

### TUGAS AKHIR - TM141585

# STUDI NUMERIK TABRAKAN STRUKTUR KABIN LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

RAYHAN ZUFAR MUHAMMAD NRP. 02111440000014

Dosen Pembimbing ACHMAD SYAIFUDIN, S.T., M.Eng., Ph.D.

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2018



### TUGAS AKHIR - TM141585

# STUDI NUMERIK TABRAKAN STRUKTUR KABIN *LIGHT RAIL TRANSIT* (LRT) DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

RAYHAN ZUFAR MUHAMMAD NRP. 02111440000014

Dosen Pembimbing ACHMAD SYAIFUDIN, S.T., M.Eng., Ph.D.

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2018



### FINAL PROJECT - TM141585

# NUMERICAL STUDY OF LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) CABIN STRUCTURE COLLISION WITH FINITE ELEMENT METHOD

RAYHAN ZUFAR MUHAMMAD NRP. 02111440000014

Supervisor ACHMAD SYAIFUDIN, S.T., M.Eng., Ph.D.

Department of Mechanical Engineering Faculty Of Industrial Technology Sepuluh Nopember Institute Of Technology Surabaya 2018

### HALAMAN PENGESAHAN

### STUDI NUMERIK TABRAKAN STRUKTUR KABIN LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

#### **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember

### Oleh : <u>RAYHAN ZUFAR MUHAMMAD</u> NRP. 02111440000014

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- 1. <u>Achmad Syaifudin, S.T. M.Eng., Ph.D.</u> (*Pembimbing*) NIP. 197909262005011001
- 2. <u>Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T.</u> NIP. 196807061999031004
- 3. <u>Ari Kurniawan Saputra, ST, MT, KARTE (EA)</u> (Penguji II) NIP. 198604012015041001 (EKNIK MARK)

#### **SURABAYA**

#### **JULI, 2018**

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

# STUDI NUMERIK TABRAKAN STRUKTUR KABIN LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa	: Rayhan Zufar Muhammad
NRP	: 02111440000014
Departemen	: Teknik Mesin FTI-ITS
Desen Pembimbing	: Achmad Syaifudin, ST, M.Eng., Ph.D.

### ABSTRAK

Kementrian Perhubungan Republik Indonesia, sedang gencar untuk merencanakan pembangunan transportasi massal LRT, demi menanggulangi kemacetan. Untuk meningkatkan nilai Tingkat Komponen Dalam Negeri, sebagian besar komponen penyusun LRT tersebut akan melalui tahap riset rancangan dan produksi dalam negeri. Sebelum di produksi, rancangan struktur LRT harus lulus standar uji salah satunya adalah uji tabrakan berdasarkan EN 15227.Pengujian tabrakan pada LRT dilakukan karena potensi kecelakaan moda transportasi berbasis rel di Indonesia yang masih tergolong tinggi. LRT tersebut harus memiliki sistem keselamatan pasif yang baik, yaitu kemampuan struktur dalam melindungi penumpang saat terjadi tabrakan. Oleh karena itu dilakukan studi numerik tabrakan struktur kabin LRT dengan metode elemen hingga yang bertujuan untuk melihat kemampuan strukur saat terjadi tabrakan berdasarkan standar EN 15227 dalam melindungi penumpang.

Studi ini dilakukan dengan software ANSYS 18 Explicit Dynamic AUTODYN, Material yang digunakan SPAH Steel JIS 3125. Skenario yang digunakan adalah tabrakan struktur kabin LRT tanpa dan ber-coupler house dengan dinding kaku kecepatan 25 km/h, struktur kabin LRT tanpa dan ber-coupler house dengan struktur sejenis kecepatan 25 km/h, dan struktur kabin ber-coupler house dengan dinding kaku untuk mencari kecepatan maksimum tabrakan sesuai batas deformasi yang diizinkan. Studi ini menunjukkan bahwa, desain struktur kabin LRT tersebut aman dengan kecepatan maksimum sebelum tabrakan adalah 40 km/h.

Kata kunci: tabrakan, Struktur kabin LRT, deformasi, EN 15227, MEH, explicit dynamic

# NUMERICAL STUDY OF LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) CABIN STRUCTURE COLLISION WITH FINITE ELEMENT METHOD

Name	: Rayhan Zufar Muhammad
NRP	: 02111440000014
Department	: Mechanical Engineering- ITS
Academic Supervisor	: Achmad Syaifudin, S.T,M. Eng,Ph.D.

#### ABSTRACT

The transportation ministry of Republic Indonesia, is being intensively to plan the construction of mass transportation LRT, in order to cope with congestion. To increase the Domestic Component Level, most of the components will go through the domestic design and production stage. Before being produced, the LRT structure design must pass the test standard, which is collision test based on EN 15227. Collision testing on the LRT carried out because of the potential for accidents in rail-based transportation modes in Indonesia still relatively high. The LRT must have a good passive safety system, namely the ability of the structure to protect passengers during a collision. Therefore, a numerical study of LRT cabin structure collision with finite element method carried out, which aims to see the structure's capability during a collision in protecting passengers based on EN 15227 standard.

This study conducted with ANSYS Explicit Dynamic AUTODYN 18 software, material used is SPAH Steel JIS 3125. The scenario used are a collision of the LRT cabin structure without and with coupler house againts a rigid wall using 25 km/h of velocity, an LRT cabin structure without and with coupler house against a similar structure using 25 km/h of velocity, and a LRT cabin structure with a coupler house againts a rigid wall to find the maximum collision speed according to the permissible deformation limits.

This study shows that, the LRT cabin structure design is safe with maximum velocity before the collision is 40 km/h.

Keywords: collision, LRT cabin structure, deformation, EN 15227, FEM, explicit dynamic

# KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis panjatkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materiil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

- 1. Bapak Ibu tercinta dan Keluarga yang senantiasa memberi dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
- Bapak Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
- Bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T., selaku dosen penguji dan dosen wali serta Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T., selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih telah meluangkan waktunya dan atas saran-saran yang telah diberikan.
- 4. Rekan satu tim tugas akhir penulis Egy, Kelvin, Betti, kukuh, mas Andhika, mas Alkalifa, mas Sadam, Rifai, Windhu, dan kawan lainnya dalam susah senang menyelesaikan tugas akhir bersama.
- 5. Kekasih tercinta, Nidya Marchika Sudarsono, terima kasih atas dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
- 6. Seluruh teman-teman M57.
- 7. Sahabat laboratorium Mekanika Benda Padat yang memberikan semangat penulis.
- 8. Seluruh civitas akademika Teknik Mesin ITS yang Baik dan Ramah.

9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 24 Juli 2018

Penulis

# DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	XV
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Ruang Lingkup	3
1.3.1 Variabel yang Diteliti	3
1.3.2 Variabel yang Diabaikan	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	10
2.2 Standar Kelayakan Tabrakan Kereta EN 15227	22
2.3 Metode Elemen Hingga (MEH)	
2.3.1 Prosedur Dasar	
2.3.2 Verifikasi	
2.3.3 Validasi	
2.4 Analisis yang Digunakan	
2.4.1 Tumbukan	
2.4.2 Deformasi Plastis	
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1 Diagram Metode Elemen Hingga	35
3.2 Model Material	
3.3 Model Solid 3D	
3.4 Model Elemen Hingga	41
3.5 Kondisi Batas dan Solusi	43

3.6 Tipe Analisis dan Kontrol Solusi51
3.6.1 Tipe Analisis51
3.6.2 Kontrol Solusi dan Verifikasi Prosedur Simulasi 52
BAB IV PEMBAHASAN
4.1 Analisis Deformasi Struktur Kabin LRT57
4.2 Tabrakan Struktur Kabin LRT Tanpa Coupler house
dengan Dinding Kaku
4.3 Tabrakan Struktur Kabin LRT Menggunakan Coupler
house dengan Dinding Kaku60
4.4 Tabrakan Struktur Kabin LRT Tanpa Coupler house
dengan Kabin Sejenis62
4.5 Tabrakan Struktur Kabin LRT Menggunakan Coupler
house dengan Kabin Sejenis64
4.6 Kecepatan Maksimum Hingga Batas Deformasi Maksimum
4.7 Analisis Hasil Simulasi68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN71
5.1 Kesimpulan71
5.2 Saran
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN
BIODATA PENULISxxi

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Presentase Kecelakaan Kereta Api Tahun 2010 -
20162
Gambar 1. 2 Tabrakan Antar KRL di Stasiun Juanda
Gambar 2. 1 <i>Light Rail Transit</i> Negara Singapura5
Gambar 2. 2 Light Rail Transit Negara Filipina6
Gambar 2. 3 Rangkaian Light Rail Transit Palembang9
Gambar 2. 4 Grafik Perbedaan Energi Serap pada Desain Awal dan
Desain Modifikasi12
Gambar 2. 5 Perbedaan Perubahan Bentuk pada Kedua Desain.13
Gambar 2. 6 Skenario Tabrakan Model Kabin dengan Dinding
Kaku13
Gambar 2.7 Model Kabin untuk Simulasi dan Uji Sesungguhnya
Gambar 2. 8 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Uji
Sesungguhnya
Gambar 2. 9 Struktur Kabin Kereta
Gambar 2. 10 <i>Draft sill</i> pada Bagian Kabin
Gambar 2. 11 Gaya yang Terjadi pada <i>Draft sill</i> dan <i>Side sill</i> 16
Gambar 2. 12 Hasil Simulasi Tabrakan Kabin Sebelum Modifikasi
Gambar 2. 13 Hasil Simulasi Tabrakan Kabin setelah Modifikasi
17
Gambar 2. 14 Grafik Perbedaan Energi Serap pada Side sill Awal
dengan Modifikasi
Gambar 2. 15 Model Rangka Kabin yang Disederhakan
Gambar 2. 16 Deformasi yang Terjadi setelah Simulasi
Gambar 2. 17 Jarak Aman Kursi Operator Kereta20
Gambar 2. 18Grafik Perbandingan Hasil Simulasi dengan
Pengujian Sesungguhnya21
Gambar 2. 19Perbandingan Hasil Simulasi dan Pengujian
Sesungguhnya22
Gambar 2. 20 Jarak Aman yang Diperbolehkan pada Standar EN
15227

Gambar 4. 5 Struktur Kabin LRT Sebelum Menabrak Dinc	ling
Kaku	61
Gambar 4. 6 Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Dinding K	aku
	61
Gambar 4. 7 Struktur Kabin LRT Sebelum Menabrak Ka	ıbin
Sejenis	63
Gambar 4. 8 Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Kabin Seje	enis
Tabel 4. 3 Deformasi Struktur Kabin LRT Sete	elah
Menabrak Kabin Sejenis	63
Gambar 4. 9 Struktur Kabin LRT Sebelum Menabrak Ka	ıbin
Sejenis	65
Gambar 4. 10Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Ka	ıbin
Sejenis	65
Gambar 4. 11Struktur Kabin setelah Tabrakan pada kecepa	atan
70(a), 50(b), dan 40km/h (c)	68

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

# DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data Teknis Light Rail Transit Palembang7
Tabel 2. 2 data kecelakaan kereta api di Eropa tahun 1991-199510
Tabel 2. 3 Kategori kereta menurut EN 1522723
Tabel 2. 4 Kecepatan pada skenario 124
Tabel 2. 5 Kecepatan pada skenario 3
Tabel 2. 6kecepatan dan kebutuhan kekuatan deflektor rintangan
pada skenario 425
Tabel 3. 1 Spesifikasi material SPA-H (JIS 3125)36
Tabel 3. 2 Skenario Simulasi41
Tabel 3. 3 Energi Serap Struktur Penelitian Baykasoglu Tahun
2012
Tabel 3. 4 Energi Serap Struktur Simulasi54
Tabel 4. 1 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak
Dinding Kaku60
Tabel 4. 2 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak
Dinding Kaku62
Tabel 4. 3 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak
Kabin Sejenis64
Tabel 4. 5 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Kabin
Sejenis66
Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Deformasi

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

# BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada hakikatnya, transportasi bertujuan untuk memenuhi kebutuhan pergerakan seseorang atau pergerakan barang dari satu tempat ke tempat lain. Transportasi juga memegang peranan penting dalam memperlancar roda perekonomian. Semakin berkembangnya perekonomian, akan menuntut pergerakan seseorang atau mobilitas yang semakin tinggi pula. Semakin tingginya kebutuhan mobilitas masyarakat harus diimbangi dengan perningkatan sarana dan prasana transportasi.

Di Indonesia, pelayanan transportasi dinilai masih cukup akibatnya masyarakat lebih sering menggunakan rendah. transportasi pribadi daripada transportasi massal. Dampak penggunaan transportasi pribadi adalah kemacetan lalu-lintas. Demi menanggulangi Kementrian permasalahan tersebut. Perhubungan Republik Indonesia, sedang gencar untuk merencanakan pembangunan LRT sebagai sarana transportasi massal yang diharapkan akan memperbaiki dan meningkatkan aspek-aspek seperti: perhubungan, tata kota, perekonomian, dan lain-lain. LRT merupakan salah satu alat transportasi massal yang berbasis rel. LRT merupakan sarana transportasi yang beroperasi dikawasan perkotaan yang memiliki konstruksi ringan dan berjalan pada lintasan khusus.

