



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TESIS - TM5400

ANALISA *CRASHWORTHINESS* PADA STRUKTUR FRAME CABIN KERETA CEPAT NASIONAL MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

KARISMA RIZAL
NRP. 6007202004

Dosen Pembimbing:
Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021



TESIS - TM5400

**ANALISA *CRASHWORTHINESS* PADA
STRUKTUR *FRAME CABIN* KERETA CEPAT
NASIONAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

KARISMA RIZAL
NRP. 6007202004

Dosen Pembimbing:
Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

(halaman ini sengaja dikosongkan)



THESIS - TM5400

***CRASHWORTHINESS ANALYSIS ON CABIN
FRAME STRUCTURE OF NATIONAL HIGH-
SPEED TRAIN USING FINITE ELEMENT
METHOD***

KARISMA RIZAL
NRP. 6007202004

Advisor:

Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

(halaman ini sengaja dikosongkan)

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISA *CRASHWORTHINESS* PADA STRUKTUR *FRAME CABIN* KERETA CEPAT NASIONAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

TESIS





Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
Program Studi S-2 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

KARISMA RIZAL

NRP : 6007202004

Disetujui Oleh :

1. **ACHMAD SYAIFUDIN, ST., MEng., PhD**  (Pembimbing)
NIP.197909262005011001
2. **AGUS SIGIT PRAMONO., Ir. Dr. DEA**  (Penguji I)
NIP. 196508101991021001
3. **YOHANES, ST, M.Sc. Ph.D**  (Penguji II)
NIP. 198006272012121003
4. **ALIEF WIKARTA ST., MSc.Eng. Ph.D**  (Penguji III)
NIP. 198202102006041002

SURABAYA

2022

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA *CRASHWORTHINESS* PADA STRUKTUR
FRAME CABIN KERETA CEPAT NASIONAL
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Nama Mahasiswa : Karisma Rizal
NRP : 6007 202 004
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Kereta Api merupakan salah satu jenis moda transportasi umum yang sangat diminati masyarakat, karena memiliki daya tampung penumpang yang besar untuk sekali perjalanan serta lebih aman dan nyaman. Pada unsur keamanan, kereta api memiliki unsur keamanan aktif dan unsur keamanan pasif. Sistem keamanan aktif bertujuan untuk mencegah terjadinya kecelakaan sedangkan sistem keamanan pasif bertujuan mengurangi risiko yang timbul akibat kecelakaan. Namun tidak dipungkiri bahwa dengan adanya berbagai sistem keamanan aktif yang terdapat pada kereta api, kecelakaan masih dapat terjadi. Sehingga perlu adanya penelitian yang lebih mendalam mengenai sistem keamanan pasif. BRIN dan PT. INKA berencana mengembangkan kereta cepat nasional dengan kecepatan operasi mencapai 250 km/jam. Dengan kecepatan yang tinggi tersebut tentu saja risiko kecelakaan yang ditimbulkan juga semakin tinggi. Namun standar nasional maupun internasional mengenai kelayakan tabrak yang merupakan sistem keamanan pasif kereta api, tidak membedakan antara kereta kecepatan rendah dengan kereta kecepatan tinggi. Sehingga perlu adanya penelitian yang lebih mendalam mengenai kelayakan tabrak sistem keamanan pasif terutama pada kereta cepat yang menurut beberapa data kecelakaan terjadi pada kecepatan melebihi kriteria yang diprasyarkan pada standar.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa kelayakan tabrak pada sistem keamanan pasif lokomotif kereta cepat nasional dengan metode

elemen hingga. Geometri model yang digunakan mengacu pada desain kereta cepat nasional BRIN dan PT. INKA dengan penyederhanaan geometri *frame* dan penggunaan *sheel surface* sebagai model simulasi. Material yang digunakan pada model adalah aluminium 6005A-T6 sesuai dengan rencana desain kereta api. Simulasi dijalankan dengan *initial velocity* 10 m/s, 14,75 m/s, 20 m/s, dan 27,78 m/s. solver yang akan digunakan pada simulasi adalah “LS-DYNA” dengan *hourglass control type 4 “Flanagan-Belytschko”* dengan *hourglass coefficient* 0,04. untuk *endtime* akan diatur sebesar 0,2 s dengan pertimbangan pada *range* waktu tersebut dengan variasi kecepatan seperti dijelaskan di atas tumbukan sudah mencapai batas kemampuan *crash energy management* dan atau energi kinetik pada saat tabrakan sudah terserap seluruhnya.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa deformasi *survival space* pada ketiga desain variasi memenuhi syarat untuk kecepatan tabrak 10 m/s dan 14,75 m/s, kecuali pada desain *existing* untuk kecepatan tabrak 14,75 m/s deformasi pada *survival space* melebihi batas aman. Pada kecepatan tabrak 20 m/s dan 27,78 m/s, deformasi *survival space* pada ketiga desain variasi melebihi batas aman. Berdasarkan analisa *crash force*, desain variasi A dan B memenuhi *manner* deformasi yang diinginkan, sedangkan pada desain *existing* *manner* deformasi tidak sesuai harapan pada kecepatan 14,75 m/s sampai 27,78 m/s. ketiga desain variasi mampu menahan energi tabrak sesuai dengan standar yang berlaku maupun pada *overspeed*, kecuali pada desain *existing* untuk kecepatan 27,78 m/s energi tabrak tidak terserap secara sempurna. Nilai rata-rata serta nilai tertinggi *deceleration pulse* pada ketiga desain variasi tidak memenuhi persyaratan sesuai dengan standar, namun ditinjau dari penelitian tentang toleransi seluruh tubuh terhadap impact nilai perhitungan pada seluruh desain variasi masih berada pada batas aman, kecuali untuk desain *existing* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s.

Kata Kunci : *crashworthiness, crash energy management, Occupant protection, pulsar tabrakan, high speed train*

***CRASHWORTHINESS ANALYSIS ON CABIN FRAME
STRUCTURE OF NATIONAL HIGH-SPEED TRAIN USING
FINITE ELEMENT METHOD***

Student's Name : Karisma Rizal
Student's ID : 6007 202 004
Department : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Advisory Lecturer : Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

Train is one of the massive transportations that is in great demand by the public, because it has a large passenger capacity for one trip and is safer and more comfortable. Train has active and passive system for safety. The active security system aims to prevent accidents while the passive security system aims to reduce the risks arising from accidents. However, it is undeniable that with the existence of various active safety systems on trains, accidents still possibly happen. There is a need for more in-depth research on passive security systems. BRIN and PT. INKA plans to develop a national high-speed train with an operating speed of 250 km/hour. With this high speed, of course, the risk of an accident is also higher. However, national, and international standards regarding crash feasibility, which is a passive rail safety system, do not distinguish between low-speed trains and high-speed trains. There is a need for more in-depth research on the feasibility of collisions with passive safety systems, especially on fast trains which according to some accident data occur at speeds exceeding the criteria required by the standard.

This study aims to analyse the feasibility of a collision on the passive safety system of the national high-speed train locomotive, using the finite element method. The geometry of the model used refers to the BRIN and PT. INKA by simplifying the frame geometry and by using the shell surface as a simulation model. The material used in the model is aluminium 6005A-T6 in

accordance with the train design plan. The simulation was run with initial velocity of 10 m/s, 14.75 m/s, 20 m/s, and 27,78 m/s. The solver that will be used in the simulation is “LS-DYNA” with hourglass control type 4 “Flanagan-Belytschko” with hourglass coefficient of 0.04. for the end time will be set at 0.2 s with consideration in that time range with variations in speed as described above the collision has reached the limit of crash energy management capability and or kinetic energy at the time of the collision has been completely absorbed.

The result of the study showed that the deformation of survival space of each variation design fulfils the requirement for 10 m/s and 14,75 m/s crash speed, except for the existing design at the crash’s speed of 14,75 m/s the deformation of survival space exceed the limit. The deformation of survival speed at 20 m/s and 27,78 m/s speed’s crash for each variation design is exceed the limit. Crash force value showed that design variation A and B fulfil desired deformation manner, but existing design showed bad deformation manner at 14,75 m/s until 27,78 m/s speed’s crash. Each of variation design can absorb the crash energy required by the standard and the overspeed, except for the existing design at 27,78 m/s crash’s speed the crash energy is not fully absorb. Mean and peak value of deceleration pulse for each variation design at all variation speed is not fulfil the standard requirement. According to the study of the “whole body tolerance of rearward acceleration” all of design variation in each crash speed, the calculated value is below the maximum value permitted, existing design at 27,78 m/s crash speed.

Kata Kunci : crashworthiness, crash energy management, Occupant protection, pulsar tabrakan, high speed train

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarokatuh.

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, Tuhan Maha Pengasih Maha Penyayang, karena atas segala nikmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Shalawat dan salam penulis ucapkan kepada Nabi Muhammad SAW yang membawa cahaya keimanan dan agama Islam sebagai pedoman kehidupan untuk selalu bertakwa dan beriman kepada Allah SWT.

Dalam pengerjaan Tesis ini penulis banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada halaman ini, penulis ingin memberi hormat dan ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu tercinta, Siti Indiah yang selalu mendukung, memberikan kasih sayang, dan tak henti-hentinya mendoakan penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini. Terima kasih ibunda atas segalanya
2. Ayah tercinta, Ridwan yang selalu mendukung, menasihati, mengarahkan, dan mendoakan penulis. Terima kasih ayah untuk semuanya
3. Nenek dan Kakek tercinta yang selalu mendukung dan menyayangi penulis selama ini
4. Bapak Achmad Syaifudin, ST., MEng., PhD selaku dosen pembimbing Tesis yang telah memberikan ide, pembelajaran dan pengetahuan yang tidak ternilai harganya bagi penulis untuk memberikan hasil yang bermanfaat
5. Agus Sigit Pramono, Ir. Dr. DEA, Yohanes, ST, M.Sc. Ph.D, dan Alief Wikarta ST., MSc.Eng. Ph.D sebagai dosen penguji tesis yang telah memberikan kritik dan saran terhadap penulis dan memberikan pembelajaran kepada penulis
6. Segenap dosen Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran serta pengalaman dalam mendidik penulis dalam bidang keteknikan maupun ilmu tentang kehidupan selama penulis menempuh pendidikan sarjana di Teknik Mesin ITS
7. Seluruh keluarga besar penulis yang tak henti mendukung, menyemangati, dan mendoakan penulis selama perkuliahan
8. Seluruh teman-teman S2 angkatan Genap 2021 yang telah membantu penulis selama awal masa perkuliahan sampai penulis dapat menyelesaikan perkuliahan
9. Teman-teman S2 yang telah membantu penulis selama masa perkuliahan, mbak ika, mas andi, mas yoga, mas uyab, mas aditia, mbak dika

10. Seluruh keluarga besar PT. INKA yang telah memberikan kesempatan dan dukungan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan masa perkuliahan tepat pada waktunya

Pada akhirnya penulis berharap agar Tesis ini bermanfaat untuk pembaca dan perkembangan ilmu pengetahuan ke depannya.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarokatuh.

Surabaya, 29 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK.....	iii
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.1.1 Rachman Setiawan, Michael Pamintori (2017).....	7
2.1.2 Setiawan, R., dkk (2019)	10
2.2 <i>Structural Crashworthiness</i>	14
2.2.1 Aspek Dasar Tumbukan Tidak Elastis	15
2.2.2 Cedera Akibat Tumbukan.....	16
2.2.3 Konsep Tegangan	19
2.2.4 Konsep Regangan	20
2.2.5 Hubungan antara Tegangan dan Regangan	21

2.2.6	Deformasi	23
2.2.7	Deformasi Plastis pada Laju Regangan Tinggi	24
2.2.8	Hambatan Kereta	26
2.2.9	Konsep Impuls dan Momentum	28
2.2.10	Pulsar Tabrakan	30
2.2.11	<i>Overriding</i>	30
2.3	Metode Elemen Hingga	31
2.3.1	Analisa Metode Elemen Hingga Menggunakan <i>Software</i>	33
2.3.2	Elemen Solid	34
2.3.3	Elemen <i>Shell</i>	34
2.4	Spesifikasi Teknis Kereta Cepat Nasional.....	35
2.5	Standard Nasional dan Internasional mengenai <i>Crashworthiness</i>	37
2.5.1	PM 69:2019	37
2.5.2	BS-EN 15227:2008	38
2.5.3	49 CFR bagian 238.203 dan 238.403	40
BAB 3 METODE PENELITIAN		43
3.1	Tahapan Penelitian.....	43
3.2	<i>Pre-Processing</i>	44
3.2.1.	Pembuatan Model.....	44
3.2.2.	<i>Meshing</i>	46
3.3	<i>Processing</i>	47
3.3.1	<i>Material Properties</i>	47
3.3.2	Pendefinisian Kekakuan Model.....	48
3.3.3	<i>Point Mass</i>	48
3.3.4	<i>Contact</i>	50
3.3.5	Kondisi Batas.....	51

3.4	<i>Post Processing</i>	52
3.5	Validasi dan Pengolahan Data	52
3.5.1	Validasi.....	52
3.5.2	<i>Grid Independency</i>	55
3.5.3	Pengolahan Data	57
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		59
4.1	<i>Survival space</i>	59
4.1.1	Deformasi pada Desain <i>Existing</i>	59
4.1.2	Deformasi pada Desain Variasi A	63
4.1.3	Deformasi pada Desain Variasi B.....	68
4.1.4	Perbandingan <i>Survival space</i>	72
4.2	<i>Crash force</i>	78
4.2.1	<i>Crash force</i> pada Desain <i>Existing</i>	78
4.2.2	<i>Crash force</i> pada Desain Variasi A	82
4.2.3	<i>Crash force</i> pada Desain variasi B	86
4.2.4	Pembahasan <i>Crash force</i>	90
4.3	<i>Energy Absorption</i>	94
4.3.1	<i>Energy Absorption</i> pada Kecepatan tabrak 10 m/s.....	94
4.3.2	<i>Energy Absorption</i> pada Kecepatan tabrak 14,75 m/s.....	95
4.3.3	<i>Energy Absorption</i> pada Kecepatan tabrak 20 m/s.....	96
4.3.4	<i>Energy Absorption</i> pada Kecepatan tabrak 27,78 m/s.....	98
4.4	<i>Deceleration pulse</i>	99
4.4.1	<i>Deceleration pulse</i> pada kecepatan tabrak 10 m/s.....	99
4.4.2	<i>Deceleration pulse</i> pada kecepatan tabrak 14,75 m/s.....	101
4.4.3	<i>Deceleration pulse</i> pada kecepatan tabrak 20 m/s.....	103
4.4.4	<i>Deceleration pulse</i> pada kecepatan tabrak 27,78 m/s.....	105

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	109
5.1 Kesimpulan	109
5.2 Saran	111
DAFTAR PUSTAKA.....	113

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Jumlah kecelakaan berdasarkan korban kecelakaan per tahun 2015-2021 (Direktorat Jenderal Perkeretaapian, 2021)	2
Gambar 1.2 Survey kecelakaan kereta berdasarkan kecepatan saat terjadi kecelakaan (Sullivan, 2011)	3
Gambar 2.1 Model geometri kereta penumpang yang sudah disederhanakan (Setiawan & Michael Pamintori, 2017).....	8
Gambar 2.2 <i>Meshing</i> model elemen hingga kereta penumpang (Setiawan & Michael Pamintori, 2017).....	8
Gambar 2.3 Respons gaya terhadap deformasi struktur kereta pada kasus tabrakan dengan dinding kaku (Setiawan & Michael Pamintori, 2017).....	9
Gambar 2.4 Tampak Samping (a) dan Tampak Atas (b) dari Bagian Depan Kereta Setelah Deformasi Akhir (Setiawan & Michael Pamintori, 2017).....	10
Gambar 2.5 Tampak samping (a) Lokasi <i>Crash Zone Area</i> (b) Komponen utama pada <i>Crash Zone Area</i> (Setiawan et al., 2019).....	11
Gambar 2.6 Komponen penyusun modul penyerap impak (Setiawan et al., 2019).....	12
Gambar 2.7 Mode kegagalan yang terjadi pada <i>Centersill</i> (Setiawan et al., 2019).....	13
Gambar 2.8 Perbandingan penerapan <i>Anticlimber</i> pada kereta konvensional (Setiawan et al., 2019).....	13
Gambar 2.9 (a) Massa M2 melaju dengan kecepatan V_2 ke arah massa diam M1 (b) Gaya <i>horizontal</i> pada massa M2 sesaat setelah terjadi tumbukan (Ambrósio, 2001)	16
Gambar 2.10 Toleransi keseluruhan tubuh terhadap <i>impact</i> (Huston & Perrone, 1978)	17

Gambar 2.11 Pengaruh durasi pulsar pada toleransi keseluruhan tubuh terhadap <i>impact</i> (Macaulay, 1987).....	18
Gambar 2.12 Variasi kriteria cedera kepala berdasarkan kecepatan serta percepatan maupun perlambatan ketika tabrakan (Macaulay, 1987).....	19
Gambar 2.13 Tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada bidang 3-dimensi (Hibbeler, 2016)	20
Gambar 2.14 Diagram tegangan - regangan (Hibbeler, 2016)	21
Gambar 2.15 Grafik gaya tarik kereta terhadap kecepatan kereta (Shalahuddin et al., 2020).....	26
Gambar 2.16 Grafik impuls berdasarkan gaya yang bekerja (Hibbeler, 2016)	29
Gambar 2.17 Grafik pulsar tabrakan (Sequeira & Brandmeier, 2020).....	30
Gambar 2.18 <i>Vertical Relative Distance</i> (Zhou et al., 2012)	31
Gambar 2.19 Grafik Perubahan Posisi Titik Tabrak Kereta (Zhou et al., 2012)	31
Gambar 2.20 <i>Element</i> dan <i>Node</i> (Cook, 1994).....	32
Gambar 2.21 View atas, samping, depan, dan potongan kereta cepat nasional	35
Gambar 2. 22 Spesifikasi Komponen CEM (a) <i>Coupler</i> dengan <i>Deformation Tube</i> (b) <i>Anti Climber</i> dengan <i>Buffer</i>	36
Gambar 2.23 Skematik pembebanan sStatis pada ujung kereta (Tyrell, 2002)	41
Gambar 2.24 Ilustrasi skematik penyerapan energi pada kereta kecepatan tinggi.....	42
Gambar 3.1 Model tiga dimensi lokomotif kereta cepat nasional	44
Gambar 3.2 Model <i>existing surface</i> lokomotif kereta cepat nasional	45
Gambar 3.3 Konfigurasi <i>main frame</i> variasi A (Xue et al., 2005) dan variasi B (Hou et al., 2021).....	46
Gambar 3.4 Jenis kekakuan model pada ANSYS Mechanical.....	48

Gambar 3.5 Pemberian <i>Mass Point</i>	49
Gambar 3.6 <i>Center of Gravity</i> kereta	49
Gambar 3.7 Hasil simulasi individu komponen (a) <i>anti climber</i> dengan <i>buffer</i> (b) <i>coupler</i> dengan <i>deformation tube</i>	50
Gambar 3. 8 Grafik <i>Crusing Force</i> (Wang et al., 2019)	54
Gambar 3.9 Grafik <i>Crushing Force</i> validasi	54
Gambar 3.10 Grafik hasil uji konvergen	55
Gambar 3.11 Grafik kesetimbangan energi simulasi <i>Crashworthiness</i>	56
Gambar 4.1 Tahapan tabrakan desain <i>existing</i> pada kecepatan 10 m/s.....	60
Gambar 4.2 Tahapan tabrakan desain <i>existing</i> pada kecepatan 14,75 m/s..	61
Gambar 4.3 Tahapan tabrakan desain <i>existing</i> pada kecepatan 20 m/s.....	62
Gambar 4.4 Tahapan tabrakan desain <i>existing</i> pada kecepatan 27,78 m/s..	63
Gambar 4.5 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 10 m/s.....	64
Gambar 4.6 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 14,75 m/s	65
Gambar 4.7 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 20 m/s.....	66
Gambar 4.8 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 27,78 m/s	67
Gambar 4.9 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 10 m/s.....	69
Gambar 4.10 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 14,75 m/s	70
Gambar 4.11 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 20 m/s ...	71
Gambar 4.12 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 27,78 m/s	72
Gambar 4.13 <i>Survival space</i> pada kecepatan tabrak 10 m/s.....	74
Gambar 4.14 <i>Survival space</i> pada kecepatan tabrak 14,75 m/s.....	75
Gambar 4.15 <i>Survival space</i> pada kecepatan tabrak 20 m/s.....	76
Gambar 4.16 <i>Survival space</i> pada kecepatan tabrak 27,78 m/s.....	77
Gambar 4.17 Grafik <i>crash force</i> desain <i>existing</i> pada kecepatan tabrak 10 m/s	79
Gambar 4.18 Grafik <i>crash force</i> desain <i>existing</i> pada kecepatan tabrak 14,75 m/s	80

Gambar 4.19 Grafik <i>crash force</i> desain <i>existing</i> pada kecepatan tabrak 20 m/s	81
Gambar 4.20 Grafik <i>crash force</i> desain <i>existing</i> pada kecepatan tabrak 27,78 m/s	82
Gambar 4.21 Grafik <i>crash force</i> desain variasi A pada kecepatan tabrak 10 m/s	83
Gambar 4.22 Grafik <i>crash force</i> desain variasi A pada kecepatan tabrak 14,75 m/s	84
Gambar 4.23 Grafik <i>crash force</i> desain variasi A pada kecepatan tabrak 20 m/s	85
Gambar 4.24 Grafik <i>crash force</i> desain variasi A pada kecepatan tabrak 27,78 m/s	86
Gambar 4.25 Grafik <i>crash force</i> desain variasi B pada kecepatan tabrak 10 m/s	87
Gambar 4.26 Grafik <i>crash force</i> desain variasi B pada kecepatan tabrak 14,75 m/s	88
Gambar 4.27 Grafik <i>crash force</i> desain variasi B pada kecepatan tabrak 20 m/s	89
Gambar 4.28 Grafik <i>crash force</i> desain variasi B pada kecepatan tabrak 27,78 m/s	89
Gambar 4.29 Grafik perbandingan <i>crash force</i> pada kecepatan tabrak 10 m/s	90
Gambar 4.30 Grafik perbandingan <i>crash force</i> pada kecepatan tabrak 14,75 m/s	91
Gambar 4.31 Grafik perbandingan <i>crash force</i> pada kecepatan tabrak 20 m/s	92
Gambar 4.32 Grafik perbandingan <i>crash force</i> pada kecepatan tabrak 27,78 m/s	93
Gambar 4.33 Grafik perbandingan <i>energy absorption</i> pada kecepatan tabrak 10 m/s	95
Gambar 4.34 Grafik perbandingan <i>energy absorption</i> pada kecepatan tabrak 14,75 m/s	96

Gambar 4.35 Grafik perbandingan <i>energy absorption</i> pada kecepatan tabrak 20 m/s	97
Gambar 4.36 Grafik perbandingan <i>energy absorption</i> pada kecepatan tabrak 27,78 m/s	98
Gambar 4.37 Grafik perbandingan <i>deceleration pulse</i> pada kecepatan tabrak 10 m/s	99
Gambar 4.38 Grafik perbandingan <i>deceleration pulse</i> pada kecepatan Tabrak 14,75 m/s	101
Gambar 4.39 Grafik perbandingan <i>deceleration pulse</i> pada kecepatan tabrak 20 m/s	103
Gambar 4.40 Grafik perbandingan <i>deceleration pulse</i> pada kecepatan tabrak 27,78 m/s	105

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat material SS400 (Setiawan & Michael Pamintori, 2017).....	8
Tabel 2.2 Kategori kendaraan kereta api (BS EN 12663, 2010)	38
Tabel 2.3 Kategori desain kereta api untuk kasus <i>Crashworthiness</i> (BS EN15227, 2008).....	39
Tabel 2.4 Skenario tabrakan dan skenario hambatan (BS EN15227, 2008)	40
Tabel 3.1 <i>Material properties</i> Aluminium 6005A-T6.....	47
Tabel 3.2 Perbandingan nilai validasi hasil simulasi dan eksperimen.....	53
Tabel 3. 3 Kualitas <i>Mesh</i>	56
Tabel 5. 1 Hasil Penelitian.....	110

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta Api merupakan salah satu jenis moda transportasi umum yang sangat diminati masyarakat, karena memiliki daya tampung penumpang yang besar untuk sekali perjalanan serta lebih aman dan nyaman. Berdasarkan laporan Badan Pusat Statistik pada tahun 2020 (Badan Pusat Statistik, 2020) jumlah penumpang kereta api mulai dari tahun 2016 hingga tahun 2019 meningkat setiap tahunnya dan hanya menurun pada tahun 2020 disebabkan pandemi Covid-19. Pada tahun 2016 tercatat 351,8 juta penumpang kereta Api, meningkat menjadi 393,3 juta penumpang pada 2017, 422,4 juta penumpang pada 2018, 426,8 juta penumpang pada 2019, lalu mengalami penurunan menjadi 186,1 juta penumpang pada 2020. Namun seiring berkembangnya teknologi moda transportasi dituntut untuk dapat mengakomodir mobilitas penduduk dengan waktu yang lebih singkat. Untuk itu dikembangkanlah kereta api cepat “*High Speed Train (HST)*” kerja sama antara BRIN dan PT. INKA jalur eksklusif yang diharapkan dapat memenuhi hal tersebut.

Kereta api memiliki sistem keamanan yang lebih baik dari moda transportasi lain. Sistem keamanan tersebut berada baik pada sarana maupun prasarana yang secara aktif melindungi kereta dari adanya kemungkinan kecelakaan. Sistem keamanan aktif dapat mencegah terjadinya kecelakaan pada kereta dengan cara menghentikan kereta secara otomatis ketika terjadi keadaan darurat seperti tidak adanya respons masinis, gempa bumi, rangkaian kereta terputus, dan lain-lain. Selain itu sistem keamanan aktif juga dapat memutuskan traksi kereta pada saat terjadi kegagalan pada sistem kereta seperti pintu tidak tertutup, pengereman aktif, udara tekan pada kereta terlalu rendah, *overspeed*, dan lain-lain. Setiap negara memiliki penamaan dan pengembangan sistem keamanan aktif tersendiri seperti contohnya ATP (*Automatic Train Protection*) di Indonesia, ATC (*Automatic Train Control*)

di Jepang, ACSES (*Advanced Civil Speed Enforcement System*) di USA, dan negara lainnya. Namun tidak dipungkiri bahwa dengan adanya berbagai sistem keamanan aktif yang terdapat pada kereta api, kecelakaan masih dapat terjadi. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Perkeretaapian (Direktorat Jenderal Perkeretaapian, 2021), Dapat dilihat pada Gambar 1.1 jumlah kecelakaan kereta api pada tahun 2015-2020 mencapai 130 kejadian dengan total korban 132 jiwa meninggal dunia, dan 283 jiwa luka-luka. Kecelakaan yang terjadi di dominasi oleh anjlokkan dengan jumlah 127 kejadian, 1 kejadian tabrakan antar kereta, dan 2 kejadian lain-lain. Jumlah kejadian tabrakan antar KA memang hanya terjadi 1 kali namun memiliki kontribusi terhadap jumlah korban jiwa yang paling besar dibandingkan anjlokkan dan lain-lain. Sebanyak 252 korban jiwa yang terdiri dari 87 korban meninggal, 79 korban luka berat, dan 86 korban luka ringan. Berdasarkan data tersebut maka tabrakan antar kereta ketika sistem keamanan gagal untuk mencegah kecelakaan memiliki tingkat risiko korban jiwa yang paling tinggi. Oleh sebab itu diperlukan sistem keamanan pasif yang dapat melindungi penumpang ketika terjadi kecelakaan saat sistem keamanan aktif gagal bekerja. Salah satu sistem keamanan pasif yang dapat diterapkan pada kereta api adalah sistem keamanan *Crashworthiness*.

No.	Uraian Descriptions	Satuan Unit	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021 (Semester I)
C. Korban (Orang) / Victim (Person)									
1	Meninggal Dunia / <i>Dead</i>	Orang Person	1	43	87	1	0	0	0
2	Luka Berat / <i>Seriously Injured</i>	Orang Person	3	41	79	1	0	0	0
3	Luka Ringan / <i>Lightly Injured</i>	Orang Person	39	13	86	2	19	0	0
Jumlah Korban Kecelakaan / Total of Victim		Orang Person	43	97	252	4	19	0	0

Gambar 1.1 Jumlah kecelakaan berdasarkan korban kecelakaan per tahun 2015-2021 (Direktorat Jenderal Perkeretaapian, 2021)

Secara garis besar terdapat dua fungsi utama pada *Crashworthiness*. Yang pertama yaitu *Crash Energy Management*, merupakan kemampuan konstruksi kereta untuk dapat menyerap energi impak secara terkontrol saat

terjadi tumbukan akibat dari kecelakaan sehingga dapat mengeliminasi kemungkinan terjadinya beberapa pola kegagalan seperti *Lateral Buckling* dan *Overriding*. Kedua adalah *Occupant protection* yaitu dapat melindungi penumpang dari akibat tumbukan tersebut. Penelitian mengenai desain *Crash Energy Management* pada kereta penumpang di Indonesia sudah beberapa kali dilakukan (Dharma et al., 2016; Setiawan et al., 2019; Setiawan & Michael Pamintori, 2017), namun penelitian tersebut difokuskan untuk kereta di Indonesia dengan kecepatan kurang dari 100 km/jam.

Location	Type of Collision	Speed of Collision (mph) (kmh)	Injuries	Fatalities
Voiron	Grade Crossing	68 109.5	60	1
Mâcon-Loché	Derailment	168 270	27	0
Haute-Picardie	Derailment	182 293	1	0
Vitré	Grade Crossing	87 140	2	0
Bierne	Grade crossing	81 130	7	0
Neau	Grade Crossing	87 140	6	0
Hoeven	Grade Crossing	--	6	0
Eschede	Derailment	124 199.5		101
Guipavas	Grade Crossing	75 120	0	0
Ladbroke Grove	Train to train	130 209	227	31
Brühl	Derailment	75 120	149	9
Laval	Derailment	74 120	0	0
Torredembarra	Train to train	65 104	142	2
Istein	Collision with Obstacle	--	0	0
Saint Romain en Gier	Train to train	18 29	2	0
Thun	Train to train	35 56	9	0
München	Collision with obstacle	122 196	5	0
Tossiat	Grade Crossing	62 100	22	0
Fulda	Collision with obstacle	130 209	38	0
Lambrecht	Collision with obstacle	--	1	0

Gambar 1.2 Survey kecelakaan kereta berdasarkan kecepatan saat terjadi kecelakaan (Sullivan, 2011)

Penelitian mengenai kemampuan crashworthiness pada skala sub komponen seperti *single tube* (Velmurugan & Muralikannan, 2009), *honeycomb structure* (Choiron, 2020), *maupun foam filled* (Toksoy & Güden, 2011), serta penelitian *crash energy arrangement* (Starlinger, 2011) sudah banyak dilakukan. Namun penelitian mengenai kekuatan frame utama dalam

menahan sisa energi impak setelah diserap *crash energy management* belum banyak dibahas. Pada prinsipnya memang area *main frame* di upayakan untuk tidak terkena energi impak sehingga tidak terdeformasi yang mana dapat membahayakan masinis dan penumpang. Namun Berdasarkan beberapa standar mengenai *crashworthiness* (49 CFR Part 238, 2020; BS EN15227, 2008; PM 69, 2019) kecepatan yang diprasyarkan sebagai acuan desain *Crash Energy Management* sama antara kereta cepat maupun kereta konvensional. Sehingga optimasi *crash energy management* pada kereta hanya pada batasan kecepatan dan energi serapan sesuai standar. Padahal dapat dilihat pada Gambar 1.2, hasil survei mengenai kecelakaan kereta cepat didapatkan hasil bahwa kecepatan kereta ketika tabrakan rata-rata 100 km/jam di mana kecepatan tersebut jauh melebihi kecepatan yang diprasyarkan dalam standar.

Berdasarkan alasan tersebut, maka perlu untuk dilakukan penelitian pada kemampuan *Crashworthiness High Speed Train* khususnya pada frame utama dalam menerima energi impak sisa pada kasus tabrakan sesuai standar dan kasus tabrakan khusus pada kecepatan di luar standar. Model yang akan digunakan pada penelitian ini berdasarkan Geometri dan konstruksi pada pengembangan kereta cepat nasional kerja sama BRIN dan PT. INKA. Dari hasil penelitian ini diharapkan penulis dapat mengetahui kemampuan *Crashworthiness High Speed Train* khususnya pada frame utama dalam menerima energi impak sisa berdasarkan standar Nasional dan Internasional yang berlaku untuk selanjutnya dapat dijadikan sebagai referensi dalam pengembangan *High Speed Train* yang selanjutnya.

1.2 Perumusan Masalah

Sebagai salah satu instrumen keamanan pasif, Bagaimana pengaruh variasi konstruksi *mainframe* pada kemampuan *Crashworthiness* Lokomotif Kereta Cepat Nasional dalam menyerap energi impak secara terkontrol dan mengurangi risiko cedera (*Occupant protection*) pada penumpang yang disebabkan karena adanya perlambatan yang terjadi secara tiba-tiba saat terjadi kecelakaan berdasarkan variasi kecepatan sesuai standar Nasional dan

Internasional yang berlaku maupun pada kecepatan melebihi standar Nasional dan Internasional yang berlaku.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun Tujuan dari dilakukannya penelitian tesis ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi konstruksi *mainframe* pada kemampuan *Crashworthiness* Lokomotif Kereta Cepat Nasional dalam menyerap energi impact secara terkontrol dan mengurangi risiko cedera (*Occupant protection*) pada penumpang yang disebabkan karena adanya perlambatan yang terjadi secara tiba-tiba saat terjadi kecelakaan berdasarkan variasi kecepatan sesuai standar Nasional dan Internasional yang berlaku maupun pada kecepatan melebihi standar Nasional dan Internasional yang berlaku.

1.4 Batasan Masalah

Pada Penelitian ini digunakan beberapa batasan sehingga pembahasan yang dilakukan tidak menyimpang dari tujuan yang diinginkan. Adapun batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut :

- a. Analisa dilakukan pada model Lokomotif kereta cepat nasional kerja sama BRIN dan PT. INKA.
- b. Pemodelan 3D serta simulasi *Explicit Dynamic* menggunakan *Software* Ansys dengan *solver* LS-Dyna.
- c. Perhitungan serta kriteria keberterimaan *Crashworthiness* mengacu pada Standard PM 69 tahun 2009 Pasal 31 ayat 3.c (PM 69, 2019), EN 15227 tahun 2008 (BS EN15227, 2008), dan CFR 238.203 & 238.403 tahun 2012 (49 CFR Part 238, 2020).

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap semua pihak. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Meningkatkan pengetahuan tentang *Crashworthiness Analysis* pada Lokomotif *High Speed Train* dengan metode numerik menggunakan bantuan perangkat lunak.

- b. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi industri khususnya dibidang *High Speed Train*.
- c. Sebagai referensi untuk perancangan desain *main frame* dan *Crash Energy Management* Lokomotif *High Speed Train* dan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

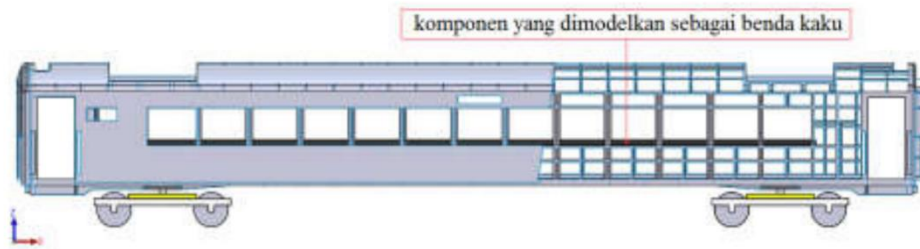
DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik *Crashworthiness* pada kereta di Indonesia, beberapa penelitian tersebut antara lain adalah :

2.1.1 Rachman Setiawan, Michael Pamintori (2017)

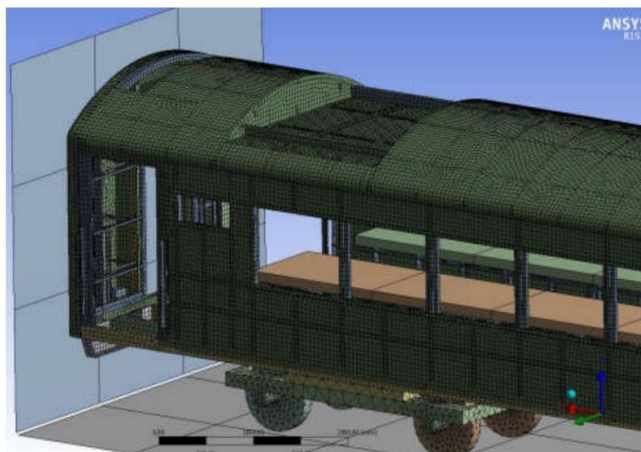
Penelitian dengan judul “Analisis *Crashworthiness* Struktur Kereta Penumpang Indonesia” telah dilakukan oleh Rachman Setiawan, Michael Pamintori pada tahun 2017 (Setiawan & Michael Pamintori, 2017). Dengan latar belakang penelitian banyaknya kasus kecelakaan kereta api yang menyebabkan banyak korban jiwa baik di Indonesia maupun di negara lain, penulis bertujuan untuk mengetahui karakteristik *Crashworthiness* Struktur Kereta Penumpang Indonesia dengan model kereta penumpang K1 desain dari PT. INKA. Model yang digunakan penulis 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. Pembuatan model simulasi menggunakan *shell* elemen berdasarkan model solid desain kereta dengan menghilangkan beberapa detail geometri yang diperkirakan tidak akan mempengaruhi hasil secara signifikan. Selain itu penulis juga mengasumsikan beberapa komponen seperti lintasan, *pivot*, dan *bogie* sebagai benda kaku yang tidak dapat terdeformasi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.1. Material yang digunakan adalah SS400 dengan sifat material tercantum pada Tabel 2.1. Model *Cowper-Symond* digunakan sebagai model sifat laju regangan tinggi material dengan nilai $C=40$ dan $P=5$, serta sifat plastisitas material dimodelkan menggunakan *Piecewise linear plasticity*. Ukuran *mesh* 50 mm digunakan pada proses *meshing* pada seluruh elemen *shell* dan menghasilkan 191.600 elemen, dengan hasil akhir proses *meshing* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Model geometri kereta penumpang yang sudah disederhanakan (Setiawan & Michael Pamintori, 2017)

Tabel 2.1 Sifat material SS400 (Setiawan & Michael Pamintori, 2017)

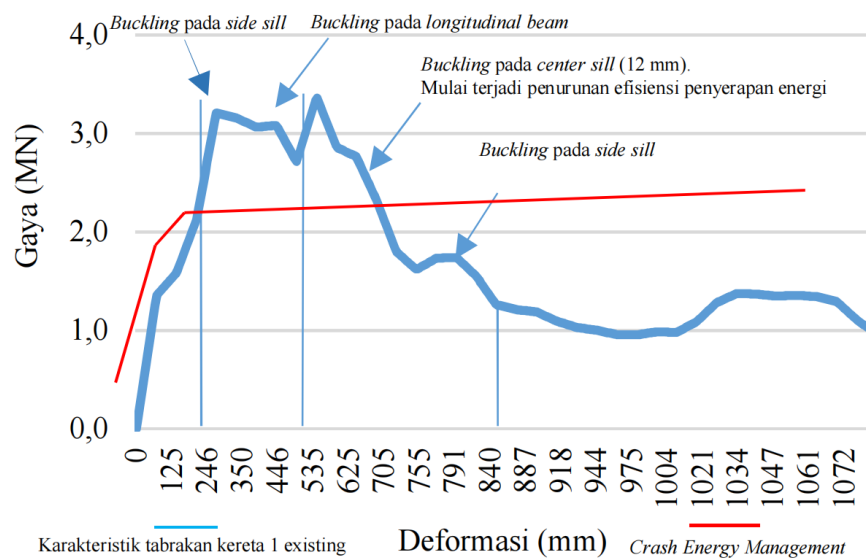
Kuantitas fisik	SS400	Satuan
Massa jenis	7850	Kg/m ³
Rasio Poisson	0,3	-
Modulus elastisitas	200	GPa
Kekuatan luluh	245	MPa
Kekuatan tarik	480	MPa
Modulus tangensial	1000	MPa
Elongasi sampai gagal	23%	-



Gambar 2.2 *Meshing* model elemen hingga kereta penumpang (Setiawan & Michael Pamintori, 2017)

Berdasarkan simulasi yang dilakukan dengan mengacu standar BS-EN 15227:2008 (BS EN15227, 2008) simulasi tabrakan kereta dengan dinding kaku dengan kecepatan 36 Km/jam diperoleh beberapa data seperti

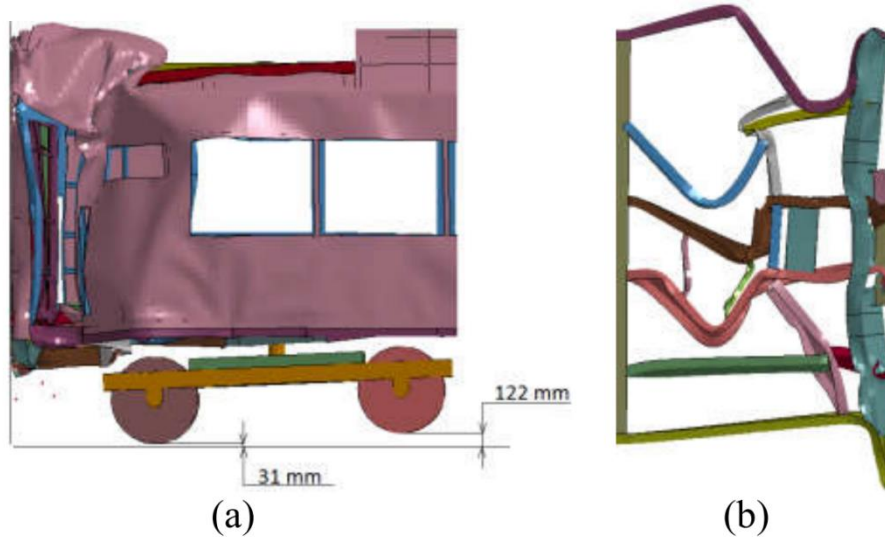
tahapan deformasi hingga bentuk deformasi akhir, respons gaya terhadap deformasi, perlambatan dan penyerapan energi. Terlihat pada Gambar 2.3 bahwa struktur utama, yaitu *center sill* (balok longitudinal dari rangka bawah di sumbu kereta) mulai pada $t = 90$ ms. Secara keseluruhan tabrakan terjadi selama 259 ms hingga seluruh energi impact terserap seperti yang terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Respons gaya terhadap deformasi struktur kereta pada kasus tabrakan dengan dinding kaku (Setiawan & Michael Pamintori, 2017)

Hasil akhir dari simulasi diperoleh bahwa energi yang diserap oleh struktur senilai 1,9 MJ atau 87% dari total energi kinetik, dengan gaya impact puncak mencapai 3,39 MJ. Deformasi longitudinal pengurangan panjang sebesar 1074 mm dengan struktur pada daerah penumpang terdeformasi sebesar 38 mm. Nilai deformasi tersebut masih memenuhi kriteria dari standar yaitu sebesar 156 mm. Namun perpindahan *wheelset* masih terlalu tinggi yaitu 122 mm sedangkan batas standar mensyaratkan perpindahan *wheelset* hanya 22,5 mm. Selain itu Perlambatan rata-rata arah longitudinal di daerah penumpang masih terlalu tinggi yaitu sebesar 8,8 g dengan batas maksimal berdasarkan Standard adalah 5g. Data hasil simulasi tersebut diharapkan dapat dijadikan bahan evaluasi serta bahan acuan dalam

perancangan komponen *crash energy management* pada desain kereta selanjutnya.

