

# **Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung**



## **SISTEM KESELAMATAN PASIF PADA STRUKTUR KERETA PENUMPANG**

**Profesor Bagus Budiwantoro**  
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB  
20 Agustus 2022**

**Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**  
20 Agustus 2022

**Profesor Bagus Budiwantoro**

**SISTEM KESELAMATAN PASIF  
PADA  
STRUKTUR KERETA PENUMPANG**



Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: SISTEM KESELAMATAN PASIF PADA STRUKTUR  
KERETA PENUMPANG

Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,  
tanggal 20 Agustus 2022.

**Hak Cipta dilindungi undang-undang.**

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

**UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA**

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Bagus Budiwanto

SISTEM KESELAMATAN PASIF PADA STRUKTUR KERETA PENUMPANG  
Disunting oleh Bagus Budiwanto

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2022

vi+70 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-58-1

1. Perancangan Teknik 1. Bagus Budiwanto

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, salawat serta salam kita sampaikan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW. Berkat rahmat dan karuniaNya penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini dengan baik.

Terimakasih serta hormat yang setinggi-tinggi penulis sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memperkenankan penyampaian orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB, tanggal 20 Agustus 2022.

Salah satu solusi kemacetan lalu lintas di Indonesia adalah dengan memperbanyak kendaraan massal. Penggunaan kendaraan massal berdampak penggunaan kendaraan pribadi berkurang yang secara langsung berdampak kepada menurunnya volume permintaan kendaraan pribadi. Menurunnya volume permintaan tersebut di atas secara tidak langsung akan berdampak terhadap menurunnya volume produksi kendaraan pribadi. Salah satu dampak atas penurunan volume produksi kendaraan pribadi adalah terjadinya pengangguran, masalah ekonomi dan sosial. Dengan memperbanyak kendaraan massal, maka volume produksi industri manufaktur kendaraan massal seperti kereta penumpang dan bus meningkat. Peningkatan volume produksi kendaraan massal diharapkan akan menjadi solusi terjadinya pengangguran, masalah ekonomi dan sosial akibat penurunan volume produksi kendaraan pribadi. Artinya kendaraan massal buatan Indonesia

menjadi suatu keharusan. Pemerintah maupun pengusaha swasta nasional harus berpikir ulang saat harus memutuskan impor kendaraan massal. Disisi lain industri manufaktur kendaraan massal nasional harus meningkatkan kualitas produksi dan kapasitas produksinya sesuai dengan peraturan, standar, dan volume kebutuhan kendaraan massal di Indonesia.

Orasi ilmiah berjudul “Perancangan dan implementasi keselamatan pasif pada struktur kereta penumpang” merupakan hasil penelitian dalam bidang keselamatan penumpang pada kendaraan massal yang dimulai dari tahun 1998 sampai sekarang.

Penelitian dibidang *crashworthiness* serta implementasinya pada sistem keamanan pasif pada struktur kereta penumpang telah memberikan kontribusi bagi terbitnya perbaikan Peraturan Menteri Perhubungan dan terbitnya Standar Nasional Indonesia (SNI) tentang Struktur kendaraan massal yang mampu melindungi penumpang dari kemungkinan cedera dan kematian. Selanjutnya penelitian ini diharapkan akan memberikan manfaat bagi kemajuan industri manufaktur kendaraan nasional, bagi perkembangan ilmu pengetahuan, industri dan ekonomi bagi negara.

Semoga tulisan ini dapat dapat memberikan wawasan dan inspirasi bagi kita semua.

Bandung, 20 Agustus 2022

**Prof. Bagus Budiwantoro**

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	iii
DAFTAR ISI .....	v
1. PENDAHULUAN .....	1
1.1 Pengertian <i>Crashworthiness</i> .....	3
1.2 Pengujian Sifat Mekanik Material .....	4
1.3 Kriteria Cedera Penumpang .....	6
1.4 Metodologi .....	8
1.5 Implementasi Pada Struktur Metro Kapsul dan LRT .....	9
1.6 Manfaat .....	10
1.7 Standar Nasional Indonesia .....	11
1.8 Regulasi Struktur <i>Crashworthiness</i> .....	12
2. PENGERTIAN <i>CRASHWORTHINESS</i> .....	14
3. STRATEGI PENERAPAN <i>CRASHWORTHINESS</i> PADA KERETA .....	16
3.1 Karakteristik <i>Crash box</i> pada Kasus <i>Axial Impact</i> .....	17
3.1.1 Rancangan <i>Crash box</i> dengan Penampang Persegi Panjang ( <i>Rectangular</i> ) .....	22
3.1.2 Efektifitas Rancangan <i>Crash box</i> pada Struktur Penyerap Energi Impak .....	23
3.1.2.1 Ketidaksimetrisan pada Rancangan <i>Crash box</i> .....	24
3.1.2.2 Variasi Ketebalan pada Rancangan <i>Crash box</i> .....	25
3.1.2.3 Variasi Panjang pada Rancangan <i>Crash box</i> .....	28
4. RANCANGAN ALTERNATIF YANG DIUSULKAN .....	34

4.1 Variasi Geometri <i>Crash Box</i> Tunggal .....	37
4.2 Pemodelan .....	38
4.3 Parameter Performa <i>Crashworthiness</i> .....	42
5. HASIL DAN DISKUSI .....	43
5.1 Variasi Ketebalan <i>Crash Box</i> .....	43
5.2 Hasil Simulasi Sistem Rancangan .....	48
6. KESIMPULAN .....	51
7. PENUTUP .....	52
DAFTAR PUSTAKA .....	53
UCAPAN TERIMA KASIH .....	58
CURRICULUM VITAE .....	61

# SISTEM KESELAMATAN PASIF PADA STRUKTUR KERETA PENUMPANG

## 1. PENDAHULUAN

Keselamatan penumpang adalah hal yang sangat penting dalam dunia transportasi massal. Segala risiko yang mengancam keselamatan penumpang harus semaksimal mungkin dihindarkan. Akan tetapi dalam kenyataannya, kelalaian dan keterbatasan sarana dan prasarana seringkali menjadi sumber malapetaka terjadinya tabrakan (kecelakaan) yang mengancam keselamatan penumpang [6].



**Gambar 1.1** Contoh kecelakaan kereta api di Indonesia

Kereta api adalah salah satu jenis transportasi massal yang banyak digunakan pada saat ini. Kecelakaan kereta api akibat tabrakan kerap terjadi dan secara langsung mengancam keselamatan penumpang dan semua awak yang bertugas di dalamnya, seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 1.1. Ada banyak hal yang mengakibatkan kecelakaan kereta api, mulai dari *system control* yang tidak berfungsi, kelalaian masinis dan kesalahan informasi antara masinis dan pemberi sinyal seringkali menjadi sumber kecelakaan.

Dalam teknologi keselamatan kendaraan secara umum, dikembangkan beberapa cara untuk mencegah terjadinya kecelakaan dan bagaimana mengurangi konsekuensi kecelakaan jika kecelakaan tetap terjadi.

Cara tersebut terbagi menjadi dua jenis, yaitu :

- a. Sistem keselamatan aktif dan
- b. Sistem keselamatan pasif.

Sistem keselamatan aktif ditujukan untuk mencegah terjadinya tabrakan antara dua kendaraan (dalam penelitian ini adalah kereta api atau kereta) apabila terdeteksi keduanya berada dalam satu jalur dan bergerak saling mendekati. Sistem ini mendeteksi potensi kecelakaan menggunakan sensor dan secara otomatis akan menghentikan kereta.

Sedangkan sistem keselamatan pasif dalam pengaplikasiannya berupa struktur pada kereta yang dapat melindungi penumpang bila terjadi tabrakan. Apabila tabrakan tidak dapat dihindari struktur tersebut berfungsi untuk menurunkan konsekuensi atau dampak terjadinya tabrakan pada penumpang ataupun barang/kargo.

Struktur di atas, dikenal dengan struktur yang "*Crashworthy*" atau *Structural Crashworthiness* yang didefinisikan sebagai kemampuan suatu

struktur dalam melindungi keselamatan kargo/penumpang. Penerapan teknologi *crashworthiness* pada kereta yang mampu menyerap sebagian energi tabrakan, diharapkan dapat melindungi struktur utama kereta.

Apabila proses penyerapan energi tidak tercapai dengan baik, akan terjadi kecelakaan fatal yang berdampak pada kerusakan berlebih struktur kereta, juga cedera penumpang didalamnya. Kerusakan berlebihan pada struktur dapat menyebabkan terjadinya *overriding*, *derailment*, *rollover*, dan *buckling*. Sedangkan tingkat cedera pada dapat terjadi dari cedera ringan sampai kehilangan nyawa [9].

### 1.1 Pengertian *Crashworthiness*<sub>[8]</sub>

Menurut Huang, *Crashworthiness* (kelaikan tabrak) didefinisikan sebagai kemampuan struktur kendaraan untuk mengalami deformasi dengan gaya yang terkendali dan dapat meminimalisir cedera penumpang atau pengemudi yang ada di dalamnya [10].

Sedangkan sebagai sebuah istilah teknis, *Structural crashworthiness* pada kendaraan dimaksudkan untuk mendeskripsikan performa sebuah struktur dalam proses impact dengan objek lain. Beberapa parameter yang sebaiknya dikaji dalam merancang *Structural crashworthiness* atau yang berkaitan dengan permasalahan *crashworthiness* adalah sebagai berikut [11];

1. Deformasi yang dihasilkan dan energi impact yang diserap dalam sebuah peristiwa tabrakan;

2. *Crash pulse*, yakni proses perlambatan (*deceleration*) yang diinduksi oleh proses dampak yang berkaitan langsung dengan dampak terhadap tubuh manusia;
3. *Crash position*, yakni kemampuan struktur untuk mengurangi kerusakan pada posisi terjadinya dampak yang berbeda-beda;
4. Model yang digunakan dalam pengujian, baik dari segi berat ataupun ukuran harus mampu mengurangi dampak kerusakan pada struktur yang berpengaruh terhadap keselamatan penumpang.

Selain hal di atas, beberapa parameter yang mempunyai pengaruh yang signifikan dalam permasalahan *crashworthiness* yang dirasakan oleh penumpang selama proses tabrakan terjadi adalah;

1. deselerasi atau perlambatan maksimal yang dirasakan oleh pengguna/penumpang,
2. durasi *crash pulse*,
3. deselerasi rata-rata,
4. deformasi maksimum,
5. energi yang berkaitan dengan deformasi yang terjadi karena tabrakan.

## 1.2 Pengujian Sifat Mekanik Material

Untuk keperluan analisis perhitungan integritas struktur umumnya digunakan kurva tegangan regangan hasil uji tarik berdasarkan standar

ASTM. Pengujian dilakukan dengan menarik batang uji dengan kecepatan relatif konstan sampai patah, sementara beban dan jarak panjang ukur dimonitor secara kontinyu.

Untuk kasus tabrakan, dimana struktur mengalami pembebanan impact, maka karakteristik sifat mekanik material uji sebaiknya diperoleh berdasarkan kondisi beban impact. Berbagai teknik telah dikembangkan untuk mengetahui karakteristik material pada laju regangan tinggi, salah satunya adalah teknik pengujian *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) [12].

Tujuan utama pengujian SHPB adalah memperoleh hubungan tegangan, regangan, dan laju regangan yang mempengaruhi karakteristik material dalam kurva regangan terhadap waktu yang kemudian akan diubah menjadi kurva tegangan terhadap regangan.

Teknik pengujian *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) dari terdiri dari beberapa teknik di mana dibedakan berdasarkan jenis pembebanan yang dialami spesimen. Jenis pembebanan yang berbeda dilakukan dengan perangkat pengujian dan geometri spesimen yang berbeda. Teknik-teknik SHPB meliputi, teknik tegangan tarik, teknik tegangan geser, teknik tegangan puntir, dan teknik tegangan *multiaxial*. Semua teknik tersebut mempunyai prinsip kerja yang sama. Pertama, spesimen terletak diantara *incident bar* dan *transmitted bar* dalam kondisi terjepit. Kedua, pulsa tegangan ditransmisikan pada sepanjang *incident bar*. Ketiga, pulsa tegangan sebagian disalurkan ke *transmitted bar* dan sebagian dipantulkan kembali ke *incident bar* sebagai beban tarik pada batang kompresi [13].

Walaupun telah banyak dikembangkan, teknik pengujian *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) belum terstandarkan karena kompleksitas dari analisis data. Standarisasi penting dilakukan agar tersedia pedoman untuk memperoleh sifat material yang sebenarnya namun tidak dipengaruhi oleh efek mesin yang digunakan sehingga hasil dari setiap pengujian menjadi konsisten [14]. KK Perancangan Mesin ITB khususnya Lab. Perancangan Mesin telah mengembangkan beberapa teknik varian SHPB dengan menggunakan simulasi komputer untuk menuju terbitnya standar bagi uji sifat mekanik material yang sudah dinantikan dalam implementasi analisis struktur *crashworthiness*.

### 1.3 Kriteria Cedera Penumpang

Efek tabrakan bagi penumpang dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1. Efek primer (*primary collision*) dan
2. Efek tabrakan sekunder (*secondary collision*).

Efek tabrakan primer akan merusak struktur utama kereta dan mengakibatkan cedera bagi penumpang, sedangkan efek tabrakan sekunder menyebabkan penumpang cedera atau kehilangan nyawa karena terjadi tumbukan antara penumpang dengan benda-benda yang berada dalam kabin kereta. Disamping berakibat terhadap penumpang, tabrakan sekunder dapat menyebabkan juga kerusakan interior kereta seperti kursi, bagasi dan lain-lain, seperti yang terlihat pada Gambar 1.2.



**Gambar 1.2** Contoh kerusakan struktur utama dan kerusakan interior kereta

Teknologi *crashworthiness* dapat meminimumkan kedua efek tabrakan di atas. Penerapan teknologi *crashworthiness* pada kereta yang mampu menyerap sebagian energi tabrakan, diharapkan dapat melindungi struktur utama kereta. Teknologi *crashworthiness* yang diterapkan harus juga dapat mengontrol terjadinya perlambatan, kecepatan dan tumbukan penumpang dengan benda-benda dalam kabin kereta sehingga memenuhi kriteria keselamatan penumpang yang distandarkan.

Analisis tingkat keselamatan penumpang dilakukan dengan memanfaatkan data-data karakteristik perlambatan, kecepatan selama terjadinya tabrakan serta jarak rintangan dan parameter-parameter struktur interior lainnya. Hasil analisis diaplikasikan terhadap kriteria keselamatan penumpang yaitu *Head Injury Criterion (HIC)/Severity Index*

(SI), yang selanjutnya akan digunakan sebagai acuan untuk melakukan modifikasi rancangan global kereta sehingga dapat meminimumkan tingkat cedera yang dialami penumpang. Tingkat keselamatan dan cedera penumpang dapat dianalisis untuk berbagai kasus tabrakan di jalur lurus dan belokan.

Saat ini, struktur berdinding tipis banyak digunakan sebagai komponen *crashworthiness* dalam berbagai moda transportasi. Struktur berdinding tipis dengan penampang melintang prisma yang dikenal sebagai *crash box* digunakan sebagai alat untuk menyerap energi melalui mekanisme deformasi progresif. Lebih dari itu, alat ini pun dapat digunakan untuk mengontrol perlambatan dari sistem dalam rangka mengurangi cedera [15].

