



Analisis Keselamatan Penumpang *Train Set* Akibat Efek Sekunder Tabrakan

Bagus Budiwanto^{*}, IGN Wiratmaja Puja, Muhammad Agus Kariem,
Elias S Sinuraya

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

^{*}Email: budiwan@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak. Efek tabrakan kereta dapat dibagi atas dua kategori yaitu efek tabrakan primer (*primary collision*) dan efek tabrakan sekunder (*secondary collision*). Kedua efek tabrakan tersebut merupakan ancaman bagi keselamatan penumpang yang berada di dalam kendaraan. Paper ini terfokus pada keselamatan penumpang akibat efek sekunder tabrakan. Analisis tingkat keselamatan penumpang dilakukan dengan memanfaatkan data-data karakteristik perlambatan dan kecepatan selama terjadinya tabrakan. Selanjutnya diaplikasikan terhadap kriteria keselamatan yaitu *Head Injury Criterion* (HIC)/*Severity Index* (SI). Analisis keselamatan dan tingkat cedera penumpang dilakukan berdasarkan posisi, jarak rintang dan keberadaan modul penyerap energi impact. Penumpang pada baris 1 dan 2 mengalami perlambatan 74g dan 73g, sedangkan untuk baris selanjutnya, nilai perlambatan bervariasi antara 3g - 21g. Jarak rintangan yang semakin dekat akan mengakibatkan penumpang tersebut mengalami tingkat cedera yang semakin tinggi. Variasi kecepatan, massa penumbuk, dimensi modul penyerap energi impact, akan mempengaruhi tingkat cedera penumpang.

Kata kunci: *crashworthiness; efek sekunder tabrakan; integritas struktur interior; keselamatan penumpang; tabrakan kereta.*

1 Pendahuluan

Efek tabrakan kereta dapat dibagi atas dua kategori yaitu efek tabrakan primer (*primary collision*) dan efek tabrakan sekunder (*secondary collision*). Kedua efek tabrakan tersebut merupakan ancaman bagi keselamatan penumpang yang berada di dalam kendaraan.

Makalah ini terfokus pada keselamatan penumpang akibat efek sekunder tabrakan. Analisis tingkat keselamatan penumpang dilakukan dengan memanfaatkan data-data karakteristik perlambatan dan kecepatan selama terjadinya tabrakan. Selanjutnya diaplikasikan terhadap kriteria keselamatan yaitu *Head Injury Criterion* (HIC)/*Severity Index* (SI). Tabrakan antara suatu kendaraan dengan kendaraan lainnya akan mengakibatkan terjadinya perlambatan yang besar dalam rentang waktu yang relatif singkat. Perlambatan yang tinggi ini dapat menimbulkan cedera pada organ tubuh manusia.

2 Kriteria-Kriteria Keselamatan

Batasan-batasan perlambatan yang dapat ditahan tubuh berbeda untuk organ tubuh yang satu dengan organ tubuh lainnya. Standar kriteria dan tingkat cedera penumpang untuk ukuran keselamatan penumpang pada saat tabrakan sudah banyak diadopsi secara internasional antara lain adalah *Wayne State Tolerance Curve* (WSTC) [1], *Gadd Severity Index* (GSI) [2], atau yang lebih baru seperti *Head Injury Criterion* (HIC)/*Severity Index* (SI) [3].

Wayne State Tolerance Curve [1] berasal dari eksperimen yang dilakukan di Wayne State University dimana penelitian dilakukan untuk mengetahui tingkat cedera pada kepala akibat beban impak. Persamaan *Wayne State Tolerance Curve* dikembangkan dari kombinasi harga perlambatan dan interval waktu tabrakan:

$$a^{2.5}T = C = 1000 \quad (1)$$

dimana a adalah perlambatan yang terjadi dalam satuan gravitasi (g) dan T adalah waktu dalam satuan detik (s). Jika perlambatan yang terjadi tidak konstan maka Pers. (1) di atas dimodifikasi menjadi:

$$\int a^{2.5} dt = 1000 \quad (2)$$

Persamaan ini disebut juga *Gadd Severity Index* (GSI) [2]. Persamaan-persamaan di atas ditetapkan sebagai tingkat perlambatan atau perlambatan yang dapat menyebabkan kerusakan pada kepala dan juga patah pada tulang kepala manusia.

Kriteria keselamatan yang lebih baru dan lebih banyak dipakai dalam analisis keselamatan manusia yaitu *Head Injury Criterion* (HIC)/*Severity Index* (SI) yang merupakan modifikasi dari GSI [3].

$$HIC = SI = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^n \quad (3)$$

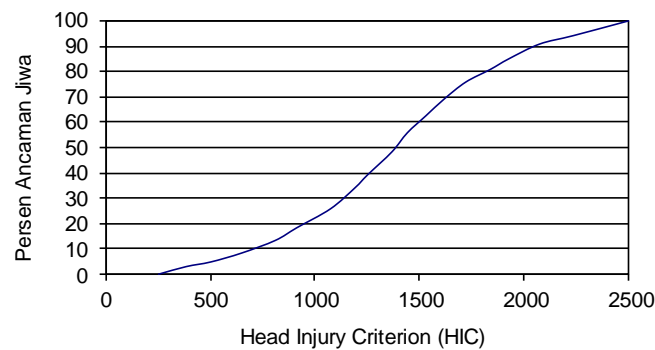
dimana $(t_2 - t_1)$ adalah interval waktu selama terjadinya impak, $a = a(t)$ adalah perlambatan yang terjadi berdasarkan fungsi waktu, dan n adalah indeks eksponen. Indeks n tersebut untuk kepala berdasarkan eksperimen ditetapkan sebesar 2,5 dan besarnya nilai HIC/SI tersebut dibatasi hingga 1000 untuk cedera kepala dan dada.

