

Perancangan Dasar Sistem Keselamatan Pasif Kereta Penumpang Kelas 1 (Kereta K1)

I Gede Sattvika Satya Dharma^{1*}, I Wayan Suweca², Rachman Setiawan³

KK Perancangan Mesin
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
²csuweca@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak

Sebagai salah satu alat transportasi massal, peningkatan keselamatan, keamanan, dan kenyamanan dalam berpindah tempat (*commuting*) menjadi hal yang vital dan perlu lebih diprioritaskan. Walaupun sistem keselamatan aktif untuk mencegah terjadinya kecelakaan sudah diterapkan, namun kecelakaan pada alat transportasi dengan kereta api masih saja terjadi. Oleh karena itu perlu diterapkan sistem keselamatan pasif berupa teknologi *crashworthiness* pada kereta penumpang kelas 1 (Kereta K1). Hal ini bertujuan meminimumkan dampak jika terjadi kecelakaan. Saat ini, regulasi perkeretaapian di Indonesia belum mempertimbangkan aspek *crashworthiness* tersebut, sehingga rancangan Kereta K1 yang ada sekarang juga tidak memiliki fitur keselamatan berbasis *crashworthiness*. Pada penelitian ini dilakukan perancangan dasar sistem keselamatan pasif Kereta K1 dengan mengimplementasikan teknologi *crashworthiness*. Beberapa modifikasi yang harus dilakukan mengacu pada desain Kereta K1 *existing*. Analisis kekuatan struktur utama dilakukan dengan metode elemen hingga (MEH) dengan bantuan perangkat lunak *Ansys Mechanical R15.0*. Hasil analisis MEH kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran tegangan yang telah dilakukan oleh PT INKA. Hasil analisis menunjukkan bahwa pembebanan maksimum yang dapat diterima kereta K1 adalah 140 tonf, sehingga memiliki faktor keamanan 1,4 dari kekuatan struktur utama yang dibutuhkan, yaitu 100 tonf. Oleh karena itu sistem keselamatan pasif dirancang agar sudah kolaps sebelum gaya tabrakan mencapai 140 tonf. Hasil simulasi sistem keselamatan pasif kereta K1 merekomendasikan bahwa gaya-hancur (*crushing force*) untuk komponen *draft gear* dan modul penyerap energi (MPE) adalah masing-masing sebesar 110 tonf dan 130 tonf.

Kata kunci: Kereta K1, sistem keselamatan pasif, *crashworthiness*, metode elemen hingga, gaya-hancur (*crushing force*).

Pendahuluan

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang mempunyai peranan penting dalam perpindahan barang dan orang di Indonesia. Keberadaan moda transportasi dengan kereta api ini akan mendukung pertumbuhan ekonomi dan pengembangan wilayah suatu daerah. Oleh karena itu, peningkatan keselamatan, keamanan, dan kenyamanan penumpang dalam berpindah tempat (*commuting*) menggunakan kereta api menjadi hal yang vital dan perlu lebih diprioritaskan.

Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Ditjen Perkeretaapian, jumlah kecelakaan kereta api yang terjadi di Indonesia dari tahun

ke tahun tidaklah sedikit. Sempat mengalami penurunan dari tahun 2009 ke tahun 2012 dari 90 menjadi 31 kecelakaan. Jumlah kecelakaan kereta meningkat lagi dari tahun 2012 hingga tahun 2015 dari 31 kecelakaan menjadi 73 kecelakaan. Sedangkan untuk tahun 2016 sendiri, hingga bulan Maret 2016, sudah terjadi 3 kejadian tumburan antar kereta api dan 3 kejadian anjlok/terguling, yang menyebabkan 50 korban luka-luka dari keseluruhan kejadian [1]. Jumlah korban kecelakaan ini sebenarnya bisa dikurangi dengan menerapkan dua sistem keselamatan yaitu, sistem keselamatan aktif untuk menghindari kemungkinan terjadinya kecelakaan seperti ATP (*Automatic Train*

Protection) dan sistem keselamatan pasif untuk mengurangi dampak kecelakaan jika kecelakaan tetap terjadi salah satunya yang berbasis teknologi *crashworthiness*. Penerapan teknologi *crashworthiness* dapat mengurangi atau meminimumkan efek tabrakan dan sangat berpotensi untuk diterapkan pada kereta-kereta penumpang di Indonesia.

