



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

STUDI NUMERIK KETAHANAN FRAME BOGIE LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL

KELVIN YOHANES YORDANIUS
NRP. 0211144000029

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 KETAHANAN FRAME BOGIE
LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) TERHADAP
BEBAN EKSEPSIONAL**

KELVIN YOHANES YORDANIUS
NRP. 0211144000029

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 DURABILITY ON
BOGIE LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) FRAME
AGAINST EXCEPTIONAL LOAD***

**KELVIN YOHANES YORDANIUS
NRP. 0211144000029**

Supervisor

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

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

STUDI NUMERIK KETAHANAN FRAME BOGIE LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL

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 :

KELVIN YOHANES YORDANIUS

NRP. 0211144000029

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD. (Pembimbing)
NIP. 197909262005011001
2. Ari Kurniawan Saputra, ST, MT (Penguji I)
NIP. 198604012015041001
3. Dr.Eng Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc (Penguji II)
NIP. 197805112001121001
4. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E (Penguji III)
NIP. 196511031996021001

SURABAYA

JULI, 2018

STUDI NUMERIK KETAHANAN FRAME BOGIE LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL

Nama Mahasiswa : Kelvin Yohanes Yordanius
NRP : 0211144000029
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Achmad Syaifudin,S.T,M.Eng,Ph.D.

ABSTRAK

Mobilitas manusia modern dan meningkatnya perekonomian menuntut perkembangan sarana transportasi yang cepat, murah dan aman. Kebutuhan transportasi publik di Indonesia dijawab dengan pengadaan kereta ringan yaitu *Light Rail Transit* (LRT), sebagai salah satu moda transportasi pilihan yang beroperasi dalam kota. LRT diproduksi oleh PT. INKA untuk digunakan di Palembang dan Jakarta demi menyukseskan penyelenggaraan Asian Games 2018. Namun, tingkat kandungan dalam negeri (TKDN) LRT ini masih tergolong rendah, disebabkan bogie system yang digunakan masih merupakan produksi Bombardier, Inggris. Disisi lain, kemampuan PT. INKA untuk memproduksi rangka bogie kereta api perlu dikembangkan, sehingga juga dapat memproduksi rangka bogie untuk LRT. Oleh karena itu, diperlukan studi pengembangan bogie system dengan muara pemanfaatan produksi *bogie system* dalam negeri dan peningkatan TKDN. Penelitian ini merupakan tahapan awal pengembangan *bogie system*, yang mana dimulai dari analisis struktur rangka (frame) bogie.

Pada penelitian ini, perangkat lunak Inventor Professional 2015 digunakan untuk membangun model solid dan Ansys Workbench R18 digunakan sebagai media studi numerik. Tipe analisis yang dilakukan disini berupa analisis struktur statis. Analisis struktur statis dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan rangka bogie. Merujuk kepada standar EN 13749, ada 2

variasi pembebanan yang digunakan yaitu *switches* dan *running through curves*.

Setelah dilakukan simulasi, didapatkan beberapa poin yaitu tegangan von-mises dan faktor keamanan dari kasus pembebanan *switches* memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap struktur bogie. Setelah dilakukan simulasi maka didapatkan nilai tegangan von-mises dan faktor keamanan yang berbeda. Pada kondisi pembebanan *switches* didapatkan tegangan von-mises maksimum sebesar 319.66 MPa dan faktor keamanan terkecil sebesar 1.0167. Pada kondisi pembebanan *running through curves* didapatkan tegangan von-mises maksimum sebesar 311.09 MPa dan faktor keamanan terkecil sebesar 1.0447.

Kata kunci: *Bogie Frame*, Metode Elemen Hingga, *Statis Structural Analysis*, EN 13749.

**NUMERICAL STUDY OF DURABILITY ON BOGIE LIGHT
RAIL TRANSIT (LRT) FRAME AGAINST EXCEPTIONAL
LOAD**

Name : Kelvin Yohanes Yordanius
NRP : 0211144000029
Department : *Mechanical Engineering- ITS*
Academic Supervisor : Achmad Syaifudin, S.T,M. Eng,Ph.D

ABSTRACT

Modern human mobility and increasing economy matters demanding development of transportation which fast, cheap and safe. The demand of public transportation in Indonesia answered by creating light train which is Light Rail Transit (LRT), for one of the preferred modes of transportation operating within the city. LRT produced by PT.INKA used in Palembang and Jakarta to succeed of Asian Games 2018. However, specific level of domestic component (TKDN) classified as very low, because bogie system produced by Bombardier, England. On the other hand, capability of PT.INKA in produce bogie frame need to be improved, so PT.INKA can also produce LRT bogie frame. Therefore, is required bogie system development study for production of domestic bogie and increase specific of domestic component (TKDN). This research is an early stage of development bogie system, which starts with bogie frame structural analysis.

In this research, Inventor Professional 2015 software used for make solid model dan Ansys Workbench R18 used as finite element method software for numerical study media. Type of analysis that used in this research is static structural. Static structural analysis used to know the safety of bogie frame. Referring to EN 13749 standart, there are 3 load cases that used that is switches, running through curves and running through curves based on track radius.

There are points obtained after simulation done, von-mises stress dan safety factor from switches load case have more influence to bogie structure. After simulation done the result of von-mises stress dan safety factor that obtained is different. On switches load case obtained maximum von-mises stress of 319.66 Mpa dan minimum safety factor of 1.0167. On running through curves load case obtained maximum von-mises stress of 311.09 Mpa dan minimum safety factor of 1.0447.

Key words: Bogie Frame, Finite Element Method, Static Structural Analysis, EN 13749.

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur bagi Tuhan YME atas limpahan petunjuk dan rahmatnya-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“STUDI NUMERIK KETAHANAN FRAME BOGIE LIGHT RAIL TRANSIT (LRT) TERHADAP BEBAN EKSEPSIONAL”**. Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Papa Dr. Benny Sugiapranata Yordanius, Mama Hendrawati Sarjono, Dr. Nico Odolf Yordanius, Vanessa Chris Patricia S.I.Kom serta keluarga besar.
2. Bapak Achmad Syaifudin, ST., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis, terima kasih atas bimbingan, saran dan ilmu yang telah diberikan.
3. Bapak Ari Kurniawan Saputra, ST, MT., Dr.Eng Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc., Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E., selaku dosen penguji tugas akhir penulis. Terima kasih atas waktu dan bimbingan yang telah diberikan.
4. Bapak Bobby Oedy Pramudyo, Ir., M.Sc., Ph.D. selaku dosen wali, terima kasih atas saran-saran yang diberikan saat perwalian setiap semester.
5. Seluruh dosen, staff, angkatan 2014, Teman-teman Lab Mekanika Benda Padat Departemen Teknik Mesin ITS.
6. Rekan-rekan tugas akhir Rayhan, Egy, Betti, Kukuh, mas Andhika, mas Alkalifa, Rifai, Windhu, dan rekan-rekan lainnya yang telah menyelesaikan tugas akhir bersama dalam susah dan senang.
7. Kepada Adi, Bernard, Diaz, Edwin, Juan, Leonard, Narendro, Puri.
8. Keluarga besar KMK ITS.
9. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat dituliskan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa pengerjaan Tugas Akhir ini masih

banyak kekurangan. Oleh karena itu penulis sangat mengharapklan jika terdapat kritik dan saran pada Tugas Akhir ini. Akhir kata semoga Tuhan YME menjadikan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat serta kontribusi bagi rekan-rekan semua.

Surabaya, 28 Juli 2018

Penulis

Daftar Isi

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
Daftar Isi.....	vii
Daftar Gambar.....	x
Daftar Tabel.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 RUANG LINGKUP.....	3
1.4 TUJUAN PENELITIAN	4
1.5 MANFAAT PENELITIAN	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 PENELITIAN TERDAHULU.....	5
2.2 BOGIE	9
2.3 STANDAR EN 13749 APLIKASI PERKERETAAPIAN.....	9
2.4 STANDAR EN 15663 REFERENSI MASA KENDARAAN.....	10
2.5 METODE ELEMEN HINGGA (MEH)	10
2.5.1 Prosedur MEH.....	11

2.5.2 Verifikasi.....	11
2.5.3 Validasi	11
2.6 ANALISIS YANG DIGUNAKAN.....	12
2.6.1 Analisis Tegangan Von Mises	12
2.6.2 Analisis Angka Keamanan.....	12
2.6.3 Analisis Beban yang Digunakan.....	12
BAB III METODE PENELITIAN.....	15
3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN	16
3.2 MODEL MATERIAL	17
3.3 MODEL SOLID 3D	18
3.4 MODEL ELEMEN HINGGA.....	19
3.5 KONDISI BATAS DAN PEMBEBANAN	22
3.6 ANALISIS YANG DIGUNAKAN.....	25
3.6.1 Analisis Pembebanan Massa.....	25
3.6.2 Analisis beban <i>car body</i>	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 HASIL SIMULASI STATIS.....	37
4.1.1 Tegangan Ekuivalen Von-Mises.....	37
4.1.2 Faktor Keamanan	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	43

5.1 KESIMPULAN.....	43
5.2 SARAN.....	43
Daftar Pustaka	xiii
LAMPIRAN	xiv
Biodata Penulis.....	xxviii

Daftar Gambar

Gambar 1.1 Jumlah kecelakaan perkeretaapian tahun 2010-2016	2
Gambar 2.1 Deformasi pada kondisi pertama	6
Gambar 3.1 Metode Penelitian	15
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	16
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (lanjutan)	17
Gambar 3.3 Model Solid 3D Awal	18
Gambar 3.4 Model Solid 3D Akhir	19
Gambar 3.5 Tampilan <i>Static Structural</i>	20
Gambar 3.6 <i>Fixed Support</i> pada 4 sisi bogie.....	22
Gambar 3.7 <i>Frictionless Support</i> pada 4 sisi bogie.....	23
Gambar 3.8 Gaya vertikal pada <i>sideframe</i>	23
Gambar 3.10 Gaya transversal pada <i>lateral buffer</i>	24
Gambar 3.11 Gaya Akibat Angin Pada Sisi <i>Car Body</i>	28
Gambar 3.12 <i>Free body diagram</i> pada <i>car body</i> sumbu xz	28
Gambar 3.13 <i>Free body diagram</i> pada <i>car body</i> sumbu yz	30
Gambar 3.14 Gambar distribusi gaya F_z pada tiap tumpuan sumbu xy	32
Gambar 4.1 Tegangan Von-Mises <i>Switches</i>	38
Gambar 4.2 Tegangan Von-Mises <i>Curves</i>	38

