. Deformasi percobaan (perc.) eksperimental terhadap simulasi numerik

**IV. PENUTUP**

**Kesimpulan**

Pengujian tabrakan yang dikenal dengan *crashworthiness* diperlukan untuk menjamin keselamatan penumpang diantaranya deformasi struktur kendaraan. Pengujian tersebut antara lain dengan metode simulasi numerik dan eksperimental. Dengan pengujian simulasi numerik dapat menghemat biaya dan waktu, sehingga saat pengujian eksperimental mendapatkan hasil yang diinginkan. Oleh karena itu diperlukan terlebih dahulu pengujian simulasi numerik dengan permodelan yang sama dengan eksperimental. Dari pembahasan di atas, pengujian antar simulasi numerik dan eksperimental dengan penggunaan *Impact Transferability* yang mengenai *crashworthiness* sudah dilakukan dengan memperoleh deformasi maksimum sebesar 134,44 mm dan 139,90 mm. Dengan membandingkan deformasi maksimum tersebut diperoleh error sebesar 3,90 %. Di samping itu perlu dilakukan pengujian antara simulasi numerik dengan analitik dengan memperoleh error maksimum waktu cepat rambat tegangan pada kedua metode tersebut sebesar 14,89 %.

Tabel 1. Error deformasi maksimum

No. Perc.	Deformasi maksimum (mm)		
	Eksperimental	Simulasi Numerik	Error (%)
1	139.90	134.44	3.90
2	136.40		1.44
3	139.60		3.70
4	134.50		0.05

Tabel 2. Fungsi polinomial deformasi terhadap waktu

Pengujian	Fungsi polinomial
Ekperimen	1 $\delta = -0,0279t^2 + 3,9292t + 1,3003$
	2 $\delta = -0,0277t^2 + 3,8311t + 2,6481$
	3 $\delta = -0,0267t^2 + 3,8275t + 3,8743$
	4 $\delta = -0,0284t^2 + 3,8802t + 1,4516$
Simulasi	$\delta = -0,0260t^2 + 3,6414t + 6,1565$

**V. DAFTAR PUSTAKA**

- [1] L. Peroni and M. Avasse, "Experimental investigation of the energy absorption capability of bonded crash boxes," *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 87, 2006.
- [2] L. Peroni, M. Avasse and G. Belingardi, "Experimental Investigation of The Energy Absorption Capabilit of Continuous Joined Crash Boxes," Torino: Politecnico.
- [3] J. Istiyanto, S. Hakiman, D. A. Sumarsono, G. Kiswanto, A. S. Baskoro and S. Supriadi, "Experiment And Numerical Study - Effect of *Crush initiators* Under Quasi-Static Axial Load of Thin Wall Square Tube," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 660, pp. 628-632, 2014.
- [4] A. S. Danardono, M. Malawat and J. Istiyanto, "Pengembangan Impact Energy Absorber Dengan Pengaturan Jarak *Crush initiator*," in *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XIV*, Banjarmasin, 2015.
- [5] J. Istiyanto, F. Dionisius, M. Yudha, M. Malawad and S. Hakiman, "Pengaruh Diameter *Crush initiator* Terhadap *Crashworthiness* Pada Hollow Box Beam," in *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa*, Malang, 2016.
- [6] J. Istiyanto and F. Dionisius, "Pengaruh Sudut *Crush initiator* Berbentuk Lubang Lingkaran Terhadap Kriteria *Crashworthiness* Pada Tabung Persegi Berdinding Tipis," in *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XV (SNTTM XV)*, Bandung, 2016.
- [7] G. Sun, J. Fang, X. Tian, G. Li and Q. Li, "Discrete robust optimization algorithm based on Taguchi method for structural *crashworthiness* design," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, pp. 4482-4492, Januari 2015.
- [8] ESI, "Solver Reference Manual vol 4," in *Virtual Performance Solution Known & Fix Issued*, 2014.
- [9] N. Jones, *Structural Impact*, Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [10] J. A. Ambrosio, *Crashworthiness Energy Management and Occupant Protection*, C. Tasso, Ed., New York: Springer-Verlag Wien GmbH, 2001.
- [11] M. Yamashita, H. Kenmotsu and T. Hattori, "Dynamic axial compression of aluminum hollow tubes with hat cross-section and buckling initiator using inertia force during impact," *Thin-Walled Structures*, vol. 50, no. 1, pp. 37-44, January 2012.
- [12] R. Rafiee-Dehkharghani, A. J. Aref and G. F. Dargush, "Planar stress wave attenuation in plates with circular voids," *Composites Part B*, vol. 75, pp. 307-318, February 2015.