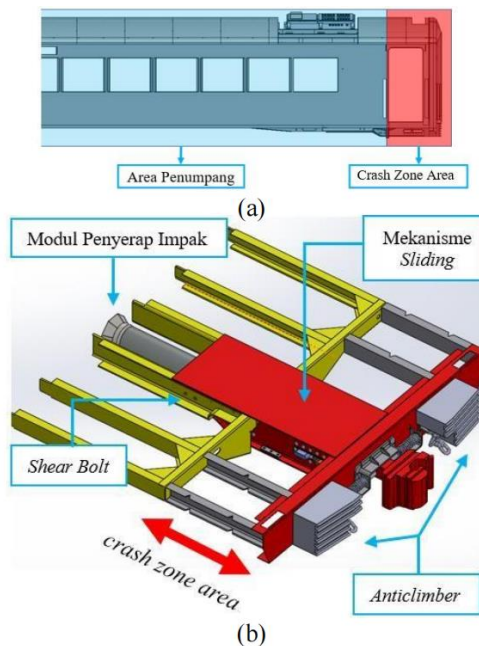


Gambar 2.4 Tampak Samping (a) dan Tampak Atas (b) dari Bagian Depan Kereta Setelah Deformasi Akhir (Setiawan & Michael Pamintori, 2017)

2.1.2 Setiawan, R., dkk (2019)

Berdasarkan hasil dari penelitian pertama dari “Analisis *Crashworthiness* Struktur Kereta Penumpang Indonesia” di mana hasil dari simulasi menunjukkan bahwa energi impact belum terserap sepenuhnya sehingga dapat mengakibatkan kemungkinan deformasi pada area penumpang. Serta nilai *overriding* dan perlambatan rata-rata arah longitudinal yang masih melebihi nilai pada Standard. Penulis melanjutkan penelitian pada model kereta yang sama dengan judul “Perancangan dan Analisis Penyerapan Energi Impact *Crash Zone Area* Kereta Penumpang Nasional” (Setiawan et al., 2019), di mana pada penelitian tersebut penulis menerapkan desain *crash zone area* pada kereta konvensional seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.5. Terdapat 3 variasi yang di analisa pada penelitian tersebut antara lain :

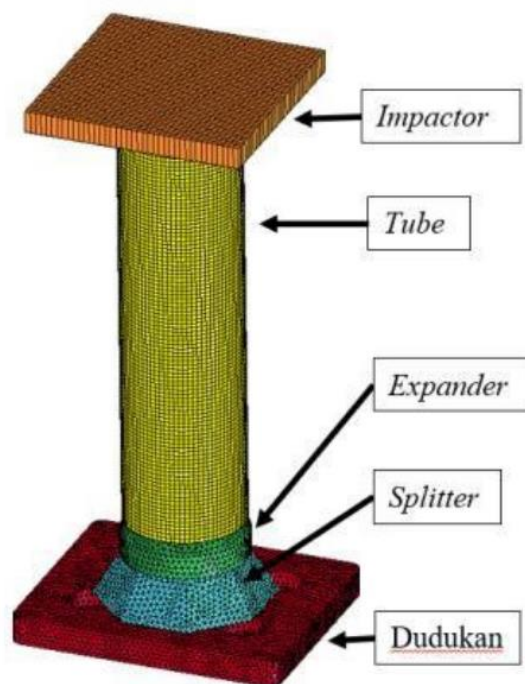
1. Simulasi dinamik plastis skala 1:1 struktur depan kereta konvensional. Dengan tujuan untuk membandingkan kasus tabrakan saat langsir untuk memverifikasi model elemen hingga yang dibuat.
2. Simulasi dinamik plastis skala 1:1 penerapan *anticlimber*. Dengan tujuan untuk mengetahui kemampuan *anticlimber* dalam mencegah terjadinya *overriding*.
3. Simulasi dinamik plastis skala 1:2 rancangan *crash zone area*. Dengan tujuan untuk melakukan evaluasi terhadap kinerja *crash zone area* pada karakteristik respons gaya, deformasi, dan perlambatan serta mengamati fenomena yang terjadi dalam tabrakan.



Gambar 2.5 Tampak samping (a) Lokasi *Crash Zone Area* (b) Komponen utama pada *Crash Zone Area* (Setiawan et al., 2019)

Terdapat 2 komponen utama penyusun modul *crash zone area* yaitu Mekanisme *Sliding*, Modul Penyerap Impak, dan *Anticlimber*. Mekanisme *sliding* bekerja dengan cara *centersill* dan *u-loop* meluncur menabrak modul penyerap impact ketika *shear bolt* gagal pada gaya 130 tonf sebagai komponen aktivasi. Pergerakan meluncur *u-loop* berperan sebagai *impactor* pada modul penyerap impact serta menyebabkan *anticlimber* yang berfungsi

menahan gaya vertikal sehingga sehingga terhindar dari *overriding* pada kedua kereta dapat terkunci. Modul penyerap impact Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.6, bekerja setelah mekanisme *sliding* aktif. Pada tahap awal modul akan mengalami perubahan diameter dan kemudian menumbuk *splitter* yang mengakibatkan sobekan awal pada delapan titik pada modul yang terus menjalar hingga akhir deformasi.

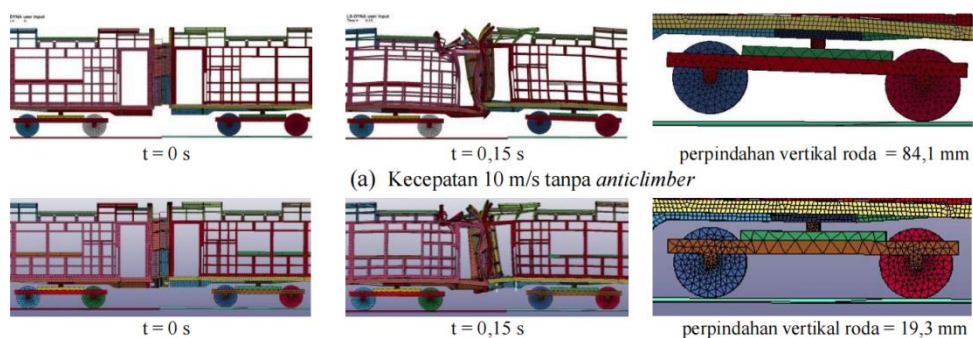


Gambar 2.6 Komponen penyusun modul penyerap impact (Setiawan et al., 2019)

Pemodelan elemen hingga pada simulasi 1 dilakukan dengan skala 1:1 dan kecepatan tumbuk sebesar 10 m/s mengacu pada standar BS EN 15227:2008 (BS EN15227, 2008). simulasi dibandingkan dengan bangkai kereta yang rusak saat proses langsir. Namun karena tidak adanya informasi mengenai kecepatan, deformasi, serta gaya pada saat tumbukan terjadi sehingga perbandingan dilakukan terbatas pada letak dan bentuk deformasi secara visual. Dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 2.7 bahwa letak dan bentuk deformasi hasil simulasi sesuai dengan kejadian lapangan, sehingga dapat dikatakan bahwa pengaturan simulasi valid.



Gambar 2.7 Mode kegagalan yang terjadi pada *Centersill* (Setiawan et al., 2019)



Gambar 2.8 Perbandingan penerapan *Anticlimber* pada kereta konvensional (Setiawan et al., 2019)

Pada simulasi 2 pemodelan skala 1:1 dilakukan dengan dan tanpa *anticlimber*, dengan kecepatan awal 10 m/s dan terdapat perbedaan ketinggian antar kereta pada titik kontak sebesar 40 mm sesuai dengan BS EN 15227:2008 (BS EN15227, 2008). Dapat dilihat pada Gambar 2.8 perbandingan hasil simulasi dengan dan tanpa *anticlimber*. Pada hasil simulasi tanpa *anticlimber* roda mengalami perpindahan sebesar 84,1 mm di mana nilai tersebut telah melewati batas yang ditentukan 15227:2008 (BS EN15227, 2008) yaitu sebesar 21 mm yang merupakan 75% dari ketinggian *flange* roda. Pada hasil simulasi dengan *anticlimber*, roda mengalami

perpindahan vertikal maksimal sebesar 30 mm pada 0,075 s kemudian turun hingga akhir simulasi sebesar 19,3 mm di mana nilai tersebut masih di luar batas maksimal yang diprasyarkan yaitu 21 mm. Namun sesuai 15227:2008 (BS EN15227, 2008) kondisi tersebut masih diperbolehkan sampai 100 mm dengan syarat komponen *anticlimber* kereta berfungsi dengan sempurna dalam menahan gaya vertikal selama tabrakan. Validasi pada simulasi 2 tersebut dilakukan dengan melihat kesetimbangan energi di mana nilai *hourglass energy* hanya sebesar 0,1% dari total energi di mana nilai tersebut masih di bawah 10% sebagai batas untuk simulasi dikatakan valid.

Pada simulasi 3 pemodelan dilakukan dengan skala 1:2 hanya pada *crash zone area* dengan ukuran dan berat di rubah sedemikian hingga untuk memenuhi skala tersebut. Ilustrasi dari model simulasi 3 dapat dilihat pada Gambar 2.9. dari hasil simulasi didapatkan perbandingan antara model konvensional dengan model dengan *crash zone area*. Terdapat penurunan puncak gaya sebesar 24% dari 2,25 MN pada model konvensional menjadi 1,53 MN pada model dengan *crash zone area*. Hal tersebut dikarenakan pada model *crash zone area* deformasi terjadi mencapai 567 mm karena adanya mekanisme *sliding* sehingga menyebabkan rendahnya gaya reaksi. Berbeda dengan model konvensional deformasi terjadi hanya sekitar 377 mm di mana gaya reaksi menjadi lebih besar. Namun besarnya deformasi juga perlu di jaga agar tidak melebihi batas sehingga sampai ke daerah penumpang. Faktor lain yang diperhatikan pada adalah perlambatan yang dirasakan oleh penumpang pada saat terjadi tumbukan, di mana pada model *crash zone area* terdapat penurunan dari perlambatan sebesar 68% dibandingkan dengan model konvensional.

2.2 *Structural Crashworthiness*

Structural Crashworthiness adalah kemampuan suatu struktur untuk dapat menyerap energi impact dan terdeformasi secara terkontrol sehingga dapat melindungi penumpang terhadap kemungkinan cedera. Penelitian mengenai *Structural Crashworthiness* kereta api telah banyak dilakukan baik di dalam negeri (Dharma et al., 2016; Setiawan et al., 2019; Setiawan &

Michael Pamintori, 2017) maupun di luar negeri (Kirkpatrick et al., 2001; Pereira, 2006; Zhao et al., 2021), beberapa optimasi metode terkait analisa *Structural Crashworthiness* juga telah banyak dikembangkan (Dias & Pereira, 2004; Hou et al., 2021; Xie et al., 2018; Zhu et al., 2019). Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam pengujian *Structural Crashworthiness* antara lain :

2.2.1 Aspek Dasar Tumbukan Tidak Elastis

Tumbukan tidak elastis adalah tumbukan di mana energi kinetik pada partikel yang saling bertumbukan berubah menjadi bentuk energi lain seperti panas dan radiasi. Pada kasus *Structural Crashworthiness* tumbukan antar struktur tergolong sebagai tumbukan tidak elastis, karena energi kinetik yang dimiliki oleh struktur yang bertumbukan diserap ke dalam internal energi dari struktur tersebut sehingga terjadi deformasi yang terkontrol. Salah satu contoh tumbukan tidak elastis berdasarkan buku karya Jorge A.C. Ambrosio dengan judul “*Crashworthiness: Energy Management and Occupant protection*” (Ambrósio, 2001), dapat dilihat pada Gambar 2.9 sebuah massa M_1 yang merupakan benda diam ditumbuk oleh massa M_2 yang melaju dengan kecepatan awal V_2 memiliki persamaan momentum linear

$$M_2V_2 = (M_1 + M_2)V_3 \quad (2.1)$$

Di mana V_3 adalah kecepatan rata-rata pada kedua massa sesaat setelah tumbukan tidak elastis terjadi. Oleh karena itu, energi kinetik yang terbuang adalah,

$$K_1 = M_2V_2^2/2 - (M_1 + M_2)V_3^2/2 \quad (2.2)$$

Jika persamaan 2.1 disubstitusikan pada V_3 , maka

$$K_1 = (M_2V_2^2/2)/(1 + M_1 + M_2) \quad (2.3)$$

di mana $M_2V_2^2/2$ adalah energi kinetik awal pada massa M_2 .

Pada kasus *Structural Crashworthiness*, persamaan 5.3 menunjukkan besarnya energi yang harus diserap oleh sistem *Crash Energy Management* pada kereta diam M_1 dan kereta yang melaju M_2 . Untuk tabrakan antar kereta sejenis maka di mana massa M_1 sama dengan massa M_2 ($M_1 = M_2$) maka,

$$K_1 = M_2V_2^2/4 \quad (2.4)$$

Di mana energi kinetik yang harus diserap oleh setiap massa adalah setengah dari energi kinetik awal M_2 . Jika massa M_2 jauh lebih besar dari massa M_1 ($M_2/M_1 \gg 1$) maka,

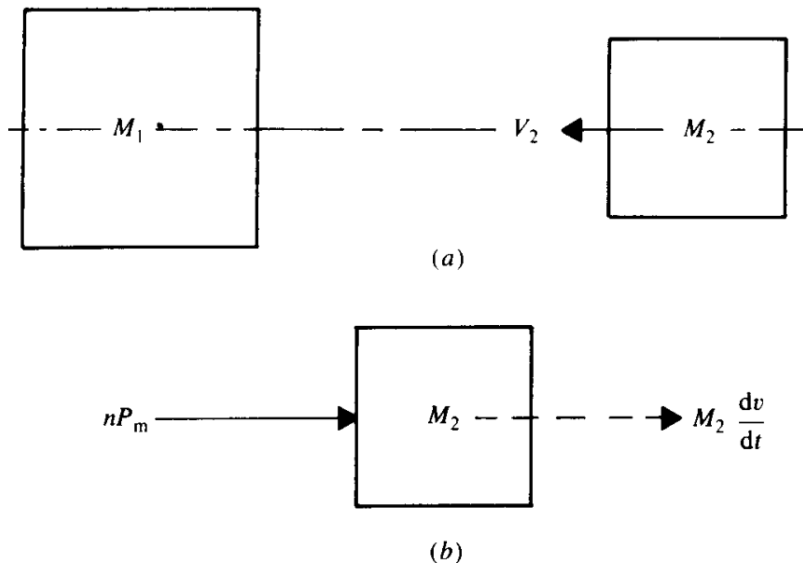
$$K_1 = 0 \quad (2.5)$$

di mana hampir tidak ada energi kinetik yang diserap pada saat tumbukan.

Jika massa M_2 jauh lebih kecil dari massa M_1 ($M_2/M_1 \ll 1$) maka,

$$K_1 = M_2 V_2^2 / 2 \quad (2.6)$$

di mana seluruh energi kinetik harus diserap pada saat tumbukan.



Gambar 2.9 (a) Massa M_2 melaju dengan kecepatan V_2 ke arah massa diam M_1 (b) Gaya *horizontal* pada massa M_2 sesaat setelah terjadi tumbukan (Ambrósio, 2001)

2.2.2 Cedera Akibat Tumbukan

Pada kasus *Crashworthiness* sarana transportasi, perlu juga untuk dipastikan bahwa penumpang dapat mentoleransi adanya percepatan maupun perlambatan secara tiba-tiba saat terjadi tumbukan. Jelas sekali bahwa dalam membuat desain suatu alat transportasi diperlukan pedoman dan kriteria untuk memastikan keselamatan penumpang saat terjadi tabrakan. Namun pedoman dan kriteria keselamatan manusia sangat sulit untuk diperoleh, dan semakin diperumit dengan adanya respons dan toleransi manusia berbeda-

beda tergantung pada berat badan, usia, dan jenis kelamin (Ambrósio, 2001). Dapat dilihat pada Gambar 2.10 berbagai jenis dampak percepatan dan perlambatan pada seluruh tubuh manusia.

Berdasarkan penelitian (Macaulay, 1987) Lama terjadinya percepatan atau perlambatan pada tubuh memiliki peran penting pada tingkat keparahan cedera, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.11. Garis tengah yang memisahkan tingkat keparahan cedera dengan pendekatan rumus,

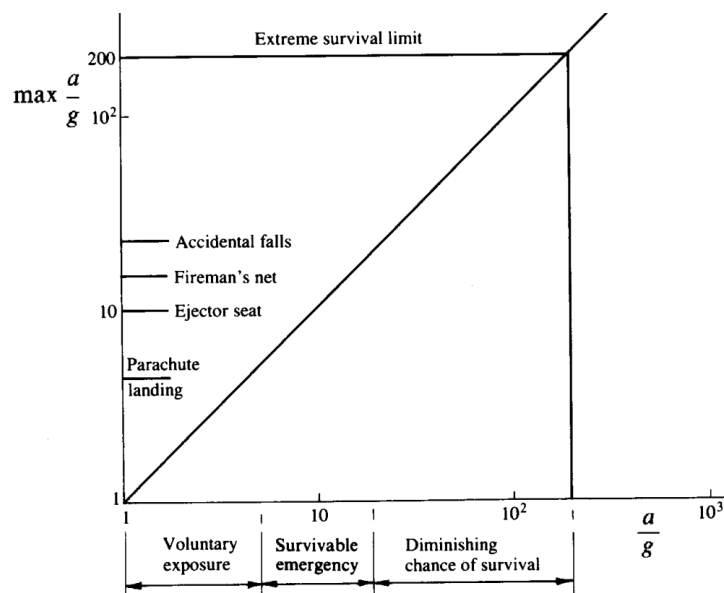
$$T \cdot (a/g)^{2,5} = 1000 \quad (2.7)$$

dengan :

T = durasi pulsar (s)

a = percepatan atau perlambatan saat tabrakan (m/s^2)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)



Gambar 2.10 Toleransi keseluruhan tubuh terhadap *impact* (Huston & Perrone, 1978)

Persamaan 2.7 berlaku pada cedera keseluruhan tubuh pada penumpang yang menggunakan sabuk pengaman, sedangkan untuk bagian tubuh lain yang lebih spesifik memiliki variasi dampak yang berbeda terhadap durasi pulsar. Pulsar tabrak pada perhitungan tersebut diasumsikan konstan dengan fluktuasi pulsar yang diabaikan.

Cedera akibat tabrakan pada bagian kepala memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kematian dan luka fatal. Dengan mengombinasikan Penelitian mengenai ketahanan kepala pada menjatuhkan objek kepala pada permukaan keras (Huston & Perrone, 1978), dengan kasus 2 pada Sub-bab 2.2.1 di mana massa M2 melaju dengan kecepatan V_2 dan menumbuk massa 1 yang jauh lebih besar dari massa 2, menghasilkan Persamaan 2.8, kriteria keparahan cedera pada kepala tingkat kecepatan saat tabrakan serta percepatan maupun perlambatan saat tumbukan (Zhu et al., 2019).

$$HIC = V_2 \cdot a^{1,5} / g^{2,5} \quad (2.8)$$

dengan :

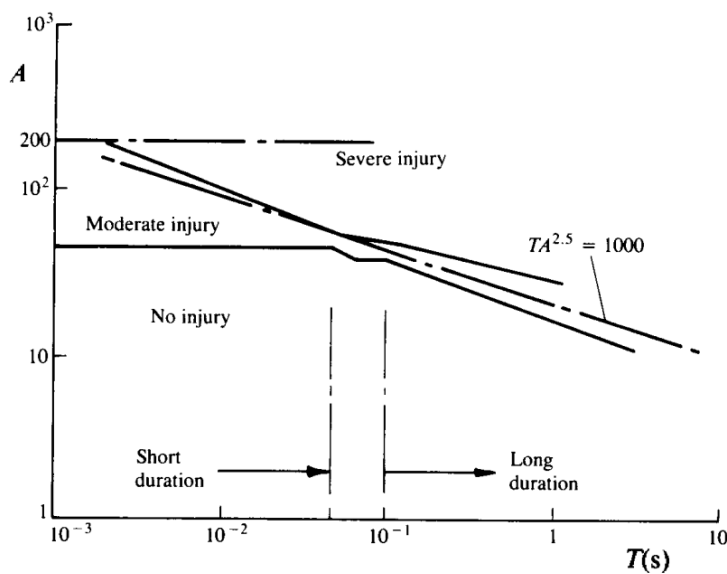
HIC = Kriteria Cedera pada Kepala

V = kecepatan massa penumbuk (m/s)

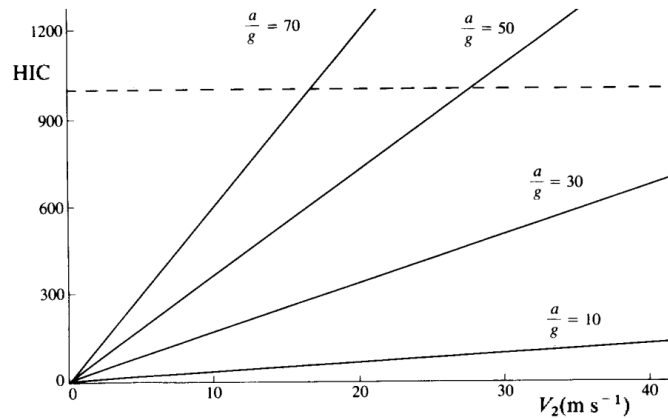
a = percepatan atau perlambatan saat tabrakan (m/s^2)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

HIC merupakan kriteria cedera pada kepala di mana nilai batas cedera kepala yang dapat ditoleransi adalah sebesar 1000. Grafik variasi kriteria cedera kepala berdasarkan kecepatan serta percepatan maupun perlambatan ketika tabrakan sesuai dengan Persamaan 2.8 digambarkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Pengaruh durasi pulsar pada toleransi keseluruhan tubuh terhadap *impact* (Macaulay, 1987)



Gambar 2.12 Variasi kriteria cedera kepala berdasarkan kecepatan serta percepatan maupun perlambatan ketika tabrakan (Macaulay, 1987)

2.2.3 Konsep Tegangan

Tegangan atau *stress* berhubungan dengan kekuatan material pada suatu struktur. Tegangan menggambarkan intensitas gaya internal suatu material yang bekerja pada bidang (luas permukaan) tertentu yang melewati suatu titik. Terdapat dua jenis tegangan, yaitu tegangan normal (*normal stress*) dan tegangan geser (*shear stress*) (Hibbeler, 2016).

Tegangan normal (*normal stress*) merupakan tegangan yang bekerja secara tegak lurus terhadap bidang permukaan benda. Tegangan normal dirumuskan sesuai Persamaan 2.9 dengan σ (sigma) adalah nilai tegangan normal dengan satuan MPa, F adalah gaya internal dengan satuan N, dan A adalah luas bidang penampang dengan satuan m^2 yang dilewati oleh gaya internal tersebut,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

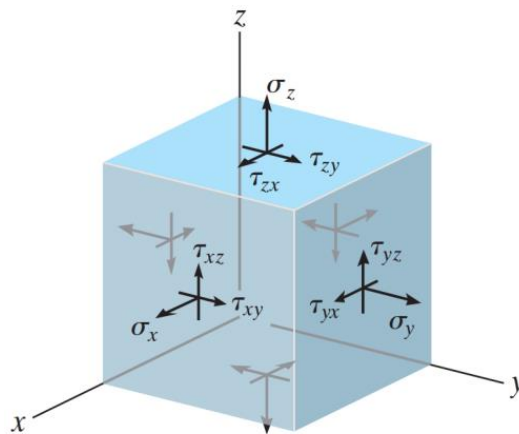
Tegangan normal yang mengarah ke bidang permukaan disebut dengan tegangan tekan (*compressive stress*), sedangkan tegangan normal yang mengarah keluar bidang permukaan disebut dengan tegangan tarik (*tensile stress*) (Macaulay, 1987).

Tegangan geser (*shear stress*) merupakan tegangan yang bekerja secara sejajar terhadap bidang permukaan benda. Tegangan geser dirumuskan sesuai dengan Persamaan 2.10 dengan τ (*tau*) adalah nilai tegangan geser

dengan satuan MPa, V adalah resultan gaya geser pada permukaan sejajar dengan satuan N, dan A adalah luas bidang penampang dengan satuan m^2 (Macaulay, 1987).

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2.10)$$

Terlihat pada Gambar 2.13, jika sebuah material dipotong pada bidang x - z dan y - z , lalu dipotong sebuah bentuk kubus maka dapat dilihat arah tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada bidang luasan kubus tersebut.



Gambar 2.13 Tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada bidang 3-dimensi (Hibbeler, 2016)

2.2.4 Konsep Regangan

Untuk menggambarkan deformasi benda dengan perubahan panjang segmen garis dan perubahan sudut diantaranya, maka dibutuhkan konsep regangan (Hibbeler, 2016). Regangan secara umum dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang suatu bidang terhadap panjang awal bidang tersebut, atau bisa dituliskan dalam rumus sebagai berikut,

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.11)$$

dengan :

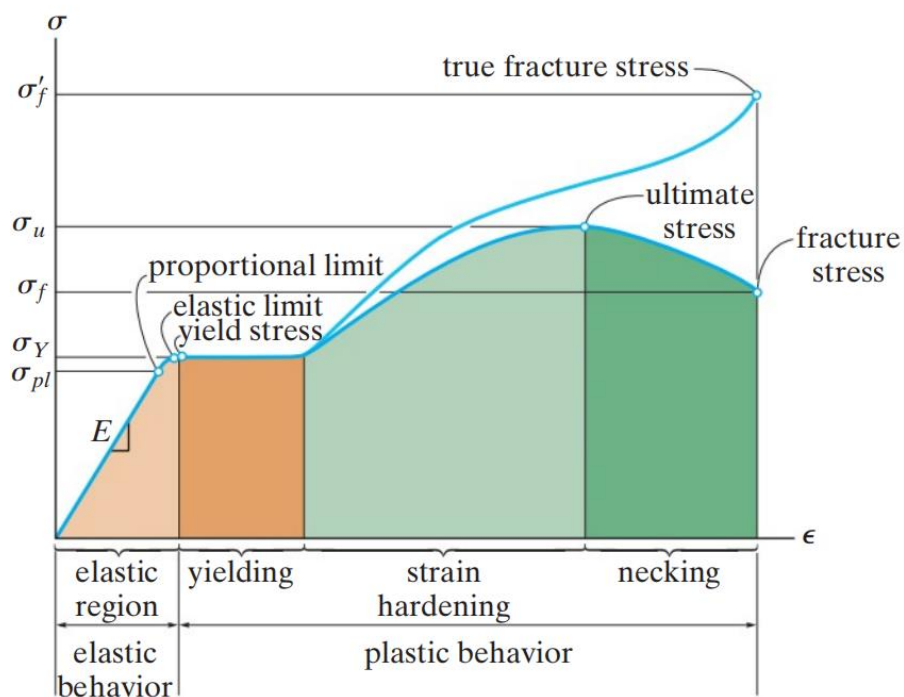
ϵ = regangan (mm/mm)

ΔL = perubahan panjang akhir dan awal (mm)

L_0 = panjang awal (mm)

2.2.5 Hubungan antara Tegangan dan Regangan

Untuk mengetahui hubungan antara tegangan dan regangan, dilakukan eksperimen pada spesimen uji untuk setiap material. Eksperimen dilakukan dengan cara meletakkan spesimen pada sebuah alat tarik dan selanjutnya spesimen ditarik dengan beban *axial* yang bertahap dan selanjutnya diamati besar regangan yang terjadi berbanding dengan besar tegangan yang dibutuhkan oleh alat tarik. Grafik tegangan - regangan memiliki karakteristik yang berbeda-beda pada berbagai material, dan hal tersebut dipengaruhi oleh beberapa variabel seperti komposisi bahan, ketidaksempurnaan mikroskopis, cara pembuatannya, laju pembebanan, dan suhu selama waktu pengujian. Hasil uji hubungan antara tegangan - regangan secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Diagram tegangan - regangan (Hibbeler, 2016)

Diagram tegangan-regangan untuk sebagian besar bahan teknik menunjukkan hubungan linier antara tegangan dan regangan dalam daerah elastis. Akibatnya, peningkatan stres menyebabkan peningkatan regangan yang proporsional. Fakta ini ditemukan oleh Robert Hooke pada tahun 1676 dengan menggunakan pegas dan dikenal sebagai hukum Hooke. Ini dapat dinyatakan secara matematis pada Persamaan 2.12 sebagai berikut,

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.12)$$

Di mana σ adalah tegangan, ϵ adalah regangan, dan E adalah modulus elastisitas atau modulus Young, diambil dari nama Thomas Young yang menemukannya pada tahun 1807 (Hibbeler, 2016).

Perilaku elastis material terjadi ketika regangan pada spesimen berada dalam wilayah oranye terang. Di sini kurva sebenarnya adalah garis lurus di sebagian besar wilayah ini, sehingga tegangannya sebanding dengan regangan. Bahan di daerah ini dikatakan elastis linier. Batas tegangan atas untuk hubungan linier ini disebut batas proporsional. Jika tegangan sedikit melebihi batas proporsional, kurva cenderung menekuk dan mendatar seperti yang ditunjukkan. Ini berlanjut sampai tegangan mencapai batas elastis. Setelah mencapai titik ini, jika beban dilepas, spesimen masih akan kembali ke bentuk aslinya.

Sedikit peningkatan tegangan di atas batas elastis akan mengakibatkan kerusakan material dan menyebabkannya berubah bentuk secara permanen. Perilaku ini disebut *yielding*. Tegangan yang menyebabkan luluh disebut tegangan luluh atau titik leleh, dan deformasi yang terjadi disebut deformasi plastis. Untuk baja karbon, titik leleh sering dibedakan dengan dua nilai. Titik leleh atas terjadi pertama, diikuti dengan penurunan mendadak dalam kapasitas angkut beban ke titik leleh yang lebih rendah. Perhatikan bahwa setelah titik leleh tercapai, maka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14, spesimen akan terus memanjang (regangan) tanpa ada peningkatan beban. Ketika bahan dalam keadaan ini, sering disebut sebagai plastik sempurna.

Ketika peluluhan telah berakhir, peningkatan beban dapat didukung oleh spesimen, menghasilkan kurva yang naik terus menerus tetapi menjadi lebih datar hingga mencapai tegangan maksimum yang disebut tegangan maksimum. Kenaikan dalam kurva dengan cara ini disebut *strain hardening*, dan diidentifikasi pada Gambar 2.14 sebagai daerah berwarna hijau muda.

Sampai tegangan maksimum, saat spesimen memanjang, luas penampang akan berkurang. Penurunan ini cukup seragam di seluruh panjang pengukur spesimen, akan tetapi, setelah itu, pada tegangan maksimum, luas penampang akan mulai berkurang di daerah lokal spesimen. Akibatnya, penyempitan atau "leher" cenderung terbentuk di wilayah ini karena spesimen semakin memanjang. Daerah kurva karena *necking* ini ditunjukkan dengan warna hijau tua pada Gambar 2.14. Di sini diagram tegangan regangan cenderung melengkung ke bawah sampai spesimen rusak pada tegangan fraktur (Hibbeler, 2016).

2.2.6 Deformasi

Setiap kali gaya diberikan pada suatu benda, gaya tersebut akan cenderung mengubah bentuk dan ukuran benda tersebut. Perubahan ini disebut sebagai deformasi, dan mungkin sangat terlihat atau hampir tidak terlihat. Misalnya, karet gelang akan mengalami deformasi yang sangat besar saat diregangkan. Dalam pengertian umum, deformasi suatu benda tidak akan seragam di seluruh volumenya, sehingga perubahan dalam geometri ruas garis mana pun dalam benda tersebut dapat bervariasi secara substansial di sepanjang panjangnya. Oleh karena itu, untuk mempelajari perubahan deformasi dengan cara yang lebih seragam, harus dipertimbangkan segmen garis yang sangat pendek dan terletak di sekitar suatu titik. Bagaimanapun, perubahan ini juga akan bergantung pada orientasi ruas garis pada titik tersebut. Misalnya, ruas garis dapat memanjang jika diorientasikan ke satu arah, sedangkan ruas garis dapat berkontraksi jika diorientasikan ke arah lain (Hibbeler, 2016).

Dalam benda kontinu, bidang yang terdeformasi dihasilkan dari tegangan yang diaplikasikan akibat adanya gaya atau pemuaian di dalam benda. Hubungan antara tegangan dan regangan diekspresikan sebagai

persamaan *konstitutif*, seperti hukum Hooke mengenai elastisitas linear. Benda yang terdeformasi dapat kembali ke kondisi semula setelah gaya yang diaplikasikan dilepas disebut deformasi elastis. Selain itu, benda yang terdeformasi namun tidak dapat kembali ke kondisi semula ketika gaya yang diaplikasikan dilepas disebut deformasi plastis. Deformasi plastis terjadi ketika benda telah melewati batas elastis atau *yield* dan merupakan hasil dari *slip* atau mekanisme dislokasi pada tingkat atom.

2.2.7 Deformasi Plastis pada Laju Regangan Tinggi

Perubahan laju regangan dapat memengaruhi sifat mekanik dari suatu material dan juga respons tegangan-regangan dari material tersebut, di mana sifat mekanik suatu material merupakan aspek yang sangat penting dalam ilmu keteknikan. Sifat mekanik suatu material pada laju regangan rendah dan laju regangan tinggi tidak akan sama. Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai pengaruh laju regangan terhadap respons tegangan regangan seperti yang dilakukan oleh Kenny Wiratno pada tahun 2020 dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Laju Regangan terhadap Respons Tegangan-Regangan *Bulk Adhesive*” (Wiratno, 2020) yang mendapatkan hasil bahwa semakin tinggi laju regangan maka energi serapan akan meningkat, modulus elastisitas tidak berubah, kurva tegangan-regangan akan semakin besar, serta *yield strength* akan meningkat.

Penelitian lain dilakukan oleh Benidiktus Handoko dan Tulung Prayoga pada tahun 2013 dengan judul “Pengaruh Variasi Laju Regangan Linier terhadap Data Hasil Uji Tarik Pelat Aluminium” (Handoko & Prayoga, 2010) memberikan hasil bahwa semakin tinggi laju regangan maka kekuatan tarik putus bahan meningkat tetapi regangan maksimal menurun begitu pula dengan nilai *hardening exponent*, sedangkan kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) cenderung tidak terpengaruh oleh laju regangan linier.

Laju regangan pada deformasi plastis suatu material didefinisikan dalam sebuah persamaan yang merupakan fungsi dari regangan, tegangan, laju regangan, dan *temperature*. Deformasi plastis sendiri merupakan sebuah proses di mana ketika sebuah benda yang diberikan gaya yang menyebabkan

benda tersebut berubah bentuk, tidak dapat kembali lagi ke bentuk semula setelah gaya tersebut dihilangkan, atau dapat disebut juga sebagai proses *irreversible*. Respons material pada suatu titik tegangan-regangan dalam deformasi plastis bergantung pada deformasi struktur yang bervariasi ketika dikenakan pembebanan dinamik karena pengaruh regangan, laju regangan, *temperature*, dan keadaan tegangan tertentu.