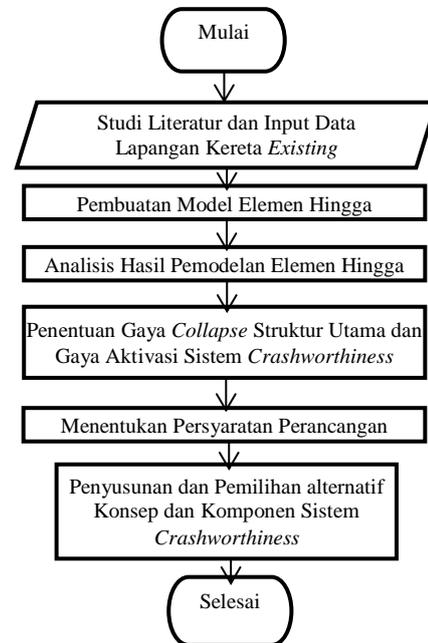
Secara definisi *crashworthiness* adalah kemampuan suatu struktur atau kendaraan untuk melindungi penumpang atau argonya ketika terjadi impact tabrakan (Johnson dan Mamalis, 1978). Sedangkan Struktur yang *crashworthy* adalah struktur yang mampu menyerap sebagian energi tabrakan, menyelamatkan bagian berpenumpang, mencegah benturan dengan objek luar, mencegah terlemparnya penumpang dan membatasi perlambatan (Setiawan dan Fajrianto, 2006).

Saat ini regulasi perkeretaapian di Indonesia belum mempertimbangkan aspek *crashworthiness*, sehingga rancangan Kereta K1, yang menjadi kereta acuan desain yang akan dimodifikasi, juga belum memiliki fitur keselamatan berbasis *crashworthiness*. Oleh karena itu akan dilakukan modifikasi konsep desain kereta penumpang Kelas 1 (K1) dengan mempertimbangkan aspek *crashworthiness*. Dalam melakukan modifikasi terhadap kereta K1, tetap harus memperhatikan batasan kekuatan struktur utama terhadap beban tekan longitudinal dan syarat kekuatan struktur kereta yang harus mampu menahan pembebanan longitudinal sebesar 100 tonf. Persyaratan besar 100 tonf tersebut tercantum dalam KM No. 41 tahun 2010, “Standar Spesifikasi Teknis Kereta Yang Ditarik Lokomotif”.

Tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh rancangan dasar sistem keselamatan pasif kereta K1 *existing* dengan menentukan gaya tabrakan maksimum pada *underframe* kereta, menentukan gaya-hancur komponen sistem *crashworthiness*, dan melakukan analisis kekuatan struktur saat pembebanan tekan 100 tonf.

Metodologi

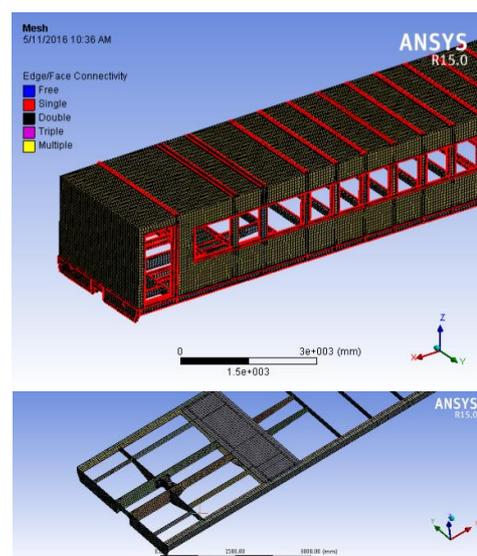
Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti alur seperti ditunjukkan pada diagram alir, Gambar 1 berikut.



