

Analisis Kekuatan Struktur Under Frame Kereta Akibat Tabrakan

Bagus Budiwantoro^{1,*}, IGN Wiratmaja Puja¹, Muhammad Agus Kariem¹
dan Henry Rihard Pasaribu¹

¹Fakultas Teknologi Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

a budiwan@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak

Struktur kereta harus dirancang agar dapat mengurangi resiko fatal yang dialami penumpang akibat tabrakan. Salah satu teknologi yang berkembang adalah *Structural Crashworthiness*, yang didefinisikan sebagai kemampuan suatu struktur dalam melindungi keselamatan kargo/penumpang ketika terjadi tabrakan. Salah satu yang harus diperhitungkan dalam mengurangi resiko penumpang akibat tabrakan adalah kekuatan struktur utama. Hal ini dilakukan karena struktur utama ini tidak boleh mengalami deformasi plastis yang berlebihan yang secara langsung dapat membahayakan keselamatan penumpang.

Makalah ini menganalisis kekuatan *underframe* struktur kereta dengan menggunakan metode elemen hingga. Pemodelan dilakukan dengan bantuan program MSC/Nastran ver. 2. Model dibuat dengan 506 nodal, 963 elemen beam, dan 4 buah elemen pegas. Studi kasus dilakukan untuk kereta yang menabrak dinding kaku dengan kecepatan tabrakan 40 km/jam. Hasil analisis menunjukkan bahwa *underframe* struktur utama kereta mengalami kegagalan di daerah kabin penumpang. Hasil ini juga identik dengan bentuk kegagalan pada kereta yang telah mengalami tabrakan di Indonesia.

Kata kunci: *Multi-body dynamics*, Kereta, Tabrakan, Penyerap Energi, Struktur Kereta.

Pendahuluan

Segala resiko yang mengancam keselamatan penumpang kereta api harus semaksimal mungkin dihindarkan. Untuk mengurangi resiko fatal yang dialami penumpang akibat tabrakan perlu dirancang suatu jenis struktur yang dapat melindungi penumpang bila terjadinya tabrakan. Struktur ini dirancang sedemikian rupa sehingga mampu menyerap energi impak yang terjadi pada saat tabrakan terjadi dan tidak diteruskan ke ruang penumpang.

Salah satu teknologi yang berkembang untuk menjawab tuntutan tersebut adalah *Structural Crashworthiness*, termasuk di dalamnya adalah pemasangan modul penyerap energi [1], yang didefinisikan sebagai kemampuan suatu struktur dalam melindungi keselamatan kargo/penumpang (dalam kasus ini) ketika terjadi tumbukan (impak) [2-4].

Salah satu yang harus diperhitungkan dalam mengurangi resiko penumpang

akibat tabrakan adalah kekuatan struktur utama dimana penumpang berada. Hal ini dilakukan karena struktur utama ini tidak boleh mengalami deformasi plastis yang berlebihan yang secara langsung dapat membahayakan keselamatan penumpang. Posisi akhir kereta seperti *overrideing*, *derailment*, dan *rollover* setelah mengalami tabrakan juga perlu diperhitungkan dengan baik.

Dari uraian diatas dapat dikatakan bahwa besarnya gaya tabrakan, bentuk deformasi kereta, dan posisi kereta setelah terjadinya tabrakan perlu diperhitungkan dengan baik. Hasil perhitungan ini kemudian akan digunakan untuk merancang konstruksi modul penyerap energi [1] dan konstruksi kereta agar dapat melindungi penumpang pada saat terjadinya tabrakan. Gaya tabrakan dan posisi akhir kereta setelah terjadinya tabrakan dapat diperoleh dengan mengembangkan model matematik

multibody dynamics rangkaian kereta, dimana model matematik dan programnya telah dikembangkan oleh tim penulis dan dapat dilihat pada ref. [5-6]. Hasil dari simulasi model yang telah dikembangkan akan digunakan untuk menghitung kekuatan struktur kereta. Hasil analisis kekuatan *underframe* kereta dapat dijadikan acuan dalam melakukan perancangan atau modifikasi struktur kereta yang diinginkan.