## 1.4 Metodologi

Metode Penelitian mengikuti metode yang sudah baku meliputi:

1. Studi pustaka, berupa peninjauan pustaka yang berkaitan dengan struktur *crashworthiness*;
2. Studi parametrik, berupa simulasi kasus yang telah ditentukan untuk menentukan parameter - parameter optimasi geometri dan material dengan melakukan variasi pada parameter masukan;
3. Penentuan solusi alternatif yang efisien berdasarkan parameter yang telah diperoleh dari studi parametrik untuk kasus struktur kereta penumpang.

## 1.5. Implementasi Pada Struktur Metro Kapsul dan LRT

Peraturan Menteri Perhubungan PM 175 Tahun 2015 Pasal 13 (c) mengatakan kereta mampu menahan beban dampak akibat tumbukan (*crashworthiness*). Metro Kapsul (sejenis LRT, dengan roda dari karet) dan LRT merupakan kereta yang dirancang dengan menerapkan teknologi *crashworthiness* sehingga memenuhi peraturan tersebut di atas.

Metro Kapsul adalah kendaraan yang termasuk jenis *Automated People Mover System* (APMS) atau *Automated Guideway Transit* (AGT). APM mempunyai jalur khusus dan operasinya yang dikendalikan dari pusat sehingga dapat memberikan layanan yang cepat dan tanpa gangguan seperti kemacetan. Metro Kapsul bergerak dengan menggunakan ban pengarah (*guide wheel*) yang menjaganya tetap pada jalur. Ia terdiri dari kapsul tunggal yang dioperasikan dari pusat kendali berdasarkan rute perjalanannya. Metro kapsul menggunakan motor DC sebagai motor penggerak. Salah satu hal yang menarik dari Metro Kapsul adalah radius putarnya 15 m, dengan jumlah penumpang 50 orang, sehingga sangat cocok untuk digunakan sebagai kendaraan massal di dalam kota yang sudah dibangun gedung-gedung terlebih dahulu. Gambar 1.3 menunjukkan uji coba prototype Metro Kapsul di trek mandiri di daerah Subang.



**Gambar 1.3** Uji coba Metro Capsul

LRT adalah kereta yang dibuat oleh PT. INKA, menggunakan roda baja dan sudah beroperasi di Palembang dan akan segera beroperasi di JABODEBEK, kapasitasnya lebih besar dari pada Metro Capsul.

## **1.6 Manfaat**

Salah satu solusi kemacetan lalu lintas di Indonesia adalah dengan memperbanyak kendaraan massal. Penggunaan kendaraan massal berdampak penggunaan kendaraan pribadi berkurang yang secara langsung berdampak kepada menurunnya volume kendaraan yang diproduksi dari industri manufaktur kendaraan pribadi. Dengan memperbanyak kendaraan massal, diharapkan industri manufaktur kendaraan massal nasional seperti kereta api dan bus meningkat, sehingga penurunan volume industri manufaktur kendaraan pribadi secara tidak langsung dapat tergantikan. Artinya kendaraan massal buatan Indonesia menjadi suatu keharusan. Pemerintah maupun pengusaha swasta nasional harus berpikir ulang saat harus memutuskan import kendaraan massal. Disisi lain industri manufaktur kendaraan

massal nasional harus meningkatkan kualitas produksi dan kapasitas produksinya sesuai dengan peraturan, standar, dan volume kebutuhan kendaraan massal di Indonesia. Riset dibidang *crashworthiness* pada umumnya serta implementasi sistem keamanan pasif pada struktur kereta penumpang akan memberikan manfaat bagi kemajuan industri manufaktur kendaraan nasional, bagi perkembangan ilmu pengetahuan, industri, dan ekonomi bagi negara.

### **1.7 Standar Nasional Indonesia**

Kegiatan penelitian, perancangan dan pembuatan yang telah dilakukan di atas, tidak saja berakhir di pengguna akhir (*end user*), tetapi memberikan kontribusi yang lebih luas lagi secara nasional, misalnya dalam pembuatan Standar Nasional Indonesia dan penyempurnaan peraturan pemerintah/menteri yang berhubungan dengan keselamatan penumpang.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 8826:2019 dengan judul Aplikasi perkeretaapian-Crashworthiness pada sarana perkeretaapian, merupakan standar baru yang disusun dengan merujuk pada standar EN 15277:2008, *Railway application-Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies*.

Standar ini disusun oleh KT 45-01 Sarana Perkeretaapian. Standar ini telah dikonsesuskan pada tanggal 05 Agustus 2019 di Jakarta yang dihadiri oleh pemangku kepentingan terkait, yaitu pemerintah, pelaku

usaha, pakar, dan produsen. Standar ini telah melalui tahap Jajak Pendapat pada tanggal 27 Agustus 2019 sampai dengan 27 Oktober 2019, dengan hasil akhir disetujui menjadi SNI.

Kontribusi hasil penelitian tentang *crashworthiness* pada kereta, peran pemerintah, peran pelaku usaha, pakar, dan pengalaman produsen memberikan warna tersendiri dari isi SNI di atas, yang intinya isi SNI di atas harus berpihak kepada kepentingan kemajuan perkeretaapian Indonesia.

### **1.8 Regulasi Struktur *Crashworthiness***

Dari sekian banyak regulasi perancangan struktur kereta api yang dianut oleh beberapa negara yang mempertimbangkan aspek *crashworthiness* dalam perancangannya, dipilih dua regulasi di bawah ini sebagai acuan perancangan;

1. Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 175 Tahun 2015 (PM 175 Tahun 2015) tentang Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal dengan Penggerak Sendiri, yang mengacu pada regulasi internasional UIC/EN 12663 untuk menguji kondisi statik dari struktur kereta;
2. EN 15227:2008 *Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies*. Standar ini membahas kecepatan minimal yang digunakan sebagai pembebanan minimal pada simulasi impak dan diperoleh beberapa acuan untuk melakukan pengujian dinamik (ditujukan

untuk pemenuhan syarat kelaikan tabrak rancangan) pada perancangan yang dilakukan.

Dalam menentukan acuan pengujian dinamik, terlebih dahulu harus ditentukan golongan keretanya, seperti terlihat pada Tabel 1.1 dan standar kecepatan kereta saat tabrakan, seperti terlihat pada Tabel 1.2.

**Tabel 1.1** Golongan Rancangan Kereta Berdasarkan EN 15227:2008 [16] [17]

<i>Category</i>	<i>Definition</i>	<i>Example of vehicle types</i>
<b>C-I</b>	<i>Vehicle designed to operate on TEN routes, international, national, and regional networks (which have level crossings)</i>	<i>Locomotive, coaches and fixed train units</i>
<b>C-II</b>	<i>Urban vehicles designed to operate only on a dedicated railway infrastructure, with no interface with road traffic</i>	<i>Metro vehicle</i>
<b>C-III</b>	<i>Light rail vehicles designed to operate on urban and/or regional networks, in track-sharing operation, and interfacing with road traffic</i>	<i>Tram trains, peri-urban tram</i>
<b>C-IV</b>	<i>Light rail vehicles designed to operate on dedicated urban networks interfacing with road traffic</i>	<i>Tramway vehicles</i>

**Tabel 1.2** Skenario Pembebanan Tabrak Depan [16] [17]

<i>Design collision scenario</i>	<i>Collision obstacle</i>	<i>Operational characteristic of requirement</i>	<i>Collision Speed – km/h</i>				<i>Collision partner and conditions</i>
			<i>C-I</i>	<i>C-II</i>	<i>C-III</i>	<i>C-IV</i>	
1	<i>Identical train unit</i>	<i>All systems</i>	36	25	25	15	<i>Identical train unit</i>
2	<i>80 t wagon</i>	<i>Mixed traffic with vehicles equipped with side buffers</i>	36	n.a.	25	n.a.	<i>See C.1 for wagon specification</i>
	<i>129 t regional train</i>	<i>Mixed traffic with vehicles with a central coupler</i>	n.a.	n.a.	10	n.a.	<i>See C.2 for representation of regional train</i>

Design collision scenario	Collision obstacle	Operational characteristic of requirement	Collision Speed – km/h				Collision partner and conditions
			C-I	C-II	C-III	C-IV	
3	15 t deformable obstacle	TEN and similar operation with level crossing	$V_{tr} - 50 \leq 110$	n.a.	25	n.a.	See C.3 for representation of large obstacle
	3 t rigid obstacle	Urban line not isolated from the road traffic	n.a.	n.a.	n.a.	25	See C.4 for representation of obstacle
4	Small, low obstacle	Obstacle deflector requirements to be achieved	See Table 3	n.a.	See Table 3	n.a.	See also 6.5

Berdasarkan data pada Tabel 1.1 dan Tabel 1.2, maka dalam perancangan LRT atau Metro Kapsul termasuk kepada golongan C-II dengan skenario tabrakan pertama (1), yakni tumbukan dengan sistem kereta golongan C-II yang identik di depan atau di belakang, dengan kecepatan saat tabrakan sebesar **25 km/jam**.

## 2. PENGERTIAN *CRASHWORTHINESS* <sup>[8]</sup>

*Crashworthiness* (kelaikan tabrak) merupakan kemampuan struktur kendaraan untuk berdeformasi dengan gaya yang yang terkendali dan menyisakan ruang yang cukup untuk melindungi keselamatan kargo/penumpang (dalam kasus ini) ketika terjadi tabrakan [10].

Struktur utama dimana penumpang berada, tidak boleh mengalami deformasi plastis yang berlebihan yang secara langsung dapat membahayakan keselamatan penumpang. Disamping kekuatan struktur

utama di atas, posisi akhir kereta seperti *overriding*, *derailment*, dan *rollover* setelah mengalami tabrakan serta kondisi penumpang harus diperhitungkan dengan baik.

Dalam merancang keamanan pasif struktur kereta, struktur kereta dibagi dalam dua area, yaitu;

- a. *crash zone area*, yaitu daerah “tanpa” penumpang dimana struktur di daerah ini dirancang untuk boleh rusak dan dirancang untuk dapat menyerap energi tabrakan sebesar mungkin. Dikenal juga dengan struktur penyerap energi.
- b. *area berpenumpang*, yaitu daerah berpenumpang, struktur di daerah ini dirancang tidak mengalami deformasi plastis yang berlebihan sehingga penumpangnya selamat.

Dalam hubungannya dengan perancangan struktur penyerap energi, karakteristik utama yang harus diperhatikan adalah fungsi perlambatan yang mampu diberikan oleh struktur dan jumlah energi yang mampu diserap oleh struktur. Karakteristik perlambatan dari struktur penyerap energi yang dirancang sangat menentukan keselamatan penumpang, karena pada saat tabrakan terjadi penumpang akan terlempar kedepan dan menabrak interior (kursi) didepannya. Keselamatan penumpang yang menabrak interior didepannya ditentukan oleh kecepatan penumpang menabrak interior di dalam kereta dan lamanya proses tumbukan itu terjadi.

Dari uraian diatas dapat dikatakan bahwa besarnya gaya tabrakan,

bentuk deformasi kereta, dan posisi kereta setelah terjadinya tabrakan perlu diperhitungkan dengan baik. Hasil perhitungan ini kemudian akan digunakan untuk merancang konstruksi penyerap energi dan konstruksi kereta agar dapat melindungi penumpang pada saat terjadinya tabrakan.

### 3. STRATEGI PENERAPAN *CRASHWORTHINESS* PADA KERETA

*“Perancangan adalah proses iterasi, diperlukan beberapa kali iterasi untuk memperoleh hasil rancangan yang optimal, baik optimal dari sisi produksi, optimal dari sisi operasi dan maintenance dan optimal dari biaya.”*

Proses perhitungan struktur kereta dalam simulasi tabrakan kereta, memerlukan waktu perhitungan komputer yang cukup lama. Untuk mengatasi hal tersebut, strategi optimasi perhitungan simulasi tabrakan menjadi sangat penting. Dengan strategi yang tepat, beberapa varian perancangan struktur dapat diusulkan lebih cepat, sehingga dapat dihasilkan dan dipilih rancangan struktur kereta yang aman terhadap penumpang saat terjadi tabrakan dan optimal dari semua sisi.

Untuk memperoleh struktur kereta yang lebih aman, struktur kereta yang dirancang dan diproduksi harus mampu untuk melindungi penumpang dengan mengubah energi kinetik selama proses tabrakan terjadi untuk dikonversi menjadi bentuk energi lain yang dapat diprediksi dan dikontrol [18]. Keamanan struktur kereta saat tabrakan salah satunya dapat ditinjau pada jenis tabrakan aksial, yakni *frontal impact* (tabrak depan). Kelaikan tabrak pada kasus *frontal impact* dapat direpresentasikan

sebagai besar deformasi plastis terkontrol yang diperbolehkan pada struktur depan kereta saat proses tabrakan untuk menghindari intrusi antara struktur (dan komponen mesin) dengan ruang penumpang atau pengguna serta untuk menjaga deselerasi yang terjadi pada proses tersebut berada di bawah batas toleransi manusia [19].

Salah satu strategi untuk memperoleh struktur kereta yang optimal dari sisi rancangan, optimal dari sisi produksi dan optimal dari sisi operasi, *maintenance*, dan biaya, adalah dengan menggunakan *crash box* sebagai struktur utama kereta bagian depan (*crash zone area*).

### 3.1 Karakteristik *Crash box* pada Kasus *Axial Impact* <sup>[8]</sup>

*Crash box* merupakan komponen yang sangat umum digunakan karena memiliki beberapa keunggulan, diantaranya memiliki performa yang sangat baik pada pembebanan dinamik, murah (*cost effective*), serta mudah untuk dimanufaktur dan diinstalasi. Saat ini, komponen *thin-walled* atau *crash box*, banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan sifat kelaikan tabrak alat transportasi dan konstruksi [18].

