



## Perancangan *Anticlimber* sebagai Perangkat *Crashworthiness* untuk Kereta Penumpang Indonesia

Rachman Setiawan<sup>\*1</sup>, Faza Ahmad<sup>1</sup>, Dodi<sup>2</sup> & I Wayan Suweca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>KK Perancangan Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132

<sup>2</sup> Litbang & Rekayasa, PT INKA (Persero), Jl. Yos Sudarso No. 71 Madiun 63122  
Email: r.setiawan@itb.ac.id

**Abstract.** *Anticlimber* merupakan komponen aspek *crashworthiness*, yang berfungsi khusus mengurangi kemungkinan terjadinya fenomena *overriding* (tumpang tindih) saat terjadi tumburan kereta api yang dapat menyebabkan dampak jatuhnya korban jiwa yang signifikan. Sebagai rangkaian riset dan pengembangan untuk menerapkan teknologi *crashworthiness* pada kereta penumpang nasional, dikembangkan rancangan *anticlimber* yang sesuai dengan kereta penumpang produk industri nasional saat ini. Rancangan menggunakan konsep rusuk (*ribs*) terpisah yang dipasang pada kedua ujung kereta tepat di kanan dan kiri *coupler*. *Anticlimber* dirancang sehingga dapat diintegrasikan pada rancangan kereta penumpang yang ada, dan dapat diproduksi di dalam negeri di samping tentunya efektif menahan gerakan vertikal (*climbing*) antar kereta. Analisis keefektifan rancangan *anticlimber* ini diuji dengan simulasi beban statik maupun beban dinamik berdasarkan kriteria standar internasional, yaitu BS EN 15227 yang dinilai paling lengkap mengatur aspek *crashworthiness* di perkeretaapian. Dari analisis kekuatan statik yang telah dilakukan, terbukti bahwa rancangan mampu menahan beban gaya longitudinal 60 tonf (177,6 kN) dan gaya angkat vertikal 12 tonf (588 kN) saat terjadi tumburan. Berdasarkan hasil simulasi dinamik pada kecepatan tumburan 10 m/s (36 km/jam), sesuai kriteria BS EN, dan kecepatan tinggi 20 m/s (72 km/jam), keberadaan *anticlimber* terbukti memenuhi standar dan mampu menurunkan kemungkinan terjadinya tumpang tindih, dibandingkan jika tanpa *anticlimber* secara signifikan. Dengan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa rancangan memiliki prospek yang baik untuk dikembangkan ke purwarupa dan pengujian lapangan, yang menjadi tahap berikutnya dari penelitian ini.

**Keywords:** *anticlimber*, BS EN 15227:2008, *crashwothiness*, kereta penumpang.

## 1 Pendahuluan

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi berbasis rel yang memiliki kehandalan yang relatif tinggi dibandingkan dengan moda transportasi darat yang lain. Kehandalan kereta api disebabkan oleh biaya bahan bakar per kilometer yang relatif lebih rendah dari moda transportasi darat lain, bebas macet, lebih tepat waktu dan memiliki kapasitas angkut yang besar. Melihat keunggulan tersebut, minat masyarakat Indonesia dalam menggunakan kereta api terus meningkat. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik tercatat sepanjang tahun 2017 sekitar 90,5 juta orang menggunakan jasa kereta api [1].

Kapasitas yang besar dalam sekali angkut dan kecepatan operasi yang relatif tinggi sekaligus memberikan potensi dampak yang besar juga jika terjadi kecelakaan. Terbukti, sepanjang tahun 2010 hingga 2016 tercatat total 35 kecelakaan kereta api di Indonesia, dengan korban jiwa hingga 55 orang meninggal dan 240 orang luka [2]. Dari tiga puluh lima kecelakaan, terdapat sembilan kecelakaan dengan kategori tumburan, baik antar muka, maupun tabrak belakang.

Tidak hanya di Indonesia, di negara maju pun, meski sudah dilengkapi perangkat pencegahan yang canggih, kecelakaan dalam bentuk tumburan sejalur juga masih saja terjadi, seperti yang terjadi akhir-akhir ini di Jerman dan Polandia, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1. Pada kasus pertama, terjadi tabrakan antar kereta penumpang cepat di kota Bad Aibling, Jerman pada Februari 2016 yang menyebabkan 11 korban meninggal [3]. Tabrakan diperkirakan terjadi pada kecepatan impact masing-masing 100 km/jam (kecepatan relatif kurang lebih 200 km/jam). Dengan kecepatan tabrak setinggi itu, jumlah korban tersebut dapat dikatakan rendah, kemungkinan besar karena kereta di Eropa sudah menerapkan teknologi *crashworthiness*, sebagaimana diwajibkan oleh Uni Eropa. Pada kasus kedua, 2 rangkaian kereta api bertumburan dalam satu jalur yang sama di kota Szczekociny, Polandia akibat salah satu rangkaian berjalan di jalur yang salah, mengakibatkan 16 orang meninggal dan 58 terluka pada 3 Maret 2012 [4].

Tumburan antar kereta di Jerman dan Polandia tersebut di atas adalah dua dari sekira 490 kecelakaan kereta api di seluruh dunia dalam kurun 2010 – 2019 [5]. Dari seluruh kecelakaan kereta api, kecelakaan sejalur masih banyak terjadi, meski dengan berbagai usaha pencegahan yang sudah diterapkan. Oleh karena itu, selain pendekatan keselamatan aktif untuk mencegah terjadinya kecelakaan, usaha untuk mengurangi dampak terjadinya kecelakaan masih diperlukan, yang dikategorikan sebagai pendekatan keselamatan pasif, biasanya dengan menerapkan teknologi *crashworthines* pada perancangan kereta penumpang. Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, serangkaian riset, pengembangan dan

penerapan teknologi *crashworthiness* sedang dilaksanakan untuk kendaraan rel pada umumnya dan kereta api pada khususnya.