Gambar 4.3 Faktor Keamanan Kasus *Switches*..... 40

Gambar 4.4 Faktor Keamanan Kasus *Curves* 40

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Main operating load's working condition	5
Tabel 2.2 Hasil Maksimum Equivalent Stress Dengan Kondisi Pembebanan	7
Tabel 2.3 Hasil Tegangan Maksimum untuk Tes Statis	7
Tabel 2.4 Kasus Pembebanan Statis Saat Operasi (Margono dkk, 2017)	8
Tabel 2.5 Hasil Simulasi Pembebanan Statis Saat Operasi	8
Tabel 3.1 Data Material JIS G3106	18
Tabel 3.2 <i>Mesh</i> Konvergen.....	21
Tabel 3.3 Percepatan Berdasarkan Load Case	26
Tabel 3.4 Distribusi gaya Fz kasus <i>switches</i>	33
Tabel 3.5 Distribusi gaya kasus <i>running through curves</i>	35
Tabel 3.6 Distribusi gaya Fz kasus <i>running through curves</i>	35

BAB I

PENDAHULUAN

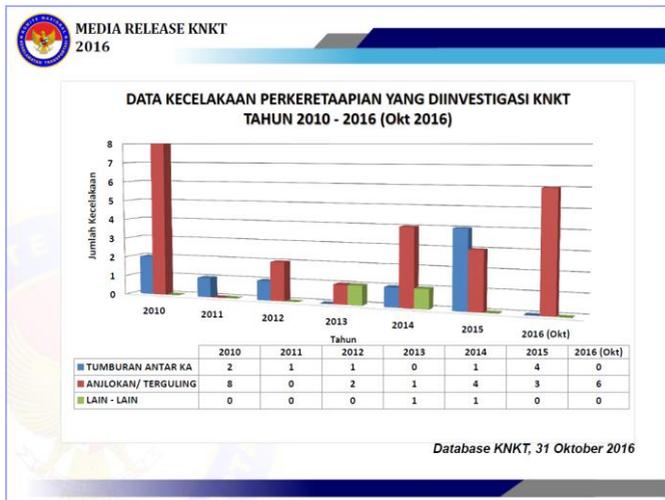
Bab ini akan menjelaskan latar belakang, perumusan masalah, ruang lingkup, tujuan penelitian dan manfaat penelitian.

1.1 LATAR BELAKANG

Pada era modern ini mobilitas manusia sudah sangat tinggi. Hal ini terjadi karena tuntutan lokasi pekerjaan ataupun lokasi sekolah. Sebagai contoh banyak orang yang memiliki pekerjaan di Surabaya tetapi bertempat tinggal di Sidoarjo. Salah satu contoh yang lebih ekstrem dapat ditemukan di negeri sakura yaitu Jepang dimana banyak penduduknya memiliki tempat kerja yang berbeda kota puluhan atau ratusan kilometer jaraknya. Di Indonesia untuk menghadapi kondisi ini banyak orang yang memilih menggunakan kendaraan seperti mobil atau motor, tetapi solusi ini menimbulkan masalah yang baru yaitu kemacetan. Penggunaan sarana transportasi umum seperti bus juga tidak cukup untuk menanggulangi kemacetan karena harus berbagi jalan dengan pengguna kendaraan pribadi, sedangkan luas jalan yang digunakan sudah tidak mampu menanggung banyaknya kendaraan yang digunakan setiap harinya.

Pemerintah Indonesia telah merencanakan angkutan umum komersial dalam kota untuk memperlancar transportasi di Indonesia. Salah satu angkutan yang dipilih untuk digunakan adalah *Light Rail Transit* (LRT). LRT dipilih karena ukuran yang kecil cocok untuk transportasi dalam kota. Selain itu dengan adanya LRT maka angka kemacetan yang terjadi akan berkurang dan menekan penggunaan kendaraan propulsi. Penggunaan LRT juga akan mengurangi jumlah kecelakaan yang terjadi di jalan karena LRT memiliki jalur tersendiri sehingga tidak melewati jalan yang digunakan oleh kendaraan lain. Dengan kelebihan-kelebihan diatas, LRT juga memiliki kemungkinan kecelakaan dengan

kategori yang berbeda, seperti menabrak benda berukuran kecil (batu & burung) dan terjadi anjlokkan. Komponen LRT yang akan digunakan terdiri dari sekitar 70% produk import dari “BOMBARDIER” dan sisanya produksi dalam negeri.



Gambar 1.1 Jumlah kecelakaan perkeretaapian tahun 2010-2016 (Komite Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian, 2016)

Pada Gambar 1.1 dapat dilihat jumlah kecelakaan yang terjadi pada perkeretaapian yang di bagi menjadi 3 kategori kecelakaan yaitu akibat tumbukan, anjlokkan dan lain-lain. Jumlah kecelakaan yang terjadi berfluktuasi setiap tahunnya dan jumlah kecelakaan terbanyak terjadi pada tahun 2010 sebanyak 10 kecelakaan. Kecelakaan kategori anjlokkan memiliki angka yang paling tinggi jumlah kejadiannya setiap tahun. Terjadinya kecelakaan menyebabkan banyak jatuh korban luka-luka bahkan meninggal.

Kecelakaan akibat anjlokkan dapat terjadi akibat kondisi rel kereta yang tidak baik dan kegagalan pada bogie kereta. Kegagalan pada bogie kereta yang sering disebut *fatigue* diakibatkan desain

struktur bogie dan material yang digunakan tidak mampu menopang beban dari gerbong. Oleh karena itu, diperlukan studi numerik struktur statis pada bogie untuk memastikan desain bogie yang digunakan akan aman saat beroperasi dan dapat digunakan untuk acuan pembuatan bogie berikutnya. Pada penelitian ini, bogie yang akan dianalisis adalah bogie dari LRT Palembang.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana posisi dan nilai dari von mises *stress* pada bogie saat diberikan pembebanan penuh?
- b. Bagaimana besar angka keamanan dari bogie saat beroperasi?

1.3 RUANG LINGKUP

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah:

1.3.1 Variabel yang diteliti

- a. Sambungan las pada bogie dianggap sempurna sehingga seluruh bagian bogie merupakan satu kesatuan.
- b. Perangkat lunak CAD yang digunakan untuk simulasi ini adalah Autodesk Inventor professional 2015 dan Designmodeller.
- c. Perangkat lunak FEA yang digunakan pada simulasi ini adalah Ansys Workbench 18.0.

1.3.2 Variabel yang diabaikan

- a. Bagian selain kerangka utama dari bogie.

1.4 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui posisi dan nilai dari *Von mises stress* pada bogie saat diberikan pembebanan penuh.
- b. Mengetahui angka keamanan dari bogie saat beroperasi.

1.5 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat penelitian ini adalah:

- a. Memberikan wawasan baru tentang simulasi ansys khususnya mengenai static structural analysis bogie.
- b. Memastikan desain bogie yang digunakan aman.
- c. Bogie dapat digunakan sebagai salah satu acuan untuk desain produksi LRT.
- d. Memberikan wawasan baru kepada mahasiswa dalam memahami konsep finite element analysis.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PENELITIAN TERDAHULU

Pada penelitian ini digunakan referensi dari penelitian lain yang pernah dilakukan yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Penelitian ini menggunakan referensi penelitian tes statis dan fatik pada bogie. Penelitian referensi menggunakan metode elemen hingga untuk tes statis dan fatik pada bogie dengan beberapa model pembebanan.

Penelitian yang dilakukan oleh DAI Jun pada tahun 2015 mengenai bogie, bertujuan untuk mendapatkan desain dan spesifikasi bogie yang aman dan terhindar dari kegagalan yang dapat menyebabkan kecelakaan. Dengan tujuan yang ada, maka bogie harus diketahui besar *displacement* maksimal saat pembebanan statis. Model yang digunakan memiliki *nodes* sebanyak 553064 dengan jumlah elemen sebanyak 275280.

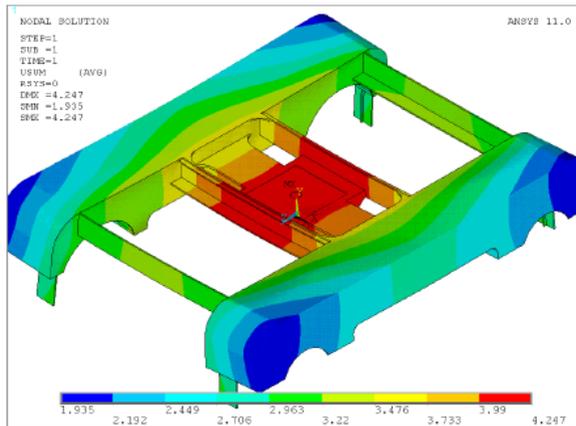
Pembebanan yang diperhitungkan adalah beban vertikal dan horizontal untuk menganalisa struktur secara komprehensif. Beban vertikal yang digunakan adalah sebesar 190.73 KN pada pusat instalasi rangka bogie. Fz yang merupakan beban vertikal yang beroperasi sebesar 95.36KN dan beban transversal sebesar 59.94KN. Dengan mengacu pada standar TB/T2368-2005 analisa dilakukan dengan 6 jenis kondisi pembebanan.

Tabel 2.1 Main operating load's working condition (DAI Jun, 2015)

Working condition	Vertical Load	Transverse Load	Skew Symmetric Load
1	F		

2	$(1+\beta)F$		
3	$(1+\beta)F$	F_y	
4	$(1+\beta)F$	$-F_y$	
5	$(1+\beta)F$	F_y	F_{xie}
6	$(1+\beta)F$	$-F_y$	F_{xie}

Tabel 2.1 merupakan beban kondisi kerja saat beroperasi. Setelah didapatkan hasil dari percobaan, maka dihitung tegangan ijin yang diperbolehkan untuk *ordinary carbon steel* (Q235) memiliki *yield limit* sebesar 235 Mpa. Selanjutnya menurut TB/T1335-1996 seluruh perhitungan di ubah mejadi *equivalent stress*. Beban yang diperbolehkan atau *stress* yang diijinkan harus lebih kecil dibanding *yield limit* dari materialnya. Saat pembebanan diberikan, *stress* yang diijinkan adalah saat rasio *yiled limit* 1.5 dibanding dengan *safety factornya*. Pada perhitungan ini didapatkan tegangan ijin sebesar 142Mpa.