Makalah ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan *underframe* struktur kereta akibat tabrakan dan membandingkan dengan bentuk kereta akibat tabrakan yang pernah terjadi di Indonesia, yang akan bermanfaat dalam merancang struktur kereta yang baru atau memodifikasi struktur yang ada.

Gaya tabrakan diperoleh dari analisis model *multibody dynamics* tabrakan kereta yang telah dikembangkan pada ref. [7]. Rangkaian kereta dapat dibuat untuk 8 buah kereta dalam satu rangkaian. Studi kasus perhitungan gaya-gaya tabrakan dan posisi masing-masing komponen kereta dilakukan untuk kasus tabrakan kereta identik pada jalan lurus dengan kecepatan kereta pada saat terjadinya tabrakan adalah 40 km/jam.

Fenomena Tabrakan/Impak

Tabrakan frontal antara benda bermassa m_1 berkecepatan v_1 dengan benda bermassa m_2 berkecepatan v_2 , dan kedua massa m_1, m_2 diasumsikan mempunyai kecepatan akhir u , maka energi impak yang timbul dari kasus di atas merupakan selisih energi kinetik awal dengan energi kinetik akhir:

$$EI = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 + v_2)^2 \quad (1)$$

Secara ideal, persamaan penyerapan energi impak oleh deformasi struktur dapat dituliskan seperti Pers. 2.

$$EI = \int_0^{\delta_{max}} F \cdot d\delta = F_{mean} \delta_{max} \quad (2)$$

Distribusi Energi Impak pada Rangkaian Kereta yang Bertabrakan

Jika sebuah kereta bermassa m_1 bergerak dengan kecepatan v menabrak dinding kaku, maka energi yang harus diserap ujung depan kereta adalah seperti pada Pers. 3 [8].

$$Ed_1 = \frac{1}{2} m_1 v^2 \quad (3)$$

Antara satu kereta dengan kereta lainnya dihubungkan dengan komponen elastis. Saat terjadinya tabrakan, hanya satu kereta paling depan yang terkena impak, sementara kereta lainnya belum terkena impak. Kereta-kereta lainnya akan terlibat dalam tumbukan setelah beberapa periode waktu tertentu, tergantung pada karakteristik dari ujung-ujung kereta.

Dalam analisis, diasumsikan bahwa energi deformasi tambahan yang diakibatkan oleh kereta ke- n , ditambahkan secara merata ke energi deformasi dari setiap ujung-ujung kereta yang dihitung jika rangkaian diasumsikan terdiri dari $n-1$ kereta.

Kasus tabrakan rangkaian kereta yang berjumlah n kereta. Jika masing-masing kereta bermassa m_1, m_2, m_3 , sampai dengan m_n , maka energi yang diterima **ujung depan kereta 1** adalah [8]:

$$Ed_1 + \frac{Ed_2 - Ed_1}{2} + \frac{Ed_3 - Ed_2}{3} + \dots + \frac{Ed_n - Ed_{n-1}}{n} \quad (4)$$

atau sebesar:

$$\frac{1}{2} \left(m_1 + \frac{m_2}{2} + \frac{m_3}{3} + \dots + \frac{m_n}{n} \right) v^2 \quad (5)$$

Sedangkan energi yang diterima sambungan kereta 1 dan kereta 2, sebesar [8]:

$$\frac{Ed_2 - Ed_1}{2} + \frac{Ed_3 - Ed_2}{3} + \dots + \frac{Ed_n - Ed_{n-1}}{n} \quad (6)$$

atau

$$\frac{1}{2} \left(\frac{m_2}{2} + \frac{m_3}{3} + \dots + \frac{m_n}{n} \right) v^2 \quad (7)$$

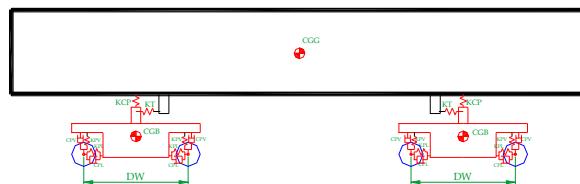
Demikian juga seterusnya untuk energi di sambungan-sambungan lainnya.