3 Kriteria-Kriteria Biomekanik

Metoda perhitungan tingkat cedera yang dialami oleh manusia telah banyak dikembangkan sepanjang tahun baik dalam bentuk skala, skor, indeks, maupun grafik. Metoda perhitungan tersebut dirancang berdasarkan bentuk dan anatomi tubuh yang mengalami cedera, respon fisiologi terhadap cedera atau gabungan keduanya.

Terdapat suatu hubungan antara kriteria keselamatan dan kriteria biomekanik. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 1. Dari gambar tersebut dapat kita lihat, semakin besar nilai HIC, maka semakin besar persentase terhadap ancaman jiwa.

Hubungan antara HIC dan AIS (*Abbreviated Injury Scale*) dapat dilihat pada Tabel 1. Hubungan nilai AIS terhadap tingkat cedera yang mungkin terjadi pada kepala, tulang rusuk, dan daerah dada dapat dilihat pada Ref. [4].



Gambar 1 Kurva tingkat keselamatan [4].

Tabel 1 Hubungan antara AIS dengan HIC [4].

<i>Head Injury Criterion</i> (HIC)	<i>Abbreviated Injury Scale</i> (AIS)
0-132	0
132-500	1
501-912	2
913-1250	3
1251-1617	4
1618-1926	5
1927-2500	6

4 Pembebanan Impak Pada Kereta KRDE

Hukum kekekalan momentum dan energi kinetik antara kedua benda yang saling bertubrukan digunakan dalam pemodelan matematis masalah tabrakan kereta api.

Energi impact akibat tabrakan haruslah dapat diserap oleh sistem penyerap energi impact dan diusahakan agar tidak diteruskan ke ruang penumpang yang akhirnya dapat menyebabkan deformasi pada kabin penumpang dan membahayakan keselamatan penumpang. Secara ideal persamaan matematis energi impact oleh deformasi struktur adalah [5]:

$$EI = \int_0^{\delta_{maks}} P.d\delta = P_{mean} \cdot \delta_{maks} \quad (5)$$

Gaya impact (tabrakan) yang terjadi di tiap-tiap kereta akan menghasilkan perlambatan rata-rata. Perlambatan rata-rata yang diterima kereta akan secara otomatis diterima penumpang yang berada di dalamnya dan juga komponen interior.

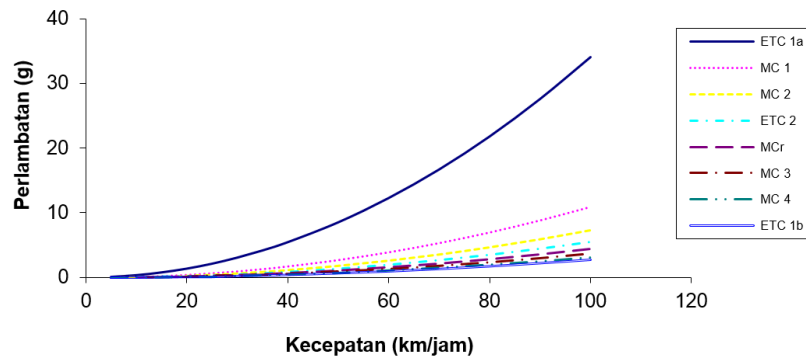
5 Karakteristik Perlambatan Kereta KRDE Pada Saat Terjadi Tabrakan

Karakteristik perlambatan yang dialami penumpang pada saat tabrakan merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat cedera penumpang. Karakteristik perlambatan tersebut merupakan fungsi dari sistem penyerapan energi impact pada kereta yang terdiri dari modul penyerap energi, *crash zone area*, dan struktur utama kereta (*saloon*).

Tabrakan yang menghasilkan perlambatan 25g akan mengakibatkan penumpang yang berada di dalam kereta tersebut mengalami tingkat cedera pada level maksimum (AIS 3) tetapi penumpang masih bisa diselamatkan [6].

Dalam simulasi dinamik rangkaian KRDE yang digunakan adalah rangkaian KRDE rancangan PT. INKA dengan delapan buah kereta pada satu rangkaian kereta [7]. Simulasi dinamik tabrakan KRDE dilakukan pada kecepatan 20, 40, 60, 80, dan 100 km/jam. Dalam simulasi tersebut diasumsikan KRDE telah dilengkapi dengan modul penyerap energi impact dan *crash zone area*. Data lengkap simulasi dapat dilihat pada Ref. [7].