Gb. 1. Diagram alir penelitian

Pemodelan Elemen Hingga

Pemodelan elemen hingga dilakukan dengan elemen 2D (*shell*) kecuali pada bagian *stopper* yang menggunakan elemen 3D (*solid*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



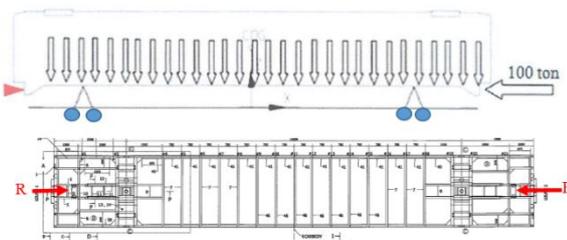
Gb. 2. Model elemen hingga struktur kereta K1

Material yang digunakan adalah material baja struktur SS400.

Tabel 1 Sifat Material baja SS400 [2]

Sifat	SS400
Densitas (kg/m ³)	7850
Poisson's Ratio	0,33
Modulus Elastisitas (GPa)	200
Kekuatan Luluh (MPa)	245
Kekuatan Tarik (MPa)	480

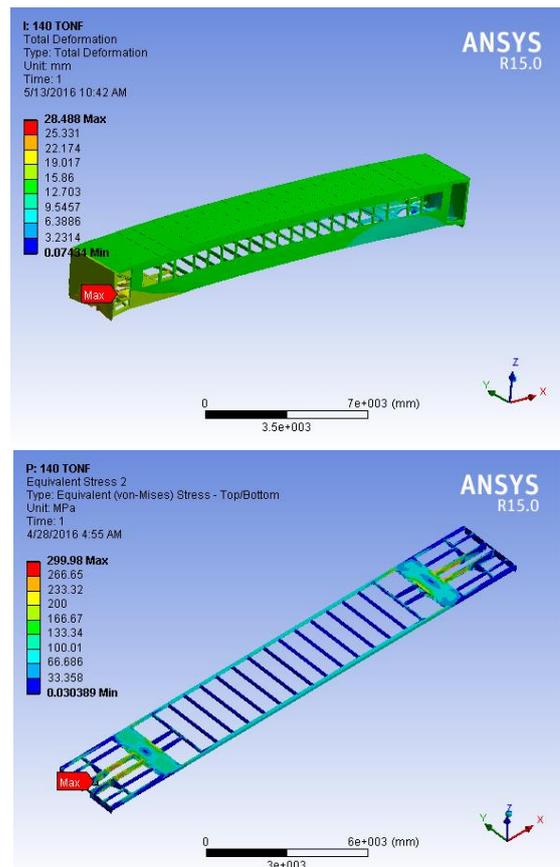
Beban *initial* yang diberikan pada struktur merupakan beban tekan yang ditempatkan pada luas permukaan depan *stopper*. Selain itu *boundary condition* yang diberikan merupakan *support* pada ujung *stopper* satunya dengan *zero displacement* pada arah u_x, u_y, u_z dan bebas bergerak pada arah $\theta_x, \theta_y, \theta_z$. Sedangkan pada bagian permukaan sekitar *pivot* diberikan tumpuan sendi sebagai pengganti *bogie* sehingga *pivot* memiliki *zero displacement* pada arah $u_y, u_z, \theta_x, \theta_z$ dan bergerak bebas pada arah u_x, θ_y seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Kasus pembebanan ini mencerminkan kasus pengujian berdasarkan regulasi nasional, yaitu KM No. 41 tahun 2010, dengan spesifikasi minimum bahwa struktur kereta mampu menerima beban longitudinal sebesar 100 tonf tanpa terjadi deformasi tetap.