Gaya Akibat Tabrakan Kereta Pada Kecepatan Tabrakan 40 km/Jam.

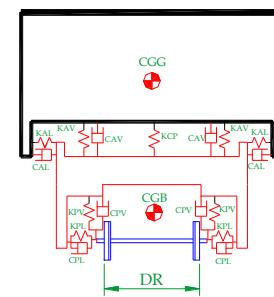
Sebelum menganalisis kekuatan *underframe* struktur kereta akibat tabrakan, kita terlebih dahulu harus menghitung gaya yang terjadi akibat tabrakan kereta tersebut. Gaya yang terjadi akibat tabrakan diperoleh dari perhitungan simulasi *multibody dynamics* tabrakan yang model matematik dan programnya telah dikembangkan oleh tim penulis, yang detailnya dapat dilihat pada ref. [7].

Dalam simulasi ini rangkaian kereta yang digunakan adalah rangkaian dengan delapan buah gerbong pada satu rangkaian kereta. Struktur kereta telah dilengkapi dengan modul penyerap energi dan *crash zone* area. Simulasi tabrakan dilakukan pada kecepatan 40 km/jam.

Simulasi *multibody dynamics* tabrakan kereta akan menghasilkan grafik fungsi waktu terhadap perlambatan, gaya, sudut *pitching*, perpindahan, energi yang diserap dan energi yang diserap fungsi deformasi dari setiap kereta, mulai dari kereta 1 sampai dengan kereta 8. Contoh pemodelan multibody dynamics dari suatu kereta ditunjukkan oleh Gambar 2 (tampak samping) dan Gambar 2 (tampak depan). Grafik-grafik tersebut bermanfaat untuk digunakan dalam menganalisis berbagai hal yang berhubungan dengan kekuatan kereta, *lay out* tempat duduk masinis maupun penumpang dan keselamatan penumpang jika terjadi tabrakan.

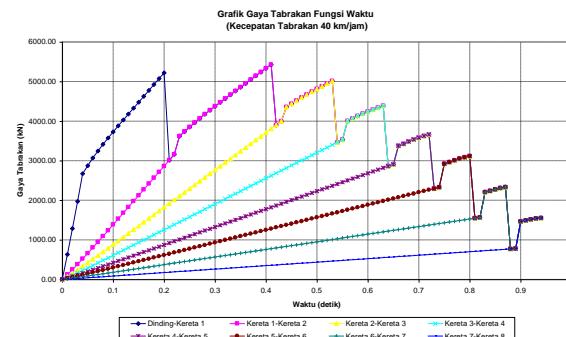


Gambar 1. Contoh pemodel *multibody dynamics* satu buah kereta (tampak samping) [7].



Gambar 2. Contoh pemodel *multibody dynamics* satu buah kereta (tampak depan) [7].

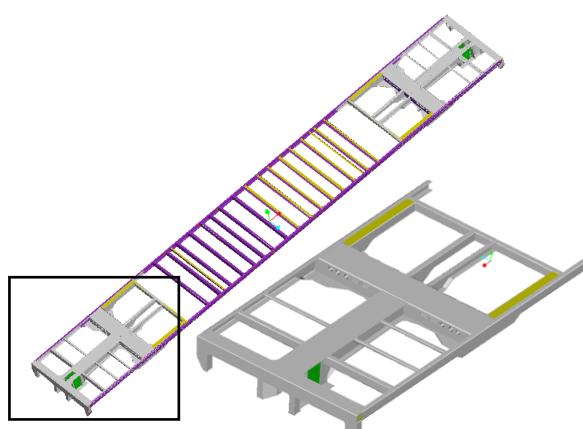
Gambar 3 adalah grafik gaya yang terjadi akibat tabrakan kereta yang menabrak dinding kaku pada kecepatan 40 km/jam di kereta 1, kereta 2 dan seterusnya sampai kereta 8. Dari grafik dan data digital ditunjukkan bahwa besarnya gaya tabrakan maksimum yang terjadi bila kereta mengalami tabrakan dengan dinding kaku dengan kecepatan 40 km/jam adalah 5.520,7 kN.



