

Analisis Crashworthiness Struktur Kereta Penumpang Indonesia

Rachman Setiawan^{1,*} dan Michael Pamintori¹

¹KK Perancangan Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung - Bandung

*Korespondensi: rachmans@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak. Kereta api, sebagai sarana transportasi masal, sudah seharusnya memberikan perlindungan terhadap penumpang di tengah potensi kecelakaan kereta api di Indonesia yang tergolong tinggi. Beberapa upaya untuk mengurangi resiko dari suatu kecelakaan kereta api adalah dengan penerapan sistem keselamatan aktif untuk mencegah terjadinya kecelakaan. Dengan kondisi rel kereta api di Indonesia, yang pada umumnya, didominasi oleh jalur tunggal, kemungkinan terjadinya kecelakaan dipandang masih cukup tinggi. Oleh karena itu, sistem kereta api di Indonesia dipandang perlu menerapkan sistem keselamatan pasif berdasarkan teknologi *crashworthiness*, yaitu kemampuan struktur dalam melindungi penumpang selama tabrakan. Dalam penelitian ini, analisis *crashworthiness* pada struktur kereta penumpang K1 buatan PT INKA dilakukan. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga ANSYS-LS DYNA yang memiliki kapabilitas plastisitas dinamik menggunakan pendekatan eksplisit. Simulasi dilakukan dengan studi kasus tabrakan kereta dengan dinding kaku. Simulasi ini bertujuan untuk memperoleh karakteristik *crashworthiness* maksimum kereta. Dari hasil simulasi tabrakan kereta terhadap dinding kaku, karakteristik maksimum *crashworthiness* dari struktur kereta dapat diperkirakan, antara lain dalam bentuk penyerapan energi impak maksimum (1,9 MJ), gaya kolaps maksimum (3,39 MN) yang diperoleh dari kolaps *center sill*, perpindahan vertikal pada *wheelset* hingga 122 mm dan perlambatan maksimum sebesar 8,8 g. Data-data hasil simulasi di atas dapat digunakan sebagai acuan dalam perancangan komponen *crash energy management*, seperti modul penyerap impak, *anti-climber* dll.

Kata kunci: kereta penumpang K1, *crashworthiness*, plastisitas dinamik

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Peristiwa tabrakan antara KA 220 Pantas Merak dan KA 225 (*head to head collision*) di daerah Pondokbetung, Bintaro, pada tanggal 19 Oktober 1987 merupakan salah satu peristiwa kelam dalam sejarah perkeretaapian di Indonesia. Tabrakan yang disebabkan oleh kesalahan masinis itu, mengakibatkan 156 penumpang meninggal dunia dan ratusan penumpang lainnya mengalami luka-luka [1]. Selain kasus tragis di atas, beberapa kecelakaan KA masih terjadi di Indonesia hingga kini. Berdasarkan data dari Direktorat Jendral Perkeretaapian, dari Tahun 2009 sampai dengan 2015 telah terjadi 395 kasus kecelakaan kereta api di beberapa daerah operasi. Sedangkan pada Tahun 2016 telah terjadi 3 kasus tumbuhan antar kereta api dan 3 kejadian anjlok/terguling yang menyebabkan 50 korban luka-luka dari keseluruhan kejadian [2]. Tidak hanya terjadi di Indonesia, kecelakaan kereta api juga kerap terjadi pada perkeretaapian di luar negeri. Sebagai contoh, pada tanggal 9 Februari 2016, telah terjadi *head to head collision* di daerah Bavaria, Jerman (Gambar 1). Tabrakan terjadi ketika satu kereta masih berjalan pada kecepatan 100 km/jam, dan dari arah berlawanan kereta lainnya berjalan pada kecepatan 50 km/jam. Kecelakaan ini merupakan kecelakaan kereta api

terparah di negara Jerman dalam 4 tahun terakhir, mengakibatkan 11 orang meninggal dunia dan sekitar 100 orang mengalami luka-luka [3].