Karakteristik perlambatan terhadap waktu, hasil simulasi dinamik KRDE untuk berbagai kecepatan tabrakan di jalur lurus diperlihatkan pada Gambar 2.

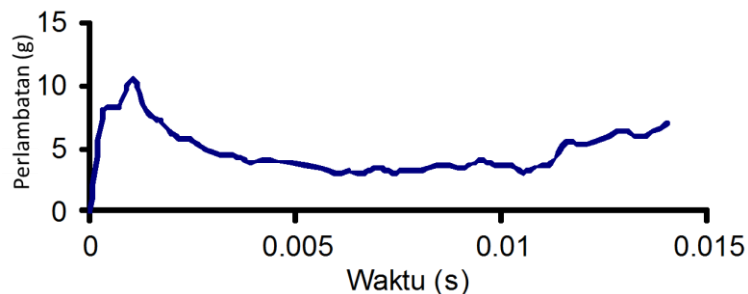


Gambar 2 Grafik perlambatan rata-rata terhadap berbagai kecepatan [7].

6 Modul Penyerap Energi Impak dan *Crash Zone Area*

Modul penyerap energi dirancang agar dapat menyerap energi impak akibat terjadinya tabrakan sehingga energi tersebut tidak diteruskan ke bagian ruang penumpang yang dapat membahayakan keselamatan penumpang. Selanjutnya *crash zone area* adalah area yang boleh mengalami *crash* bila modul penyerap energi tidak mampu menyerap semua energi impak.

Karakteristik perlambatan yang dihasilkan *crash zone area* dapat dilihat pada Gambar 3 Perlambatan maksimum sebesar 10g tersebut hanya terjadi untuk waktu 0,014 detik dan deformasi *crash zone area* sekitar 30 cm.



Gambar 3 Grafik perlambatan terhadap waktu pada *crash zone area* [8].

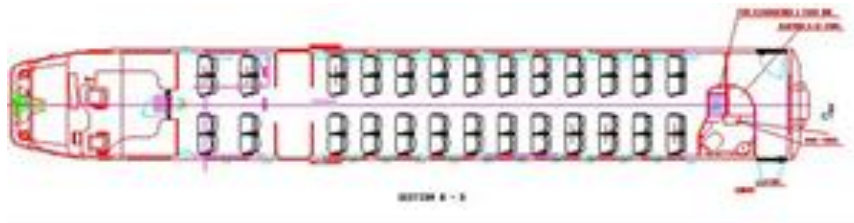
7 Analisis Keselamatan Penumpang Berdasarkan Jarak Rintangan

Persamaan yang digunakan dalam menganalisis keselamatan penumpang berdasarkan posisi adalah rumus modifikasi WSTC dan GSI yang dapat dituliskan [9]:

$$SI = \frac{Vo^4}{g(2Sg)^{1.5}} \quad (4)$$

Dalam analisis ini diperlukan beberapa input yaitu kecepatan sesaat sebelum terjadinya tabrakan dan jarak penumpang ke rintangan di depannya dan diasumsikan perlambatan tiap-tiap penumpang adalah konstan serta rintangan yang dihadapi penumpang adalah *rigid body*.

Gambar 4 memperlihatkan peta posisi penumpang yang berada di dalam ETC 1 (*Engine Trailer Car*), sedangkan Tabel 2 adalah hasil analisis keselamatan penumpang KRDE untuk kecepatan tabrakan 60 km/jam di *Engine Trailer Car* 1.



Gambar 4 Peta posisi penumpang ETC [7].

Tabel 2 Persen ancaman jiwa berdasarkan posisi penumpang di ETC 1 [7].

Penumpang	SI	Persen ancaman jiwa
Masinis dan Asisten masinis	1203	35,8
Penumpang baris pertama	356,57	2,2
Penumpang baris ke-2	295,53	1,6
Penumpang baris ke-3	433,57	3,8
Penumpang baris ke-4 hingga ke-13	441,94	4

Hasil analisis keselamatan penumpang yang ditunjukkan pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa masinis dan asisten masinis mengalami ancaman jiwa yang paling besar (35,8 %) dibandingkan dengan penumpang lainnya untuk kecepatan yang sama dalam satu kereta yang sama. Hal ini disebabkan jarak antara masinis dan asisten masinis dengan jarak rintangan di depannya lebih dekat dibandingkan dengan penumpang lainnya. Ancaman jiwa terbesar kedua akan dialami oleh penumpang pada baris keempat hingga baris ke-13 yaitu sebesar 4,18%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jarak antara penumpang dengan rintangan di depannya sangat mempengaruhi besarnya ancaman jiwa yang dialami oleh penumpang tersebut. Penumpang yang berada di dalam kereta lainnya seperti MC dan MCr akan mengalami ancaman jiwa yang lebih kecil dibandingkan dengan penumpang yang berada di dalam ETC 1a (tergantung dari letak kereta dalam suatu tabrakan). Hal ini disebabkan