Gambar 3. Grafik gaya tabrakan fungsi waktu pada kecepatan 40 km/jam [7].

Konstruksi *Underframe*

Konstruksi *underframe* dari kereta dirancang dengan menggunakan baja profil dari bahan *stainless steel* yang dirol dingin. Pada pemodelan elemen hingga, profil penampang dimasukkan sebagai input untuk tiap elemen beam. Gambar 4 menampilkan *underframe* kereta yang akan dianalisa.



Gambar 4. Pandangan isometri underframe kereta.

Model Elemen Hingga Underframe Kereta

Dengan menggunakan data-data dimensi *underframe*, jenis material, dan kekakuan pegas dari kondisi fisik *underframe* dikembangkan model elemen hingga dari *underframe*. Pemodelan *underframe* dilakukan dengan menggunakan program paket analisis kekuatan struktur berbasis elemen hingga yaitu MSC/Nastran ver. 2. Model dibuat dengan 506 nodal, 963 elemen beam, dan 4 buah elemen pegas.

Properti Pegas Udara. Bogie kereta adalah bagian yang menumpu sebuah *underframe*. Salah satu komponen bogie yang penting untuk dimasukkan propertinya dalam simulasi adalah pegas udara. Dari data-data fisik pada Ref. [5], diperoleh kekakuan pegas udara dalam arah vertikal = 30.000 kN/m dan kekakuan pegas udara dalam arah lateral = 12.000 kN/m. Pegas udara ini dimodelkan dengan elemen pegas (*spring*) dengan memasukkan angka konstanta pegas udara sebagai propertinya.

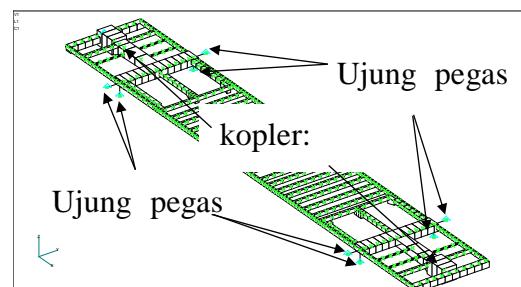
Properti material *underframe*. Material yang digunakan untuk membuat *underframe* kereta adalah material *stainless steel* SUS301M dengan sifat-sifat ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Properti material underframe [7]

Properti Material	Nilai
Modulus Elastisitas (E)	200 GPa

Modulus Geser (G)	75,8 GPa
Rasio Poisson, ν	0,32
Rapat Massa (ρ)	7.862 kg/m ³
Kekuatan yield, S_Y	685 MPa
SUS301M HT	
Kekuatan yield, S_Y	215 MPa
SUS301M LT	

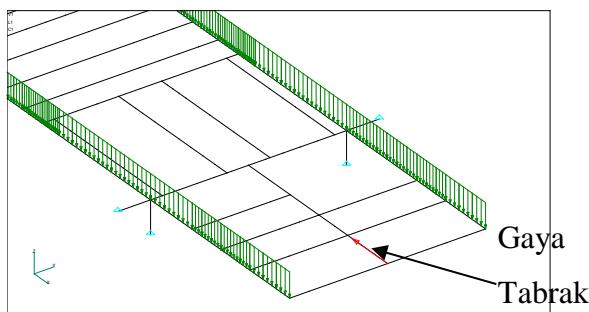
Kondisi Batas. Kondisi batas adalah 8 tumpuan jepit pada kedalaman titik tumpuan pegas udara dan satu buah tumpuan yang tidak membebaskan derajat kebebasan arah longitudinal yang merepresentasikan kopler.