Gambar 1. Tabrakan antar kereta di Jerman [3]

Risiko kecelakaan kereta api dapat dikendalikan, dengan dua cara, yaitu: mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan dan menurunkan konsekuensi kecelakaan jika tidak dapat dihindarkan. Cara pertama, antara lain dapat dilakukan dengan menerapkan sistem keselamatan aktif, seperti *Automatic Train Protection* (ATP) yang secara otomatis dapat mengurangi kecepatan dan bahkan menghentikan kereta api jika risiko kecelakaan telah muncul.

Selain itu, pendekatan kedua, yaitu pendekatan pasif, diharapkan mampu meminimalkan konsekuensi kecelakaan apabila tabrakan tidak dapat dihindari, dalam bentuk *crashworthiness*, yaitu kemampuan struktur dalam melindungi penumpang selama tabrakan [4]. Kasus tabrakan kereta di Jerman, sebagaimana disebutkan di atas menjadi contoh bahwa meskipun usaha pencegahan telah dilakukan dengan standar yang tinggi di Jerman, kejadian tabrakan masih saja mungkin terjadi. Dengan tabrakan kereta frontal pada kecepatan impak relatif mendekati 150 km/jam, jumlah korban jiwa tidak sebanyak yang dikhawatirkan. Hal ini dikarenakan kedua kereta tersebut telah menerapkan standar *crashworthiness* terkini [3]. Dengan kecepatan impak tinggi di atas, tanpa penerapan teknologi *crashworthiness*, diperkirakan konsekuensi akan jauh lebih tinggi.

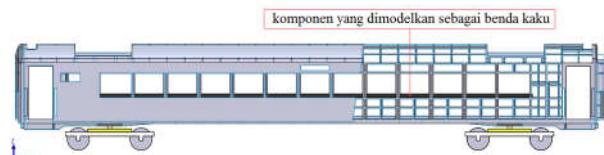
Dalam upaya penerapan penerapan teknologi *crashworthiness* ini di kereta api, diperlukan analisis *crashworthiness* pada struktur kereta penumpang K1, yang selanjutnya akan dijadikan tolak ukur pembanding (*baseline*) dari berbagai usaha penerapan teknologi *crashworthiness* di masa depan. Dari hasil makalah ini diharapkan juga disusun alternatif strategi untuk peningkatan performa *crashworthiness* untuk rancangan kereta di masa depan. Penerapan teknologi *crashworthiness* dapat mengacu, misalnya pada Tyrell [5] dan Schole [6]. Usaha awal sejenis telah dimulai Setiawan untuk kereta penumpang dengan menggunakan model yang lebih sederhana [7], dan lokomotif diesel-hidrolik [8].

Metode Penelitian

Analisis *crashworthiness* ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga algoritma eksplisit. Pemodelan elemen hingga dari struktur kereta penumpang dilakukan secara bertahap berdasarkan model solid yang disederhanakan menjadi model shell untuk mempercepat proses komputasi tanpa mengurangi akurasi secara signifikan. Di samping itu penyederhanaan juga dilakukan dengan memodelkan beberapa komponen yang tidak mempengaruhikekakuan struktur menjadi massa solid yang terdistribusi di dalam kereta, sedemikian sehingga massa total dan pusat massa mencerminkan kondisi kereta sebenarnya.

Analisis dilakukan dengan menyimulasikan kasus tabrakan antara kereta dengan dinding kaku pada kecepatan impak 36 km/jam. Kasus tabrakan ekstrim dapat menggambarkan tingkat kemampuan maksimum struktur kereta terhadap tabrakan, dan dalam berbagai analisis literatur selalu menjadi standar perbandingan antar berbagai rancangan struktur.