Untuk meningkatkan TKDN, LRT tersebut akan melalui tahap riset rancangan dan produksi dalam negeri. Riset tersebut mencakup desain eksterior dan interiornya. Penelitian mengenai desain LRT, terutama eksteriornya yang mencakup struktur pengaman pasif saat terjadi kecelakaan penting untuk dilakukan. Karena, berdasarkan data dari Komite Nasional Keselamatan Transportasi pada gambar 1.1, persentase kecelakaan tabrakan antar kereta api dari tahun 2010 sampai tahun 2016 sebesar 26 %. Kecelakaan tersebut dapat mengakibatkan luka berat hingga kematian. Gambar 1.2 merupakan contoh yang diambil dari metrotvnews.com, pada Hari Rabu, tanggal 23 September 2015 di Stasiun Juanda, terjadi kecelakaan antar KRL yang menyebabkan 42 orang luka ringan dan masinis terluka berat. Kedua kabin tersebut ditemukan rusak parah. Hal tersebut bisa menjadi bahan untuk diteliti lebih lanjut tentang desain struktur kabin LRT yang aman.



Menurut penelitian oleh Baykasoglu, XiangDong Xue, dan Harish BM, kendaraan berbasis rel yang akan digunakan harus memenuhi standar uji tabrak yang ada. Struktur kereta harus mampu menyerap energi tumbukan yang cukup besar dan mengalami deformasi seminimal mungkin tanpa menyebabkan luka serius pada penggunanya saat terjadi tabrakan. Begitu pula desain LRT yang digunakan harus memenuhi standar uji tabrak tersebut, dimana struktur tersebut dapat menyerap energi tumbukan semaksimal mungkin sehingga deformasi yang terjadi saat terjadi tabrakan tidak menyebabkan luka serius bagi penggunanya. Oleh karena itu perlu dilakukan simulasi uji tabrakan pada LRT dengan menggunakan metode elemen hingga.



Gambar 1. 2 Tabrakan Antar KRL di Stasiun Juanda (www.metrotvnews.com)

### 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini antara lain:

- a. Bagaimana melakukan simulasi tumbukan pada kabin *Light Rail Transit* dengan metode elemen hingga.
- b. Bagaimana efek penambahan *coupler house* sebagai penyerap energi tumbukan.
- c. Bagaimana membandingkan hasil simulasi tumbukan kabin *Light Rail Transit* dengan standar keamanan EN 15227.

### 1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini antara lain:

### 1.3.1 Variabel yang Diteliti

a. Struktur kabin *Motor Car Light Rail Transit* dengan beberapa penyederhanaan model seperti balok bermassa yang dibentuk menyerupai gerbong untuk mewakili massa total *motor car*.

# 1.3.2 Variabel yang Diabaikan

- a. Massa gerbong penumpang atau trailer car diabaikan.
- b. Kecepatan konstan.
- c. Sambungan tiap joint diasumsikan sempurna.
- d. Material rangka homogen
- e. Pitching diabaikan

# 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini antara lain:

- a. Melakukan simulasi uji tabrakan pada kabin LRT untuk melihat kekuatan struktur dan kecepatan maksimum sebelum tabrakan berdasarkan standar EN 15227
- b. Mengetahui peran dinding kaku sebagai pengganti skenario tabrakan dengan struktur sejenis
- c. Mengetahui efek *coupler house* sebagai penyerap energi tumbukan

# 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini antara lain:

- a. Memberikan wawasan baru terutama simulasi tabrakan *Light Rail Transit* dengan program Ansys.
- b. Memastikan bahwa struktur kabin *Light Rail Transit* sesuai standar uji tabrakan EN 15227
- c. Dapat dijadikan sebagai acuan rancangan struktur *Light Rail Transit* dalam negeri yang lebih baik.

# BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Light Rail Transit atau kereta api ringan merupakan salah satu sistem kereta api penumpang yang beroperasi dikawasan perkotaan yang memiliki konstruksi ringan dan berjalan di suatu lintasan khusus. Kereta api ringan ini banyak digunakan di Negara Eropa dan telah mengalami modernisasi, seperti pengedalian otomatis sehingga tidak diperlukan masinis. Tidak hanya di Negara Eropa saja, di Asia Tenggara, *Light Rail Transit* juga digunakan di Filipina pada gambar 2.1 dan Singapura pada gambar 2.2.



Gambar 2. 1 Light Rail Transit Negara Singapura (en.wikipedia.org)



Gambar 2. 2 *Light Rail Transit* Negara Filipina (en.wikipedia.org)

Di Indonesia sendiri, *Light Rail Transit* yang telah lama diusulkan akhirnya resmi dimulai. Menurut bidang konstruksi Badan Usaha Milik Negara (BUMN), PT Adhi Karya Tbk memastikan bahwa proyek tersebut telah dilaksanakan sejak tanggal 9 September 2015. Pembangunan *Light Rail Transit* di Jakarta dapat menjadi solusi kemacetan yang melanda di ibukota. *Light Rail Transit* tersebut juga menjadi moda transportasi yang ramah lingkungan, karena menggunakan desain trase moda *elevated* basis rel. Rel tersebut akan dibangun diatas jalan tol dan non-tol. Selain itu, di Palembang, proyek *Light Rail Transit* sedang dalam proses pembangunan sejak tahun 2015. *Light Rail Transit* Palembang rencananya akan digunakan untuk menghubungkan Bandar Udara Internasional Sultan Mahmud Badaruddin II dengan Kompleks Olahraga Jakabaring. Proyek tersebut diperkirakan akan selesai dan bisa digunakan pada tahun 2018.

Kemudian, data teknis *Light Rail Transit* yang akan dianalisis menggunakan spesifikasi dari PT. INKA tentang *Light Rail Transit* Palembang 8 Trainset pada tahun 2016. Data teknis tersebut akan mencakup persyaratan minimum untuk desain, ketentuan umum, ukuran kinerja, konstruksi, komponen, dan peralatan penunjang lainnya. Tabel 2.1 merupakan data teknis *Light Rail Transit* Palembang.

a. Folly and all all all all all all all all all al	
Tipe Sarana	Electric Multiple Unit
Beban Gandar	Maks. 12 ton (Crush load.
	70  kg/penumpang
Material Eksterior /Interior	Monggungkon Allumunium
Waterial Exsterior / Interior	allow action having
	alloy, cover bagian
	depan/kabin menggunakan
	komposit
Jendela	Frame alumunium, kaca
	jenis tempered
Wheel gauge	1.607 mm
Ketinggian dari permukaan air	1.200 m
laut	
Umur teknis	30 tahun dengan dengan
	perawatan sesuai manual
	yang ada
	yang ada
Fungsi terhadap pelestarian	Standar kebisingan eksternal
lingkungan hidup	dan emisi gas buang sesuai
Ban month	dengan ketentuan
	nomin don con vong horlolus
	perundangan yang berlaku

Tabel 2. 1 Data Teknis Light Rail Transit PalembangaPersyaratan umum

#### b. Ukuran

or onaran	
Panjang kereta (beserta alat	(MC <sub>1</sub> , MC <sub>2</sub> ) 18.350 mm, (T)
perangkai)	17.946 mm
Lebar badan kereta	2.650 mm
Tinggi atap dari kepala rel	3.402 mm
Tinggi lantai dari kepala rel	1.000 mm

Tinggi atap interior dari lantai	Min 1980 mm
kereta	
Berat kosong maksimum	MC = 33,8 Ton T = 32.2 Ton

## c. Performasi

Kecepatan desain	100 km/jam
Kecepatan opersional	Maksimum 70 km/jam
Percepatan (beban normal)	Maksimum 1 m/dt <sup>2</sup>
Percepatan (beban penuh)	Maksimum 0,8 m/dt <sup>2</sup>
Perlambatan (beban penuh)	Maksimum 1 m/dt <sup>2</sup>
Perlambatan darurat	$1,3 \text{ m/dt}^2$
Radius minimum	80/60 m
Kelandaian maksimum	20/35 ‰

# d. Karakteristik teknis

Sumber Daya	750 Vdc (range voltage 500-	
	900 VDC)	
Sistem Propulsi	Menggunakan teknologi	
_	variable voltage variable	
	frequency dengan traction	
	inverteg dan traction motor	
Sistem Pengereman	Menggunakna rem gesek dan	
	elektrik, electro pneumatic,	
	Regenerative	
Suspensi	Menggunakan rubber spring	
-	(primer) dan air spring	
	(sekunder)	

(Data Teknis LRT Palembang)

Satu set LRT terdiri dari tiga kereta, dengan dua kereta penggerak berkabin dan satu kereta pengikut tanpa kabin. Susunan dapat disesuaikan dengan kebutuhan operasional. Susunan rangkaian satu set LRT terdiri dari MC<sub>1</sub> - T - MC<sub>2</sub>, dimana MC, *motor car* merupakan kereta beroda penggerak dan berkabin

masinis, T merupakan *trailer car*, kereta pengikut. kapasitas total penumpang dengan desain 4 orang/m<sup>2</sup> adalah 379 orang dan desain 8 orang/m<sup>2</sup> adalah 629 orang. Gambar 2.3 merupakan satu set LRT Palembang.



Gambar 2. 3 Rangkaian *Light Rail Transit* Palembang (www.rmolsumsel.com)

Sebelum LRT tersebut dimanufaktur dan digunakan massal, desainnya harus diuji serta mampu menjaga keselamatan penumpang. Hal ini dilakukan karena tingkat kecelakaan alat transportasi cukup tinggi dan dapat mengancam nvawa penumpang. Pada tahun 90an, kecelakaan kereta api menjadi topik yang menarik untuk dikaji. Suatu data statistik mengenai kecelakaan kereta api di Eropa pada tahun 1991-1995 membuktikan bahwa tabrakan antar kereta api memiliki persentase 40%, tabrakan dengan mobil yang menyebrangi rel sebesar 36%, dan kecelakaan lain akibat kerusakan rel sebesar 24%. Dari data statistik tersebut maka dibuatlah skenario tabrakan untuk mengukur sistem pengaman pasif. Karena persentase terbesar adalah tabrakan antar kereta, maka dibuatlah suatu skenario uji kelayakan sistem pengaman pasif atau kelayakan tabrak antar kereta. Data kecelakaan kereta api dapat dilihat pada tabel 2.2.

Accident Type		Number of accidents	%	
Collision between each other	<ul> <li>Head on collision</li> </ul>	31		
			10	
	<ul> <li>Rear collision</li> </ul>	69	23	40%
	> Other	21	7	1
Collision on Level crossing	<ul> <li>Collision with car</li> </ul>	28	9	
	<ul> <li>Collision with lorries/heavy</li> </ul>	80	26	1
	duty truck			
	<ul> <li>Other vehicle</li> </ul>	3	1	36%
Collision not included elsewhere (Others)		24	8	
Collision with Buffer stop		33	11	1
Collision due to Derailment		2	1	1
Derailment without collision		13	4	24%

Tabel 2. 2 data kecelakaan kereta api di Eropa tahun 1991-1995

(Anders Larbrant, 2002)

Pembuatan *prototype* struktur tabrakan kereta menjadi hal yang penting untuk menentukan seberapa aman desain dari kereta tersebut. Seiring berkembangnya teknologi, peran dari *prototype* tersebut mulai digantikan dengan adanya bantuan analisis numerik berbasis elemen hingga. Dengan adanya analisis numerik tersebut, kita dapat dengan mudah untuk melakukan simulasi uji tabrakan dan meramalkan seberapa aman desain kereta yang diuji, dengan demikian kecelakaan yang mengakibatkan kehilangan nyawa dapat diminimalisir. Dari data statistik tersebut juga dapat disimpulkan bahwa saat terjadi tabrakan antar kereta api bagian yang rawan mengalami deformasi yang besar adalah kabinnya. Oleh karena itu analisis atau pengujian tabrakan, fokus pada bagian kabin saja.

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian ini diperlukan berbagai referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Penelitian *Light Rail Transit* dapat didekati menggunakan referensi penelitian berupa pengujian tabrakan pada Kereta Api. Penelitian tersebut berupa

penggunaan metode elemen hingga untuk analisis kelayakan tabrak (*crashworthiness*) pada kereta api penumpang dengan berbagai macam perlakuan dan standar yang di acu.

(Baykasoglu et al., 2012) dalam penelitiannya, Tujuan utama dalam analisis tabrakan yaitu untuk mendapatkan desain optimum pada kelayakan tabrak dan menghindari efek kecelakan yang berakibat fatal pada pengguna transportasi tersebut. Mengacu pada tujuan tersebut maka, kereta api dan sejenisnya apabila terjadi tabrakan harus berdeformasi atau berubah bentuk dalam suatu kondisi yang diinginkan, dalam arti perubahan berkelanjutan akibat tabrakan yang terjadi pada struktur kendaraan hingga interiornya, tidak boleh memberikan dampak negatif pada nyawa penggunanya.

Perubahan bentuk berkelanjutan yang diinginkan dapat meliputi perubahan pada penyusun struktur seperti batang ekstrusi, dan plat. Hal tersebut dapat diatur dengan melihat jumlah energi yang diserap berdasarkan yield strength, perlakuan kekerasan material, ketebalan dan geometrinya. Beberapa skenario uji tabrakan dapat digunakan seperti satu bodi kereta dengan dinding kaku, dua bodi kereta yang bergandengan dengan dinding kaku dan tabrakan dari sisi samping dengang kendaaran lain. Skenario tabrakan dengan dinding kaku paling sering digunakan karena mudah dan cukup menggambarkan karakteristik kelakuan tumbuk.