Gambar 2.1 Deformasi pada kondisi pertama (DAI Jun, 2015)

Gambar 2.1 merupakan hasil deformasi pada kondisi percobaan pertama. Percobaan dilakukan sebanyak 6 kondisi. *Maximum equivalent stress* didapatkan hasil yang bervariasi. Setelah dilakukan percobaan sebanyak 6 kondisi maka didapatkan *maximum equivalent stress* sebesar 116.719 Mpa (DAI Jun, 2015).

Tabel 2.2 Hasil Maksimum Equivalent Stress Dengan Kondisi Pembebanan (DAI Jun, 2015)

Calculation conditions	Maximum equivalent stress(MPa)	The maximum equivalent stress location
Condition1	86.101	The joint between the frame's beam and side beam
Condition2	103.321	The joint between the frame's beam and side beam
Condition3	103.476	The joint between the frame's beam and side beam
Condition4	136.719	The joint between the frame's beam and side beam
Condition5	105.666	The joint between the frame's beam and side beam
Condition6	114.356	The joint between the frame's beam and side beam

Tabel 2.2 merupakan hasil maksimum equivalent stress dengan kondisi pembebanan. Penelitian serupa dilakukan oleh Seo dkk, model yang digunakan pada penelitian ini terdapat 51811 elemen dan 47356 node. Pembebanan yang digunakan adalah *exceptional load* dengan 9 jenis pembebanan dan *normal service load* dengan 4 jenis pembebanan. Menggunakan metode statis maka didapatkan tegangan maksimal pada model dengan 9 jenis pembebanan dari *exceptional load* dan 2 dari *normal service load* (Seo dkk, 2017).

Tabel 2.3 Hasil Tegangan Maksimum untuk Tes Statis (Seo dkk, 2017)

Load case	Load conditions	Maximum stress (MPa)	Yielding strength (MPa)	Safety factor	Material	Gauge no.
1	Vertical force	-127	325	2.56	SM490A	02
		113	325	2.87	SM490A	37
2	Transverse force	-114	325	2.85	SM490A	02
		104	325	3.13	SM490A	38
3	Longitudinal force	95	315	3.32	STKM18A	32
		84	325	3.86	SM490A	36
4	Lozenging forces	-87	325	3.74	SM490A	02
5	Twist load	-93	325	3.49	SM490A	42
6	Traction motor Inertia load	-106	325	3.01	SM490A	10
		-93	325	3.49	SM490A	01
8	Emergency braking load	-107	325	3.04	SM490A	02
9	Active steering force	140	315	2.25	STKM18A	32
10*	Vertical + transverse force	123	325	2.64	SM490A	34
11*	Vertical + transverse + twist force	135	325	2.41	SM490A	34

* Combined load at normal service load.

Tabel 2.3 merupakan hasil tegangan maksimum analisis tes statis dengan 11 variasi pembebanan. Penelitian lain dilakukan oleh Margono dkk dengan objek bogie kereta api monorel. Standar yang digunakan adalah UIC-615 dengan 2 jenis beban yaitu vertikal dan transversal. Digunakan 9 kasus pembebanan saat bogie beroperasi. Kasus pembebanan yang digunakan sebesar kombinasi beban yang ditentukan.

Tabel 2.4 Kasus Pembebanan Statis Saat Operasi
(Margono dkk, 2017)

Load Case	Vertical force per solebar		Transverse force exerted on bogie	Load Case	Vertical Force (N)		Transverse Force (N)
	F _{z1}	F _{z2}			Fz1	Fz2	
0	Installation of traction motors		0	1	36145,4355	36145,4355	0
1	F _z	F _z	0	2	32530,892	25301,8049	0
2	(1 + α - β) F _z	(1 - α - β) F _z	0	3	32530,892	25301,8049	20525,21775
3	(1 + α - β) F _z	(1 - α - β) F _z	+F _y	4	46989,0662	39759,9791	0
4	(1 + α + β) F _z	(1 - α + β) F _z	0	5	46989,0662	39759,9791	20525,21775
5	(1 + α + β) F _z	(1 - α + β) F _z	+F _y	6	25301,8049	32530,892	0
6	(1 - α - β) F _z	(1 + α - β) F _z	0	7	25301,8049	32530,892	-20525,2178
7	(1 - α - β) F _z	(1 + α - β) F _z	-F _y	8	39759,9791	46989,0662	0
8	(1 - α + β) F _z	(1 + α + β) F _z	0	9	39759,9791	46989,0662	-20525,2178
9	(1 - α + β) F _z	(1 + α + β) F _z	-F _y				

Tabel 2.4 merupakan kasus pembebanan statis saat kondisi operasi. Pada kasus pembebanan digunakan koefisien *roll* (α) sebesar 0.1 dan koefisien *bounce* (β) sebesar 0.2. Fz merupakan beban vertikal dan Fy merupakan beban transversal. Kasus Pembebanan lalu di simulasikan dan akan didapatkan masing-masing nilai deformasi, von mises *stress* dan angka keamanannya.

Tabel 2.5 Hasil Simulasi Pembebanan Statis Saat Operasi
(Margono dkk, 2017)

Load Case	Deformation (mm)	von Mises Stress (MPa)	Safety Factor
1	0,256	77,438	3,16
2	0,237	63,456	3,86
3	0,283	88,193	2,77
4	0,339	91,047	2,69
5	0,37	93,236	2,62
6	0,236	71,281	3,43
7	0,262	85,738	2,85
8	0,338	102,26	2,39
9	0,364	92,641	2,64

Tabel 2.5 merupakan hasil simulasi pembebanan statis saat operasi. Selanjutnya didapatkan nilai maksimum sebesar 53.234 N dan 48.619 N. Deformasi didapatkan dengan pengujian untuk beban luar biasa sebesar 0.5 pada bagian balance wheel dan tegangan maksimal sebesar 175.97 Mpa pada anti roll bar. Angka keamanan yang didapatkan sebesar 1.39 pada area anti roll bar dan 2,39 untuk beban kerja. Didapatkan tegangan terbesar sebesar 102.26 Mpa pada kasus pembebanan 8 (Margono dkk, 2017).

2.2 BOGIE

Bogie adalah sistem kesatuan roda yang digunakan pada kereta yang terdiri dari 2 bagian yaitu frame dan axle. Fungsi dari bogie adalah sebagai penopang gerbong kereta dan memberika fleksibilitas pada kereta saat melalui rel yang berbelok. Bogie dilengkapi dengan sistem pengereman, pemegasan, spring dan damper. Konstruksi bogie biasanya dibuat dengan menggunakan forged cast iron yang di las menjadi 1 kesatuan.

2.3 STANDAR EN 13749 APLIKASI PERKERETAAPIAN

Standar yang digunakan pada analisis bogie adalah EN 13749. Pada standar yang digunakan, LRT digolongkan pada golongan B-IV. Standar EN 13749 menjabarkan ketentuan untuk analisa pada bogie meliputi *static test* dan *fatigue test*. *Static test* dibedakan menjadi 2 berdasarkan tipe pembebanannya yaitu yang pertama adalah tes beban luar biasa dimana tidak terjadi deformasi permanen atau defleksi yang berlebihan. Tipe yang kedua adalah tes saat beban normal dimana tidak timbul *fatigue crack*. Gaya yang terjadi pada bogie meliputi gaya longitudinal, gaya transversal, gaya transversal akibat angin dan gaya vertikal. Pada bogie tipe B-IV standar ini mengatur beban yang digunakan menggunakan akselerasi yang dialami oleh bogie pada analisa statis. Kasus pembebanan pada bogie golongan B-IV dibedakan menjadi 2 yaitu beban luar biasa dan beban normal.

Pada pengujian statis digunakan tes beban luar biasa. Kasus pembebanan tes beban luar biasa dibedakan menjadi 2 kasus yaitu perpindahan rel dan melalui tikungan. Kedua kasus pembebanan ini memiliki besaran bergantung pada kecepatan angin sebesar 105 km/jam dan juga angka pengereman darurat. Angka pengereman darurat dapat diketahui dalam annex D pada EN 13749.

2.4 STANDAR EN 15663 REFERENSI MASA KENDARAAN

Standar EN 15663 mengatur tentang masa yang digunakan dalam perhitungan bogie. Salah satu masa yang diatur pada standar ini adalah *payload*. Masa *payload* yang digunakan dibedakan menjadi 2 yaitu *normal payload* dan *exceptional payload*. Kedua *payload* ini kemudian dibagi lagi menjadi 2 kondisi yaitu masa desain dan masa operasional. Pada pengujian statis digunakan tes beban luar biasa maka digunakan *exceptional payload*. Pada *exceptional payload* diatur mengenai masa penumpang, koper tangan, jumlah kursi yang terisi, berat per luasan penumpang berdiri dan area catering, beban per luas koper dalam ruang dan beban per luasan dari setiap permukaan area koper. Jumlah orang per luasan dapat disesuaikan dengan kebutuhan atau desain dari kendaraan.

2.5 METODE ELEMEN HINGGA (MEH)

Metode elemen hingga adalah suatu metode yang digunakan untuk memprediksi solusi dari matematis untuk mendapatkan solusi yang mendekati kondisi real. Metode elemen hingga membagi-bagi struktur menjadi elemen-elemen, dan elemen dihubungkan dengan *nodes*. Metode elemen hingga suatu elemen yang digunakan harus memiliki matriks kekakuan tertentu, yaitu $[K]$. Matriks kekakuan dinyatakan dengan : $[K] \times [X] = [F]$. Matriks $[K]$ adalah matriks kekakuan, matriks $[X]$ adalah deformasi, dan matriks $[F]$ adalah gaya. Perhitungan persamaan matriks pada metode elemen hingga menggunakan operasi komputer, komputer digunakan karena perhitungan matriks cukup rumit.

