

Perancangan dan Analisis Penyerapan Energi Impak *Crash Zone* Area Kereta Penumpang Nasional

Rachman Setiawan^{1*}, Yunendar Aryo Handoko¹, Fikri Imam Ramadhan², dan M. Yazid Fahmi²

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

²Prodi Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

*Corresponding author: rachmans@edc.itb.ac.id

Abstract. Having a massive weight and high operational speed make a great amount of kinetic energy involve when the train collision occurs. To reduce the risk of passengers death and serious injury in a train collision, a passive safety system on the train has been developed and is planned to be implemented in the near future. The passive safety mechanism is designed to maximize the deformed area which is safe for passengers. This is fulfilled by modifying the front end structure of the train as a crash zone area. The design is conducted by modifying the structure at the front end of the train that is not occupied by passengers, and assessed based on the standard of crashworthiness to estimate the impact force, deformation, and impact energy absorption. Impact energy absorption is designed to be absorbed mainly by impact energy absorber module, and addition of the antyclimber is meant to prevent overriding phenomenon using scenarios based on BS EN 15227: 2008 standards. The study was conducted on a crash zone area design, compared to cases without a crash zone area design. The proposed crash zone area is modeled in 1: 2 scale as preparation for 1: 2 scale field test, because until now there has not been an adequate full scale test facility in Indonesia. Based on dynamic plasticity simulation with collision speeds according to BS EN, the peak force decreased by 24% and the deceleration decreased by 68%. Both of parameters are important to reduce the risk of collisions to the passengers in the passenger area with energy absorption is concentrated at the front end of the train and reduce vertical displacement of the wheelset. From these parameters, it can be concluded that the design of the crash zone area can increase the crashworthiness of passenger trains, so that it is expected to reduce the risk of passengers death and serious injury in a train collision.

Abstrak. Massa kereta yang besar dan kecepatan operasi yang tinggi berdampak pada besarnya energi yang terlibat jika terjadi tabrakan. Untuk menurunkan dampak tabrakan tersebut, sistem keselamatan pasif pada kereta api telah dirancang dan rencananya akan diterapkan dalam waktu dekat. Mekanisme keselamatan pasif yang dirancang adalah dengan memaksimalkan area terdeformasi yang aman bagi penumpang. Hal ini dilakukan dengan memodifikasi struktur pada ujung kereta sebagai *crash zone area*. Perancangan dilakukan dengan memodifikasi struktur bawah bagian ujung kereta yang tidak ditempati penumpang, dan dikaji berdasarkan prinsip *crashworthiness*, untuk memperkirakan gaya tabrakan, deformasi, dan penyerapan energi impak. Penyerapan energi impak dirancang terutama oleh modul penyerap energi impak utama, dan aplikasi *anticlimber* untuk mencegah kemungkinan mode kegagalan *overriding* jika terjadi tabrakan, dengan skenario berdasarkan standar BS EN 15227:2008. Kajian dilakukan pada rancangan *crash zone area*, dibandingkan dengan kasus tanpa rancangan *crash zone area*. Kajian rancangan *crash zone area* yang diusulkan, dimodelkan secara 1:2 sebagai persiapan untuk pengujian skala 1:2 di lapangan, karena hingga saat ini belum terdapat fasilitas uji skala penuh yang memadai di Indonesia. Dari simulasi dinamik plastisitas, untuk kasus tabrakan pada beberapa kecepatan impak sesuai BS EN, diperoleh hasil gaya impak turun sebesar 24% dan perlambatan turun sebesar 68%. Kedua parameter ini penting untuk menurunkan dampak tabrakan pada penumpang di area penumpang, dengan penyerapan energi terpusat pada ujung kereta yang aman dan menghasilkan perpindahan vertikal yang lebih rendah. Dari beberapa parameter ini, dapat disimpulkan bahwa rancangan *crash zone area* dapat meningkatkan *crashworthiness* dari kereta penumpang, sehingga diharapkan dapat menurunkan dampak pada penumpang jika terjadi tabrakan.

Kata kunci: *sliding mechanism, crush zone area, crashworthiness, crash energy management*.

Pendahuluan

Kereta api menjadi moda transportasi yang umum digunakan di Indonesia dengan rata-rata penumpang per bulannya mencapai 30 juta pengguna pada tahun 2018 [1]. Sebagai salah satu alat transportasi massal, peningkatan keamanan dan keselamatan dalam berpindah tempat menggunakan kereta api menjadi hal vital dan perlu diprioritaskan. Setidaknya telah terjadi 9 tumbuhan antar kereta dan 24 kasus anjlok/terguling dalam rentang tahun 2010-2016 [2]. Fenomena yang umum terjadi ketika tabrakan adalah modus kegagalan *lateral buckling* dimana badan kereta yang kaku cenderung tidak stabil ketika dibebani gaya kompresi akibat tabrakan seperti halnya yang terjadi pada tabrakan KA Sancaka dengan truk pada tahun 2018 yang diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1.(a) Tumbuhan KA Sancaka [3] dan **(b)** ilustrasi modus kegagalan *lateral buckling*