Karakteristik yang harus dimiliki oleh *crash box* ialah kuantitas energi yang diserap saat proses tabrakan berlangsung atau yang sering diistilahkan dengan *energy absorbed* (EA)[8]. Untuk menentukan performa yang berkaitan dengan besar *energy absorbed* dan parameter lainnya yang berkaitan dengan kelaikan tabrak struktur pada struktur *crash box*, digunakan beberapa parameter, yakni:

- 1) *Initial peak force* ( $F_{max}$ ), yaitu gaya tabrak (*crush force*) maksimum yang dibutuhkan untuk menghasilkan deformasi plastis pada struktur penyerap energi impact. Parameter ini dapat ditinjau dari kurva force - deformasi dari struktur [19];
- 2) *Crush force efficiency* (CFE), merupakan rasio antara *mean crushing force* dan *peak crushing force* yang bertujuan untuk mengidentifikasi secara kuantitatif distribusi gaya impact terhadap struktur [19]. Rentang nilai CFE berada pada  $0 < CFE \leq 1$ , dengan nilai 1 menandakan bahwa nilai *mean crushing force* sama dengan nilai *peak crushing force*, atau gaya impact terdistribusi merata pada struktur yang dibebankan. Untuk proses penelitian ini, nilai yang ditampilkan adalah *mean crushing force* dan *peak crushing force* yang bertujuan untuk melihat reduksi nilai keduanya terhadap rancangan awal;
- 3) *Stroke efficiency* (SE), yaitu rasio antara rentang deformasi dan panjang total yang diperbolehkan untuk berdeformasi, yang dirumuskan:

$$SE = \frac{\Delta_{deform}}{\Delta_{available}} \quad (3.1)$$

Nilai SE berada pada rentang  $0 < SE \leq 1$ . *Stroke efficiency* menyatakan efektivitas deformasi rancangan yang telah dirancang terhadap nilai deformasi maksimum struktur yang aman. Selain itu, semakin besar nilai SE, maka semakin besar pula deformasi yang lebih besar pada sebuah rancangan [19]. Apabila

nilai ini melebihi 1, maka deformasi yang terjadi telah melampaui batas deformasi struktur yang aman bagi pengguna (dalam hal ini adalah masinis);

- 4) *Structure deceleration* yang berkaitan dengan efek pembebanan impact pada kelaikan tabrak suatu kendaraan (menyerap energi impact dan mampu berdeformasi secara terkontrol untuk menyediakan ruang aman dan perlindungan pada penumpang). Untuk mencapai tujuan itu, maka diperlukan limit (batasan) pada deselerasi struktur. Deselerasi maksimum berada di bawah 60 g (*chest maximum deceleration*) dengan mengasumsikan deformasi kendaraan yang konstan [20]. Untuk mengukur deselerasi maksimum pada simulasi struktur berdasarkan SAE J211-1, digunakan *filter* SAE dengan *channel frequency class* 60 untuk *collision simulation input* [21].
- 5) *Specific energy absorption* (SEA), yaitu rasio antara jumlah energi yang diserap ketika tabrakan dan massa total struktur penyerap energi, yang dirumuskan:

$$SEA = \frac{D_a}{m_{crush}} \quad (3.2)$$

Sebuah struktur penyerap energi impact yang ideal memiliki *initial peak force* yang rendah, serta SE dan SEA yang tinggi [19]. Untuk memenuhi persyaratan yang ada, diperlukan beberapa optimasi terhadap struktur penyerap energi impact, yakni:

- 1) Geometri dengan deformasi plastis terkontrol;

- 2) Material dengan keuletan yang mumpuni untuk menyerap energi impact sekaligus mengalami deformasi plastis yang seefektif mungkin [20].

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa untuk memperoleh rancangan yang memiliki kelaikan tabrak yang lebih baik, dapat ditinjau dengan peningkatan nilai parameter SE dan SEA yang disertai dengan penurunan *initial peak force*. Optimasi nilai parameter - parameter tersebut dapat dilakukan dengan melakukan proses rancangan ulang (*redesign*) dengan mempertimbangkan 2 (dua) aspek utama, yakni geometri yang disesuaikan dengan pembebanan dinamik sehingga diperoleh deformasi plastis yang dapat terkontrol dan pemilihan material yang bersifat ulet (*ductile*) yang mampu menyerap energi impact dari pembebanan yang terjadi disesuaikan dengan besar pembebanan dinamik yang diberikan.

Satu hal yang penting dalam penggunaan *crash box* untuk struktur penyerap energi, bahwa pemasangan *crash box* pada struktur untuk pembebanan tabrak aksial, dipasang searah dengan arah vektor kecepatan tabrak sehingga energi tabrak aksial yang terserap, dapat secara optimum untuk diubah menjadi deformasi pada struktur. Deformasi pada struktur dapat didasarkan secara kualitatif pada perbandingan panjang sisi penampang terhadap ketebalan.

Beberapa sifat mekanik dan mode kegagalan dari *crash box* untuk penggunaan struktur penyerap energi yang mengalami beban impact aksial, dapat di lihat sebagai berikut:

- a. *Non-compact mode*, untuk struktur dengan perbandingan sisi penampang terhadap ketebalan sebesar 100, mode kegagalan ini, tidak diinginkan bila ditinjau dari bentuk penyerapan energi struktur karena mode ini akan menghasilkan *Euler buckling* pada struktur yang sekaligus menurunkan kemampuan penyerapan energi struktur *crash box* [22].
- b. *Symmetric mode*, *crash box* terdeformasi secara progresif selama proses impact terjadi, dengan deformasi plastis terbesar terjadi pada lipatan (*horizontal folds*) dan pada sudut - sudut *crash box* [22].
- c. *Asymmetric folding mode*. *Asymmetric folding mode* dapat dibagi menjadi dua jenis lipatan, yakni lipatan dengan satu permukaan lipatan ke dalam disebut *asymmetric mix mode A*, seperti terlihat dalam Gambar 3.1 dan *asymmetric mix mode B*, lipatan dengan dua permukaan yang saling tegak lurus pada *crash box* melipat ke dalam, sedangkan dua lainnya melipat ke arah sebaliknya seperti dapat dilihat pada Gambar 3.2 [23].



**Gambar 3.1** *Asymmetric Folding Mix Mode A* [23] [8]



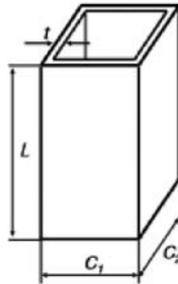
**Gambar 3.2** *Asymmetric Folding Mix Mode B* [23] [8]

Deformasi *asymmetric folding mode* memunculkan instabilitas struktur dan menyebabkan terjadinya *Euler's Buckling*. *Euler's Buckling* menyebabkan penyerapan energi yang tidak efektif. *Euler's Buckling* terjadi akibat adanya inklinasi pada bagian yang belum mengalami deformasi relatif terhadap acuan sumbu vertikal *crash box*. Inklinasi tersebut akan mengakibatkan transisi dari beban aksial progresif menjadi beban *bending* pada permukaan *crash box* karena banyaknya lipatan yang bersifat tidak simetris pada *crash box*. Ternyata bentuk lipatan yang tidak simetris pada *crash box* terjadi karena adanya cacat pada *crash box*, tidak disebabkan oleh dimensi dari *crash box* [23].

### **3.1.1 Rancangan *Crash box* dengan Penampang Persegi Panjang (*Rectangular*)<sub>[8]</sub>**

Bentuk persegi panjang pada *crash box*, yang diusulkan Chen, dapat dilihat seperti pada Gambar 3.3 di bawah, merupakan bentuk generalisasi

dari penampang persegi pada umumnya yang diadopsi untuk rancangan *crash box*.



**Gambar 3.3** Rancangan *Crash box* dengan Penampang *Rectangular* [24]

Hampir sama dengan Chen di atas, Du Bois memberikan persamaan analitik *mean crushing force* dan *initial peak crushing force* untuk meninjau parameter *crashworthiness* pada rancangan *crash box* dengan penampang persegi panjang. Persamaan Du Bois dapat dilihat pada Persamaan 5.1 dan Persamaan 5.2 pada subbab 5.

### 3.1.2 Efektifitas Rancangan *Crash box* pada Struktur Penyerap Energi Impak<sub>[8]</sub>

Sebelum *crash box* digunakan sebagai komponen pada struktur *crashworthiness*, terlebih dahulu akan ditinjau keefektifan *crash box* saat diberi beban impak dalam berbagai variasi parameter geometri pada *crash box* tersebut. Parameter geometri *crash box* yang divariasikan adalah, variasi;

- Ketidaksimetrisan atau asimetris,

- ketebalan, melalui analisis tren pada variasi ketebalan *crash box*,
- *trigger* pada rancangan *crash box*.

### 3.1.2.1 Ketidaksimetrisan pada Rancangan *Crash box*

Ketidaksimetrisan pada penampang *crash box* terjadi karena penyimpangan hasil ekstrusi yang tidak simetris, penampang hasil ekstrusi tidak sepenuhnya berbentuk persegi panjang, sudut antar sisi tidak bernilai  $90^\circ$  melainkan menyimpang sebesar hingga  $2^\circ$ . Dengan demikian, perlu dilakukan simulasi untuk melihat apakah simpangan yang terjadi hingga sudut  $2^\circ$  dapat berpengaruh pada penurunan kualitas rancang *crash box* atau perubahan pada karakteristik kelaikan tabrak *crash box* yang telah dirancang.

Pengujian dilakukan baik untuk *crash box* simetris dan *crash box* yang tidak simetris. Beban pada kedua model di atas diberikan melalui *impactor*, dengan beban yang sama yaitu, massa *impactor* sebesar 142,368 kg dan kecepatan *impactor* 13,88 m/s. Dimensi *crash box* simetris adalah panjang 440 mm dan penampang 97,5 mm x 150 mm, sedangkan penampang *crash box* tidak simetris berbentuk trapesium dengan panjang sisi sejajar adalah 95,3 mm dan 97,5 mm serta tinggi 150 mm, memiliki panjang yang sama yaitu 440 mm. Material yang digunakan adalah sama yaitu alumunium AA6005-T5 yang biasa sebagai material dari struktur penyerap energi impak *light rail transit*.

Hasil analisis dengan menggunakan LS DYNA dapat dilihat pada

Tabel 3.1 di bawah ini. Grafik pada Gambar 3.7 menggambarkan grafik untuk *mean crushing force* untuk masing - masing model *crash box*.

**Tabel 3.1** Perbandingan *Crash box* Simetris dan Asimetris <sup>[8]</sup>

Rancangan	Deformasi	<i>Energy Absorbed</i>	<i>Mean Crushing Force</i>	<i>Peak Crushing Force</i>
Simetri	269,218 mm	13.693,4 J	50,863 kN	170,391 kN
Asimetri	266,684 mm	13.694,2 J	51,35 kN	169,83 kN
Perbedaan	0,941%	0,006%	0,957%	0,329%

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbedaan penampang simetris dan asimetris sangat kecil maksimum bernilai 0,957%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi untuk *crash box* dengan bentuk penampang tak simetris (dengan sudut penampang menyimpang sebesar hingga 2° dari sudut 90°) tetap valid dalam proses simulasi yang dilakukan. Dengan perbedaan yang tidak begitu signifikan (maksimum nilai *error* ialah 0,957%), maka dapat disimpulkan ketaksimetrisan pada penampang struktur *crash box* dapat diabaikan pada proses rancangan yang dilakukan [8].

### 3.1.2.2 Variasi Ketebalan pada Rancangan *Crash box*

Variasi ketebalan *crash box* dimaksudkan untuk menganalisis tren perubahan yang terjadi pada parameter - parameter kelaikan tabrak. Selain itu, variasi ini juga dimaksudkan untuk melakukan studi parametrik dalam mereduksi massa struktur penyerap energi impact *light*

*rail transit* agar bersesuaian dengan rancangan struktur ringan (*lightweight structure*) yang ingin diterapkan pada struktur tersebut. Variasi ketebalan dilakukan pada *crash box* dengan panjang 440 mm dengan penampang asimetri sama seperti model yang digunakan pada pengujian ketidaksimetrisan pada rancangan *crash box*. Selain itu, spesifikasi pembebanan pada *impactor* juga mengikuti Tabel 3.1 (dengan pengurangan kecepatan awal *impactor* menjadi  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ) pada pengujian variasi ketebalan pada rancangan struktur *crash box*. Simulasi pembebanan menggunakan perangkat lunak LS DYNA.

Dapat dilihat pada Gambar 3.6, terjadi peningkatan pada *initial peak crushing force*, yakni gaya awal yang diberikan pada *crash box* untuk kemudian diserap oleh struktur menjadi energi untuk berdeformasi akibat proses impak yang dialami. Peningkatan *peak crushing force* yang terjadi akibat adanya penambahan ketebalan pada struktur *crash box* mengisyaratkan adanya penambahan kekakuan pada struktur, sehingga akan meningkatkan resistansi struktur terhadap terjadinya *progressive buckling* seperti yang diharapkan sebagai bentuk proses deformasi struktur saat proses impak terjadi. Peningkatan tersebut juga turut diikuti oleh adanya peningkatan terhadap nilai *mean crushing force*, yakni gaya rerata yang terjadi pada struktur selama proses impak. Selain itu, peningkatan pada *peak crushing force* dan *mean crushing force* dengan penambahan ketebalan akan mengurangi besarnya deformasi yang terjadi pada struktur dikarenakan untuk menghasilkan deformasi pada struktur,

gaya pembebanan yang harus diberikan semakin tinggi bila struktur tersebut semakin tebal pula, besarnya gaya yang semakin tinggi tersebut tentunya akan berpengaruh terhadap seberapa banyaknya energi yang diserap hingga diperoleh besar gaya yang dibutuhkan dapat membuat struktur *crash box* terdeformasi. Hal ini dapat dilihat pada relasi sederhana dalam hukum kekekalan energi yang diaplikasikan ke struktur *crash box* pada persamaan berikut;

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k\Delta^2 = P_m\Delta \quad (3.1)$$

Dari Persamaan 3.1, dapat dilihat energi kinetik yang diberikan oleh *impactor* kepada struktur diserap untuk kemudian digunakan sebagai energi untuk berdeformasi. Deformasi yang terjadi pada struktur menurut persamaan tersebut berkaitan dengan baik kekakuan struktur ( $k$ ) yang akan bertambah seiring dengan adanya penambahan ketebalan struktur, serta nilai *mean crushing force* yang juga akan bertambah dengan penambahan ketebalan struktur. Akibatnya, struktur akan mengalami deformasi yang lebih kecil dengan adanya penambahan ketebalan seperti yang dapat diamati pada Gambar 3.7.

Selain itu, terjadi pula penurunan jumlah energi spesifik yang diserap oleh struktur dengan adanya penambahan ketebalan struktur. Penambahan ketebalan struktur pada dasarnya akan menambah massa struktur *crash box* yang dirancangan. Penambahan massa ini juga secara otomatis akan memperkecil nilai *specific energy absorbed* (SEA) pada struktur *crash box*.

**Tabel 3.2** *Energy Absorbed Crash box* dengan Variasi Ketebalan [8]

440 mm		
Rancangan	<i>Energy Absorbed</i>	SEA
1,5 mm	7105,86 J	13,66 $\frac{J}{g}$
2 mm	7097,17 J	11,37 $\frac{J}{g}$
3 mm	7072,47 J	8,93 $\frac{J}{g}$
4 mm	7049,37 J	6,66 $\frac{J}{g}$
5 mm	7010,01 J	4,85 $\frac{J}{g}$

Bila dilihat dari segi penyerapan energi, total energi yang diserap relatif konstan dengan tren penurunan dengan persentase yang berada di bawah 2% (jika dibandingkan antara ketebalan *crash box* 1,5 mm dan 5 mm). Perbedaan penyerapan energi oleh masing - masing *crash box* dengan variasi ketebalan diperoleh akibat jenis deformasi yang terjadi tidak hanya deformasi plastis saja (deformasi permanen), melainkan juga deformasi elastis (deformasi tak permanen). Perbedaan ini diperoleh dari penyerapan energi untuk menghasilkan deformasi elastis pada *crash box*. Energi untuk melakukan deformasi elastis kemudian akan diberikan kepada *impactor* dalam peristiwa *bounce - back* (*impactor* akan berbalik dengan kecepatan tertentu) dan struktur *crash box* yang berdeformasi elastis dengan nilai regangan tertentu akan kembali ke bentuk semula sejauh nilai regangan elastik tersebut.