Untuk data analisis yang digunakan yaitu kecepatan tumbuk adalah 90 km/h. kelakuan tumbuk dapat dicari dengan mensimulasikan tumbukan kereta dengan dinding kaku. Durasi simulasi yang digunakan adalah 100 ms untuk meminimalisir beban perhitungan. Karena yang dicari adalah kondisi terburuk pada saat terjadi tabrakan, maka sistem penggandeng kereta atau coupler diabaikan hal tersebut karena sistem penggandeng kereta dapat berlaku sebagai pegas yang dapat menyerap energi tumbukan cukup besar. Analisis tabrakan ini terdiri dari dua tahap, yang pertama mensimulasikan dengan desain yang asli dan yang kedua mensimulasikan dengan desain yang telah dimodifikasi. Dibawah ini merupakan grafik perbedaan energi yang terserap pada desain kereta asli dengan desain kereta termodifikasi. Desain yang dimodifikasi memiliki energi serap yang lebih besar sekitar 13 % dari desain yang asli.



Gambar 2. 4 Grafik Perbedaan Energi Serap pada Desain Awal dan Desain Modifikasi (Baykasoglu, 2012)

Pada gambar 2.4 dapat dilihat perbedaan perbuhan bentuk pada kedua desain. Untuk desain asli, perubahan bentuk berkelanjutan terjadi hingga bagian kabin, hal tersebut dikarenakan desain tidak dapat menyerap energi tumbukan yang besar sehingga membahayakan keselamatan penumpang. Sedangkan pada desain yang dimodifikasi, perubahan bentuk tidak sampai bagian kabin karena menyerap energi tumbukan yang besar sehingga perubahan bentuk yang besar terjadi hanya pada bagian ujung bodi saja dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Perbedaan Perubahan Bentuk pada Kedua Desain (Baykasoglu, 2012)

(Manuel S. Pereira, 2005) dalam penelitiannya menunjukkan perbandingan antara hasil simulasi dengan uji tabrakan sesungguhnya. Simulasi yang dilakukan berupa uji tabrakan secara dinamis dan statis. Skenario tabrakan yang digunakan adalah tabrakan model kabin dengan diding kaku. Parameter yang dijadikan perbandingan adalah besar deformasi dan besar energi yang terserap oleh struktur saat terjadi tabrakan. Skenario dan hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 2.6 dan 2.7.



Gambar 2. 6 Skenario Tabrakan Model Kabin dengan Dinding Kaku (Manuel S. Pereira, 2005)



Gambar 2. 7 Model Kabin untuk Simulasi dan Uji Sesungguhnya (Manuel S. Pereira, 2005)



Gambar 2. 8 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Uji Sesungguhnya (Manuel S. Pereira, 2005)

Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa terjadi perbedaan kecil antara hasil simulasi dengan uji sesungguhnya. Gambar 2.8 merupakan Grafik *force-displacement* menunjukkan tren yang sama sehingga simulasi dengan metode elemen hingga dapat digunakan untuk meramalkan dampak tabrakan sesungguhnya.
(XiangDong Xue, 2005) dalam penelitiannya menyatakan bahwa hasil simulasi tabrakan kabin dengan dinding kaku menunjukkan deformasi terbesar terjadi pada *draft sill* dan *side sill*. pada bagian tersebut terjadi *downward bending* yang cukup besar, oleh karena itu dilakukan modifikasi pada bagian kabin dengan memperkuat bagian ujung belakang *draft sill*, mengatur geometri dari *side sill* dan memberikan penyerap energi di depan *draft sill*. Hal tersebut dilakukan untuk menambah besar energi tumbukan yang terserap sehingga mengurangi deformasi. Gambar 2.9 hingga 2.13 merupakan model 3D pada penelitian Xiangdong Xue beserta perbedaan kemampuan penyerapan energi tumbukan pada *side sill*.



Gambar 2. 9 Struktur Kabin Kereta (XiangDong Xue, 2005)



Gambar 2. 10 *Draft sill* pada Bagian Kabin (XiangDong Xue, 2005)



Gambar 2. 11 Gaya yang Terjadi pada *Draft sill* dan *Side sill* (XiangDong Xue, 2005)



Gambar 2. 12 Hasil Simulasi Tabrakan Kabin Sebelum Modifikasi (XiangDong Xue, 2005)



Gambar 2. 13 Hasil Simulasi Tabrakan Kabin setelah Modifikasi (XiangDong Xue, 2005)



Gambar 2. 14 Grafik Perbedaan Energi Serap pada *Side sill* Awal dengan Modifikasi (XiangDong Xue, 2005)

(Anders Larbrant, 2002) dalam penelitiannya, model yang digunakan saat simulasi menggunakan elemen hingga bisa disederhanakan untuk mengurangi beban perhitungan. Pada penelitian tersebut hanya mengambil struktur tabrakan saja yaitu rangka kabin dengan beberapa penyederhanaan. Karena rangka kabin tersebut simetri, maka yang dimodelkan hanya setengah bagian saja dan diberikan kondisi batas simetri, dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut ini.



Gambar 2. 15 Model Rangka Kabin yang Disederhakan (Anders Larbrant, 2002)

Penelitian yang dilakukan berdasarkan standar uji tabrakan oleh Swedia STI3, dengan menabrakkan struktur kabin dengan lorry bermuatan yg telah disederhanakan. Hasil deformasi yang didapat tertera pada gambar 2.16.



Gambar 2. 16 Deformasi yang Terjadi setelah Simulasi (Anders Larbrant, 2002)

(Harish BM et al., 2015) dalam penilitiannya tentang struktur kabin aman saat terjadi tabrakan sesuai standar Eropa EN 15227, menunjukkan bahwa clearance ruang kabin masinis setidaknya tersisa 300 mm saat terjadi tabrakan dengan kecepatan 25 km/h, dapat dilihat pada gambar 2.17. Dalam penelitiannya menjelaskan bahwa simulasi *head on collision* atau tabrakan depan

antar kereta identik dapat diwakilkan dengan tabrakan dengan dinding.



Gambar 2. 17 Jarak Aman Kursi Operator Kereta (Harish BM et al., 2015)

Begitu pula dengan penelitian yang dilakukan oleh Takeshi Kawasaki et al., (2008) menyatakan bahwa keselematan pengguna transportasi berbasis rel memang sangat penting. Menurutnya, struktur yang aman saat terjadi tabrakan adalah struktur yang mampu meminimalisir deformasi, menyerap energi tumbukan yang besar, dan mengurangi akselerasi dengan cukup cepat. Pengujian dilakukan dengan simulasi yang menggunakan standar RGS dan TSI untuk kendaraan berbasis rel. Simulasi tabrakan tersebut fokus pada struktur kabin yang dilengkapi dengan *crumple zone. Crumple zone* tersebut diharapkan dapat menyerap energi tumbukan yang besar, sehingga struktur kabin hanya mengalami deformasi yang kecil. Kemudian dilakukan pengujian sesungguhnya untuk membandingkan hasil simulasi tersebut. Pada gambar 2.18 dapat dilihat bahwa hasil simulasi dengan pengujian sesungguhnya tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Dapat dilihat juga pada gambar 2.19, hasil simulasi menunjukkan deformasi hanya terjadi di *crumple zone* saja begitu pula dengan hasi pengujian sesungguhnya, sehingga dapat disimpulkan meskipun terjadi deformasi pada struktur kabin saat terjadi tebrakan, tetapi tidak sampai melukai penggunanya, oleh karena itu struktur tersebut aman dan dapat digunakan massal.



Gambar 2. 18 Grafik Perbandingan Hasil Simulasi dengan Pengujian Sesungguhnya (Takeshi Kawasaki et al., 2008)



Gambar 2. 19 Perbandingan Hasil Simulasi dan Pengujian Sesungguhnya. (Takeshi Kawasaki et al., 2008)

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dipublikasi diatas, maka uji tabrakan pada struktur kabin *Light Rail Transit* dapat dilakukan dengan metode elemen hingga, yang bertujuan untuk mencari besar energi yang diserap dan batas deformasi yang diizinkan pada saat terjadi tabrakan supaya pengguna kereta tetap aman meskipun terjadi kecelakaan. Skenario yang digunakan antara lain tabrakan dengan dinding kaku dan tabrakan dengan jenis kereta yang sama.

#### 2.2 Standar Kelayakan Tabrakan Kereta EN 15227

Tujuan dibentuknya standar ini adalah memenuhi kebutuhan pengaman pasif untuk mengurangi konsekuensi dari tabrakan kereta. Standar ini menjelaskan mengenai skenario yang merepresentasikan tabrakan kereta sebenarnya berdasarkan data statisktik kecelakaan kereta yang pernah terjadi. Dalam standar ini, kereta dibagi menjadi beberapa kategori berdasarkan *buffer load* nya sebelum menentukan skenario tabrakan. Tabel 2.3 merupakan kategori kereta menurut EN 15227.

Category	Buffer load	Example
P-I	2 000 kN	coaches and locomotives
P-II	1 500 kN	fixed rake units
P-III	800 kN	underground and rapid transit vehicles
P-IV	400 kN	light duty metro and heavy duty tramway vehicles
P-V	200 kN	tramway vehicles

Tabel 2. 3 Kategori kereta menurut EN 15227

(EN 15227, 2005)

Setelah memilih kategori kereta yang digunakan, selanjutnya adalah mengetahui kebutuhan pengaman pasifnya. Pengaman pasif merupakan komponen pengaman tanpa perlu diaktifkan yang dapat melindungi pengguna saat terjadi kecelakaan. Pengaman pasif pada kereta berupa rangka, *coupler house*, dll. Kebutuhan pengaman pasif pada standar ini antara lain penyerapan energi tumbukan, ruang aman pengguna kereta yang tersisa, dan pengurangan efek gangguan pada ruang aman pengguna.

Skenario tabrakan yang digunakan pada standar ini berdasarkan kejadian tabrakan yang pernah terjadi di Eropa, namun dapat memenuhi kebutuhan skenario tabrakan seluruh dunia karena tabrakan kereta pada umumnya sama. Skenario yang terdapat pada standar ini antara lain pertama, tabrakan bagian depan antara kereta sejenis, kedua, tabrakan bagian depan dengan kereta tidak sejenis yang memiliki *buffer* atau penyerap energi tumbukan, ketiga, tabrakan bagian depan kereta dengan rintangan berat seperti lorry, dan keempat, tabrakan kereta dengan rintangan ringan seperti mobil kecil, hewan, batu.

Parameter yang digunakan berupa kecepatan sesuai kategori kereta yang dipilih bisa dilihat pada tabel 2.4 hingga 2.6 berikut ini.

	Passenger vehicles collision speed $v_{\rm c}$ $^{\rm a}$					
	P-I	P-II	P-III	P-IV	P-V	
	Assi					
	36 kph	36 kph	36 kph d	36 kph d	15 kph	
а	a Collision conditions: train units non-braked on straight track.					
b	<sup>b</sup> Where the system's active safety measures are such that the collision risk is higher than the normal for European operations (e.g. as presented in ERRI B 205 Report), then a higher collision speed v, shall be considered. The collision speed shall be based on local accident statistics (or those for similar operations) or on the results of other risk assessment measures.					
с	<sup>c</sup> The collision speed may be reduced if the vehicles have a mean emergency braking rate $a_d > 1,0 \text{ m/s}^2$ . The reduced collision speed may be determined from the following formula: $v_{ted} = v_c (1 - (11(a_d - 1.0)/36)) \ge 25 \text{ kph}$ .					
d	<sup>d</sup> The normal collision speed for vehicle categories P-III and P-IV may also be reduced to 25 kph if automatic train protection is present and if the network is isolated from other types of rolling stock and the service on all lines operates in one direction only.					

# Tabel 2. 4 Kecepatan pada skenario 1

(EN 15227, 2005)

Passenger vehicles collision speed $v_c$ <sup>a, b, c, d</sup>					
	P-I	P-II	P-III	P-IV	P-V
	36 kph °	36 kph °	36 kph ⁰	36 kph ° 10 kph <sup>g</sup>	10 kph †
а	Collision conditions: tra	ain units/rail vehicles non-bral	ked on straight track.		
<sup>b</sup> Where the system's active safety measures are such that the collision risk is higher than the normal for European operations (e.g. as presented in ERRI B 205 Report, then a higher collision speed v, shall be considered. The collision speed shall be based on local accident statistics (or those for similar operations) or on the results of other risk assessment measures.					
<sup>c</sup> Assumed mean braking deceleration 1,0 m/s <sup>2</sup> . The collision speed may be reduced if the vehicles in categories P-I, P-II, P-III and P-IV have a mean emergency braking rate ad > 1,0 m/s <sup>2</sup> . The reduced collision speed may be determined from the following formula: $v_{nd} = v_c (1 + (14_{0d} - 10/36)) \geq 25$ kp.					
d	d The energy absorption behaviour of the buffers, see UIC 526-1, or automatic couplers of the other impacted vehicle shall be taken into account where appropriate.				
e	<sup>e</sup> For category P-I and P-II vehicles the wagon to be considered shall be a wagon as specified in UIC 571-2, mass = 80T with category A buffers. For other categories of vehicle, where this scenario exists, the wagon shall represent the heaviest type of wagon used on the system if this has a lower mass.				
f	f For normal European operation, a P-V unit working in a mixed traffic environment with a P-IV unit, shall be considered in collision with a rigid mass of 55T with a plane vertical face (this simplified obstacle representing the P-IV unit does not contribute to the energy absorption within this scenario).				