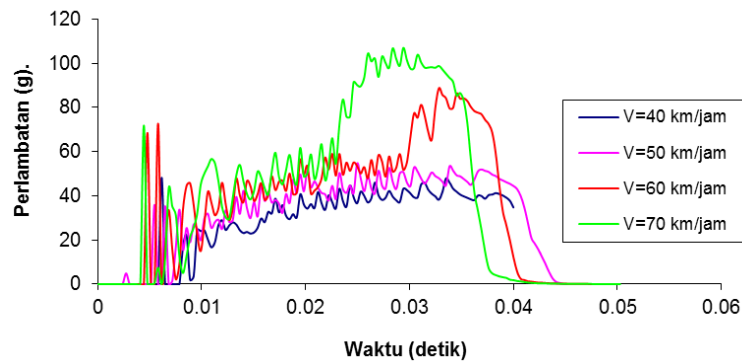
perlambatan kereta lainnya lebih kecil dibandingkan dengan kereta paling depan pada saat terjadi tabrakan.

8 Analisis Keselamatan Penumpang Berdasarkan Simulasi Modul Penyerap Energi Impak

Karakteristik modul penyerap energi impact yang digunakan pada setiap simulasi dapat dilihat pada Tabel 3. Untuk semua simulasi; massa impaktor diasumsikan 9 ton, bahan pipa terbuat dari mild steel dan dimensi *dies* ($r/D = 0,133$).

Tabel 3 Keterangan simulasi [8, 10].

No.	Dimensi Pipa (mm)	Kecepatan Impaktor (km/jam)
1	$L=500$ $t_1=4$ $t_2=10$	50
2	$L=600$ $t_1=4$ $t_2=10$	50
3	$L=700$ $t_1=4$ $t_2=10$	50
4	$L=500$ $t_1=4$ $t_2=10$	40
5	$L=500$ $t_1=4$ $t_2=10$	50
6	$L=500$ $t_1=4$ $t_2=10$	60
7	$L=500$ $t_1=4$ $t_2=10$	70

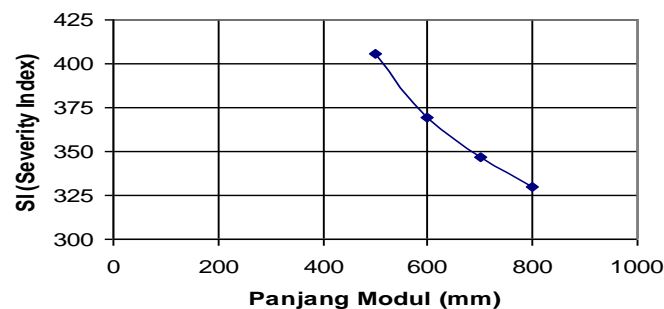


Gambar 5 Karakteristik perlambatan simulasi 4, 5, 6 & 7 di jalur lurus [8, 10].

Jika KRDE menggunakan simulasi modul penyerap energi impact maka karakteristik perlambatan maksimum yang terjadi, untuk simulasi 1, 2, dan 3 adalah 45g, sedangkan untuk simulasi 4-7 berada pada rentang 40g – 100g. Gambar 5 merupakan grafik perlambatan yang dihasilkan simulasi 4 hingga 7 (simulasi modul dengan variasi kecepatan penumbuk).

Hasil analisis keselamatan penumpang KRDE akibat tabrakan di jalur lurus dengan menggunakan simulasi modul penyerap energi impact tersebut di atas dapat dilihat pada Tabel 3.

Jika memperhatikan panjang modul penyerap energi maka simulasi 1 akan menimbulkan perlambatan maksimum sebesar 54 g dengan interval waktu tabrakan sebesar 0,0451 detik, sehingga penumpang yang berada di dalam kereta akan mengalami ancaman jiwa sebesar 3,5 %. Pada Gambar 6, semakin pendek modul yang akan digunakan akan mengakibatkan penumpang yang berada di dalam kereta tersebut akan mengalami ancaman jiwa yang semakin besar.



Gambar 6 Perbandingan SI terhadap panjang modul di jalur lurus.

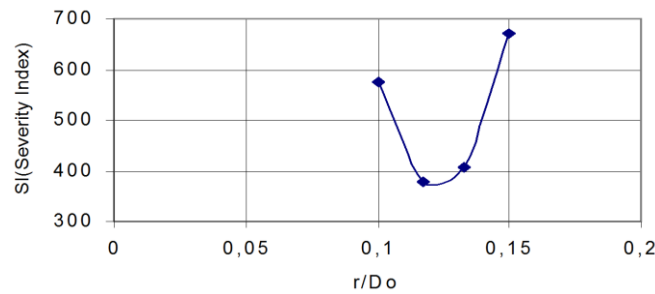


Gambar 7 Perbandingan SI terhadap panjang modul di jalur lurus.