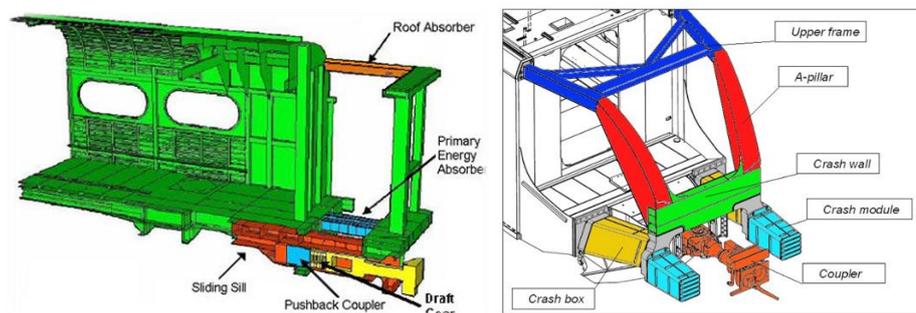
**Gambar 1** Contoh kecelakaan tumburan antar kereta api di luar negeri: a) tumburan kereta penumpang sejalur di Bad Aibling, Jerman [3], b) Tumburan 2 kereta di Szczekociny, Polandia [4]

Sebagai komponen penting dalam teknologi *crashworthiness* di kereta api, *anticlimber* berfungsi mencegah terjadinya fenomena tumpang tindih (*overriding*), yaitu terangkatnya salah satu kereta dan menimpa kereta terdekat saat terjadi tumburan sejalur, baik berhadapan (*head to head*), maupun tabrak belakang, sebagaimana dapat dilihat dari **Error! Reference source not found.** Akibat tumpang tindih ini, penumpang terutama yang duduk di bagian ujung kereta yang tertimpa kereta lain akan mengalami risiko kecelakaan yang signifikan. Dampak lain dari tumpang tindih ini adalah terjadinya *derailment*, yang berdampak terlemparnya penumpang di dalam kereta dan berisiko mengalami cedera akibat dampak sekunder, yaitu dampak antara penumpang dengan bagian interior kereta. Di makalah ini, dilaporkan pengembangan rancangan produk *anticlimber* pada kereta api, meliputi pengembangan alternatif rancangan, perancangan geometri sesuai rancangan kereta api produksi nasional, pemilihan material, hingga analisis efektifitas rancangan pada kasus tumburan kereta api berdasarkan standar BS EN 15227:2008.

## 2 Teknologi *Crashworthiness* di Kereta Penumpang

Teknologi *crashworthiness* diterapkan dalam suatu *crash energy management*, yang mengatur bagaimana energi akibat dampak tabrakan dapat disalurkan ke komponen dan struktur yang dapat menyerap energi dampak semaksimal mungkin dan mengurangi dampak kerusakan struktur di area penumpang. Dua contoh konsep penyerapan energi dampak untuk kereta api telah diusulkan oleh Mayville *et al* [6] dan Starlinger *et al* [7]. Pada contoh pertama, sebagaimana pada Gambar 1.a, energi dampak pertama diterima menjadi gaya kompresi draft gear hingga draft gear tidak bisa menyerap energi lagi, yang dilanjutkan ke komponen *pushback*

*coupler*. Saat *pushback coupler* sudah tidak mampu menyerap energy lagi (*fully deformed*), gaya ditransmisikan ke *shear bolts* yang terdapat pada struktur *sliding sill* hingga *shear bolts* putus pada tahapan tertentu sehingga *sliding sill* masuk ke dalam struktur dan gaya diteruskan ke *primary energy absorber*. Sisa energi impact, selanjutnya diteruskan ke struktur penumpang kereta yang diharapkan tidak terlalu tinggi lagi. Sementara itu, pada konsep kedua, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.b, penyerapan energi impact tahap pertama terjadi ketika *coupler* menerima beban tekan dan diteruskan ke draft gear dan *pushback coupler* hingga bagian *coupler* mundur dan *crash module* saling bertemu di bagian *anticlimber*-nya. Selanjutnya, penyerapan energi impact terjadi pada *crash box* dan *A-Pillar* dan upper frame, sebelum mencapai struktur di area penumpang.



**Gambar 1.** Konsep *Crash Energy Management*: a) Mayville *et al* [6], dan b) Starlinger *et al* [7].

Diinspirasi oleh kedua contoh konsep penyerapan energi impact ini, aplikasi *crashworthiness* untuk perkeretaapian di Indonesia telah disusun, sebagaimana dilaporkan dalam Dharma *et al* [8] dan hasil simulasi analisis *crashworthiness* dilaporkan dalam Setiawan dan Pamintori [9]. Konsep *crash energy management* untuk kereta di Indonesia dirancang terdiri dari komponen-komponen utama *anticlimber*, modul penyerap impact, mekanisme geser pada struktur dasar di *crash zone area*. Secara prinsip, jika terjadi tumburan, *anticlimber* berfungsi menahan gerakan relatif vertikal antar kereta, untuk mencegah tumpang tindih, sehingga energi impact akan tetap terarah secara longitudinal. Ketika gaya tumburan mencapai tingkat tertentu, baut pengaman pada mekanisme geser pada struktur dasar di *crash zone area* bergeser dan mendesak modul penyerap impact utama sehingga dapat menjalankan fungsinya untuk menyerap energi impact. Guna memastikan kolaps pada bagian ujung kereta, beberapa struktur dirancang lebih mudah untuk kolaps dalam arah longitudinal.