Gb. 3. Model pembebanan dan tumpuan pada struktur kereta K1

Hasil Analisis Elemen Hingga

Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi pembebanan tekan yang telah dilakukan, berupa distribusi deformasi dan tegangan von Mises.



Gb. 4. Hasil Simulasi Elemen Hingga

Tabel 2 menunjukkan rangkuman hasil simulasi pembebanan yang telah dilakukan

Tabel 2. Rangkuman Hasil Simulasi Pembebanan

Besar Pembebanan (tonf)	Deformasi (mm)	Tegangan pada Struktur (MPa)
100	13,1	175,3
110	15,1	192,6
120	18,1	210,5
130	22,4	224,8
140	28,5	245,1

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan terlihat bahwa pada pembebanan 100 tonf, tegangan yang dihasilkan belum melewati tegangan luluh dengan *safety factor* sebesar **1,4**. Struktur *underframe* baru mengalami kegagalan pada pembebanan 140 tonf. Oleh karena itu dinyatakan bahwa gaya *collapse* dari struktur *underframe* adalah 140 tonf dan sistem *crashworthiness* yang didesain harus sudah kolaps sebelum gaya tabrakan mencapai **140 tonf**.

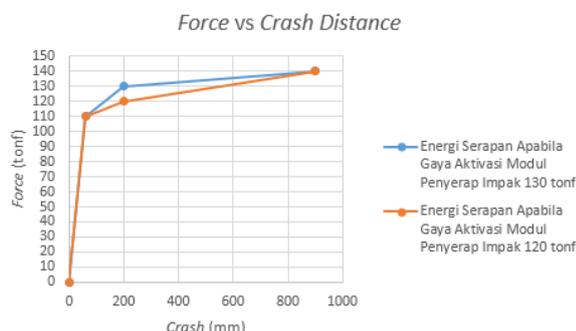
Rencana Implementasi Sistem Crashworthiness

Sistem *crashworthiness* yang dirancang memiliki 3 buah komponen utama yang proses kolapsnya harus secara berurutan dan tidak boleh *overlap*.

- *Pushback coupler* yang kolaps setelah bagian *draft gear* kolaps.
- Komponen penyerap energi yang kolaps setelah bagian *pushback coupler* kolaps.
- Anticlimbing System yang akan bekerja setelah bagian *pushback coupler* kolaps.

Pushback coupler adalah komponen yang terletak berdampingan dengan *draft gear* dan baru menerima gaya setelah *draft gear* tidak dapat terdeformasi lagi. Komponen *draft gear* akan berhenti berdeformasi pada gaya 110 tonf dan kemudian *pushback coupler* baru boleh teraktivasi pada gaya **110 tonf**.

Komponen penyerap energi didesain sehingga baru akan rusak setelah rusaknya *pushback coupler*. Ini berarti gaya-hancurnya harus lebih besar dari 110 tonf namun tidak boleh melebihi 140 tonf. Terlihat bahwa deformasi yang terjadi pada gaya 130 tonf tidak lah jauh berbeda (16% lebih besar) bila dibandingkan deformasi yang terjadi pada gaya 120 tonf. Sehingga dipilih gaya-hancur **130 tonf** agar energi yang bisa diserap lebih besar seperti tampak pada Gambar 5.



Gb. 5. Grafik gaya versus defleksi *crash*

Persyaratan Perancangan

Persyaratan-persyaratan yang digunakan dalam perancangan diturunkan dari regulasi dan standar mengenai *crashworthiness* yang telah digunakan di Eropa dan Amerika. Persyaratan tersebut diambil dari Standard Eropa BS EN 15227:2008 [3] dan Standard Amerika CFR 238.403 [4]. Selain itu

persyaratan yang digunakan juga diperoleh melalui aspek praktis dan diskusi dengan PT INKA Madiun.