Model solid kereta penumpang K1 diperoleh dari PT INKA [9]. Model struktur terdiri dari struktur rangka bawah (*underframe*), bogie, rangka samping (*sidewall*), rangka atap, rangka ujung (*endwall*), kulit kereta dan massa solid yang merepresentasikan massa selain struktur yang telah dimodelkan. Penyederhanaan model meliputi pembuatan model *shell* berdasarkan model solid kereta dan penghilangan detil geometri yang tidak mempengaruhi hasil secara signifikan. Tipe elemen *quadrilateral* digunakan untuk seluruh bagian terdeformasi, karena dipandang mampu memodelkan perilaku tekuk lebih baik dan tingkat akurasi hasilnya lebih tinggi bila dibandingkan dengan elemen *triangular*. Simulasi mengasumsikan beberapa komponen, seperti lintasan, *pivot*, dan *bogie* sebagai komponen yang tidak dapat berdeformasi, atau benda kaku; Sambungan antar komponen terhubung secara kuat, tanpa adanya kegagalan pada sambungan. Komponen pelengkap seperti AC, kursi, meja, toilet, dll. dimodelkan sebagai komponen balok sederhana sedemikian sehingga massa dan pusat massa mencerminkan kereta yang sesuai dengan kenyataannya. Gambar 2 menunjukkan hasil pemodelan geometri dengan beberapa penyederhanaan tersebut di atas.



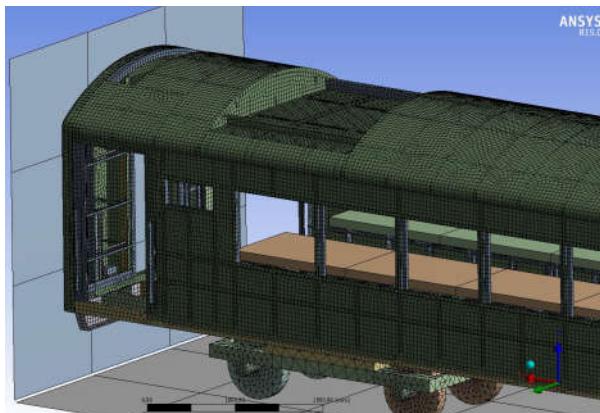
Gambar 2. Model geometri kereta penumpang yang sudah disederhanakan

Sebagaimana diketahui dari dokumen rancangan, material yang digunakan untuk struktur kereta adalah SS 400 (sebanding dengan ASTM A36), dengan data sifat material sebagaimana pada Tabel 1. Dalam perangkat lunak, sifat plastisitas material dimodelkan dengan *Piecewise linear plasticity*, dengan sifat laju regangan tinggi dimodelkan menggunakan model Cowper-Symond, memakai faktor *C* dan *P*, berturut-turut 40 dan 5. Pada proses *meshing*, ukuran elemen untuk seluruh elemen *shell* dipilih pada ukuran rata-rata 50 mm, sehingga menghasilkan sejumlah 191.660 elemen. Dengan pemilihan tipe elemen yang cukup beraturan dan pemilihan *time step* sesuai anjuran dalam perangkat lunak, diharapkan hasil yang diperoleh mencapai konvergensi [10]. Permasalahan yang timbul dalam simulasi kasus seperti ini adalah koneksi antar elemen yang berasal dari asal geometri 2 dimensi yang berbeda. Seringkali, secara visual terlihat telah menyatu, namun sejatinya secara elemen hingga hasil *meshing* menghasilkan celah antara keduanya. Hal ini menyebabkan diskontinuitas dan singular-

ritas dalam bentuk tengangan dan deformasi yang berlebihan. Dari beberapa kali simulasi dan perbaikan model, diperoleh model elemen hingga dengan konektivitas penuh. Gambar 3 menunjukkan hasil akhir proses *meshing* yang digunakan dalam simulasi.

Tabel 1. Sifat Material baja SS400 [9]

| Kuantitas fisik | SS 400 | Satuan |
|-----------------------|--------|-------------------|
| Densitas | 7850 | kg/m ³ |
| Rasio Poisson | 0,3 | - |
| Modulus elastisitas | 200 | GPa |
| Kekuatan luluh | 245 | MPa |
| Kekuatan tarik | 480 | MPa |
| Modulus tangensial | 1000 | MPa |
| Elongasi sampai gagal | 23% | - |