Efektifitas keseluruhan sistem *crashworthiness* dapat dievaluasi berdasarkan beberapa standar *crashworthiness* di dunia, antara lain CFR 238.201[10], CFR 238.403 [11], BS EN 15227:2008 [12], dan AS 7520.3 [13]. Tinjauan terhadap

standar-standar ini dalam rangka penerapan teknologi keselamatan aktif di Indonesia dapat dilihat di Setiawan *et al* [14]. Dari tinjauan tersebut, disimpulkan bahwa standar *BS EN 15227:2008 Railway Applications. Crashworthiness requirements for rail vehicles*, memberikan panduan yang paling komprehensif dan detail, dan dapat dijadikan sebagai acuan penerapan keselamatan pasif di perkeretaapian Indonesia. Adapun prinsip pemenuhan *crashworthiness* pada kendaraan rel adalah sebagai berikut,

- i. Pengurangan kemungkinan tumpang tindih
- ii. Penyerapan energi dampak secara terkendali
- iii. Perlindungan *survival space* dan ketahanan struktur pada ruang penumpang
- iv. Pembatasan perlambatan
- v. Pengurangan risiko *derailment* dan pembatasan tabrakan dengan halangan di jalur

Dari kelima prinsip peningkatan *crashworthiness* kereta api, secara khusus komponen *anticlimber* berfungsi meminimalkan kemungkinan terjadinya fenomena tumpang tindih, yaitu terangkatnya salah satu kereta dan menimpa kereta lainnya ketika terjadi tabrakan antar rangkaian kereta api yang menghasilkan energi dampak yang besar. Fenomena tumpang tindih ini dalam sejarahnya menimbulkan dampak yang besar terutama pada penumpang di kereta yang tertindih, juga pada penumpang di kereta yang terangkat. Dengan tidak terjadinya fenomena tumpang tindih ini, gaya dampak akan diteruskan secara longitudinal dan diserap oleh modul penyerap energi dampak utama secara lebih efektif sebelum diterima struktur di area penumpang, sehingga dampak tabrakan pada penumpang. Di samping itu, dengan tidak terangkatnya kereta, rangkaian kereta tetap berada di relnya dan diharapkan risiko anjlokkan (*derailment*) akan dapat dikurangi juga, lebih menurunkan dampak tabrakan kereta api.

### **3 Perancangan *Anticlimber***

#### **3.1 Persyaratan Perancangan**

*Anticlimber* harus mampu menahan gaya tumburan, baik arah longitudinal sebagai akibat langsung tumburan, maupun vertikal sebagai dampak tumburan yang coba ditanggulangi. Gaya longitudinal dibatasi dari batas gaya longitudinal kereta sesuai regulasi, yaitu sebesar 100 tonf. Dengan asumsi faktor keamanan, maka dirancang beban longitudinal pada *anticlimber* sebesar 120 tonf. Beban vertikal dihitung berdasarkan persamaan berikut [6],

$$F = \frac{Wl_2}{l_1} + \frac{I(\Delta y)V^2}{l_1^2(\Delta x)^2} \quad (1)$$

- $I$  = Momen Inersia massa arah *pitch* (kg.m<sup>2</sup>)  
 $l_1$  = Panjang total kereta (m)  
 $l_2$  = Jarak longitudinal titik pusat massa ke ujung kereta (m)  
 $V$  = Laju tumburan (m/s)  
 $W$  = Berat total kereta (N)  
 $\Delta x$  = Jarak longitudinal antar ujung kereta (m)  
 $\Delta y$  = Beda ketinggian antar struktur bawah saat tumburan (m)

Dari data kereta dan perhitungan, diperoleh gaya vertikal sebesar 24 tonf.

Secara lengkap, persyaratan perancangan disusun sesuai kondisi yang harus dipenuhi dari produk *anticlimber* yang akan dibuat adalah sebagai berikut,

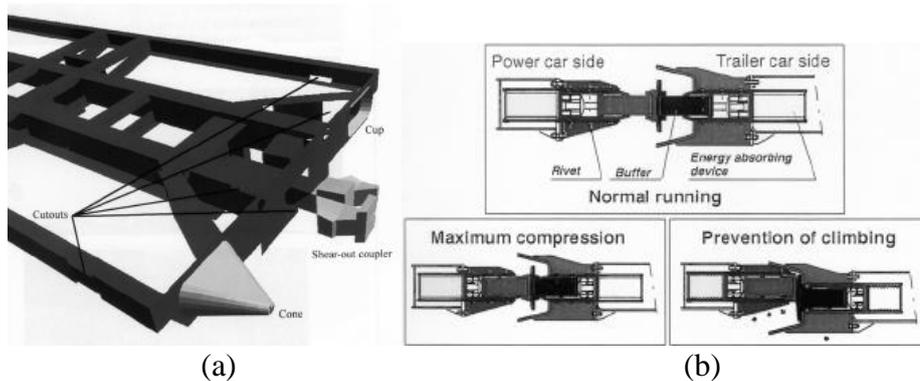
- Sebagai fungsi utamanya, struktur *anticlimber* harus dapat menahan gaya angkat akibat tumburan, 120 tonf (1176 kN) arah longitudinal, dan 24 tonf (235,2 kN) arah vertikal tanpa mengalami gagal patah
- Berdasarkan standar BS EN 15227, dengan adanya *anticlimber*, pada kasus tumburan kecepatan relatif 36 km/jam, masing-masing kereta tidak boleh terangkat sebesar 75% dari tinggi *flange* rel kereta, yaitu 21 mm, atau 100 mm asalkan *anticlimber* tetap dalam posisi terkait,
- Dengan dipasangnya *anticlimber*, operasional kereta api tidak akan terganggu, terutama saat berbelok maksimum, baik akibat kontak antara ujung samping kedua kereta, maupun kontak dengan *coupler* (*Coupler* dapat mengayun ke samping +/- 13 derajat)
- Panjang longitudinal *anticlimber* ditentukan sedemikian sehingga jika terjadi tumburan, *coupler* kedua kereta yang bertumburan akan saling terdorong akibat elastisitas *draft gear*, yaitu penumpu *coupler* berbahan karet, dan kedua *anticlimber* dari kedua kereta akan bertemu. Dengan gaya longitudinal maksimum batasan regulasi sebesar 100 tonf, maka *draft gear* akan terdeformasi sebesar 60 mm pada masing-masing ujung kereta.
- Modifikasi ujung kereta diharapkan seminimal mungkin
- Mudah dibuat dari material yang ada di Indonesia, mudah diaplikasikan pada kereta produksi nasional, dan mudah dirawat
- Tambahan berat untuk keseluruhan perangkat keselamatan pasif maksimal 5% dari total berat kereta saat ini, atau 1,9 ton.