Modus kegagalan lain yang mungkin terjadi adalah peristiwa *overriding* (tumpang tindih) gerbong akibat terdapat gaya vertikal tabrakan yang menyebabkan salah satu kereta terangkat seperti kecelakaan kereta di Pakistan pada Juli 2019 yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2.(a) Tumbuhan Akbar Express Pakistan [4] dan **(b)** Ilustrasi modus kegagalan *tumpang tindih*

Belum adanya regulasi terkait standar kelaikan tabrak di Indonesia menyebabkan rancangan kereta yang ada belum dirancang sesuai kaidah kelaikan tabrak. Desain kereta konvensional saat ini cenderung memiliki struktur yang terlalu kokoh untuk memenuhi persyaratan uji kompresi pada peraturan KM No. 41 tahun 2010 yang menyatakan struktur kereta harus mampu menahan pembebanan longitudinal sebesar 100 tonf [5]. Desain yang

terlalu kokoh memiliki karakteristik gaya hancur yang tinggi dan perlambatan yang begitu besar saat tabrakan sehingga berakibat fatal bagi keselamatan penumpang di dalamnya. Hal tersebut mendorong segera diterapkannya *crash energy management* (CEM) pada kereta penumpang nasional. CEM adalah serangkaian metode desain untuk meningkatkan kelaikan tabrak [6]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Gede, telah diusulkan CEM berupa penerapan *crash zone area*, sebuah area yang dirancang agar hancur yang terletak di ujung-ujung kereta dimana area tersebut tidak ditempati oleh penumpang [7]. Terdapat tiga komponen utama pada *crash zone area* yaitu: *anticlimber* untuk mencegah modus tumpang tindih, modul penyerap impak sebagai penyerap energi utama, dan mekanisme *sliding* sebagai penumbuk modul penyerap impak.

Riset terkait penerapan CEM dan kaji eksperimental skala penuh telah ada sejak satu dekade lalu yang diprakarsai oleh Amerika, Korea dan beberapa negara di Eropa [8,9,10], walaupun demikian hal ini masih sangat baru khususnya bagi perkeretaapian di Indonesia sehingga diperlukan strategi penerapan CEM secara bertahap agar pelaku industri dan pemangku kebijakan dapat menyesuaikan. Rencana penerapan diusulkan dimulai dari pemasangan *anticlimber* pada desain konvensional dan penerapan *crash zone area* bagi kereta produksi baru. Dalam penelitian ini efektifitas penggunaan *anticlimber* pada kereta konvensional akan dianalisis dan kinerja penerapan *crash zone area* akan ditinjau berdasarkan prinsip kelaikan tabrak dengan parameter yang dievaluasi berupa respon gaya, deformasi dan perlambatan. Kondisi simulasi dan parameter yang dievaluasi disesuaikan dengan standar BS EN 15227:2008 [11]. Belum adanya fasilitas pengujian skala 1:1 menyebabkan simulasi *crash zone area* dilakukan pada skala 1:2. Pengujian skala 1:2 akan dilakukan pada penelitian selanjutnya sehingga hasil yang didapat pada penelitian ini dapat dibandingkan.

Metodologi

Terdapat 3 simulasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu:

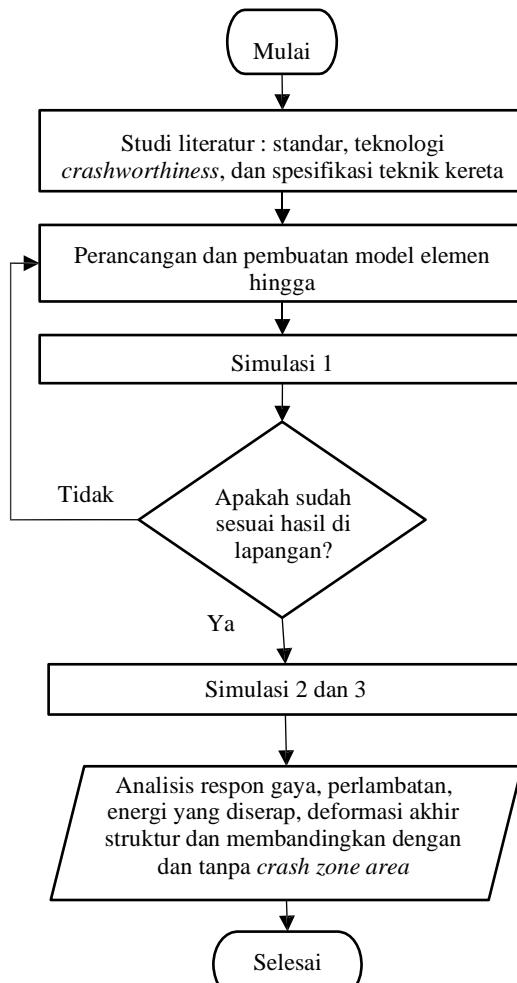
1. Simulasi dinamik plastis skala 1:1 struktur depan kereta konvensional.
2. Simulasi dinamik plastis skala 1:1 penerapan *anticlimber*.
3. Simulasi dinamik plastis skala 1:2 rancangan *crash zone area*.