2.5.1 Prosedur MEH

Langkah-langkah yang digunakan dalam analisis struktur menggunakan *software* adalah sebagai berikut :

1. Penyederhanaan desain yang digunakan pada analisa
2. Penentuan jenis material dan properti dari material yang digunakan
3. Pengaplikasian *mesh* pada geometry yang akan dianalisis
4. Pemberian *boundary condition* dan pembebanan
5. Penentuan jenis material pada setiap *part*
6. Penentuan jenis analisis yang digunakan
7. Analisa

2.5.2 Verifikasi

Verifikasi adalah suatu proses yang dilakukan untuk memastikan suatu simulasi dapat menyelesaikan suatu persamaan atau tidak. Proses ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan simulasi sejenis yang pernah dilakukan. Hal yang dibandingkan dengan verifikasi adalah besar dan letak deformasi, lama umur objek, dll. Pada penelitian ini digunakan verifikasi dengan membandingkan hasil penelitian dengan penelitian sebelumnya.

2.5.3 Validasi

Validasi adalah proses yang digunakan untuk memastikan hasil simulasi sesuai dengan kondisi nyata. Salah satu validasi simulasi struktur statis pada bogie adalah dengan membuat desain struktur bogie dan dilakukan uji pembebanan statik, lalu dibandingkan dengan hasil tegangan maksimum *von mises* dari simulasi yang pernah dilakukan. Apabila perbedaan hasil tidak signifikan, maka simulasi yang dilakukan valid untuk memodelkan kasus nyata. Pada penelitian ini tidak memungkinkan untuk dilakukan percobaan

karena keterbatasan fasilitas.

2.6 ANALISIS YANG DIGUNAKAN

2.6.1 Analisis Tegangan Von Mises

Analisis von mises digunakan untuk mengetahui kegagalan suatu material saat tegangan ekuivalen melebihi tegangan *yield* dari material yang digunakan. Tegangan von mises digunakan karena penggunaan tegangan yang ekuivalen sehingga memudahkan penelitian (Deutschman dkk, 1975). Tegangan von mises di rumuskan sebagai berikut:

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

2.6.2 Analisis Angka Keamanan

Analisis angka keamanan digunakan untuk mengetahui perbandingan tegangan aman dan gagal dari suatu model agar diketahui keamanannya. Angka keamanan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$SF = \frac{F_{fail}}{F_{allow}} \quad (2.2)$$

dimana SF adalah angka keamanan, F_{fail} adalah besar gaya tersebut menyebabkan kegagalan dan F_{allow} gaya yang diperbolehkan (Deutschman dkk, 1975).

2.6.3 Analisis Beban yang Digunakan

a. Gaya Longitudinal

$$F_{xc} = m1 \times a_{xc} \quad (2.3)$$

b. Gaya Transversal

$$F_{yc} = m_1(a_{yc} + a_{ycc}) \quad (2.4)$$

c. Gaya Vertikal

$$F_{zc} = m_1(g + a_{zc}) \quad (2.5)$$

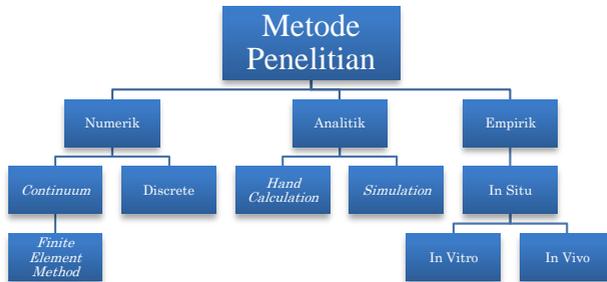
d. Gaya Transversal Oleh Angin

$$F_{w1} = A_w \times q \quad (2.6)$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODE PENELITIAN

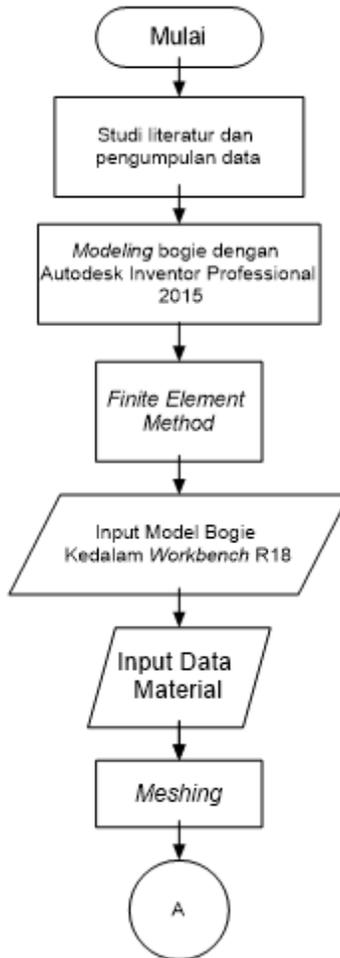
Metode penelitian adalah suatu proses yang digunakan untuk menentukan metode penelitian yang efektif untuk mendapatkan tujuan penelitian yang dilakukan. Terdapat 3 jenis metode yang dapat digunakan dalam penelitian yang dapat dilihat pada gambar 3.1. Dengan adanya 3 metode penelitian tersebut, maka di gunakan Penelitian Numerik *Finite Element Method* (FEM).



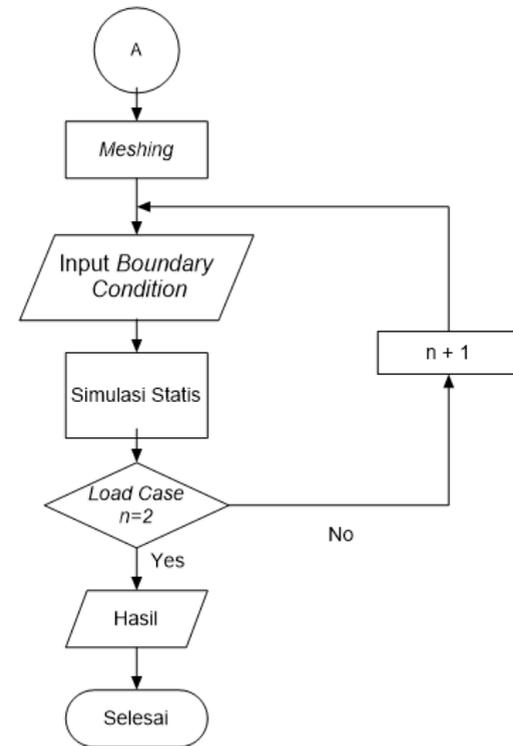
Gambar 3.1 Metode Penelitian

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Berikut merupakan diagram alir penelitian yang digunakan:



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (lanjutan)

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa bogie LRT pada beban eksepsional. Bogie yang dianalisis merupakan desain dari LRT Palembang. Bogie yang dianalisis hanya bagian rangka bogie. Analisa statis dilakukan dengan beberapa langkah seperti pada Gambar 3.2.

3.2 MODEL MATERIAL

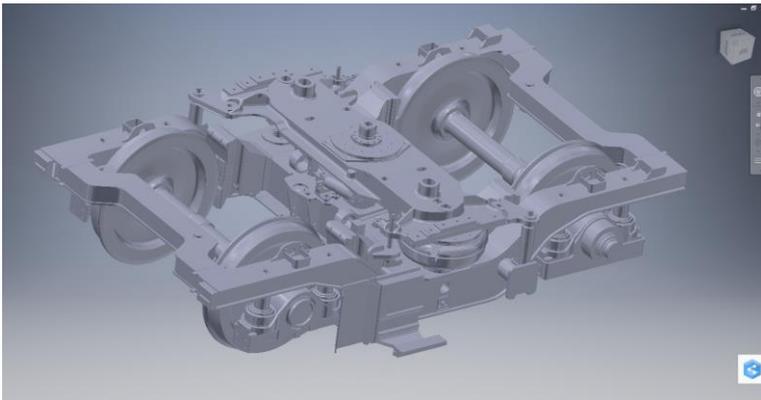
Material yang digunakan pada bogie adalah SM490BW / JIS G3106 low-alloy high-strength steel. Data material yang digunakan disajikan pada Tabel 3.1. Material data ini meliputi Young'

Modulus sebesar 200 GPa, Poisson's Ratio sebesar 0.3, Ultimate Tensile Strength sebesar 490 Mpa. Young's Modulus didapatkan dengan membagi Force x panjang benda dengan luas cross-sectional aktual x besar perubahan panjang objek. Ultimate Tensile Strength didapatkan dengan melakukan pengujian tarik material.

Tabel 3.1 Data Material JIS G3106
(*Japanese Industrial Standart G 3106, 2004*)

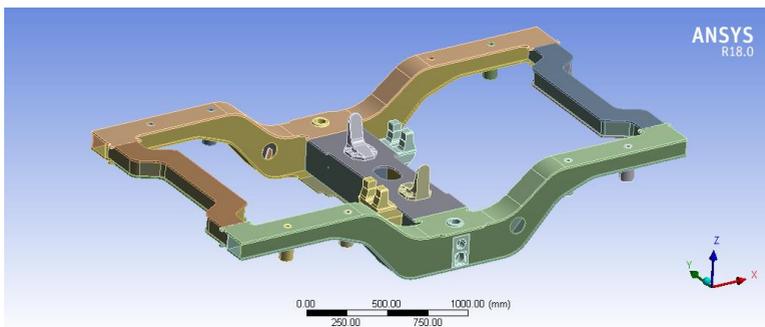
Properties	Constants	Dimension
Young's Modulus	200	Gpa
Poisson's ratio	0,3	
Ultimate Tensile Strength	490	Mpa
Yield Stress	325	N/mm ²

3.3 MODEL SOLID 3D



Gambar 3.3 Model Solid 3D Awal

Gambar 3.3 menampilkan model solid 3 dimensi awal dari bogie. Model dari bogie yang digunakan pada penelitian ini adalah seperti pada Gambar 3.3. Model ini merupakan desain yang didapatkan dari PT. INKA. Model yang digunakan memiliki karakteristik yang cukup berbeda dimana terdapat 8 *first spring* dan memiliki penghubung antara *sideframe* pada kedua ujung. Penyederhanaan dibutuhkan untuk dilakukan analisis statis agar didapatkan hasil yang optimal.