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (2.13)$$

dengan :

σ = tegangan

ε = regangan

$\dot{\varepsilon}$ = laju regangan

T = temperatur

Salah satu persamaan yang digunakan dalam mendeskripsikan perilaku plastis suatu material dalam fungsi laju regangan dan temperatur adalah model material Johnson-Cook dalam Persamaan 2.14 (Meyer & Kleponis, 2001) sebagai berikut,

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) [1 - (\frac{T-T_r}{T_m-T_r})^m] \quad (2.14)$$

dengan :

σ = tegangan

σ_0 = *initial yield*

B = *hardening constant*

ε = regangan

n = *hardening exponent*

C = *strain rate constant*

$\dot{\epsilon}$ = strain rate

$\dot{\epsilon}_0$ = reference strain rate

T = temperature

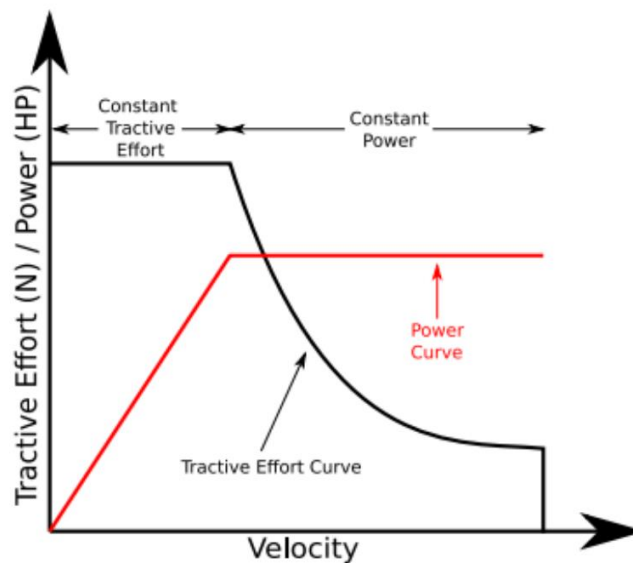
T_r = reference temperature

T_m = melting temperature

m = thermal softening exponent

2.2.8 Hambatan Kereta

Kereta dapat bergerak karena adanya komponen penggerak (motor) pada rangkaian kereta. Kekuatan yang dihasilkan oleh komponen penggerak untuk menggerakkan kereta kerap disebut sebagai gaya tarik atau *tractive effort*. Ketika kereta sedang melaju pada lintasannya, terdapat gaya hambat atau *train resistance* yang diterima oleh kereta tersebut. Ketika *tractive effort* lebih besar dari *train resistance*, maka kereta akan bergerak maju. Sebaliknya, ketika *tractive effort* lebih kecil dibandingkan *train resistance*, maka kereta akan mengalami perlambatan hingga berhenti.



Gambar 2.15 Grafik gaya tarik kereta terhadap kecepatan kereta (Shalahuddin et al., 2020)

Dilihat dari Gambar 2.15, kurva dari *tractive effort* dan *train resistance* bergerak secara berlawanan arah, dan akan berpotongan pada sebuah titik yang menjadi “*balanced speed*”, yaitu kecepatan maksimum yang dapat dicapai kereta di bawah kondisi operasi yang dijelaskan oleh kedua kurva (Henderson, 1904).

Menurut (Shalahuddin et al., 2020), Hambatan yang paling diperhitungkan pada umumnya yaitu *Rolling and Air Resistance* (R_r), *Gradient resistance* (R_g) dan *Curvature resistance* (R_c), sehingga hambatan total dalam kereta api atau *Total Train Resistance* (R_t) dirumuskan pada Persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$R_t = R_r + R_g + R_c \quad (2.15)$$

2.2.8.1 Rolling Resistance

Rolling resistance merupakan jumlah total gaya yang harus diatasi oleh *tractive effort* dari lokomotif agar kereta dapat bergerak pada lintasan datar dengan kecepatan konstan. Gaya resistif ini meliputi,

- A. Gaya gesek antara roda dan rel kereta yang bergantung pada kualitas rel.
- B. Hambatan *bearing* yang bervariasi yang bergantung pada berat pada setiap poros, jenis, desain, serta pelumasan pada *bearing* tersebut.
- C. Hambatan udara yang bervariasi yang bergantung pada luas penampang, panjang dan bentuk kendaraan, serta kuadrat kecepatannya.

Dengan total hambatan pada kereta dirumuskan pada Persamaan 2.16 sebagai berikut,

$$R = A + Bv + Cv^2 \quad (2.16)$$

Di mana v adalah kecepatan dari kereta dan A , B , C merupakan konstanta. Setiap sistem perkeretaapian memiliki konstantanya masing-masing. Hambatan *bearing* dan *rolling resistance* bersama-sama disebut hambatan mekanis. (Radosavljevic, 2006)

2.2.8.2 Curve Resistance

Curve resistance merupakan hambatan yang terjadi ketika kereta berbelok pada lengkungan rel dan dapat dirumuskan pada Persamaan 2.17 sebagai berikut,

$$R_c = wK + G \quad (2.17)$$

Di mana G adalah berat lokomotif ditambah dengan berat rangkaian kereta, dan wK adalah hambatan tikungan spesifik yang didapat dari Persamaan 2.18 sebagai berikut:

$$wK = \frac{400}{R-20} \quad (2.18)$$

2.2.8.3 Gradient Resistance

Gradient resistance merupakan hambatan yang terjadi ketika kereta melaju melalui medan yang menanjak, sehingga *tractive effort* atau gaya Tarik yang dibutuhkan menjadi lebih besar dikarenakan kereta melawan gaya berat yang disebabkan oleh gravitasi dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_g = m \cdot g \cdot i \quad (2.19)$$

Di mana m adalah massa kereta, g adalah percepatan gravitasi bumi dan i adalah *track grade (slope)* yang didapatkan dari Persamaan 2.20 sebagai berikut:

$$i = 1000 \tan \theta = 100 \frac{s_y}{s_x} \quad (2.20)$$

Di mana θ adalah derajat kemiringan, s_y adalah jarak kenaikan dan s_x adalah jarak horizontal (Boschetti & Mariscotti, 2012).

2.2.9 Konsep Impuls dan Momentum

Prinsip impuls dan momentum didapatkan dari persamaan gerak yang diintegrasikan terhadap waktu. Persamaan yang dihasilkan akan berguna untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan gaya, kecepatan, dan waktu. Persamaan dari prinsip impuls dan momentum dapat dituliskan dalam Persamaan 2.21 sebagai berikut:

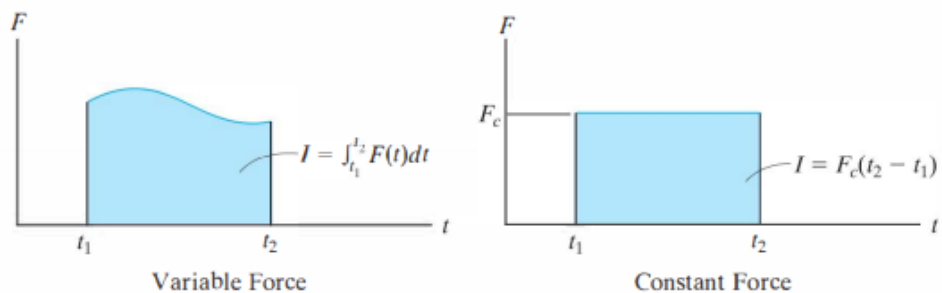
$$\Sigma \int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 - mv_1 \quad (2.21)$$

Dari penurunan tersebut dapat diketahui bahwa persamaan dari prinsip impuls dan momentum hanyalah integrasi waktu dari persamaan gerak. Ini memberikan cara langsung untuk mendapatkan kecepatan akhir partikel v_2 setelah periode waktu tertentu ketika kecepatan awal partikel diketahui dan gaya yang bekerja pada partikel adalah konstan atau dapat dinyatakan sebagai fungsi waktu (Hibbeler, 2016)

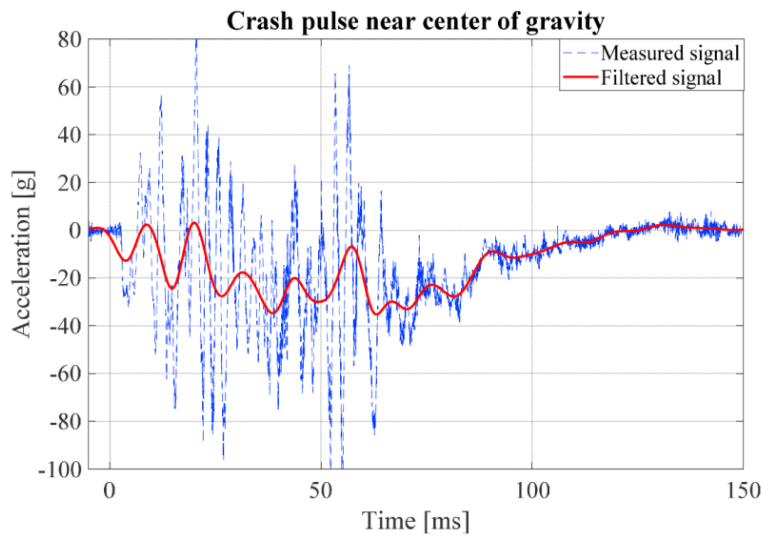
Masing-masing vektor $L = \int mv$ dalam persamaan di atas disebut sebagai momentum linier partikel. Karena m adalah skalar positif, vektor momentum linier memiliki arah yang sama dengan v , dan besarnya mv memiliki satuan kecepatan-massa, misalnya $kg \cdot m/s$ atau $slug \cdot ft/s$ (Hibbeler, 2016).

Integral $I = \int F dt$ dalam persamaan di atas disebut sebagai impuls linier. Istilah ini adalah besaran vektor yang mengukur pengaruh suatu gaya selama gaya bekerja. Karena waktu adalah skalar positif, impuls bertindak searah dengan gaya, dan besarnya memiliki satuan gaya-waktu, seperti $N \cdot s$ atau $lb \cdot s$ (Hibbeler, 2016).

Jika gaya dinyatakan sebagai fungsi waktu, impuls dapat ditentukan dengan evaluasi langsung dari integral. Khususnya, jika gaya konstan dalam besar dan arah, impuls yang dihasilkan menjadi:



Gambar 2.16 Grafik impuls berdasarkan gaya yang bekerja (Hibbeler, 2016)



Gambar 2.17 Grafik pulsar tabrakan (Sequeira & Brandmeier, 2020)

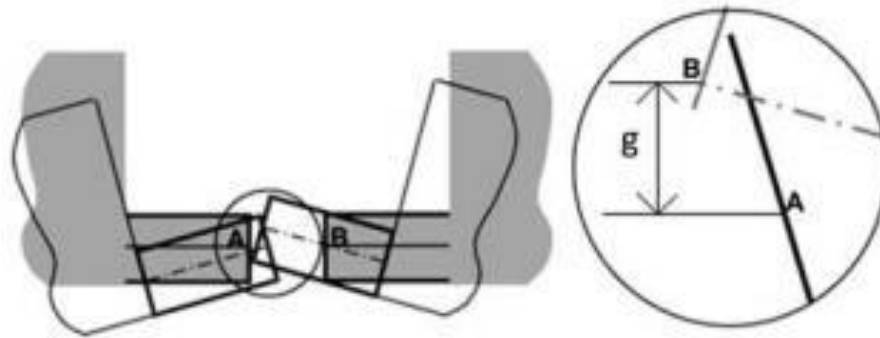
2.2.10 Pulsar Tabrakan

Dapat dilihat pada Gambar 2.17 Grafik Pulsar tabrakan, merupakan sebuah grafik yang menggambarkan gerakan suatu kendaraan selama dalam fase tabrakan, yaitu perlambatan dari kendaraan pada sampel waktu yang berbeda. Perlambatan ini dapat diukur pada titik yang berbeda dari struktur kendaraan. Dari pulsar tabrakan, parameter-parameter fisik dapat dikalkulasi, seperti perubahan kecepatan, perpindahan dan energi terserap. Ketika tabrakan terjadi, kendaraan akan mengalami perlambatan. Ketika perlambatan terjadi, penumpang akan mengalami akselerasi ke depan, tergantung seberapa besar perlambatannya (Sequeira & Brandmeier, 2020).

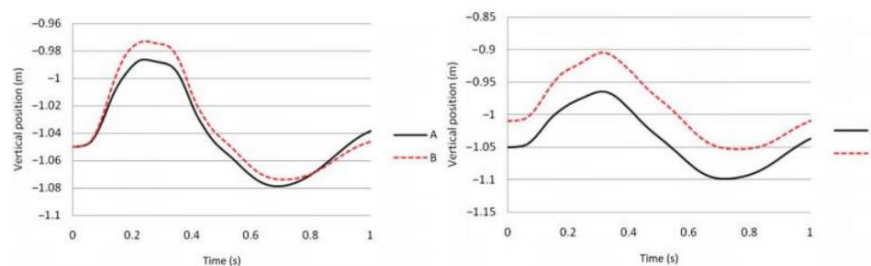
2.2.11 *Overriding*

Overriding merupakan sebuah fenomena yang terjadi ketika suatu kendaraan mengalami tabrakan dan bergerak naik ke atas kendaraan yang ditabrak. *Override* dapat disebabkan oleh perbedaan posisi ketinggian dari dua buah kendaraan atau oleh *pitching motion* (Zhou et al., 2012).

Overriding dapat diketahui dari perbedaan ketinggian titik tabrak dua buah kendaraan ketika tabrakan terjadi, yang biasa disebut sebagai *vertical relative distance*, dan disimbolkan dengan g . Jika nilai g melebihi 150 mm, maka *override* dianggap terjadi (Zhou et al., 2012).



Gambar 2.18 *Vertical Relative Distance* (Zhou et al., 2012)

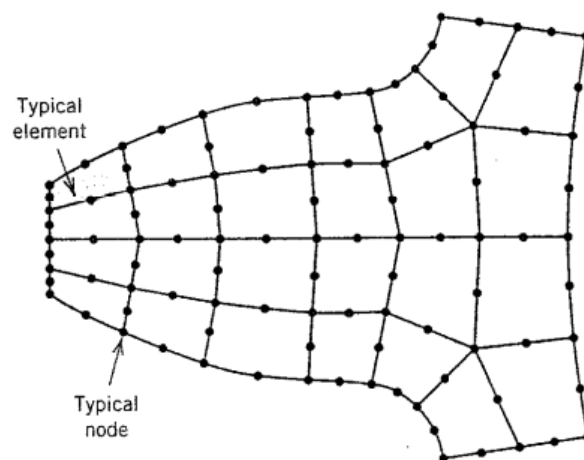


Gambar 2.19 Grafik Perubahan Posisi Titik Tabrak Kereta (Zhou et al., 2012)

2.3 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk menyelesaikan masalah teknik dan fisika matematika. Bidang masalah khas yang menarik dalam fisika teknik dan matematika yang dapat diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga meliputi analisis struktur, perpindahan panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensial elektromagnetik. Untuk masalah yang melibatkan geometri, pembebanan, dan properti material yang rumit, secara umum tidak mungkin mendapatkan solusi matematika analitik. Solusi analitis adalah solusi yang diberikan oleh ekspresi matematika yang menghasilkan nilai kuantitas yang tidak diketahui yang diinginkan di lokasi mana pun dalam tubuh (dalam kasus ini, struktur total atau sistem fisik yang diminati) dan dengan demikian berlaku untuk lokasi dalam jumlah tak terbatas dalam tubuh. Solusi analitis ini umumnya memerlukan solusi persamaan diferensial biasa atau parsial, yang karena geometri, pembebanan,

dan properti material yang rumit, biasanya tidak dapat diperoleh. Oleh karena itu kita perlu mengandalkan metode numerik, seperti metode elemen hingga, untuk solusi yang dapat diterima. Rumusan elemen hingga dari masalah menghasilkan sistem persamaan aljabar simultan untuk penyelesaian, bukan membutuhkan solusi persamaan diferensial. Metode numerik ini menghasilkan nilai perkiraan dari hal-hal yang tidak diketahui pada sejumlah titik diskrit dalam kontinu. Oleh karena itu, proses pemodelan benda dengan membaginya menjadi sistem ekuivalen dari benda atau unit yang lebih kecil (elemen hingga) yang saling berhubungan pada titik yang sama dengan dua atau lebih elemen (titik atau titik nodal) dan/atau garis batas dan/atau permukaan disebut diskritisasi. Dalam metode elemen hingga, alih-alih menyelesaikan masalah untuk seluruh benda dalam satu operasi, kami merumuskan persamaan untuk setiap elemen hingga dan menggabungkannya untuk mendapatkan solusi dari seluruh objek (Logan, 2014).



Gambar 2.20 *Element dan Node* (Cook, 1994)

Metode elemen hingga adalah sebuah cara untuk mendapatkan solusi numerik dari masalah spesifik. Deskripsi sederhana dari metode elemen hingga adalah metode ini melibatkan pemotongan struktur menjadi beberapa elemen, yang menjelaskan perilaku setiap elemen dengan cara yang sederhana, kemudian menghubungkan kembali elemen pada *node* seolah-

olah node adalah pin atau tetesan lem yang menahan elemen bersama, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.20. Proses ini menghasilkan sekumpulan persamaan aljabar simultan. Mungkin ada beberapa ratus atau beberapa ribu persamaan seperti itu, yang artinya implementasi komputer itu wajib. Penjelasan yang lebih lanjut dari metode elemen hingga menganggapnya sebagai interpolasi polinomial sedikit demi sedikit. Yaitu, di atas sebuah elemen, kuantitas bidang seperti perpindahan diinterpolasi dari nilai kuantitas bidang di *node*. Dengan menghubungkan elemen bersama-sama, kuantitas bidang menjadi diinterpolasi di seluruh struktur secara bertahap, sebanyak ekspresi polinom sebanyak jumlah elemen. Nilai terbaik dari kuantitas medan pada node adalah nilai yang meminimalkan beberapa fungsi seperti energi total. Proses minimalisasi menghasilkan sekumpulan persamaan aljabar simultan untuk nilai kuantitas bidang pada node. Symbolisme matriks untuk kumpulan persamaan ini adalah $KD = R$, di mana D adalah vektor yang tidak diketahui (nilai kuantitas bidang pada node), R adalah vektor beban yang diketahui, dan K adalah matriks dari konstanta yang diketahui. Kelebihan metode elemen hingga adalah keserbagunaannya. Struktur yang dianalisis mungkin memiliki bentuk yang berubah-ubah, dukungan yang berubah-ubah, dan beban yang berubah-ubah (Cook, 1994).

2.3.1 Analisa Metode Elemen Hingga Menggunakan Software

Selama beberapa dekade terakhir, banyak program komersial telah tersedia untuk melakukan *Finite Element Analysis*. Di antara sekian banyak pilihan yang telah disediakan untuk melakukan simulasi elemen hingga oleh perusahaan CAE terkemuka, ANSYS *Workbench* adalah platform yang mudah digunakan oleh pengguna dan dirancang untuk mengintegrasikan rangkaian teknologi simulasi teknik canggih ANSYS, Inc. Dengan mulus. ANSYS *Workbench* menawarkan koneksi dua arah ke sistem CAD utama. ANSYS *Workbench* diarahkan untuk meningkatkan produktivitas dan kemudahan penggunaan di antara tim teknik. Ini telah berkembang sebagai alat yang sangat diperlukan untuk pengembangan produk di semakin banyak perusahaan, menemukan penggunaan di banyak bidang teknik yang beragam (Chen & Liu, 2014).

2.3.2 Elemen Solid

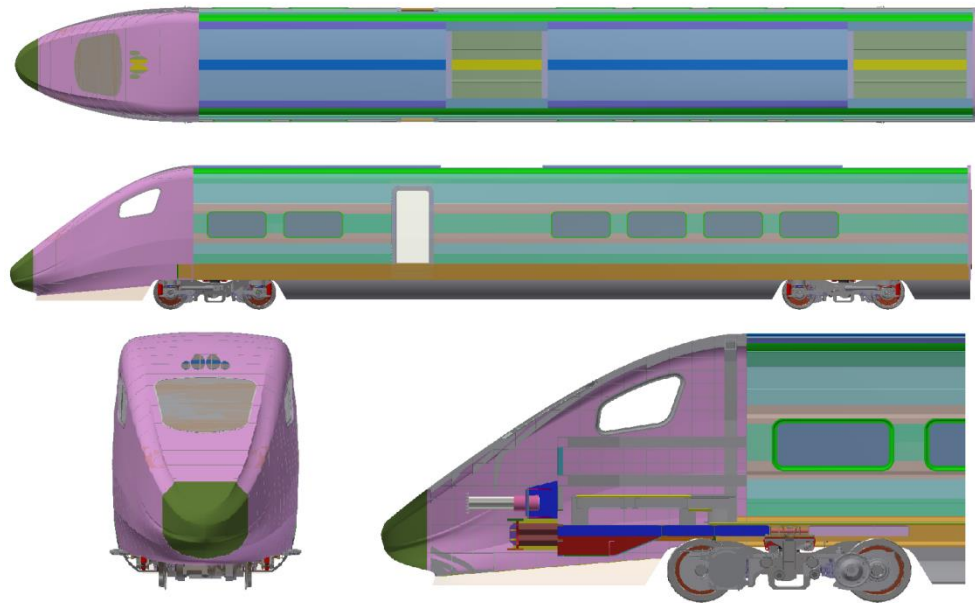
Elemen *solid* atau padat berdasarkan elastisitas 3-D adalah elemen yang paling umum untuk analisis tegangan ketika elemen batang, balok, tegangan/regangan bidang, pelat/kulit yang disederhanakan tidak lagi valid atau akurat. Secara umum, analisis struktural 3-D adalah salah satu cara paling penting dan kuat untuk memberikan wawasan tentang perilaku desain teknik (Chen & Liu, 2014). Jenis elemen ini memiliki geometri yang sepenuhnya ditentukan oleh node elemen. Mereka adalah elemen yang digunakan untuk menyatukan volume di ANSYS. Volume ini dapat dibuat di *pre-processing* ANSYS atau diimpor dari sistem CAD. Elemen *hexahedral* (batu bata) dapat digunakan untuk menyambung volume tipe persegi panjang berbentuk teratur, sedangkan elemen *tetrahedral* (tets) dapat digunakan untuk menyambung volume berapa pun. Bahkan bata linier (jika tidak banyak terdistorsi) dapat memodelkan pelat tipis dalam pembengkokan di luar bidang dengan satu elemen melalui ketebalan karena semuanya secara *default* memiliki "bentuk ekstra" yang diaktifkan. Dengan menggunakan elemen padat akan menghasilkan jumlah elemen dan node yang lebih banyak dibandingkan dengan menggunakan elemen lainnya sehingga akan memakan waktu yang lebih banyak dan membutuhkan *hardware* yang lebih mumpuni pula.

2.3.3 Elemen Shell

Pelat adalah permukaan datar yang diterapkan dengan pembebanan *lateral*, dengan perilaku lentur yang mendominasi respons struktural. *Shell* (kulit) adalah struktur yang membentang di atas permukaan yang melengkung. Mereka membawa baik gaya membran dan tekuk di bawah pembebanan lateral. Ketebalan pelat atau cangkang jauh lebih kecil daripada dimensi struktur lainnya. Berbeda dengan model pelat yang hanya memiliki gaya tekuk, terdapat dua jenis gaya pada *shell*, yaitu gaya membran (dalam gaya bidang) dan gaya tekuk (gaya luar bidang) (Chen & Liu, 2014). Elemen *shell* adalah elemen tipe permukaan. Ini benar-benar elemen 2D yang disebut 3D karena tidak terbatas pada bidang XY seperti elemen padat 2D. Elemen ini dapat ditempatkan di mana saja dalam ruang tiga dimensi dan dapat

berubah bentuk di luar bidang. Elemen *shell* adalah teknik "abstraksi" karena permukaan geometris tidak memiliki ketebalan fisik. Konstanta nyata ANSYS digunakan untuk menetapkan ketebalan ke elemen *shell*. Elemen *shell* juga disebut elemen pelat, dan digunakan untuk memodelkan struktur tipe panel yang ketebalannya kecil dibandingkan dengan dimensi lain dari bagian tersebut. Mereka dapat membawa beban dalam bidang (juga disebut beban membran) dan juga momen lentur dan puntiran di luar bidang. Dengan menggunakan elemen *shell* akan menghasilkan jumlah elemen dan node yang lebih sedikit dibandingkan dengan menggunakan elemen padat sehingga akan memakan waktu yang lebih singkat.

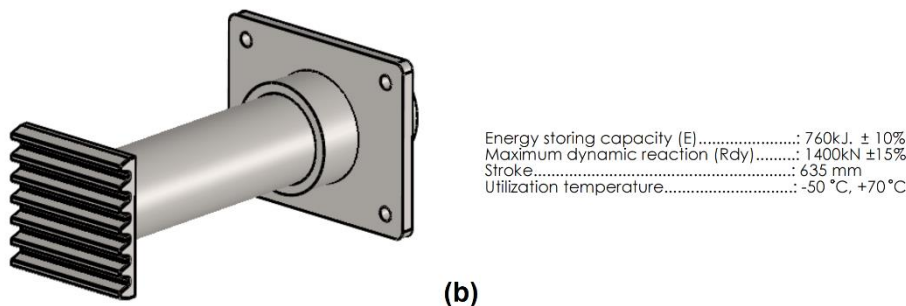
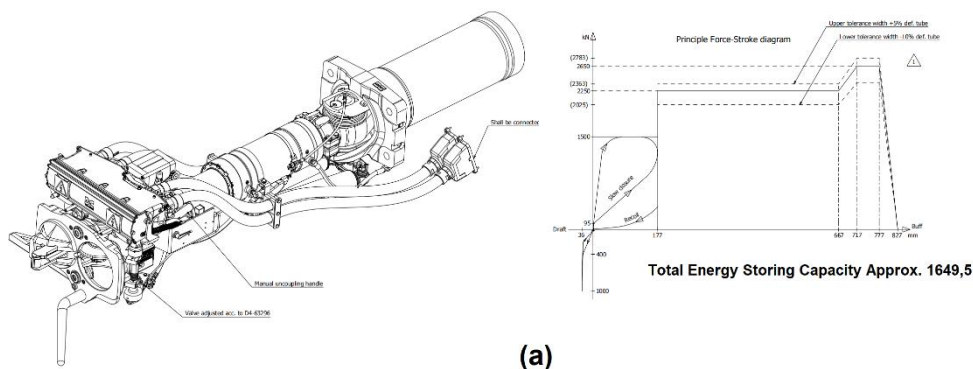
2.4 Spesifikasi Teknis Kereta Cepat Nasional



Gambar 2.21 View atas, samping, depan, dan potongan kereta cepat nasional

Dapat dilihat pada Gambar 2.21 tampak atas, samping, depan, dan potongan kereta cepat nasional. Beroperasi pada *track gauge* 1435 mm dengan radius *track* minimal 400 m pada *mainline* dan 200 m pada depo serta kelandaian maksimal 30 permil, untuk tahap awal pengembangan kereta cepat Nasional terdiri dari 2 car per *trainset* dengan konfigurasi 1 *trailer car* dengan

cabin dan 1 *motor car* dengan *cabin*. Dengan axle load 14-ton naka berat kereta maksimal adalah 46 ton yang akan beroperasi pada lingkungan dengan kelembapan relatif maksimal 98% dan temperatur lingkungan maksimal 90 °C serta mampu mencapai umur teknis selama 30 tahun dengan perawatan yang memadai. Kereta Cepat Nasional ini memiliki kecepatan desain hingga 300 km/h dan kecepatan operasional maksimum 250 km/h. Percepatan minimal pada beban normal adalah 0,4 m/s² dengan perlambatan pada beban normal adalah 0,8 m/s² namun pada kondisi *emergency*, perlambatan minimal yang diprasyaratkan adalah 1,3 m/s².



Gambar 2. 22 Spesifikasi Komponen CEM (a) *Coupler* dengan *Deformation Tube* (b) *Anti Climber* dengan *Buffer*

Kereta cepat nasional dilengkapi dengan modul penyerap energi yang disebut dengan CEM (*Crash Energy Management*). CEM pada kereta cepat nasional terletak pada ujung moncong kereta dan tersusun dari 3 komponen utama. Pertama adalah *Coupler* dengan *deformation tube*, kedua adalah dua buah *anti climber* dengan *buffer*, dan terakhir adalah *crashbox*. *Coupler* dengan *deformation tube* berfungsi sebagai alat perangkai pada kondisi

operasi normal, sedangkan pada kondisi tabrakan ketika *crash force* melebihi kemampuan coupler maka *deformation tube* akan bekerja menyerap energi tabrak. Pada *Anti Climber* dengan *deformation tube* terdapat profil gerigi yang berfungsi untuk mengunci CEM antar kereta yang bertabrakan sehingga tidak terjadi *overriding*, serta *buffer* akan berfungsi membantu menyerap energi tabrak selama tabrakan. *Crashbox* merupakan modul penyerap dampak tambahan ketika kerja *coupler* dengan *deformation tube* telah selesai, dimana *crashbox* merupakan lapisan terakhir penyerap energi pada modul CEM sebelum sisa energi tabrak mengenai *mainframe*. Coupler dengan *deformation tube* dan *anti climber with buffer* merupakan komponen dari supplier dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada Gambar 2.22.

2.5 Standard Nasional dan Internasional mengenai *Crashworthiness*

Pada kasus *Crashworthiness*, Standard dibuat bertujuan untuk memastikan bahwa kereta memiliki dan mampu menyerap energi kinetik secara terkontrol saat terjadi tabrakan. Sehingga dapat meningkatkan kemungkinan penumpang untuk selamat maupun terhindar dari cedera akibat kecelakaan. Berikut adalah beberapa Standard nasional maupun internasional yang mengatur *crashworthiness* pada kereta cepat, antara lain :

2.5.1 PM 69:2019

Peraturan Menteri Perhubungan nomor 69 tahun 2019 mengatur tentang standar spesifikasi teknis kereta api kecepatan tinggi. Adapun klasifikasi kereta api cepat berdasarkan standar ini adalah kereta api yang mempunyai kecepatan lebih dari 200 km/jam. Peraturan tentang *crashworthiness* tercantum pada klausul alat perangkai yaitu pada pasal 31 ayat 2 huruf c di mana pasal tersebut mensyaratkan bahwa alat perangkai “dapat dirancang terintegrasi dengan modul struktur peredam energi tumbukan (*crash energy management*) pada badan kereta”. Standard ini hanya mensyaratkan adanya *crash energy management* di mana performa dari *crash energy management* itu sendiri tidak dijelaskan secara detail. Selain itu kriteria keselamatan penumpang saat terjadi tabrakan juga tidak dijelaskan secara detail.

2.5.2 BS-EN 15227:2008

Standar ini bertujuan untuk mengurangi konsekuensi kecelakaan tabrakan. Tindakan-tindakan yang dipertimbangkan dalam dokumen ini memberikan cara perlindungan terakhir ketika semua kemungkinan pencegahan kecelakaan gagal. Ini menyediakan kerangka kerja untuk menentukan kondisi tabrakan yang harus dirancang oleh badan kendaraan kereta api berdasarkan kecelakaan paling umum dan risiko terkait. Ini juga mendefinisikan fitur keamanan pasif yang sesuai untuk memenuhi persyaratan. Standar ini kompatibel dengan standar EN 12663 (BS EN 12663, 2010). Standar beban kompresi statis pada ujung kendaraan, yang diprasyaratkan oleh EN 12663 (BS EN 12663, 2010), dimaksudkan untuk memberikan integritas struktural dasar ke area yang ditempati dalam kecelakaan jenis tabrakan. Standar ini menambah persyaratan kekuatan dasar dengan menetapkan persyaratan tambahan untuk keamanan pasif struktural. Adapun klasifikasi kendaraan sesuai standar EN 12663 (BS EN 12663, 2010) dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kategori kendaraan kereta api (BS EN 12663, 2010)

<i>Category</i>	<i>Buffer Load</i>	<i>Example</i>
P-I	2000 kN	<i>Coaches and locomotives</i>
P-II	1500 kN	<i>Fixed rake units</i>
P-III	800 kN	<i>Underground and rapid transit vehicles</i>
P-IV	400 kN	<i>light duty metro and heavy duty tramway vehicles</i>
P-V	200 kN	<i>Tramway vehicles</i>

Berdasarkan EN 15227 (BS EN15227, 2008) Desain kategori untuk kereta api pada kasus *crasworthiness* di klasifikasikan menjadi 4 kategori seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.3. Kategori pertama C-I adalah kereta yang didesain untuk beroperasi pada rute trans Eropa, internasional, nasional,

maupun regional yang terdapat level *crossing* pada jalurnya dengan contoh kereta adalah lokomotif dan kereta penumpang. Kategori kedua adalah C-II adalah kereta api perkotaan yang beroperasi pada jalur khusus yang tidak memiliki persimpangan dengan jalan raya seperti kereta metro. Kategori ketiga C-III adalah kereta ringan yang beroperasi di perkotaan atau antar kota dengan jalur yang digunakan oleh jenis kereta yang berbeda-beda serta terdapat persimpangan dengan jalan raya seperti kereta tram dan kereta perkotaan. Kategori terakhir C-IV adalah kereta ringan yang beroperasi pada jalur khusus namun masih ada persimpangan dengan jalan raya seperti kereta tram.

Tabel 2.3 Kategori desain kereta api untuk kasus *Crashworthiness* (BS EN15227, 2008)

<i>Category</i>	<i>Definition</i>	<i>Examples of vehicle types</i>
C-I	<i>Vehicles designed to operate on TEN routes, international, national and regional networks (which have level crossings)</i>	<i>Locomotives, coaches and fixed train units</i>
C-II	<i>Urban vehicles designed to operate only on a dedicated railway infrastructure, with no interface with road traffic</i>	<i>Metro vehicles</i>
C-III	<i>Light rail vehicles designed to operate on urban and/or regional networks, in tracksharing operation, and interfacing with road traffic</i>	<i>Tram trains, peri-urban tram</i>
C-IV	<i>Light rail vehicles designed to operate on dedicated urban networks interfacing with road traffic</i>	<i>Tramway vehicles</i>

Tabel 2.4 Skenario tabrakan dan skenario hambatan (BS EN15227, 2008)

Design collision scenario	Collision obstacle	Operational characteristics of requirement	Collision Speed - km/h				Collision partner and conditions
			C-I	C-II	C-III	C-IV	
1	Identical train unit	All systems	36	25	25	15	Identical train unit
2	80 t wagon	Mixed traffic with vehicles equipped with side buffers.	36	n.a.	25	n.a.	See C.1 for wagon specification
	129 t regional train	Mixed traffic with vehicles with a central coupler	n.a.	n.a.	10	n.a.	See C.2 for representation of regional train
3	15 t deformable obstacle	TEN and similar operation with level crossings	$V_a - 50$ ≤ 110	n.a.	25	n.a.	See C.3 for representation of large obstacle
	3 t rigid obstacle	Urban line not isolated from the road traffic	n.a.	n.a.	n.a.	25	See C.4 for representation of obstacle
4	Small, low obstacle	Obstacle deflector requirements to be achieved	See Table 3	n.a.	See Table 3	n.a.	See also 6.5

Sejauh dapat dipraktikkan secara wajar, langkah-langkah berikut harus dilakukan untuk memberikan perlindungan bagi penumpang jika terjadi kecelakaan:

1. Mencegah *overriding*
2. Menyerap energi tumbukan
3. Menjaga ruangan penumpang
4. Membatasi laju perlambatan
5. Menahan intrusi ke dalam ruangan penumpang
6. Meminimalkan konsekuensi mengenai halangan lintasan

Skenario tabrakan referensi berikut menjadi dasar dari persyaratan kelayakan bodi kendaraan:

1. Dampak ujung depan antara dua unit kereta yang identik
2. Dampak ujung depan ke kendaraan rel penyangga
3. Guncangan ujung depan unit kereta dengan rintangan berat (misalnya Truk di persimpangan jalan)
4. Unit kereta api (kategori P-I... P-IV) menabrak rintangan rendah (misalnya mobil di persimpangan jalan, hewan, sampah, dll.)

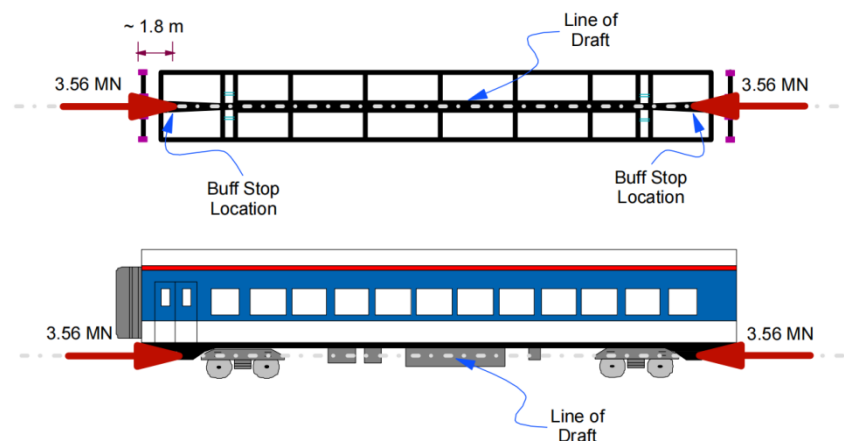
adapun skenario dan hambatan pada kasus tabrakan dijelaskan pada Tabel 2.4 berdasarkan klasifikasi yang telah dijelaskan di atas.

2.5.3 49 CFR bagian 238.203 dan 238.403

Code of Federal Regulation (CFR) adalah kodifikasi peraturan umum maupun permanen yang diterbitkan oleh lembaga pemerintah federal

Amerika Serikat. CFR 238.203 (49 CFR Part 238, 2020) mengatur tentang kekuatan statis pada ujung kereta di mana pada peraturan tersebut mensyaratkan bahwa kereta harus mampu menahan beban minimum 3,56 MN pada arah sejajar *coupler* tanpa mengalami deformasi permanen. Gambaran mengenai posisi serta besar gaya statis pada struktur dapat dilihat pada Gambar 2.23. Untuk kereta penumpang atau lokomotif diperbolehkan memiliki kekuatan statis pada ujung kereta kurang dari 3,56 MN pada dua kondisi antara lain:

- A. Terdapat struktur penyerap energi yang merupakan bagian dari *crash energy management* pada kereta
- B. Struktur kereta mampu menahan minimum 3,56 MN pada arah sejajar *coupler* setidaknya pada akhir ruang kereta yang terdapat penumpang.

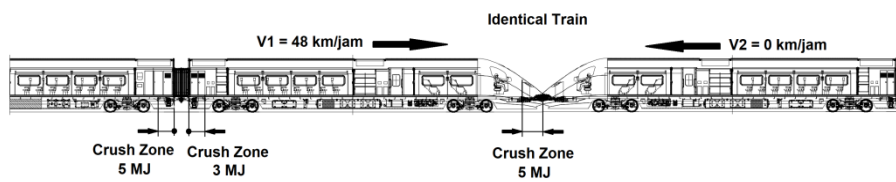


Gambar 2.23 Skematik pembebanan sStatis pada ujung kereta (Tyrell, 2002)

CFR 238.403 mengatur tentang mekanisme *crash energy management* yang diprasyaratkan pada kereta dengan kecepatan di atas 200 kmh. Setiap kereta berpengerak maupun kereta trailer harus dirancang dengan sistem *crash energy management* untuk menyerap energi kinetik pada saat tabrakan. *crash energy management* dirancang untuk dapat terdeformasi plastis secara terkontrol pada area yang tidak dihuni oleh penumpang. Adapun syarat desain minimal dari *crash energy management* adalah sebagai berikut:

- A. *crash energy management* pada setiap *trainset* harus dapat menyerap total 13 MJ secara terkontrol dengan rincian minimal 5 MJ harus diserap pada ujung lokomotif
- B. Minimal 3 MJ harus dapat diserap pada ujung belakang lokomotif yang disambungkan dengan kereta selanjutnya pada *trainset* yang sama
- C. Ujung depan kereta di belakang lokomotif pada *trainset* yang sama harus dapat menyerap 5 MJ secara terkontrol.