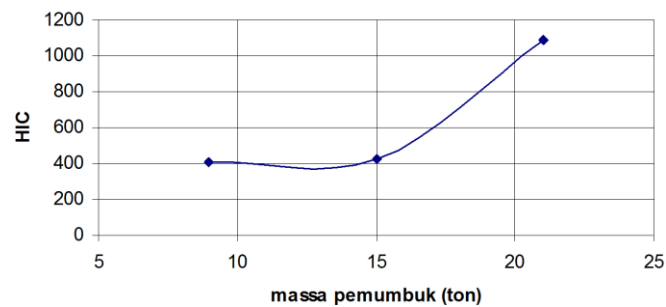
Jika memperhatikan kecepatan awal penumbuk pada berbagai kecepatan tabrakan maka persentase ancaman jiwa penumpang akan maksimum, yaitu sebesar 37% apabila menggunakan simulasi 7, dimana perlambatan maksimum

yang dihasilkan simulasi tersebut sebesar 107g dengan interval waktu 0,05 detik. Gambar 7 memperlihatkan bahwa semakin besar kecepatan penumbuk akan mengakibatkan ancaman jiwa yang dialami penumpang semakin besar.

Ancaman jiwa terbesar dialami penumpang jika modul penyerap energi mempunyai perbandingan radius *dies* terhadap diameter dalam pipa yang lebih besar, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Perbandingan SI terhadap r/D_o di jalur lurus.

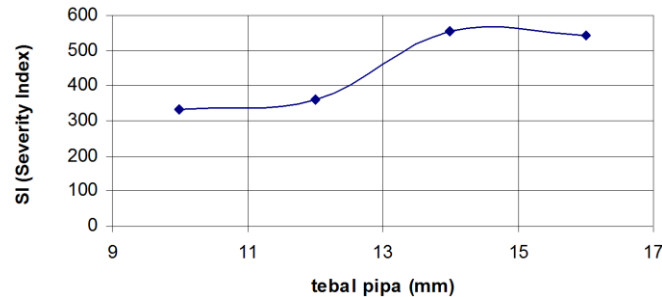


Gambar 9 Perbandingan SI terhadap massa penumbuk di jalur lurus.

Gambar 9 memperlihatkan perbandingan SI untuk variasi massa penumbuk pada kecepatan 50 km/jam dimana untuk massa penumbuk sebesar 9 hingga 15 ton SI yang dialami oleh penumpang hampir tidak mengalami perubahan tetapi ketika massa penumbuk melebihi 15 ton, SI yang dialami penumpang mengalami peningkatan.

Simulasi modul dengan variasi ketebalan pipa yang digunakan untuk modul penyerap energi impact KRDE juga akan mempengaruhi tingkat keselamatan penumpang yang berada di dalamnya. Pada Gambar 10 diperlihatkan pengaruh ketebalan pipa modul terhadap SI yang dialami penumpang KRDE. SI penumpang akan meningkat hingga ketebalan pipa yang digunakan mencapai

14 mm dan mengalami kecenderungan menurun ketika ketebalan pipa lebih besar dari 14 mm.



Gambar 10 Perbandingan SI terhadap ketebalan pipa di jalur lurus.

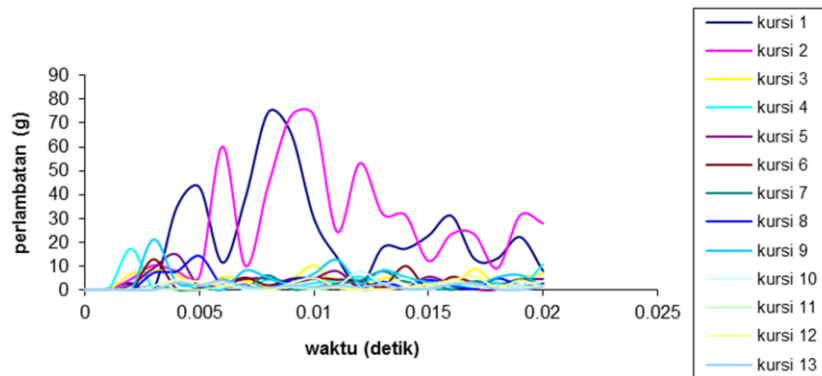
9 Analisis Keselamatan Penumpang Berdasarkan Posisi

Analisis keselamatan penumpang jika kereta hanya menggunakan *crash zone area* tanpa memakai modul penyerap energi dampak dapat dilihat pada Gambar 12. Gambar tersebut menunjukkan bahwa perlambatan untuk baris pertama dan kedua kursi penumpang cukup tinggi, berbeda dengan kursi ketiga hingga ke-13 mempunyai perlambatan yang kecil. Persentase ancaman jiwa yang dialami penumpang KRDE untuk kereta pertama (ETC 1) dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Perlambatan, interval waktu, SI dan persen ancaman jiwa.

No.	Perlambatan Maksimum (g)	Interval Waktu (s)	SI	Persen Ancaman Jiwa
1	54	0,0451	406	3,5
2	51	0,0471	369	3
3	57	0,0440	347	2
4	48	0,0400	251	1
5	54	0,0451	406	3,5
6	88	0,0485	803	13,3
7	107	0,0500	1373	37

Dari Tabel 4 terlihat bahwa penumpang baris pertama dan kedua mengalami SI yang tidak terlalu besar sehingga persentase ancamannya pun menjadi kecil sedangkan penumpang baris ke-3 hingga ke-13 SI yang diterima sangat kecil sekali, hal ini disebabkan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan analisis kekuatan *crash zone area* masih terlalu pendek sehingga karakteristik perlambatan secara keseluruhan tidak dapat diperoleh.