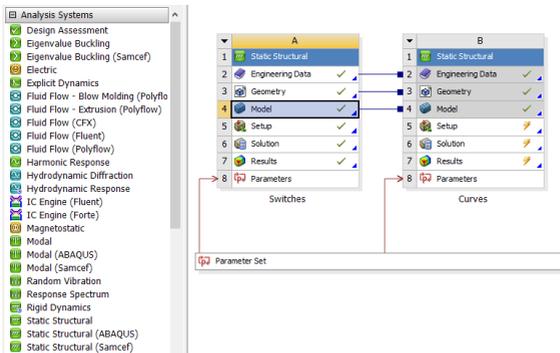
Gambar 3.4 Model Solid 3D Akhir

Model pada Gambar 3.4 merupakan penyederhanaan dari model awal. Bagian *air spring* dan beberapa sambungan dihilangkan dari model. *Axle* dan *bolster* dihilangkan dari model karena bukan merupakan rangka utama dari bogie. Penyederhanaan ini dilakukan dengan dasar penelitian dari Seo dkk.

3.4 MODEL ELEMEN HINGGA

Pemodelan elemen hingga merupakan kegiatan memproyeksikan objek penelitan kedalam gambar 3 dimensi. Bogie adalah objek yang dibuat menggunakan *software* Catia. Objek selanjutnya disederhanakan menggunakan *software* Inventor Professional 2015. Selanjutnya dilakukan analisis dengan menggunakan *software* Ansys R18. Penyederhanaan dilakukan

untuk memudahkan proses analisa yang dilakukan, yaitu analisa struktur statis. Analisa yang dilakukan pada bogie mengacu pada standar EN 13749. Kejadian yang disimulasikan adalah saat bogie beroperasi penuh. Pada pengujian statis digunakan tes beban luar biasa.

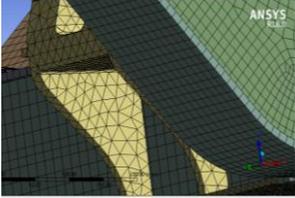
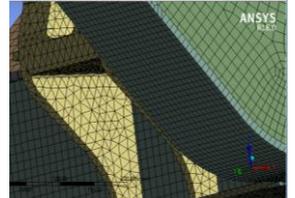


Gambar 3.5 Tampilan *Static Structural*

Gambar 3.5 merupakan tampilan *static structural* dari perangkat lunak ANSYS R18. Model diaplikasikan *mesh* yang sesuai dengan bentuk model yang digunakan. *Mesh* yang digunakan didapatkan dengan tes konvergen. Tes konvergen merupakan proses validasi yang digunakan untuk mendapatkan *mesh* yang sesuai dengan model. Tes konvergen juga digunakan untuk mendapatkan hasil yang mendekati dengan kenyataanya dengan ukuran mesh tertentu.

Tabel 3.2 menunjukkan hasil *mesh* konvergen dari bogie. Mesh yang digunakan pada percobaan ini adalah *adaptive*. Pada *mesh* terdapat variabel-variabel yang dapat diatur seperti *sizing*, *smoothing*, *span angle*. Dilakukan simulasi sebanyak kasus pembebanan yang digunakan. Hasil dari simulasi lalu dicatat dan dipilih *mesh* yang paling signifikan perubahannya.

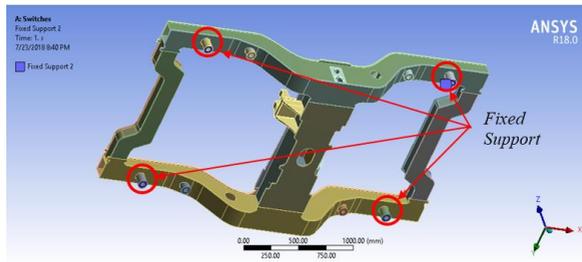
Tabel 3.2 Mesh Konvergen

Mesh	Nodes dan Element	Von-mises Stress
Coarse		
	Nodes : 389236 Elements : 113935	Von-Mises : 190.03 Mpa Mesh Quality : 71.58
Medium		
	Nodes : 511679 Elements : 143394	Von-Mises : 238.91 Mpa Mesh Quality : 75.48
Fine		
	Nodes : 664767 Elements : 171823	Von-Mises : 237.72 Mpa Mesh Quality : 75.25

Setelah didapatkan data hasil dari simulasi dengan perbedaan *mesh* yang digunakan, maka didapatkan tegangan von-mises dari *mesh coarse* sebesar 190.03 Mpa dengan jumlah nodes dan elemen sebanyak 389236 dan 113935. Dari *mesh medium* didapatkan hasil sebesar 238.91 Mpa dengan jumlah nodes dan elemen sebanyak 511679 dan 143394. Dari *mesh fine* didapatkan hasil sebesar 237.72 Mpa dengan jumlah nodes dan elemen sebanyak 664767 dan 171823. Hasil menunjukkan hasil *mesh medium* memiliki tegangan von-mises tertinggi dan tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan *mesh fine*. Maka, pada penelitian ini digunakan *mesh medium*.

3.5 KONDISI BATAS DAN PEMBEBANAN

Kondisi batas yang digunakan pada penelitian ini adalah:



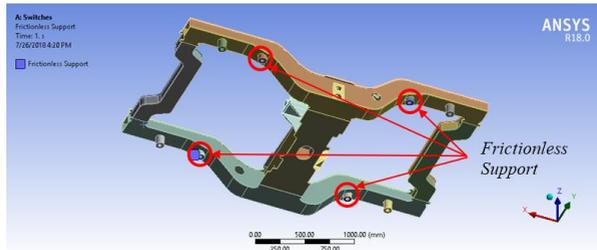
- a. *Fixed Support* pada 4 sisi bogie

Gambar 3.6 *Fixed Support* pada 4 sisi bogie

Tumpuan *fixed support* diberikan pada 4 sisi bogie seperti pada Gambar 3.6. 4 titik tersebut berhubungan langsung dengan *1st spring* dari bogie dan langsung berhubungan dengan axle. Sehingga asumsi *fixed support* diberikan di sisi-sisi tersebut. Penempatan *fixed support* ini sesuai dengan

penelitian Seo dkk.

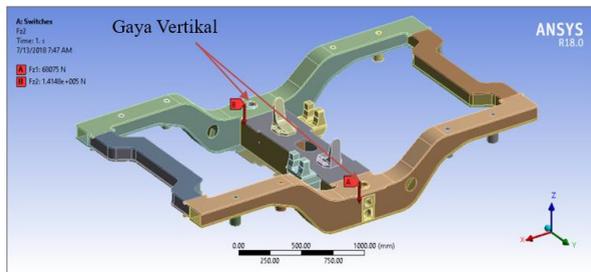
b. *Frictionless Support* pada 4 sisi bogie



Gambar 3.7 *Frictionless Support* pada 4 sisi bogie

Tumpuan *frictionless support* diberikan pada 4 sisi bogie seperti pada Gambar 3.7. 4 titik tersebut berhubungan langsung dengan 1^{st} *spring* dari bogie dan langsung berhubungan dengan axle. Sehingga asumsi *frictionless support* diberikan di sisi-sisi tersebut.

c. Gaya vertikal pada *sideframe*

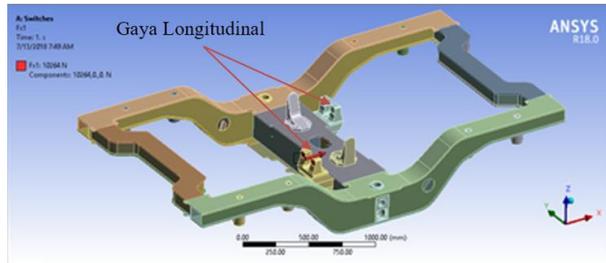


Gambar 3.8 Gaya vertikal pada *sideframe*

Gaya vertikal pada bogie berasal dari beban *carbody* dan *payload*. Gaya tersebut di aplikasikan pada 2 sisi *sideframe* dimana

pada sisi tersebut berhubungan langsung dengan *bolster* bogie yang menjadi penghubung antara bogie dan *carbody*. Posisi pembebanan ini sesuai dengan penelitian dari Seo dkk.

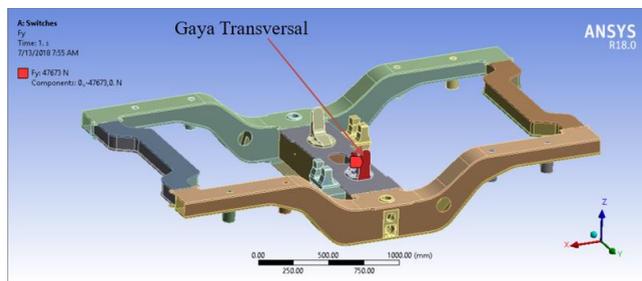
d. Gaya longitudinal



Gambar 3.9 Gaya longitudinal

Gaya longitudinal dapat terjadi akibat percepatan dan perlambatan dari kendaraan. Gaya tersebut di aplikasikan pada 2 sisi seperti pada Gambar 3.9. Hal ini sesuai dengan penelitian dari Seo dkk.

e. Gaya transversal pada *lateral buffer*



Gambar 3.10 Gaya transversal pada *lateral buffer*

Gaya tranfersal dapat terjadi akibat gerakan kereta saat berbelok dan juga akibat angin. Gaya tersebut di aplikasikan pada pusat bogie seperti pada Gambar 3.10. Hal ini sesuai dengan penelitian dari Seo dkk.