Gambar 3. Model elemen hingga kereta penumpang hasil *meshing*

Hasil dan Pembahasan

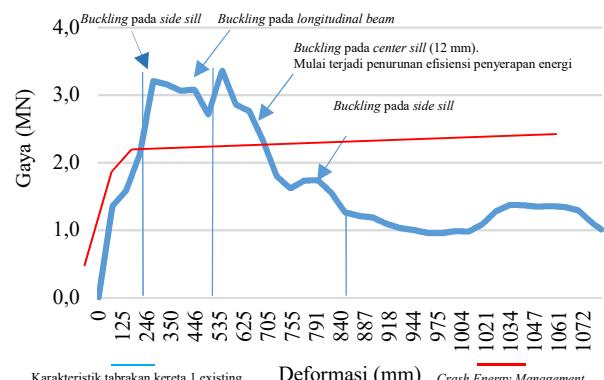
Pembahasan hasil dilakukan dengan memperhatikan aspek-aspek: tahapan deformasi hingga bentuk deformasi akhir, respon gaya terhadap deformasi, perlambatan dan penyerapan energi.

Dari hasil simulasi gambar 4 menunjukkan sejarah deformasi bagian depan kereta penumpang sebagai respon tabrakan dari struktur kereta penumpang terhadap dinding kaku. Bagian kulit badan kereta dan *solid body* yang mewakili komponen pelengkap sengaja tidak diperlihatkan agar memberikan visualisasi yang lebih baik terhadap respon dari rangka kereta sebagai struktur yang menerima beban (*load-bearing structure*). Kolaps struktur utama, yaitu *center sill* (balok longitudinal dari rangka bawah di sumbu kereta) terlihat mulai pada $t = 90$ ms. Secara keseluruhan, proses tabrakan terjadi selama 259 ms hingga energi impak terserap.

Hingga akhir proses tabrakan, deformasi longitudinal maksimal tercatat sebesar 1074 mm dengan bentuk akhir sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 5. Deformasi terlihat utamanya pada area

bordes, namun pada akhir deformasi area penumpang telah menampakkan deformasi yang signifikan. Juga terlihat, wheelset 1 dan 2 mulai terangkat, yang mengindikasikan adanya potensi roda kereta terlepas dari lintasannya (*derailment*). Sementara itu, kolaps akhir pada *center sill* terlihat pada gambar 5b.

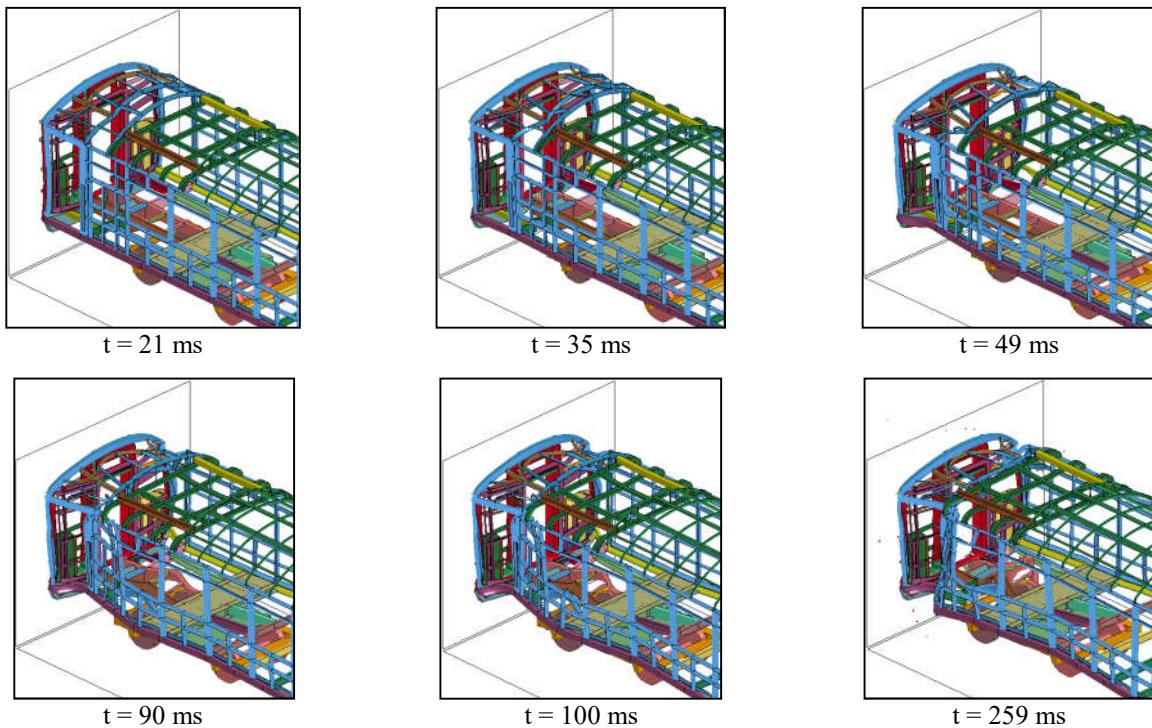
Jika dilihat dari respon gaya terhadap deformasi, sebagaimana dalam gambar 6, gaya tertinggi dalam kasus tabrakan dengan dinding kaku adalah 3,39 MN, yang disebabkan oleh deformasi pada daerah *longitudinal beam (center sill)* dan *side sill*, sebagai struktur dengan kekakuan dan kekuatan yang tertinggi. Gaya puncak tersebut dapat dijadikan batas atas nilai gaya untuk perancangan sistem penyerapan energi impak. Setelah mencapai gaya puncak, struktur akan kolaps dan gaya akan turun secara signifikan. Dari aspek *crash energy management* (CEM), respon seperti ini dipandang kurang efektif, karena dalam rentang deformasi yang dibolehkan, gaya cukup bervariasi dan turun drastis, sehingga energi yang dapat diserap tidak maksimal, sebagaimana dapat dibandingkan dengan kurva ideal CEM dalam gambar 6 itu juga.