#### Tabel 2.5 Kecepatan pada skenario 2

9 For normal European operation, a P-IV unit in a mixed traffic environment, shall be considered in collision with a regional train unit. This unit may be represented by the reference train in C.3.

(EN 15227, 2005)

Passenger vehicles collision speed $v_c^{a,c}$				
P-I	P-II	P-III	P-IV	P-V
110 kph	110 kph	110 kph	40 kph	25 kph
b, d	b, d	b, d	d	е

#### Tabel 2. 5 Kecepatan pada skenario 3

a Collision conditions: train unit non-braked on straight track.

<sup>b</sup> The collision speed for Categories P-I to P-III is based on an operational speed of 160 kph at level crossings. If the operational speed of the vehicles at the level crossing differs from 160 kph, the collision speed shall be adjusted according to the following formula:  $v_c = v_{cp} - 50$  kph, where  $v_{cp}$  is the highest operational speed at the crossings.  $v_c$  should not be below 40 kph or the operational speed at the crossing. Whichever is the lower.

<sup>c</sup> Assumed mean braking deceleration 1.0 m/s<sup>2</sup>. The collision speed may be additionally reduced if the vehicles have an emergency braking rate a<sub>d</sub> >= 1.0 m/s<sup>2</sup> according to the formula: v<sub>ind</sub> = v<sub>c</sub> (1 – (11(a<sub>d</sub> –1,0)/36))

d Heavy obstacle (e.g. lory). For normal European operation represented by the deformable obstacle as defined in Annex C. The object shall be placed symmetrically perpendicular to the path of the train.

<sup>e</sup> Heavy obstacle for corner collision at crossroads (e.g. with light goods vehicle). For normal European operation this shall be represented by a rigid mass of 3T with a vertical surface covering the complete collision contact area of the tram. The collision face is to be at an angle of 45° to the tram longitudinal axis and centred on each of the front corners.

(EN 15227, 2005)

# Tabel 2. 6 kecepatan dan kebutuhan kekuatan deflektor rintangan pada skenario 4

Passenger vehicles - Categories P-I to P-IV						
Operational speed <sup>a</sup>	≥ 160 kph	140 kph	120 kph	100 kph	≤ 80 kph	
Static load at centre line <sup>b, c</sup>	300 kN	240 kN	180 kN	120 kN	60 kN	
Energy absorption at centre line <sup>d. e</sup>	36 kJ	29 kJ	22 kJ	14 kJ	7 kJ	
Static load at 750 mm lateral distance from C/L $^{\rm b,c}$	250 kN	200 kN	150 kN	100 kN	50 kN	
Energy absorption at 750 mm lateral distance from C/L <sup>d. e</sup>	30 kJ	24 kJ	18 kJ	12 kJ	6 kJ	

<sup>a</sup> For operational speeds different from the given values, the force and energy values may be interpolated.

<sup>b</sup> Each static load shall be applied independently in the vehicle longitudinal direction. The force has to be applied over an area of 0,5 m wide and up to 0,5 m high from the bottom edge of the obstacle deflector. (Note that the available height may be limited by cutouts for the coupler or other equipment). The line of action of the force shall be horizontal and through the centre of each loaded area up to a maximum height of 500 mm above rail level.

c There shall be no significant permanent deformation of the obstacle deflector and its fixations to the car-body due to each static load.

d If the obstacle deflector is overloaded it shall deform plastically in such a way that it does not become detached or itself become a danger.

<sup>e</sup> Under plastic deformation an obstacle deflector required by this document shall absorb at least the energy values given in the above table.

(EN 15227, 2005)

Pada penelitian ini jenis kereta termasuk kategori P-IV dan memiliki sistem perlambatan darurat, sehingga kecepatan pengujian yang dilakukan adalah 25 km/h. Karena LRT berjalan di lintasan khusus maka skenario yang digunakan hanya head on collision atau tabrakan antar kereta sejenis. Setelah itu dilakukan uji tabrakan. Yang menjadi acuan pada standar EN 15227 adalah ruang aman pengguna yang tersisa. Ruang aman yang tersisa pada bagian kabin masinis saat terjadi tabrakan depan adalah setidaknya 300 mm untuk panjangnya (x) dan 80% dari tinggi awalnya untuk tinggi setelah tabrakan. Ruang aman yang tersisa dapat dilihat dari jarak komponen terdepan saat terjadi tabrakan hingga kursi masinis, dapat dilihat pada gambar 2.20 berikut ini.



Gambar 2. 20 Jarak Aman yang Diperbolehkan pada Standar EN 15227 (EN 15227, 2005)

#### 2.3 Metode Elemen Hingga (MEH)

Menurut Ir. Yerri (2004), Metode Elemen Hingga (MEH) digunakan merupakan prosedur numeris vang untuk menyelesaikan masalah di bidang engineering. MEH dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan seperti analisis tegangan pada struktur, perpindahan panas, elektromagnetis, dan fluida. Inti dari MEH adalah membagi suatu objek yang akan menjadi beberapa bagian dengan jumlah finite dianalisa (diskretisasi elemen). Tiap-tiap Bagian yang telah dibagi-bagi tersebut kemudian dihubungkan dengan node, setelah itu dibangun persamaan matematika yang merepresentasikan objek tersebut, kemudian dapat dilakukan perhitungan untuk menyelesaikan masalah pada objek tersebut. Tujuan menggunakan MEH adalah

menyelesaikan analisis dari suatu persamaan diferensial geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, dan tidak mudah diperoleh dengan perhitungan manual karena perhitungan manual membutuhkan besaran yang harus diketahui pada setiap titik pada objek yang dikaji sedangkan geometri yang rumit memiliki banyak besaran yang tidak diketahui. Selain itu, MEH juga dapat menyelesaikan permasalahan dinamik atau berbasis perubahan waktu. beberapa *software* yang berbasis elemen hingga antara lain ANSYS, SOLIDWORKS, CATIA, dll.

MEH menggunakan konsep dasar hubungan tegangan, regangan, dan deformasi dalam menyelesaikan suatu permasalahan. Menurut Jack Hu, et al (2002) Tegangan sebenarnya (*true stress*) merupakan gaya yang timbul tiap satuan luas. Tegangan dapat dirumuskan sebagai:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2.1}$$

dimana F merupakan tegangan sebenarnya dan A merupakan luasan permukaan. Sedangkan regangan merupakan perubahan ukuran material dari panjang awal akibat gaya tarik atau gaya tekan yang dialaminya, skema dapat dilihat pada gambar 2.21. Jack Hu, et al (2002) dalam bukunya menyatakan terdapat dua macam regangan (*strain*) yaitu *engineering strain* dan *true strain*. Engineering strain dapat dirumuskan sebagai berikut:



Gambar 2. 21 Skema Regangan (Jack hu, 2002)

Dimana l merupakan perubahan panjang setelah terpengaruh gaya, lo merupakan panjang mula, dan delta l merupakan perubahan panjang. Sedangkan *engineering strain* merupakan perhitungan regangan pada kondisi dimensi benda saat itu dan dirumuskan sebagai:

$$\varepsilon = \int_0^1 \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$
(2.3)

Hubungan antar tegangan dan regangan pada suatu baja struktur dapat dilihat pada gambar 2.17.





Sedangkan deformasi merupakan perubahan bentuk pada objek apabila dikenai suatu pembebanan. Deformasi tidak bisa lepas dari persamaan modulus elastisitas. Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tegangan dengan regangan yang dialami bahan. Sehingga dengan menghubungkan persamaan modulus elastisitas dengan persamaan tegangan dan regangan didapatkan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{P}{A}}{\frac{\delta}{L}}$$
(2.4)

Sehingga untuk mencari deformasi ( $\delta$ ) dapat menggunakan persamaan:

$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E} \tag{2.5}$$

Dimana:

P = Beban (N),

L = panjang awal,

E = modulus elastisitas

A = luasan yang terpengaruh beban

Dari berbagai macam persamaan dasar tersebut dikembangkan menjadi suatu persamaan umum yang sering digunakan dalam analisis struktur menggunakan metode elemen hingga yaitu:

$$\{F\} = [K]\{d\}$$
(2.6)

Dimana :

 $\{F\}$  = matriks gaya yang bekerja pada node tiap elemen

[K] = matriks kekakuan elemen lokal

 $\{d\}$  = displacement pada elemen

Nilai matriks kekakuan global dapat dicari dengan menggabungkan matriks-matriks lokal dan merubahnya menjadi koordinat global, sehingga dapat mencari nilai *displacement* atau perubahannya menggunaan aturan penyelesaian matriks.

### 2.3.1 Prosedur Dasar

Dalam menyelesaikan suatu analisis struktur menggunakan *software* elemen hingga, langkah-langkah yang dilakukan antara lain:

- 1. Pembuatan model yang akan dianalisis.
- 2. Penentuan jenis material beserta sifat-sifat mekaniknya, meliputi modulus elastis, poisson ratio, kekuatan Tarik, dll.
- 3. Pembuatan elemen dari model yang akan dianalisis.
- Pemberian kondisi batas (*boundary condition*) Kondisi batas diperlukan untuk merepresentasikan model pada kondisi nyata. Berbagai macam kondisi batas yang biasa yang digunakan antara lain *fixed support, displacement* (sumbu x, y, z), dll.
- 5. Pemberian kondisi pembebanan (*loading condition*) Kondisi pembebanan bisa berbagai macam, untuk analisis beban statis yang sering digunakan antara lain force, moment, pressure, dll. Sedangkan analisis beban dinamis yang sering digunakan antara lain *velocity*, *gravitational acceleration*, dll.
- 6. Analisa

Analisa merupakan tahapan terakhir dalam menggunakan *software* elemen hingga. Beberapa *software solver* yang sering digunakan untuk analisis struktur antara lain, mechanical APDL, AUTODYN, dll.

## 2.3.2 Verifikasi

Verifikasi merupakan proses untuk memastikan apakan suatu simulasi dapat menyelesaikan suatu persamaan atau tidak. Proses tersebut dapat dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi yang akan dilakukan dengan simulasi sejenis yang telah dilakukan. Beberapa hal yang bisa dibandingkan meliputi trenline grafik stress, trenline grafik strain, pola deformasi, dll.

Verifikasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan mengacu pada standar keamanan tabrakan pada kereta meliputi skenario dan hasil deformasi yang diizinkan berdasarkan standar Eropa EN 15227.

#### 2.3.3 Validasi

Validasi merupakan proses untuk memastikan bahwa hasil simulasi apakah sesuai dengan kondisi nyata. Suatu contoh validasi untuk simulasi tabrakan struktur kabin kereta adalah dengan membuat struktur kabin ukuran asli yang dilengkapi dengan alat ukur yang diperlukan, kemudian dilakukan uji tabrakan dengan dinding, setelah itu membandingkan tengangan, regangan, dan pola deformasi yang terjadi dengan simulasi yang telah dilakukan. Apabila tidak ada perbedaan yang signifikan, maka simulasi tersebut valid untuk memodelkan kasus nyata tersebut.

Validasi pada penelitian ini adalah menggunakan eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya. Eksperimen yang dilakukan menggunakan prototype struktur tabrakan kereta yang ditabrakkan dengan dinding atau kereta sejenis.

## 2.4 Analisis yang Digunakan

## 2.4.1 Tumbukan

Tumbukan terjadi apabila dua buah benda saling bertabrakan pada waktu yang singkat, Menyebabkan gaya besar yang diberikan pada tiap benda. Ada dua macam tumbukan, yaitu tumbukan sentral (*central impact*) dan tumbukan miring (*oblique impact*). Tumbukan sentral terjadi apabila massa kedua benda yang saling bertabrakan melewati suatu garis lurus (*line of impact*) dimana garis tersebut tegak lurus dengan bidang kontak. Sedangkan pada tumbukan miring, massa benda yang bertabrakan membentuk suatu sudut terhadap garis lurus (*line of impact*). Gambar 2.23 merupakan skema tumbukan sentral dan miring.



(Hibbeler, 2010)

Dalam peristiwa tumbukan berlaku hukum kekekalan momentum yang berbunyi bahwa momentum benda sebelum dan setelah tumbukan itu selalu sama, secara matematis dapat sebagai berikut.

$$p = p' m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$
(2.7)

Dimana m merupakan massa sebelum tumbukan, m' massa setelah tumbukan, v kecepatan sebelum tumbukan, dan v' kecepatan setelah tumbukan. Hukum lain yang berlaku dalam konsep tumbukan yaitu hukum kekekalan energi mekanik dan dapat disederhanakan menjadi kekekalan energi kinetik bila tidak ada perbedaan ketinggian.