Penyerapan energi tersebut diprasyarkan pada mode uji tabrakan antara dua kereta identik dengan salah satu kereta melaju pada kecepatan V_1 sebesar 48 kmh menabrak kereta diam dengan kecepatan V_2 sebesar 0 kmh seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.24. selain persyaratan struktur, *Occupant protection* juga di persyarkan pada standar ini dengan kriteria perlambatan pada area penumpang tidak lebih dari 8g.



Gambar 2.24 Ilustrasi skematik penyerapan energi pada kereta kecepatan tinggi

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian dan studi numerik mengenai analisa *crashworthiness* pada struktur *frame cabin* kereta cepat nasional menggunakan metode elemen hingga, Terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, antara lain :

1. Studi Kasus

Permasalahan yang diangkat adalah usaha untuk mendapatkan desain *main frame* kereta cepat nasional yang memiliki fungsi *energy absorption* dan *occupant protection* yang sesuai dengan standar yang berlaku

2. Studi Literatur

Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan *structural crashworthiness*, konsep tumbukan, kriteria keselamatan, serta standar yang berlaku. Studi literatur mengenai simulasi numerik pada kasus *crashworthiness* juga dilakukan agar simulasi numerik dapat dijalankan dengan benar dan tepat. Studi Literatur diperoleh dari buku-buku, Jurnal, *e-book*, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan permasalahan yang dibahas.

3. Pemodelan dan Simulasi

Proses pemodelan dimulai dengan pembuatan model sesuai dengan geometri desain *existing* yang dikembangkan untuk kereta cepat nasional oleh PT. INKA dan BRIN menggunakan *software Spaceclaim 2021*. Setelah itu dilakukan proses simulasi menggunakan model yang telah dibuat dengan memasukan *properties* serta kondisi batas yang dibutuhkan menggunakan *software ANSYS R21.2*. Setelah proses simulasi dilakukan proses *post-processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa visual deformasi tabrak, distribusi nilai *crash force*, distribusi nilai *energi kinetik*, dan distribusi nilai *deceleration pulse*.

4. Pengolahan dan Analisa Data Hasil Simulasi

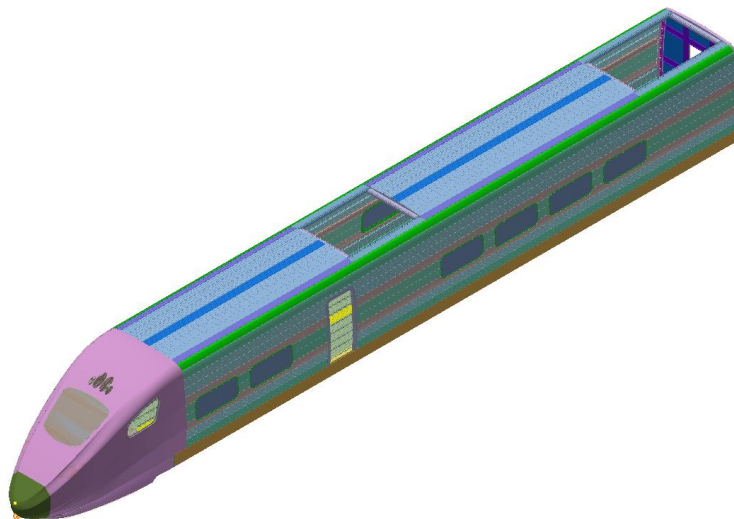
Setelah proses simulasi selesai, dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk visual kontur untuk di analisa secara kualitatif, dan juga diolah dalam bentuk grafik sehingga dapat di analisa secara kuantitatif. Dari kedua parameter tersebut, dapat dibahas karakteristik deformasi, *crash force*, *energy absorption*, serta *deceleration pulse* pada desain *main frame*.

3.2 Pre-Processing

Pre-Processing adalah tahap awal dari suatu penelitian numerik *explicit dynamic* menggunakan metode elemen hingga. Pada tahap ini dilakukan pembuatan geometri model, *input* ketebalan material, dan pembuatan *meshing*.

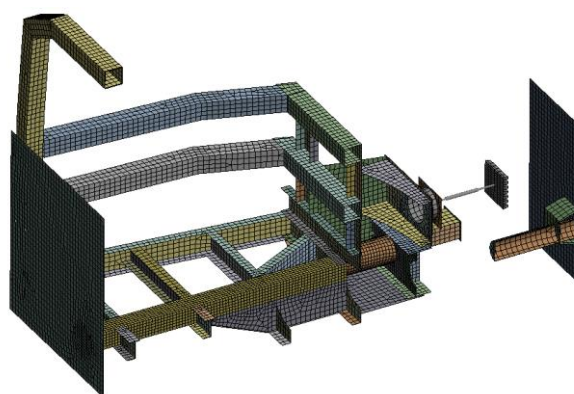
3.2.1. Pembuatan Model

Pembuatan model pada penelitian ini, penulis menggunakan *software* Autodesk Inventor 2020. Perangkat lunak tersebut termasuk perangkat lunak CAD (*Computer Aided Design*) yang berfungsi untuk mendesain suatu gambar dua dimensi dan tiga dimensi. Model yang menjadi acuan merupakan model desain dari PT. INKA dan BRIN berupa tiga dimensi yang dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Model tiga dimensi lokomotif kereta cepat nasional

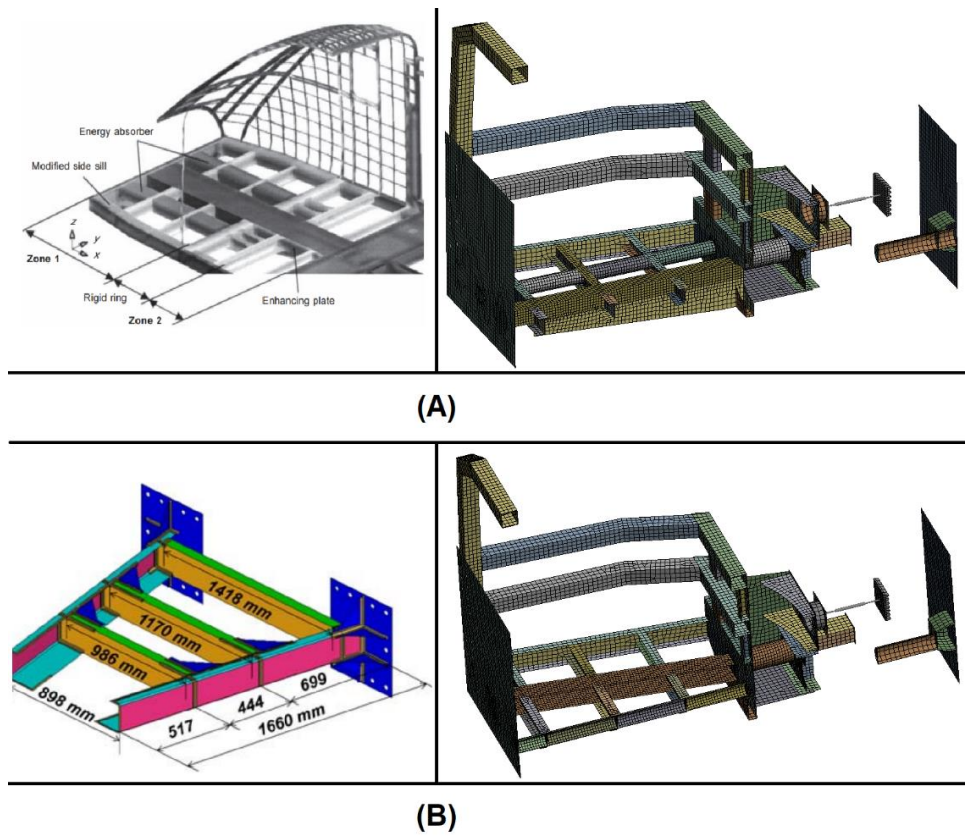
Model yang terlihat pada Gambar 3.2 tersebut merupakan model *base frame* dengan penyederhanaan dengan menghilangkan beberapa komponen seperti AC, kursi, mesin, dan komponen lainnya yang bukan bagian utama dari gerbong lokomotif kereta cepat nasional. Komponen yang dihilangkan tersebut dianggap tidak memiliki efek yang signifikan terhadap kekuatan konstruksi *frame* dan dapat digantikan dengan *mass point* agar proses simulasi dapat dipercepat.



Gambar 3.2 Model *existing surface* lokomotif kereta cepat nasional

Selanjutnya model desain asli dari PT. INKA dan BRIN tersebut dibuat ulang pada *software space claim 2021* pada area *main frame cabin*. Pemodelan disederhanakan menggunakan *shell surface* karena distribusi tegangan ke arah ketebalan dianggap tidak signifikan serta untuk mempersingkat waktu simulasi. Hasil pembuatan model desain *existing* dapat dilihat pada Gambar 3.2. Variasi konfigurasi pada penelitian ini berjumlah 2 jenis seperti yang terlihat pada Gambar 3.3. Variasi “A” adalah penguatan *main frame* serta penambahan modul penyerap energi di dalam konstruksi *main frame* untuk menahan sisa energi kinetik setelah fungsi *crash energy management* terpenuhi dalam menyerap energi kinetik awal mengacu pada penelitian (Xue et al., 2005). Sedangkan variasi “B” adalah adaptasi geometri model *frame* penyerap *impact* pada kereta Api cepat dengan penguatan *geometry* serta penambahan modul tube penyerap energi pada sisi tengah mengacu pada penelitian (Hou et al., 2021). Kedua variasi tersebut bertujuan

memberikan fungsi *safety* tambahan terhadap sisa energi impact setelah *crash energy management* terdeformasi secara total.



Gambar 3.3 Konfigurasi *main frame* variasi A (Xue et al., 2005) dan variasi B (Hou et al., 2021).

3.2.2. Meshing

Pembuatan *meshing* dilakukan berdasarkan model yang telah dibuat. *Mesh* yang digunakan adalah jenis *linear-map* dengan *four-node shell element*. Section yang digunakan adalah formulasi jenis elemen *Belytschko–Tsay* dengan tiga integral *point* searah tebal material dan satu integral *point* pada elemen *plane* (Wang et al., 2019). Ukuran *mesh* yang digunakan berbeda pada setiap komponen. Untuk komponen penyerap energi ukuran *mesh* yang digunakan adalah 30 mm sedangkan untuk komponen lainnya menggunakan *mesh* dengan ukuran 50 mm.

3.3 Processing

Tahap selanjutnya adalah tahapan *processing*, tahapan ini dilakukan dengan menggunakan *software Mechanical ANSYS Workbench R21.2* dengan *solver LS-Dyna*. Tahapan *processing* yang dilakukan pada penelitian ini antara lain adalah *Input material properties*, pendefinisian kekakuan model, pendefinisian *point mass*, pendefinisian *contact*, pendefinisian kondisi batas, serta pendefinisian tipe analisa dan kontrol solusi. Setelah seluruh pemodelan ditentukan dilakukan proses iterasi untuk menyelesaikan proses simulasi. Berikut Adalah penjelasan lebih lanjut mengenai langkah-langkah dalam *Processing* :

3.3.1 Material Properties

Material properties main frame menggunakan aluminium 6005A-T6. Dalam penelitian kali ini, penulis menggunakan perilaku material isotropik serta model material *isotropic elasticity* untuk mendefinisikan sifat elastis-plastis material dan *Johnson-Cook Strength* untuk mendefinisikan sifat material pada laju regangan tinggi. Data *properties* material aluminium 6005A-T6 mengacu pada penelitian simulasi panel ekstrusi menggunakan *software LS-DYNA* (Børvik et al., 2005) sesuai dengan Tabel 2.1.

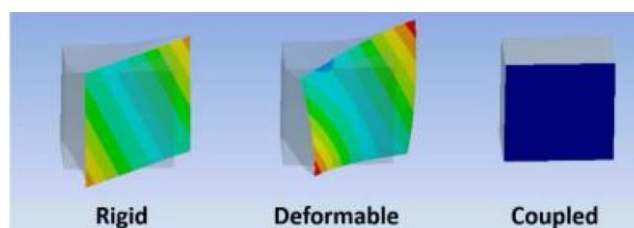
Tabel 3.1 *Material properties* Aluminium 6005A-T6

Parameter	Value	Unit
<i>Density (ρ)</i>	2700	Kg/m ³
<i>Tensile Yield Strength</i>	230	MPa
<i>Tensile Ultimate Strength</i>	280	MPa
<i>Poisson Ratio (ν)</i>	0,3	-
Modulus elastisitas (E)	70	GPa
<i>Initial Yield Stess (A)</i>	270	MPa
<i>Hardening Constant (B)</i>	134	MPa
<i>Strain Hardening Coefficient (n)</i>	0,514	-
<i>Strain Rate Constant (C)</i>	0,0082	-
<i>Thermal softening exponent (m)</i>	0,703	-

<i>Melting Temperature (TM)</i>	893	K
<i>Room Temperature (TR)</i>	293	K
<i>Reference Strain Rate (epso)</i>	0,001	/Sec
<i>Specific heat (cp)</i>	910	J/kg. K
<i>Failure Parameter 1 (D1)</i>	0,06	-
<i>Failure Parameter 2 (D2)</i>	0,497	-
<i>Failure Parameter 3 (D3)</i>	-1,551	-
<i>Failure Parameter 4 (D4)</i>	0,0286	-
<i>Failure Parameter 5 (D5)</i>	6,8	-

3.3.2 Pendefinisian Kekakuan Model

Terdapat beberapa jenis kekakuan model pada ANSYS seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.4. Kekakuan model yang di analisa perlu didefinisikan untuk melihat bentuk deformasi akhir dari analisa *crashworthiness* kereta cepat nasional. Dalam penelitian ini, maskara kereta semi cepat merupakan objek utama penelitian, sehingga penulis mendefinisikan kekakuan *deformable* pada bagian maskara agar deformasi pada objek yang di analisa dapat terbentuk. Pada penelitian (Wątroba et al., 2018) gerbong yang disederhanakan diberi kekakuan *rigid* agar tidak terjadi deformasi, dan kekakuan titik pusat massa gerbong didefinisikan dengan *coupled* dan dihubungkan dengan *nodal* pada maskara sehingga titik pusat massa gerbong telah terdefinisi bergerak bersama dengan maskara.

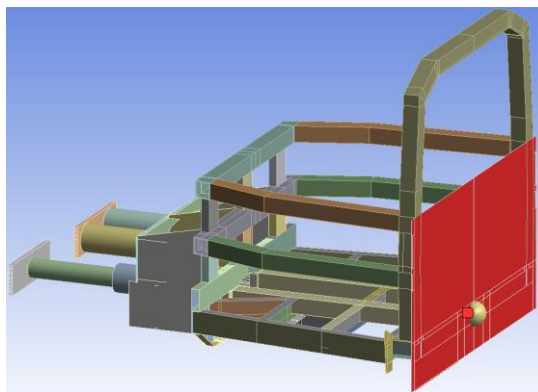


Gambar 3.4 Jenis kekakuan model pada ANSYS Mechanical

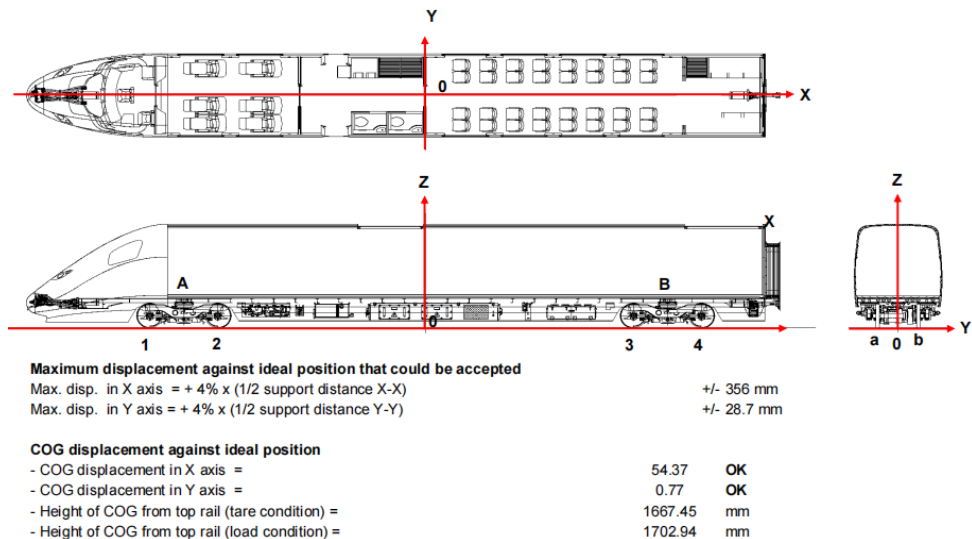
3.3.3 Point Mass

Point mass didefinisikan untuk merepresentasikan massa *body* komponen dan struktur kereta yang tidak dimasukkan ke dalam model dengan

pertimbangan komponen dan struktur tersebut tidak memiliki efek yang signifikan terhadap kekakuan model yang di analisa. Namun berat dari komponen dan struktur tersebut perlu untuk dimasukkan ke dalam simulasi sebagai variabel inputan untuk *energy*. Posisi *mass point* pada sumbu x, y, dan z sesuai dengan data perhitungan berat dari PT. INKA dengan mempertimbangkan struktur dan komponen yang berada pada kereta, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Pemberian *Mass Point*



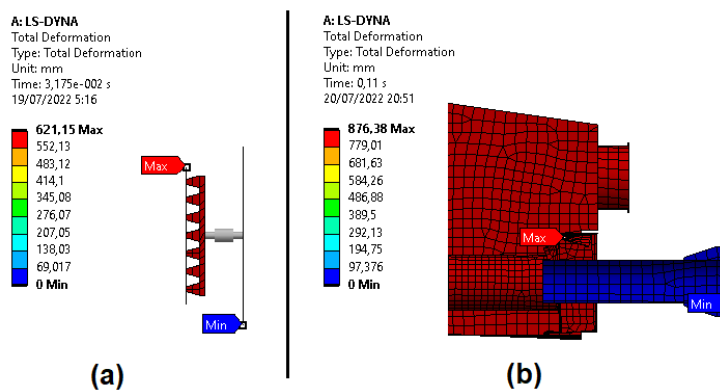
Gambar 3.6 *Center of Gravity* kereta

Nilai serta mass point didapatkan berdasarkan data dari perhitungan PT. INKA dan BRIN. Dari data pada Gambar 3.6, terlihat posisi *center of*

gravity kereta pada arah sumbu X, Y, dan Z. pada arah X dan Y deviasi posisi *centor of gravity* dari *center* sangat kecil sehingga pada simulasi akan bulatkan pada jarak 0 mm dari sumbu X dan Y. sedangkan pada sumbu Z posisi *center of gravity* yang akan digunakan adalah pada keadaan *load condition* dengan beban 46-ton yaitu pada jarak 1073 mm dari *top of rail*.

3.3.4 Contact

Salah satu batasan masalah pada penelitian ini adalah sambungan las pada setiap *joint* yang dianggap sempurna sehingga dilakukan pendefinisian *bonded contact* pada tiap kontak antar *part*. *Bonded contact* sendiri merupakan salah satu jenis pendefinisian sambungan antar *part* satu dengan lainnya pada *sub-menu contact* dalam Windows *Mechanical ANSYS*, di mana dengan digunakannya *bonded contact* ini akan membuat *part* satu dengan lainnya yang mengalami kontak menjadi satu kesatuan *rigid body*. Pada penelitian ini jumlah *part* yang disimulasikan sangat banyak, sehingga pengaturan *share topology* pada *geometry* diaktifkan untuk kelompok *frame* yang terkoneksi. Sehingga pendefinisian seluruh *bonded contact* dapat dilakukan secara bersamaan. Adapun komponen *coupler* dengan *deformation tube* dan *anti climber* dengan *buffer* dimodelkan sebagai kontak spring dan damping, dimana nilai damping nya di atur menyamakan spesifikasi yang diberikan oleh *supplier*. Terlihat pada Gambar 3.7 deformasi serta *energy absorbtion* pada kedua komponen sama dengan spesifikasi dari *supplier*.



Gambar 3.7 Hasil simulasi individu komponen (a) *anti climber* dengan *buffer* (b) *coupler* dengan *deformation tube*

3.3.5 Kondisi Batas

Kondisi batas pada penelitian ini adalah pemberian *initial velocity* pertama sebesar 36 km/h atau 10 m/s sesuai dengan standar EN 15227 (BS EN15227, 2008) yaitu pada kategori C1 di mana kereta cepat nasional ini akan beroperasi pada jalur nasional, internasional, dan regional dengan adanya persimpangan dengan jalur transportasi lain. Kereta cepat nasional direncanakan untuk melewati jalur khusus tanpa adanya persilangan dengan jalur transportasi lain, yang seharusnya masuk ke dalam kategori C2, namun pemilihan kategori C1 tersebut untuk memberikan nilai *safety* lebih kepada desain *crashworthiness* kereta. Berdasarkan standar CFR 238.203 (49 CFR Part 238, 2020) kondisi batas yang diprasyaratkan adalah *initial velocity* sebesar 30 mph atau 13,41 m/s dan kemampuan penyerapan sesuai standar CFR 238.403 (49 CFR Part 238, 2020) sebesar 5 MJ di mana dengan berat kereta sebesar 46 ton maka untuk mendapatkan energi kinetik tabrakan sebesar 5 MJ maka *initial velocity* yang dibutuhkan adalah sebesar 14,75 m/s. berdasarkan hal tersebut maka penulis memilih *initial velocity* sebesar 14,75 m/s untuk mewakili standar CFR 238.203 (49 CFR Part 238, 2020). Penulis menggunakan Variasi *initial velocity* ketiga sebesar 20 m/s atau dua kali *initial velocity* berdasarkan standar EN 15227 (BS EN15227, 2008) dan 27,78 m/s, untuk melihat performa variasi pada kasus tabrakan di luar standar yang berlaku.

Adapun kondisi tabrakan yang akan diteliti, penulis memilih untuk menabrakkan kereta pada dinding kaku dengan pertimbangan bahwa tabrakan pada dinding kaku dapat merepresentasikan kondisi terburuk pada keselamatan penumpang, di mana berkurangnya ruang untuk selamat. Selain itu penulis dapat melihat kemampuan penyerapan pada *crash energy management* secara individu lokomotif kereta karena tidak ada energi yang diserap oleh dinding kaku. Selanjutnya adalah efek tabrakan kereta trailer di belakang lokomotif tidak diperhitungkan dalam simulasi karena dianggap penyerapan energi akan diperhitungkan pada *crash energy management* pada ujung belakang kereta lokomotif dan ujung depan kereta trailer.

Adapun *solver* yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *solver* LS-DYNA dengan *hourglass control type 4* “*Flanagan-Belytschko Stiffness Form*” dengan *hourglass coefficient* 0,04. untuk *endtime* akan diatur sebesar 0,2 s dengan pertimbangan pada *range* waktu tersebut dengan variasi kecepatan seperti dijelaskan di atas tumbukan sudah mencapai batas kemampuan *crash energy management* dan atau energi kinetik pada saat tabrakan sudah terserap seluruhnya.

3.4 Post Processing

Dari hasil simulasi diperoleh data kontur visual deformasi yang terjadi pada desain existing, variasi A, dan variasi B untuk variasi *speed* 10 m/s, 14,75 m/s, 20 m/s, dan 27,78 m/s. Didapatkan pula hasil data distribusi nilai *crash force*, distribusi nilai energi kinetik, dan distribusi nilai *deceleration pulse* yang selanjutnya akan diolah menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel 365* dan akan disajikan dalam bentuk grafik. Adapun distribusi nilai data yang diambil akan di filter menggunakan tipe *butterworth* dengan frekuensi 50 Hz mengacu pada standar (49 CFR Part 238, 2020).

3.5 Validasi dan Pengolahan Data

Setelah dilakukan proses simulasi, selanjutnya data yang diperoleh akan divalidasi sebagai model acuan untuk melakukan simulasi lanjut terhadap variasi penelitian. Data yang diperoleh akan diolah untuk selanjutnya di analisa dan dibandingkan.

3.5.1 Validasi

Sebuah penelitian dengan pendekatan analisa numerik perlu untuk dibuktikan tingkat akurasi dengan cara dibandingkan dengan hasil eksperimen. Pada penelitian ini terdapat banyak sekali kendala untuk dapat melakukan eksperimen untuk *full body frame* kabin masinis sebagai dasar validasi dari hasil analisa numerik. Beberapa kendala tersebut antara lain biaya yang dibutuhkan untuk eksperimen sangat besar, dibutuhkan waktu yang panjang untuk eksperimen, dan pengulangan eksperimen yang hanya

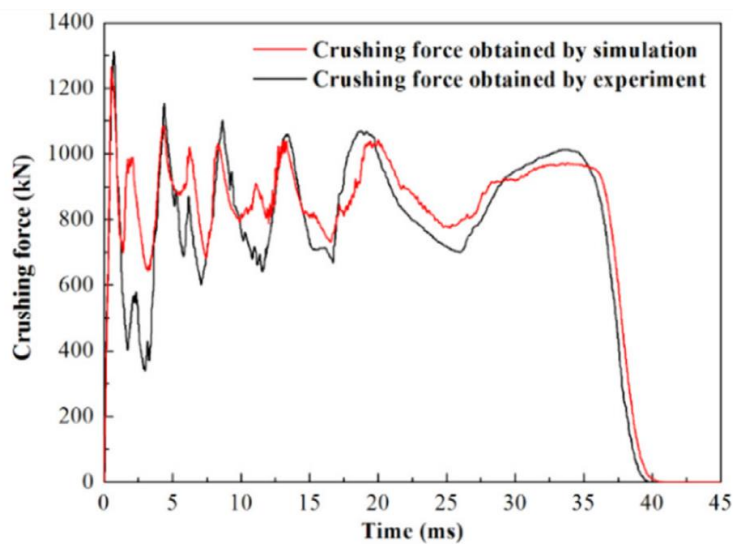
bisa dilakukan sekali karena penelitian ini bersifat merusak sehingga spesimen hanya bisa digunakan sekali pengujian. Validasi dengan membandingkan hasil simulasi model penelitian dengan penelitian lain juga tidak dapat dilakukan, karena setiap *frame* kereta bersifat unik sehingga nilai data dan *trend* grafik hasil penelitian sangat berbeda antar setiap *frame*. Selain itu *model frame* yang akan diteliti merupakan *frame* model pertama untuk kereta cepat nasional sehingga belum ada penelitian dengan *frame* serupa sebelumnya. Berdasarkan beberapa alasan di atas penulis melakukan proses validasi dengan cara membuat ulang model eksperimen pada penelitian (Wang et al., 2019) lalu membandingkan hasil simulasi dengan eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian tersebut. Hasil pengaturan yang sudah tervalidasi nantinya akan digunakan sebagai *base model setting* untuk menjalankan analisa numerik pada penelitian ini.

Tabel 3.2 Perbandingan nilai validasi hasil simulasi dan eksperimen

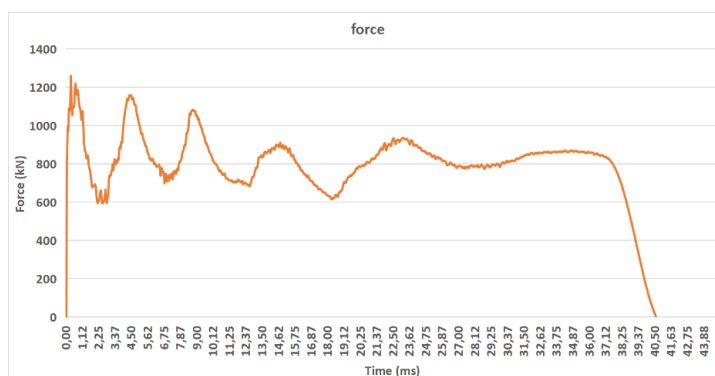
	Energy Absorbtion (kJ)	Fmax (kN)	Displacement (mm)	Favg (kN)	Duration times (ms)
Eksperimen	245,54	1311,06	279,1	879,76	39,77
Simulasi Paper	244,83	1265,55	277,25	883,07	41,15
Simulasi	236,19	1258,2	282,86	835,01	40,59
Error	3,81%	4,03%	1,35%	5%	2,06%

Sebagai validasi nilai *Energy Absorbtion*, *Force Maximum*, *Displacement*, *Force Average*, *Duration Time*, serta *trend* grafik *Force* dibandingkan yang selanjutnya kriteria *error* maksimal yang bisa diterima adalah tidak lebih dari 5%. dapat dilihat pada Tabel 3.2 Nilai *Energy Absorbtion* pada eksperimen sebesar 245,54 kJ, pada simulasi *paper* adalah 244,83 kJ, sedangkan pada hasil simulasi penulis adalah sebesar 236,19 kJ di mana nilai simulasi tersebut memiliki *error* sebesar 3,81 dibandingkan hasil eksperimen. Nilai *Force Maximum* pada eksperimen sebesar 1311,06 kN, pada simulasi *paper* adalah 1265,55 kN, sedangkan pada hasil simulasi penulis adalah sebesar 1258 kN di mana nilai simulasi tersebut memiliki *error*

sebesar 4,03% dibandingkan hasil eksperimen. Nilai *Displacement* pada hasil eksperimen, simulasi *paper*, dan simulasi penulis berturut-turut adalah sebesar 279,1 mm, 277,25 mm, dan 282,86 mm dengan nilai *error* simulasi penulis dibandingkan hasil eksperimen sebesar 1,35%. Lalu nilai *Force Avarage* pada hasil eksperimen, simulasi *paper*, dan simulasi penulis berturut-turut adalah sebesar 879,76 kN, 883,7 kN, dan 835,01 kN dengan nilai *error* simulasi penulis dibandingkan hasil eksperimen sebesar 5%. Sedangkan nilai *Duration Time* pada hasil eksperimen, simulasi *paper*, dan simulasi penulis berturut-turut adalah sebesar 39,77 ms, 41,15 ms, dan 40,59 ms dengan nilai *error* simulasi penulis dibandingkan hasil eksperimen sebesar 2,06%.



Gambar 3. 8 Grafik Crusing Force (Wang et al., 2019)

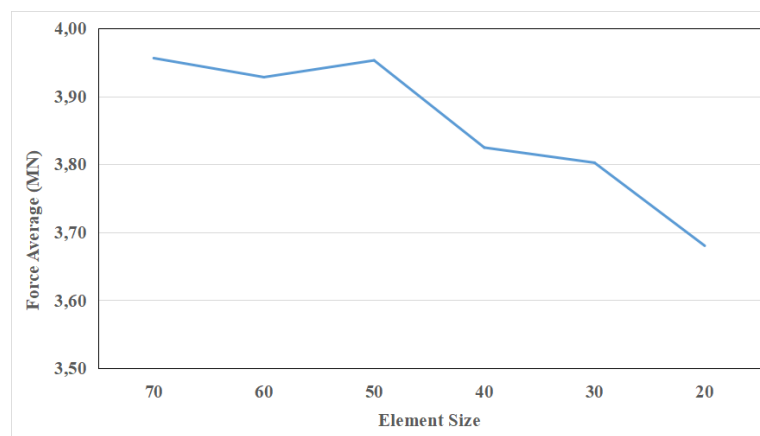


Gambar 3.9 Grafik *Crushing Force* validasi

Dapat dilihat pada Gambar 3. 8 grafik crash force pada penelitian (Wang et al., 2019) dan grafik crash force validasi yang terlihat pada Gambar 3.9 memiliki tren yang sama. *Force* tumbukan terbesar terjadi pada awal tumbukan yaitu sebesar 1258,2 kN pada waktu 0,36 ms pada simulasi penulis dan 1311,06 kN pada waktu 0,71 ms berdasarkan hasil eksperimen. Berdasarkan analisa hasil di atas dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi untuk validasi dapat dijadikan *Base Model setting* untuk simulasi penelitian *crashworthiness* pada *Cabin Frame* Kereta Cepat Indonesia.

3.5.2 Grid Independency

Selanjutnya dengan menggunakan *Base Model Setting* hasil validasi, penulis memasukkan data *geometry* model penelitian serta kondisi batas untuk selanjutnya dilakukan validasi lanjutan. validasi lanjutan yang dilakukan oleh penulis adalah melakukan *grid independency mesh* terhadap hasil simulasi. Adapun kualitas meshing pada model simulasi dapat dilihat pada Tabel 3. 3. Pada Gambar 3.10 Grafik hasil simulasi pada variasi ukuran *mesh* dari 30 mm hingga 70 mm. Berdasarkan data hasil simulasi tersebut, dipilih *mesh* dengan ukuran 30 mm karena memiliki tingkat akurasi yang cukup baik yaitu dengan error 0,5% dan waktu iterasi yang tidak terlalu lama. Adapun nilai *force average* didapatkan dari nilai *energy absorption* dibagi dengan total deformasi.

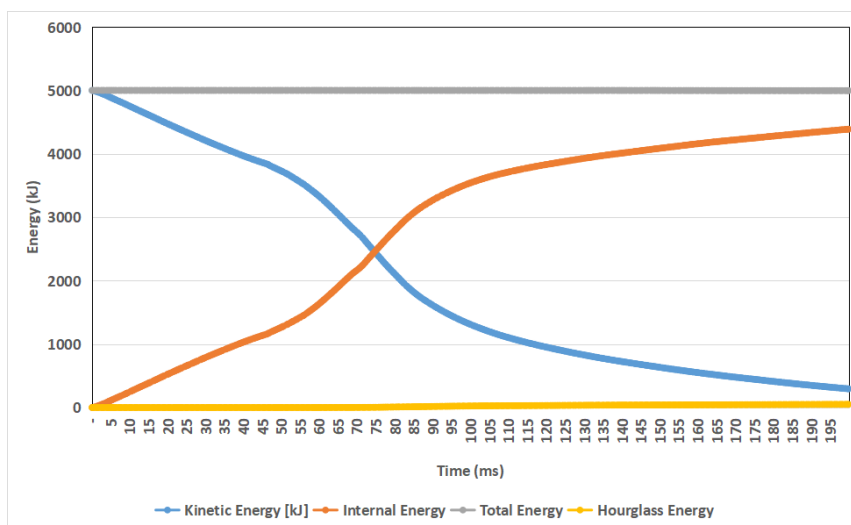


Gambar 3.10 Grafik hasil uji konvergen

Tabel 3. 3 Kualitas *Mesh*

Mesh Quality					
Parameter	Max Value	Min Value	Average Value	Acceptable Value	Remark
Aspect Ratio	5,07	1	1,16	1 to 10	GOOD
Skewness	0	0,70	0,06	0 to 0,8	GOOD
Jacobian Ratio	1	0,38	0,96	-1 to 1	GOOD
Orthogonal Quality	0,46	1	0,99	0,2 to 1	GOOD

Dengan menggunakan *base model setting* hasil validasi dan ukuran *mesh* hasil *grid independency* penulis selanjutnya melakukan *running* simulasi untuk melihat nilai *hourglass energy* sebagai validasi akhir untuk sebelum simulasi terhadap variasi dilakukan. Terlihat pada Gambar 3.11 bahwa nilai *hourglass energy* adalah sebesar 50 kJ atau 1% dari total *energy* yaitu sebesar 5000 kJ. Di mana nilai tersebut menunjukkan bahwa nilai *hourglass energi* <5% dari total energi, sehingga simulasi dapat dikatakan *valid*.



Gambar 3.11 Grafik kesetimbangan energi simulasi *Crashworthiness*

3.5.3 Pengolahan Data

Adapun data hasil simulasi akan diolah dan dibandingkan baik nilai maupun tren grafik untuk mengetahui fenomena yang terjadi selama simulasi *crashworthiness* berlangsung. Distribusi data hasil penelitian tersebut akan difilter menggunakan tipe *butterworth* dengan frekuensi 50 Hz mengacu pada standar (49 CFR Part 238, 2020). Adapun beberapa data yang akan diolah dan akan dibandingkan adalah sebagai berikut :

1. *Survival Space*

Data deformasi yang diperoleh akan diolah sehingga didapatkan nilai deformasi yang terjadi pada survival area untuk selanjutnya akan dibandingkan dengan standar (BS EN15227, 2008), di mana batas maksimal deformasi pada survival area adalah 10%. Panjang *area survival space* pada *frame cabin* adalah 2210 mm sehingga deformasi maksimal yang diizinkan adalah 221 mm.

2. *Crash Force*

Data *crash force* yang diperoleh akan diolah sehingga didapatkan urutan tabrak atau *deformation manner*. *Deformation manner* tersebut akan di analisa apakah sudah sesuai dengan kriteria atau tidak, di mana urutan tabrak yang diinginkan adalah dari depan ke belakang serta dimau dari CEM lalu ke *main frame*.

3. *Energy Absorption*

Data energi kinetik yang diperoleh akan diolah dan dijadikan acuan untuk menentukan nilai *energy absorption* yang mampu diterima oleh struktur. Berdasarkan standar (BS EN15227, 2008), tidak diprasyaratkan besar nilai *energy absorption* yang mampu untuk ditahan oleh struktur kereta, namun lebih ke persyaratan kecepatan tabrak yang harus mampu untuk dihentikan oleh struktur kereta. Pada kereta cepat nasional berat kereta yang digunakan adalah 46-ton dengan kecepatan tabrak sesuai (BS EN15227, 2008) adalah 10 m/s, sehingga *energy absorption* yang harus mampu ditahan oleh struktur kereta adalah 2,3 MJ. Sedangkan pada standar (49 CFR Part 238, 2020)

struktur *crash energy management* pada kereta harus mampu menyerap energi tabrak sebesar 5 MJ.