Gambar 5. Kondisi batas pemodelan.

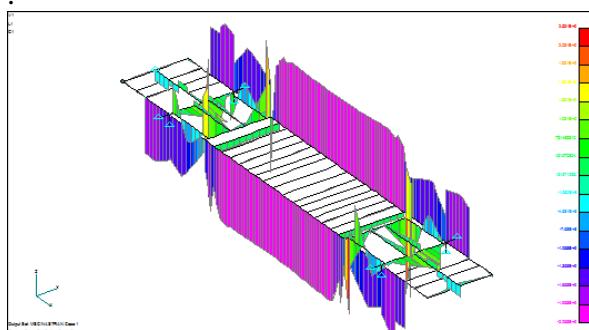
Kasus Tabrakan Kereta dengan Kecepatan 40 km/jam

Gaya sebesar 5.520,7 kN, hasil dari grafik pada Gambar 3 diberikan sebagai input pada model elemen hingga tepatnya pada titik tangkap kopler. Selain itu, beban statis seperti berat *underframe*, berat kabin, berat total penumpang dan berat barang yg dibawa penumpang juga diperhitungkan pada kasus ini. Dari data yang disajikan pada Ref. [5] diperoleh berat kabin penumpang ditambah berat penumpang dan barang pada kereta rata-rata adalah 306,8 kN. Beban berat ini didistribusikan secara merata disepanjang sideframe (beam C). Jadi beban seluruhnya yang diterima oleh *underframe* kereta adalah beban statis ditambah dengan gaya tabrakan pada titik tangkap kopler. Model Elemen Hingga kondisi pembebanan diperlihatkan pada Gambar 6.

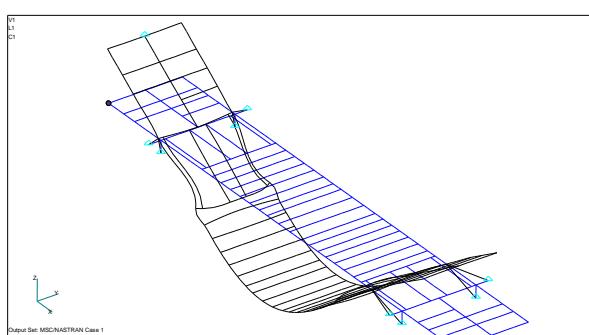


Gambar 6. Pembebanan statis pada pemodelan [7].

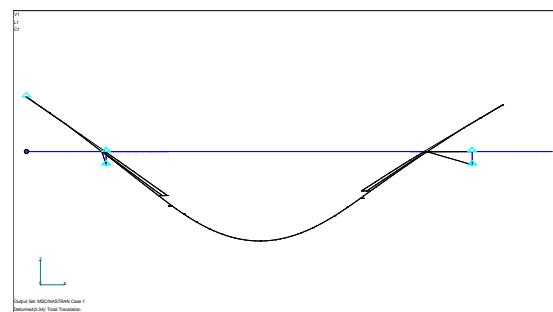
Gambar 7 menunjukkan grafik distribusi tegangan tegangan normal maksimum pada *under frame* kereta untuk kasus tabrakan dengan kecepatan 40 km/jam, sedangkan Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan diagram isometrik dan tampak samping defleksi *underframe* untuk kasus yang sama.



Gambar 7. Diagram tegangan normal maksimum pada *underframe* [7].