### 3.1.2.3 Variasi Panjang pada Rancangan *Crash box*

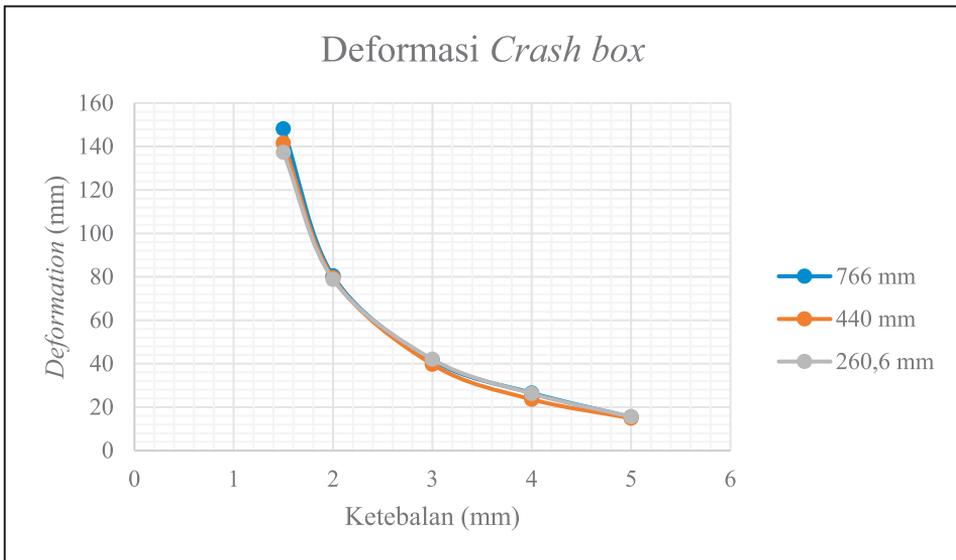
Variasi ukuran panjang pada *crash box* digunakan untuk melihat

perbandingan parameter *crashworthiness* yang berubah seiring dengan penambahan panjang pada *crash box* yang dirancangan. Perbandingan parameter ini kemudian akan dijadikan pertimbangan parameter untuk proses peletakan *crash box* pada struktur penyerap energi impact. Pada Tabel 3.3 disajikan data variasi panjang yang akan digunakan pada struktur penyerap energi impact. Variasi panjang tersebut mempertimbangkan panjang kolom yang tersedia pada *end under frame* sebagai komponen dengan penyerapan energi paling banyak pada struktur penyerap energi impact.

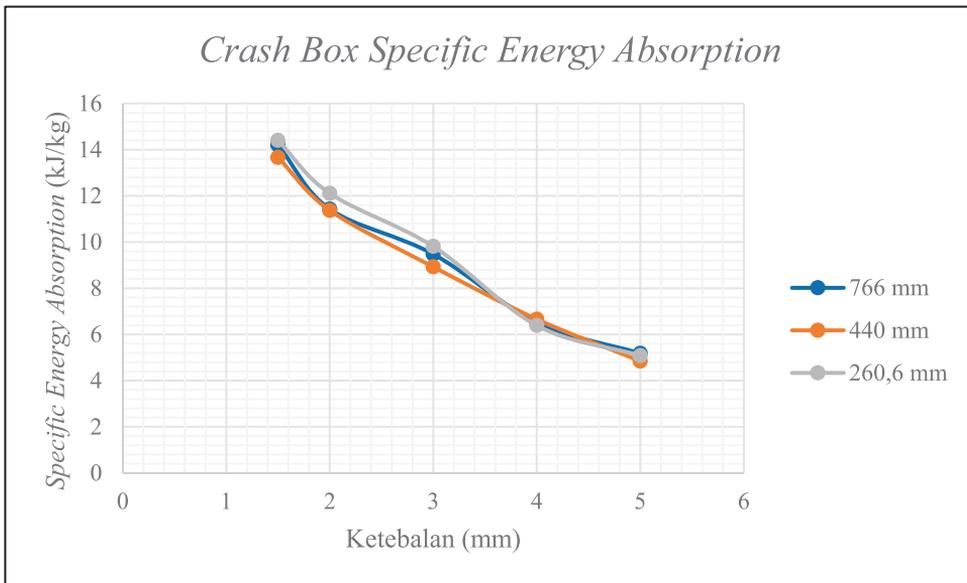
**Tabel 3.3** Variasi Panjang *Crash box* yang Digunakan <sup>[8]</sup>

<b>L</b>	<b>L/C</b>	<b>Ketebalan</b>	<b>Jenis Lipatan</b>
260,6 mm	2,088	1,5 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		2 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		3 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		4 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		5 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
440 mm	3,52	1,5 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		2 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		3 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		4 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		5 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
766 mm	6,14	1,5 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		2 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		3 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		4 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>
		5 mm	<i>Symmetric Folding Mode</i>

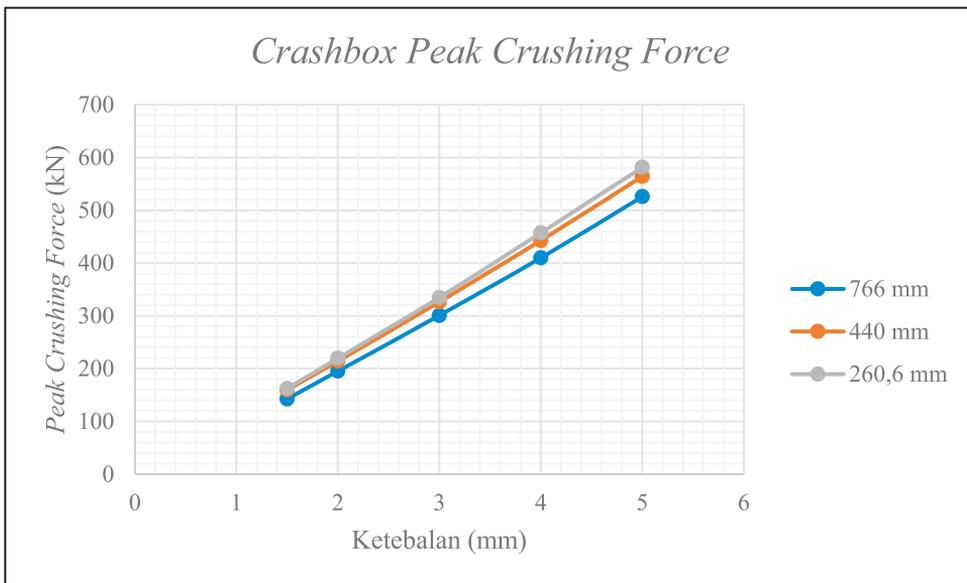
Pemodelan kemudian dilakukan untuk masing - masing panjang *crash box* yang akan digunakan, kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak LS DYNA untuk variasi ketebalan yang bersesuaian pada Tabel 3.3. Diperoleh data yang direpresentasikan pada gambar - gambar berikut;



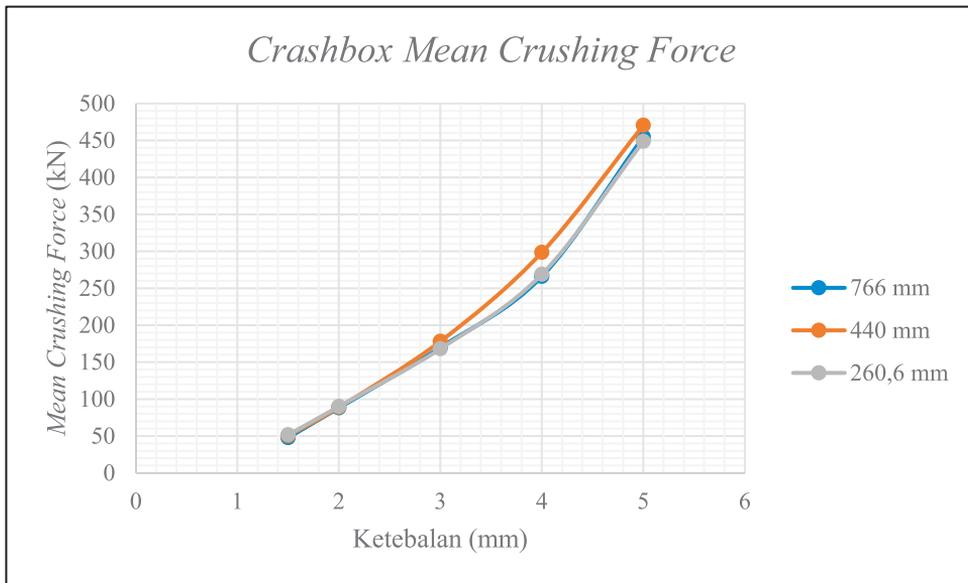
**Gambar 3.4** Deformasi pada Rancangan *Crash box* dengan Variasi Panjang <sup>[8]</sup>



**Gambar 3.5** Penyerapan Energi pada Rancangan *Crash box* dengan Variasi Panjang<sup>[8]</sup>



**Gambar 3.6** *Peak Crushing Force* pada Rancangan *Crash box* dengan Variasi Panjang<sup>[8]</sup>



Gambar 3.7 Mean Crushing Force pada Rancangan Crash box dengan Variasi Panjang<sup>[8]</sup>

Tabel 3.4 Perbandingan Energy Absorbed pada Variasi Panjang Crash box<sup>[8]</sup>

Ketebalan	Energy Absorbed (J)			Persen Perbedaan Maksimum
	260,6 mm	440 mm	766 mm	
1,5 mm	7102,18	7105,86	7105,32	0,05%
2 mm	7095,35	7097,17	7096,28	0,03%
3 mm	7073,94	7072,47	7073,74	0,02%
4 mm	7053,77	7049,37	7055	0,08%
5 mm	7014,7	7010,01	7012,01	0,07%

Gambar 3.4, 3.5, 3.6, dan 3.7 masing - masing merepresentasikan persentase perbedaan parameter deformasi, *specific energy absorption*, *mean crushing force*, dan *peak crushing force* terhadap variasi panjang struktur *crash box*. Berdasarkan pengamatan pada tren perbandingan data pada masing - masing parameter kelaikan tabrak yang dianalisis dengan adanya variasi panjang *crash box*, dapat dilihat bahwa perubahan

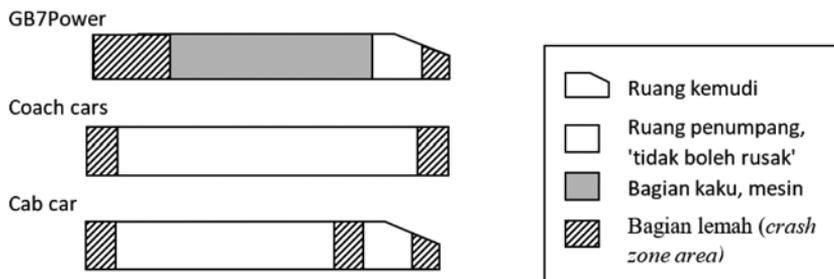
signifikan terjadi pada *specific energy absorption*, yakni perbandingan antara jumlah energi yang diserap oleh *crash box* berbanding dengan massa terdeformasi masing - masing *crash box*. Semakin panjang deformasi suatu *crash box* untuk jumlah energi yang diserap yang diasumsikan sama (dapat diamati pada Tabel 3.4), maka semakin bertambah nilai dari volume *crash box* yang digunakan untuk berdeformasi. Bila dikaitkan, maka penambahan volume *crash box* yang digunakan, mengakibatkan terjadinya penambahan massa deformasi *crash box* yang ditinjau, sehingga penambahan massa tersebut akan berakibat pada penurunan nilai *specific energy absorption* untuk penambahan ketebalan *crash box* seperti yang telah diteliti sebelumnya. Akan tetapi, perubahan *specific energy absorption* yang diperoleh pada variasi panjang tidak signifikan, akibat panjang deformasi *crash box* untuk panjang yang berbeda dengan ketebalan yang sama tidak berbeda signifikan.

Selain itu, perubahan yang variatif juga terjadi pada parameter kalikan tabrak lainnya. Akan tetapi, nilai perubahan ini tidaklah signifikan untuk masing - masing variasi panjang. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai parameter kelaikan tabrak lainnya independen terhadap variasi nilai panjang *crash box* yang digunakan. Hal ini juga dapat dilihat pada Persamaan (5.1) dan (5.2), bahwa pada perhitungan analitik *mean crushing force* dan *peak crushing force* hanya bergantung pada variasi nilai ketebalan dan ukuran geometri penampang *crash box*. Akan tetapi, perubahan yang variatif itu, juga menandakan bahwa semua variasi Panjang *crash box* menyerap jumlah energi yang hampir sama, atau dengan

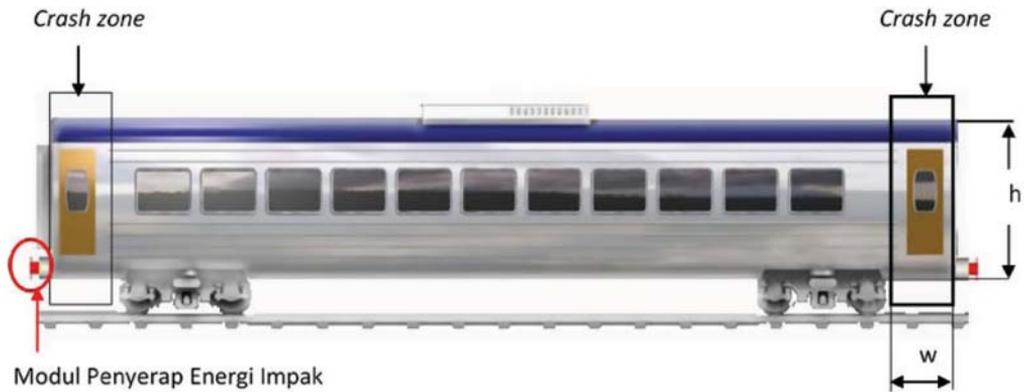
kata lain, panjang struktur *crash box* yang dibutuhkan untuk berdeformasi dan menyerap energi hanya sebesar 160 mm (Gambar 3.4), sehingga untuk ketiga variasi Panjang *crash box* akan menyisakan struktur yang tidak berdeformasi dan tentunya akan menurunkan efektivitas fungsi *crash box* sebagai struktur penyerap energi. Sehingga, untuk pembebanan energi yang dilakukan, juga dapat disimpulkan bahwa semakin panjang suatu *crash box*, maka semakin besar pula panjang kolom untuk berdeformasi dan menyerap energi impact yang lebih banyak.

#### 4. RANCANGAN ALTERNATIF YANG DIUSULKAN<sub>[2]</sub>

Sebelum membahas rancangan struktur dasar di *crash zone area*, akan ditunjukkan terlebih dahulu daerah *crash zone area* untuk beberapa tipe kereta. Gambar 4.1 menunjukkan *crash zone area* dari beberapa tipe kereta, letaknya selalu di ujung kereta dan area tersebut dirancang untuk boleh rusak, sementara area lainnya diharapkan tidak mengalami kerusakan saat terjadi tabrakan. Gambar 4.2 merepresentasikan posisi *crash zone area* untuk jenis kereta *coach car*.