4. *Deceleration Pulse*

Data distribusi *deceleration pulse* yang diperoleh akan diolah dan dijadikan acuan untuk perhitungan. Berdasarkan standar (BS EN15227, 2008) nilai rata-rata *deceleration pulse* pada *area survival space* tidak boleh lebih dari 5g. pada standar (49 CFR Part 238, 2020) nilai maksimal *deceleration pulse* tidak boleh lebih dari 8g. Berdasarkan penelitian perhitungan nilai toleransi seluruh tubuh terhadap impact tidak boleh lebih dari 1000.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

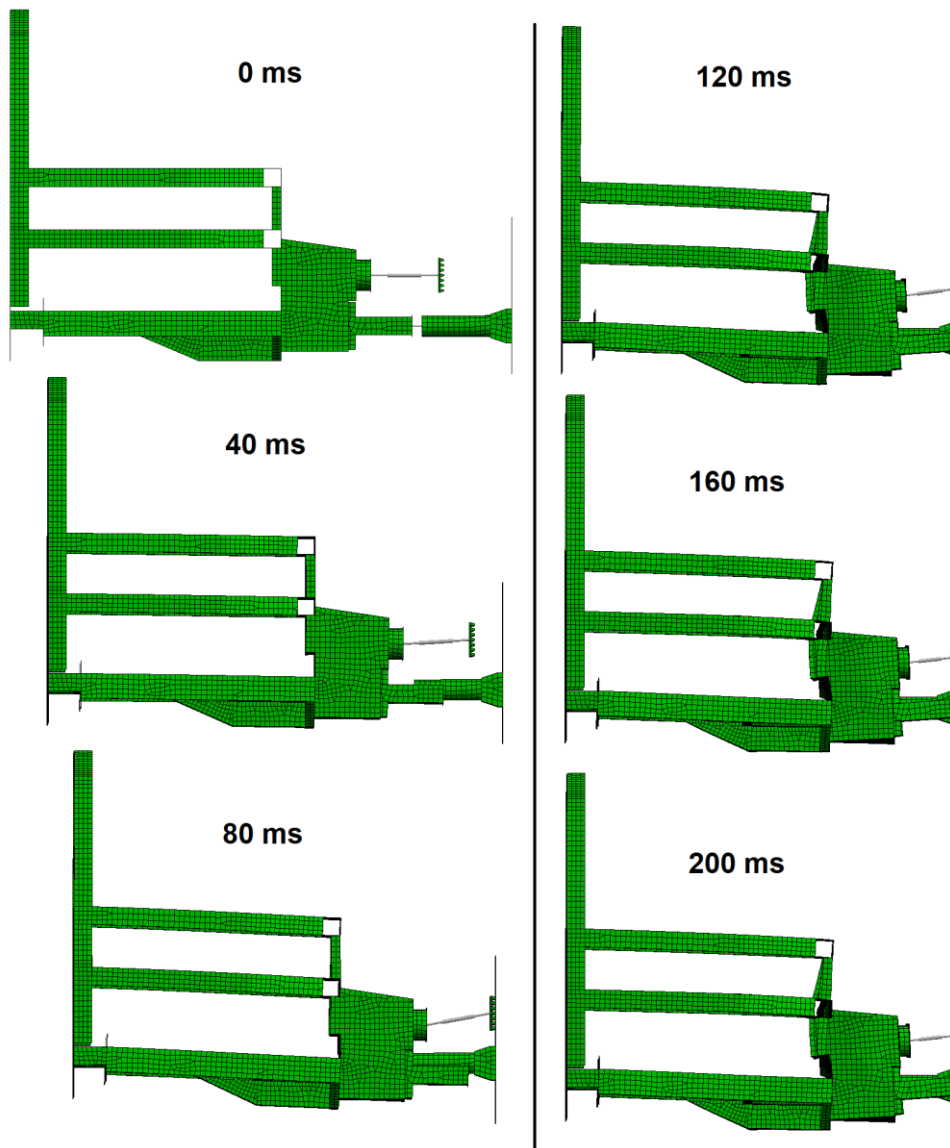
Hasil simulasi yang akan dibahas pada penelitian ini adalah Deformasi dan *Survival space*, *Crash force*, *Energy absorption*, serta *Deceleration pulse*. Hasil penelitian akan dibandingkan pada ketiga variasi *existing*, variasi A, dan Variasi B pada 4 variasi kecepatan tabrak yaitu 10 m/s, 14,75 m/s, 20 m/s, 27,78 ms.

4.1 *Survival space*

4.1.1 Deformasi pada Desain *Existing*

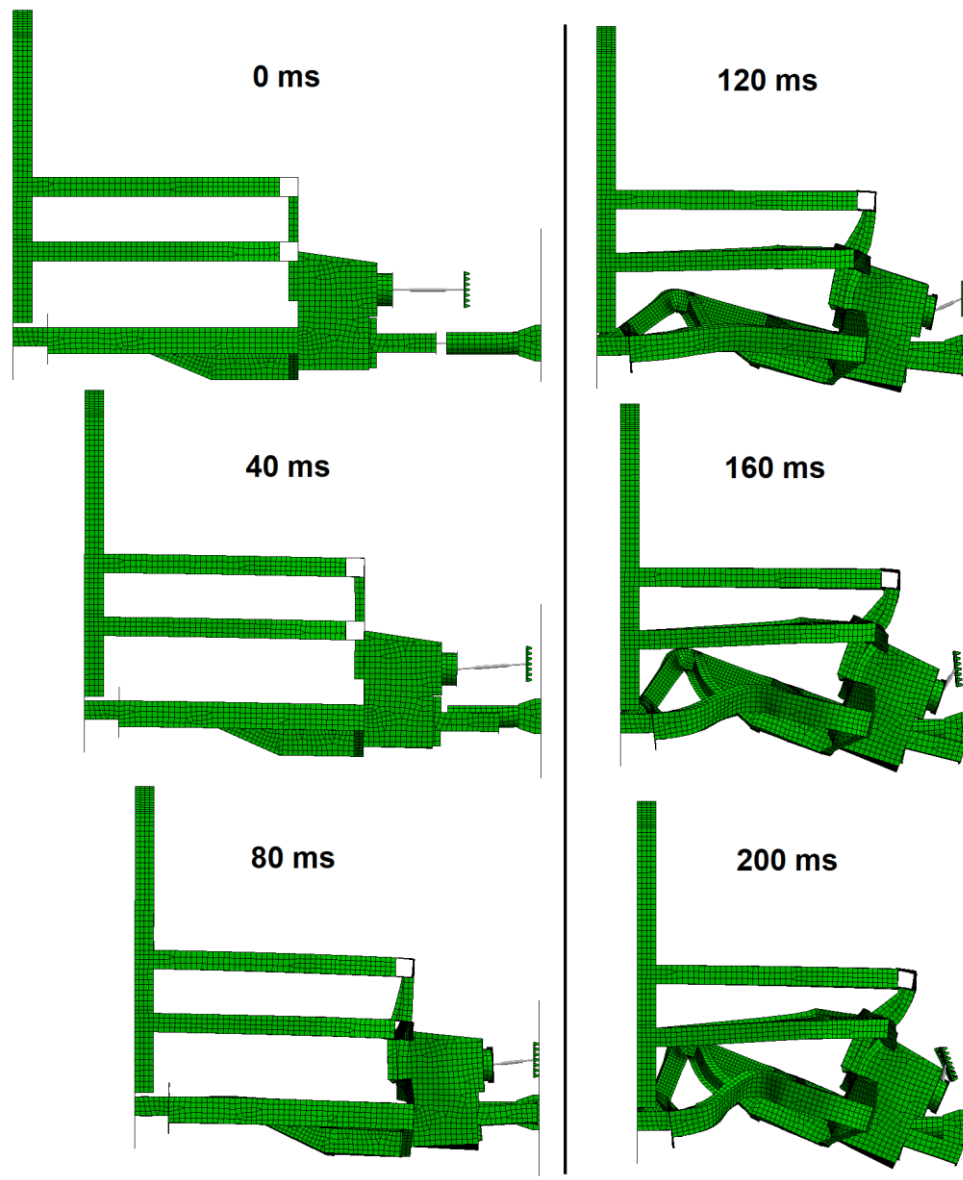
Progres tabrak *Main frame* Desain *existing* pada kecepatan tabrak 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.1. progres tabrak di ambil pada interval waktu 40 ms dari awal 0 ms sampai akhir tabrak 200 ms. Pada awal tabrak kecepatan 0 ms sampai 40 ms, *coupler* merupakan struktur pertama yang menabrak dinding kaku dan menyerap energi tabrak. Lalu pada waktu 80 ms dan 120 ms, *anti climber* dan *buffer* mulai menabrak dinding kaku dan membantu *coupler* menyerap energi tabrak. Pada waktu 160 ms dan 200 ms visual geometri *cabin frame* memiliki bentuk panjang yang sama, dikarenakan energi tabrak telah habis dan pergerakan *cabin frame* berhenti.

Dapat dilihat pada Gambar 4.2, progres tabrak *Main frame* desain *existing* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. *Coupler* serta *anti climber* dan *buffer* mulai tabrakan dan menyerap energi pada waktu 0 ms hingga 80 ms. Pada waktu 120 ms ketika *crashbox impactor* mulai menabrak dinding kaku seharusnya *impactor* menumbuk *crashbox* untuk menyerap energi tabrak. Namun konstruksi *main frame* terdeformasi lebih dahulu di titik tengah area masinis dan menyebabkan tidak sesuai *progressive pattern* yang diharapkan. Hingga pada waktu 200 ms struktur *main frame* terdeformasi ke arah vertikal lebih jauh lagi.



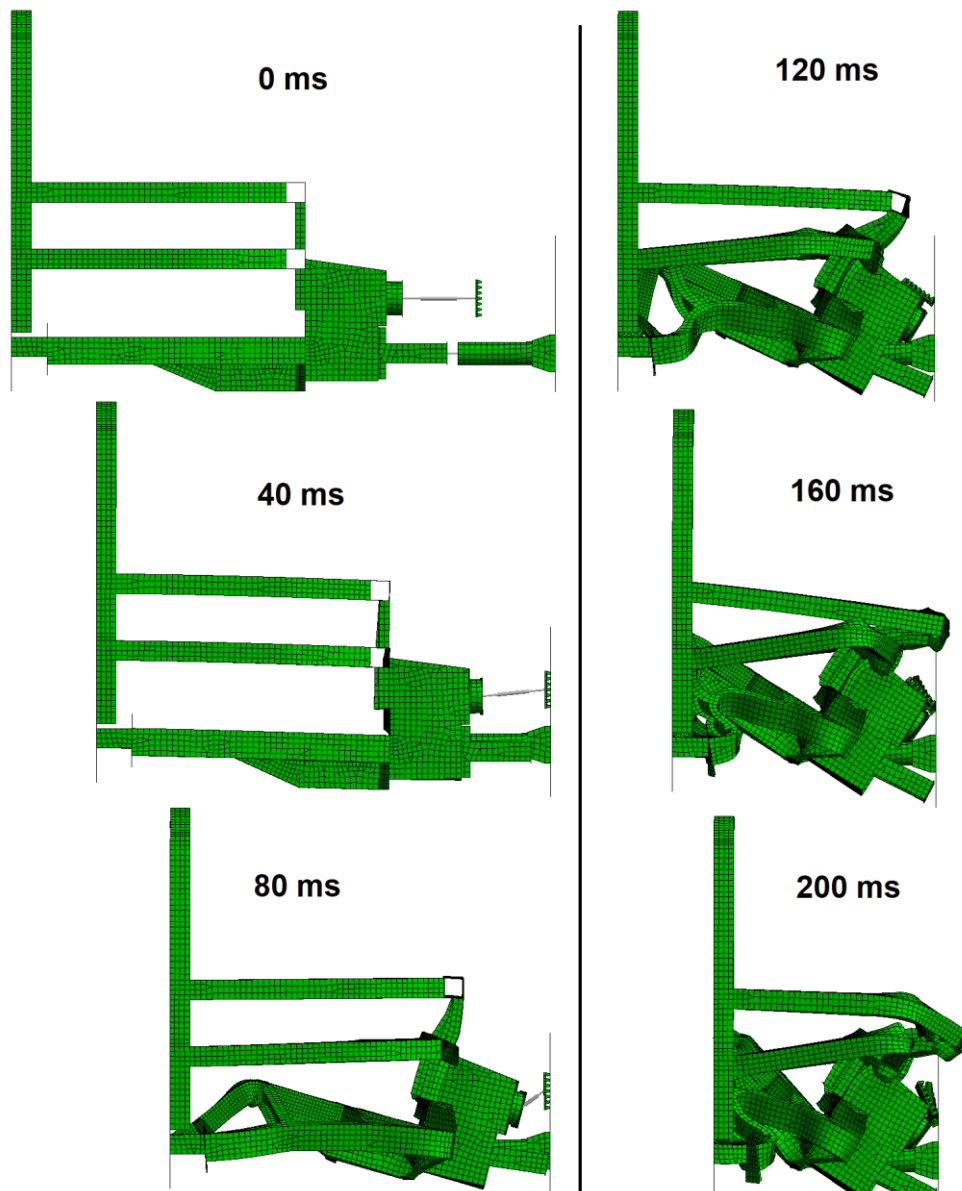
Gambar 4.1 Tahapan tabrakan desain *existing* pada kecepatan 10 m/s

Pada kecepatan tabrak 20 m/s, progres tabrak *Main frame* desain *existing* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Progres tabrak pada waktu 0 ms hingga waktu 40 ms diserap oleh *coupler*, *anti climber*, dan *buffer*. *Main frame* terdeformasi pada titik tengah ruang masinis pada waktu 80 ms ketika *crashbox impactor* mulai menyentuh dinding kaku, lalu terdeformasi ke arah vertikal semakin tinggi hingga pada waktu 200 ms ruang masinis sudah hancur sepenuhnya.

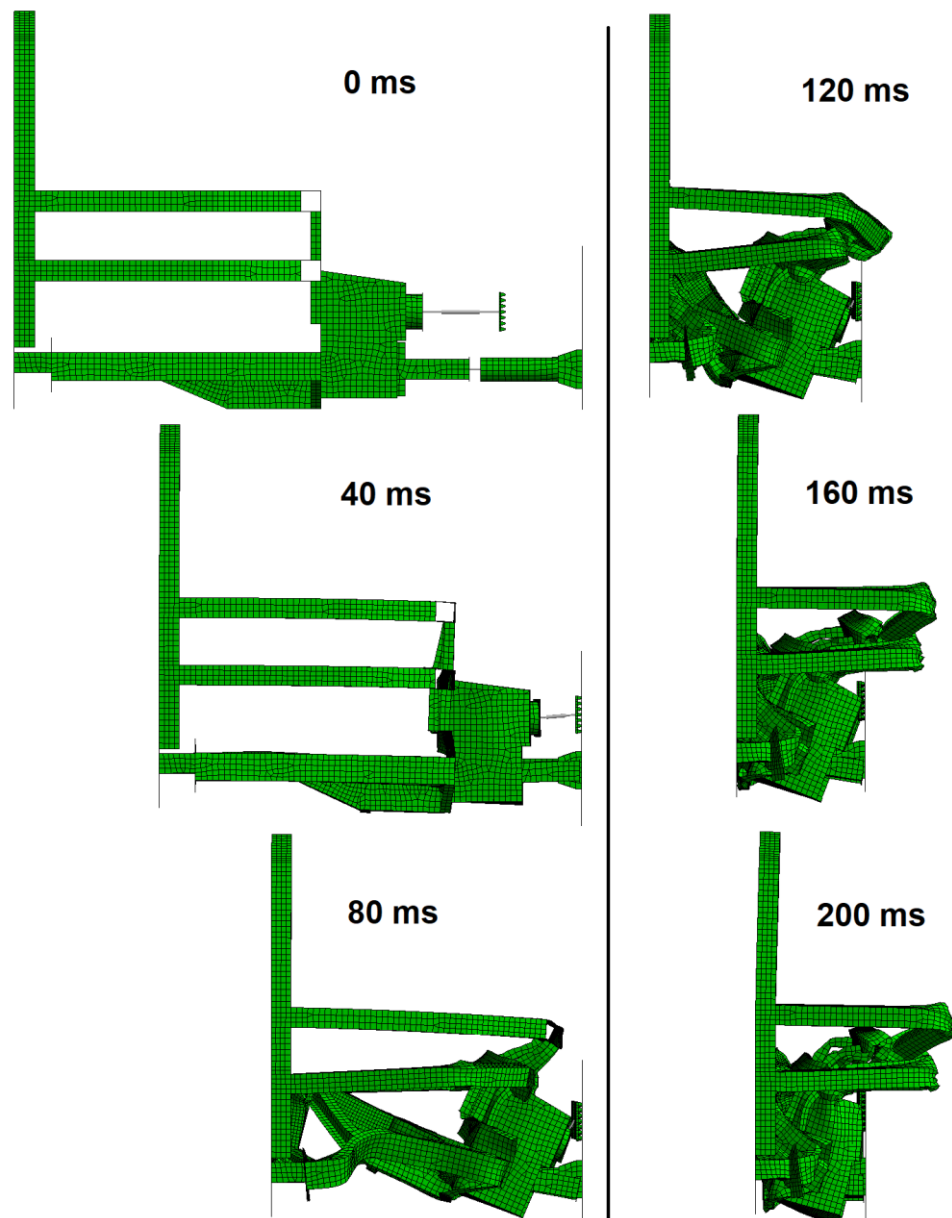


Gambar 4.2 Tahapan tabrakan desain *existing* pada kecepatan 14,75 m/s

Progres tabrak *Main frame* desain *existing* Pada kecepatan 27,78 m/s memiliki karakteristik yang mirip dengan progres tabrak pada kecepatan 20 m/s, namun kerusakan yang terjadi pada *main frame* jauh lebih parah, di mana deformasi mengenai batas ruang *cabin* sehingga kerusakan tabrak diperkirakan akan menjalar ke ruang penumpang, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Tahapan tabrakan desain *existing* pada kecepatan 20 m/s

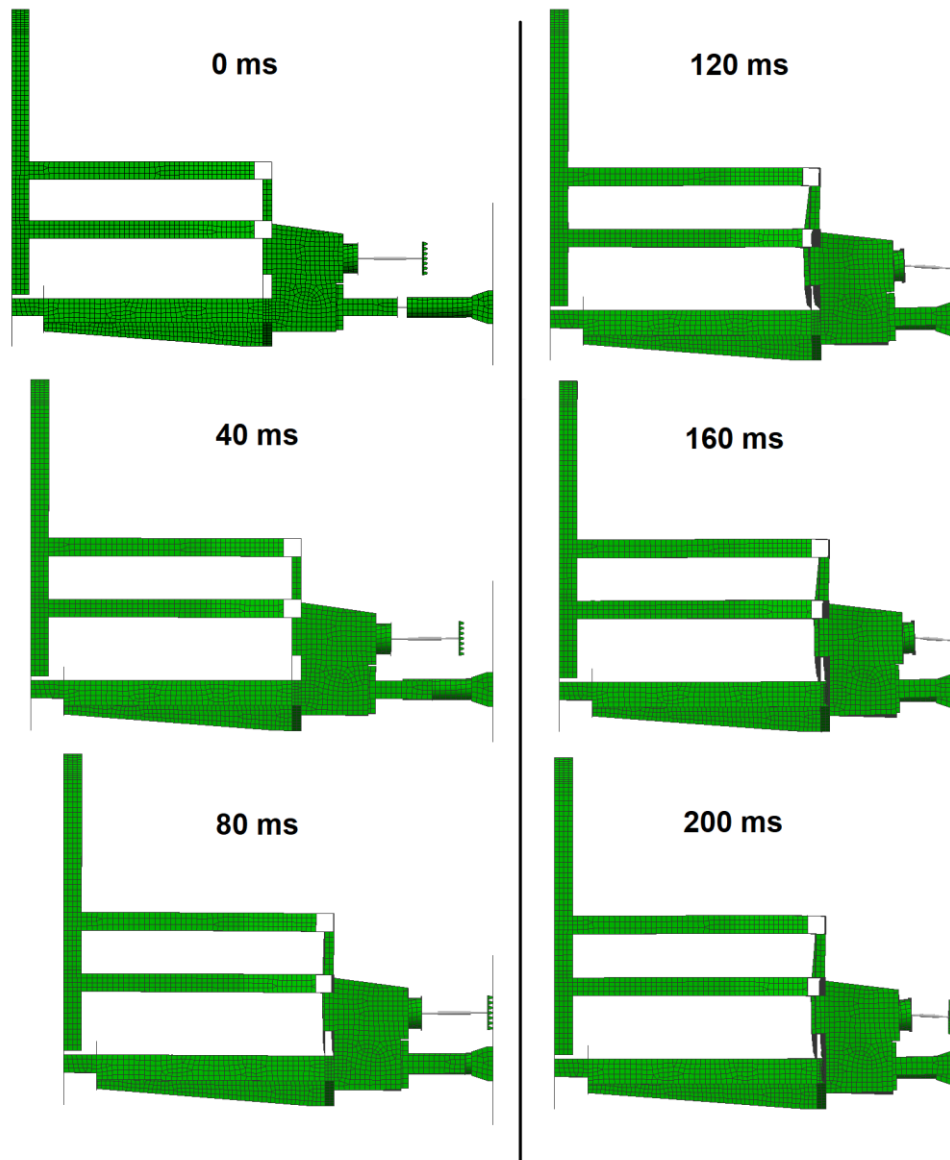


Gambar 4.4 Tahapan tabrakan desain *existing* pada kecepatan 27,78 m/s

4.1.2 Deformasi pada Desain Variasi A

Progres tabrak *Main frame* Desain Variasi A pada kecepatan tabrak 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.5. Pada waktu 0 ms hingga 40 ms energi tabrak diserap oleh *coupler* dan modul *deformation tube*. Pada waktu 80 ms hingga 120 ms *anti climber* dan *buffer* mulai menabrak dinding kaku dan menyerap energi tabrak bersama-sama dengan *coupler* dan *deformation tube*. Hingga pada waktu 160 ms sampai 200 ms visual frame terlihat sama karena

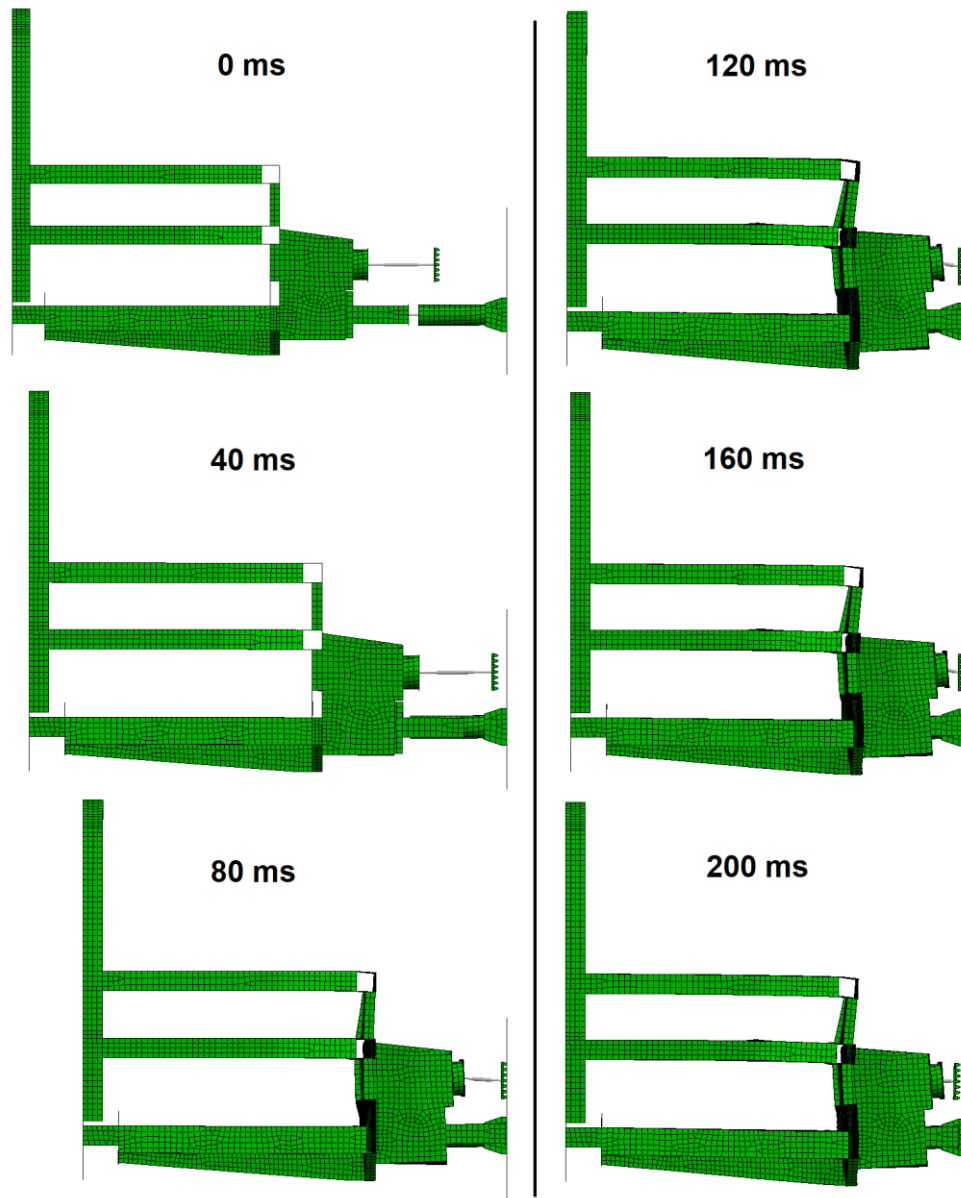
pada waktu tersebut energi tabrak telah habis dan *main frame* berhenti bergerak.



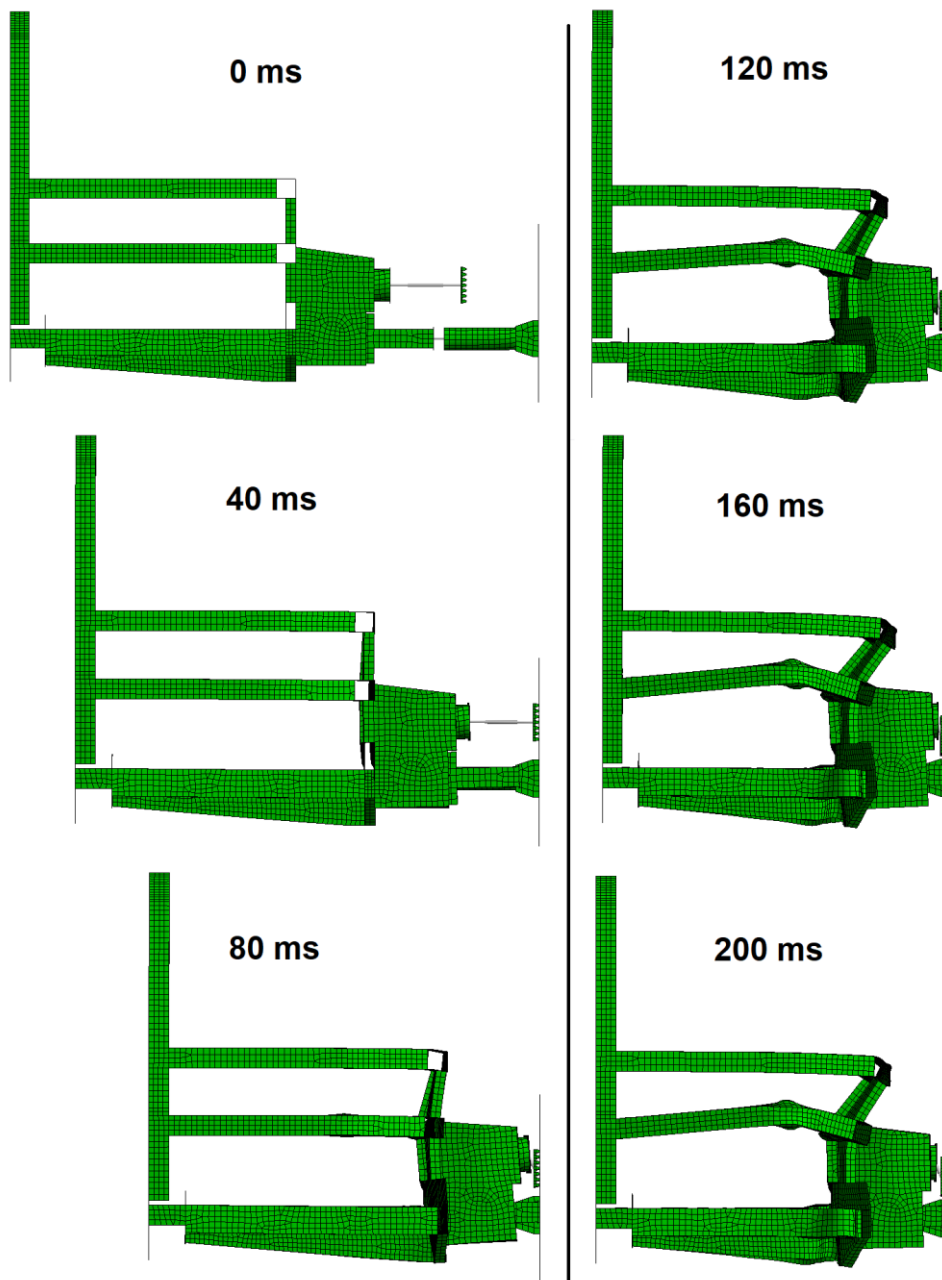
Gambar 4.5 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 10 m/s

Dapat dilihat pada Gambar 4.6, progres tabrak *Main frame* desain variasi A pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. energi tabrak diserap oleh *coupler* dan *deformation tube* pada waktu 0 ms hingga 40 ms. Pada waktu 80 ms energi impak diserap oleh *coupler* dengan *deformation tube* serta *anti climber* dengan *buffer*, lalu pada waktu 120 ms hingga 160 ms *crashbox* mulai bekerja

saat *impactor crashbox* mulai menyentuh dinding kaku. Pada waktu 200 ms visual deformasi memiliki bentuk yang sama dengan 160 ms, di mana dapat dikatakan pada waktu 200 ms seluruh energi tabrak telah terserap semua dengan tanpa adanya deformasi yang besar pada area masinis.



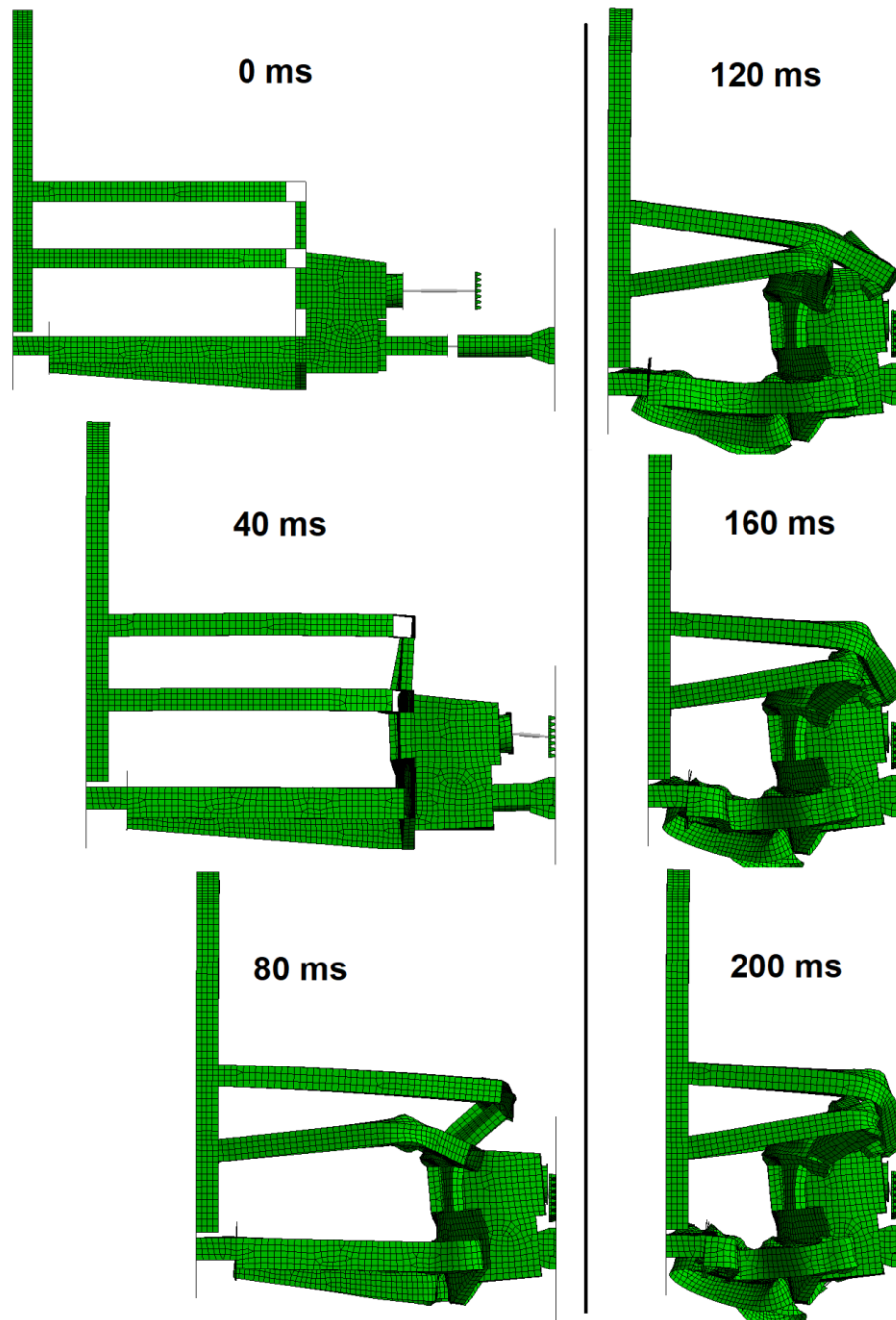
Gambar 4.6 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 14,75 m/s



Gambar 4.7 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 20 m/s

Pada kecepatan tabrak 20 m/s, progres tabrak *Main frame* desain variasi A dapat dilihat pada Gambar 4.7. *coupler* dengan *deformation tube* bekerja menyerap energi tabrak mulai dari waktu 0 ms, dan dibantu oleh *anti climber* dengan *buffer* pada waktu 40 ms. Pada waktu 80 ms kemampuan serap *crash energy management* yang terdiri dari *coupler* dengan *deformation tube*, *anti climber* dengan *buffer*, dan *crashbox* telah habis. Sehingga pada

waktu 120 ms energi tabrak yang tersisa yang tidak mampu diserap oleh mulai diserap oleh konstruksi *main frame*. Pada waktu 160 ms dan 200 ms visual deformasi memiliki bentuk yang sama karena pada waktu tersebut energi tabrak yang tersisa telah terserap habis oleh *main frame*. Namun terlihat bahwa *main frame* mengalami deformasi ke arah area masinis.



Gambar 4.8 Tahapan tabrakan desain variasi A pada kecepatan 27,78 m/s

Progres tabrak *Main frame* desain variasi A Pada kecepatan 27,78 m/s mengalami deformasi yang cukup besar. Kemampuan CEM dalam menyerap energi tabrak habis pada waktu antara 40 ms sampai 80 ms, sehingga pada waktu 80 ms *main frame* sudah mengalami deformasi. Deformasi yang terjadi membesar seiring dengan bertambahnya waktu. Sampai pada waktu 160 ms dan 200 ms memiliki visual deformasi yang hampir sama. Hal tersebut disebabkan pada waktu antara 160 ms sampai 200 ms sisa energi tabrak telah habis terserap oleh *main frame*. Namun dapat terlihat pada Gambar 4.8 bahwa deformasi mengarah ke area masinis cukup parah.

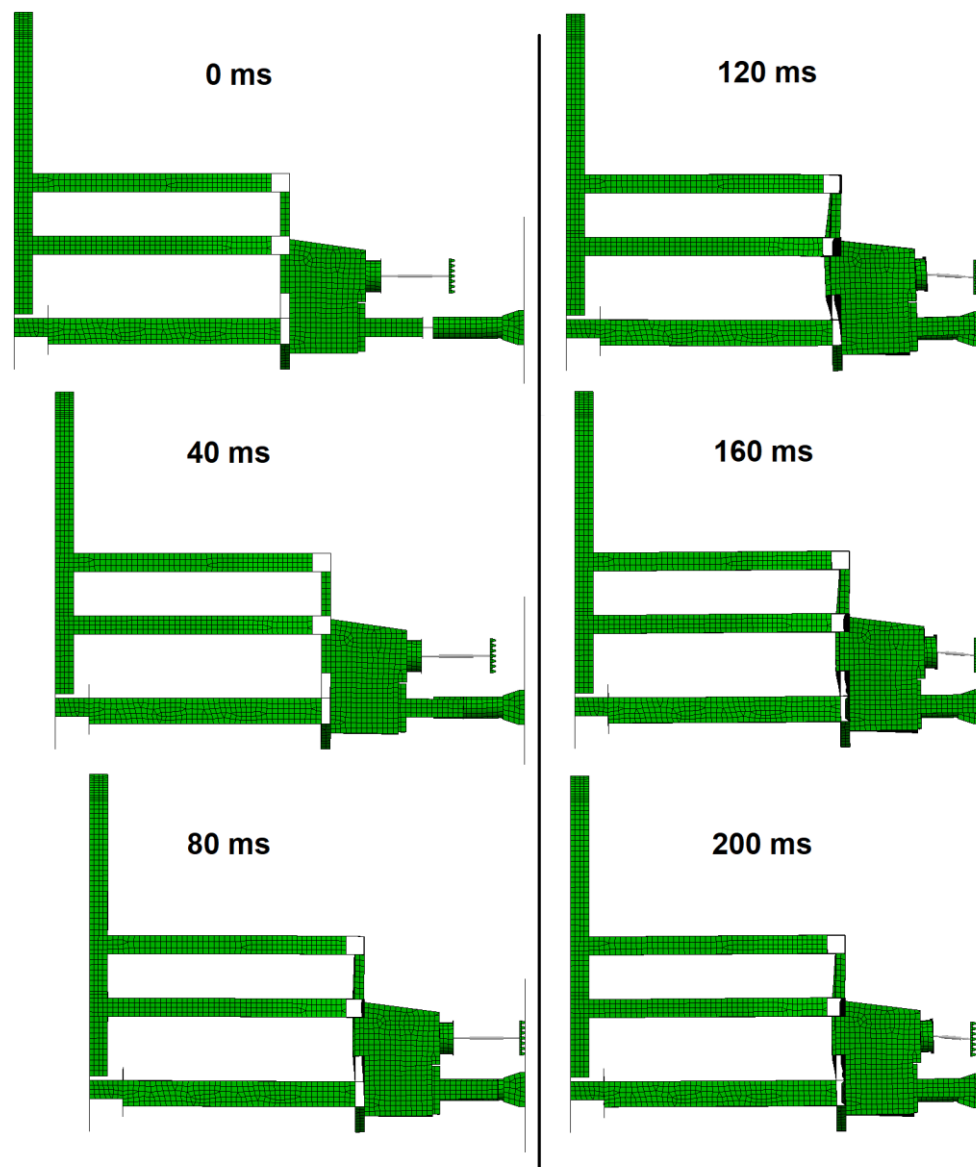
4.1.3 Deformasi pada Desain Variasi B

Progres tabrak *Main frame* Desain variasi B pada kecepatan tabrak 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.9. pada waktu 0 ms hingga 40 ms *coupler* dengan *deformation tube* merupakan penyerap energi utama dalam penyerapan energi tabrak. Pada waktu 80 ms *anti climber* dengan *buffer* mulai membantu penyerapan energi tabrak. Pada waktu 120 ms terlihat modul penyerapan energi masih terus terdeformasi, hingga pada waktu 160 ms dan 200 ms visual deformasi *main frame* terlihat sama dikarenakan pada energi tabrak telah terserap sepenuhnya sehingga tidak terjadi deformasi lanjut.