Persyaratan perancangan sistem *crashworthiness* dibagi ke dalam 3 bagian yaitu :

- Persyaratan operasional
- Persyaratan ruang
- Persyaratan saat tabrakan

Sistem keselamatan pasif maupun komponennya harus memenuhi beberapa persyaratan operasional yaitu :

1. Mekanisme *pushback coupler* yang didesain harus memiliki kemampuan untuk menahan beban tarik dan tekan secara berulang tanpa teraktivasi.
2. Komponen *anticlimber* harus didesain agar tidak mengganggu kemampuan lepas-pasang antar kereta (*couple-uncouple*) dan operasional tuas yang terletak pada *end wall*.
3. Komponen penyerap energi harus didesain agar tidak mengganggu rute sistem perpipaan dan kelistrikan kereta.

Sistem keselamatan pasif maupun komponennya harus memenuhi beberapa persyaratan ruang yaitu :

1. Komponen *anticlimber* yang didesain tidak boleh bersinggungan ketika kereta berbelok.
2. Mekanisme *pushback coupler* yang didesain harus bekerja tanpa menyinggung *bogie* ataupun komponen lain dari kereta.
3. Komponen penyerap energi harus didesain agar memiliki dimensi awal yang tidak lebih besar dari ruang yang tersedia dari kereta K1 existing dengan panjang tidak melebihi 1000 mm.
4. *Crash distance* maksimum sistem *crashworthiness* secara keseluruhan tidak boleh melewati 1000 mm.

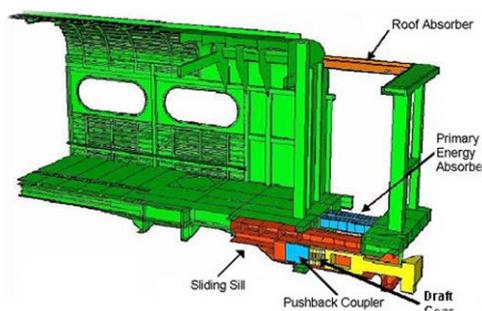
Sistem keselamatan pasif maupun komponennya harus memenuhi beberapa persyaratan saat tabrakan yaitu :

1. Saat terjadi tabrakan, rusaknya komponen *crashworthiness* tidak menyebabkan rusaknya bagian penumpang (lantai) agar tidak membahayakan penumpang.

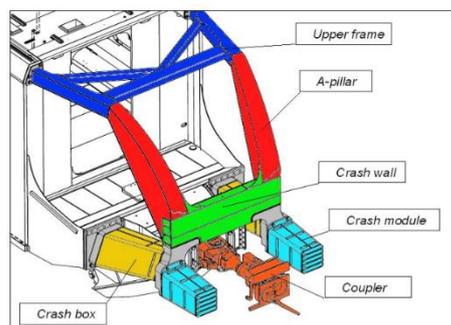
2. Saat gaya tabrakan masih kurang dari 110 tonf, tidak boleh ada kerusakan permanen karena pembebanan masih pada rentang gaya *draft gear*.
3. Saat gaya tabrakan yang terjadi lebih dari 110 tonf namun kurang dari 130 tonf hanya komponen *pushback coupler* yang boleh rusak dengan *crash distance* hingga 200 mm yang didapat dari deformasi *draft gear* dan *pushback coupler* ideal.
4. Saat gaya tabrakan sudah lebih besar dari 130 tonf, barulah komponen *primary energy absorber* boleh teraktivasi dengan *crash distance* hingga 900 mm yang didapat dari total deformasi dari *draft gear*, *pushback coupler* dan penyerap energi.

Penyusunan Alternatif Sistem

Terdapat dua Alternatif Sistem global yaitu Konsep A dan Konsep B.