Pada tumbukan lenting sebagian, hukum kekekalan energi kinetik tidak berlaku karena ada perubahan energi kinetik setelah tumbukan. Perubahan energi kinetik bisa berarti pengurangan energi kinetik atau penambahan energi kinetik. Energi kinetik yang berkurang berubah menjadi energi panas yang diikuti dengan munculnya suara dan deformasi lokal. Pada Tumbukan plastis, energi kinetik yang berkurang bernilai maksimum sedangkan pada tumbukan elastis, tidak ada energi kinetik yang berkurang. Perhitungan tumbukan erat kaitannya dengan koefisien restitusi (e). Koefisien restitusi menunjukkan tingkat kelentingan suatu benda dengan melihat perbandingan antara kecepatan relatif benda setelah tumbukan dan sebelum tumbukan. Nilai koefisien restitusi berbeda-beda sesuai kecepatan tumbukan, ukuran dan bentuk benda yang saling bertumbukan. Untuk tumbukan lenting sebagian memiliki nilai koefisien restitusi 0 hingga 1, dan persamaannya sebagai berikut:

$$\mathbf{e} = -\frac{v_{2}-v_{1}}{v_{2}-v_{1}} \tag{2.8}$$

#### 2.4.2 Deformasi Plastis

Deformasi plastis merupakan deformasi atau perubahan bentuk yang terjadi pada suatu benda yang tidak bisa kembali ke kondisi semula walaupun beban ditiadakan. Apabila suatu material diberikan pembebanan melewati fase elastis dan tegangan luluhnya atau *yield strength*, maka material tersebut akan memasuki fase plastis dimana modulus elastisitasnya tidak konstan, hal ini tertera pada gambar 2.24. Kemudian energi deformasi plastik dapat dihitung dengan persamaan:





Gambar 2. 24 Grafik Deformasi Plastis (www.nde-ed.org)

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Diriba et al., (2014) menunjukkan bahwa deformasi panjang spesifik pada kendaraan dapat dicari dengan menghitung perbandingan antara deformasi maksimum  $(Lc)_{max}$  dengan panjang total kendaraan (L). Dalam hal ini, deformai maksimum dapat dilihat dari nilai deformasi total struktur kabin dan Panjang total dapat dilihat dari Panjang struktur kabin searah longitudinal. Persamaan deformasi Panjang spesifik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu \mathbf{d} = \frac{(Lc)\max}{L}.$$
 (2.10)

Dimana µd merupakan besar deformasi spesifik, yang menunjukkan kecepatan deformasi total. Kemudian bagian depan kendaraan atau kabin pada LRT tidak boleh terdeformasi lebih dari suatu nilai perbandingan, Biasanya nilai tersebut adalah 0,65. Apabila struktur yang analisis memiliki nilai µd lebih dari 0,65, kemungkinan besar apabila terjadi deformasi akan menyebabkan kerusakan pada ruangan pengguna kendaraan, sehingga dapat berdampak pada keselamatan pengguna.

Nilai deformasi maksimum yang diizinkan pada struktur kabin juga dipaparkan pada standar EN 15227 mengenai keamanan dan keselamatan tabrakan kendaraan berbasis rel. standar tersebut menjelaskan bahwa saat terjadi deformasi, setidaknya ruang kabin memiliki sisa panjang sebesar 300 mm. Apabila deformasi yang terjadi lebih dari nilai tersebut, maka akan berdampak pada keselamatan masinis.

## BAB III METODE PENELITIAN

## 3.1 Diagram Metode Elemen Hingga

Gambar 3.1 merupakan diagram alir metode elemen hingga pada penelitian ini.



Gambar 3. 1 Diagram Metode Elemen Hingga

#### **3.2 Model Material**

Berdasarkan data manufaktur PT. INKA, material yang digunakan adalah SPA-H JIS 3125 atau CORTEN Steel. Material tersebut merupakan baja paduan kromium dan tembaga sehingga tahan terhadap korosi. Material tersebut dimodelkan sebagai *isotropic linear*. SPA-H JIS 3125 memiliki spesifikasi pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Spesifikasi material SPA-H (JIS 3125)

Density (kg/mm <sup>3</sup> )	Young's modulus (MPa)	Poisson ratio	Bulk modulus (MPa)	Shear modulus (MPa)	Tensile yield strength (MPa)	Tensile ultimate strength (MPa)
7,7x10 <sup>6</sup>	2x10 <sup>5</sup>	0,32	1,8519x10 <sup>5</sup>	75758	355	490

#### 3.3 Model Solid 3D

elemen hingga adalah Pembuatan model proses menggambar objek penelitian tiga dimensi. Pada penelitian ini, model telah dibuat sebelumnya menggunakan software Catia dan ke Solidworks kemudian di import untuk dilakukan penyederhanaan. Bagian yang dimodelkan adalah struktur kabin LRT. Parameter yang akan diteliti adalah besar deformasi panjang ruang kabin masinis. Gambar 3.2 merupakan 3D model dari struktur tabrakan LRT.



Gambar 3. 2 Komponen Struktur Kabin LRT

Pada penjelasan mengenai Standar EN 15227 sebelumnya, terdapat beberapa skenario yang dapat dilakukan. Karena yang akan disimulasikan adalah LRT, dimana berjalan di lintasan khusus, sehinga dapat disimpulkan skenario yang digunakan adalah head on collision identical train atau tabrakan depan antar kereta sejenis. Kemudian untuk membuktikan hasil deformasi dari simulasi tabrakan antar kereta sejenis, maka dilakukan skenario kedua yaitu tabrakan dengan dinding. Karena menurut jurnal yang telah diterbitkan, tabrakan dengan dinding dapat mewakili kondisi tabrakan antar kereta sejenis. Kemudian skenario ketiga dengan tambahan coupler house pada bagian underframe untuk membandingkan efek penambahan coupler house sebagai penyerap energi tumbukan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Harish BM tahun 2015 dan Anders Larbrant tahun 2002, pemodelan dapat disederhanakan menjadi bentuk simetri untuk perhitungan. Gambar mengurangi beban 3.3 merupakan penyederhanaan dari model tersebut.



Gambar 3. 3 Penyerdahanaan Model Struktur Kabin LRT

Gerbong *motor car* dimodelkan sebagai *solid rigid body*, sehingga yang dimasukkan dalam simulasi hanya densitasnya saja dan tidak dapat berdeformasi. Dimensi gerbong dibuat menyerupai kondisi aktual dengan panjang sekitar 18 m dan lebar 2,6 m. Selain itu, gerbong yang dimodelkan harus mewakili massa total *motor car*. Menurut data dari PT. INKA *motor car* ini memiliki berat total 28 ton dan massa penumpang diasumsikan 57,7 kg/orang berdasarkan jurnal oleh Sarah Catherine di tahun 2012. Apabila Total penumpang *Motor Car* 202 orang, maka massa total *motor car* didapatkan,

$$\begin{split} M_{total} &= M_{mc} + (\text{total penumpang x berat}) \\ M_{total} &= (28000 + (202 \text{ x 57,7})) \text{ kg} \\ M_{total} &= 39655,4 \text{ kg} \end{split}$$

Apabila diketahui volume model gerbong yang akan digunakan adalah 5,8393 m<sup>3</sup>maka densitas material yang diperlukan untuk menambah massa adalah,

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$\rho = \frac{39655,4 \text{ kg}}{5,8393 \text{ m}^3}$$

$$\rho = 6791,12 \text{ Kg/m}^3$$

Karena densitas dari material yang digunakan lebih dari 6791,12 Kg/m<sup>3</sup>, maka densitas gerbong tidak perlu diganti dan dapat berlaku sebagai beban tambahan saat terjadi *overload* penumpang.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu seperi penelitian oleh Xiangdong Xue tahun 2005, skenario yang sering digunakan adalah tabrakan dengan dinding kaku dan tabrakan kabin sejenis, sehingga skenario yang pertama, yang dimodelkan adalah struktur kabin LRT dan Dinding kaku menggunakan kecepatan 25 km/h atau 6,94 m/s. Skenario pertama dapat dilihat pada gambar 3.4.





Kemudian untuk skenario kedua, yang dimodelkan adalah struktur kabin LRT dan struktur kabin sejenis dengan kecepatan 25 km/h atau 6,94 m/s. Skenario kedua dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Struktur Kabin dan Struktur Kabin Sejenis

Untuk skenario ketiga menggunakan kecepatan sampai batas maksimum deformasi. Skenario pengujian dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3. 2 Skenario Simulasi

No	Skenario	Kecepatan
1	Kabin LRT dengan dinding kaku	25 km/h
	(menggunakan & tanpa coupler	
	house)	
2	Kabin LRT dengan kabin sejenis	25 km/h
	(menggunakan & tanpa <i>coupler</i>	
	house)	
3	Kabin LRT menggunakan coupler	25 km/h -70 km/h
	house dengan dinding	

#### 3.4 Model Elemen Hingga

hingga Pemodelan elemen diawali dengan proses diskritisasi atau meshing. Meshing adalah proses pembagian body menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Proses ini sangat mempengaruhi hasil dari simulasi. Oleh karena itu meshing harus dilakukan dengan jenis dan jumlah elemen yang sesuai dengan kebutuhan. Pada penelitian ini elemen yang diaplikasikan adalah elemen shell dengan ketebalan 5 mm dan menggunakan ukuran mesh rata-rata 5 cm berdasarkan penelitian oleh Rachman Setiawan tahun 2017 dan data uji konvergensi elemen yang tertera pada lampiran. Gambar 3.6 dan gambar 3.7 merupakan 3D model struktur tabrakan yang telah di meshing.



(a)



(b) Gambar 3. 6 (a) Contoh Meshing pada Struktur Kabin LRT (b) Perbesaran Meshing



Gambar 3. 7 Meshing Keseluruhan Model

#### 3.5 Kondisi Batas dan Solusi

Kondisi batas yang diberikan pada penelitian ini untuk skenario pertama yaitu:

a. Symmetric region, simetri normal sumbu Z

Karena model 3D dibuat simetri untuk mengurangi beban perhitungan, maka pada sisi perpotongan diberikan kondisi batas symmetric region. Symmetric regon diberikan pada plane XY searah sumbu Z. Kondisi batas ini diberikan supaya model memiliki perlakuan seperti model penuh. Gambar 3.8 merupakan sisi perpotongan yang diberi symmetric region.



Gambar 3. 8 Symmetric Region pada LRT dan Dinding Kaku

b. Kecepatan 25 km/h atau 6,94 m/s pada model LRT searah sumbu X

Kondisi batas berikutnya adalah pembebanan berupa kecepatan. Kecepatan yang diberikan sebesar 25 km/h searah sumbu X sesuai standar EN 15227. Kondisi batas ini menggambarkan bahwa LRT melaju sebesar 25 km/h pada jalur lurus sebelum terjadi tabrakan. Kecepatan tersebut akan dikonversi menjadi energi tumbukan yang nanti nya akan diserap oleh struktur kabin LRT saat terjadi kontak dengan model lain. Gambar 3.9 merupakan pembebanan kecepatan yang diberikan pada model LRT.



Gambar 3. 9 Kecepatan 25 km/h atau 6,94 m/s pada LRT

c. Fixed support pada dinding kaku

*Fixed support* diberikan pada sisi depan permukaan dinding kaku. *Fixed support* yang diberikan menggambarkan bahwa dinding kaku tersebut diam ditempat dan tidak akan terdeformasi meskipun terjadi tumbukan. Gambar 3.10 merupakan sisi dari dinding kaku yang diberi *fixed support*.



Gambar 3. 10 Fixed Support Dinding Kaku

d. Bonded contact pada tiap-tiap sambungan

*Bonded contact* diberikan pada model untuk mewakili sambungan las pada tiap tiap komponen. *Bonded contact* menggambarkan bahwa sambungan tiap komponen sempurna dan tidak bisa bergeser saat terdeformasi hingga batas kegagalan material. Gambar 3.11 merupakan contoh dari komponen yang diberikan *bonded contact*.



Gambar 3. 11 Contoh *Bonded Contact* pada Sambungan *Underframe* 

e. *Displacement* X=*free*, Y=*free*, dan Z=*fix* pada struktur kabin LRT

Kondisi batas *displacement* X= *free*, Y=*free*, dan Z=*fix* diberikan pada model gerbong LRT menggambarkan bahwa LRT berjalan pada jalur yang lurus dan tidak dapat bergerak kearah kanan atau kiri. Gambar 3.12 merupakan *displacement* yang diberikan pada model.



Gambar 3. 12 *Displacement* X=*free*, Y=*free*, Z=*fix* pada Struktur Kabin LRT

f. End Time

Pemberian *end time* simulasi berdasarkan saat kecepatan berkurang menjadi 0, setelah melakukan uji coba simulasi maka didapatkan bahwa end time pada *range* sebesar 0,03s hingga 0,04s.

Kemudian kondisi batas dan pembebanan untuk skenario kedua yaitu:

a. *Symmetric region*, sumbu normal Z

Karena model 3D dibuat simetri untuk mengurangi beban perhitungan, maka pada sisi perpotongan diberikan kondisi batas *symmetric region. Symmetric regon* diberikan pada *plane* XY searah sumbu Z. Kondisi batas ini diberikan supaya model memiliki perlakuan seperti model penuh. Gambar 3.13 merupakan sisi perpotongan yang diberi *symmetric region*.