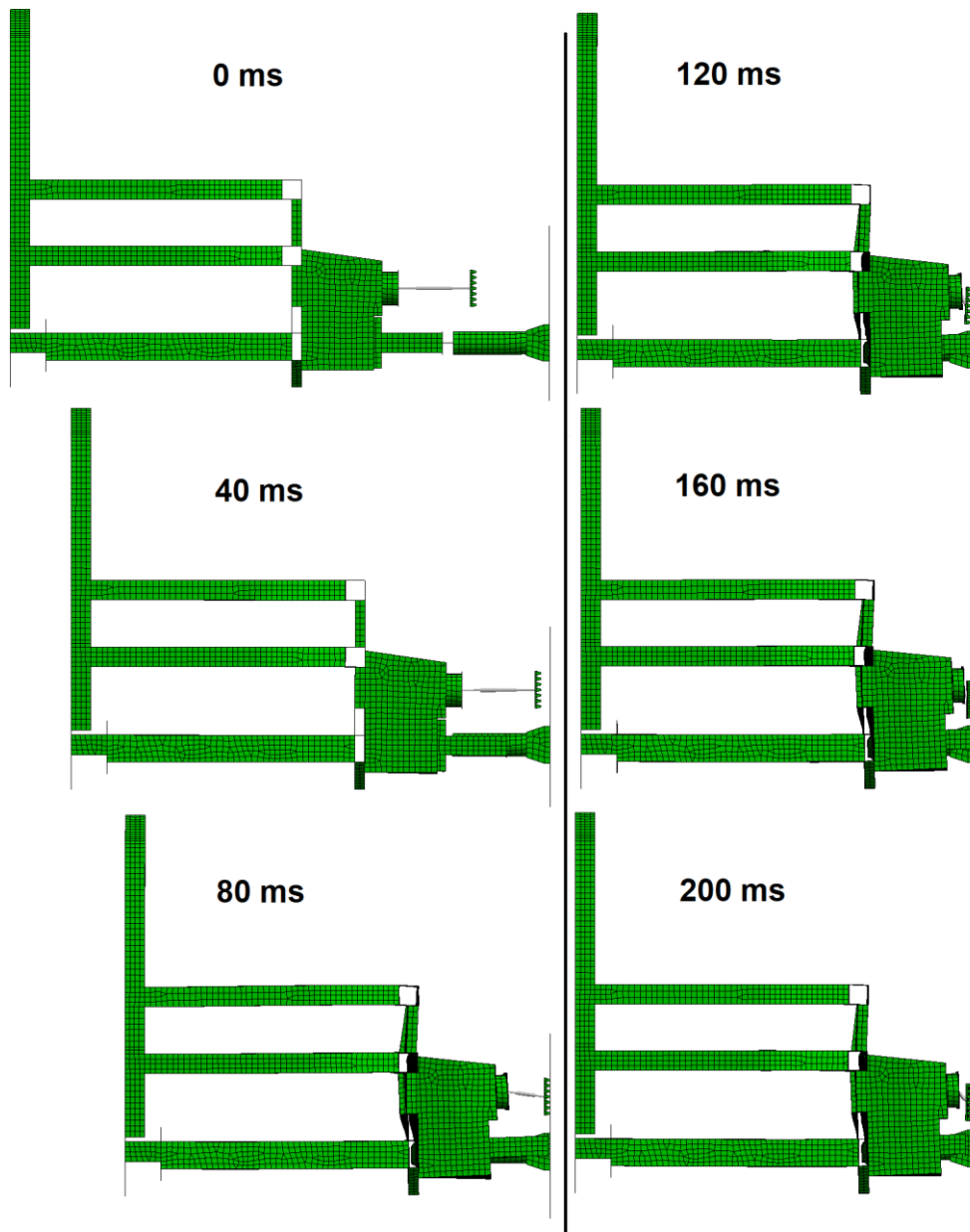
Dapat dilihat pada Gambar 4.10, progres tabrak *Main frame* desain variasi B pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. *Coupler* dengan *deformation tube* bekerja dari waktu 0 ms hingga 40 ms. Pada waktu 80 ms *anti climber* dengan *buffer* mulai membantu penyerapan energi tabrak. Pada waktu 120 ms terlihat *crashbox* telah terdeformasi dan stroke *anti climber* dengan *buffer* hampir maksimal. Pada waktu 160 ms dan 200 ms visual deformasi terlihat sama dikarenakan seluruh energi tabrak telah habis terserap sehingga tidak terdapat deformasi lanjutan.

Pada kecepatan tabrak 20 m/s, progres tabrak *Main frame* desain variasi B dapat dilihat pada Gambar 4.11. *coupler* dengan *deformation tube* bekerja pada awal tabrak. *Anti climber* dengan *buffer* serta *crashbox* mulai membantu penyerapan energi pada waktu 40 ms. Pada waktu 80 ms

kemampuan serat CEM telah habis dan energi tabrak mulai mengenai *main frame* hingga terlihat pada 120 ms *main frame* telah terdeformasi plastis. Deformasi terhenti pada waktu 160 ms hingga 200 ms sebagai tanda telah habisnya sisa energi tabrak karena terserap oleh *main frame*. Namun dapat dilihat bahwa deformasi *main frame* ke arah area masinis sudah cukup parah pada akhir simulasi.



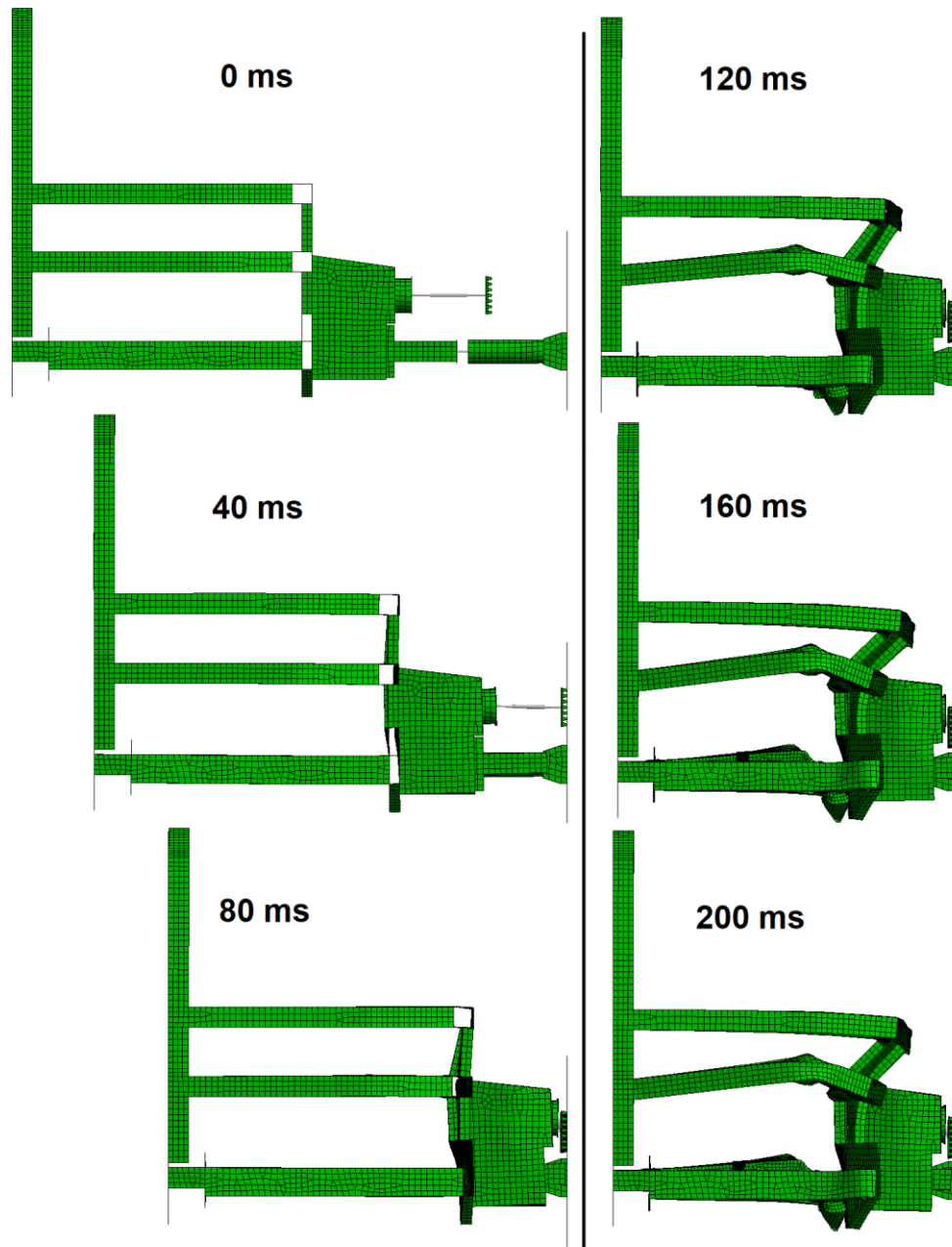
Gambar 4.9 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 10 m/s



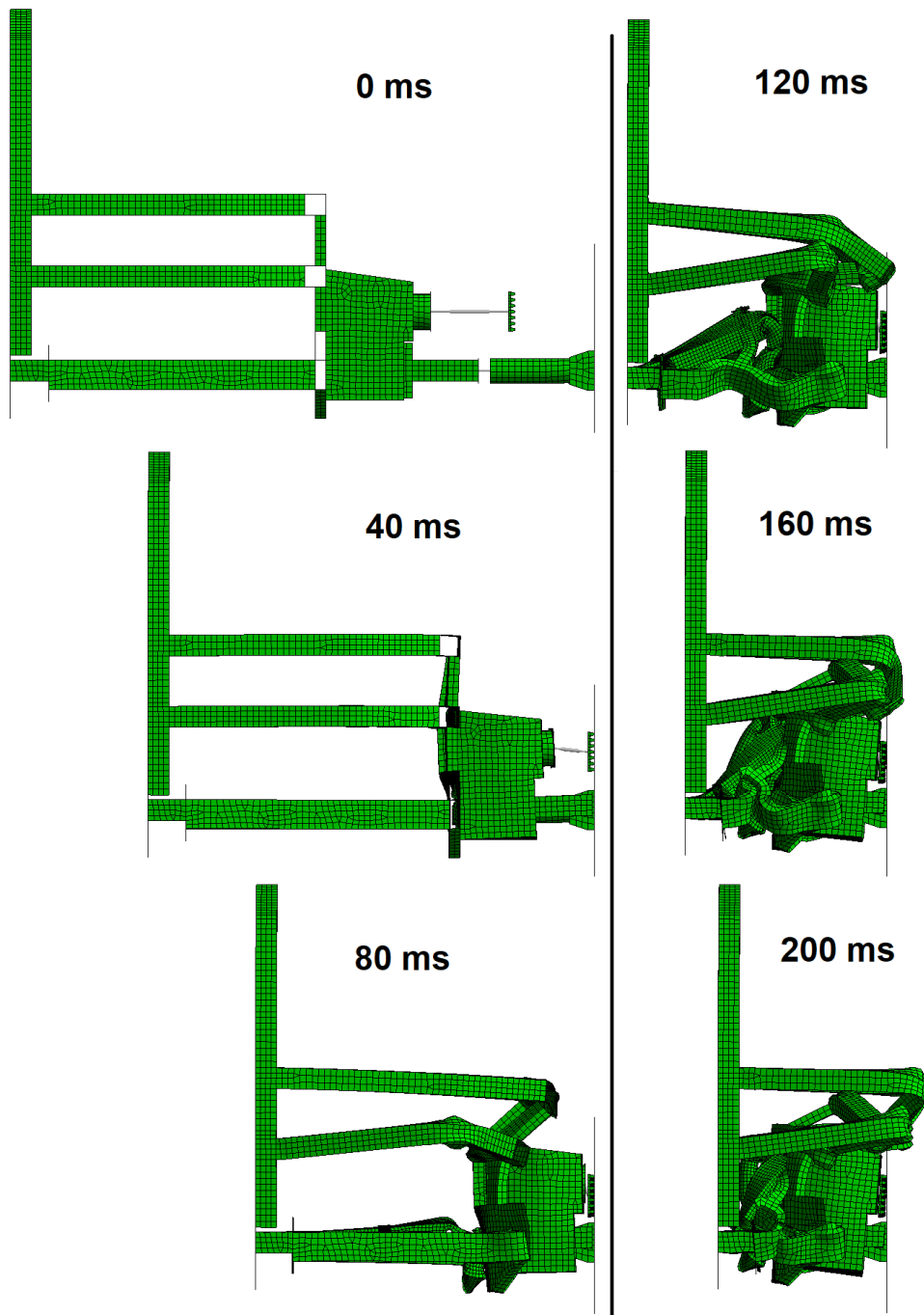
Gambar 4.10 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 14,75 m/s

Progres tabrak *Main frame* desain variasi B Pada kecepatan 27,78 m/s mengalami deformasi yang cukup besar. Terlihat pada Gambar 4.12 *coupler* dengan *deformation tube* bekerja mulai dari waktu 0 ms dan pada waktu 40 ms *anti climber* dengan *buffer* serta *crashbox* sudah mulai membantu penyerapan energi tabrak. Pada waktu 80 ms kemampuan CEM dalam menyerap energi tabrak telah habis sehingga sisa energi tabrak ditahan oleh

main frame sehingga terjadi deformasi pada *main frame*. Deformasi semakin besar pada waktu 120 ms, 160 ms, hingga 200 ms masuk ke area masinis. Deformasi terhenti pada 200 ms namun area masinis sudah terdeformasi sepenuhnya walaupun tidak sampai ke area penumpang.



Gambar 4.11 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 20 m/s



Gambar 4.12 Tahapan tabrakan desain variasi B pada kecepatan 27,78 m/s

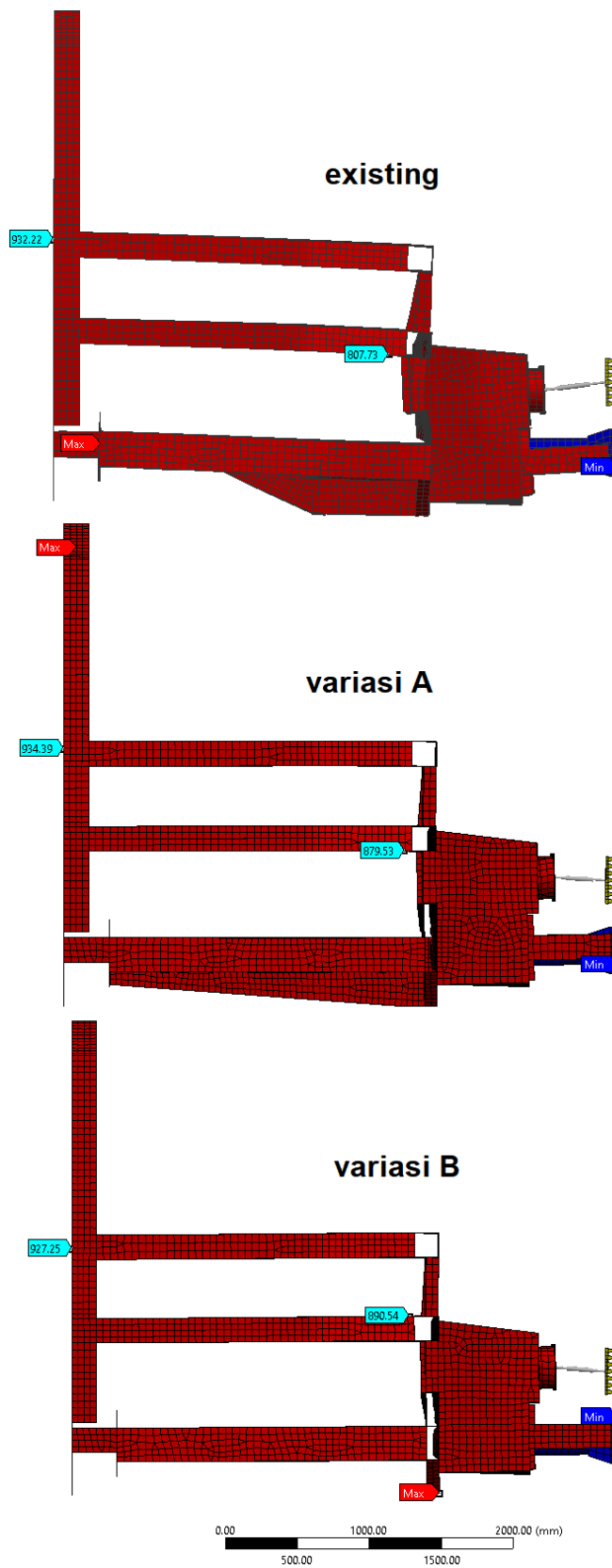
4.1.4 Perbandingan *Survival space*

Gambar 4.13 menunjukkan perbandingan visual akhir deformasi pada kecepatan tabrak 10 m/s antara desain *existing*, variasi A, maupun variasi B. terlihat secara visual deformasi bahwa ketiga desain dapat menahan energi

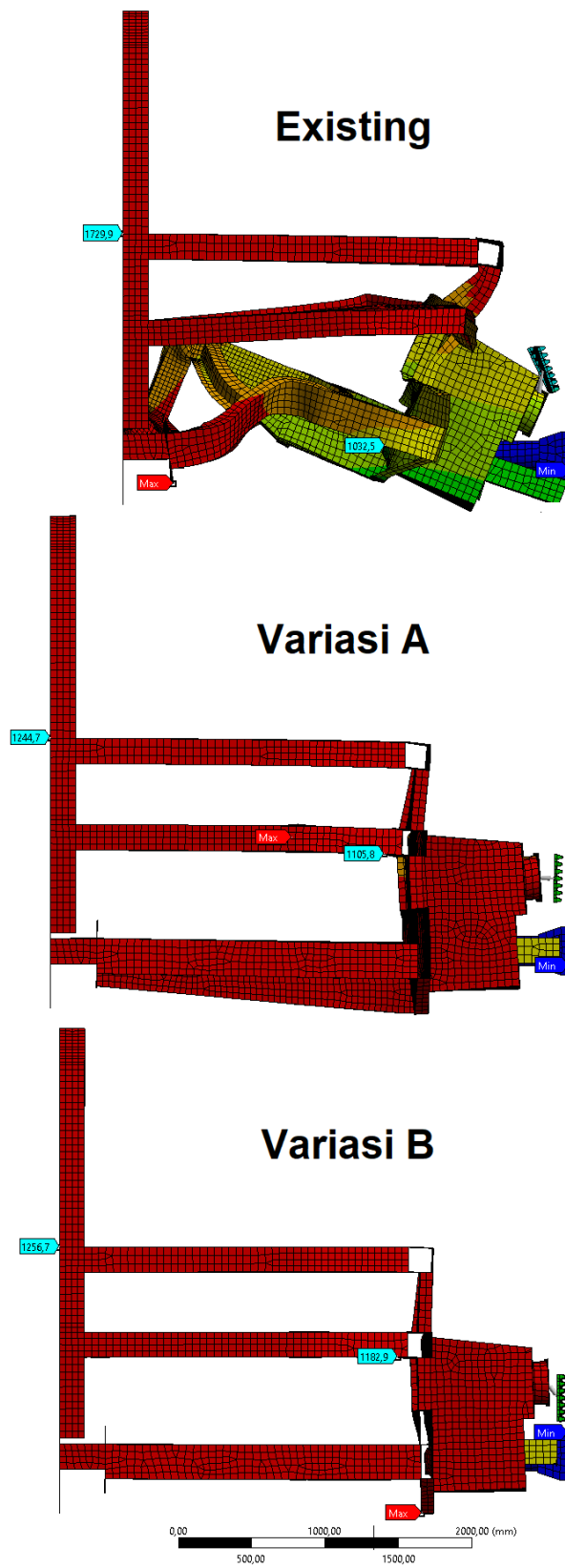
tabrak tanpa membahayakan area *survival space* masinis. *Total deformation* pada variasi *existing* sebesar 932 mm dengan deformasi pada ujung area *survival space* sebesar 807,73 mm sehingga dapat dihitung bahwa pengurangan *survival space* area masinis adalah sebesar 125 mm. Di mana deformasi tersebut masih di bawah 10% total area *survival space* masinis yaitu 221 mm. Deformasi total pada desain variasi A dan B berturut turut adalah 934 mm dan 927 mm dengan deformasi pada ujung area *survival space* masinis berturut turut sebesar 879 mm dan 882 mm. Dapat dihitung bahwa deformasi pada area *survival space* pada desain A sebesar 55 mm dan pada desain B sebesar 45 mm, di mana kedua nilai tersebut masih di bawah 10% dari total area *survival space* masinis.

Perbandingan visual akhir deformasi pada kecepatan 14,75 m/s antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B di tunjukan pada Gambar 4.14. Terlihat pada akhir desain *existing* mengalami deformasi yang cukup parah pada akhir pada akhir tabrak. Sedangkan pada variasi A dan B deformasi pada area *survival space* masinis tidak terlalu besar. Deformasi area *survival space* masinis pada desain *existing* sebesar 697,5 mm di mana nilai tersebut jauh lebih besar dari 10% *survival area* masinis yang hanya 221 mm. Pada desain variasi A deformasi pada area *survival space* sebesar 139 mm dan pada variasi B hanya sebesar 74 mm. Sehingga dapat dikatakan bahwa deformasi pada desain *existing* tidak aman untuk *survival area* masinis dan deformasi pada variasi desain A dan B aman untuk *survival space* masinis.

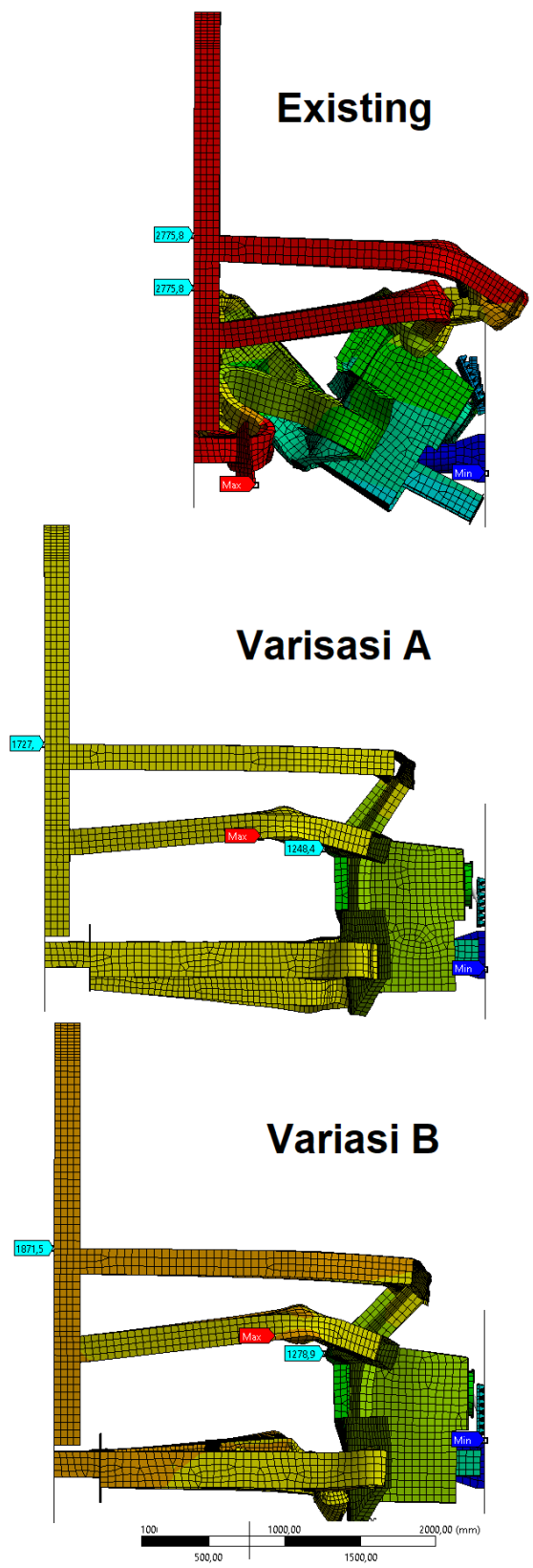
Deformasi yang cukup besar terjadi pada ketiga desain variasi pada kecepatan tabrak 20 m/s seperti yang di tunjukan pada Gambar 4.15. Seluruh *survival area* masinis terkena deformasi pada desain *existing*. Sedangkan pada desain variasi A dan B, deformasi terjadi berturut-turut 479 mm dan 593 mm, di mana nilai tersebut sudah melebihi 10% dari nilai maksimal deformasi *survival space* area yang di ijin kan pada standar (BS EN15227, 2008).



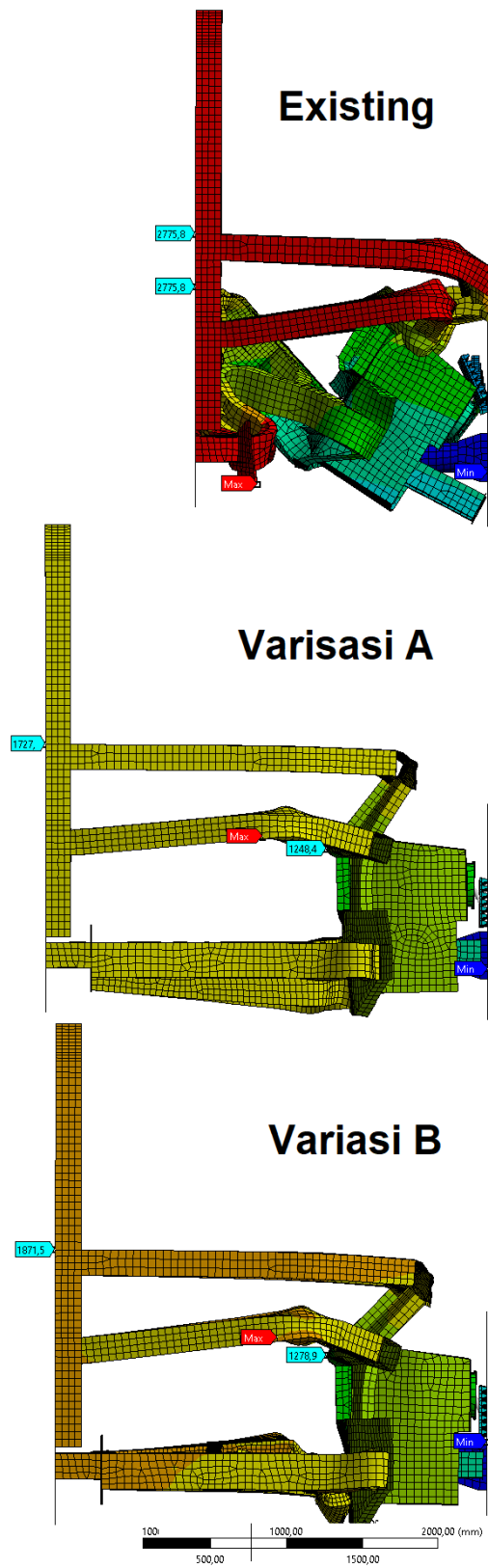
Gambar 4.13 *Survival space* pada kecepatan tabrak 10 m/s



Gambar 4.14 *Survival space* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s



Gambar 4.15 *Survival space* pada kecepatan tabrak 20 m/s



Gambar 4.16 *Survival space* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s

Terlihat pada Gambar 4.16 visual akhir deformasi pada kecepatan tabrak 27,78 m/s antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B. terlihat pada semua desain deformasi terjadi hingga area *survival space* masinis berkurang sangat besar. Dari visual deformasi dapat terlihat bahwa ketiga desain variasi tidak aman secara *survival space* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s.

Deformasi *main frame* desain *existing* tidak sesuai dengan *deformation manner* yang diinginkan, yaitu pada tengah *survival area* masinis. Sedangkan pada desain variasi A dan B *deformation manner* dimulai dari bagian depan dan menjalar ke belakang di mana hal tersebut sesuai dengan yang diinginkan sesuai dengan penelitian (Hou et al., 2021; Xue et al., 2005).

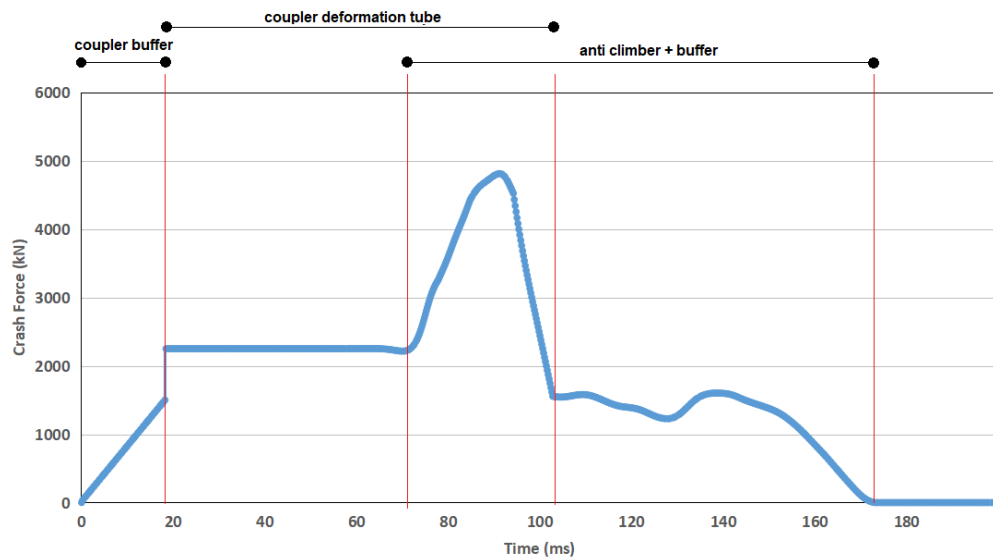
4.2 Crash force

Nilai serta Tren grafik *Crash Force* dapat memberikan gambaran urutan serta durasi dari setiap segmen komponen penyerap energi. Selain itu juga dapat diketahui besar nilai *force* yang terjadi pada setiap segmen komponen penyerap energi maupun pada keseluruhan struktur kereta. Setelah dilakukan simulasi menggunakan analisa numerik didapatkan hasil *crash force* pada masing-masing desain *existing*, variasi A, dan variasi B adalah sebagai berikut.

4.2.1 Crash force pada Desain Existing

Grafik *crash force* desain *existing* pada kecepatan tabrak 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.17. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. Nilai *crash force* naik mulai dari 0 ms sampai 18 ms hingga mencapai 1500 kN. *Coupler buffer* merupakan komponen yang berfungsi untuk mengakomodir deformasi dan menyerap energi tekan-tarik *coupler* pada kondisi operasi normal. *Crash force* terus meningkat hingga mencapai nilai 2250 kN. Komponen *deformation tube* pada *coupler* mulai terdeformasi hingga pada waktu 75 ms di mana *anti climber* mulai menabrak dinding kaku dan *buffer* mulai

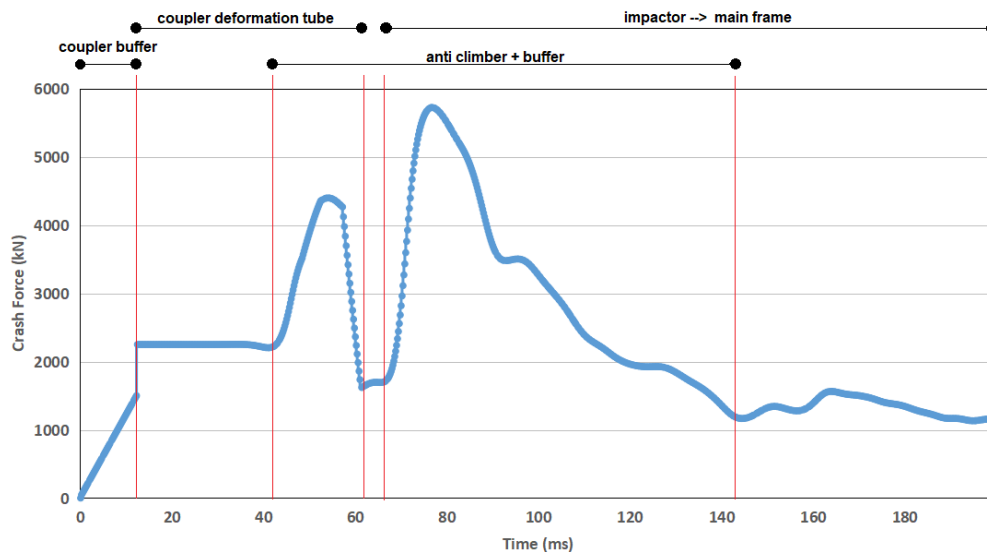
terdeformasi. pada waktu 75 ms *deformation tube* dan *coupler* bekerja bersama sehingga *crash force* naik hingga ke titik tertinggi sebesar 4810 kN. *Crash force* mulai menurun dikarenakan serapan pada *coupler deformation tube* habis dan landai pada nilai 1400 kN hingga pada waktu 156 ms *crash force* turun drastis yang menandakan tabrakan telah berhenti.



Gambar 4.17 Grafik *crash force* desain *existing* pada kecepatan tabrak 10 m/s

Gambar 4.18 menunjukkan grafik *crash force* desain *existing* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. *Coupler buffer* bekerja pada nilai force 0 kN hingga 1500 kN. Pada waktu 12 ms crash *coupler deformation tube* mulai bekerja pada *crash force* 2250 kN. Pada waktu 46 ms *anti climber* mulai bekerja bersamaan dengan *coupler deformation tube* sehingga *crash force* naik tajam mencapai 4397 kN. *Crash force* turun bersamaan dengan berakhirnya serapan pada *coupler deformation tube* dan mulai landai pada nilai 1400 kN. Pada waktu 66 ms *impactor* pada *crashbox* mulai menabrak dinding kaku sehingga terjadi kenaikan *crash force* hingga mencapai nilai puncak yaitu 5722 kN. Namun pada waktu 77 ms *crash force* tiba-tiba turun drastis dikarenakan struktur *main frame* mengalami *buckling*

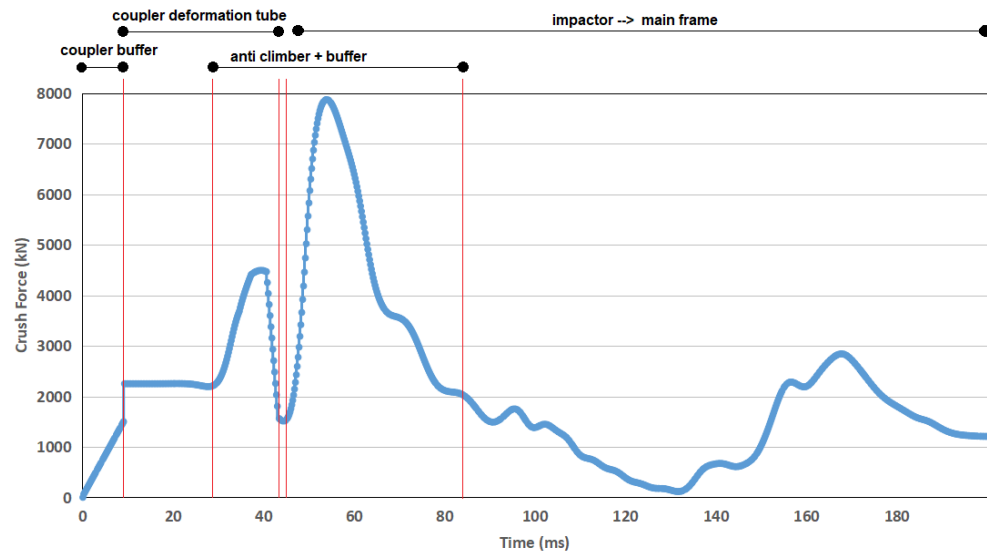
lebih dahulu sebelum *crashbox* terdeformasi. Hal tersebut dikarenakan kekakuan *main frame existing* masih di bawah kekakuan *crashbox*, sehingga *main frame* terdeformasi lebih dulu. *Crashbox* terlihat landai sampai dengan akhir simulasi pada 200 ms yang menandakan bahwa tabrakan masih belum selesai pada akhir waktu penelitian.



Gambar 4.18 Grafik *crash force* desain *existing* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s

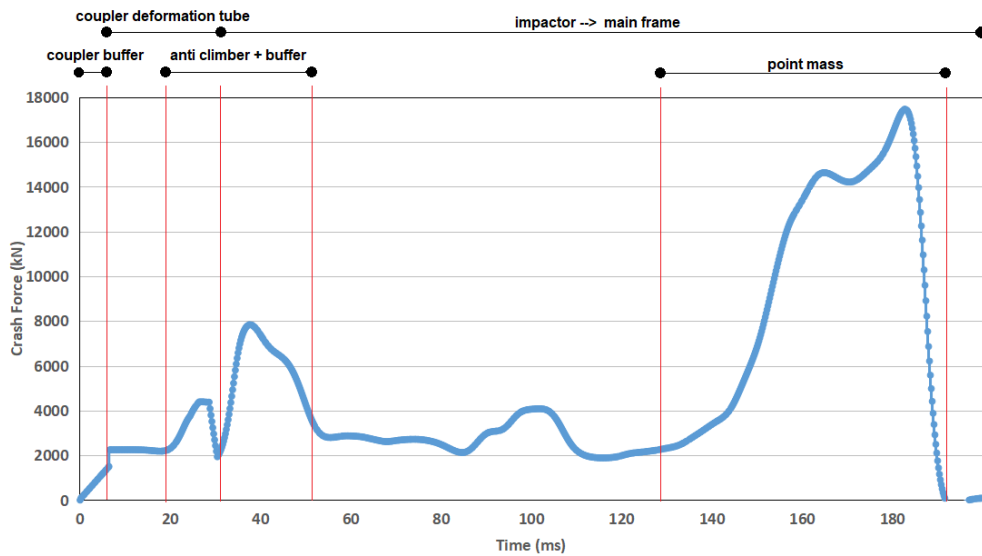
Sumbu X pada Gambar 4.19 menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton pada kecepatan tabrak 20 m/s. *Coupler buffer* bekerja pada *crash force* maksimum sebesar 1500 kN. Pada waktu 9 ms *coupler deformation tube* mulai bekerja sehingga *crash force* naik pada nilai 2250 kN. Pada waktu 33 ms *anti climber* dengan *buffer* mulai bekerja bersama dengan *coupler deformation tube* sehingga *force* naik hingga 4493 kN. *Crash force* turun bersamaan dengan berakhirnya serapan pada *coupler deformation tube* namun mengalami kenaikan kembali pada waktu 46 ms hingga mencapai puncak *crash force* yaitu sebesar 7872 kN. *Main frame* mengalami *buckling* pada waktu 46 ms di mana pada waktu tersebut *crash force* langsung mengenai *main frame* karena kekakuan

konstruksi *main frame* yang lebih lemah d dibandingkan *crashbox*. *Crash force* turun seiring dengan terdeformasinya *main frame* dan melandai sampai akhir deformasi di mana menandakan bahwa pada waktu 200 ms tabrakan belum berhenti.



Gambar 4.19 Grafik *crash force* desain *existing* pada kecepatan tabrak 20 m/s

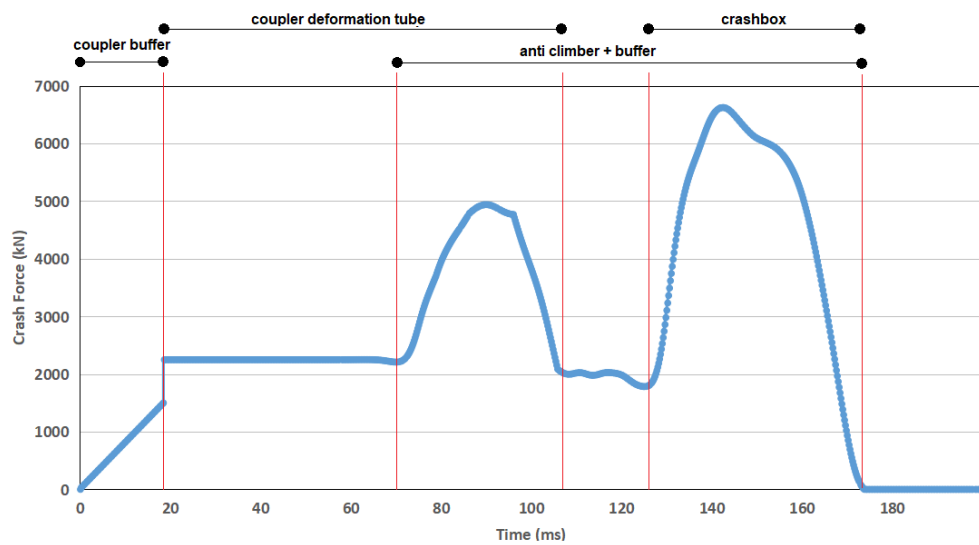
Gambar 4.20 menunjukkan grafik *crash force* desain *existing* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. Tren grafik pada kecepatan 27,78 m/s mirip dengan tren grafik pada kecepatan 20 m/s. perbedaan ada pada waktu perubahan *crash force*. Pada waktu 130 ms terjadi kenaikan *crash force* yang sangat signifikan dan mencapai puncak pada nilai 17460 kN, lalu mengalami penurunan yang sangat tajam hingga mencapai nilai 0 kN. Hal tersebut disebabkan karena *main frame* telah terdeformasi menyeluruh sehingga sisa energi tabrak menumbuk *point mass* yang kaku dan menghentikan tabrakan secara tiba-tiba.