Simulasi 1 digunakan sebagai verifikasi model elemen hingga yang dibuat, dengan membandingkannya dengan kasus tabrakan saat langsir di dipo kereta.

Simulasi 2 bertujuan untuk mengetahui kemampuan *anticlimber* dalam mencegah tumpang tindih pada kereta konvensional.

Simulasi 3 dilakukan untuk mengevaluasi kinerja penerapan *crash zone area* dengan memperkirakan respon gaya, deformasi, dan perlambatan serta mengamati fenomena yang terjadi dalam tabrakan.

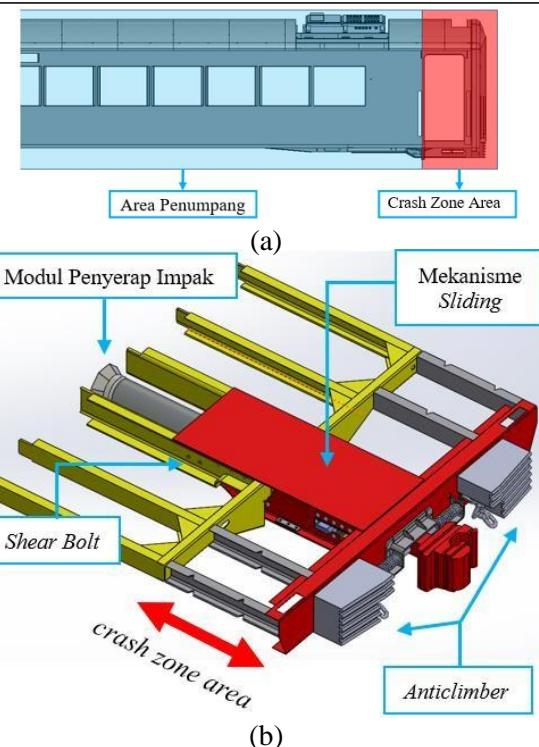
Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti alur yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur penggerjaan penelitian

Desain Crash Zone Area

Crash zone area dirancang untuk membatasi deformasi kereta agar kerusakan yang terjadi berada diujung-ujung kereta dan tidak sampai pada daerah penumpang. Pada *crash zone area* terdapat 3 komponen utama yaitu: mekanisme *sliding*, modul penyerap impak dan *anticlimber* seperti tampak pada Gambar 4. Sebagai sistem untuk meningkatkan kelaikan tabrak, terdapat 3 persyaratan perancangan yang harus dipenuhi untuk menjamin sistem bekerja sesuai desain, yaitu: persyaratan ruang, persyaratan operasional dan persyaratan ketika tabrakan [7].



Gambar 4. (a) Lokasi *Crash zone area* dan (b) Komponen utama pada *crash zone area*

Persyaratan Perancangan. Persyaratan operasional ditujukan agar desain tidak mengganggu jalannya kondisi operasi normal, diantaranya adalah :

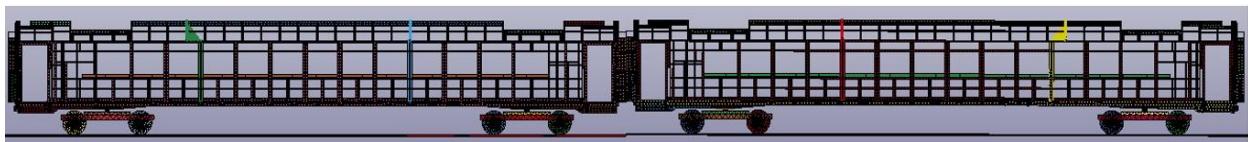
- Komponen tidak boleh mengganggu proses lepas-pasang *coupler*.
- Penempatan komponen tidak boleh mengganggu tuas perpipaan dan kelistrikan yang ada.
- Mekanisme *sliding* tidak boleh teraktivasi pada beban tarik-tekan operasional.

Persyaratan ruang membatasi ketersediaan ruang bagi komponen untuk bekerja sesuai fungsinya, beberapa yang harus dipenuhi adalah :

- Anticlimber* tidak boleh bersinggungan ketika kereta berbelok.
- Mundurnya mekanisme *sliding* tidak boleh menyenggung bogie atau komponen lain.
- Hancurnya *crash zone area* tidak lebih dari 1000 mm

Terakhir adalah persyaratan tabrakan, dimana skenario tabrakan dirancang agar tiap komponen bekerja dengan maksimal, beberapa diantaranya adalah :

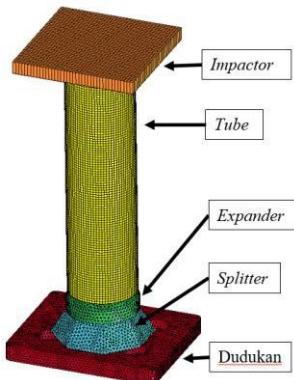
- Draft gear* terkompresi maksimal sebesar 60 mm pada gaya 110 tonf.
- Shear bolt* gagal pada gaya 130 tonf, pada saat ini modul penyerap impak mulai bekerja.