### 3.2 Pemilihan Geometri

Banyak kendaraan rel seperti kereta api di beberapa negara yang sudah menerapkan *anticlimber*, sebagaimana dapat dilihat di Gambar 2, masuk kategori tipe *ribbed plate* (pelat rusuk). Ketika terjadi tumburan antara dua kereta, dan terjadi penyerapan energi impact awal di *coupler assembly*, kedua kereta akan saling mendekat dan pasangan rusuk antara dua kereta saling bertemu dan saling mengunci, menghindari gerakan relatif vertikal sehingga mencegah gerak keseluruhan kereta untuk saling tumpang tindih. Di samping konsep rancangan *ribbed plate* ini, terdapat alternatif tipe *anticlimber* lainnya, yaitu tipe *Cup and cone* (Gambar 3a) dan *C-channel* (Gambar 3b). Alih-alih dilakukan oleh rusuk, efek *anticlimbing* dilakukan oleh pasangan *cup and cone*, maupun *C-channel*, dengan konsep terakhir mengandalkan rancangan terintegrasi dengan *automatic coupler*, sehingga memerlukan perubahan secara signifikan pada rancangan *coupler*, tidak memenuhi persyaratan rancangan (d) pada bagian 3.1.

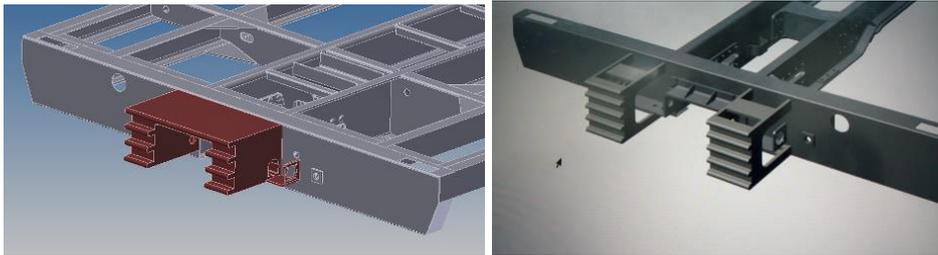


**Gambar 2.** Contoh penerapan *anticlimber* di kendaraan rel, untuk tipe *ribbed plate*: a) kereta penumpang cepat antar kota di Swiss [16], b) kereta komuter di Stockholm, Swedia [17]



**Gambar 3.** Alternatif lain rancangan *anticlimber* [6]: a) *Cup and cone*, b) *C-channel*

Dari kedua konsep alternatif yang layak, konsep *ribbed plate* yang menjanjikan karena kesederhanaan pembuatan dan aplikasi, sehingga selanjutnya dipilih sebagai konsep rancangan *anticlimber*. Dengan memperhatikan jarak optimum antar *anticlimber* dari kedua ujung kereta yang berdekatan, dan dengan memperhatikan aspek operasional saat kereta berbelok maksimum, maka dipilih panjang *anticlimber* sebesar 405 mm. Konsep *ribbed plate* dapat dikembangkan menjadi 2 alternatif lanjut, yaitu rancangan menyatu atau terpisah, seperti dapat dilihat pada Gambar 4. Keuntungan konsep *anticlimber* yang menyatu, adalah panjang *anticlimber* dapat dimaksimalkan sehingga meningkatkan kemungkinan *anticlimber* saling bertemu jika terjadi tumburan, dan sekaligus meminimumkan kemungkinan terjadi kontak yang tidak diinginkan antar *anticlimber* dari ujung kedua kereta saat berbelok maksimum. Namun, rancangan yang menyatu dikhawatirkan justru menyebabkan kontak antara *anticlimber* dengan *coupler* saat mengayun maksimum. Di samping itu, konsep rancangan menyatu memiliki massa 205 kg, jauh lebih berat dibandingkan rancangan terpisah, yang diperkirakan sebesar 109 kg. Jarak antar *anticlimber* kanan dan kiri selanjutnya perlu dioptimumkan sedemikian sehingga saat berbelok tidak terjadi kontak antara *anticlimber* dengan *coupler*, maupun antara dua *anticlimber* dari kedua ujung kereta yang berdekatan.



**Gambar 4.** Konsep rancangan anticlimber: a) menyatu di sekitar coupler, b) terpisah di kanan-kiri dari coupler

### 3.3 Pemilihan Material dan Proses

Dengan konsep rancangan *ribbed plate* terpisah, dan untuk meminimalkan massa, *anticlimber* dirancang terdiri 2 bagian utama, yaitu rusuk dan rangka. Untuk kemudahan pembuatan rusuk dengan geometri yang diinginkan, maka metode coran yang dimesin dinilai akan relatif lebih murah untuk produksi massal. Selanjutnya, rangka akan dipotong dan disambungkan ke bagian rusuk dengan cara dilas, sehingga dapat diperoleh bentuk dengan massa seringan mungkin dan mudah dalam manufaktur. Dengan bagian rusuk yang berasal dari coran, dan rangka dari bahan pelat rol, maka harus dipastikan bahwa keduanya memiliki sifat mampu las (*weldability*) yang baik. Oleh karena itu, dipilih spesifikasi material keduanya yang mendekati. Bagian rusuk dari bahan coran dipilih dari

spesifikasi material JIS SC450, sedangkan rangka dari pelat SS400, dengan sifat mekanik dan komposisi kimia berdasarkan standar dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil uji material SC450 yang dipakai dalam rancangan rusuk *Anticlimber* ini juga ditampilkan pada tabel yang sama. Dari hasil uji sebagai bagian dari kontrol kualitas, dapat dilihat bahwa material rusuk yang dipakai sudah sesuai dengan standar. Hal ini untuk menjamin keterlaksanaan antar kedua material tersebut.