**Gambar 4.1.** Sistem ideal penyerap energi pada struktur kereta (*crash zone area*)



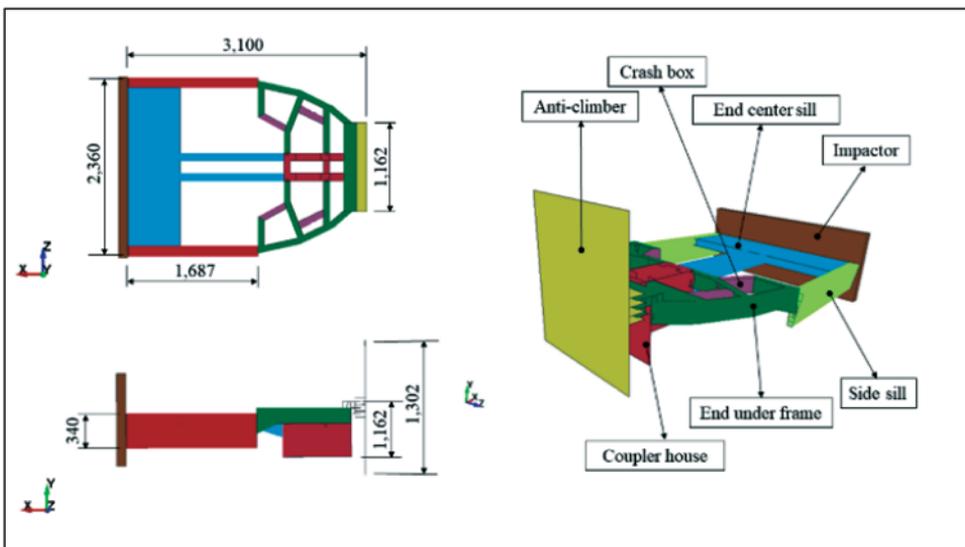
**Gambar 4.2.** *Crash zone area* untuk kereta tipe *coach car*

Gambar 4.3 menunjukkan rancangan struktur dasar di *crash zone area* dari sistem penyerap energi dampak yang terdiri atas *side sill*, *end center sill*, *coupler house*, *anti-climber*, *end under frame*, dan *crash box* dalam bentuk *C-channel*. Dalam rancangan yang diusulkan, *crash box* adalah kolom dengan penampang persegi panjang dan orientasi longitudinalnya disusun dengan arah longitudinal dari kereta. Komponen *cross-bar* ditambahkan pada rancangan yang diusulkan untuk memastikan bahwa *crash box* akan memiliki *buckling* yang progresif ketika sistem dibebani dengan dampak frontal. Modifikasi lain yang dibuat pada usulan rancangan yaitu reduksi dari ketebalan *end under frame* dari 10 mm ke 2 mm. Tabel 4.1 menunjukkan daftar komponen dari rancangan acuan dan usulan yang diajukan beserta dengan massanya. Massa dari *cross-bar* yaitu 22,05 kg dan *end under frame* dengan *crash box* 23,11 kg, komponen ini lebih ringan dibandingkan massa rancangan acuan. Massa ini didapatkan setelah simulasi dan evaluasi dari beberapa *crash box* dengan variasi ketebalan. Total massa dari rancangan

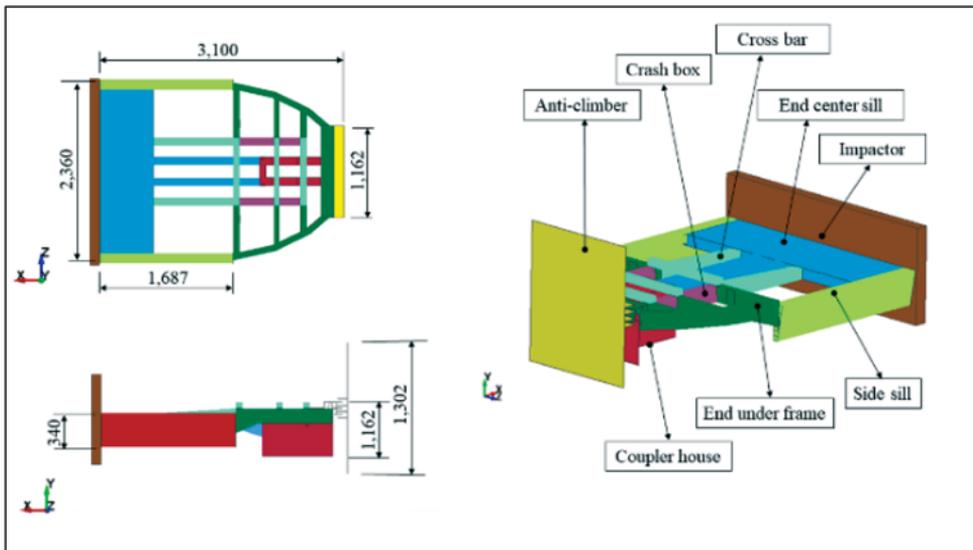
yang diajukan yaitu sekitar 42 kg lebih ringan dibandingkan rancangan acuan.

**Tabel 4.1** Perbandingan komponen sistem acuan dan rancangan yang diajukan <sup>[2]</sup>

Komponen	Massa (kg)	
	Rancangan acuan	Rancangan yang diusulkan
<i>Side sill</i>	131,53	131,53
<i>End center sill</i>	168,22	168,36
<i>Coupler house</i>	98,19	98,19
<i>Anti-climber</i>	56,91	56,91
<i>End under frame and crash box</i>	99,13	23,11
<i>Cross-bar</i>	-	22,05
TOTAL	553,98	511,70



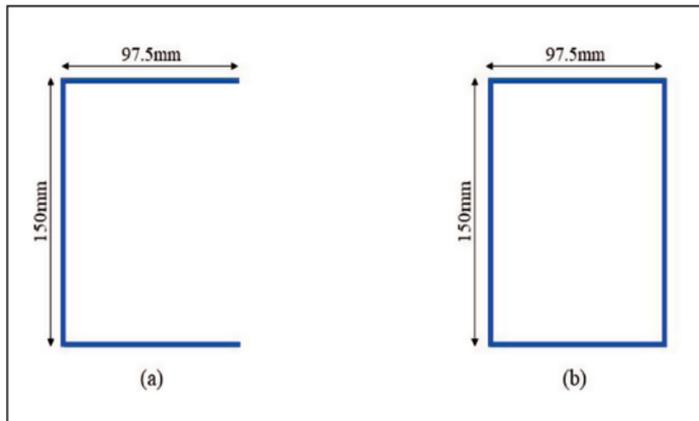
**Gambar 4.3** Representasi komponen simulasi rancangan dasar <sup>[2]</sup>



Gambar 4.4. Representasi komponen simulasi rancangan yang diajukan<sub>[2]</sub>

#### 4.1 Variasi Geometri *Crash Box* Tunggal<sub>[2]</sub>

Penampang melintang *crash box* pada rancangan yang diusulkan ditentukan berdasarkan evaluasi atas performa dua tipe *crash box* dengan variasi ketebalan, *C-channel* (sebagai rancangan acuan), dan penampang persegi panjang dengan dimensi luar yang sama seperti *C-channel*, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.3. Simulasi numerik dilakukan untuk *crash box* dengan kedua penampang melintang serta variasi ketebalan (2 mm - 7 mm) dan panjang 440 mm untuk memprediksikan kecenderungan dari perilaku parameter *crashworthiness*. Penabrak (*impactor*) yang digunakan pada simulasi memiliki massa 100 kg dan kecepatan 15 m/s.<sub>[2]</sub>



**Gambar 4.5.** (a) *C-Section*, (b) Bagian persegi panjang<sub>[2]</sub>

## 4.2 Pemodelan

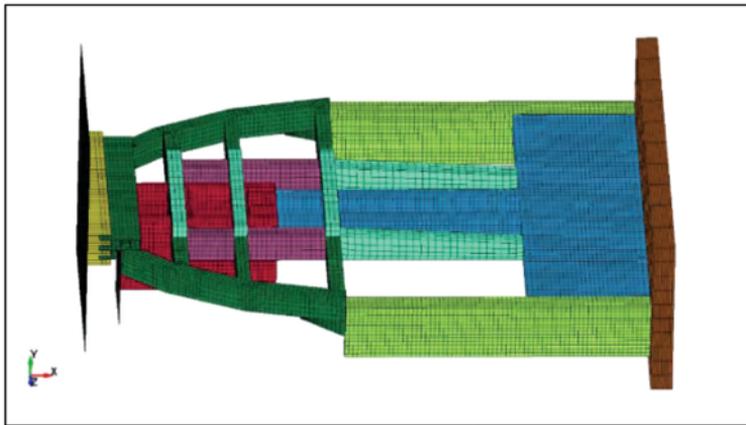
Simulasi pada penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi performa atas *crash box* tunggal seperti penjelasan pada segmen sebelumnya dan untuk mengevaluasi performa keseluruhan sistem penyerap energi impact. Seluruh simulasi yang dilakukan menggunakan LS-DYNA yang berbasis metode elemen hingga.

**Tabel 4.2.** Tipe elemen komponen rancangan yang diajukan<sub>[2]</sub>

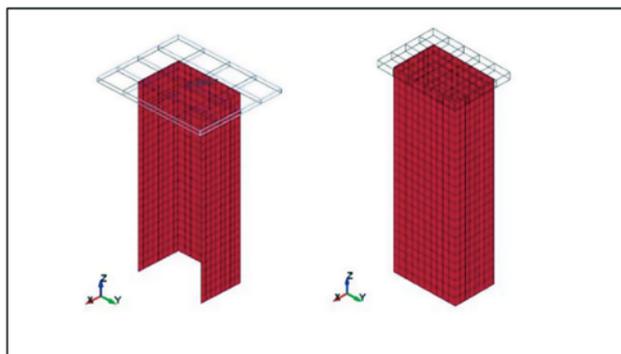
Komponen	Tipe elemen
Penabrak	<i>Constant stress solid element</i>
<i>Side sill</i>	Elemen <i>shell</i> terintegrasi menyeluruh
<i>End center sill</i>	
<i>Coupler house</i>	
<i>Anti-climber</i>	
<i>End under frame dan crash box</i>	
<i>Cross-bar</i>	

Gambar 4.6 dan 4.7 secara berurutan menunjukkan hasil dari metode elemen hingga dari sistem rancangan yang diajukan dan *crash box* tunggal.

Tipe elemen yang digunakan untuk model dari sistem acuan dan rancangan yang diajukan ditunjukkan pada Tabel 4.2. Elemen *shell* yang terintegrasi menyeluruh digunakan untuk mengurangi efek *locking* dan meningkatkan kekokohan hasil simulasi [26]. Uji konvergensi dilakukan untuk menemukan dimensi *mesh* yang optimum dari kedua sistem. Hal ini dapat dilihat pada gambar bahwa komponen sistem memiliki ukuran *mesh* yang lebih kecil dibandingkan penabrak.



**Gambar 4.6.** Hasil dari proses *meshing* rancangan acuan<sup>[2]</sup>



**Gambar 4.7.** Simulasi *Meshing crash box tunggal*<sup>[2]</sup>

Sistem dibebani dalam arah longitudinal kendaraan dengan sebuah penabrak (*impactor*) yang memiliki massa 20,347 kg dan kecepatan 25 m/s. Kondisi batas yang digunakan pada simulasi ditampilkan pada Tabel 4.3.

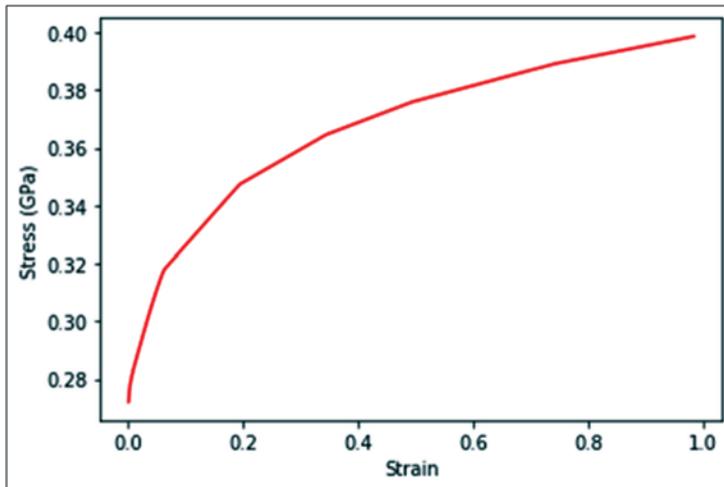
**Tabel 4.3.** Tipe elemen komponen rancangan yang diajukan<sub>[2]</sub>

Komponen	Kondisi batas
<i>Anti-climber</i> (simulasi sistem)	<i>Fixed</i> diseluruh sumbu
<i>Rail</i> (tidak termasuk pada representasi geometris) (simulasi sistem)	<i>Fixed</i> diseluruh sumbu
<i>Impactor</i> (simulasi sistem)	Bergerak hanya dalam sumbu x
<i>Impactor</i> (single crash box simulation)	Bergerak hanya dalam sumbu z

Material yang digunakan pada model *crash box* tunggal, rancangan acuan, dan rancangan yang diajukan adalah alumunium AA6061-T6. Hubungan tegangan-regangan pada daerah elastis dan plastis belum menggunakan SHPB metode, pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur Ringan Institut Teknologi Bandung yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.8. Karakteristik material lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4.** Parameter fisik AA6061-T6<sub>[2]</sub>

Parameter	Nilai
Densitas	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Modulus Young	69,28 Gpa
Rasio Poisson	0,33
Kekuatan <i>yield</i>	271,7 Mpa



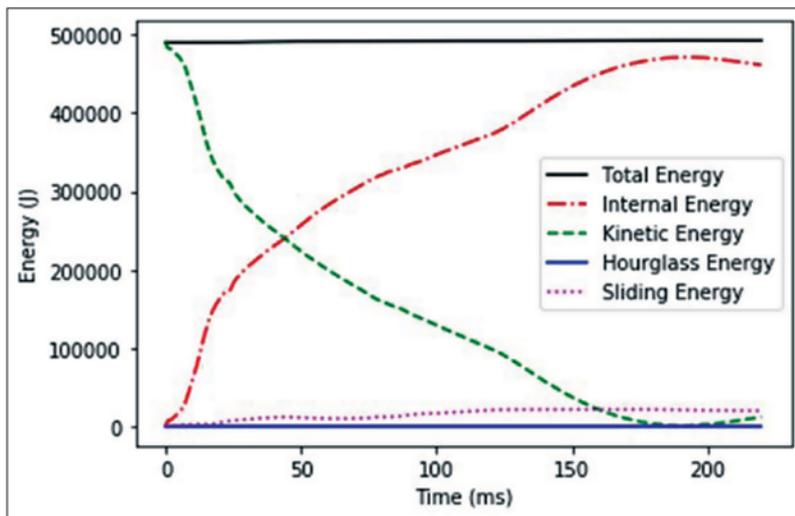
Gambar 4.8. Kurva tegangan-regangan AA01-T6<sub>[2]</sub>

Untuk memperoleh grafik seperti pada gambar 4.8, *Piecewise linear plasticity* digunakan dalam melakukan pemodelan material AA01-T6. Model material menggunakan hubungan Cowper Symond untuk memodelkan efek laju regangan yang ditampilkan dengan berikut [26]:

$$\beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}} \quad (3.1)$$

Fidelitas dari hasil simulasi dihitung secara kualitatif menggunakan kriteria kesetimbangan energi. *Hourglass energy* yang dikenal sebagai mode deformasi *zero-energy* nonfisik harus bernilai nol untuk memvalidasi bahwa tidak ada galat pada simulasi numerik [26] [28]. Lebih jauh lagi, *sliding energy* disebut sebagai bagian penetrasi dalam simulasi harus memiliki nilai yang positif untuk memvalidasi bahwa tidak ada komponen yang tumpang tindih [29]. Dalam rangka validasi di atas, sistem disimulasikan secara kuasi statik, nilai maksimum energi kinetik

global harus berkisar antara 0,01% hingga 0,533% dari energi internal global serta memenuhi hukum konservasi energi, dimana total nilai energi tetap sama saat simulasi dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9[29].