3.6 ANALISIS YANG DIGUNAKAN

3.6.1 Analisis Pembebanan Massa

Pada penelitian ini digunakan desain penumpang sebanyak 8 orang tiap m^2 atau sebanyak 225 orang dalam gerbong trailer. Menurut Wapole dkk berat rata-rata orang asia sebesar 57.7 kg. Berdasarkan data beban yang dimiliki didapatkan *payload* sebesar 12982.5 kg. Masa *carbody* tanpa bogie dari LRT yang digunakan sebesar 18600 kg.

$$\begin{aligned} m_1 &= M_t + P_1 \\ m_1 &= 18600 \text{ kg} + 12982.5 \text{ kg} \\ m_1 &= 31582.5 \text{ kg} \end{aligned}$$

dimana,

m_1 = masa aktif *car body*

M_t = masa *car body trailer* tanpa bogie

P_1 = *payload*

3.6.2 Analisis beban *car body*

Pada analisis ini dibedakan menjadi 2 kasus beban yang digunakan yaitu *switches* dan *running through curves*. Pada kasus pembebanan *switches* dan *running through curves* digunakan percepatan yang didapatkan dari ketentuan standar. Percepatan yang digunakan terangkum pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Percepatan Berdasarkan Load Case (EN 13749)

Load case	Vehicle body masses				
	a_{zc} (m/s ²)	a_{yc} (m/s ²)	a_{ycc} (m/s ²)	a_{xc} (m/s ²)	q (N/m ²)
Switches	3,2	2,2	—	Emergency braking rate	600 ^a
Running through Curves	1,6	1,3	2,0	Emergency braking rate	600 ^a

Untuk percepatan longitudinal digunakan *emergency braking rate* yang sebesar 1.3 untuk pembebanan luar biasa. Dari percepatan didapatkan gaya yang diakibatkan oleh *car body*. Gaya yang diakibatkan oleh *car body* diklasifikasikan menjadi 4 jenis gaya yaitu:

3.6.2.1 Kasus Switches

a) Gaya longitudinal

Pada subbab 3.6.1 didapatkan masa aktif *car body* sebesar 31582.5 kg . Pada Tabel 3.3 didapatkan percepatan longitudinal sebesar 1.3. Menurut Persamaan 2.3 didapatkan gaya longitudinal yang bekerja pada bogie akibat dari *car body* sebesar 41057.25 N. Gaya longitudinal ini bekerja pada *center of gravity* dari *car body*. Kemudian gaya tersebut didistribusikan ke tiap bogie. Gaya longitudinal yang didapatkan merupakan representasi dari gaya akibat percepatan dan perlambatan dari LRT.

b) Gaya transversal

Pada subbab 3.6.1 didapatkan masa aktif *car body*

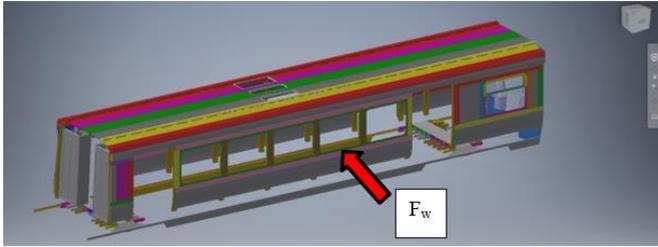
sebesar 31582.5 kg . Pada Tabel 3.3 didapatkan percepatan transversal sebesar 2.2. Menurut Persamaan 2.4 didapatkan gaya transversal yang bekerja pada bogie akibat dari *car body* sebesar 69481.5 N. Gaya transversal ini bekerja pada *center of gravity* dari *car body*. Kemudian gaya tersebut didistribusikan ke tiap bogie. Gaya transversal yang didapatkan merupakan representasi dari gaya akibat gerakan membelok dan akibat dari posisi *coupler* saat perlambatan dari LRT.

c) Gaya vertikal

Pada subbab 3.6.1 didapatkan masa aktif *car body* sebesar 31582.5 kg . Pada Tabel 3.3 didapatkan percepatan vertikal sebesar 3.2. Menurut Persamaan 2.5 didapatkan gaya vertikal yang bekerja pada bogie akibat dari *car body* sebesar 410888.3 N. Gaya vertikal ini bekerja pada *center of gravity* dari *car body*. Kemudian gaya tersebut didistribusikan ke tiap bogie. Gaya vertikal yang didapatkan merupakan representasi dari gaya akibat masa gerbong dan *payload* dari LRT.

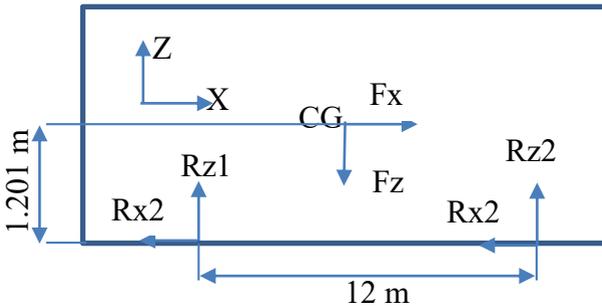
d) Gaya transversal oleh angin

Pada model yang digunakan memiliki dimensi panjang kereta sepanjang 17.946 m dan memiliki tinggi *car body* setinggi 2.402 m. Dari panjang dan tinggi *car body* didapatkan luas sisi samping dari *car body* sebesar 43.10629 m². Gaya akibat angin ini bekerja pada pusat permukaan sisi samping *car body*. Menurut Persamaan 2.6 didapatkan gaya transversal akibat angin sebesar 25864.78 N.



Gambar 3.11 Gaya Akibat Angin Pada Sisi *Car Body*

e) Distribusi gaya sumbu xz



Gambar 3.12 *Free body diagram* pada *car body* sumbu xz

Gambar 3.12 menunjukkan *Free body diagram* pada *car body* pada sumbu xz. Gambar digunakan untuk memudahkan perhitungan mencari gaya reaksi sumbu x dan sumbu z. F_x merupakan gaya longitudinal, F_z merupakan gaya vertikal, R_{z1} merupakan gaya reaksi arah vertikal pada bogie 1, R_{z2} merupakan gaya reaksi arah vertikal pada bogie 2, R_{x1} merupakan gaya reaksi arah longitudinal pada bogie 1 dan R_{x2} merupakan gaya reaksi arah longitudinal pada bogie 2.

$$(+\rightarrow) \sum F_x = 0$$

$$R_{x1} + R_{x2} - F_a = 0$$

Asumsi:

$$R_{x1} = R_{x2} = R_x$$

Sehingga,

$$2 R_x - 41057.25 \text{ N} = 0$$

$$R_x = 20528.625 \text{ N}$$

$$(+\uparrow) \sum F_z = 0$$

$$R_{z1} + R_{z2} - F_z = 0 \quad (1)$$

$$\sum M_{CG} = 0$$

$$R_{z1} (6) - R_{z2} (6) + R_{x1} (1.201) + R_{x2} (1.201) = 0 \quad (2)$$

Substitusi (2) dan (1)

$$(F_z - R_{z2}) (6) - R_{z2} (6) + 2R_x (1.201) = 0$$

$$6 F_z - 2R_x (1.201) = 12 R_{z2}$$

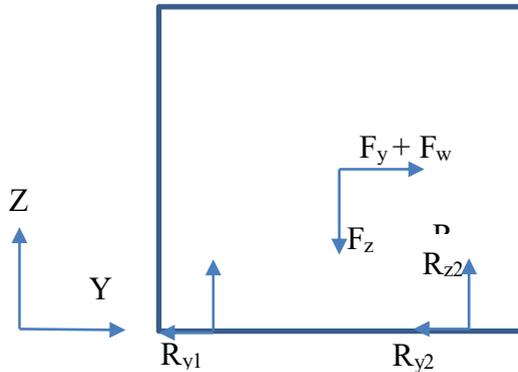
$$R_{z2} = 209553.2964 \text{ N}$$

Substitusi R_{z2} ke persamaan (1)

$$R_{z1} + 209553.2964 - 410888.3 = 0$$

$$R_{z1} = 201335.0036 \text{ N}$$

f) Distribusi gaya sumbu yz



Gambar 3.13 *Free body diagram* pada *car body* sumbu yz

Gambar 3.13 menunjukkan *Free body diagram* pada *car body* pada sumbu yz. Gambar digunakan untuk memudahkan perhitungan mencari gaya reaksi sumbu y dan sumbu z. F_y merupakan gaya transversal, F_w merupakan gaya transversal akibat angin, F_z merupakan gaya vertikal, R_{z1} merupakan gaya reaksi arah vertikal pada bogie 1, R_{z2} merupakan gaya reaksi arah vertikal pada bogie 2, R_{y1} merupakan gaya reaksi arah transversal pada bogie 1 dan R_{y2} merupakan gaya reaksi arah transversal pada bogie 2.

$$\sum M_{CG} = 0$$

$$R_{z1} (0.78) - R_{z2} (0.78) + R_{y1} (1.201) + R_{y2} (1.201) = 0 \quad (1)$$

$$(+\uparrow) \sum F_z = 0$$

$$R_{z1} + R_{z2} - F_z = 0$$

$$R_{z1} + R_{z2} - 410888.3 = 0$$

$$R_{z1} = 410888.3 - R_{z2} \quad (2)$$

$$(+\rightarrow) \sum F_y = 0$$

$$F_y - R_{y1} - R_{y2} = 0$$

Asumsi:

$$R_{y1} = R_{y2} = R_y$$

Sehingga,

$$2 R_y - 95345.28 \text{ N} = 0$$

$$R_y = 47672.64 \text{ N}$$

Substitusi R_y dan (1)

$$R_{z1} (0.78) - R_{z2} (0.78) + 2R_y = 0$$

Substitusi dengan (2)

$$(410888.3 - R_{z2}) (0.78) - R_{z2} (0.78) + 2R_y = 0$$

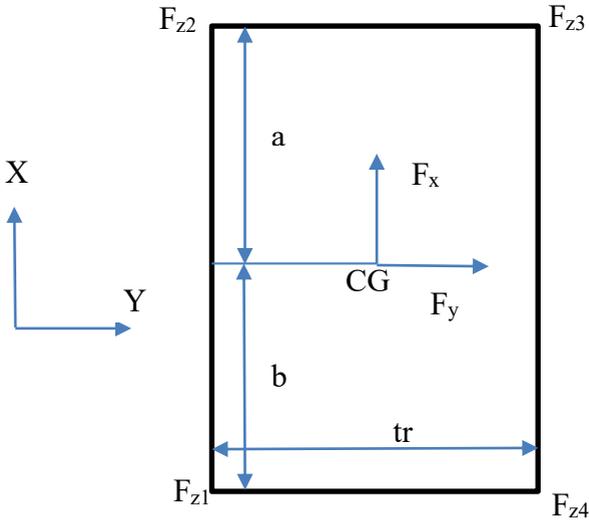
$$R_{z2} = 278847.7918 \text{ N}$$

Substitusi R_{z2} dan (2)

$$R_{z1} = 132040.5082 \text{ N}$$

g) Distribusi gaya F_z

Gambar 3.14 merupakan gambar distribusi gaya F_z pada tiap tumpuan sumbu xy. Dengan menerapkan rumus



statika didapatkan gaya normal pada masing-masing tumpuan bogie dirumuskan sebagai berikut:

Gambar 3.14 Gambar distribusi gaya F_z pada tiap tumpuan sumbu xy

$$F_{z1} = \frac{a}{2(a+b)} (F_z) - \frac{a}{(a+b)} \left[\frac{F_y \cdot h + F_w \cdot h}{tr} \right] - \frac{-F_x \cdot h}{2(a+b)}$$

$$F_{z2} = \frac{b}{2(a+b)} (F_z) - \frac{b}{(a+b)} \left[\frac{F_y \cdot h + F_w \cdot h}{tr} \right] + \frac{-F_x \cdot h}{2(a+b)}$$

$$F_{z3} = \frac{b}{2(a+b)} (F_z) + \frac{b}{(a+b)} \left[\frac{F_y \cdot h + F_w \cdot h}{tr} \right] + \frac{-F_x \cdot h}{2(a+b)}$$

$$F_{z4} = \frac{a}{2(a+b)}(F_z) + \frac{a}{(a+b)} \left[\frac{F_y \cdot h + F_w \cdot h}{tr} \right] - \frac{-F_x \cdot h}{2(a+b)}$$

rumus diatas digunakan untuk menentukan besar gaya F_z pada tiap *sideframe* bogie dimana F_y merupakan gaya transversal, F_w merupakan gaya transversal akibat angin, F_z merupakan gaya vertikal, a merupakan jarak dari *center of gravity* ke tumpuan depan, b merupakan jarak dari *center of gravity* ke tumpuan belakang, h merupakan ketinggian dari *center of gravity* ke tumpuan, tr merupakan lebar antar *sideframe*. Rumus ini diadaptasi dari Sutantra. Dari rumus diatas diketahui besar gaya F_z tiap-tiap tumpuan seperti pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Distribusi gaya F_z kasus *switches*

F_{z1}	F_{z2}	F_{z3}	F_{z4}
68074.83	63965.68	137369.3	141478.5
N	N	N	N

3.6.2.2 Kasus *Running Through Curves*

a) Gaya longitudinal

Pada subbab 3.6.1 didapatkan masa aktif *car body* sebesar 31582.5 kg . Pada Tabel 3.3 didapatkan percepatan longitudinal sebesar 1.3. Menurut Persamaan 2.3 didapatkan gaya longitudinal yang bekerja pada bogie akibat dari *car body* sebesar 41057.25 N. Gaya longitudinal ini bekerja pada *center of gravity* dari *car body*. Kemudian gaya tersebut didistribusikan ke tiap bogie. Gaya longitudinal yang didapatkan merupakan representasi dari gaya akibat percepatan dan perlambatan dari LRT.

b) Gaya transversal

Pada subbab 3.6.1 didapatkan masa aktif *car body* sebesar 31582.5 kg . Pada Tabel 3.3 didapatkan percepatan transversal dan centrifugal sebesar 1.3 dan 2. Menurut Persamaan 2.4 didapatkan Gaya transversal yang bekerja pada bogie akibat dari *car body* sebesar 104222.3 N. Gaya transversal ini bekerja pada *center of gravity* dari *car body*. Kemudian gaya tersebut didistribusikan ke tiap bogie. Gaya transversal yang didapatkan merupakan representasi dari gaya akibat gerakan membelok dan akibat dari posisi *coupler* saat perlambatan dari LRT.

c) Gaya vertikal

Pada subbab 3.6.1 didapatkan masa aktif *car body* sebesar 31582.5 kg . Pada Tabel 3.3 didapatkan percepatan vertikal sebesar 1.6. Menurut Persamaan 2.5 didapatkan Gaya vertikal yang bekerja pada bogie akibat dari *car body* sebesar 360356.3 N. Gaya vertikal ini bekerja pada *center of gravity* dari *car body*. Kemudian gaya tersebut didistribusikan ke tiap bogie. Gaya vertikal yang didapatkan merupakan representasi dari gaya akibat masa gerbong dan *payload* dari LRT.

d) Gaya transversal oleh angin

Gaya transversal oleh angin pada kasus *running through curves* memiliki nilai dan arah yang sama dengan gaya transversal oleh angin dari kasus *switches*. Menurut Tabel 3.3 tekanan angin yang digunakan pada kedua pembebanan memiliki besar yang sama. Dimensi dari gerbong kereta yang dianalisis pada kedua pembebanan memiliki dimensi yang sama. Menggunakan perhitungan statika maka didapatkan gaya transversal oleh angin sebesar dan searah kasus pembebanan *switches*.

e) Distribusi gaya

Distribusi gaya yang digunakan pada kasus pembebanan ini memiliki langkah dan proses yang sama dengan perhitungan sebelumnya. Perbedaan pada kedua pembebanan terletak pada percepatan yang digunakan seperti tercantum pada Tabel 3.3. Hasil dari distribusi gaya kasus *running through curves* terangkum pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Distribusi gaya kasus *running through curves*

Sumbu ZX			Sumbu ZY		
R_x (N)	R_{z1} (N)	R_{z2} (N)	R_y (N)	R_{z1} (N)	R_{z2} (N)
20528.625	176069.0036	184287.2964	65043.04	80028.5461	280327.7539

f) Distribusi gaya F_z

Distribusi gaya yang digunakan pada kasus pembebanan ini memiliki langkah dan proses yang sama dengan perhitungan sebelumnya. Perbedaan pada kedua pembebanan terletak pada besar gaya yang digunakan. Hasil dari distribusi gaya kasus *running through curves* terangkum pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Distribusi gaya F_z kasus *running through curves*

F_{z1} (N)	F_{z2} (N)	F_{z3} (N)	F_{z4} (N)
42068.85	37959.7	138109.3	142218.5

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

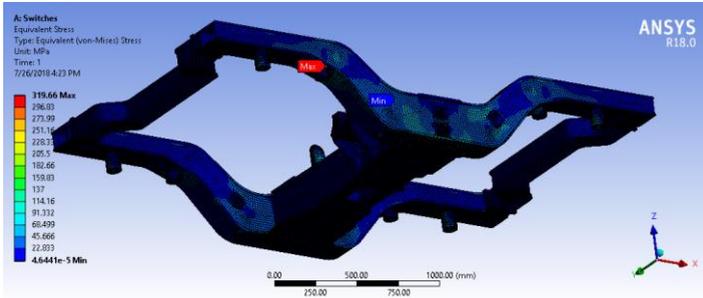
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 HASIL SIMULASI STATIS

Simulasi statis digunakan untuk mengetahui kekuatan suatu model pada kondisi tertentu. Pada penelitian ini analisis tegangan von-mises perlu diketahui untuk mengetahui tegangan terbesar dan lokasi dari model yang di analisa. Selain tegangan von-mises, angka keamanan juga dibutuhkan untuk mengetahui perbandingan antara tegangan aktual dan tegangan maksimal yang diijinkan.

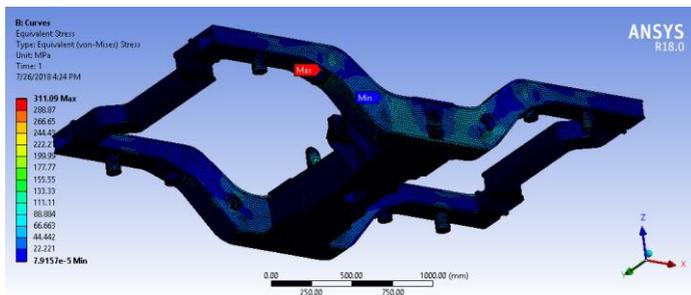
4.1.1 Tegangan Ekuivalen Von-Mises

Tegangan ekuivalen von-mises digunakan untuk mengetahui model yang digunakan aman atau tidak saat diberi beban tertentu. Tegangan ekuivalen yang diketahui kemudian di bandingkan dengan *yield strength* dan juga *ultimate tensile strength* dari material yang digunakan. Ketika tegangan ekuivalen yang didapatkan lebih besar dibanding dengan *yield strength* maka model yang digunakan akan mengalami deformasi plastis. Ketika tegangan ekuivalen yang didapatkan lebih besar dibanding dengan *ultimate tensile strength* maka model yang digunakan akan mengalami kegagalan. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah JIS G3106 / SM490BW. *Yield strength* dari material JIS G3106 sebesar 325 Mpa. *Ultimate tensile strength* dari material JIS G3106 sebesar 490 Mpa.



Gambar 4.1 Tegangan Von-Mises *Switches*

Pada Gambar 4.1 didapatkan hasil simulasi dari kasus pembebanan *switches*. Tegangan maksimal pada kasus pembebanan ini sebesar 319.66 MPa. Tegangan maksimum terjadi pada bagian *sideframe* disekitar area *first spring*. Hal ini terjadi karena *first spring* terhubung dengan permukaan *sideframe* yang miring dan membentuk lekukan yang relatif kecil. Menurut Deutschman dkk, konsentrasi tegangan yang tinggi terjadi pada lekukan yang relatif kecil pada suatu geometri. Hal ini sesuai dengan posisi tegangan ekuivalen maksimal pada bogie.



Gambar 4.2 Tegangan Von-Mises *Curves*

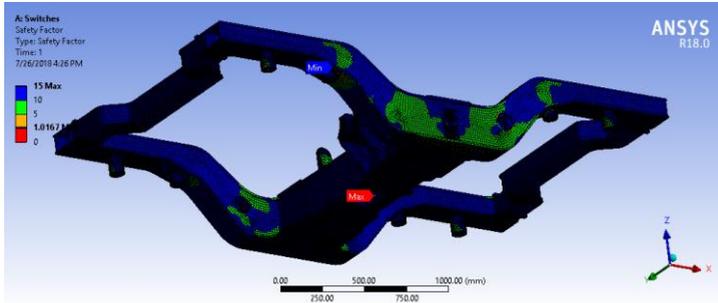
Pada Gambar 4.2 didapatkan hasil simulasi dari kasus pembebanan *curves*. Tegangan maksimal pada kasus

pembebanan ini sebesar 311.09 MPa. Tegangan maksimum terjadi pada bagian *sideframe* disekitar area *first spring*. Hal ini terjadi karena *first spring* terhubung dengan permukaan *sideframe* yang miring dan membentuk lekukan yang relatif kecil. Menurut Deutschman dkk, konsentrasi tegangan yang tinggi terjadi pada lekukan yang relatif kecil pada suatu geometri. Hal ini sesuai dengan posisi tegangan ekuivalen maksimal pada bogie.