**Tabel 1.** Sifat mekanik material

	<i>C</i> (%)	<i>P</i> (%)	<i>S</i> (%)	<i>YS</i> (MPa)	<i>UTS</i> (MPa)	<i>Elongation</i> (%)
Standar SS 400	--	0,05 (max.)	0,05 (max.)	245 (min.)	400-510	21 (min.)
Standar SC 450	0,35 (max.)	0,04 (max.)	0,04 (max.)	225 (min.)	450 (min.)	19 (min.)
Hasil uji coran SC 450	0,236	0,0158	0,0049	484,7	696,6	19,71

## 4 Analisis

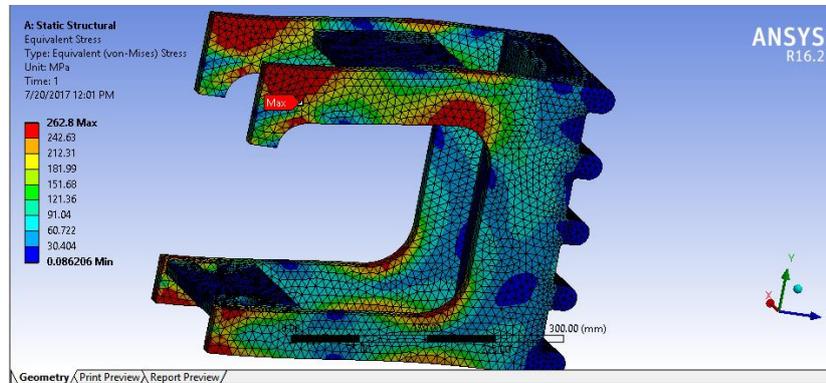
Analisis pertama yang dilakukan pada rancangan *anticlimber* adalah kekuatan statis, terhadap beban-beban kasus tumburan, sebagaimana Persyaratan Perancangan (a), yaitu mampu menahan gaya longitudinal dan vertikal sebesar, masing-masing 60 (588 kN) dan 12 tonf (177,6 kN) untuk setiap unit *anticlimber*.

### 4.1 Analisis Statik

Analisis kekuatan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis elemen hingga, Ansys R16. *Anticlimber* dimodelkan sebagai solid dengan bagian pangkal ditumpu pada semua arah, baik translasi maupun rotasi, untuk memodelkan sambungan lasan pada *end plate* kereta. Beban vertikal sebesar 12 tonf (177,6 kN) diterapkan pada 4 dari 5 sirip *anticlimber* secara merata untuk memodelkan kondisi yang paling mungkin terjadi. Beban longitudinal/horisontal sebesar 60 tonf (588 kN) diterapkan pada sisi antara sirip-sirip secara merata juga. Proses uji konvergensi menghasilkan ukuran mesh maksimum sebesar 9,0 mm dengan tipe elemen solid tetrahedron.

Dari hasil analisis elemen hingga, diperoleh tegangan von Mises terbesar adalah 262,8 MPa, terjadi pada area fillet dan merupakan material dasar pelat SS400, dan bukan pada daerah sambungan dengan material coran SC450 (Gambar 5). Jika diperhatikan, besaran tegangan tersebut di atas telah melebihi tegangan luluh SS400, yaitu 245 MPa namun lebih rendah kekuatan tarik standar material, yaitu 400 MPa. Besaran tegangan yang melebihi tegangan luluh dapat diterima karena penggunaan *anticlimber* adalah untuk sekali pakai saat terjadinya tumburan. Pada

kasus tumburan, komponen tidak mengalami gagal patah, dan menjamin *anticlimber* dari kedua kereta yang bertumburan tetap saling mengait.



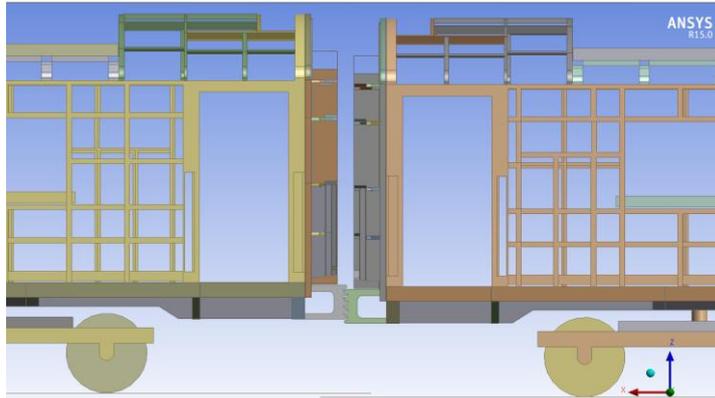
**Gambar 5.** Distribusi tegangan von Mises rancangan *anticlimber* dengan beban statik teoretik akibat tumburan.

## 4.2 Analisis Impak

Analisis fungsional penting lain berdasarkan Persyaratan Perancangan (b), yaitu gerak vertikal relatif kereta, atau tumpang tindih, memerlukan analisis impak menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga dengan kemampuan plastisitas dinamik yang mengakomodasi sifat material pada laju regangan tinggi. Untuk itu, digunakan perangkat lunak LS-Dyna. Sebagai dasar pemodelan geometri rangka kereta, digunakan geometri yang telah disusun oleh Setiawan dan Pamintori [9], berdasarkan rangka dasar kereta KI produksi PT INKA (Persero). Geometri rangka kereta disusun dari geometri *surface* tanpa memperhitungkan kulit kereta maupun interior, karena kekuatan kereta mengandalkan rangka (*space frame*) dan kulit tidak berkontribusi pada kekakuan maupun kekuatan. Pendekatan ini dinilai lebih konservatif, dalam arti jika model ini memberikan hasil yang aman, maka jika memperhitungkan kulit akan menghasilkan struktur yang lebih kokoh sehingga lebih aman pada penumpang. Berat masing-masing komponen utama di kereta sudah diperhitungkan sesuai data dari perusahaan, baik berat maupun lokasi titik pusat massa. Komponen tanpa data akurat, diasumsikan tersebar secara merata, sedemikian sehingga secara keseluruhan, massa dan titik pusat massa kereta mendekati kondisi sebenarnya. Sementara itu, untuk *anticlimber* dan *bogie*, dimodelkan sebagai solid, karena secara bentuk dan massa jauh lebih padat dibandingkan dengan *space frame*.