Gambar 4.9. Kurva keseimbangan energi<sub>[2]</sub>

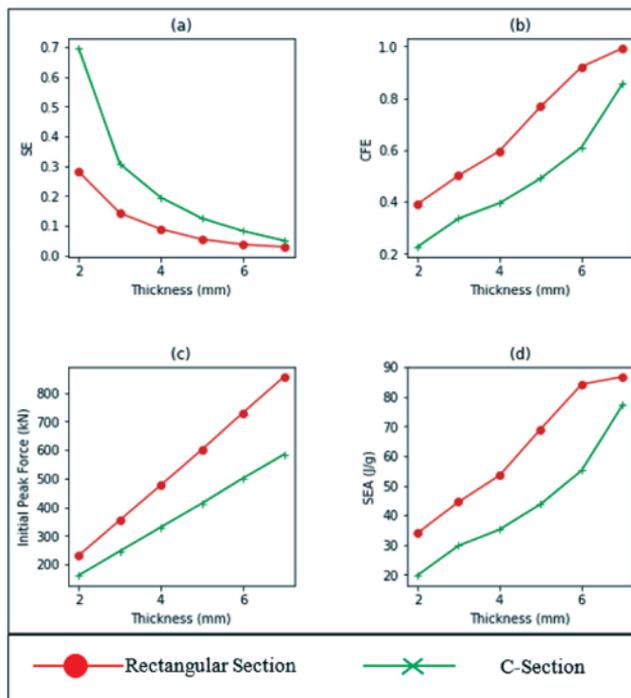
### 4.3 Parameter Performa *Crashworthiness*

Analisis performa dari *crashworthiness* didasarkan pada beberapa kriteria yang merepresentasikan karakteristik dari sistem saat tumbukan dan akibat tabrakan bagi penumpang, seperti yang sudah dijelaskan pada sub.bab 4.1. Hasil akhir dari simulasi dievaluasi berdasarkan parameter tersebut untuk menentukan sistem yang terbaik.

## 5. HASIL DAN DISKUSI<sub>[2]</sub>

### 5.1 Variasi Ketebalan *Crash Box*

Gambar 5.1 menunjukkan parameter *crashworthiness* pada kolom *C-channel* dan persegi panjang dengan variasi ketebalan dari 2 mm hingga 7 mm.



**Gambar 5.1.** (a) *Stroke Efficiency* (SE), (b) *Crushing Force Efficiency* (CFE), (c) Gaya puncak initial, (d) *Specific Energy Absorption* (SEA) terhadap variasi ketebalan *crash box*<sub>[2]</sub>

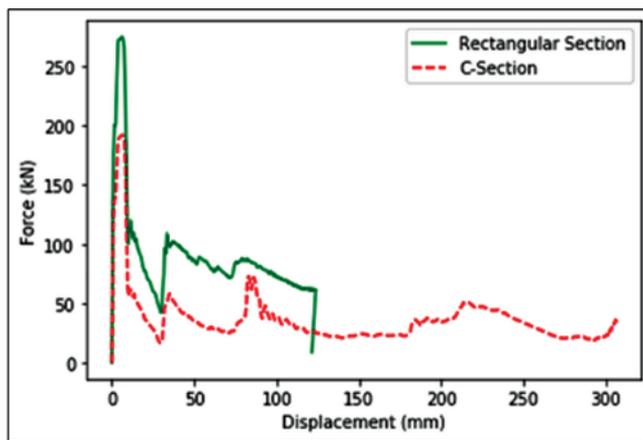
Gambar 5.1 (a) menampilkan data dari struktural SE pada kedua bagian, sedangkan Gambar 5.1 (b) merepresentasikan nilai CFE. Seperti yang terlihat pada kedua gambar tersebut, *C-channel* dapat terdeformasi

lebih jauh dibandingkan kolom persegi panjang meskipun nilai CFE-nya lebih buruk. Ini mengindikasikan bahwa *C-channel* lebih dapat dihancurkan dibandingkan kolom persegi panjang pada pembebanan yang diberikan, hal ini pun menyebabkan struktur memiliki perlambatan yang lebih efektif. Dengan demikian, kolom persegi panjang lebih menguntungkan dibandingkan *C-channel* untuk mengatasi tumbukan berdasarkan analisis SE dan CFE.

Gambar 5.1 (c) dan Gambar 5.1 (d) merepresentasikan gaya puncak inisial dan nilai SEA. Seperti yang terlihat pada kedua gambar tersebut, kolom persegi panjang memiliki gaya puncak inisial yang lebih tinggi dibandingkan *C-channel*. Semakin tinggi gaya puncak inisial maka kian parah cedera pada penumpang[30]. *C-channel* memiliki nilai SEA yang lebih rendah dibandingkan kolom persegi panjang. Dengan demikian, *C-channel* menyerap lebih sedikit jumlah energi impact saat terjadi deformasi, sehingga dapat dikatakan bahwa kolom persegi lebih efektif dalam menyerap energi impact dibanding *C-channel*.

Singkatnya, bagian terbuka (*C-channel*) memiliki kekakuan torsional yang signifikan rendah dibandingkan dengan bagian terbuka (kolom persegi panjang). Oleh karenanya, *C-channel* rentan terhadap kegagalan *buckling* global dibandingkan pada bagian terbuka [31]. Dalam kegagalan *buckling* global, nilai dari gaya puncak inisial lebih tinggi dibandingkan gaya rata-ratanya (terlihat pada Gambar 5.2). Terlebih lagi, fenomena *buckling* global juga menyebabkan reduksi dari penyerapan energi [32].

Berdasarkan pernyataan tersebut, nilai CFE (Semakin tinggi nilainya maka makin baik) dan SEA (Semakin tinggi nilainya maka makin baik) digunakan untuk menganalisis kecenderungan dari kegagalan *buckling* global pada kedua penampang melintang. Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, kolom persegi panjang memiliki nilai CFE dan SEA yang lebih besar dibandingkan *C-channel*. Simulasi menunjukkan bahwa bagian tertutup lebih baik digunakan dibandingkan bagian terbuka untuk mengembangkan performa perlindungan sistem. Oleh karenanya, bagian persegi panjang *crash box* dipilih untuk dipasang pada usulan rancangan.



**Gambar 5.2.** Kurva gaya bagian crash box tunggal terhadap perpindahan<sub>[2]</sub>

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1 (a) untuk kedua penampang melintang, Nilai SE berkorelasi negatif dengan variasi ketebalan. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan ketebalan *crash box* akan mengurangi jumlah deformasi plastis yang terbentuk untuk menghilangkan energi kinetik dan semakin tebal *crash box* maka semakin

sedikit ruang yang dibutuhkan untuk terdeformasi pada pembebanan impak yang sama [9]. Di sisi lain, nilai CFE berkorelasi positif dengan ketebalan *crash box*. Dalam Gambar 5.1 (b) kecenderungan data menunjukkan bahwa gaya puncak inisial berbanding lurus terhadap ketebalan *crash box*. Dalam rangka menganalisis korelasi, Du Bois et al. [25] membuat persamaan pada gaya rata-rata *crushing* ( $P_{\text{mean}}$ ) untuk digunakan sebagai parameter dalam mendapatkan nilai CFE dan gaya puncak inisial untuk bagian persegi panjang pada Persamaan 5.1 dan 5.2.

$$P_{\text{mean}} = 17\sigma_u t^{1.8} C^{0.2} \quad (5.1)$$

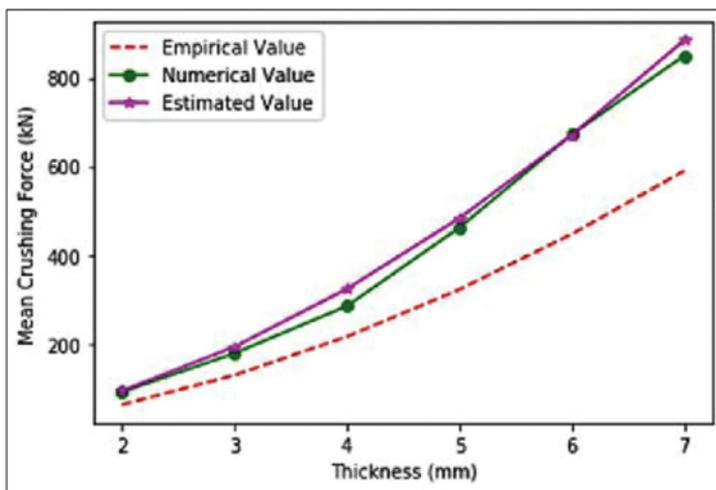
$$P_{\text{max}} = 2 \left[ k_p \frac{E}{\mu} (1 - \nu^2) \right]^{0.43} t^{1.86} C^{0.14} (1 + \alpha) \sigma_y^{0.57} \quad (5.2)$$

Persamaan diatas merepresentasikan hubungan umum antara ketebalan *crash box* ( $t$ ) dengan rata-rata panjang bagian ( $C$ ). Persamaan ini juga melibatkan parameter lain seperti tegangan *yield* material ( $\sigma_y$ ), tegangan *ultimate*, rasio Poisson ( $\nu$ ), faktor rasio ketebalan ke lebar ( $\mu$ ), koefisien *crippling* ( $k_p$ ), dan rasio panjang bagian persegi panjang ( $\alpha$ ).

Gambar 5.3 merepresentasikan perbandingan antara hasil simulasi dengan nilai empiris dari Du Bois et al. [25] untuk gaya rata-rata *crushing* pada kolom persegi panjang. Perbandingan dari data ini digunakan untuk validasi kekokohan (*robustness*) untuk nilai gaya rata-rata *crushing*. Dikarenakan kekurangan data koefisien, tidak terdapat perbandingan antara data gaya puncak inisial. Dalam Gambar 5.3, nilai empiris untuk gaya rata-rata *crushing* diturunkan dari kondisi simulasi numerik. Kecenderungan data yang sama (direpresentasikan dengan gradien)

ditunjukkan pada gambar tersebut. Hal ini mengimplikasikan hasil dari simulasi atas parameter gaya crushing memiliki nilai yang kurang lebih sama. Seperti yang telah dijelaskan literatur bahwa nilai empiris didasarkan atas analisis *curve fitting* pada data eksperimen [25], sehingga faktor koreksi ( $\delta$ ) perlu didefinisikan. Faktor ini digunakan untuk menyesuaikan data empiris dengan hasil simulasi. Nilai konstanta diperoleh dengan iterasi dan didefinisikan sebagai 1,5. Nilai estimasi dari gaya rata-rata *crushing* diperoleh melalui perkalian antara data teoretis dengan faktor seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 5.3.

$$P_{\text{mean}} = \delta(17\sigma_u t^{1.8} C^{0.2}) \tag{5.3}$$



Gambar 5.3. Perbandingan nilai gaya rata-rata *crushing*

Singkatnya, semakin tinggi nilai ketebalan maka akan mengurangi kapabilitas *crash box* untuk deformasi dan proteksi sistem. Di sisi lain, hal ini akan meningkatkan kapabilitas untuk menyerap energi impact dengan

sedikit jumlah massa yang terdeformasi dan gaya puncak inisial. Lebih dari itu, hal ini mengindikasikan bahwa *crash box* dengan ketebalan yang lebih tipis berguna secara efektif sebagai struktur korban untuk melindungi penumpang. Oleh sebab itu, sistem yang diusulkan akan menggunakan *crash box* persegi panjang paling tipis (2 mm) untuk mengganti *C-section* (tebal 10 mm) pada rancangan acuan.

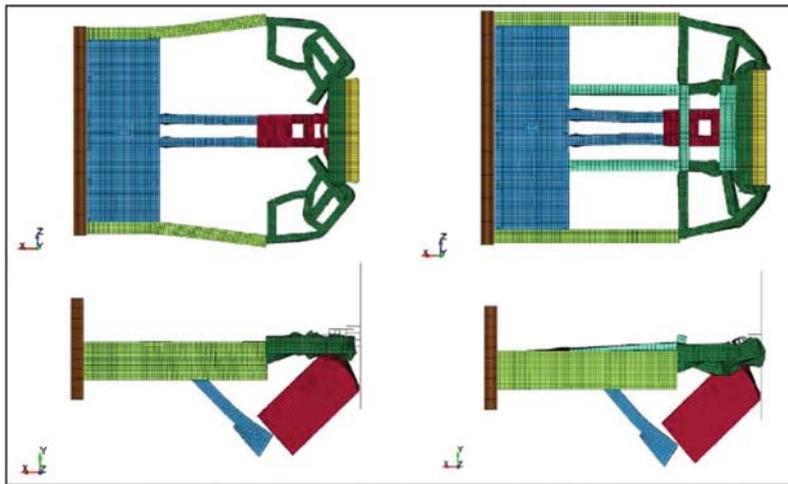
## 5.2 Hasil Simulasi Sistem Rancangan

Seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, terdapat dua model dari sistem LRT yaitu rancangan acuan dan usulan. Kedua struktur tersebut disimulasikan dalam LS-DYNA. Dalam Gambar 5.4, kedua struktur terdeformasi secara progresif untuk menghilangkan energi dampak. Meskipun kedua struktur memberikan hasil yang diinginkan, namun keadaan deformasi kedua struktur tersebut berbeda. Oleh karenanya, parameter *crashworthiness* pada rancangan acuan dan usulan benar-benar berbeda seperti yang ditampilkan pada Tabel 5.1.

**Tabel 5.1.** Parameter *crashworthiness* rancangan acuan dan usulan

Parameter	Acuan	Usulan
SE (Semakin tinggi semakin baik)	0,14	0,20
CFE (Semakin tinggi semakin baik)	0,62	0,56
Gaya puncak inisial (kN) (Semakin rendah semakin baik)	1731,06	1356,29
SEA (J/g) (Semakin tinggi semakin baik)	0,86	0,94
Perlambatan efektif (g) (Semakin rendah semakin baik)	19,85	15,50

Terlihat pada Tabel 5.1, rancangan usulan memiliki performa yang lebih baik dengan meningkatkan nilai SE, gaya puncak inisial, SEA, dan perlambatan efektif dibandingkan rancangan acuan meskipun nilai CFE lebih buruk.