Gb. 6. Alternatif Sistem Konsep A [5]



Gb. 7. Alternatif Sistem Konsep B [6]

Terdapat 4 perbedaan antara Konsep A dan Konsep B yaitu :

1. Ada dan tidaknya komponen *sliding* saat proses rusaknya penyerap energi *primary*.
2. Penempatan komponen *anticlimber*.
3. Penempatan modul penyerap energi *secondary*
4. Urutan rusaknya modul penyerap energi

Pemilihan alternatif sistem dilakukan dengan *scoring* pada dua kriteria yaitu ketersediaan bahan dan *applicability*. *Applicability* disini lebih mengarah kepada apakah desain konsep A atau konsep B yang lebih mungkin diterapkan pada kereta K1 *existing*. Tabel 3 menunjukkan hasil *scoring* pemilihan alternatif yang telah dilakukan.

Tabel 3. *Scoring* Alternatif Sistem

No	Kriteria	Alternatif Sistem Global	
		Konsep A	Konsep B
1	Ketersediaan Bahan	S	DATUM
2	<i>Applicability</i>	++++	
TOTAL		+4	

Untuk ketersediaan material, kedua alternatif sistem ini memiliki nilai yang sama. Sedangkan untuk *applicability* terdapat 4 poin keunggulan desain sistem konsep A yang berdasarkan kepada perbedaan utama sistem konsep A dan sistem konsep B. Dari hasil *scoring* dan poin keunggulan desain yang telah dijelaskan di atas maka sistem yang dipilih adalah **Crash Energy Management Konsep A**.

Penyusunan Alternatif Komponen

Sistem *crashworthiness* dari kereta penumpang terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:

- *Pushback coupler* yang fungsinya adalah memberi dorongan balik kepada gaya tekan yang diberikan *coupler* kepada struktur. *Pushback coupler* harus memiliki mekanisme agar tidak aktif secara prematur sebelum tercapainya besar pembebanan tertentu. Terdapat dua alternatif mekanisme *pushback coupler*.

1. *U-Loop Mechanism*. Mekanisme ini diawali dengan kompresi *draft gear* hingga *draft gear* tidak bisa menyerap energi lagi. Setelah itu gaya diteruskan ke komponen *pushback coupler*. Saat *pushback coupler* sudah tidak mampu menyerap energi lagi (*fully deformed*), maka gaya ditransmisikan ke *shear bolts* yang terdapat pada struktur

- sliding sill* hingga *shear bolts* gagal pada tahapan tertentu sehingga *sliding sill* masuk ke dalam struktur dan gaya diteruskan oleh *crash wall* ke *primary energy absorber*.
2. *Auto Slide Mechanism*. Mekanisme pada *auto slide* diawali dengan terkompresinya bagian *draft gear*, setelah terkompresi hingga jarak tertentu, *coupler* akan sampai pada jalur *slide* ke bagian bawah sehingga nantinya *coupler* akan jatuh dan tidak ikut dalam skema tabrakan selanjutnya.
- i. *Interlocking anticlimber* adalah komponen dari sistem *crashworthiness* yang memiliki fungsi utama menahan gaya vertikal yang terjadi untuk mencegah terjadinya *overlap* antara satu kereta dengan yang lainnya. Terdapat dua alternatif *anticlimber*.
 1. *Ribbed Plate* yang merupakan plat yang disusun seperti berusuk. Satu bagian dari rusuk tersebut harus mampu menahan gaya vertikal yang terjadi ketika tabrakan. Selain itu dia juga harus bisa menyejajarkan kedua bagian dari *underframe* dan menguncinya dari gerakan *climbing* saat terjadi gerakan dinamik, berbeloknya kereta maupun saat terjadi perbedaan ketinggian antara *underframe* saat tabrakan terjadi.
 2. *Cup-Cone Anti Climbing System*. *Cup-Cone Anticlimbing System* memiliki prinsip menggunakan struktur utama *underframe* sebagai penahan beban vertikal. Bagian *Cup* dan *Cone* hanya berfungsi sebagai *Alligning Part* atau bagian penyejajar yang akan mengarahkan *underframe* agar bertemu dan saling mengunci terhadap arah vertikal.
 - ii. Modul penyerap energi yang merupakan bagian dari sistem *crashworthiness* yang didesain untuk rusak dan menyerap energy tabrakan secara terkontrol saat tabrakan terjadi tanpa membahayakan bagian yang berisi penumpang. Terdapat dua alternatif penempatan modul penyerap energi.
 1. Yang pertama adalah dengan *crash box* pada rongga kosong antar pilar.
 2. Yang kedua adalah mengganti pilar dengan *crash module*