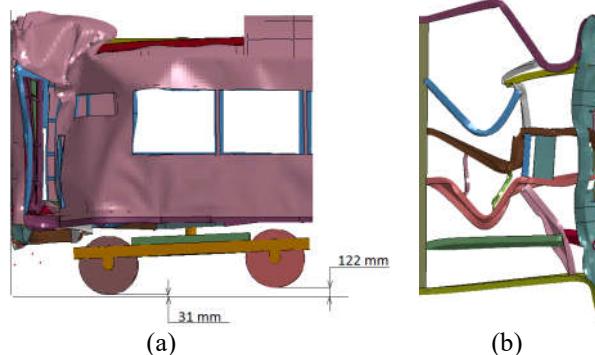
Gambar 4. Respon gaya terhadap deformasi struktur kereta pada kasus tabrakan dengan dinding kaku

Dengan respon gaya tersebut, berdasarkan simulasi, diperoleh hasil perlambatan di berbagai posisi untuk berbagai arah. Sejalan dengan kurva respon gaya maupun tahapan deformasi, perlambatan tertinggi terjadi pada periode 0 – 30 ms, yang dapat mencapai 8,8 g di daerah penumpang.

Dalam kurun waktu proses terjadinya impak, struktur kereta mampu menyerap maksimum sebesar 1,9 MJ, atau 87% dari energi kinetik awal sebesar 2,15 MJ. Pada waktu lebih dari 259 ms setelah impak, kurva energi internal bersifat tunak yang berarti bahwa struktur tidak lagi menyerap energi secara efektif. Sisa energi impak yang tidak terserap dapat mengejawantah dalam energi kinetik perpindahan kereta, baik secara vertikal maupun longitudinal ke belakang.



Gambar 5. Respon struktur kereta pada kasus tabrakan antara kereta dan dinding kaku



Gambar 6. Tampak samping (a) dan Tampak atas (b) dari bagian depan kereta setelah deformasi akhir

Rangkuman

Hasil simulasi tabrakan kereta terhadap dinding kaku pada kecepatan impak 36 km/jam terangkum di dalam tabel 2. Untuk kasus-kasus simulasi yang lebih realistik, Standar BS EN 15227:2008 [11], salah satunya, memberikan kriteria keterimaan sebagaimana pada tabel 3.

Kasus simulasi meliputi kasus tabrakan kereta dengan kereta lain yang identik, baik tanpa maupun dengan *vertical offset* sebesar 40 mm pada *wheelset*-nya. Hal ini menjadi rencana aktivitas riset selanjutnya.