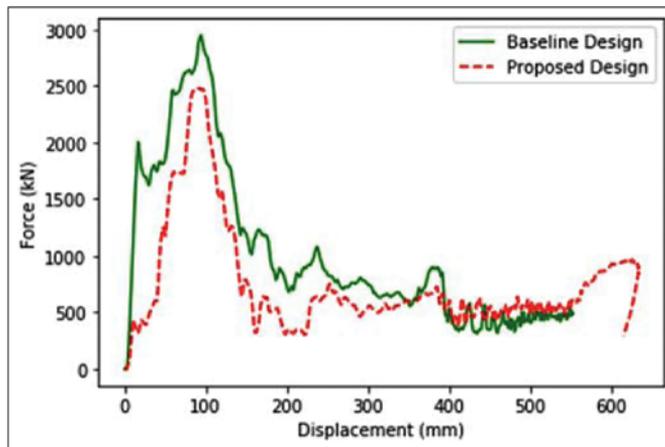


**Gambar 5.4.** Keadaan akhir rancangan acuan (kiri) dan rancangan usulan (kanan)<sub>[2]</sub>

Rendahnya nilai CFE disebabkan oleh celah yang besar dari gaya rata-rata *crushing* dan gaya puncak inisial. Nilai CFE dapat ditingkatkan dengan ketebalan tambahan komponen seperti yang disebutkan pada analisis variasi ketebalan *crash box* tunggal dengan mengimplementasikan korelasi gaya puncak inisial serta gaya rata-rata *crushing* dan ketebalan komponen di Persamaan 5.1 dan Persamaan 5.2 [25]. Inspeksi lebih lanjut dari performa sistem didasarkan pada kurva gaya sistem terhadap deformasi yang direpresentasikan pada Gambar 5.5.

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.5, ruang deformasi dari

rancangan yang diusulkan lebih jauh dibandingkan acuan, namun gaya puncak inisial saat deformasi pada rancangan acuan secara bertahap menurun dan rancangan usulan memiliki penurunan gaya puncak inisial yang cepat pada saat tumbukan. Penurunan bertahap dari gaya puncak inisial pada struktur acuan mengakibatkan tingginya nilai gaya rata-rata *crushing* dibandingkan rancangan usulan.



**Gambar 5.5.** Gaya pada rancangan dasar dan usulan terhadap perpindahan

Singkatnya, implementasi rancangan yang diusulkan dengan bagian persegi panjang memberikan hasil yang lebih baik pada SE, SEA, gaya puncak inisial, dan perlambatan efektif dibandingkan rancangan acuan. Parameter *crashworthiness* yang perlu ditingkatkan pada rancangan usulan yaitu nilai CFE agar memberikan performa perlindungan umum pada penumpang.

## 6. KESIMPULAN

Dalam studi ini, performa dan gaya yang diberikan pada *crash box* *crashworthiness* dar *C-channel* serta kolom persegi panjang sama sekali berbeda. Kolom persegi panjang memiliki SE yang lebih rendah namun nilai CFE, gaya puncak inisial, dan SEA yang lebih tinggi dibandingkan *C-channel*. Oleh sebab itu, komponen dengan penampang persegi panjang dipilih pada rancangan usulan. Parameter *crashworthiness* berubah akibat ketebalan yang bervariasi. Hasil dari studi ini, nilai SE berkorelasi negatif pada ketebalannya. Meskipun demikian, parameter lainnya (CFE, gaya puncak inisial, dan SEA) memiliki korelasi positif terhadap ketebalannya. Terlebih lagi, nilai gaya rata-rata *crushing* dari data simulasi dan nilai empiris kolom persegi panjang hampir sama dengan faktor koreksi ( $\delta$ ) 1,5.

Sistem dari model yang diajukan (*crash box* kolom persegi panjang) telah dirancangan, disimulasikan, dan dibandingkan terhadap rancangan acuan (menggunakan *crash box C-channel*). Terdapat reduksi sebesar 42 kg pada rancangan yang diusulkan dengan peningkatan performa pada SE (meningkat sekitar 43%), SEA (meningkat berkisar 9,3%), gaya puncak inisial (menurun sekitar 21,6%), dan perlambatan efektif (menurun berkisar 22%). Meskipun demikian, rancangan yang diajukan memiliki performa yang lebih buruk pada CFE dibandingkan acuan (sekitar 9,6%). Oleh sebab itu, rancangan yang diusulkan lebih baik digunakan sebagai struktur kobran dan sistem proteksi penumpang dibandingkan rancangan acuan.

## 7. PENUTUP

Salah satu solusi kemacetan lalu lintas di Indonesia adalah dengan memperbanyak kendaraan massal. Peningkatan kendaraan massal dapat mengurangi penggunaan kendaraan pribadi di jalan. Pengurangan penggunaan kendaraan pribadi berimbas pada menurunnya volume permintaan atas produksinya. Persoalan yang dapat timbul dari hal ini yaitu terjadinya beberapa masalah antara lain pengangguran, ekonomi, dan sosial. Masalah ini dapat dihindari jika kendaraan massal merupakan produksi dalam negeri. Hal ini berarti peningkatan kendaraan massal tidak hanya menyelesaikan persoalan kemacetan di Indonesia saja, tetapi juga diharapkan sebagai solusi dalam masalah pengangguran, ekonomi, dan sosial.

Oleh sebab itu, kendaraan massal, khususnya kereta penumpang dan bus, buatan dalam negeri sudah menjadi suatu keharusan. Pemerintah maupun pengusaha swasta nasional perlu mempertimbangkan kembali untuk mengambil keputusan impor kendaraan massal. Disisi lain, industri manufaktur kendaraan massal dalam negeri harus meningkatkan kualitas produksi dan kapasitasnya sesuai dengan peraturan, standar, dan kebutuhan nasional.

Disamping dapat mendorong penggunaan kendaraan massal, penelitian dibidang *crashworthiness* serta implementasinya pada sistem keamanan pasif dalam struktur kereta penumpang telah memberikan kontribusi bagi terbitnya perbaikan Peraturan Menteri Perhubungan dan

terbitnya Standar Nasional Indonesia (SNI) tentang Struktur kendaraan massal yang mampu melindungi penumpang dari kemungkinan cedera dan kematian. Selanjutnya penelitian ini diharapkan akan memberikan manfaat bagi kemajuan industri manufaktur kendaraan nasional, bagi perkembangan ilmu pengetahuan, industri dan ekonomi bagi negara.

Penelitian ini menampilkan peningkatan performa sistem penyerap energi impact pada *Light Rail Transit* (LRT) dengan mengimplementasikan susunan *crash box* persegi panjang. Performa rancangan yang diajukan dibandingkan dengan sistem acuan yaitu *crash box C-section*. Regulasi internasional, UIC/EN 15227 digunakan untuk mengevaluasi performa dari sistem yang dikenakan beban impact aksial. Indikator performa sistem yaitu reduksi massa dan parameter *crashworthiness*. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga untuk mengevaluasinya. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa sistem yang diajukan dapat mereduksi massa dan menurunkan perlambatan efektif sebagai syarat bagi perlindungan penumpang dari kemungkinan cedera atau kematian.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Bagus Budiwantoro, M. Agus Kariem, Burhan Febrinawarta, *The Influence of Shear Angles on the Split Hopkinson Shear Bar Testing*, International Journal of Impact Engineering, ISSN: 0734743X, Vol.149, March 2021, Article number 103787, UK, Publisher: Elsevier Ltd, , UK,

2021

2. Masli, R., Budiwantoro, B., Santosa, S.P., Gunawan, L., "**Rectangular Crash Boxes Implementation on Impact Energy Absorbing System for Lightweight Rail Vehicle Application**", ICEVT 2019 - Proceeding: 6th International Conference on Electric Vehicular Technology 2019 November 2019, Article number 8994004, Pages 225-230, ISBN: 978-172812917-4,
3. Budiwantoro, B., Faizah, I., Prabowo, D.A., Febrinawarta, B., Kariem, M/A., "Results comparison for hat-shaped, double notch and punch testing of split Hopkinson shear bar technique", Journal of Engineering and Technological Sciences, Volume 51, Issue 6, 2019, Pages 805-823, ISSN: 23375779, Publisher Institute For Research and Community Service, Institut Teknologi Bandung.
4. Budiwantoro, B., Herman, I., Halim, F.S.S., "**Evaluation of metro kapsul performance in steady state curving, traction, and braking**", Journal of Engineering and Technological Sciences Volume 50, Issue 6, 2018, Pages 797-817, ISSN: 23375779, Publisher: Institute for Research and Community Services, Institut Teknologi Bandung,
5. Bagus Budiwantoro, I Made Parwata, I Gusti Nyoman Wiratmaja, Satryo Soemantri Brodjonegoro, "**Optimum Lateral Railway Wheel Flange Radius with Minimum Wear Rate: Twin Disc Simulation**", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering Volume 7 Issue 4, 2013, Pages 496-506, Online ISSN: 1880-9871, ISSN-L : 1880-9871,

Publisher: The Japan Society of Mechanical Engineers

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/7/4/7\\_496/\\_article/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/7/4/7_496/_article/-char/en)

6. Bagus Budiwantoro, I Gusti Nyoman Wiratmaja, M. Agus Kariem, Hendry R Pasaribu, "**Analisis Kekuatan Struktur Under Frame Kereta Akibat Tabrakan**", Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM XV), Bandung, 5-6 Oktober 2016, ISBN: 978-602-96269-2-6  
<http://prosiding.bkstm.org/prosiding/2016/PM-002.pdf>
7. Bagus Budiwantoro, Abdul Hakim Masyhur, Didi Rushadi, "**Design and Finite Element Analysis of Universal Test Rig on Indonesian AGT**", Seminar Nasional Energi dan Industri Manufaktur (SIGER 2017), 7-8 November 2017, Bandung, ISBN: 978-602-5085-10-9
8. R Masli, Rancangan dan Analisis Struktur Penyerap Energi Impak untuk Aplikasi Kendaraan Ringan (Light Rail Transit), Tugas Akhir, Teknik Dirgantara FTMD ITB, 2019.
9. M. Ihsan, Analisis Aspek Crashworthiness pada Struktur Kereta Ringan Nasional, Tugas Akhir, Teknik Mesin FTMD ITB. 2016.
10. M. Huang, Vehicle Crash Mechanics, Florida: CRC Press LLC, 2002, p. 94.
11. R. A. Galganski, "Crashworthiness Design of HSGGT Vehicles," Proc. IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp. 121-130, 1993.
12. B. Febrinawarta, Kaji Numerik Sudut Bidang Geser Spesimen untuk

- Tiga Teknik Split-Hopkinson Shear Bar, Teknik Mesin FTMD ITB, 2018.
13. Menteri Perhubungan Republik Indonesia, PM 175 Tahun 2015 : Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal dengan Penggerak Sendiri, Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015.
  14. U. K. Department for Transport, "Valuing the Social Impacts of Public Transport," Mott MacDonald, Birmingham, 2003.
  15. N. C. Nghia, T. Dirgantara, L. Gunawan and I. S. Putra, "Analytical Prediction of Square Crash Box Structure with Holes due to Impact Loading," in Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology, Kuala Lumpur, 2013.
  16. Institut Teknologi Bandung, "Laporan Akhir : Analisa Statik Struktur dan Crashworthiness," Bandung, 2018.
  17. European Committee for Standardization, "Standard EN 15227:2008+A1, Railway Applications - Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies, English Version," 2010.
  18. A. Baroutaji, M. Sajjia and A.-G. Olabi, "On the Crashworthiness Performance of Thin-Walled Energy Absorbers: Recent Advances and Future Developments," *Thin-Walled Structures*, vol. 118, pp. 137 - 163, 2017.
  19. T. Reddy, Y. Rao and V. Narayanamurthy, "Analysis of Structural configurations for Assessment of Crashworthiness," *Procedia*

- Engineering, vol. 173, pp. 1357 - 1364, 2017.
20. A. A. E.-R. Khattab, "Investigation of an Adaptable Crash Energy Management System to Enhance Vehicle Crashworthiness," Concordia University, Montreal, 2010.
  21. SAE International, "Instrumentation for Impact Test - Part 1 - Electronic Instrumentation," March 1995. [Online]. Tersedia: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/005/sae.j211-1.1995.html>. [Diakses 29 April 2019].
  22. J. Ma, "Thin-walled Tubes with Pre-folded Origami Patterns as Energy Absorption Devices," Oxford University, Oxford, 2011.
  23. W. Abramowicz and N. Jones, "Dynamic Axial Crushing of Square Tubes," International Journal of Impact Engineering, vol. 2, pp. 179 - 208, 1984.
  24. D.-H. Chen, "Axial Compression of Square Tubes," in Crush Mechanics of Thin-Walled Tubes, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2016, pp. 92 - 93.
  25. P. Du Bois, C. C. Chou and B. B. Fileta, "Design of Vehicle Structures for Crash Energy Management," in Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection, Michigan, American Iron and Steel Institute, 2004, pp. 43-49.
  26. J. O. Hallquist, LS-DYNA Theory Manual, Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.

27. P. Mukhopadhyay, "Alloy Designation, Processing, and Use of AA6XXX Series Aluminium Alloys," *International Scholarly Research Network*, vol. 2012, 2012.
28. M. Ahmad, K. A. Ismail and F. Mat, "Convergence of Finite Element Model for Crushing of a Conical Thin-walled Tube," *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 586-593, 2013.
29. A. Sharma, A. Despande and R. Nayak, "Use of Stochastic Analysis for FMVSS210 Simulation Readiness for Correlation to Hardware Testing," in *7th International LS-DYNA Users Conference*, 2002.
30. A. R. A. Ghani and M. A. Hassan, "Axial Crush Behaviour of Square Column with External Tapered Plunger," *Journal of Engineering Science*, vol. 41, 2013.
31. M. I. Alam, B. Kanagarajan and P. Jana, "Optimal Design of Thin-Walled Open Cross-Section Column for Maximum Buckling Load," *Thin-Walled Structures*, vol. 141, pp. 423-434, 2019.
32. O. Jensen, M. Langseth and O. S. Hopperstad, "Transition Between Progressive and Global Buckling of Aluminium Extrusions," *Structures Under Shock and Impact*, vol. VII, 2002.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pencapaian menjadi guru besar di Institut Teknologi Bandung merupakan sebuah kehormatan besar sekaligus amanah yang harus dapat

digunakan dengan sebaik-baiknya bagi kemajuan pendidikan khususnya dan kemajuan bangsa pada umumnya.

Pencapaian yang diperoleh sebagai guru besar tidaklah mungkin tercapai tanpa usaha, bantuan, kerjasama dan doa dari berbagai pihak yang menginginkan kemajuan pendidikan dan kemajuan bangsa.

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayahNya kepada kita semua, sehingga kita dapat bersama-sama dapat mengikuti forum Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung dalam keadaan sehat wala'fiat.

Dalam kesempatan yang berbahagia ini kami ingin mengucapkan terimakasih dan hormat yang setinggi-tingginya kepada;

- Kedua orang tua dan mertua tercinta,
- Istri, anak, mantu dan semua cucu tercinta,
- Rektor ITB dan jajarannya,
- Pimpinan dan Anggota Senat Akademik,
- Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar,
- Dekan Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara dan jajarannya
- Semua guru formal dan non formal yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu yang selalu memberikan ilmu dan pengetahuannya tanpa pamrih,
- Rekan sejawat dosen di FTMD khususnya dan ITB pada umumnya, serta seluruh civitas academica di FTMD dan ITB.
- Rekan di Industri

- Rekan alumni SD BPI, SMP V, SMA III dan MS'75 ITB.
- Dan semua orang yang tidak bisa saya sebutkan namanya satu persatu.

Terimakasih atas dukungan dan doa yang diberikan, semoga Allah SWT membalasnya dengan kebaikan yang lebih baik.