(c) *U-loop* mundur mengakibatkan deformasi pada *endbeam*, setelah 150 mm *anticlimber* saling mengunci.

Mekanisme Sliding. Mekanisme ini memungkinkan bagian *centersill* dan *endbeam* (selanjutnya disebut *u-loop*) bergerak meluncur menumbuk modul penyerap impak ketika *shear bolt* sebagai komponen aktivasi gagal pada gaya 130 tonf. *U-loop* bergerak mundur dan berfungsi sebagai *impactor* bagi modul penyerap impak. Mundurnya *u-loop* juga menyebabkan *anticlimber* kedua kereta dapat saling terkunci untuk mencegah mode kegagalan *overriding*.

Modul Penyerap Impak. Modul yang digunakan berjenis *ekspansi-axial splitting* [12]. Pada tahap awal modul akan mengalami perubahan diameter (ekspansi) kemudian modul akan munumbuk *splitter* yang mengakibatkan terbentuk sobekan awal di delapan titik pada modul. Sobekan ini terus berlanjut menjadi gulungan hingga akhir deformasi. Komponen pada modul penyerap impak dijabarkan pada Gambar 6.



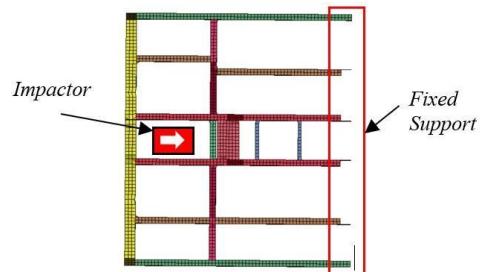
Gambar 6. Komponen penyusun modul penyerap impak

Anticlimber. Komponen yang digunakan bertipe *ribbed plate*, dengan fungsi utamanya adalah menahan gaya vertikal ketika tabrakan sehingga modus tumpang tindih dapat dihindarkan.

Pemodelan Elemen Hingga

Simulasi 1 dilakukan dengan pemodelan skala 1:1 dari sebagian struktur *underframe* kereta dari *bolster* hingga ujung kereta, sebagai verifikasi antara *set-up* simulasi dan hasil di lapangan. Pembebaan dilakukan dengan menempatkan sebuah *impactor* sebagai representasi *coupler*, *impactor* diberi kecepatan awal 10 m/s dan massa

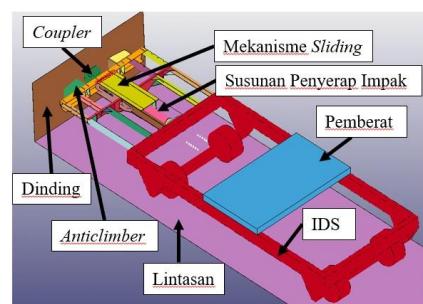
40 ton yang merupakan massa satu gerbong kereta [13]. Ilustrasi penempatan pembebaan dan kondisi batas ditampilkan pada Gambar 7.



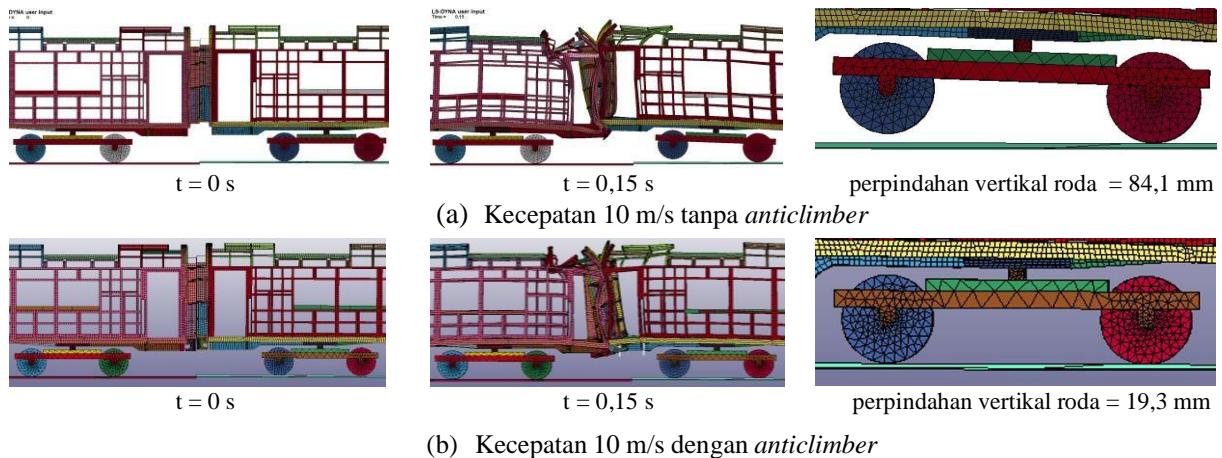
Gambar 7. Kondisi awal dan kondisi batas simulasi 1