Tabel 2. Rangkuman hasil simulasi untuk kasus tabrakan kereta v.s. dinding kaku

| No. | Aspek yang ditinjau | Nilai |
|-----|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Energi yang diserap oleh struktur | 1,9 MJ (87% dari energi kinetik) |

| | | |
|---|---|---------|
| 2 | Gaya impak puncak | 3,39 MN |
| 3 | Deformasi longitudinal | 1074 mm |
| 4 | Pengurangan panjang struktur pada daerah penumpang | 38 mm |
| 5 | Perpindahan <i>wheelset</i> (max) | 122 mm |
| 6 | Perlambatan rata-rata arah longitudinal di daerah penumpang | 8,8 g |

Tabel 3. Kriteria keterimaan untuk kasus tabrakan antar kereta sejenis menurut BS EN 15227:2008

| Kereta Penumpang K1 (Kategori kereta : C1) | | |
|--|--|-----------------------------------|
| 1. | Pengurangan panjang maksimum pada daerah penumpang | 156 mm atau regangan maksimum 10% |
| 2. | Perlambatan maksimum | 5g |

| | |
|--------------------------------|------------------|
| 3. Perpindahan <i>wheelset</i> | 22,5 mm maksimum |
|--------------------------------|------------------|

Kesimpulan

Dari hasil simulasi tabrakan kereta terhadap dinding kaku, karakteristik maksimum *crashworthiness* dari struktur kereta dapat diperkirakan, antara lain dalam bentuk penyerapan energi impak maksimum (1,9 MJ), gaya kolaps maksimum (3,39 MN) yang diperoleh dari kolaps *center sill*, perpindahan vertikal pada *wheelset* hingga 122 mm dan perlambatan maksimum sebesar 8,8 g.

Data-data hasil simulasi di atas dapat digunakan sebagai acuan dalam perancangan komponen *crash energy management*, seperti modul penyerap impak, *anti-climber* dll. Evaluasi *crashworthiness* untuk struktur kereta juga perlu dilakukan berdasarkan kasus-kasus simulasi tabrakan sebagaimana diatur, salah satunya dalam Standar BS EN 15227:2008, berikut kriteria keterimaannya.

Daftar Pustaka

- [1] “Mengenang-Kecelakaan-KRL-Bintaro-26-Tahun-Lalu”, [online] <https://foto.tempo.co/read/beritafoto/12043/Mengenang-Kecelakaan-KRL-Bintaro-26-Tahun-Lalu/1>. [Diakses 15 Desember 2016].
- [2] “Data kecelakaan kereta api Indonesia,” Komite Nasional Keselamatan Transportasi, 2016
- [3] “Human error caused bad aibling collision”, [online] <http://www.railwaygazette.com/news/passenger/single-view/view/human-error-caused-bad-aibling-collision.html>, 12 Februari 2016
- [4] Johnson, W. and Mamalis, A. G., “Crash worthiness of Vehicles”, MEP, London, 1978
- [5] Tyrell, D.C., *et al*, „Train crashworthiness design for occupant survivability“. 1995, ASME APPLIED MECHANICS DIVISION PUBLICATIONS-AMD
- [6] Setiawan, R., S Fajrianto, “Perancangan modul penyerap impak internal inversion untuk kereta penumpang kelas I”, Proc. SMART seminar, 27 April 2006, UGM, Yogyakarta
- [7] Scholes, A., “Passenger Vehicle Design Loads and Structural Crashworthiness”, C284/85, British Railways Board, Railway Technical Centre, Derby, 1985
- [8] Setiawan, R., AH Suryono, AP Putra, DY Sari, “Perancangan Awal Aspek Crashworthiness pada Lokomotif”, Pros. “Seminar Nasional

Tahunan Teknik Mesin” (SNTTM) X, Malang, 3-4 November 2011

- [9] [Komunikasi pribadi], PT INKA, Juli 2016
- [10] “Time step size”, LS-DYNA Support, [Online] <http://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/time-step-size>. [Diakses 12 2016]
- [11] “BS EN 15227 - Railway Applications, in Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies,” European Committee For Standardization, 2008.