Pemilihan alternatif komponen dilakukan dengan *scoring* pada beberapa kriteria yaitu ketersediaan bahan modifikasi, *reliability* desain dan juga kemudahan modifikasi desain bila mengacu pada kereta *existing* seperti yang ditunjukkan Tabel 3.

Dari *scoring* yang telah dilakukan maka dipilih kombinasi ***U-Loop Mechanism*** dengan ***ribbed plate*** sebagai *anticlimber* dan penempatan modul penyerap energi **pada rongga-rongga antar pilar**.

Tabel 3. *Scoring* Alternatif Komponen

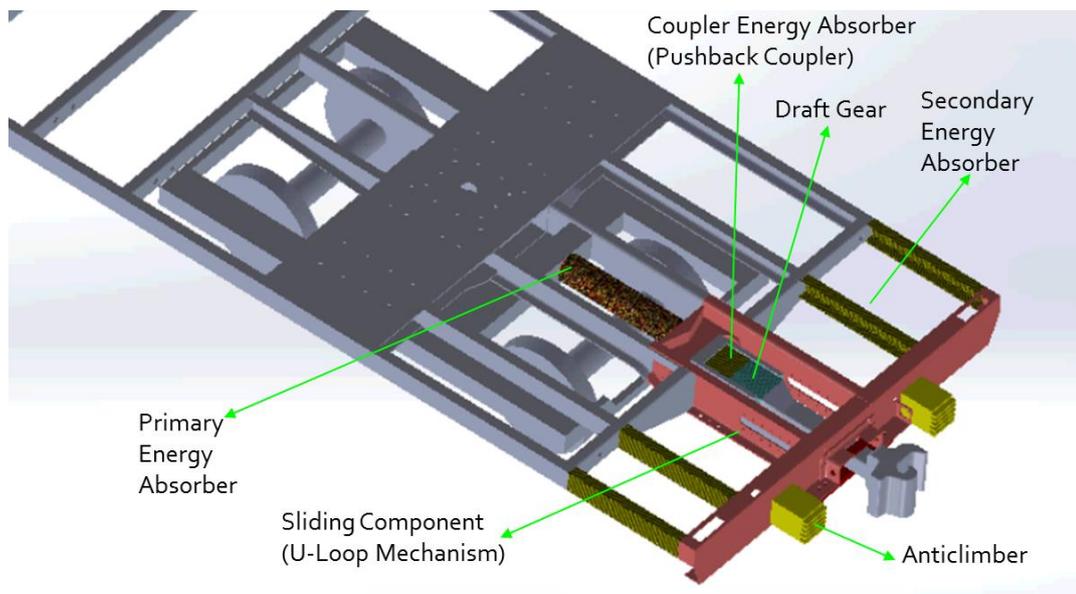
No	Kriteria	Alternatif <i>Pushback Coupler Mechanism</i>		Alternatif <i>Anticlimber</i>		Alternatif Penempatan <i>Primary Energy Absorber</i>	
		<i>U-Loop Mechanism</i>	<i>Auto-Slide Mechanism</i>	<i>Ribbed Plate</i>	<i>Cup-Cone Anticlimber</i>	Dengan <i>Crash Box</i> pada rongga kosong antar pilar	Mengganti Pilar dengan <i>Crash Module</i>
1	Ketersediaan Bahan	++	DATUM	S	DATUM	S	DATUM
2	<i>Reliability</i>	++		++		S	
3	Kemudahan Modifikasi	+		+		+	
TOTAL		+5		+3		+1	

Konsep Rancangan Usulan

Dari komposisi komponen dan sistem yang telah dipilih Gambar 8 merupakan konsep rancangan dari sistem *crashworthiness* yang diusulkan.