Gambar 3. 13 Symmetric Region pada LRT 1 dan LRT 2

b. Kecepatan 25 km/h atau 6,94 m/s pada struktur kabin LRT 1 searah sumbu X

Kondisi batas berikutnya adalah pembebanan berupa kecepatan. Kecepatan yang diberikan sebesar 25 km/h searah sumbu X sesuai standar EN 15227. Kondisi batas ini menggambarkan bahwa LRT melaju sebesar 25 km/h pada jalur lurus sebelum terjadi tabrakan. Kecepatan tersebut akan dikonversi menjadi energi tumbukan yang nanti nya akan diserap oleh struktur kabin LRT saat terjadi kontak dengan model lain. Gambar 3.14 merupakan pembebanan kecepatan yang diberikan pada model LRT 1.



Gambar 3. 14 Kecepatan 25 km/h atau 6,94 m/s pada LRT 1

- c. Bonded contact tiap-tiap sambungan
  - *Bonded contact* diberikan pada model untuk mewakili sambungan las pada tiap tiap komponen. *Bonded contact* menggambarkan bahwa sambungan tiap komponen sempurna dan tidak bisa bergeser saat terdeformasi hingga batas kegagalan material. Gambar 3.15 merupakan contoh dari komponen yang diberikan *bonded contact*.



Gambar 3. 15 Contoh *Bonded contact* pada Sambungan *Underframe* 

d. Fixed support pada LRT 2

*Fixed support* diberikan pada sisi belakang *underframe* dan rangka utama LRT 2. *Fixed support* yang diberikan menggambarkan bahwa LRT 2 tersebut pada kondisi berhenti saat terjadi tabrakan. Gambar 3.16 merupakan sisi dari LRT 2 yang diberi *fixed support*.



Gambar 3. 16 Fixed Support LRT 2

e. *Displacement* X=*free*, Y=*free*, dan Z=*fix* pada LRT 1 Kondisi batas *displacement* X=*free*, Y=*free*, dan Z=*fix* diberikan pada model gerbong LRT 1 menggambarkan bahwa LRT berjalan pada jalur yang lurus dan tidak dapat bergerak kearah kanan atau kiri. Gambar 3.17 merupakan *displacement* yang diberikan pada model gerbong.


Gambar 3. 17 Displacement X=free, Y=free, Z=fix pada LRT 1

f. End time

*End time* yang diberikan diasumsikan sama dengan skenario pertama karena skenario pertama untuk pembanding skenario kedua.

Untuk skenario ketiga, kondisi batas yang digunakan sama dengan skenario pertama.

### 3.6 Tipe Analisis dan Kontrol Solusi 3.6.1 Tipe Analisis

Pada penelitian ini, hasil simulasi yang akan didapat adalah total deformasi dari struktur kabin LRT. Total deformasi yang didapat pada skenario 1 dan skenario 2 akan dibandingkan. Setelah dibandingkan, dan hasilnya sama, maka dilanjutkan skenario dengan penambahan komponen *coupler house*. Total deformasi tersebut akan dibandingkan dengan standar EN 15227. Dapat dilihat pada gambar 3.18, (a) merupakan bagian terdepan struktur hingga meja kabin atau bisa disebut dengan *crumple zone* yang memiliki jarak 30 cm. Sedangkan (b) jarak meja dengan kursi masinis yang berjarak 60 cm. Jarak aman kursi masinis setidaknya 30 cm dari meja atau menyisakan 30 cm pada (b), dapat dilihat

pada gambar 3.18. Meja diasumsikan rigid dan berdeformasi setelah melebihi jarak (a), sehingga deformasi maksimum yang boleh terjadi adalah 60 cm dan deformasi spesifik kurang dari 0,65. Jarak tersebut akan dibandingkan dengan deformasi saat tabrakan. Kemudian diambil kesimpulan apakah struktur tersebut aman atau tidak berdasarkan Batasan EN 15227.



Gambar 3. 18 Jarak Aman Kursi Masinis LRT

### 3.6.2 Kontrol Solusi dan Verifikasi Prosedur Simulasi

Verifikasi pada penelitian ini untuk membuktikan bahwa prosedur yang dilakukan sudah benar. Verifikasi prosedur dilakukan dengan cara membandingkan grafik *output energy summary* pada *solution information* dengan penelitian sebelumnya. Grafik *energy summary* terdiri dari grafik energi kinetik, energi internal, energi kontak, dan energi *hourglass*. Berdasarkan penilitian yang dilakukan oleh Mesay Diriba pada tahun 2014, energi *hourglass* merupakan mode deformasi *zero*  *energy* yang berosilasi pada frekuensi yang jauh lebih tinggi daripada respon global struktur. Terjadinya *hourglassing* dalam analisis dapat menghasilkan data yang tidak valid. *Hourglass* harus dijaga pada batas 5% hingga 10% dari energi internal model, sehingga pada penelitian ini *hourglass* menjadi acuan apakah simulasi sudah berjalan dengan benar. Gambar 3.19 dan 3.20 merupakan grafik *energy summary* pada penelitian sebelumnya (gambar 3.19) dan penilitian ini (gambar 3.20 dan 3.21).



Gambar 3. 19 Grafik Energi Penelitian Sebelumnya



Gambar 3. 20 Grafik Energi Penelitian Ini

Dapat dilihat bahwa *hourglass* yang terjadi pada penilitian ini masih dibawah 10% dari energi internal, sehingga hasil dari simulasi mendekati benar. Apabila *hourglass* berada diatas 10% maka beberapa hal yang bisa dilakukan yaitu menghaluskan mesh dengan *refinement* atau mengecilkan ukuran mesh. Namun perlu berhati-hati karena mengecilkan ukuran mesh akan mempengaruhi waktu *solving* simulasi, sehingga perlu dicari ukuran mesh seoptimal mungkin. Selain itu pemilihan ukuran elemen dapat dilakukan dengan uji konvergensi. Pada penelitian ini didapatkan ukuran elemen optimal 5 cm.

Selain itu verifikasi dilakukan dengan membandingkan besar energi yang diserap oleh struktur pada rentang waktu waktu yang sama. Dapat dilihat pada tabel 3.3 merupakan hasil penelitian yang dilakukan oleh Baykasoglu tahun 2012 menggunakan kereta dengan berat sekitar 24 ton. Skenario yang digunakan adalah tabrakan dengan dinding kaku menggunakan kecepatan 30 km/h pada waktu 30 ms.

Tabel 3. 3	Energi	Serap	Struktur	Penelitian	Baykasoglu	Tahun
2012						

Kecepatan	Energi yang Diserap oleh Struktur				
Tabrakan	Desain original	Desain modifikasi			
30 km/h	2,57 MJ	2,7 MJ			

Dan tabel 3.4 merupakan hasil simulasi penelitian ini dengan berat kereta sekitar 28 ton, menggunakan skenario tabrakan dengan dinding kaku pada kecepatan 30 km/h selama 30 ms.

Tabel 3. 4 Energi Serap Struktur Simulasi

Kecepatan	Energi yang Dis	erap oleh Struktur
Tabrakan	Desain tanpa coupler house	Desain menggunakan coupler house
30 km/h	2,51 MJ	2,62 MJ

Sehingga dari kedua tabel diatas diperoleh grafik perbandingan besar energi yang diserap oleh struktur yang tertera pada gambar 3.21.



Gambar 3. 21 Perbandingan Energi yang Diserap Struktur

Dimana energi yang diserap oleh struktur original pada Baykasoglu diperoleh sebesar 2,57 MJ dan energi yang diserap oleh struktur tanpa coupler house sebesar 2,51 MJ. Dari data perbandingan tersebut, hasil simulasi dengan penelitian sebelumnya diperoleh nilai eror sebesar 2,33 persen. Kemudian terjadi peningkatan energi serap sebesar 0,13 MJ pada struktur modifikasi oleh penelitian Baykasoglu dan sebesar 0,11 MJ pada hasil simulasi, sehingga diperoleh energi yang diserap sebesar 2,70 MJ dan 2,62 MJ. Dari data tersebut hasil simulasi dengan penelitian sebelumnya diperoleh nilai eror sebesar 2,96 persen. bahwa, penambahan *coupler* house Dapat dilihat akan meningkatkan kemampuan penyerapan energi tumbukan, hal ini sesuai dengan penelitian oleh Baykasoglu pada tahun 2012, dimana struktur yang dimodifikasi dengan komponen penyerap energi akan meningkatkan kemampuan penyerapan energi oleh

struktur. Peningkatan energi serap pada penelitian Baykasoglu lebih besar karena pada penelitiannya sebagian besar yang dirubah adalah profil geometri dari struktur, sedangkan di penilitian ini hanya menambahkan *coupler house* tanpa merubah profil geometrinya.

Perbedaan energi serap dari kedua model diakibatkan oleh material yang digunakan berbeda. Penelitian yang dilakukan oleh Baykasoglu pada tahun 2012 menggunakan material stainless steel St 52, sedangkan pada penelitian ini material yang digunakan adalah SPA-H JIS 3125. St 52 memiliki sifat mekanik material yang lebih baik dibandingkan dengan SPA-H, sehingga kemampuan menyerap energi juga lebih baik. Selain itu terdapat perbedaan geometri kedua model dimana pada penelitian ini LRT memiliki *crumple zone* sedangkan penelitian sebelumnya tidak ada *crumple zone*.

## BAB IV PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Deformasi Struktur Kabin LRT

Dapat dilihat pada gambar 4.1, (a) merupakan bagian terdepan struktur hingga meja kabin atau bisa disebut dengan *crumple zone* yang memiliki jarak 30 cm. Sedangkan (b) merupakan jarak meja dengan kursi masinis yang berjarak 60 cm. Menurut EN 15227, pada kasus ini, Jarak aman kursi masinis setidaknya 30 cm dari meja atau menyisakan 30 cm pada (b). Meja diasumsikan *rigid* dan berdeformasi apabila deformasi yang terjadi melebihi jarak (a), sehingga deformasi maksimum yang boleh terjadi adalah 60 cm dan deformasi spesifik kurang dari 0,65. Jarak acuan struktur kabin LRT dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Jarak Acuan pada Struktur Kabin LRT Untuk mengetahui besarnya deformasi, maka perlu diberikan koordinat sebagai acuan sebelum terjadi tabrakan. Penentuan titik koordinatnya dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Posisi Koordinat pada Bagian Depan Struktur Kabin dan Kursi Masinis

Koordinat 1 merupakan posisi awal bagian terdepan dari Struktur kabin dan koordinat 2 merupakan merupakan posisi awal kursi masinis. Deformasi pada struktur dapat dihitung dengan menghitung selisih perpindahan antara kedua koordinat tersebut.

# 4.2 Tabrakan Struktur Kabin LRT Tanpa *Coupler house* dengan Dinding Kaku

Gambar 4.3 dan gambar 4.4 merupakan gambar struktur kabin LRT tanpa *coupler house* sebelum dan sesudah menabrak dinding kaku.



Gambar 4. 3 Struktur Kabin LRT Sebelum Menabrak Dinding Kaku



Gambar 4. 4 Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Dinding Kaku

Koordinat	Posisi Awal [sumbu x] cm	Deformasi [sumbu x] cm	Deformasi cm
1	9,31	1,5	24.4
2	-130,53	25,9	

Tabel 4. 1 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Dinding Kaku

 $deformasi \ spesifik = \frac{deformasi \ total}{panjang \ awal}$  $deformasi \ spesifik = \frac{24,4}{60}$  $deformasi \ spesifik = 0,4$ 

Dapat dilihat pada tabel 4.1, koordinat 1 yang mewakili bagian terdepan struktur kabin terjadi deformasi sebesar 1,5 cm dan koordinat 2 yang mewakili bagian depan kursi sebesar 25,9 cm dari koordinat acuan, sehingga selisih deformasi didapatkan 24,4 cm. Dan deformasi spesifik yang terjadi adalah 0,4. kedua hasil tersebut menyatakan bahwa desain dari struktur kabin aman.

## 4.3 Tabrakan Struktur Kabin LRT Menggunakan Coupler house dengan Dinding Kaku

Gambar 4.5 dan gambar 4.6 merupakan gambar struktur kabin LRT menggunakan *coupler house* sebelum dan sesudah menabrak dinding kaku.



Gambar 4. 5 Struktur Kabin LRT Sebelum Menabrak Dinding Kaku



Gambar 4. 6 Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Dinding Kaku

Koordinat	Posisi Awal [sumbu x] cm	Deformasi [sumbu x] cm	Deformasi cm
1	9,31	1,7	199
2	-130,53	21,6	19,9

Tabel 4. 2 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Dinding Kaku

 $deformasi \ spesifik = \frac{deformasi \ total}{panjang \ awal}$  $deformasi \ spesifik = \frac{19,9}{60}$  $deformasi \ spesifik = 0,33$ 

Dapat dilihat pada tabel 4.2, koordinat 1 yang mewakili bagian terdepan struktur kabin terjadi deformasi sebesar 1,7 cm dan koordinat 2 yang mewakili bagian depan kursi sebesar 21,6 cm dari koordinat acuan, sehingga selisih deformasi didapatkan 19,9 cm. Dan deformasi spesifik yang terjadi adalah 0,33. kedua hasil tersebut menyatakan bahwa desain dari struktur kabin aman.