Selanjutnya adalah simulasi 2 dengan pemodelan skala 1:1 dari keseluruhan kereta konvensional dengan dan tanpa *anticlimber* terpasang. Kondisi awal yang diberikan berupa kecepatan relatif 10 m/s antara kereta 1 dan kereta 2 yang mengacu pada standar BS EN 15227:2008 [11]. Ilustrasi kondisi awal dan kondisi batas simulasi 2 ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada simulasi 3, model yang dibangun berupa struktur *crash zone area*. Model yang digunakan merupakan skala 1:2 sehingga pemberian massa pada IDS harus diperhitungkan agar nilainya representatif terhadap skala 1:1. Massa kereta ukuran sebenarnya adalah 40 ton, ketika diubah skala nya menjadi 1:2 itu berarti panjang tiap komponen nya menjadi setengah dari semula yang berarti volumenya berubah menjadi satu per delapan semula sehingga massa yang diberikan pada IDS adalah 5 ton. IDS digerakkan menumbuk sebuah dinding kaku dengan kecepatan 10m/s. Dinding kaku memberikan kondisi batas yang sederhana bagi pemodelan dan validasi kaji eksperimental pada penelitian lanjutan. Dinding kaku juga merupakan idealisasi dari tabrakan kereta simetrik [14]. Ilustrasi kondisi batas dan pembebaan diperlihatkan pada Gambar 8.

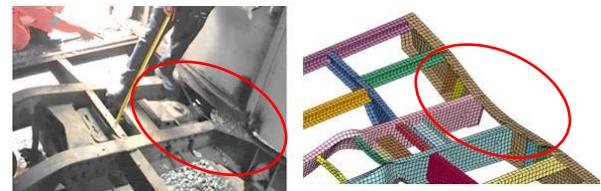


Gambar 8. Kondisi awal dan kondisi batas simulasi 3

**Gambar 9.** Perbandingan penerapan *anticlimber* pada kereta konvensional

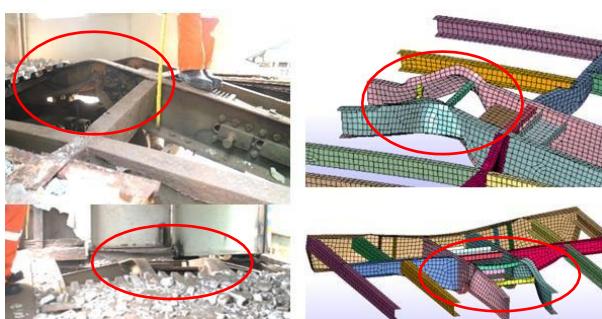
Material yang digunakan pada struktur adalah SS400 dengan pemodelan material *piecewise linear plasticity* sedangkan untuk modul penyerap impak menggunakan API 5L dengan pemodelan material *johnsoon cook* serta terakhir *anticlimber* menggunakan material SC45 dengan pemodelan *piecewise linear plasticity* [15].

centersill buckling lebih dulu tercapai daripada gaya untuk menggagalkan *sidesill* seperti diperlihatkan pada Gambar 11.

**Gambar 11.** Mode kegagalan yang terjadi pada *endbeam*

Verifikasi simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap bangkai kereta di Balai Yasa Surabaya Gubeng yang rusak akibat tumbukan saat langsir. Tidak adanya data kecepatan, deformasi, dan gaya yang dimiliki mengakibatkan perbandingan yang dilakukan terbatas pada letak deformasi dan bentuk deformasi secara visual. Bagian yang diamati adalah modus kegagalan *buckling* pada bagian tengah *centersill*. Geometri penampang *centersill* bagian depan memiliki tinggi vertikal lebih besar dari *centersill* bagian belakang akibatnya pada bagian tersebut *centersill* lebih mudah mengalami *buckling* seperti diperlihatkan pada Gambar 10.

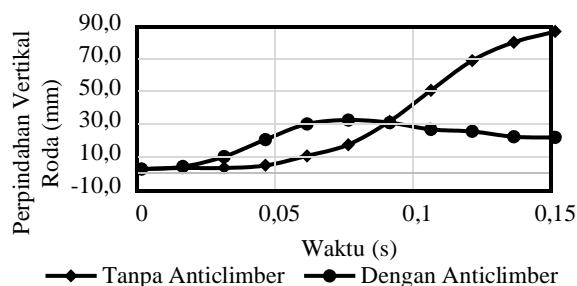
Letak dan bentuk deformasi telah sesuai antara simulasi dan pengujian sehingga model dan pengaturan simulasi dapat dikatakan valid. Selanjutnya penerapan *anticlimber* pada kereta konvensional akan dievaluasi. Berdasarkan standar standar BS EN 15227:2008 dijelaskan kriteria terjadinya *overriding*. Kriteria peristiwa *overriding* adalah valid jika dilakukan simulasi tabrakan dengan perbedaan ketinggian antar kereta pada titik kontak tabrakan adalah 40 mm dengan adanya gerakan inklinasi (kereta yang bergerak dipaksa naik terhadap kereta yang diam). Lebih jauh, dijelaskan bahwa:

**Gambar 10.** Mode kegagalan yang terjadi pada *centersill*

1. Selama simulasi tabrakan berjalan, perpindahan arah vertikal roda kereta pada setiap bogie tidak boleh melebihi 75% ketinggian nominal flange roda kereta. Flange roda kereta memiliki tinggi 28 mm, maka batasnya adalah 21 mm.
2. Jika kondisi pertama tidak bisa tercapai, perpindahan vertikal dari roda diperbolehkan mencapai maksimal 100 mm ketika komponen *anticlimber* kereta berfungsi dengan sempurna dalam menahan gaya vertikal selama tabrakan.