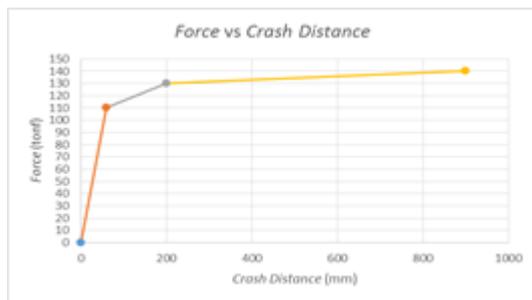
Saat tabrakan terjadi, *draft gear* mengalami kompresi hingga tidak bisa menyerap energi lagi. Setelah itu gaya diteruskan ke komponen *pushback coupler*. Saat *pushback coupler* sudah tidak mampu menyerap energi lagi (*fully deformed*), gaya ditransmisikan ke *shear bolts* yang

terdapat pada struktur *sliding component (U-Loop Mechanism)* hingga *shear bolts* gagal pada tahapan tertentu sehingga komponen *U-Loop* masuk ke dalam struktur dan gaya diteruskan oleh *puncher* (yang terdapat di belakang *stopper* pada komponen *U-Loop*) ke *primary energy absorber*. Setelah *primary energy absorber* sudah tidak bisa menyerap energi lagi (*fully deformed*) baru struktur penumpang kereta dibebani gaya tabrakan dimana diusahakan hal ini tidak sampai terjadi.



Gb. 8. Konsep Rancangan Sistem Usulan

Gambar 9 menunjukkan skenario diagram *force vs crash distance* ideal:



- Draft Gear
- Coupler Energy Absorber (Pushback Coupler)
- Primary + Secondary Energy Absorber

Gb. 9. Force vs Crash Distance Ideal

Kesimpulan

Berdasarkan perancangan dan analisis yang telah dilakukan, didapatkan hasil sebagai berikut:

- i. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan maka diperoleh bahwa gaya *collapse* struktur utama adalah 140 tonf. Sehingga struktur *crashworthiness* harus didesain agar sudah kolaps sebelum gaya tabrakan mencapai 140 tonf. Karena jika tidak maka struktur utama akan rusak duluan sebelum sistem *crashworthiness (crashzone)* nya kolaps.
- ii. Konsep rancangan sistem *crashworthiness* terdiri dari *anticlimber*,

pushback coupler dan *energy absorber* dengan skenario kolaps diawali oleh kolapsnya *draft gear* dan *pushback coupler* setelah itu barulah mekanisme *sliding component* bekerja dan meneruskan gaya tabrakan ke modul-modul penyerap impak. Gaya-hancur komponen *pushback coupler* adalah 110 tonf sedangkan untuk komponen *energy absorber* adalah 130 tonf.

Ucapan Terima Kasih

Riset ini diselenggarakan atas kerjasama dengan PT INKA (Persero) dan didanai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) - Kementerian Keuangan RI, melalui skema Riset Inovatif-Produktif (RISPRO) Komersial dengan kontrak No. PRJ-2289/LPDP/2015. Untuk itu, para penulis menyampaikan terima kasih.

Referensi

- [1] S. Tjahjono, "Peran KNKT dalam Keselamatan Perkeretaapian," 2016.
- [2] R. Setiawan, "Riset Dan Rancang Bangun Struktur Lokomotif Modern Dengan Memperhatikan Prinsip Keselamatan Dan Ramah Lingkungan," 2011.
- [3] EN15227, "Railway Applications, in Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies," 2008.
- [4] U. D. o. Transportation, "U.S. Rail Equipment Crashworthiness Standards".
- [5] C. M, T. D and P. A. B, "Performance Efficiency Of A Crash Energy Management System," 2007.
- [6] A. Starlinger, "The Application Of ABAQUS For The Evaluation Of The Structural Integrity Of Railway Vehicles," 2011.