## 4.4 Tabrakan Struktur Kabin LRT Tanpa Coupler house dengan Kabin Sejenis

Gambar 4.7 dan gambar 4.8 merupakan gambar struktur kabin LRT tanpa *coupler house* sebelum dan sesudah menabrak kabin sejenis.



Gambar 4. 7 Struktur Kabin LRT Sebelum Menabrak Kabin Sejenis



Gambar 4. 8 Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Kabin Sejenis

Koordinat	Posisi Awal [sumbu x] cm	Deformasi [sumbu x] cm	Deformasi cm
1	9,31	1,2	22.7
2	-130,53	23,9	22,1

Tabel 4. 3 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Kabin Sejenis

 $deformasi \ spesifik = \frac{deformasi \ total}{panjang \ awal}$  $deformasi \ spesifik = \frac{22,7}{60}$  $deformasi \ spesifik = 0,37$ 

Dapat dilihat pada tabel 4.3, koordinat 1 yang mewakili bagian terdepan struktur kabin terjadi deformasi sebesar 1,2 cm dan koordinat 2 yang mewakili bagian depan kursi sebesar 23,9 cm dari koordinat acuan, sehingga selisih deformasi didapatkan 22,7 cm. Dan deformasi spesifik yang terjadi adalah 0,37. kedua hasil tersebut menyatakan bahwa desain dari struktur kabin aman.

## 4.5 Tabrakan Struktur Kabin LRT Menggunakan Coupler house dengan Kabin Sejenis

Gambar 4.9 dan gambar 4.10 merupakan gambar struktur kabin LRT menggunakan *coupler house* sebelum dan sesudah menabrak kabin sejenis.



Gambar 4. 9 Struktur Kabin LRT Sebelum Menabrak Kabin Sejenis



Gambar 4. 10 Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Kabin Sejenis

Koordinat	Posisi Awal [sumbu x] cm	Deformasi [sumbu x] cm	Deformasi cm
1	9,31	2,3	193
2	-130,53	21,6	17,5

Tabel 4. 4 Deformasi Struktur Kabin LRT Setelah Menabrak Kabin Sejenis

 $deformasi \ spesifik = \frac{deformasi \ total}{panjang \ awal}$  $deformasi \ spesifik = \frac{19,3}{60}$  $deformasi \ spesifik = 0,32$ 

Dapat dilihat pada tabel 4.4, koordinat 1 yang mewakili bagian terdepan struktur kabin terjadi deformasi sebesar 1,7 cm dan koordinat 2 yang mewakili bagian depan kursi sebesar 2,3 cm dari koordinat acuan, sehingga selisih deformasi didapatkan 21,6 cm. Dan deformasi spesifik yang terjadi adalah 0,32. kedua hasil tersebut menyatakan bahwa desain dari struktur kabin aman.

#### 4.6 Kecepatan Maksimum Hingga Batas Deformasi Maksimum

Untuk mengetahui kecepatan maksimum yang boleh terjadi pada saat sebelum terjadi tabrakan. Skenario tabrakan dengan dinding menggunakan kecepatan maksimum LRT 70 km/h diperoleh deformasi sebesar 80 cm. Deformasi tersebut berada diatas spesifikasi aman EN 15227. Kemudian menggunakan kecepatan kerja rata-rata LRT sebesar 50 km/h diperoleh hasil deformasi sebesar 65 cm. Deformasi tersebut melebihi batas *crumple zone* yang akan mengakibatkan kemungkinan terdorongnya meja pada bagian kabin. Tedorongnya meja tersebut akan mengakibatkan berkurangnya jarak aman antara meja dengan kursi masinis, sehingga dapat mengakibatkan masinis terhimpit. Kecepatan diturunkan sampai diperoleh deformasi aman sebesar 38 cm pada kecepatan 40 km/h, maka diperoleh kecepatan maksimum yang diperbolehkan sebelum terjadi tabrakan adalah 40 km/h. gambar 4.11 (a), (b), dan (c) merupakan gambar deformasi yang tejadi pada kecepatan 70, 50, dan 40 km/h secara berturutturut.







Gambar 4. 11 Struktur Kabin setelah Tabrakan pada kecepatan 70(a), 50(b), dan 40km/h (c)

#### 4.7 Analisis Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi diatas dapat dirangkum pada tabel 4.5 berikut ini:

Shanaria	Deformasi				
Skenario _ Tabrakan	Tanpa Coupler house	Menggunakan Coupler house			
Dinding kaku	24,4 cm	19,9 cm			
Kereta sejenis	22,7 cm	19,3 cm			

Tabel 4. 5 Perbandingan Hasil Deformasi

Pada tabel 4.5 dapat dilihat deformasi terbesar terjadi pada struktur kabin tanpa menggunakan *coupler house*. Hal ini terjadi karena pada struktur kabin tanpa *coupler house*, energi tumbukan

diserap oleh *underframe*, sehingga underframe langsung mengalami *downward* bending yang cukup besar dan mengakibatkan kemampuan untuk menyerap energi tumbukan berkurang oleh karena itu terjadi deformasi yang lebih besar. Hal tersebut sesuai dengan penilitian yang dilakukan oleh Xiangdong Xue pada tahun 2005 dimana efek penambahan penguat dibagian belakang *draft sill* atau komponen sejenis *coupler house* yang memiliki plat penguat dibagian belakang dapat mengurangi downward bending pada underframe. Menurutnya, downward *bending* terjadi karena sebagian besar geometri pada kabin kereta tidak simetris arah vertikal. Saat terjadi tumbukan, pada bagian rangka seakan-akan memberikan gaya reaksi vertikal ke bawah, hal ini mengakibatkan underframe yang menjadi penopang utama akan mengalami downward bending, sehingga pada bagian berlakang *draft sill* perlu diberi plat penguat tambahan.

Hasil pengujian menggunakan dinding kaku menghasilkan deformasi yang relatif sama dibandingkan dengan kereta sejenis. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Harish BM pada tahun 2015 dimana penggunaan dinding kaku sebagai pengganti *head on collision* atau tabrakan kereta sejenis dapat dilakukan namun terdapat sedikit perbedaan karena dinding kaku pada simulasi tidak menyerap energi tumbukan.

Dari empat skenario tabrakan struktur kabin LRT, kereta masih dalam batas keamanan sesuai standar EN 15227 yang menyebutkan bahwa setidaknya saat terjadi tabrakan sebesar 25 km/h pada kereta ringan, menyisakan 30 cm jarak aman pada kursi masinisnya. Dan kecepatan maksimum yang didapat sebelum tabrakan adalah 40 km/h.

*Coupler house* yang digunakan sebagai peredam tumbukan dapat mengurangi deformasi yang terjadi pada struktur kereta sekitar 15% hingga 18% hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Baykasoglu pada tahun 2012 dimana kereta hasil modifikasi struktur atau penambahan komponen peredam kejut dapat mereduksi sekitar 13%.

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi tabrakan struktur kabin LRT yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

- 1. Deformasi pada struktur kabin LRT tanpa *coupler house* saat terjadi tabrakan dengan dinding kaku sebesar 24,4 cm dan tabrakan dengan kabin sejenis sebesar 22,7 cm, struktur kabin LRT menggunakan *coupler house* sebesar saat terjadi tabrakan dengan dinding kaku sebesar 19,9 cm dan tabrakan dengan kabin sejenis sebesar 19,3 cm. Dari semua data diatas maka struktur tersebut masih dalam batas keamanan yang diijinkan yaitu 60 cm. Kecepatan maksimum yang diperbolehkan sebelum terjadi tabrakan adalah 40 km/h.
- 2. Penggunaan dinding kaku sebagai pengganti skenario tabrakan kereta sejenis dapat menghasilkan simulasi yang lebih stabil dan hemat waktu perhitungan, karena dinding kaku tidak menyerap energi tumbukan.
- 3. *Coupler house* selain sebagai komponen untuk meletakkan alat penggandeng kereta juga sebagai komponen peredam kejut saat terjadi tabrakan, dapat mengurangi deformasi 15% hingga 18%.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang bisa diberikan antara lain:

- 1. Sebaiknya pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan analisis mengenai efek *secondary collision* seperti dampak benturan penumpang terhadap sekitarnya dan lain-lain.
- 2. Sebaiknya pada penelitian selanjutnya melakukan simulasi menggunakan spesifikasi *hardware* yang lebih baik, sehingga kereta beserta gerbongnya dapat dimodelkan secara penuh dan didapatkan hasil yang lebih mendekati kondisi sebenarnya.

"Halaman ini sengaja dikosongkan."

## DAFTAR PUSTAKA

Anders L., 2002. "Structural Optimization of Train Crash Structure", **Bombardier Transportation-Solid Mech. Division.** 

Ansel C. 2010. Stress in Beams, Plates, and Shells. CRC press.

Ardhian A., 2016, "Spesifikasi Teknis *Light Rail Transit* (LRT) Palembang", **PT. INKA.** 

Arifin M.N., 2017 "Analisis Collision Pada Kendaraan Multiguna Pedesaan Menggunakan Metode Elemen Hingga Dengan Software Virtual Performance Solution", Surabaya: **Institut Teknologi Sepuluh Nopember.** 

Baykasoglu., 2012. "Numerical Static and Dynamic Stress Analysis on Railway Passenger and Freight Car Models", International Iron & Steel Symposium.

CEN, 2005, "Railway Application – Crashworthiness Requirement for Railway Vehicle Bodies", European Comitee for Standardization.

David T., 2002. "US Rail Equipment Crashworthiness Standards", Journal of Rapid Transit.

Harish BM., dan Mallesh AP., 2015. "Crashworthiness Analysis of Metro Cars (Standard EN 15227", Altair Technology Converence.

Hibbeler R.C. 2010. Engineering Mechanics – Dynamics. New Jersey: Pearson-Prentice hall

Ilhami, A.H.A., 2016. "Analisis Collision pada Chassis Formula Sapuangin Speed dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga". Surabaya: **Institut Teknologi Sepuluh Nopember**.

Joao M., 2003, "Validated Multibody Model for Train Crash Analysis", International Journal of Crashworthiness.

John S., 2016. "State of the Art in Light Rail Vehicle Crashworthiness Standards", **SNC-Lavalin Rail Engineering.** 

Jorge ambrosio., 2005. "Crash Analysis and Dynamical Behaviour of Light Road and Rail Vehicles", **Vehicle System dynamics** 43, 6-7.

Manuel S., 2009 "Structural Crashworthiness of Railway Vehicles", **Technical University of Lisbon.** 

Marciniak, Z. 2002. **Mechanic of Sheet Metal Forming**. Oxford: Butterworth-Heinemann press.

Mesay D., 2014. "Rail Vehicle Cab Structural Dynamic Behaviour Under Collision", Addis Ababa University.

Rachman S., 2017. "Analisis Crashworthiness Struktur Kereta Penumpang Indonesia", **Institut Teknologi Bandung.** 

Sarah C., 2012. "The Weight of Nations: An Estimation of Adult Human Biomass", **Walpole BMC Public Health.** 

Singiresu, S. 2011. **The Finite Element Method in Engineering**. Oxford: Butterworth-Heinemann press.

Takeshi Kawasaki., 2009. "Railway-vehicle Technologies for European Railways", **Hitachi.** 

Tuncer T., 2003. "Railroad Passenger Vehicle Collision Analysis", Istanbul Technical University.

Xue X., 2005. "Modelling Study to Validate Finite Element Simulation of Railway Vehicle Behaviour in Collisions", **AEA Technology Rail.** 

## LAMPIRAN

#### 1. Uji Konvergensi Ukuran Elemen

Selain menggunakan acuan ukuran elemen rata-rata dari penelitian sebelumnya dan menggunakan kontrol *hourglass* pada output *energy summary*, untuk menambah tingkat kepercayaan diri terhadap hasil simulasi, maka pada algoritma Explicit Dynamic AUTODYN bisa dilakukan uji konvergensi ukuran elemen. Tabel dibawah ini merupakan kumpulan data dengan berbagai macam ukuran elemen beserta nilai deformasi pada bagian *side sill* kabin.

Ukuran Elemen Rata-rata (cm)	Jumlah Elemen	Deformasi (mm)
6	57566	30,024
5	57932	30,197
4,5	58026	30,168
3,5	58757	30,186
3	59241	30,203

Tabel 1 Uji Konvergensi



Dapat dilihat bahwa untuk ukuran elemen antara 3 hingga 5 cm menghasilkan deformasi yang tidak jauh berbeda, sehingga pemilihan elemen dengan ukuran 5 cm cukup untuk memprediksi hasil simulasi dengan baik. Selain itu pemilihan ukuran elemen yang terlalu kecil dapat memperpanjang waktu *solving* yang cukup signifikan pada algoritma Explicit Dynamic AUTODYN. 2. *Screenshot* prosedur simulasi Berikut merupakan langkah-langkah saat melakukan simulasi.