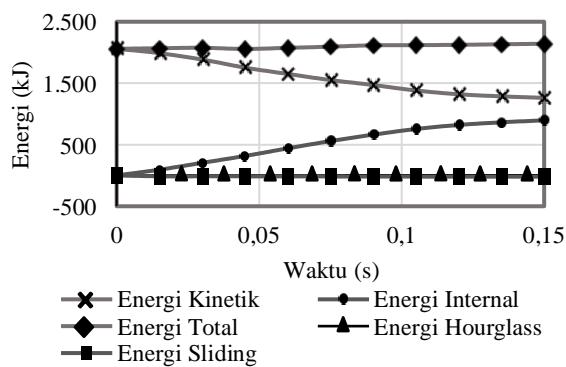
Hasil simulasi yang diperlihatkan pada Gambar 9 menunjukkan desain tanpa *anticlimber* mengakibatkan perpindahan roda mencapai 84.1 mm. Kondisi tersebut telah melewati batas yang ditetapkan standar BS EN 15227:2008 terkait batas

kenaikan maksimum roda kereta yang diperbolehkan yaitu sebesar 21 mm. Hal ini menunjukkan ketika kereta tidak dipasangkan *anticlimber*, terjadi *overriding*. Setelah pemasangan *anticlimber*, terlihat perpindahan vertikal roda kereta mencapai maksimum pada 0,075 s sebesar 30,0 mm, kemudian kembali turun hingga akhir simulasi seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Kondisi tersebut memang telah melewati batas kenaikan maksimum roda kereta yang ditetapkan standar BS EN 15227:2008 pada syarat pertama, namun kenaikan vertikal roda kereta masih di bawah 100 mm dengan kondisi *anticlimber* sudah saling mengunci ketika terjadi tabrakan. Hal ini memenuhi persyaratan kedua sesuai standar serta menunjukkan bahwa *anticlimber* mampu mencegah terjadinya *overriding* dengan menahan gaya vertikal yang terjadi ketika tabrakan.



Gambar 12. Grafik perbandingan perpindahan vertikal roda kereta tanpa *anticlimber* dan dengan *anticlimber*

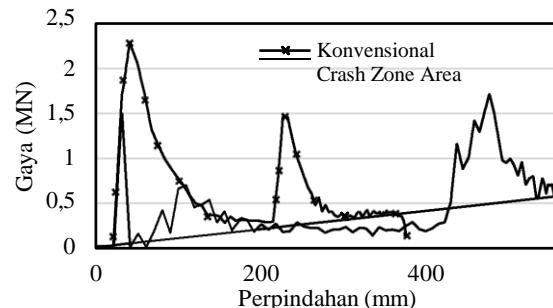
Validasi simulasi dilakukan dengan melihat *hourglass energy* yang terjadi selama simulasi. Umumnya *hourglass energy* dijaga agar tidak lebih dari 10% dari energi total [16]. Grafik kesetimbangan energi pada Gambar 13 menunjukkan energi *hourglass* simulasi sebesar 2,8 kJ atau 0,1% dari energi total sehingga simulasi dapat dikatakan valid.



Gambar 13. Grafik kesetimbangan energi simulasi tabrakan kereta

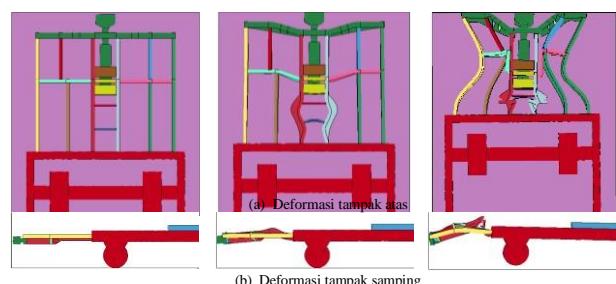
Simulasi yang terakhir adalah perbandingan antara penerapan *crash zone area* dan desain kereta konvensional. Desain kereta konvensional memiliki

karakteristik struktur yang lebih rigid, hal ini ditunjukkan dengan tingginya puncak gaya sebesar 2,25 MN yang terjadi tepat sesaat setelah menabrak dinding kaku seperti ditunjukkan pada Gambar 14.