Gambar 4.20 Grafik *crash force* desain *existing* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s

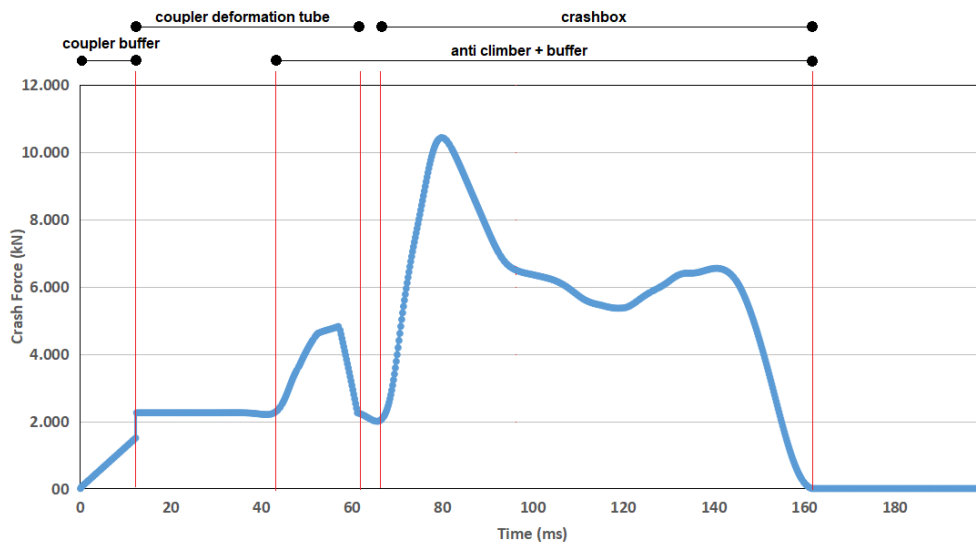
4.2.2 *Crash force* pada Desain Variasi A

Grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.21. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. Nilai *crash force* naik mulai dari 0 ms sampai 18 ms hingga mencapai 1500 kN. *Crash force* terus meningkat hingga mencapai nilai 2250 kN. Komponen *deformation tube* pada *coupler* mulai terdeformasi hingga pada waktu 75 ms diaman *anti climber* mulai menabrak dinding kaku dan *buffer* mulai terdeformasi. *Deformation tube* dan *coupler* bekerja bersama sehingga *crash force* naik hingga ke titik tertinggi sebesar 4940 kN. *Crash force* mulai menurun dikarenakan serapan pada *coupler deformation tube* habis dan landai pada nilai 1400 kN. *Crash force* naik kembali pada waktu 129 ms hingga mencapai puncak *crash force* yaitu sebesar 6623 kN. Kenaikan tersebut disebabkan karena *impactor* telah menabrak dinding kaku sehingga *crashbox*. *crash force* turun drastis dimulai pada waktu 160 ms hingga 174 ms yang menandakan tabrakan telah berhenti.



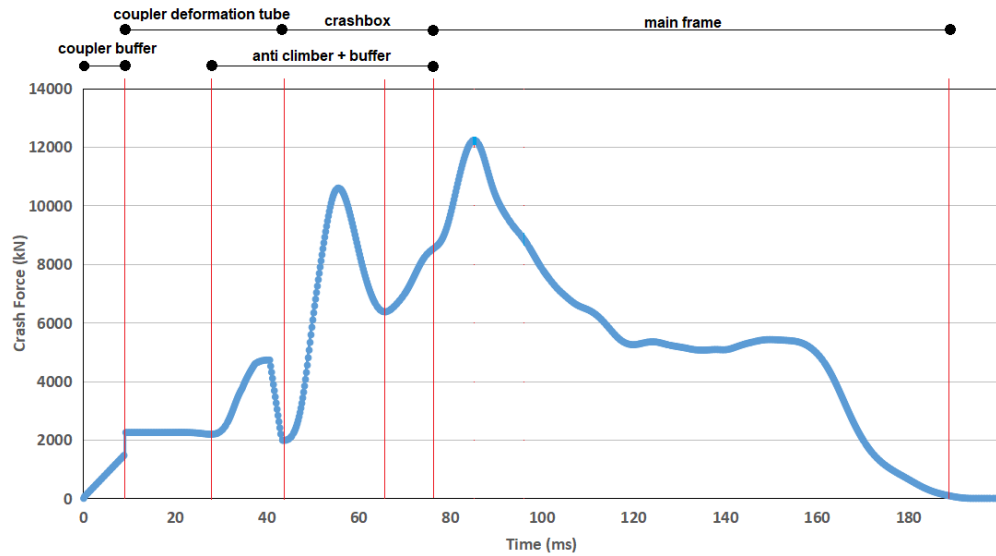
Gambar 4.21 Grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 10 m/s

Gambar 4.22 menunjukkan grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. *Coupler buffer* bekerja pada nilai force 0 kN hingga 1500 kN. Pada waktu 12 ms crash *coupler deformation tube* mulai bekerja pada *crash force* 2250 kN. Pada waktu 46 ms *anti climber* mulai bekerja bersamaan dengan *coupler deformation tube* sehingga *crash force* naik tajam mencapai 4824 kN. *Crash force* turun bersamaan dengan berakhirnya serapan pada *coupler deformation tube* dan mulai landai pada nilai 2100 kN. Pada waktu 66 ms *impactor* pada *crashbox* mulai menabrak dinding kaku sehingga terjadi kenaikan *crash force* hingga mencapai nilai puncak yaitu 10.423 kN. *Crash force* kembali menurun dan fluktuatif pada *crash force* 6000 kN, di mana pada *crash force* tersebut merupakan gabungan *crash force* antara *anti climber* dengan *buffer* serta *crashbox*. *Crash force* kembali turun tajam sampai nilai 0 kN dari waktu 140 ms hingga 160 ms yang menandakan bahwa tabrakan telah berhenti.



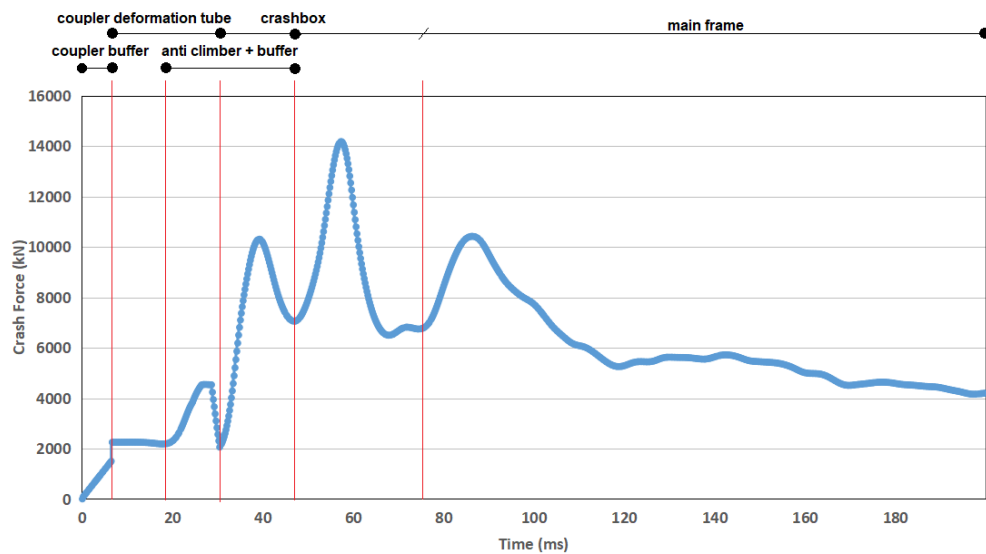
Gambar 4.22 Grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 14,75 m/s

Sumbu X pada Gambar 4.23 menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton pada kecepatan tabrak 20 m/s. *Coupler buffer* bekerja pada *crash force* maksimum sebesar 1500 kN. Pada waktu 9 ms *coupler deformation tube* mulai bekerja sehingga *crash force* naik pada nilai 2250 kN. Pada waktu 33 ms *anti climber* dengan *buffer* mulai bekerja bersama dengan *coupler deformation tube* sehingga *force* naik hingga 4724 kN. *Crash force* turun bersamaan dengan berakhirnya serapan pada *coupler deformation tube* namun mengalami kenaikan kembali pada waktu 46 ms hingga mencapai *crash force* sebesar 10.596 kN. *Crash force* sempat turun setelah naik karena awal tabrak dan mulai naik kembali pada waktu 76 ms hingga mencapai puncak *crash force* sebesar 12.229 kN pada 85 ms. Kenaikan *crash force* pada 66 ms terjadi karena pada waktu tersebut kemampuan serap CEM telah habis sehingga lalu energi tabrak yang tersisa ditahan langsung oleh *main frame* sehingga mulai terjadi awal deformasi. *Crash force* turun curam hingga mencapai nilai 5200 kN lalu mengalami fluktuasi. *Crash force* turun kembali pada waktu 160 ms hingga mencapai nilai 0 kN pada waktu 193 ms sebagai tanda bahwa tabrakan telah berhenti.



Gambar 4.23 Grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 20 m/s

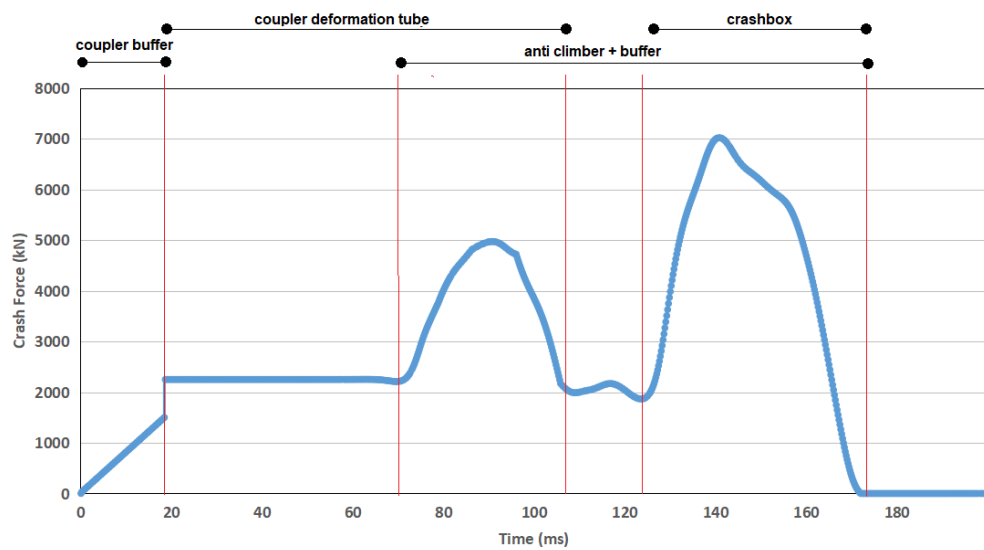
Gambar 4.24 menunjukkan grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 27,78 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. Tren grafik pada kecepatan 27,78 m/s mirip dengan tren grafik pada kecepatan 20 m/s. Perbedaan ada pada waktu perubahan *crash force*. Pada waktu 48 ms energi tabrak mulai mengenai *main frame* saat deformasi CEM telah maksimal. Terjadi kenaikan *crash force* yang sangat signifikan dan mencapai puncak pada nilai 14176 kN, lalu mengalami penurunan dan landai pada nilai 7000 kN. *Crash force* naik kembali pada waktu 75 ms pada saat ruas pertama *main frame* telah terdeformasi maksimal dan merambat ke ruas kedua *main frame*. Setelah itu *crash force* turun kembali dan landa pada 5000 kN hingga akhir simulasi. Nilai *crash force* yang tidak 0 kN pada akhir waktu simulasi menandakan bahwa terdapat energi tabrak yang tersisa dan tabrakan belum selesai.



Gambar 4.24 Grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 27,78 m/s

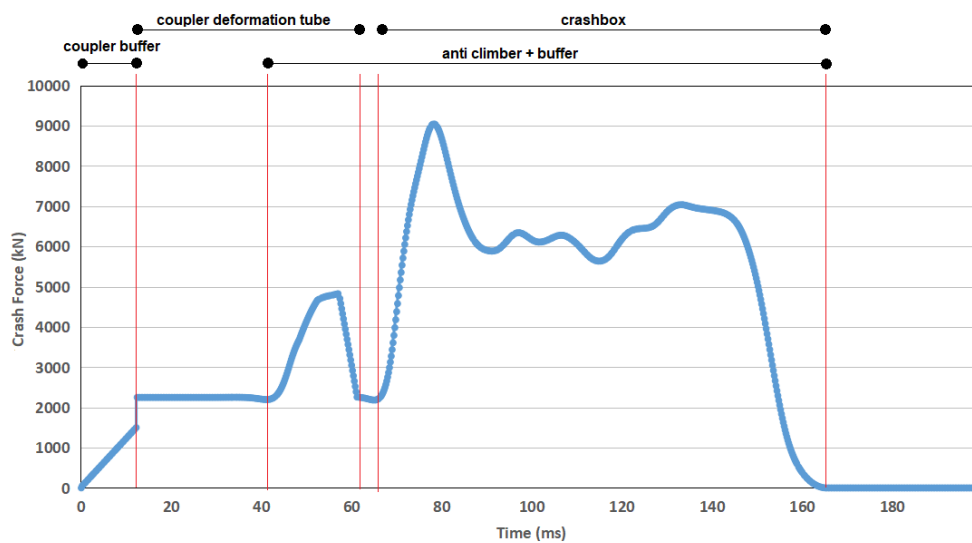
4.2.3 *Crash force* pada Desain variasi B

Grafik *crash force* desain variasi B pada kecepatan tabrak 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.25. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. Nilai *crash force* naik mulai dari 0 ms sampai 18 ms hingga mencapai 1500 kN. *Crash force* terus meningkat hingga mencapai nilai 2250 kN. Komponen *deformation tube* pada *coupler* mulai terdeformasi hingga pada waktu 75 ms diaman *anti climber* mulai menabrak dinding kaku dan *buffer* mulai terdeformasi. *Deformation tube* dan *coupler* bekerja bersama sehingga *crash force* naik hingga ke titik tertinggi sebesar 4972 kN. *Crash force* mulai menurun dikarenakan serapan pada *coupler deformation tube* habis dan landai pada nilai 2100 kN. *Crash force* naik kembali pada waktu 129 ms hingga mencapai puncak *crash force* yaitu sebesar 7020 kN. Kenaikan tersebut disebabkan karena *impactor* telah menabrak dinding kaku sehingga *crashbox*. *crash force* turun drastis dimulai pada waktu 160 ms hingga 174 ms yang menandakan tabrakan telah berhenti.



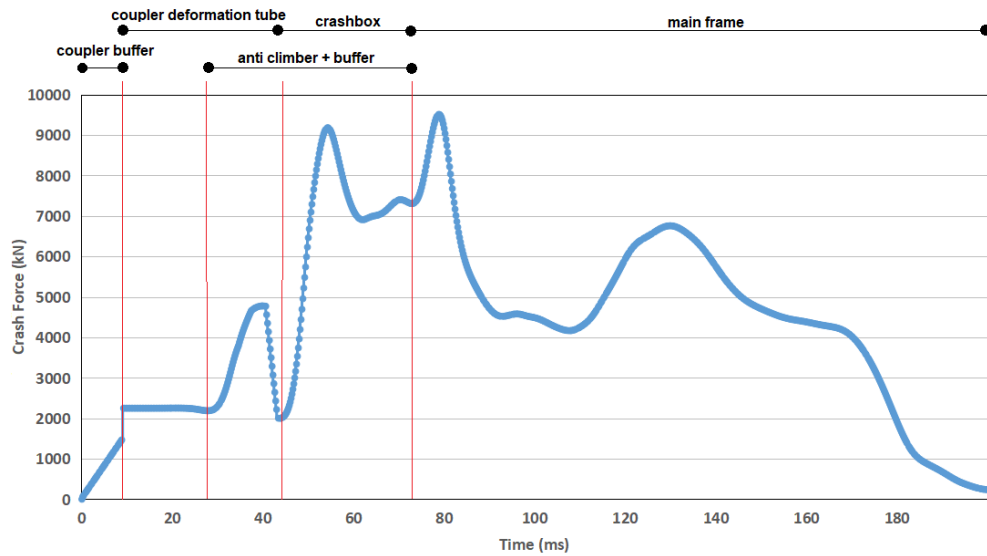
Gambar 4.25 Grafik *crash force* desain variasi B pada kecepatan tabrak 10 m/s

Gambar 4.26 menunjukkan grafik *crash force* desain variasi B pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. *Coupler buffer* bekerja pada nilai *force* 0 kN hingga 1500 kN. Pada waktu 12 ms *crash coupler deformation tube* mulai bekerja pada *crash force* 2250 kN. Pada waktu 46 ms *anti climber* mulai bekerja bersamaan dengan *coupler deformation tube* sehingga *crash force* naik tajam mencapai 4832 kN. *Crash force* turun bersamaan dengan berakhirnya serapan pada *coupler deformation tube* dan mulai landai pada nilai 2100 kN. Pada waktu 66 ms *impactor* pada *crashbox* mulai menabrak dinding kaku sehingga terjadi kenaikan *crash force* hingga mencapai nilai puncak yaitu 9044 kN. *Crash force* kembali menurun dan fluktuatif pada *crash force* 6000 kN, di mana pada *crash force* tersebut merupakan gabungan *crash force* antara *anti climber* dengan *buffer* serta *crashbox*. *Crash force* kembali turun tajam sampai nilai 0 kN dari waktu 140 ms hingga 160 ms yang menandakan bahwa tabrakan telah berhenti.

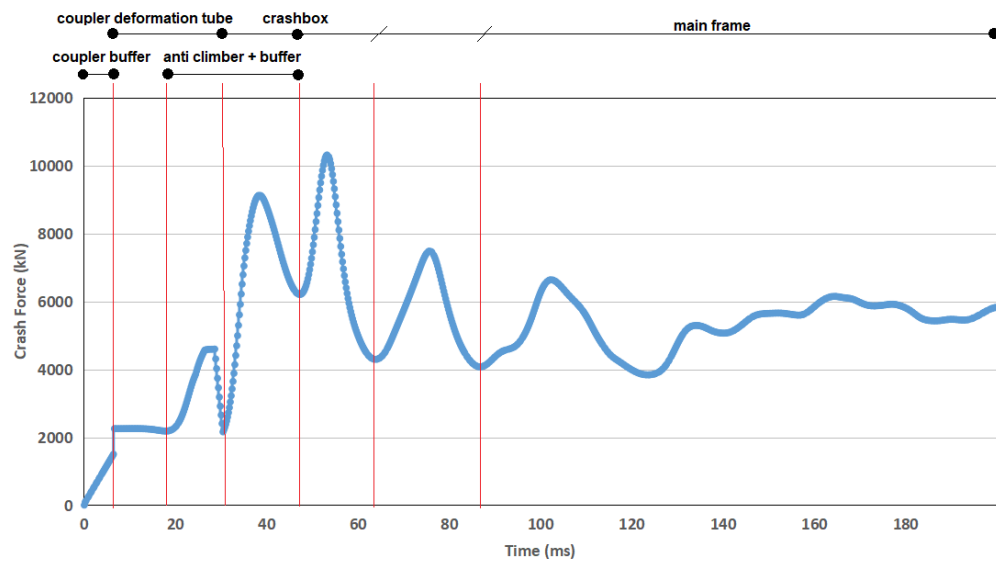


Gambar 4.26 Grafik *crash force* desain variasi B pada kecepatan tabrak 14,75 m/s

Sumbu X pada Gambar 4.27 menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton pada kecepatan tabrak 20 m/s. *Coupler buffer* bekerja pada *crash force* maksimum sebesar 1500 kN. Pada waktu 9 ms *coupler deformation tube* mulai bekerja sehingga *crash force* naik pada nilai 2250 kN. Pada waktu 33 ms *anti climber* dengan *buffer* mulai bekerja bersama dengan *coupler deformation tube* sehingga *force* naik hingga 4777 kN. *Crash force* turun bersamaan dengan berakhirnya serapan pada *coupler deformation tube* namun mengalami kenaikan kembali pada waktu 46 ms hingga mencapai *crash force* sebesar 9179 kN. *Crash force* turun setelah awal tabrakan dan fluktuatif ada nilai 7200 kN. Kemampuan serap CEM habis pada waktu 75 ms sehingga energi tabrak yang tersisa langsung ditahan oleh *main frame*. *Crash force* naik hingga ke nilai tertinggi yaitu 9510 kN lalu turun dan fluktuatif pada nilai 4500 kN. Deformasi pada ruas kedua *main frame* menyebabkan kenaikan nilai *crash force* pada waktu 110 ms. *Crash force* turun kembali sampai pada akhir simulasi ketika tabrakan telah selesai.



Gambar 4.27 Grafik *crash force* desain variasi B pada kecepatan tabrak 20 m/s

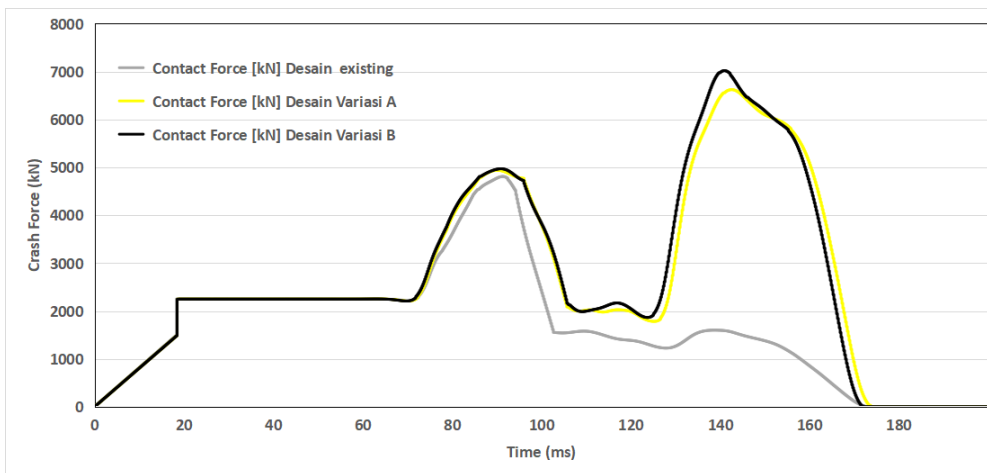


Gambar 4.28 Grafik *crash force* desain variasi B pada kecepatan tabrak 27,78 m/s

Gambar 4.28 menunjukkan grafik *crash force* desain variasi A pada kecepatan tabrak 27,78 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *crash force* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo newton. Tren grafik pada kecepatan 27,78 m/s mirip dengan tren grafik pada kecepatan 20 m/s.

Perbedaan berada pada nilai puncak *crash force* yaitu 10309 kN, serta fluktuasi naik turun *crash force* terjadi selama deformasi *main frame*. Fluktuasi terjadi pada *range crash force* 4000 kN sampai 6000 kN. *Crash force* pada akhir simulasi masih berada pada nilai 6000 kN, hal tersebut menandakan bahwa tabrakan belum selesai pada akhir simulasi 200 ms.

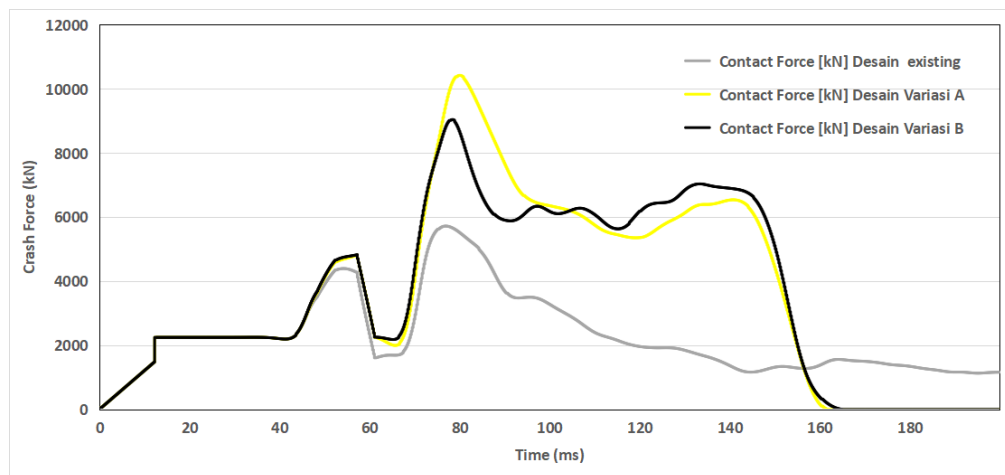
4.2.4 Pembahasan *Crash force*



Gambar 4.29 Grafik perbandingan *crash force* pada kecepatan tabrak 10 m/s

Grafik perbandingan *crash force* antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.29. Grafik pada waktu 0 ms hingga 66 ms memiliki tren yang sama. Pada interval waktu tersebut *force* tabrak ditahan oleh *coupler* dengan *deformation tube* di mana pada ketiga variasi desain memiliki komponen *coupler* yang sama. Setelah melewati waktu 66 ms *crash force* mengalami peningkatan bersamaan dengan *anti climber* dengan *buffer* mulai menyentuh dinding kaku. *crash force* pada ketiga jenis desain kemudian turun bersamaan dengan berakhirnya deformasi dari *coupler* dengan *deformation tube* dan kemudian landai. Pada waktu 130 ms *crash force* pada desain variasi A dan B mengalami kenaikan hingga mencapai nilai puncak dengan nilai masing-masing adalah 6623 kN dan 7020 kN. Meningkatnya *crash force* disebabkan

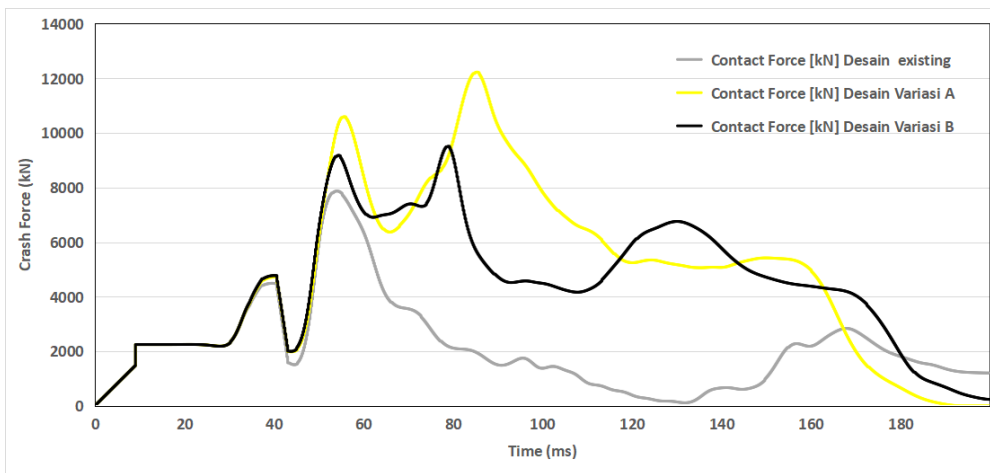
karena *impactor* pada *crashbox* mulai menabrak dinding kaku sehingga nilai *crash force* meningkat resultan dari *buffer* dan *crashbox*. Namun pada desain *existing* terlihat bahwa nilai *crash force* tidak meningkat pada waktu 130 ms, di mana hal tersebut disebabkan karena *main frame* desain *existing* memiliki kekakuan yang lebih rendah dibanding dengan *crashbox* sehingga deformasi tidak terjadi pada *crashbox* namun langsung ke *main frame*. Rata-rata nilai *crash force* pada kecepatan tabrak 10 m/s untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut adalah 1947 kN, 3072 kN, dan 3103 kN.



Gambar 4.30 Grafik perbandingan *crash force* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s

Gambar 4.30 menunjukkan grafik perbandingan *crash force* antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. grafik memiliki tren yang sama pada awal tabrak dikarenakan pada ketiga jenis variasi menggunakan komponen yang sama. Namun pada waktu 70 ms di mana *impactor* mulai menabrak dinding kaku *crash force* meningkat hingga mencapai nilai puncak, namun berbeda-beda pada masing-masing variasi. Nilai puncak *force* pada desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 5722 kN, 10.423 kN, dan 9044 kN. Perbedaan pada nilai puncak *force* disebabkan oleh perbedaan kekakuan *main frame* pada masing-masing variasi. Pada variasi A dan variasi B *Crash force* turun dan fluktuatif pada nilai 6000 kN dan turun pada waktu 150 ms hingga akhir

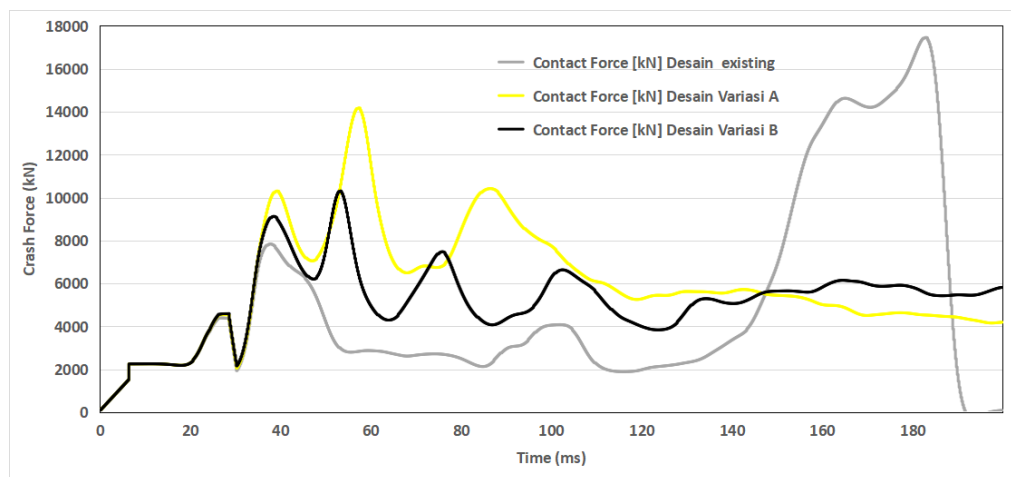
tabrak. Namun pada desain *existing* grafik *crash force* terus landai pada nilai 1800 kN hingga akhir waktu simulasi, di mana hal tersebut menandakan bahwa energi tabrak belum terserap sempurna hingga akhir waktu simulasi. Rata-rata nilai *crash force* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut adalah 2278 kN, 4498 kN, dan 4379 kN.



Gambar 4.31 Grafik perbandingan *crash force* pada kecepatan tabrak 20 m/s

Grafik perbandingan *crash force* antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 20 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.31. Grafik pada awal tabrak hingga waktu 45 ms memiliki tren yang sama. *Crash force* naik bersama dengan *impactor crashbox* menabrak dinding kaku. pada desain variasi A dan B lalu turun dan landai pada proses deformasi *crashbox*. *Crash force* kembali naik dan mencapai puncak pada desain variasi A dan variasi B berturut-turut dengan nilai 12.229 kN dan 9510 kN disebabkan karena energi tabrak mulai diserap oleh *main frame* saat fungsi serap CEM telah habis. Pada desain variasi A nilai *crash force* puncak *main frame* dibandingkan dengan nilai *crash force* puncak *crashbox* lebih tinggi dibandingkan desain variasi B. hal tersebut menandakan bahwa *main frame* desain variasi A jauh lebih kaku dibandingkan *crashbox* sedangkan kekakuan *main frame* pada desain variasi B sedikit lebih tinggi dibandingkan *crashbox*. Pada desain *existing* nilai *crash force* menurun dan fluktuatif pada nilai 2000

diakibatkan setelah *impactor crashbox* menabrak dinding kaku deformasi terjadi pada *main frame* yang tidak lebih kaku dari *crashbox* dan terdeformasi dengan *manner* yang tidak baik. *Crash force* turun dan landai hingga mencapai nilai 0 kN pada akhir simulasi pada kedua desain variasi A dan B, namun pada variasi B sempat terjadi kenaikan *crash force* dikarenakan deformasi pada desain variasi B telah memasuki ruas kedua pada *main frame*. Rata-rata nilai *crash force* pada kecepatan tabrak 20 m/s untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut adalah 2132 kN, 5155 kN, dan 4369 kN.



Gambar 4.32 Grafik perbandingan *crash force* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s

Pada kecepatan tabrak 27,78 m/s, grafik perbandingan *crash force* antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B memiliki tren yang sama pada awal tabrakan. Grafik perbandingan *crash force* pada kecepatan 27,78 m/s memiliki tren yang mirip dibandingkan dengan kecepatan 20 m/s. perbedaan ada pada puncak *crash force* berturut turut 17.460 kN, 14.176 kN, dan 10.309 untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B. desain *existing* mengalami puncak *crash force* sebelum akhir waktu simulasi dikarenakan serapan *main frame* yang kecil sehingga seluruh sisa energi tabrak mengenai *point mass* hingga tabrakan berhenti secara tiba-tiba. Seacara menyeluruh dapat dilihat nilai *crash force* desain variasi B memiliki nilai yang relatif lebih rendah

dibanding desain variasi A. Rata-rata nilai *crash force* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut adalah 5041 kN, 5951 kN, dan 5174 kN.

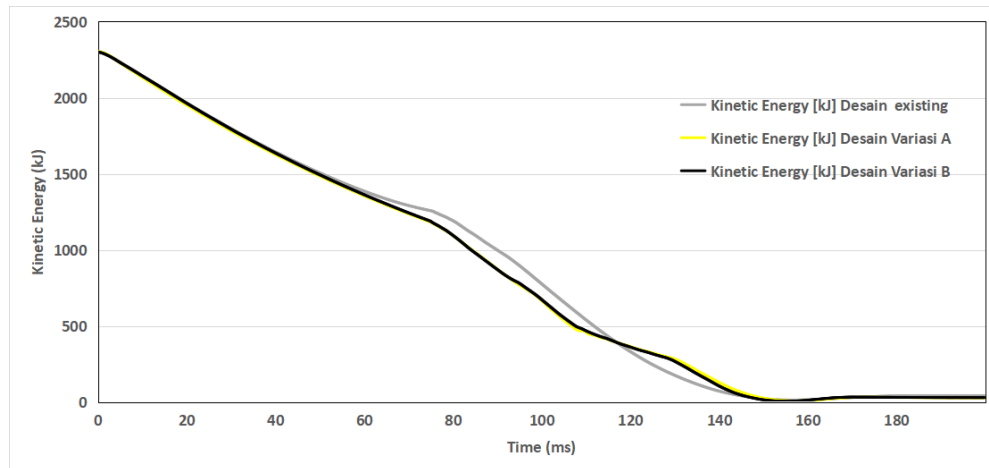
4.3 Energy Absorption

Perbandingan nilai dan grafik *energy absorption* dapat memberikan gambaran perubahan energi kinetik selama waktu tabrakan, serta seberapa besar energi kinetik yang mampu diserap oleh *cabin frame* pada beberapa variasi kecepatan tabrak. Setelah dilakukan simulasi menggunakan analisa numerik didapatkan hasil *energy absorption* pada masing-masing desain *existing*, variasi A, dan variasi B adalah sebagai berikut.

4.3.1 Energy Absorption pada Kecepatan tabrak 10 m/s

Grafik perbandingan nilai *energy absorption* untuk variasi desain kereta *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 10 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.33. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *kinetic energy* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo joule. *Energy absorption* dihitung dari resultan antara energi kinetik saat awal tabrakan dan energi kinetik terendah selama tabrakan. Terlihat bahwa tren dan nilai energi kinetik yang sama pada ketiga variasi desain sejak awal waktu simulasi hingga pada waktu 66 ms. Tren grafik pada desain variasi A dan B terus memiliki kesamaan hingga akhir simulasi, namun pada desain *existing* terjadi perbedaan nilai dan tren mulai dari waktu 66 ms. Kesamaan nilai dan tren tersebut dikarenakan pada awal tabrak energi kinetik diserap oleh komponen CEM yang sama pada ketiga desain variasi. Pada waktu 66 ms tren dan nilai energi kinetik pada desain *existing* lebih tinggi dibanding kan dengan desain variasi A dan B di mana hal tersebut menandakan bahwa serapan energi pada desain *existing* lebih rendah dibandingkan serapan energi pada desain variasi A dan B. Pada waktu 130 ms energi kinetik pada desain *existing* lebih rendah d banding nilai energi kinetik pada desain variasi A dan B yang menandakan bahwa serapan pada desain *existing* lebih tinggi dibanding dua desain variasi lainnya. Energi

kinetik mencapai nilai 0 kJ pada waktu 156 ms yang menandakan bahwa tabrakan telah berhenti dan seluruh energi kinetik telah terserap untuk ketiga desain variasi. Ketiga desain variasi memiliki nilai *energy absorption* yang sama yaitu 2,3 MJ pada kecepatan tabrak 10 m/s.

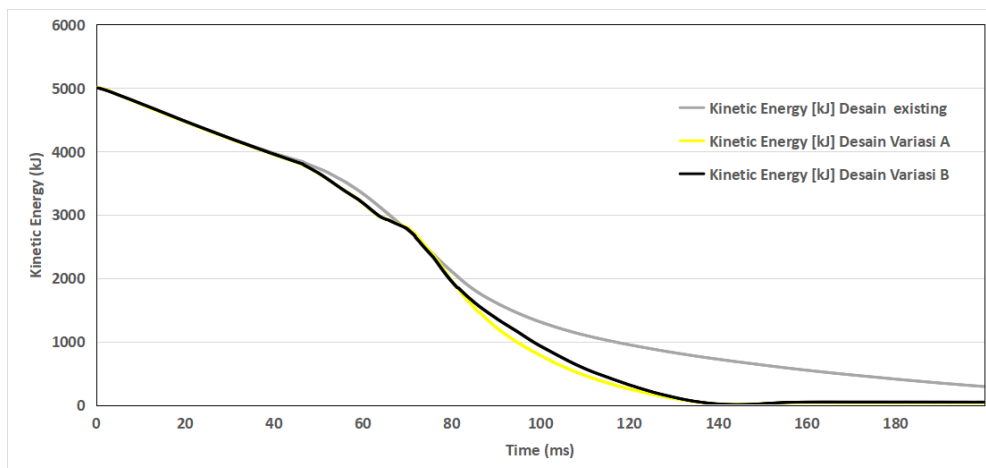


Gambar 4.33 Grafik perbandingan *energy absorption* pada kecepatan tabrak 10 m/s

4.3.2 Energy Absorption pada Kecepatan tabrak 14,75 m/s

Gambar 4.34 menunjukkan Grafik perbandingan nilai *energy absorption* untuk variasi desain kereta *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *kinetic energy* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo joule. Di awal tabrakan energi kinetik diserap oleh komponen CEM. Penyerapan diawali oleh *coupler* dengan *deformation tube* lalu dibantu oleh *anti climber* dengan *buffer*. Pada tahap penyerapan kedua komponen tersebut tren grafik memiliki nilai dan bentuk yang sama. tahap ketiga dan terakhir dari komponen CEM adalah *crashbox* di mana penyerapan *crashbox* dimulai pada waktu 70 ms. Pada waktu 70 ms tersebut tren grafik pada desain variasi A dan B memiliki bentuk yang mirip, sedangkan pada desain *existing* memiliki nilai energi kinetik yang lebih tinggi. Nilai grafik energi kinetik yang lebih tinggi menunjukkan bahwa serapan pada desain *existing* lebih rendah dibandingkan kedua desain variasi.