Gambar 112 Perlambatan penumpang di kereta ETC 1a kecepatan 60 km/jam.

Tabel 5. Perlambatan dan SI penumpang di ETC pada 60 km/jam.

Urutan kursi	Perlambatan maksimum (g)	SI
Baris 1	74	133
Baris 2	73	147
Baris 3	10	0,9
Baris 4	17	0,7
Baris 5	14	0,1
Baris 6	12	0,67
Baris 7	7	0,32
Baris 8	14	0,23
Baris 9	21	1,96
Baris 10	8	0,23
Baris 11	3	0,02
Baris 12	5	0,22
Baris 13	4	0,07

10 Evaluasi Biomekanik Penumpang Berdasarkan Jarak Rintangan

Setelah dilakukan analisis keselamatan penumpang, maka langkah selanjutnya mengaplikasikan hasil analisis keselamatan penumpang terhadap kriteria-kriteria biomekanik. Pada Tabel 5 diberikan tingkatan cedera yang dialami penumpang KRDE berdasarkan posisinya untuk kereta ETC 1 pada saat terjadi tabrakan dengan kecepatan 60 km/jam.

Pada Tabel 5 terlihat bahwa masinis dan asisten masinis mengalami tingkat cedera yang paling besar yaitu pada level 3 menurut AIS (berat) dibandingkan dengan penumpang lainnya di dalam ETC 1. Hal ini disebabkan jarak rintangan ke depannya untuk masinis dan asisten masinis terlalu dekat dibandingkan

dengan penumpang lainnya dalam satu kereta yang sama. Kemungkinan bentuk cedera yang dialami masinis dan asisten masinis yaitu: (i) tidak sadarkan diri dalam waktu 1 hingga 6 jam, (ii) lebih dari tiga tulang rusuk patah pada satu sisi, atau (iii) luka memar ringan pada jantung atau luka memar pada paru-paru. Penumpang pada baris pertama hingga baris ke-13 mengalami AIS yang sama walaupun mengalami HIC yang berbeda yaitu pada level AIS 1 (ringan). Kemungkinan bentuk cedera yang mungkin dialami penumpang pada baris pertama hingga baris ke-13 yaitu: (i) sakit kepala atau pening-pening, (ii) satu tulang rusuk patah, atau (iii) abrasi kulit, luka memar atau luka gores ringan pada kulit.

Perlu diperhatikan, walaupun penumpang pada baris pertama hingga baris ke-13 mengalami AIS yang sama akan tetapi persentase ancaman jiwa yang diterima oleh masing-masing penumpang berbeda (lihat kembali Tabel 2).

11 Evaluasi Biomekanik Berdasarkan Simulasi Modul Penyerap Energi Impak

Tingkatan cedera penumpang jika KRDE menggunakan berbagai jenis simulasi modul penyerap energi impact ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Tingkat cedera penumpang di ETC 1.

Penumpang	HIC	AIS
Masinis	1220	3
Asisten masinis	1220	3
Penumpang baris ke-1 dan ke-3	431	1
Penumpang baris ke-2	308	1
Penumpang baris ke-4 s.d. ke-13	448	1

Tabel 7. Tingkat cedera untuk berbagai jenis simulasi.

No.	HIC	AIS
1	406	1
2	369	1
3	347	1
4	251	1
5	406	1
6	803	2
7	1373	4

Kereta KRDE jika menggunakan simulasi 1, 2, atau 3 pada saat terjadi tabrakan akan mengakibatkan penumpang mengalami tingkat cedera yang sama yaitu AIS 1. Bentuk cedera yang mungkin diderita oleh penumpang yaitu: (1) tidak

sadarkan diri dalam waktu kurang dari satu jam, (2) dua hingga tiga tulang rusuk patah, dan (3) luka gores berat pada kulit

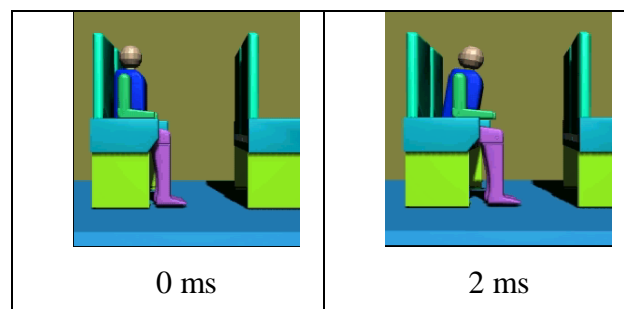
Jika simulasi 7 terjadi pada KRDE maka akan mengakibatkan penumpang yang berada di dalamnya akan mengalami AIS pada level 4. Semakin cepat massa penumbuk dan semakin besar massa penumbuk akan mengakibatkan penumpang yang berada di dalamnya mengalami bentuk cedera yang semakin parah. Bentuk cedera yang mungkin dialami penumpang pada saat KRDE menggunakan simulasi 7 yaitu: (1) tidak sadarkan diri dalam waktu 6 hingga 24 jam, (2) lebih dari tiga tulang rusuk patah pada kedua sisi, dan (3) luka memar berat pada jantung.