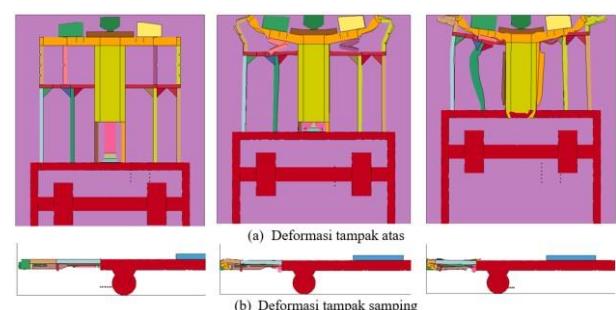
Gambar 14. Perbandingan respon gaya

Pada gaya 2,25 MN *centersill* bagian belakang mengalami *buckling* dan pada akhir simulasi roda depan terangkat hingga 69,5 mm hal ini sejalan dengan simulasi skala 1:1 yang dilakukan sebelumnya. Terdapat puncak gaya kedua sebesar 1,47 MN yang terjadi ketika seluruh *sidesill* gagal seperti ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Proses deformasi kereta konvensional

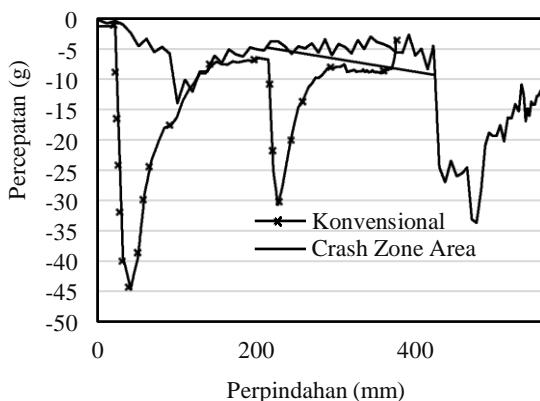
Pada penerapan *crash zone area* puncak gaya awal dapat diturunkan 24% menjadi 1,53 MN dengan pemberian takikan pada *sidesill* bagian depan, kemudian gaya cenderung konstan hingga terdapat puncak gaya di akhir deformasi yang menunjukkan ketika gerak *sliding* telah maksimal dan *tube* seluruhnya telah terdeformasi namun masih terdapat energi tabrakan yang tersisa sehingga mekanisme *sliding* terus mundur dan menabrak IDS seperti diilustrasikan pada Gambar 16.



Gambar 16. Proses deformasi kereta dengan *crash zone area*

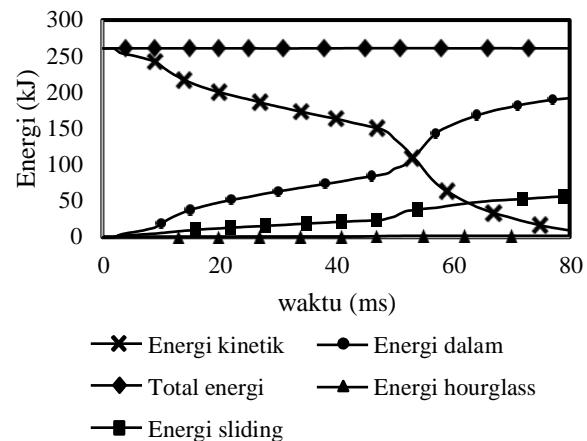
Rata-rata gaya kolaps struktur yang besar menyebabkan deformasi lebih pendek untuk jumlah energi yang diserap sama. Hal ini tergambar dari desain konvensional yang memiliki deformasi akhir lebih kecil dibandingkan desain *crash zone area*. Pada desain konvensional deformasi akhir bernilai 377 mm sedangkan pada desain *crash zone area* deformasi yang terjadi mencapai 567 mm. Deformasi yang besar menyababkan rendahnya gaya reaksi yang terjadi namun panjang deformasi harus dirancang agar tidak lebih dari 1000 mm pada skala sebenarnya agar tidak sampai pada daerah penumpang.

Parameter yang ditinjau selanjutnya adalah percepatan. Percepatan berhubungan dengan gaya inersia yang dirasakan oleh penumpang ketika tabrakan terjadi. Semakin besar perlambatan, gaya inersia semakin besar dan dapat membahayakan keselamatan penumpang [17]. Pada desain konvensional puncak perlambatan mencapai 45g yang kemudian berangssur turun hingga pada puncak kedua sebesar 32g saat ujung kiri kanan endbeam menabrak dinding dan pada saat yang sama *sidesill* gagal. Pada desain *crash zone area* puncak perlambatan awal turun 68% dibandingkan desain konvensional yaitu sebesar 15g lalu ketika modul penyerap impak bekerja perlambatan dapat dijaga disekitar 5g dan ketika modul penyerap impak selesai berdeformasi terdapat puncak perlambatan kembali sebesar 34g seperti diperlihatkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Perbandingan perlambatan

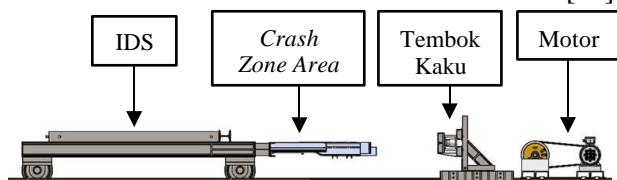
Validasi simulasi dilakukan dengan melihat kenaikan *hourglass energy*, umumnya *hourglass energy* berada dinilai tidak lebih dari 10% dari energi awal. Berdasarkan Gambar 18 *hourglass energy* simulasi maksimum sebesar 1,93 kJ atau 0.73% dari total energi sehingga simulasi dapat dikatakan valid.