## CURRICULUM VITAE



Nama : **BAGUS BUDIWANTORO**  
Tmpt./tgl lahir : Bandung, 15 Februari 1956  
Kel. Keahlian : Perancangan Mesin  
Alamat Kantor : Fakultas Teknik Mesin dan  
Dirgantara, Jl Ganesha no. 10,  
Bandung 40132

Nama Istri : Nusantari

Anak-anak : 1. Ryan Pradipta  
2. Ekky Al-Ghazaly  
3. Karina Ramadhani  
4. Khadijah Ayu Miranti

### RIWAYAT PENDIDIKAN

- Post Doc Precision Mechanics, Chuo University Japan, 1993
- S3 (Doktorat) Teknik Mesin Ecole Centrale de Lyon, France, 1990
- S2 Teknik Mesin Ecole Centrale de Lyon, France, 1987
- S1 Teknik Mesin ITB, 1980

### RIWAYAT PEKERJAAN DI ITB

- Staf pengajar Departemen Mesin ITB 1980-sekarang
- Sekretaris Program Magister Perkeretaapian ITB, 1999
- Ketua Program Magister Perkeretaapian ITB, 2002

- Sekretaris Satuan Unit Komersial (SUK ITB), 2004
- Direktur PT LAPI ITB, 2004
- Kepala Laboratorium Perancangan Mesin, FTMD-ITB, 2014-2019

## **RIWAYAT KEPANGKATAN**

1. CPNS, III/A, 1 Maret 1982
2. Penata Muda, III/A. 1 November 1986
3. Penata Muda TK 1, III/B, 1 April 1987
4. Penata, III/C, 1 April 1992
5. Penata Tingkat I, III/D, 1 Oktober 1994
6. Pembina, IV/A, 1 Oktober 1997
7. Pembina Tingkat I, IV/B, 1 Januari 2001
8. Pembina Utama Muda, IV/C, 1 Oktober 2021

## **RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL**

1. Asisten Ahli Madya, 1 November 1986
2. Asisten Ahli, 1 April 1987
3. Lektor Muda, 1 Februari 1992
4. Lektor Madya, 1 Juli 1994
5. Lektor, 1 Oktober 1997
6. Lektor Kepala Madya, 1 Oktober 2000
7. Lektor Kepala (Inpasing Jabatan), 1 Januari 2001
8. Guru Besar, 1 Desember 2020

## KEGIATAN PENELITIAN

1. **Bagus Budiwanto** (team leader), “Excessive Wear Mechanism due to Wheel/Rail Contact in Curve Railway Track”, Penelitian Kerja Sama Luar Negeri dan Publikasi Internasional, 2010
2. **Bagus Budiwanto** (team leader), “Excessive Wear Mechanism due to Wheel/Rail Contact in Curve Railway Track”, International Joint Reaserach 7 International Publication., 2011
3. **Bagus Budiwanto** (team member), “Penyempurnaan Rancangan dan Produksi Blok Rem Komposit untuk Kereta API” (*Design, Development & Production of train composite brake*), Riset Andalan Perguruan Tinggi dan Industri (RAPID), 2013
4. **Bagus Budiwanto** (team member), “Perancangan Dan Implementasi Sistem Keselamatan Pasif Pada Struktur Kereta Penumpang” (*Design & implementation of passive safety structure for passanger train*, 2017
5. **Bagus Budiwanto** sebagai Anggota, “Perancangan Dan Implementasi Sistem Keselamatan Pasif Pada Struktur Kereta Penumpang” (*Design & implementation of passive safety structure for passanger train*), 2019
6. **Bagus Budiwanto** sebagai Anggota, “Socio-technical solutions to water security challenges in urban areas and post-disaster scenarios”, 2020.

## PUBLIKASI

### a. Publikasi ilmiah internasional

1. **Bagus Budiwantoro**, M. Agus Kariem, Burhan Febrinawarta, *The Influence of Shear Angles on the Split Hopkinson Shear Bar Testing*, International Journal of Impact Engineering, ISSN: 0734743X, Vol.149, March 2021, Article number 103787, UK, Publisher: Elsevier Ltd, Editor: Magnus Langseth, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103787, Terindeks pada Scopus dan Scimagojr 2019: 1.671 (Q1), Impact Factor 2018:3.83, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X20308575>, UK, 2021
2. Dewi, D.K., Abidin, Z., **Budiwantoro, B.**, Malta, J., "Dimensional analysis of a rotor system through FRF using transfer function and finite element methods", Journal of Mechanical Science and Technology Volume 34, Issue 5, 1 May 2020, Pages 1863-1870, ISSN: 1738494X, DOI: 10.1007/s12206-020-0407-x, Publisher: Korean Society of Mechanical Engineers, terindex Scopus dan Scimagojr, H Index 2019: 47, SJR 2019: 0,491 (Q2), Impact Factor 2018: 1,48, (2019, 2020 belum terbit)
3. **Budiwantoro, B.**, Faizah, I., Prabowo, D.A., Febrinawarta, B., Kariem, M.A., "Results comparison for hat-shaped, double-notch and punch testing of split Hopkinson shear bar technique", Journal of Engineering and Technological Sciences Volume 51,

Issue 6, 2019, Pages 805-823, ISSN: 23375779, DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.6.5, Publisher: Institute for Research and Community Services, Institut Teknologi Bandung, terindex Scopus dan Scimagojr, H Index 2019: 12, SJR 2019: 0,226 (Q2), Impact Factor 2018: 0,85 (IF 2019 belum terbit)

4. **Budiwanto, B.**, Herman, I., Halim, F.S.S., "Evaluation of metro kapsul performance in steady state curving, traction, and braking, Journal of Engineering and Technological Sciences Volume 50, Issue 6, 2018, Pages 797-817, ISSN: 23375779, DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.6.4, Publisher: Institute for Research and Community Services, Institut Teknologi Bandung, terindex Scopus dan Scimagojr, H Index 2019: 12, SJR 2018: 0,212 (Q2), Impact factor 2018: 0,85
5. **Budiwanto, B.**, Djodikusumo, I., Ramdan, A., "Analysis of geometrical specification in decanter centrifuge machine", ASEAN Engineering Journal Volume 8, Issue 2, 2018, Pages 29-47, ISSN: 25869159, Publisher: ASEAN University Network/ Southeast Asia Engineering Education Development Network, terindex Scopus.
6. **Bagus Budiwanto**, M. Agus Kariem, Renco Rashi Basia, Galih Prima, "Stability Analysis of Rail-Conveyor for Coals Transportation", Applied Mechanics and Materials Volume 758, April 2015, pp 89-93, ISSN: 16609336, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.758.89, Publisher: Trans Tech

Publication, terindex Scopus dan Scimagojr, H Index 2019: 29, SJR 2015: 0,112 (Q4), Impact Factor 2015: 0,08

7. **Bagus Budiwanto**, I Made Parwata, I Gusti Nyoman Wiratmaja, Satryo Soemantri Brodjonegoro, "Optimum Lateral Railway Wheel Flange Radius with Minimum Wear Rate: Twin Disc Simulation", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering Volume 7 Issue 4, 2013, Pages 496-506, Online ISSN: 1880-9871, ISSN-L : 1880-9871, DOI: <https://doi.org/10.1299/jmmp.7.496>, Publisher: The Japan Society of Mechanical Engineers .
8. Parwata, I.M., **Budiwanto**, B., Brodjonegoro, S.S., Wiratmaja Puja, I.G.N., "Effect of curving speed and mass of railway vehicle to the contact characteristic on curve track", International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing Volume 6, Issue 3-4, December 2011, Pages 250-267, ISSN: 17456436, DOI: 10.1504/IJVSMT.2011.044228, Publisher: Inderscience Publishers, terindex Scopus dan Scimagojr, H Index 2019: 14, SJR 2011: 0,265 (Q2).
9. Satryo Soemantri Brodjonegoro, I Gusti Nyoman Wiratmaja, **Bagus Budiwanto**, I Made Parwata, D. J. Schipper, "Solution to Hertzian Contact Problem between Wheel and Rail for Small Radius of Curvature", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering Volume 4 Issue 6, 2010, Pages 669-677, Online ISSN: 1880-9871, ISSN-L : 1880-9871, DOI: <https://doi.org/>

10.1299/jmmp.4.669, Publisher: The Japan Society of Mechanical Engineers

**b. Publikasi jurnal nasional (terakreditasi)**

1. **Bagus Budiwanto**, Ridha Firmansyah, I Gusti Nyoman Wiratmaja, "Aplikasi Metode Raimondi dan Boyd pada Perbandingan Analisis Performansi Journal Bearing Lokomotif yang mengalami Beban Impak", Jurnal Teknik Mesin, Volume 21 No. 2, Oktober 2006, hal. 44-52, Penerbit: Jurusan Teknik Mesin ITB, Terakreditasi Dikti Nomor 23a/DIKTI/Kep/2004, 4 Juni 2004.

**c. Publikasi jurnal nasional (lainnya)**

1. Aditya Sukma Nugraha, **Bagus Budiwanto**, Estiko Rijanto, "Design of Vibration Absorber Using Spring and Rubber for Armored Vehicle 5.56 MM Caliber Rifle", Journal of Mechatronics, Electrical Power and Vehicular Technology Volume 5 No. 2 December 2014, pp. 75-82, e-ISSN 2088-6985 p-ISSN 2087-3379, DOI: 10.14203/j.mev.2014.v5.75-82, Penerbit: Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik - LIPI, Akreditasi Dikti nomor 1/E/KPT/2015, tanggal 21 September 2015
2. I Made Parwata, I Gusti Nyoman Wiratmaja, **Bagus Budiwanto**, Satryo Soemantri Brodjonegoro, "Penyelesaian Pendekatan Problem Kontak Hertzian pada Kasus Kontak antara Roda dan Rel", Jurnal Teknik Mesin Volume 24, No. 1, April 2009, hal. 25-40,

ISSN 0852-6095, Penerbit: Program Studi Teknik Mesin ITB

3. **Bagus Budiwantoro**, Arief Teguh Hermawan, "Rancangan Geometri Screw Press dengan Metode Numerik Elemen Hingga", Jurnal Teknik Mesin Volume 17, No. 2, Juni 2002, ISSN: 0852-6095, Penerbit: Program Studi Teknik Mesin ITB

**d. Publikasi prosiding seminar internasional**

1. **B. Budiwantoro**, Y.D. Raditya and Y.A. Harijandi, "Strength Analysis of Metro Kapsul Knuckle Plate and Tie Rod using Finite Element Method", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 694, Issue 1, 21 November 2019, Article number 012011, ISSN: 17578981, DOI: 10.1088/1757-899X/694/1/012011, Publisher: Institute of Physics Publishing, terindex Scopus dan Scimagojr, H Index 2019: 31, SJR 2019: 0,198
2. Masli, R., **Budiwantoro, B.**, Santosa, S.P., Gunawan, L., "Rectangular Crash Boxes Implementation on Impact Energy Absorbing System for Lightweight Rail Vehicle Application", ICEVT 2019 - Proceeding: 6th International Conference on Electric Vehicular Technology 2019 November 2019, Article number 8994004, Pages 225-230, ISBN: 978-172812917-4, DOI: 10.1109/ICEVT48285.2019.8994004, Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., terindex Scopus
3. **Bagus Budiwantoro**, Abdul Hakim Masyhur, Irwanto Suganda, "Testing of Dynamic Characteristic and Comfort of Inonesia

Automated People Mover from Bandung", AIP Conference Proceedings Volume 1977, 26 June 2018, Article number 040015, ISSN: 0094243X, ISBN: 978-073541687-1, DOI: 10.1063/1.5042985, Publisher: American Institute of Physics Inc., terindex Scopus dan Scimagojr, H Index 2018: 64, SJR 2018: 0,182

4. M.S.Permana, Rochim Suratman, Budi Hartono Setiamarga, **Bagus Budiwanto**, "A Newly Developed Method in Repairing Surface Defect for Components of Gray Cast Iron", 5th International Materials Technology Conference & Exhibition IMTCE 2006, 17TH-20TH July, Kuala Lumpur, Malaysia, 2006

**e. Publikasi prosiding seminar nasional**

1. **Bagus Budiwanto**, Abdul Hakim Masyhur, Didi Rushadi, "Design and Finite Element Analysis of Universal Test Rig on Indonesian AGT", Seminar Nasional Energi dan Industri Manufaktur (SIGER 2017), 7-8 November 2017, Bandung, ISBN: 978-602-5085-10-9
2. **Bagus Budiwanto**, Toto Hardianto, Bangsa Mahardika, "Modifikasi Submersible Dredge Pump Gearbox dengan Daya 1,25 MW", Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM XV), Bandung, 5-6 Oktober 2016, ISBN: 978-60296269-2-6
3. **Bagus Budiwanto**, I Gusti Nyoman Wiratmaja, M. Agus Kariem, Hendry R Pasaribu, "Analisis Kekuatan Struktur Under Frame Kereta Akibat Tabrakan, Proceeding Seminar Nasional

Tahunan Teknik Mesin (SNTTM XV), Bandung, 5-6 Oktober 2016,  
ISBN: 978-602-96269-2-6

4. **Bagus Budiwanto**, I Nengah Diasta, Yulistian Nugraha, Alvin Salim, "Perancangan Jaringan Pipa Transmisi Mata Air Umbulan", Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV), 7-8 Oktober 2015, Banjarmasin, Indonesia, ISBN : 978-602-73732-0-4
5. **Bagus Budiwanto**, I Nengah Diasta, Reinaldo S Samuel H, "Analisis Tegangan pada Beberapa Jenis Ejector Uap", Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV), 7-8 Oktober 2015, Banjarmasin, Indonesia, ISBN: 978-602-73732-0-4
6. I Made Parwata, **Bagus Budiwanto**, Satriyo Soemantri Brodjonegoro, I Gusti Nyoman Wiratmaja, "Keausan Excessive Roda Rel Kereta Api Babarajang Jalur Tajungenim ke Tarahan", Prosiding Seminar Nasional Energi Terbarukan dan Produksi Bersih 2012, Bandar Lampung, 20 Juni 2012, ISBN 978-979-8510-49-6
7. I Made Parwata, I Gusti Nyoman Wiratmaja, **Bagus Budiwanto**, Satriyo Soemantri Brodjonegoro, "Contact Pressure Behavior Due to Wheel and Rail Contact in Curve Track", IJJSS 2010, The 4th Indonesia Japan Joint Scientific Symposium 2010, Bali, September, 29 - 30, 2010
8. I Made Astina, Wijaya Kusuma, **Bagus Budiwanto**, "Studi

Pengembangan Sistem Sirkulasi Bertekanan dalam Sistem Recovery Uap Bensin SPBU", Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) V, Universitas Indonesia, 21-23 November, Jakarta, Indonesia. ISBN: 979-97726-8-0 2006

9. **Bagus Budiwantoro**, Denny, "Analisis Statik Sistem Crane FPU West Seno dengan Bantuan MSC/Nastran dan SAP2000", Prosiding Seminar Metode Elemen Hingga (XV), Departemen Teknik Mesin ITB, 18 Desember 2003, Bandung ISSN: 0853-7119.



## **Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132

Telp. (022) 2512532, E-mail: sekretariat-fgb@pusat.itb.ac.id

 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)

 [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb)

 [FGB\\_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)

 [@fgbitb\\_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)

 [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

ISBN 978-602-6624-58-1



9

786026

624581