Sebagai kasus pembebanan, kereta dimodelkan dengan kondisi *offset* vertikal sebesar 40 mm, sebagaimana diatur dalam standar, dengan salah satu kereta

dalam kondisi diam dan kereta lain diberi kecepatan sebesar 10 m/s (36 km/jam) mendekati kereta diam, juga sebagaimana diatur di dalam standar. Sebagai kondisi beban berlebih, simulasi pada kecepatan relatif 20 m/s (72 km/jam) juga dimodelkan, meskipun tidak diatur di dalam standar. Untuk masing-masing kasus tersebut, dilakukan simulasi antara tanpa dan dilengkapi dengan *anticlimber*, sesuai dengan rancangan. Model simulasi impact dapat dilihat pada Gambar 6.



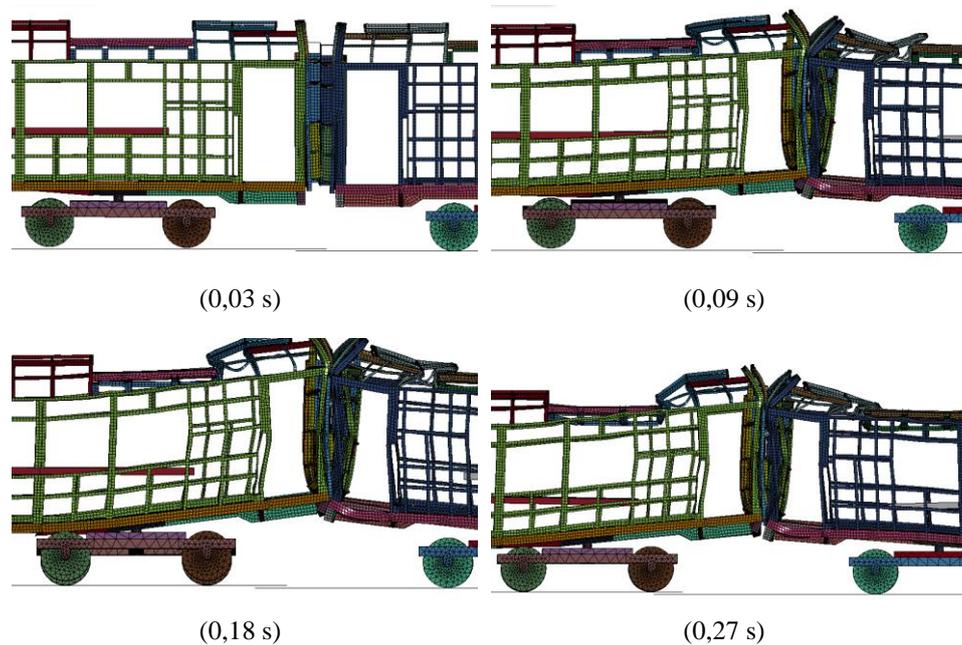
**Gambar 6.** Model simulasi impact kereta, untuk kasus dilengkapi dengan *anticlimber*.

Untuk mendefinisikan saling kontak antar komponen pada bodi kereta digunakan *Automatic single surface*, sebagaimana direkomendasikan di manual LS-Dyna untuk kasus impact. Untuk memodelkan fenomena gesekan antar komponen tersebut. Untuk kontak antara pasangan *anticlimber* dari kedua kereta dan antar permukaan kereta yang berbeda dipakai *Automatic surface to surface*. Di samping itu, untuk komponen-komponen yang diperkirakan tidak terlalu berpengaruh dalam mekanisme impact, seperti *bogie-frame* dan roda-roda, digunakan *surface to surface offset* untuk menyederhanakan masalah, tanpa mempengaruhi hasil secara signifikan. Komponen-komponen tersebut dimodelkan sebagai *rigid body*, sehingga deformasi tidak dihitung.

Material struktur kereta SS400 dimodelkan sebagai material terdeformasi, dengan karakteristik plastisitas dimodelkan sebagai *automatic piecewise linear plasticity* dengan data dasar sebagaimana Tabel 1. Untuk memodelkan karakteristik plastisitas pada laju regangan tinggi, digunakan model *Cowper-Symond* dengan parameter *C* dan *P* dipilih sebesar 40 dan 5 sebagaimana baja karbon pada umumnya.

Sebelum analisis sesuai standar, dilakukan validasi terlebih dahulu terhadap model yang telah dibuat, dengan membandingkan energi kinetik secara teoretik dengan energi kinetik simulasi, untuk kasus kecepatan 10 dan 20 m/s, dan

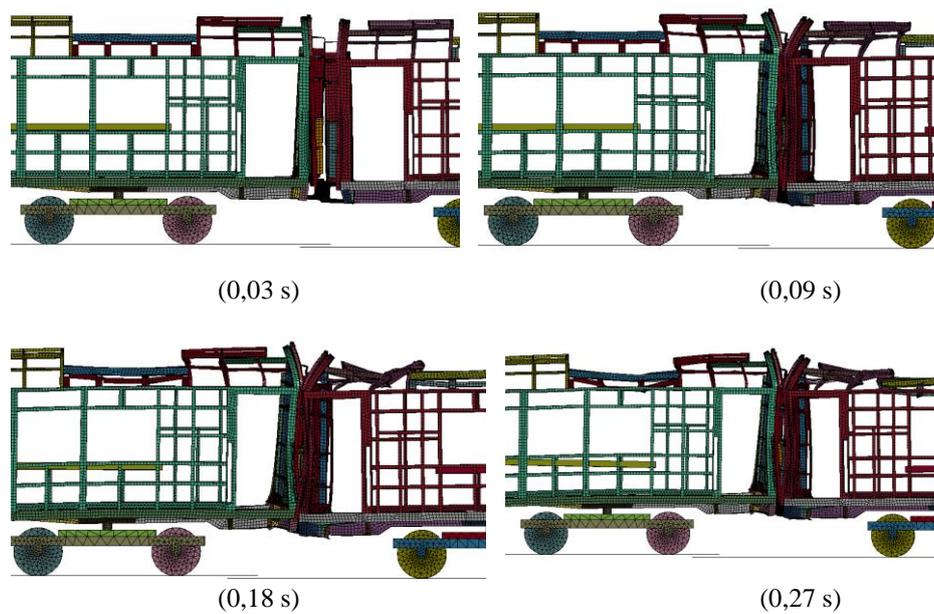
masing-masing untuk kasus tanpa dan dengan *anticlimber*. Untuk seluruh kasus, diperoleh perbedaan sekitar 0,67%, sehingga dari prinsip dampak model dapat diterima. Selanjutnya simulasi dampak dilanjutkan untuk kasus-kasus kasus kecepatan 10 dan 20 m/s, dan masing-masing untuk kasus tanpa dan dengan *anticlimber*. Kasus kecepatan 10 m/s, atau 36 km/jam dilakukan sesuai persyaratan standar BS EN, sedangkan kecepatan 20 m/s, atau 72 km/jam, dilakukan untuk menguji efektifitas *anticlimber* pada kasus tumburan cukup ekstrim. Dari simulasi tumburan dua kereta, dihasilkan riwayat tumburan kereta sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8, untuk kasus kecepatan tumburan relatif 10 m/s untuk kasus, masing-masing **tanpa** dan **dengan** *anticlimber*. Gambar 9 dan Gambar 10 menampilkan hasil simulasi berupa riwayat tumburan untuk kecepatan tumburan relatif 20 m/s, masing-masing untuk kasus **tanpa** dan **dengan** *anticlimber* juga.