Gambar 2 Membuka Software Explicit Dyamic AUTODYN

	Koerces					_						
oolbax	<ul> <li>Outline of Schematic Azi Linging</li> </ul>	corng Data				1.74	Table of Imopera	COLUMN TWO IS NOT	SECTION	CETTER VENERAL		
Physical Properties		Contants of Engineering Data	<ul> <li>&gt; + Source</li> </ul>	Desc	ription		1 Variable Nan	ne thit t	Default Data	Lower Limit	Upper Lin	nt
Departy Depart Deda	2 - Horrison								12	Program	Prognam	
Lines' Links	-			"Exurtise of State and Strength People	rise of Calendari Materials". Carl	-bern	2 Temperature	• C ~	u	Controlled	Controlled	
Orthomask: Fleetikity	3 \ AL-6061-16		× * * Explo	D.J. LLML Feb 1991								
Viscoseastic	4 9 SPNH		1 9 C/US									
Hypereizetic Experimental Data				Factorie Data at zero moan steesi corre	is from 1998 ASME BPV Code, 5	intin						
Unieodal Text Data	5 5 Sectores		TO A T CARGE	8, Dir 2, Table 5-110.1								
Sinute Test Date	<ul> <li>Click here to add a new r</li> </ul>											
Shear Test Data												
Volumetric Test Data												
hypereixetik	4											
Neo Hockean												
Mooney RMI12 Paralment												
Monore Blain S Datamater												
Nonney-Rivin 9 Parameter												
Pohrsomial 1st Order												
Polynomial 2nd Order												
Polynomial 3rd Order												
Yech 1st Order												
tech 2nd Ceder												
Yeen and Criger	Conception of the second second second						charts No data					
Control 1/2 Control	mappings or covere now p. p.						and the second se					
Option 1st Order Option Test Order	modernes or course Hore or s				<i>c</i>	sk						
Opden 1st Order Opden 2nd Order Opden 2nd Order	1	Property		n Value	Unit	2						
Ogden 1st Order Ogden 2nd Order Ogden 2nd Order Rastolik	1 2 Material Field Variables	Property		Volue • Table	Unit	00						
- Ogden Sit Order - Ogden 2nd Order - Ogden 3nd Order - Ratidly - Skneet Indrock Rendering	1 2 M Haterial Field Variables 3 10 Density	Property		Volum * Table 7650	unit kg.m^-3	200 8						
Ogden Sst Order Ogden and Order Ogden Ted Order Plasticity Elikener Jootropic Herdening Hulditiner Sotropic Herdening	1 2 W Haterial Field Variables 3 S Beneity 4 = 7 Susfergie Lineisdy	Property		* Table 7650	line kgmr-3	4 4						
Copien Set Croler Copien Jad Order Roschey Basschey Balander Isotropic Hardening Hubblener Isotropic Hardening Bilwar Einemotic Hardening	1 Heteral Field Variables 3 to Boselay 4 - This Angle Elimitedy 5 Derive from	Property		Volum • Table 7650 Tourg's Hodulus and Polson	ligan A.a	200 N						
* Option Set Circler Copies Set Onder Copies Teol Onder Pleasatory * Billewer Internation Ferdening * Billewer Internation Handwing Billewer Knormabic Handwing Malitherer Knormabic Handwing	1 2 W Hoteral Floid Variables 3 to Bondity 4 To <u>Instrume Unitedy</u> 5 Derive from 6 Young's Hodulus	Property 5		Volue * Table 7850 Young's Modulus and Polsson	kg m²-3	ы н н н н н н н н н н н н н н н н н н н						
1 Open 24 Other 1 Open 24 Other 1 Open 24 Other 1 Open 24 Other 1 Salawa Isotropic Hardwring 1 Hull Ionar Isotropic Hardwring 1 Hull Ionar Kinanado Isotoling 1 Hull Ionar Kinanado Isotoling 1 Hull Ionar Kinanado Isotoling	1           2         H Reter al Floot Variables           3         5 Bondly           4         R Sadespin Unitedy           5 Derive from           6 Young's Modules           7 Potentify Reter	Property		Yolun           * Table           7650           Young's Modulus and Polsson	ligami-is Na	м 10 10 10 10						
Option Set Cinfer Option Set Cinfer Option Set Oxfore Option Test Oxfore FloatCinfe FloatCinfe FloatCinfer FloatC	1 2 W Keter al Field Variables 3 S Booxiey 4 N Testing Stanlardy 5 Derive from 8 Young's Hodulan 7 Polewish Patto 8 Bick Hodulas	Property		Volum           * Table           7650           Young's Modulus and Polsson           12F+11           6,3           1,0592E+11	lone kgmr-3 Pa Pa	h 1 2 24						
<ul> <li>Open and Order</li> <li>Open bad Order</li> <li>Open bad Order</li> <li>Open bad Order</li> <li>Baker Inderseit</li> <li>Baker Inderseit Herdening</li> <li>Halthoner Hormpic Herdening</li> <li>Halthoner Hormpic Herdening</li> <li>Halthoner Kleinreich Herdening</li> <li>Halthoner Kleinreich Berdening</li> <li>Halthoner Kleinreich Berdening</li> <li>Halthoner Kleinreich Berdening</li> <li>Halthoner Kleinreich Berdening</li> <li>Chapter Spinolal Bereght</li> <li>Stenders Glains Shreidh</li> </ul>	Meteral Rod Variables     Meteral Rod Variables     Society     Meteral Rod Variables     Society     Modula     Posecrity Ratio     Society Rodus     Society Rodus     Society Rodus	Departy 5		Volum = Table 7650 Toung's Modulus and Polason 276-11 276-11 276-11 276-11 276-11 7,01226-10	tion Agam <sup>a</sup> -3 Pa Pa Pa	м н н н						
Copies 15 Chile Copies 24 Chile Copies 14 Orice Ristotty Bione: Softwark Reviews Histore Softwark Interfering Histore Knemutic Interfering Histore Knemutic Interfering Histore Cook Strength Compet Spreads Strength Strenger Spreads Strength Strenger Spreads Strength	A Hoteral Hood Variables     A Noteral Hood Variables     A P Society     Proceedings Links day     Proceedings Links day     Proceedings Links day     Society Hood day	Droperty 5		Volum * Table 7650 7650 7610 7611 16-1 1,005/2+11 7,02325+30 402 404	Deel lagamini 3 Pa Pa Pa Pa Jagini 6 Cini 3	N N N						
Opinia IS-Chier     Opinia IS-Chier     Opinia IS-Chier     Opinia IS-Chier     Opinia IS-Chier     Opinia     Opini	1         ** Noterial Flood Variables           3         ** Boundly           4         ** Boundly           5         Darket from           6         Yanget Modulat           7         Planemin Flood Variables           8         Yanget Modulat           9         Name Modulat           9         Name Modulat           9         Name Modulat           9         Name Modulat           9         State Modulat           9         State Modulat           10         State Modulat	Property 5		Wole           * Table           ? Toting's Midulus and Polsson           ? Frit           0,3           1,0692+11           7,6923+30           424	Eg m*-3 Pa Pa Pa J lig*-5 C*-5	NO R						
Open all chain Copies 240 Chain Open 240 Chain Biskers Bornes Biskers Bornes Biskers Honnesh Hennesh Biskers Honnesh Hennesh Biskers Honnesh Samon Casak Stendel Chain Strandal Stenden	A second se	Property		Woke           * Table           7850           Poung's Modulus and Polason           2#+11           6,3           1,995/2+11           2,092/2+80           424	bar bar Pa Pa Pa Jig*-5 C*-5	N N N						
Ogen is droke Ogen als droke Ogen bal of krev Biskow Biskow Biskow benngs hindening Hallinar kremer Hallinar Konnak landaring Hallinar Konnak landaring Jisakon Gak Sengh Sakatag Landari Swedh Zeiti Arending Simargh Biskolar, Biskow Sendari, Bahan Sendari, Bahan Hallinar Handari Sakatag Landari Sendari Biskolari Kataga Sakatag Hallinar Handari Sakataga Sakatag Hallinar Handari Kataga Sakatag Hallinar Handari Kataga Sakatag Hallinar Halling Hal	Meteral Flod Variables     w Hoteral Flod Variables     w Hoteral Flod Variables     w Power Market     worker from     Young's Hotelain     Power from     Built Hotelain     Ster Noclain     Ster Noclain	Property 5		Volum * Table 7450 7450 7451 7451 7451 7451 7451 7451 7451 7451 7451 7452 741 7452 741 7452 745 7450 7400 74500 74500 74500 74500 74500 7400 74500 74500 7400 7400 7400 7400 7400 7400 7400 740	lave kgm^-3 Pa Pa Pa Pa Jag^-5 C^-5	N N N						
Open 34 Open Open 24 Open Open 24 Open Telefort Indiana for open Senters (Telefort Senters (Telefort) Senters (Telefort) Senters (Telefort) Senters (Telefort) Senters (Telefort) Senters (Telefort)	A Material Flood Variables     A Material Flood Variables     A Material Flood Variables     A Material Variables     Denter The State     Souther Th	Departy Departy		Volum Table 7450 Trong Madau and Polann 2 4741 4741 4741 1,0052-11 2,00221-90 424	libre kg m^3 Pa Pa Pa Jig^5 C^5	N N N						
Opper Jac Opie Copper Jac Opie Copper Jac Opie Biole Note Description of Indenton Halikener Istmitte Herkening Halikener Estmitte Herkening Halikener Estmitte Herkening Halikener Schwalt Herkening Jackson Schwalt Benryth Sonstan (Jacker Synoch Sonstan (Jacker Synoch Optimume) Onteringen Sonst Links Onteringen Sonst Links Onteringen Sonst Links Descent Ister	A second find a second se	s Disparty S		Value 7 Table 7850 7000 (Mddules and Polison	1000 1000 100 100 100 100 100 10	Notes and a second seco						
Open SI Open Copen Set Open Copen Set Open Headow H	Notice and the second sec	Drypery 9		Volm Table 7450 Trong Madau and Pokann 174 11 1,0057-11 2,00225-10 424	Pe Pe Pa Pa Jug % 1 C% - 3	N N N						
Opper Jac Opie Copper Jac Opie Copper Jac Opie Data Data Data Data Data Data Data Dat	Second Index Second Index     Second Index     Second Index Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index     Second Index	S		7460 7460 7460 7461 7461 7461 7461 7461 7461 7461 7461	1000 1000 100 100 100 100 100 10	Notes and a second seco						
Capita In Camine Capital In Camine Capital International Camine Capital International Camine	A Hater and Prod Variables     Should Prod Variables     Should Prod Variables     Should Prod Variables     Should Produce Product Product     Program Product     Should Product Product     Should Product Pro	Digety		7486 7460 7460 7471 7471 7471 7471 7471 7471 7471 747	Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa	No						
Copies In Come Copies Into Come Description Interface Interfac	A second se	Бурну		value 7400 7400 7551 7551 7551 7551 7551 7551 7551 75	Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa							
Open (Colors)     Open (C	A faster and mod transition     South and the second model     Device term     Device term     Device term     Verage transition     Device term     Device term     Device term     Device term     Device term     Device term	Rivery		284a 7850 7850 7840 7841 7841 7841 7841 7841 7841 7841 7841	kg m^3 kg Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa Pa							
- Open It Come - Open It Come - Description - Description - Description - Description - Description - Description - Description - D	A Second Production Products     A Second Product Version     A Second Product Version     Develop From     Versign Version     Versign Version     Versign Version     Versign Version     Versign Version     Versign Version	Drywy		7000 - 1426 7400 - 7400	ligan-3 Pa Pa Pa Pa Dag-40-4	4° × ×						
Course 10 colors     Cour	A short of the states of	Бурлу		Vide           760           760           760           760           761           762           763           764           764           765           765           765           765           765           765           765           765           765           765           765           765	ligan-3 In Pa Pa Pa Dign-10-5	A V V						
Copies I Copies Copies I Copies Michael Descritori National Na	1         •	Rivery		2020 2100 2100 2100 2100 2100 2100 2100 2100 2100 200 2000 2	цул-3 цул-3 Р Р Р Р Р Р Р	4						

Gambar 3 Penginputan Material



Gambar 4 Penginputan Geometri



Gambar 5 Proses *Meshing* pada Model



Gambar 6 Pemberian Kondisi Batas dan Pembebanan



Gambar 7 Input End time dan CFL



Gambar 8 Solver Output



## **BIODATA PENULIS**



Rayhan Zufar Muhammad merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Malang pada 26 Maret 1996 ini merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Halid Hasan dan Ibu Setiawati Andri. Penulis memulai pendidikan formal di TK Bustanul Athfal Restu kemudian melanjutkan ke MI Negeri 1 Malang. Setelah lulus tahun 2008 penulis melanjutkan ke SMP Negeri 3 Malang dan kemudian melanjutkan ke

SMA Negeri 3 Malang pada tahun 2011. Setelah menyelesaikan studi tingkat menengah atas, penulis melanjutkan studi S1 dan diterima di Program S1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP 02111440000014.

Selama menuntut ilmu S1, penulis mengikuti kegiatan perkuliahan layaknya mahasiswa lainnya. Selain itu penulis juga sempat aktif di kegiatan ekstakurikuler robotik serta aktif mengikuti kepanitiaan, pelatihan, dan seminar di Departemen Teknik Mesin ITS. Karena ketertarikan terhadap mekanika dan fenomena yang terjadi pada benda padat terutama pada kendaraan, penulis mendedikasikan tugas akhir pada bidang tersebut dengan topik penelitian yang diambil berupa "Studi Numerik Tabrakan Struktur Kabin Light Rail Transit (LRT) dengan Metode Elemen Hingga". Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir menghubungi ini dapat Penulis melalui email zufarrayhan@gmail.com.