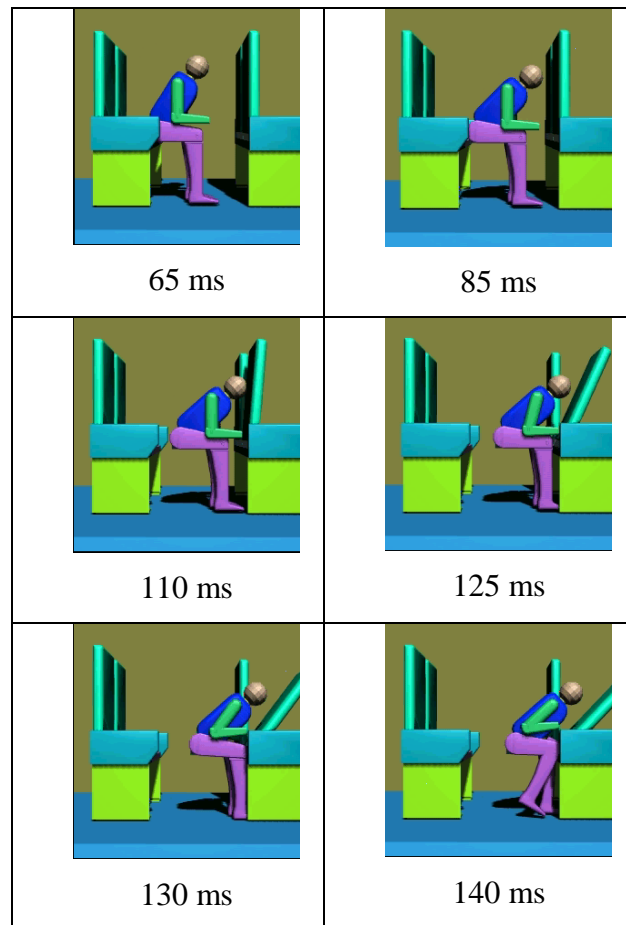
Simulasi modul dengan variasi *dies* akan mengakibatkan penumpang kereta tersebut mengalami bentuk cedera yang lebih parah jika menggunakan *dies* dengan perbandingan r/D_0 lebih kecil dari 0,117 atau lebih besar dari 0,133.

13 Pemodelan Penumpang Dengan Bantuan Perangkat Lunak *Pro/Engineer* dan *MSC/Working Model 4D*

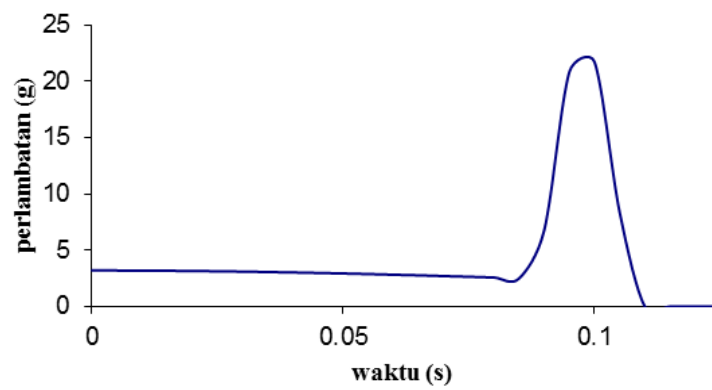
Pemodelan dan animasi pergerakan penumpang KRDE pada saat terjadi tabrakan menggunakan perangkat lunak *Pro/Engineer* dan *MSC/Working Model 4D* yang berbasis *motion*, *FEA*, dan teknologi animasi. Penumpang dan komponen interior berupa kursi penumpang dimodelkan dengan bantuan perangkat lunak *Pro/Engineer* sedangkan pergerakan (*motion*) dan animasi penumpang menggunakan perangkat lunak *MSC/Working Model 4D*.

Gambar 13 memperlihatkan pergerakan penumpang pada saat terjadi tabrakan, dimana kecepatan awal penumpang relatif terhadap kereta adalah 24 km/jam. Pada saat $t = 0$ ms, penumpang belum mengalami perubahan posisi (penumpang masih berada di posisi awal), dan setelah 2 ms penumpang mengalami pergerakan. Hingga mencapai waktu 110 ms dari keadaan awal, penumpang telah menubruk sandaran kursi penumpang yang berada di depannya. Grafik perlambatan, terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 14.