Desain *existing* memiliki komponen CEM yang sama dengan kedua desain variasi, namun *main frame* pada desain *existing* tidak lebih kaku dibandingkan dengan komponen *crashbox* pada CEM. *Main frame* terdeformasi lebih dahulu sebelum *crashbox* dengan serapan energi yang lebih rendah sehingga energi kinetik pada desain *existing* masih tinggi dan belum mencapai nilai 0 kJ pada akhir simulasi yang menandakan bahwa tabrakan pada desain *existing* belum selesai pada akhir simulasi. Pada desain variasi A dan B tabrakan berhenti ketika energi kinetik mencapai nilai 0 kJ pada waktu 160 ms. Nilai serap energi untuk desain variasi A dan B mencapai 5 MJ, sedangkan nilai serapan energi pada desain *existing* hanya mencapai 4,7 MJ sampai akhir simulasi pada waktu 200 ms.

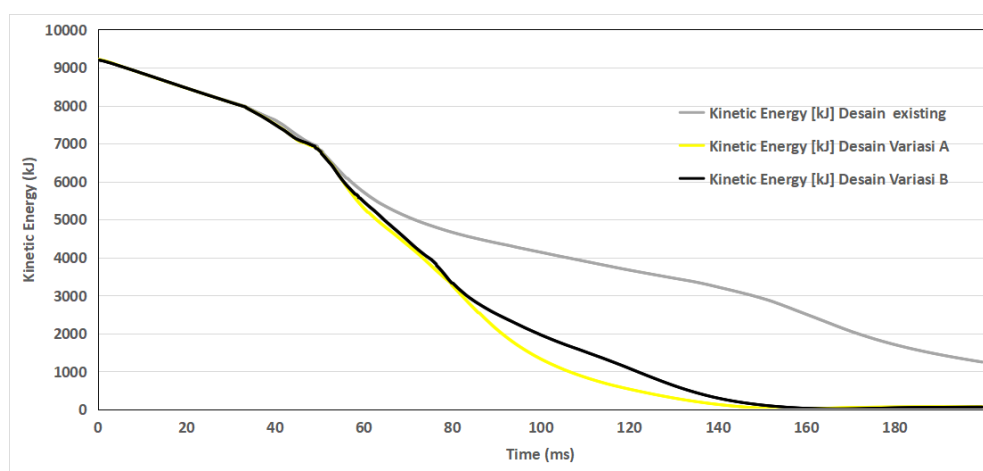


Gambar 4.34 Grafik perbandingan *energy absorption* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s

4.3.3 Energy Absorption pada Kecepatan tabrak 20 m/s

Grafik pada Gambar 4.35 menunjukkan perbandingan nilai *energy absorption* untuk variasi desain kereta *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 20 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *kinetic energy* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo joule. Tren grafik pada ketiga variasi menunjukkan bentuk dan nilai yang sama hingga waktu 50 ms yaitu ketika komponen *coupler* dengan *deformation tube* dan *anti climber* dengan *buffer*

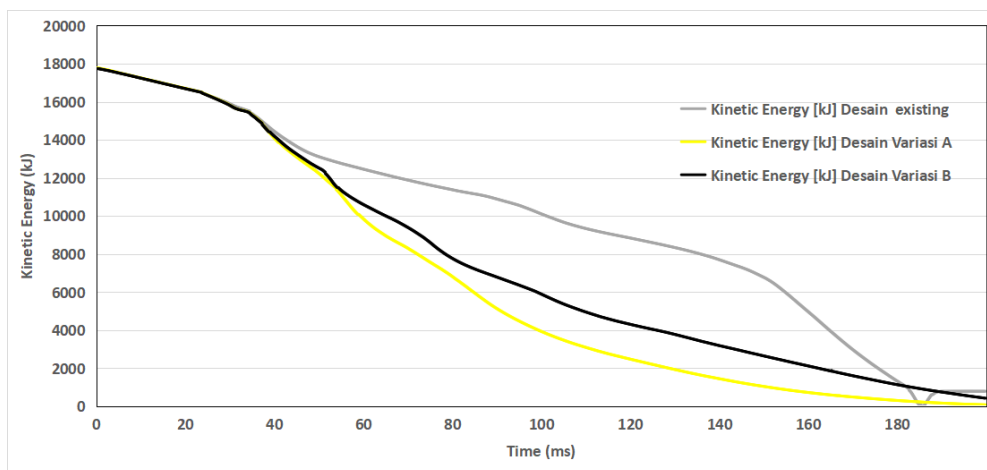
bekerja menyerap energi tabrak. Tren grafik pada variasi A dan B masih menunjukkan kesamaan hingga waktu 80 ms yaitu pada saat *crashbox* bekerja menyerap energi tabrak. Energi kinetik pada desain *existing* menunjukkan perbedaan tren setelah waktu 66 ms di mana terlihat bahwa serapan pada desain *existing* lebih rendah dibandingkan pada desain variasi A dan B. serapan pada desain yang lebih rendah tersebut terjadi karena *crashbox* lebih kaku dari *main frame* sehingga energi tabrak langsung diserap oleh *main frame*. Perbedaan tren pada desain variasi A dan B di mulai pada waktu 80 ms di mana pada waktu tersebut fungsi penyerapan *crashbox* telah habis dan energi kinetik yang tersisa diteruskan dan di tahan oleh *main frame*. Terlihat bahwa penyerapan energi desain variasi A lebih tinggi dibandingkan desain variasi B. Akhir tabrakan pada desain variasi A dan B menunjukkan waktu yang sama dikarenakan deformasi pada desain variasi A lebih kecil dibanding desain variasi B. Pada desain *existing* energi kinetik belum menunjukkan nilai 0 kJ sampai dengan akhir simulasi yang menandakan bahwa tabrakan pada desain *existing* belum berakhir. Nilai serap energi untuk desain variasi A dan B mencapai 9,2 MJ, sedangkan nilai serapan energi pada desain *existing* hanya mencapai 8 MJ sampai akhir simulasi pada waktu 200 ms.



Gambar 4.35 Grafik perbandingan *energy absorption* pada kecepatan tabrak 20 m/s

4.3.4 Energy Absorption pada Kecepatan tabrak 27,78 m/s

Gambar 4.36 menunjukkan Grafik perbandingan nilai *energy absorption* untuk variasi desain kereta *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 27,78 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *kinetic energy* selama tabrakan terjadi dengan satuan kilo joule. Tren grafik di awal tabrakan memiliki karakteristik yang sama dengan tren grafik pada kasus kecepatan tabrak 20 m/s. perbedaan terjadi pada tren grafik desain *existing* yang menunjukkan penurunan yang sangat curam pada waktu 150 ms hingga 185 ms. Penurunan yang curam tersebut disebabkan karena *main frame* pada desain *existing* telah terdeformasi secara maksimal sehingga sisa energi tabrak terserap oleh *point mass* dan terjadi penurunan kecepatan tabrak secara mendadak. Desain variasi A dan B memiliki tren menurun hingga akhir simulasi, namun pada desain variasi A penurunan terjadi lebih curam pada waktu 80 ms hingga 105 ms dan lebih landai pada waktu 105 ms hingga 200 ms dibandingkan desain variasi B. Desain *existing* dan desain variasi A menyerap seluruh energi kinetik tabrakan hingga akhir simulasi yaitu sebesar 17,7 MJ, sedangkan desain variasi B menyerap sedikit lebih rendah yaitu 17,3 MJ.

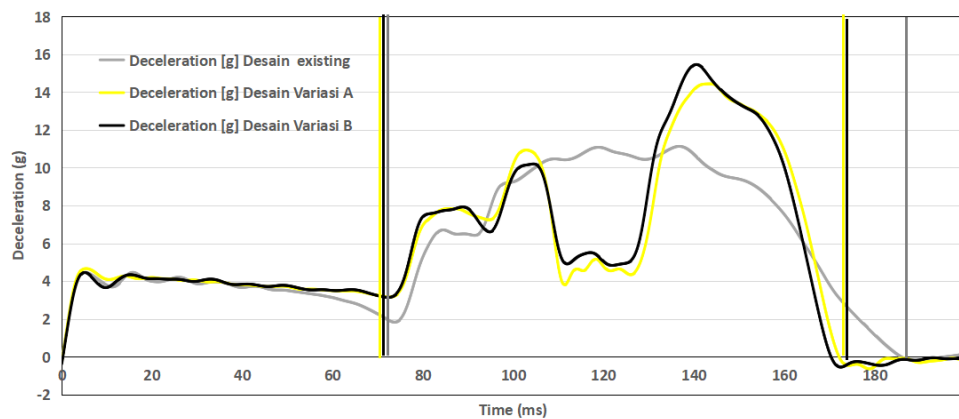


Gambar 4.36 Grafik perbandingan *energy absorption* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s

4.4 Deceleration pulse

Perbandingan nilai dan grafik *deceleration pulse* dapat memberikan gambaran perlambatan yang terjadi selama tabrakan. Nilai serta durasi *deceleration pulse* dapat dijadikan sebagai faktor untuk melihat keselamatan penumpang selama tabrakan. Setelah dilakukan simulasi menggunakan analisa numerik didapatkan hasil *deceleration pulse* pada masing-masing desain *existing*, variasi A, dan variasi B adalah sebagai berikut.

4.4.1 Deceleration pulse pada kecepatan tabrak 10 m/s



Gambar 4.37 Grafik perbandingan *deceleration pulse* pada kecepatan tabrak 10 m/s

Gambar 4.37 menunjukkan grafik perbandingan *deceleration pulse* desain *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 10 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *Decelerations* selama tabrakan terjadi dengan satuan g (gravitasi). *Occupant protection* ditinjau berdasarkan penelitian tentang toleransi seluruh tubuh terhadap perlambatan akibat dari tabrakan (Huston & Perrone, 1978). Untuk pulsar tabrak di bawah 10g dalam waktu kurang dari 1 s diklasifikasikan dalam kondisi tidak terjadi cedera. Pada desain *existing deceleration pulse* mencapai nilai puncak sebesar 11,1 g terjadi mulai dari waktu 75 ms sampai 190 ms. Pada desain variasi A *deceleration pulse* mencapai nilai puncak sebesar 15,1 g terjadi mulai dari waktu 75 ms sampai

175 ms. Pada desain variasi B *deceleration pulse* mencapai nilai puncak sebesar 16 g terjadi mulai dari waktu 75 ms sampai 175 ms. Dengan menggunakan Persamaan 2.7 didapatkan hasil:

Desain Existing

$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$

$$(0,19 - 0,075). (11,3)^{2,5} \leq 1000$$

$$(0,115). (11,3)^{2,5} \leq 1000$$

$$49 \leq 1000$$

Desain Variasi A

$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$

$$(0,175 - 0,075). (15,1)^{2,5} \leq 1000$$

$$(0,1). (15,1)^{2,5} \leq 1000$$

$$88 \leq 1000$$

Desain Variasi B

$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$

$$(0,175 - 0,075). (16)^{2,5} \leq 1000$$

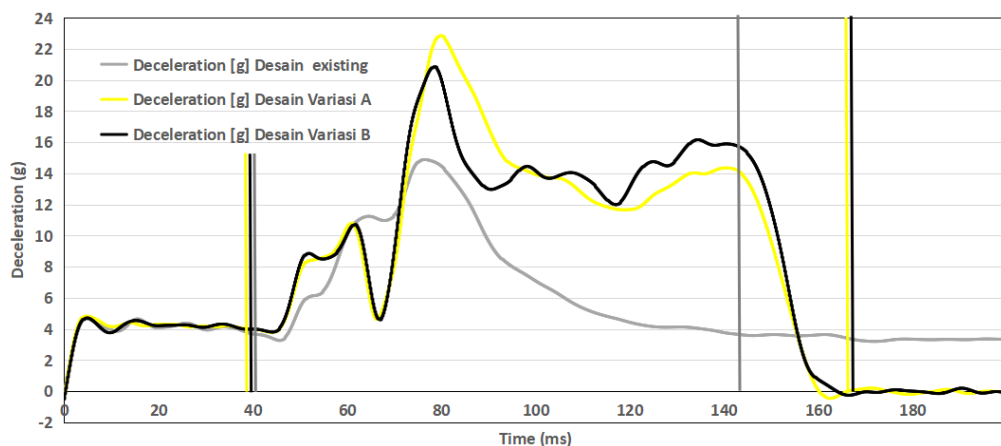
$$(0,1). (16)^{2,5} \leq 1000$$

$$103 \leq 1000$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai toleransi terhadap dampak pada desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 49, 88, dan 103. Nilai hasil perhitungan pada ketiga desain variasi berada jauh di bawah nilai batas 1000, sehingga dapat disimpulkan bahwa *deceleration pulse* tidak menimbulkan cedera terhadap penumpang dengan sabuk pengaman yang terpasang dengan baik.

Berdasarkan standar (BS EN15227, 2008), *occupant protection* ditinjau dari nilai rata-rata *deceleration pulse* dengan batas aman 5g. Pada kasus tabrakan pada kecepatan 10 m/s, nilai rata-rata *deceleration pulse* untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 6,38 g, 6,47 g, dan 6,51 g. Dapat disimpulkan bahwa berdasarkan standar (BS EN15227, 2008) *deceleration pulse* pada ketiga jenis variasi tidak aman bagi penumpang. Puncak *deceleration pulse* untuk ketiga jenis variasi melebihi batas yaitu 8g, sehingga dapat disimpulkan ketiga jenis variasi tidak memenuhi syarat aman berdasarkan standar (49 CFR Part 238, 2020).

4.4.2 *Deceleration pulse* pada kecepatan tabrak 14,75 m/s



Gambar 4.38 Grafik perbandingan *deceleration pulse* pada kecepatan Tabrak 14,75 m/s

Gambar 4.38 menunjukkan grafik perbandingan nilai dan tren *deceleration pulse* antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 14,75 m/s. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *Decelerations* selama tabrakan terjadi dengan satuan g (gravitasi). Ketiga variasi memiliki awal *pulse* tinggi yang sama yaitu pada waktu 40 ms. Puncak *pulse* pada masing-masing desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut adalah 14,9 g, 23,3 g, dan 21,3 g. *Pulse* tinggi pada desain *existing* berakhir pada

waktu 145 ms sedangkan pada desain variasi A dan B berakhir pada waktu 165 ms. Dengan menggunakan Persamaan 2.7 didapatkan hasil:

Desain Existing

$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,145 - 0,04). (14,9)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,105). (14,9)^{2,5} \leq 1000$$
$$90 \leq 1000$$

Desain Variasi A

$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,165 - 0,04). (23,3)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,125). (23,3)^{2,5} \leq 1000$$
$$328 \leq 1000$$

Desain Variasi B

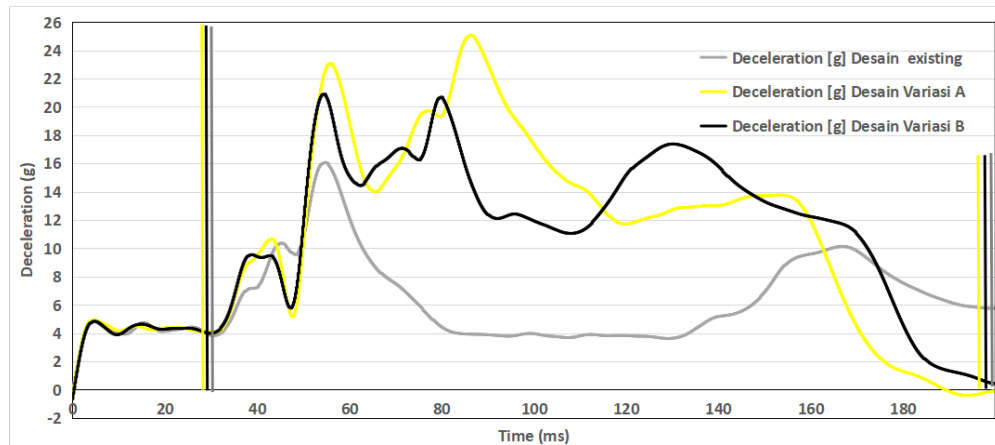
$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,165 - 0,04). (21,3)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,125). (21,3)^{2,5} \leq 1000$$
$$264 \leq 1000$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai toleransi terhadap impak pada desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 90, 328, dan 264. Nilai hasil perhitungan pada ketiga desain variasi berada jauh di bawah nilai batas 1000, sehingga dapat disimpulkan bahwa *deceleration pulse* tidak menimbulkan cedera terhadap penumpang dengan sabuk pengaman yang terpasang dengan baik.

Berdasarkan standar (BS EN15227, 2008), *Occupant protection* ditinjau dari nilai rata-rata *deceleration pulse* dengan batas aman 5g. Pada

kasus tabrakan pada kecepatan 14,75 m/s, nilai rata-rata *deceleration pulse* untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 5,6 g, 9,9 g, dan 9,9 g. Dapat disimpulkan bahwa berdasarkan standar (BS EN15227, 2008) *deceleration pulse* pada ketiga jenis variasi tidak aman bagi penumpang. Puncak *deceleration pulse* untuk ketiga jenis variasi melebihi batas yaitu 8g, sehingga dapat disimpulkan ketiga jenis variasi tidak memenuhi syarat aman berdasarkan standar (49 CFR Part 238, 2020).

4.4.3 *Deceleration pulse* pada kecepatan tabrak 20 m/s



Gambar 4.39 Grafik perbandingan *deceleration pulse* pada kecepatan tabrak 20 m/s

Grafik perbandingan nilai dan tren *deceleration pulse* antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 20 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.39. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *Decelerations* selama tabrakan terjadi dengan satuan g (gravitasi). Awal dan akhir *pulse* tinggi pada ketiga desain variasi terjadi pada waktu yang sama. Awal *pulse* tinggi terjadi pada waktu 30 ms dan berakhir pada akhir simulasi pada waktu 200 ms. Puncak *pulse* pada masing-masing desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut adalah 16,1 g, 25,5 g, dan 21,6 g. Dengan menggunakan Persamaan 2.7 didapatkan hasil:

Desain Existing

$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,2 - 0,03). (16,1)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,17). (16,1)^{2,5} \leq 1000$$
$$177 \leq 1000$$

Desain Variasi A

$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,2 - 0,03). (25,5)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,17). (25,5)^{2,5} \leq 1000$$
$$559 \leq 1000$$

Desain Variasi B

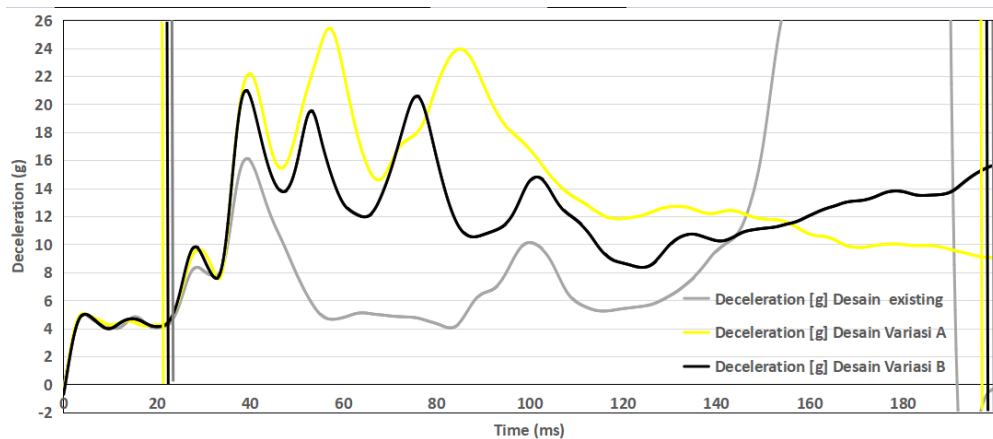
$$T. (a/g)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,2 - 0,03). (21,6)^{2,5} \leq 1000$$
$$(0,17). (21,6)^{2,5} \leq 1000$$
$$367 \leq 1000$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai toleransi terhadap impak pada desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 177, 559, dan 367. Nilai hasil perhitungan pada ketiga desain variasi berada jauh di bawah nilai batas 1000, sehingga dapat disimpulkan bahwa *deceleration pulse* tidak menimbulkan cedera terhadap penumpang dengan sabuk pengaman yang terpasang dengan baik.

Berdasarkan standar (BS EN15227, 2008), *occupant protection* ditinjau dari nilai rata-rata *deceleration pulse* dengan batas aman 5g. Pada kasus tabrakan pada kecepatan 20 m/s, nilai rata-rata *deceleration pulse* untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 6,29 g, 11,58

g, dan 10,73 g. Dapat disimpulkan bahwa berdasarkan standar (BS EN15227, 2008) *deceleration pulse* pada ketiga jenis variasi tidak aman bagi penumpang. Puncak *deceleration pulse* untuk ketiga jenis variasi melebihi batas yaitu 8g, sehingga dapat disimpulkan ketiga jenis variasi tidak memenuhi syarat aman berdasarkan standar (49 CFR Part 238, 2020).

4.4.4 *Deceleration pulse* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s



Gambar 4.40 Grafik perbandingan *deceleration pulse* pada kecepatan tabrak 27,78 m/s

Grafik perbandingan nilai dan tren *deceleration pulse* antara desain *existing*, variasi A, dan variasi B pada kecepatan tabrak 27,78 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.40. Sumbu X menunjukkan waktu tabrak dengan satuan *mili second*, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai *Decelerations* selama tabrakan terjadi dengan satuan g (gravitasi). Puncak *pulse* pada desain variasi A dan variasi B berturut-turut adalah 25,9 g dan 21,7 g. Pada desain *existing* puncak *pulse* mencapai nilai yang sangat tinggi yaitu 223,4 g, hal tersebut disebabkan *main frame* tidak mampu lagi menyerap energi tabrak sehingga sisa energi tabrak langsung mengenai *point mass* dan berhenti secara tiba-tiba dengan *deceleration* yang sangat tinggi. Durasi *pulse* tinggi pada ketiga desain variasi dimulai pada waktu 30 ms dan berakhir pada akhir

simulasi pada waktu 200 ms. Dengan menggunakan Persamaan 2.7 didapatkan hasil:

Desain Existing

$$\begin{aligned} T.(a/g)^{2,5} &\leq 1000 \\ (0,2 - 0,025).(223,4)^{2,5} &\leq 1000 \\ (0,175).(223,4)^{2,5} &\leq 1000 \\ 130.573 &\leq 1000 \end{aligned}$$

Desain Variasi A

$$\begin{aligned} T.(a/g)^{2,5} &\leq 1000 \\ (0,2 - 0,025).(25,9)^{2,5} &\leq 1000 \\ (0,175).(25,9)^{2,5} &\leq 1000 \\ 602 &\leq 1000 \end{aligned}$$

Desain Variasi B

$$\begin{aligned} T.(a/g)^{2,5} &\leq 1000 \\ (0,2 - 0,025).(21,7)^{2,5} &\leq 1000 \\ (0,175).(21,7)^{2,5} &\leq 1000 \\ 383 &\leq 1000 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai toleransi terhadap impact pada desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 130.573, 602, dan 383. Nilai hasil perhitungan pada ketiga desain variasi berada jauh di bawah nilai batas 1000, sehingga dapat disimpulkan bahwa *deceleration pulse* tidak menimbulkan cedera terhadap penumpang dengan sabuk pengaman yang terpasang dengan baik.

Berdasarkan standar (BS EN15227, 2008), *occupant protection* ditinjau dari nilai rata-rata *deceleration pulse* dengan batas aman 5g. Pada kasus tabrakan pada kecepatan 27,78 m/s, nilai rata-rata

deceleration pulse untuk desain *existing*, variasi A, dan variasi B berturut-turut sebesar 17,67 g, 13,02 g, dan 11,75 g. Dapat disimpulkan bahwa berdasarkan standar (BS EN15227, 2008) *deceleration pulse* pada ketiga jenis variasi tidak aman bagi penumpang. Puncak *deceleration pulse* untuk ketiga jenis variasi melebihi batas yaitu 8g, sehingga dapat disimpulkan ketiga jenis variasi tidak memenuhi syarat aman berdasarkan standar (49 CFR Part 238, 2020).

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- Berdasarkan kriteria *survival space* pada kecepatan 10 m/s, desain *existing*, variasi A, maupun variasi B memiliki deformasi *main frame* kurang dari 10% sehingga dapat dikatakan bahwa *survival space* aman. Pada kecepatan 14,75 m/s deformasi *main frame* desain variasi A dan variasi B kurang dari 10% namun deformasi *main frame* desain *existing* lebih tinggi dari 10%, sehingga dapat disimpulkan bahwa *survival space* pada desain variasi A dan B aman sedangkan pada desain *existing* tidak aman. Pada kecepatan tabrak 20 m/s dan 27,78 m/s ketiga desain variasi memiliki deformasi *main frame* lebih dari 10% dan dapat disimpulkan bahwa *survival space* tidak aman untuk semua jenis desain variasi.
- Berdasarkan analisa *crash force* desain variasi A dan variasi B memiliki *manner deformation* yang baik yaitu terdeformasi dari depan ke belakang. Deformasi diawali dari komponen CEM secara berurutan hingga ke *main frame* mulai pada ruas depan hingga ke belakang. Pada desain *existing manner* deformasi tidak terkendali mulai pada kecepatan 14,75 m/s hingga 27,78 m/s, di mana *main frame* terdeformasi lebih dahulu sebelum CEM dan lokasi deformasi pada *main frame* berada di titik belakang. Nilai *crash force* rata-rata pada desain variasi B cenderung lebih rendah dibandingkan desain variasi A.
- Kemampuan *energy absorption* pada ketiga desain variasi dapat memenuhi standar (BS EN15227, 2008). Untuk standar (49 CFR Part 238, 2020), persyaratan *energy absorption* hanya mampu dipenuhi oleh desain variasi A dan variasi B. Pada kasus tabrakan dengan kecepatan tinggi, energi sisa tabrakan mampu diserap oleh *main frame* desain variasi A dan B, sedangkan *main frame* desain *existing* tidak mampu menahan energi tabrak dan terus terdeformasi hingga ruang penumpang.

- Nilai rata-rata *deceleration pulse* pada ketiga desain variasi melebihi batas aman yang diprasyarkan standar (BS EN15227, 2008). Nilai puncak *deceleration pulse* pada ketiga desain variasi melebihi batas yang diprasyarkan standar (49 CFR Part 238, 2020). Selain kasus tabrak desain *existing* pada kecepatan 27,78, Nilai toleransi seluruh tubuh terhadap *deceleration* pada seluruh desain variasi berada di bawah nilai batas aman berdasarkan penelitian (Huston & Perrone, 1978).
- Dapat dilihat pada Tbael 5.1 Kriteria keberterimaan ketiga desain variasi pada seluruh variasi kecepatan berdasarkan standar yang berlaku.

Tabel 5. 1 Hasil Penelitian

Deceleration Pulse		10	14,75	20	27,78
		m/s	m/s	m/s	m/s
Survival Space	Existing	OK	NOK	NOK	NOK
	Variasi A	OK	OK	NOK	NOK
	Variasi B	OK	OK	NOK	NOK
Deformation Manner	Existing	OK	NOK	NOK	NOK
	Variasi A	OK	OK	OK	OK
	Variasi B	OK	OK	OK	OK
Energy Absorption	Existing	OK	NOK	NOK	NOK
	Variasi A	OK	OK	OK	NOK
	Variasi B	OK	OK	OK	NOK
Rata-rata Deceleration	Existing	NOK	NOK	NOK	NOK
	Variasi A	NOK	NOK	NOK	NOK
	Variasi B	NOK	NOK	NOK	NOK
Max Deceleration	Existing	NOK	NOK	NOK	NOK
	Variasi A	NOK	NOK	NOK	NOK
	Variasi B	NOK	NOK	NOK	NOK
Whole Body Tolerance Value to Deceleration	Existing	OK	OK	OK	NOK
	Variasi A	OK	OK	OK	OK
	Variasi B	OK	OK	OK	OK

5.2 Saran

Penelitian lanjutan serta eksperimen untuk memvalidasi hasil simulasi numerik sangat perlu untuk dilakukan. Diharapkan dengan adanya penelitian lanjutan desain CEM maupun *main frame* dapat aman pada semua kategori yang diprasyaratkan oleh standar (BS EN15227, 2008) dan (49 CFR Part 238, 2020). Eksperimen dengan skala maupun 1 : 1 diharapkan dapat memvalidasi hasil penelitian. Model simulasi *full body* juga diperlukan untuk melihat performa *overriding* kereta ketika tabrakan, serta kondisi ruang penumpang selama waktu tabrakan.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- 49 CFR Part 238. (2020). *49 CFR Part 238 PASSENGER EQUIPMENT SAFETY STANDARDS - U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration* (Vol. 4). www.regulations.gov.
- Ambrósio, J. A. C. (2001). "Crashworthiness". In J. A. C. Ambrosio (Ed.), *Crashworthiness*. Springer Vienna. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2572-4>
- Badan Pusat Statistik. (2020). "Statistik Transportasi Darat 2020". In S. S. Transportasi (Ed.), *BPS RI*. BPS RI/BPS-Statistics Indonesia. <https://www.bps.go.id/>
- Børvik, T., Clausen, A. H., Eriksson, M., Berstad, T., Sture Hopperstad, O., & Langseth, M. (2005). "Experimental and numerical study on the perforation of AA6005-T6 panels". *International Journal of Impact Engineering*, 32(1–4), 35–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.05.001>
- Boschetti, G., & Mariscotti, A. (2012). "THE PARAMETERS OF MOTION MECHANICAL EQUATIONS AS A SOURCE OF UNCERTAINTY FOR TRACTION SYSTEMS SIMULATION". In *XX IMEKO World Congress* (Vol. 2).
- BS EN 12663. (2010). *Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies*.
- BS EN15227. (2008). *Railway Applications, in Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies*.
- Chen, X., & Liu, Y. (2014). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17284>
- Choiron, M. A. (2020). "Characteristics of deformation pattern and energy absorption in honeycomb filler crash box due to frontal load and oblique load test". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7 (104)), 6–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200020>

- Cook, R. D. (1994). *Finite element modeling for stress analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Dharma, I. G. S. S., Suweca, I. W., & Setiawan, R. (2016). "Perancangan Dasar Sistem Keselamatan Pasif Kereta Penumpang Kelas 1 (Kereta K1)". *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin*, 889–896.
- Dias, J. P., & Pereira, M. S. (2004). "Optimization methods for crashworthiness design using multibody models". *Computers & Structures*, 82(17–19), 1371–1380. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.03.032>
- Direktorat Jenderal Perkeretaapian. (2021). *BUKU STATISTIK BIDANG PERKERETAAPIAN*. <https://djka.dephub.go.id/statistik>
- Handoko, & Prayoga, B. T. (2010). "Pengaruh Laju Regangan Linier Terhadap Data Uji Tarik Bahan Baja Tahan Karat Seri 304". *Seminar Nasional Perkembangan Riset Dan Teknologi Di Bidang Industri*, 16.
- Henderson, G. R. (1904). *Locomotive Operation*.
- Hibbeler, R. C. (2016). *Mechanics of Materials (Tenth Edition)* (10th ed.). Pearson.
- Hou, L., Zhang, H., Peng, Y., Wang, S., Yao, S., Li, Z., & Deng, G. (2021). "An integrated multi-objective optimization method with application to train crashworthiness design". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63(3), 1513–1532. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02758-2>
- Huston, R. L., & Perrone, N. (1978). "Dynamic response and protection of the human body and skull in impact situations, In Perspectives in Biomechanics". *H. Reul, D. N. Ghista and G. Rau, Harwood, 1*, 531–571.
- Kirkpatrick, S. W., Schroeder, M., & Simons, J. W. (2001). "Evaluation of passenger rail vehicle crashworthiness". *International Journal of Crashworthiness*, 6(1), 95–106. <https://doi.org/10.1533/cras.2001.0165>
- Logan, D. L. (2014). *A First Course in the Finite Element Method* (6th ed.).

- Macaulay, M. (1987). "Introduction to Impact Engineering". In *Introduction to Impact Engineering*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3159-6>
- Meyer, H. W., & Kleponis, D. S. (2001). *An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor*.
- Pereira, M. S. (2006). "Structural Crashworthiness of Railway Vehicles". *7th World Congress of Rail Research*.
- PM 69. (2019). *PM 69 TAHUN 2019 - STANDAR SPESIFIKASI TEKNIS KERETA API KECEPATAN TINGGI - KEMENTERIAN PERHUBUNGAN REPUBLIK INDONESIA*.
- Sequeira, G. J., & Brandmeier, T. (2020). "Evaluation and characterization of crash-pulses for head-on collisions with varying overlap crash scenarios". *Transportation Research Procedia*, 48, 1306–1315. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.156>
- Setiawan, R., Aryo Handoko, Y., Imam Ramadhan, F., & Yazid Fahmi, dan M. (2019). "Perancangan dan Analisis Penyerapan Energi Impak Crash Zone Area Kereta Penumpang Nasional". *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin*, 9, 1–8.
- Setiawan, R., & Michael Pamintori, dan. (2017). "Analisis Crashworthiness Struktur Kereta Penumpang Indonesia". *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin*, 191–195.
- Shalahuddin, L., Putranto, K. E., & Eskayudha, D. B. (2020). "Propulsion System Design For The Indonesian Semi High Speed Train". *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 13(3), 215–222. <https://doi.org/10.29122/mipi.v13i3.3851>
- Starlinger, A. (2011). *On the application of ABAQUS for the evaluation of the structural integrity of railway vehicles*.
- Sullivan, L. (2011). *CRASHWORTHINESS OF HIGH-SPEED RAIL SYSTEMS*.
- Toksoy, A. K., & Güden, M. (2011). "The optimisation of the energy absorption of partially Al foam-filled commercial 1050H14 and 6061T4

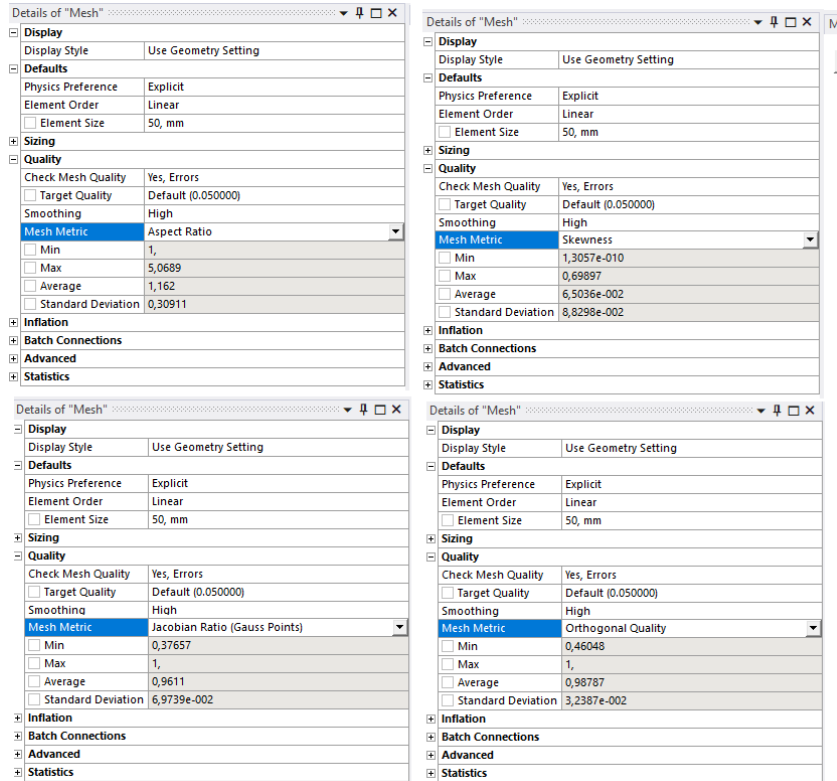
- Al crash boxes". *International Journal of Crashworthiness*, 16(1), 97–109. <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.514774>
- Tyrell, D. C. (2002). "US rail equipment crashworthiness standards". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 216(2), 123–130. <https://doi.org/10.1243/09544090260082362>
- Velmurugan, R., & Muralikannan, R. (2009). "Energy absorption characteristics of annealed steel tubes of various cross sections in static and dynamic loading". *Latin American Journal of Solids and Structures*, 6(4), 385–412.
- Wang, S., Peng, Y., Wang, T., Che, Q., & Xu, P. (2019). "Collision performance and multi-objective robust optimization of a combined multi-cell thin-walled structure for high speed train". *Thin-Walled Structures*, 135, 341–355. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.10.044>
- Wątroba, P., Pawlak, M., & Gąsiorek, D. (2018). "Validation of the Numerical Model of Impuls I Electric Multiple Unit Driver's Cab". In *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics* (Vol. 249, pp. 411–422). Springer New York LLC. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96601-4_37
- Wiratno, K. (2020). *Studi Numerik Pengaruh Laju Regangan Terhadap Respon Tegangan-Regangan Bulk Adhesive*.
- Xie, S., Yang, W., & Xu, P. (2018). "Simulation Analysis of a Multiple-Vehicle, High-Speed Train Collision Using a Simplified Model". *Shock and Vibration*, 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/9504141>
- Xue, X., Smith, R. A., & Schmid, F. (2005). "Analysis of crush behaviours of a rail cab car and structural modifications for improved crashworthiness". *International Journal of Crashworthiness*, 10(2), 125–136. <https://doi.org/10.1533/ijcr.2005.0332>
- Zhao, H., Xu, P., Li, B., Yao, S., Yang, C., Guo, W., & Xiao, X. (2021). "Full-Scale Train-to-Train Impact Test and Multi-Body Dynamic Simulation Analysis". *Machines*, 9(11), 297. <https://doi.org/10.3390/machines9110297>

Zhou, H., Wang, W., & Hecht, M. (2012). "Three-dimensional override analysis of crashed railway multiple units". *Vehicle System Dynamics*, 50(4), 663–674. <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.631552>

Zhu, T., Xiao, S.-N., Hu, G.-Z., Yang, G.-W., & Yang, C. (2019). "CRASHWORTHINESS ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF METRO VEHICLES CONSTRUCTED FROM TYPICAL MATERIALS AND THE LUMPED PARAMETER MODEL OF FRONTAL IMPACT". *Transport*, 34(1), 75–88. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.7552>

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN



T. Borvik et al. / International Journal of Impact Engineering 32 (2005) 35–64

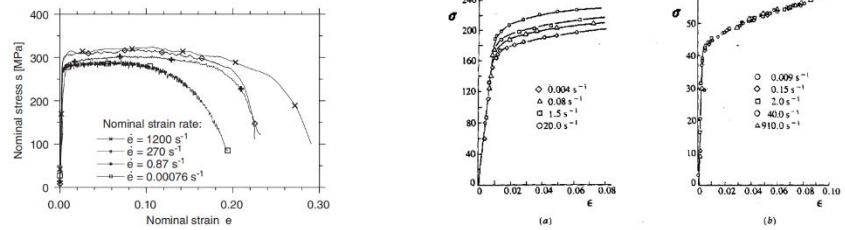


Figure 3.4 Dynamic uniaxial compression tests [3,12]. (a) titanium 6Al-4V. (b) aluminium 6061-T6, 1 unit of ordinate is 10^3 lbf/in^2 or 6.895 MN/m^2 .

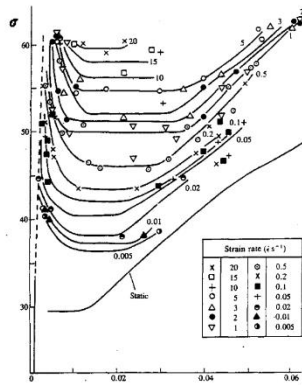


Figure 3.1 Stress (σ)-strain (ϵ) curves for mild steel at various uniaxial compressive strain rates according to Marsh and Campbell [3,2]. 1 unit of ordinate is 10^3 lbf/in^2 or 6.895 MN/m^2 .