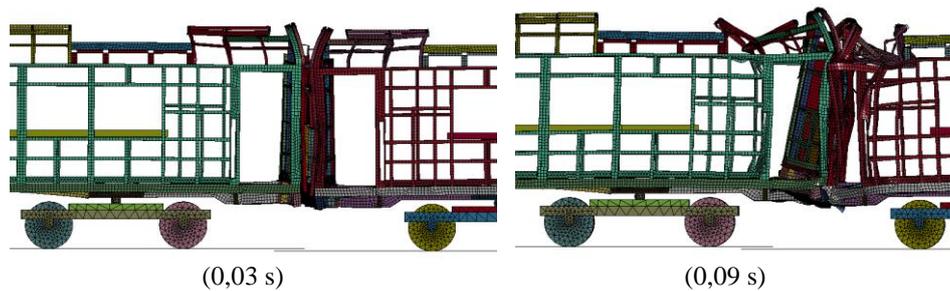
**Gambar 7.** Riwayat tumburan antar kereta pada kecepatan relatif 10 m/s, untuk kasus tanpa *anticlimber* hasil analisis dampak.

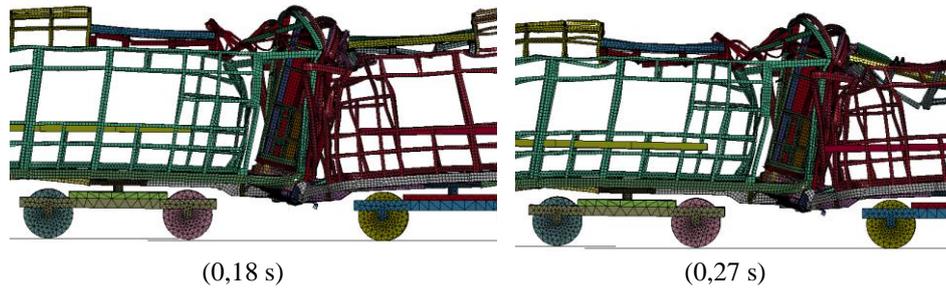
Pada kasus untuk tumburan tanpa *anticlimber* pada kecepatan 10 dan 20 m/s, terdapat kenaikan vertikal masing-masing sebesar 89,4 dan 150,5 mm. Untuk kasus sesuai standar, yaitu kecepatan tumburan 10 m/s (Gambar 7), hasil ini sudah jauh melewati batas yang dibolehkan, yaitu 21 mm, dengan kondisi struktur dasar yang mulai terlihat terangkat satu sama lain. Meskipun fenomena tumpang tindih belum terlihat, namun berdasarkan standar, untuk kecepatan yang

lebih besar atau rangkaian yang terdiri dari beberapa kereta, kemungkinan terjadinya fenomena tumpang tindih akan tinggi. Dengan terangkatnya roda terhadap rel, kemungkinan terjadinya anjlokkan juga akan lebih tinggi. Dengan *anticlimber* terpasang, roda kereta terangkat hingga maksimum 7,87 mm pada kecepatan 10 m/s dan bahkan hanya 14,8 mm untuk kecepatan 20 m/s, lebih rendah dari batas 21 mm yang disyaratkan standar. Dengan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *anticlimber* cukup efektif untuk mengurangi kemungkinan terjadinya fenomena tumpang tindih.

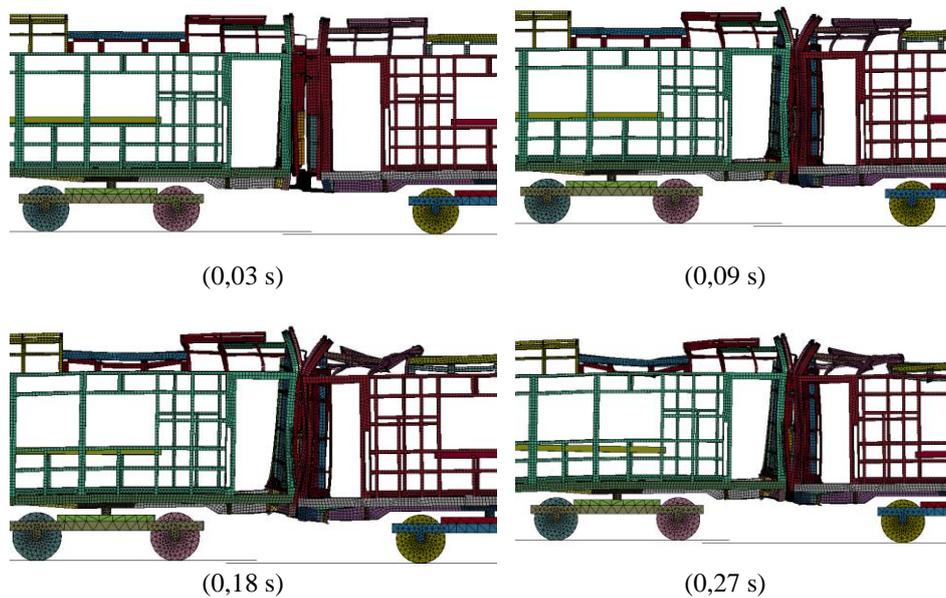


**Gambar 8.** Riwayat tumburan antar kereta pada kecepatan relatif 10 m/s, untuk kasus dengan *anticlimber* hasil analisis impak.