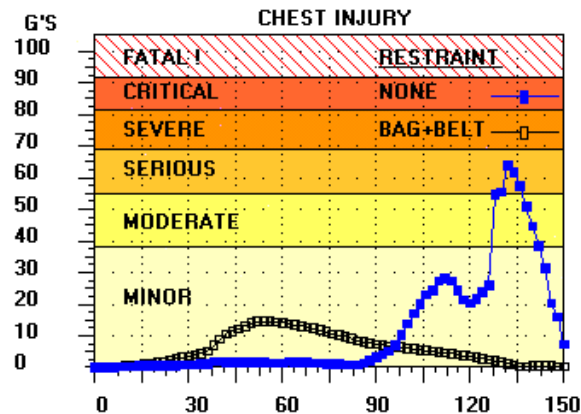




Gambar 123 Pergerakan penumpang KRDE pada saat terjadi tabrakan.



Gambar 134 Karakteristik perlambatan penumpang KRDE terhadap waktu.



Gambar 145 Perbandingan HIC dan karakteristik perlambatan pengemudi.

14 Validasi Pemodelan Penumpang Dengan Bantuan Perangkat Lunak *Dead or Alive*

Pemodelan penumpang dengan menggunakan perangkat lunak *Dead or Alive* merupakan pemodelan penumpang yang berada di dalam mobil yaitu pengemudinya sendiri pada saat terjadi tabrakan. Perangkat lunak ini membutuhkan input berupa tinggi penumpang, berat penumpang, jenis kendaraan yang digunakan, dan kecepatan sesaat sebelum tabrakan.

Bentuk perlambatan yang diperlihatkan pada Gambar 14 hampir sama dengan bentuk perlambatan yang diperlihatkan pada Gambar 15 (untuk interval waktu 0 hingga 110 ms), perbedaannya yaitu perlambatan yang dihasilkan pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak *MSC/Working Model* masih belum tepat karena *constraint* pegas pada kursi penumpang di depannya belum diberikan.

15 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis kekuatan komponen interior dan analisis biomekanik penumpang KRDE akibat efek sekunder tabrakan adalah:

1. Hasil analisis keselamatan dan tingkat cedera penumpang berdasarkan posisinya:
 - Jarak rintangan yang semakin dekat akan mengakibatkan penumpang tersebut mengalami tingkat cedera yang semakin tinggi

- Tingkat cedera yang dialami penumpang akibat efek sekunder akan semakin besar jika posisi penumpang semakin kedepan.
 - Masinis dan asisten masinis memiliki resiko yang lebih tinggi daripada penumpang saat terjadi tabrakan pada AIS 3 (berat).
2. Hasil analisis keselamatan penumpang dan tingkat cedera penumpang jika KRDE menggunakan modul penyerap energi impak:
- Modul yang semakin panjang hingga taraf sebelum *buckling*, yang digunakan sebagai modul penyerap energi impak akan mengakibatkan penumpang yang berada di dalam kereta tersebut mengalami tingkat cedera yang semakin kecil.
 - Jari-jari *dies* yang digunakan untuk modul penyerap energi dengan r/D_o lebih kecil dari 0,113 dan lebih besar dari 0,133 akan mengakibatkan penumpang akan menerima persentase ancaman yang lebih besar.
 - Tingkat cedera penumpang akan semakin besar jika menggunakan pipa dengan tebal lebih besar dari 14 mm.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada PT INKA dan Depdikbud yang telah membantu sehingga penelitian ini dapat berlangsung dengan lancar.

Referensi

- [1] Lissner, H., M. Lebow, and F. Evans, *Experimental Studies on The Relation Between Acceleration and Intracranial Pressure Changes in Man*, Surgery, gynecology & obstetrics, 111, pp. 329-338, 1960
- [2] Gadd, C., *Use of Weighted-impulse Criterion for Estimating Injury Hazard*, Proceedings of the Tenth Stapp Car Crash Conference, Society of Automotive Engineers, Inc., New York, 1966.
- [3] Versace, J., *A review of the severity index*, SAE Technical Paper, 1971.
- [4] Brell, E., G.V. Erp, and C. Snook, *Train Crashworthiness and Its Impact on Society*, International Journal of Crashworthiness, (4), pp. 419-432, 1999.
- [5] Lagneau, H., *Tolerance la Collision des Vehicules Ferroviaires*, International Crashworthiness Design Conference, 1999.
- [6] Tyrell, D.C., K.J. Severson, and B.P. Marquis, *Train crashworthiness design for occupant survivability*, ASME Applied Mechanics Division-Publications-AMD, 210, pp. 59-78, 1995.
- [7] Surya, E.S., *Analisis Kekuatan Struktur Komponen Interior dan Analisis Keselamatan Penumpang Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) Akibat Efek*

- Sekunder Tabrakan*, Mechanical Engineering Department., Bandung Institute of Technology., Bandung, 2002.
- [8] Laporan Akhir Paket II, *Penelitian Structural Crashworthiness Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) untuk PT. INKA*. 2001.
- [9] Surya, E.S., *Analisis Kekuatan Struktur Komponen Interior dan Analisis Keselamatan Penumpang Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) Akibat Efek Sekunder Tabrakan*, Mechanical Engineering Department., Bandung Institute of Technology., Bandung, 2002.
- [10] Syehnul, D., *Analisis Karakteristik Struktur Silinder Tipis untuk Impact Energy Absorber Kereta Rel Diesel Elektrik*, Mechanical Engineering Department., Bandung Institute of Technology., Bandung, 2002.