Gambar 18. Grafik keseimbangan energi model dengan *crash zone area*

Persiapan Pengujian

Pada penelitian lanjutan rancangan *crash zone area* skala 1:2 akan diuji coba tabrak untuk membandingkan hasil slimulasi dan pengujian dilapangan. Struktur utama dipasangkan pada IDS kemudian IDS dikaitkan oleh sebuah sling yang menghubungkan IDS dan motor AC. ketika motor AC dinyalakan, sling tergulung dan IDS bergerak menumbuk dinding rigid seperti diilustrasikan pada Gambar 19. Pemilihan data akuisisi disesuaikan dengan nilai maksimal parameter tiap simulasi untuk memastikan semua data dapat terolah dengan baik [18].



Gambar 19. Ilustrasi skema pengujian

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian terkait *crash zone area* yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

Pemasangan *anticlimber* pada kereta konvensional dapat mencegah terjadinya modus tabrakan tumpang tindih dengan menghasilkan perpindahan vertikal roda kereta dari awalnya 84,1 mm menjadi 30,0 mm. Rancangan *crash zone area* memiliki kinerja kelaikan tabrak yang lebih baik dari desain konvensional dengan turunnya puncak gaya sebesar 24%, perlambatan berkurang 68% dan deformasi lebih panjang sebesar 49 %.

Pada penelitian lanjutan perlu dilakukan simulasi skala 1:1 pada *crash zone area* sehingga parameter gaya, perlambatan, dan panjang

deformasi dapat dibandingkan dengan standar BS EN 15227:2008.

Penghargaan

Penulis mengucapkan terimakasih atas terselenggaranya riset ini yang merupakan kerjasama antara ITB, 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-26/LPDP/2018.

Referensi

- [1] Informasi dari <https://www.bps.go.id/dynamictable/2019/01/08/815/jumlah-penumpang-kereta-api-2006-2018-ribu-orang>.
(diakses pada 25 September 2019)
- [2] Komisi Nasional Keselamatan Transportasi. 2016. Data Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian Tahun 2010-2016.
- [3] Informasi dari <http://madiuntoday.id/2018/04/07/proses-evakuasi-ka-sancaka/>
(diakses pada 25 September 2019)
- [4] Informasi dari <https://dunyanews.tv/en/Pakistan/499824-Rahim-Yar-Khan-Eight-killed-in-collision-between-two-trains>
(diakses pada 25 September 2019)
- [5] Peraturan Menteri Perhubungan. KM. 41 Tahun 2010. Standar Spesifikasi Teknis Kereta yang Ditarik Lokomotif.
- [6] Tyrell, D. and Gordon, J., 2013. Crash energy management : an overview of federal railroad administration research. TR News 4-10.
- [7] Dharma, I.G.S.S. et al., 2016. Perancangan dasar sistem keselamatan pasif kereta penumpang kelas 1. Prosiding SNTTM XV, 889-896.
- [8] Tyrell, D. et al., 2006. A train-to-train impact test of crash energy management passenger rail equipment: structural results. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006-13597.
- [9] Kim, J. S. et al., 2012. Full -scale crash testing facilities for a railway vehicle. Proceedings of Joint Rail Conference, JRC2012-74009.
- [10] Baykasoglu, B. et al., 2012. Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. International iron & steel symposium, 579-586.
- [11] BS EN 15227. 2008. Railway application in crashworthiness requirements for railway vehicle bodies.
- [12] Setiawan, R and Pratiknyo, Y. B., 2017. Preliminary investigation on combined expansion tube-axial splitting type impact energy absorber. Prosiding seminar nasional energi dan industri manufaktur – Siger 2017, I-14-19.
- [13] INKA. 2015. Spesifikasi teknis kereta penumpang kelas eksekutif.
- [14] Kirkpatrick, S. W. et al., 2011. Evaluation of passenger rail vehicle crashworthiness. International journal of crashworthiness, Vol. 6, No. 1, 95-106.
- [15] Setiawan, R. et al., 2018. Characteristics of three structural steels at high strain rate. International conference on key engineering materials, Vol 775, 547-553.
- [16] Bala, S. and Day, J., 2006. General guidelines for crash analysis in LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation (LSTC).
- [17] Severson, K. et al., 2004. Two-car impact test of crash energy management passenger rail cars : analysis occupant protection measurements. International Mechanical Engineering Congress & Exposition. IMECE2004-61249.
- [18] Kariem, M. A. et al., 2017. On the development of horizontal impact test system (HITS) estimation of impact loads and deceleration. international symposium on plasticity and impact mechanic, Vol 172, 1479-1486.