**Gambar 9.** Riwayat tumburan antar kereta pada kecepatan relatif 20 m/s, untuk kasus tanpa *anticlimber* hasil analisis dampak.



**Gambar 10.** Riwayat tumburan antar kereta pada kecepatan relatif 20 m/s, untuk kasus dengan *anticlimber* hasil simulasi analisis dampak.

## 5 Kesimpulan

Sebagai tahap pertama implementasi teknologi *crashworthiness* untuk kereta api Indonesia, komponen *anticlimber* dirancang dengan pertimbangan kemungkinan implementasi di perkeretaapian Indonesia dan dampaknya untuk menurunkan korban jika terjadi kecelakaan tumburan kereta api. Perancangan mengacu pada geometri kereta api nasional dan berdasarkan kriteria standar BS EN 15227.

Rancangan diuji secara simulasi statik dan dinamik. Berdasarkan analisis statik, dengan beban gaya longitudinal 60 tonf (177,6 kN) dan gaya angkat vertikal 12

tonf (588 kN) yang diperkirakan terjadi saat tumburan, tegangan yang dihasilkan adalah 262,8 MPa yang masih di bawah kekuatan tarik material sehingga *anticlimber* tidak akan patah saat menjalankan fungsinya jika terjadi tumburan kereta api. Dari analisis dinamik, diperoleh efektifitas implementasi *anticlimber* dengan membandingkan antara kasus tanpa dan dengan *anticlimber*. Pada kasus kecepatan tumburan 10 m/s (36 km/jam), sesuai kriteria BS EN, dan kecepatan tinggi 20 m/s (72 km/jam), keberadaan *anticlimber* terbukti mampu menurunkan kemungkinan terjadinya tumpang tindih, dengan kenaikan roda hanya 7,87 mm pada kecepatan tumburan 10 m/s dan 14,8 mm untuk kecepatan 20 m/s, lebih rendah dari batas maksimum 21 mm sebagaimana disyaratkan oleh standar. Sementara itu, kasus tanpa *anticlimber*, menghasilkan perpindahan roda untuk kasus 10 dan 20 m/s, masing-masing sebesar 89,4 dan 150,5 mm, jauh melebihi batas maksimum standar.

Dengan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa rancangan memiliki prospek yang baik untuk dikembangkan ke purwarupa dan pengujian lapangan, yang menjadi tahap berikutnya dari penelitian ini.

## 6 Daftar Pustaka

- [1] Sawitri, A., *BPS: Jumlah Penumpang Kereta Api Melonjak*, Tempo, <https://bisnis.tempo.co/read/news/2017/05/02/090871455/bps-jumlah-penumpang-kereta-api-melonjak>, (7 September 2017).
- [2] Suprpto, *Data Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian Tahun 2010 – 2016*, Komite Nasional Keselamatan Transportasi, 2016
- [3] *Germany Train Crash: Several killed near Bavarian town of Bad Aibling*, BBC, <http://www.bbc.com/news/world-europe-35530538>, (7 September 2017).
- [4] BBC News, *Poland suffers deadly train crash near Szczekociny*, <https://www.bbc.com/news/world-europe-17248735> (25 April 2019).
- [5] Wikipedia, *List of rail accidents (2010–2019)*, [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_rail\\_accidents\\_\(2010%E2%80%932019\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rail_accidents_(2010%E2%80%932019)) (25 April 2019).
- [6] Mayville, R. A., et al, *Crashworthiness Design Modifications for Locomotive and Cab Car Anticlimbing Systems*, Federal Railroad Administration, Washington, DC, 2003
- [7] Starlinger, A., Gmür, A., Castelli, B. & Liebhard, O., *On the Application of ABAQUS in The Validation Process of Crashworthiness of Railway Vehicles*, Proc. 2007 ABAQUS Users' Conference, 2007
- [8] Dharma, G. S. S., Suweca, I. W. & Setiawan, R., *Perancangan Dasar Sistem Keselamatan Pasif Kereta Penumpang Kelas 1 (Kereta K1)*, dalam Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin Ke-15, pp. 889-896, 2016.

- [9] Setiawan, R. & Pamintori, M., *Analisis Crashworthiness Struktur Kereta Penumpang*, Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin Ke-16, pp. 191-195, 2017.
- [10] U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 49 CFR § 238.201 Scope/alternative compliance, Federal Register, 2006.
- [11] U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 49CFR § 238.403 *Crash energy management*, Federal Register, 2006.
- [12] *BS EN 15227:2008 Railway Applications - Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies*, European Committee for Standardization, 2008.
- [13] *AS 7520.3:2012 Australian Railway Rolling Stock – Body Structural Requirements – Passenger Rolling Stock*, Rail Industry Safety and Standards Board, 2012.
- [14] Setiawan, S., et al, *Tinjauan Kritis Aspek Keselamatan dalam Regulasi Nasional dan Usulan Penyempurnaannya*, Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin Ke-15, pp. 1196-1204, 2016.
- [15] Mayville *et al.*, *Approaches to Preventing Override and Lateral Buckling in Passenger Trains; Appendix B*, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA, 1999
- [16] *Swiss Train in Zurich – Switzerland 30 November 2015*, Shutterstock, <https://www.shutterstock.com/image-photo/swiss-train-zurich-switzerland-30-november-577335493?drawer=open> (25 April 2019)
- [17] Halldin, M. *A C20 Train at the Gamla Stan Metro Station – Stockholm*, Wikimedia, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamla\\_stan\\_C20\\_070330.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamla_stan_C20_070330.JPG) (25 April 2019)