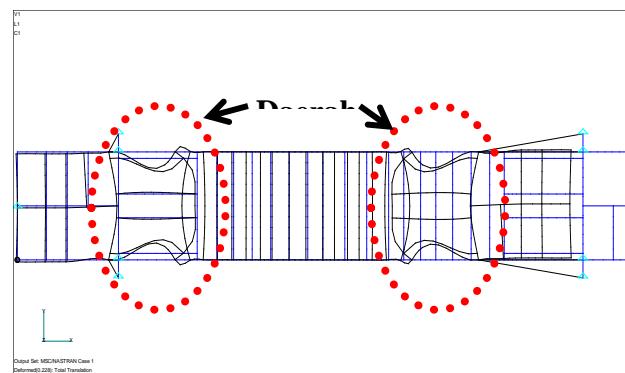


Gambar 8. Defleksi *underframe* (pembesaran) akibat gaya tabrakan 40 km/jam (tampak isometrik) [7].



Gambar 9. Defleksi *underframe* akibat gaya tabrakan 40 km/jam (tampak samping) [7].

Gambar 10 menunjukkan daerah kolaps, diagram tampak atas defleksi *underframe* untuk kasus tabrakan dengan kecepatan 40 km/jam. Dapat dilihat bahwa daerah kolaps berada di daerah kabin penumpang.



Gambar 10. Defleksi *underframe* akibat gaya tabrakan 40 km/jam (tampak atas) [7].

Perbandingan terhadap Kondisi Aktual Keadaan Kereta Setelah Tabrakan

Fakta yang terjadi akibat tabrakan di Indonesia menunjukkan bahwa kereta mengalami patah pada bagian tengah badan kereta dan tidak jauh dari dudukan bogie. Daerah tersebut adalah daerah di mana penumpang berada. Hal ini tentu sangat membahayakan keselamatan penumpang.

Daerah kolaps yang ditunjukkan pada hasil perhitungan kekuatan adalah daerah kabin yang tidak jauh dari dudukan bogie. Hal ini karena semua gaya yang diteruskan melalui kopler diteruskan ke pemegang kopler yang cukup kaku kemudian didistribusikan melalui *crossbeam* dan *side beam*. Daerah kolaps berada di daerah kabin penumpang, seperti ditunjukkan juga

pada Gambar 11 yang membandingkan antara kondisi aktual kereta yang telah mengalami tabrakan dan hasil analisis yang telah dilakukan. Seharusnya kalaupun terjadi kolaps akibat tabrakan, daerah kolapsnya bukanlah di daerah kabin penumpang, namun daerah lain, misalnya di daerah toilet.



Gambar 11. Bentuk Pola deformasi keadaan akhir aktual dan hasil pemodelan (tampak samping) [7].

Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa keadaan kereta mengalami kolaps pada bagian kabin penumpang bila mengalami tabrakan. Untuk dapat melindungi penumpang dan mengurangi resiko fatal pada penumpang pada saat tabrakan terjadi perlu dilakukan modifikasi kekuatan struktur dari kereta. Modifikasi dilakukan berdasarkan konsep *crashworthiness*, dimana struktur kereta akan dibuat lemah di bagian yang tidak berpenumpang. Selain itu, struktur kereta juga harus dilengkapi dengan modul penyerap energi sebagai perlindungan utama dalam menyerap energi tabrakan.

Referensi

- introduction to aspects of collision of motor cars, ships, aircraft and railway coaches, Mechanical Engineering Publications, 1978.
4. Tyrell, D.C., K.J. Severson, and B.P. Marquis, Train crashworthiness design for occupant survivability, ASME APPLIED MECHANICS DIVISION-PUBLICATIONS-AMD, 210 (1995) 59-78
 5. Laporan Akhir Paket I, *Penelitian Structural Crashworthiness Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) untuk PT. INKA*. 2001, PPAU IR - ITB: Bandung.
 6. Laporan Akhir Paket II, *Penelitian Structural Crashworthiness Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) untuk PT. INKA*. 2001, PPAU IR - ITB: Bandung.
 7. Pasaribu, H.R., *Simulasi Dinamik Tabrakan Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) pada Jalan Lurus*, in *Program Studi Teknik Mesin*. 2001, Institut Teknologi Bandung: Bandung.
 8. Lagneau, H. Tolerance la Collision des Véhicules Ferroviaires. 1999: International Crashworthiness Design Conference.