Tegangan maksimal yang didapatkan dari hasil simulasi statis sebesar 319.66 MPa dan 311.09 MPa. Dari data material JIS G3106 didapatkan *yield strength* sebesar 325 MPa dan *ultimate tensile strength* sebesar 490 MPa. Membandingkan hasil dengan data material yang digunakan maka bogie dapat dianggap aman ketika beroperasi. Bogie dianggap aman karena memiliki tegangan maksimal yang lebih kecil dibanding dengan nilai *yield strength* dari material sehingga bogie yang dianalisis tidak mengalami deformasi plastis maupun kegagalan.

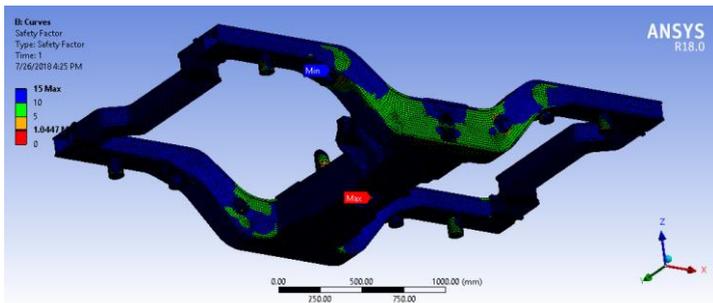
4.1.2 Faktor Keamanan

Faktor Keamanan adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi suatu struktur dapat dikatakan aman atau gagal. Untuk mendapatkan faktor keamanan dari struktur, dapat digunakan *yield strength* atau *ultimate tensile strength*. Faktor keamanan didapatkan dengan membandingkan tegangan maksimum dengan tegangan yang diijinkan.



Gambar 4.3 Faktor Keamanan Kasus *Switches*

Gambar 4.3 menunjukkan besar faktor keamanan dari kasus *switches*. Besar faktor keamanan pada kasus ini sebesar 1.0167. Faktor keamanan terjadi pada bagian *sideframe* disekitar area *first spring*. Hal ini terjadi karena *first spring* terhubung dengan permukaan *sideframe* yang miring dan membentuk lekukan yang relatif kecil. Menurut Deutschman dkk, konsentrasi tegangan yang tinggi terjadi pada lekukan yang relatif kecil pada suatu geometri. Hal ini sesuai dengan posisi tegangan ekuivalen maksimal pada bogie.



Gambar 4.4 Faktor Keamanan Kasus *Curves*

Gambar 4.4 menunjukkan besar faktor keamanan dari kasus *curves*. Besar faktor keamanan pada kasus ini sebesar 1.0447. Faktor keamanan terjadi pada bagian *sideframe*

disekitar area *first spring*. Hal ini terjadi karena *first spring* terhubung dengan permukaan *sideframe* yang miring dan membentuk lekukan yang relatif kecil. Menurut Deutschman dkk, konsentrasi tegangan yang tinggi terjadi pada lekukan yang relatif kecil pada suatu geometri. Hal ini sesuai dengan posisi tegangan ekuivalen maksimal pada bogie.

Faktor keamanan yang didapatkan dari hasil simulasi statis sebesar 1.0167 dan 1.0447. Dari data material JIS G3106 didapatkan *yield strength* sebesar 325 MPa dan *ultimate tensile strength* sebesar 490 MPa. Faktor keamanan yang didapatkan melalui perhitungan dan simulasi didapatkan hasil yang sama. Nilai faktor keamanan yang didapatkan berada di kategori aman karena memiliki besar lebih dari 1. Hal ini sesuai dengan teori yang digunakan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan dari tugas akhir ini adalah:

1. Nilai tegangan ekuivalen von-mises maksimal didapatkan pada kasus pembebanan *switches* sebesar 319.66 MPa terletak pada *sideframe* disekitar *first spring*. Nilai tegangan ekuivalen von-mises maksimal pada kasus pembebanan *running through curves* sebesar 311.09 MPa terletak pada *sideframe* disekitar *first spring*. Kasus pembebanan *switches* memiliki tegangan ekuivalen von-mises terbesar. Bogie dapat dinyatakan aman karena nilai tegangan ekuivalen berada dibawah nilai *yield strength*.
2. Faktor keamanan terkecil didapatkan pada kasus pembebanan *switches* sebesar 1.0167 terletak pada *sideframe* disekitar *first spring*. Faktor keamanan terkecil pada kasus pembebanan *running through curves* sebesar 1.0447 terletak pada *sideframe* disekitar *first spring*. Kasus pembebanan *switches* memiliki faktor keamanan terkecil. Bogie dapat dinyatakan aman karena nilai faktor keamanan bernilai lebih dari 1.

5.2 SARAN

Adapun saran pada penelitian ini untuk para pembaca guna penembangan pada penelitian selanjutnya:

1. Untuk pengujian berikutnya dapat digunakan analisa modal, redesain dan optimasi pada bogie terutama pada bagian *sideframe* yang mengalami tegangan von-mises yang tinggi.
2. Untuk pengujian berikutnya diharapkan menggunakan *mesh* yang jauh lebih detail.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Daftar Pustaka

- DAI, Jun. 2015. “The Design of Bullet Train Process Bogie and the Finite Element Analysis of Frame Strength”, International Conference on Material Science and Application (ICMSA 2015).
- Deutschman, A. D., W. j. Michels., dan c. E. Wilson. 1975. **Machine Design Theory and Practice**. New York: Macmillan Publishing Co., Inc.
- European Committee for Standarization. 2011. “EN-13749 Railway Applications – Wheelsets and Bogies – Method of Specifying The Structural Requirements og Bogie Frame”. UK: CEN.
- Gorash, Yevgen *et al.* 2017. “Investigation of Fatigue Assessments Accuracy for Beam Weldments Considering Material Data Input and FE-Mode Type”. **J. Phys: Conf. Ser.** 843 012025.
- Jong, Ing-Chang dan William Springer. 2009. “Teaching Von Mises Stress: From Principal Axes To Non-Principal Axes”. American Society for Engineering Education.
- Ketua Sub Komite Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian, 2016. **Data Investigasi Kecelakaan Perkeretaapian Tahun 2010-2016**,
<http://knkt.dephub.go.id/knkt/ntsc_home/Media_Release/Media%20Release%20KNKT%202016/Media%20Releas e%202016%20-%20IK%20KA%2020161130.pdf>.
- Seo, Jung-Won *et al.* 2017. “Fatigue Design Evaluation of Railway Bogie with Full-Scale Fatigue Test”. Hindawi.
- Sutantra, I Nyoman dan Bambang Sampurno. 2010. **Teknologi Otomotif Edisi Kedua**. Surabaya: Penerbit Guna Widya.
- Wapole, Sarah Catherine *et al.* 2012. “The Weight of Nations: an Estimation of Adult Human Biomass”. UK : BMC Public Health.

LAMPIRAN

1. EN 13749

Annex A (Simbol dan satuan yang digunakan pada annex)

A.1 Gaya-gaya

Tabel A.1 – Gaya-gaya

Gaya (N)	Posisi	Simbol		
		Statis	Kuasi-statis	Dinamis
Vertikal	Beban pada bogie	F_z		
	Gaya pada <i>sideframe</i> 1 atau <i>sidebearer</i> 1	F_{z1}	F_{z1qs}	F_{z1d}
	Gaya pada <i>sideframe</i> 2 atau <i>sidebearer</i> 2	F_{z2}	F_{z2qs}	F_{z2d}
	Gaya pada <i>center pivot</i>	F_{zp}	F_{zpqqs}	F_{zpd}
	Gaya pada (gerbong) titik berat	F_{zc}		
Transversal	Beban pada bogie	F_y		

	Gaya pada axle 1	F_{y1}	F_{y1qs}	F_{y1d}
	Gaya pada axle 2	F_{y2}	F_{y2qs}	F_{y2d}
	Gaya pada (gerbong) titik berat	F_{yc}		
	Gaya akibat angin	F_{w1}		
Longitudinal	Gaya pada setiap roda	F_{x1}		
	Gaya pada (gerbong) titik berat	F_{xc}		
	Gaya pada (bogie) titik berat	F_x		

A.2 Akselerasi

Tabel A.2 – Akselerasi

Akselerasi (m/s^2)	Simbol	
	Gerbong	Bogie (pegas utama)
Vertikal	α_{zc}	α_{zb}
Transversal (dinamis)	α_{yc}	α_{yb}

Sentrifugal (kuasi-statis)	α_{ycc}	α_{ycb}
Longitudinal	α_{xc}	α_{xc}

A.3 Masa-masa

Tabel A.3 – Masa-masa

Masa (kg)	Simbol
Kendaraan saat berjalan	M_V
Gerbong kendaraan	m_1
Masa bogie tanpa pegas sekunder (jika ada)	m^+
Masa pegas utama bogie	m_2
Payload luar biasa	P_1
Payload normal	P_2

Besaran yang digunakan pada simbol diatas didasari oleh diskripsi kuantitas dalam EN 15663

A.4 Simbol-simbol dan satuan-satuan lain

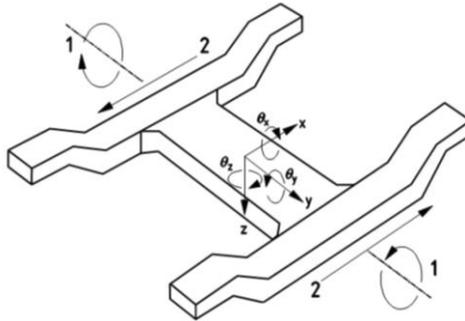
Tabel A.4 - Simbol-simbol dan satuan-satuan lain

Lain	Simbol	Satuan
------	--------	--------

Percepatan akibat gravitasi	g	$9,80665 \text{ m/s}^2$
Tekanan udara	q	N/m^2
Tegangan	σ	N/mm^2
Tegangan tertentu	σ_c	N/mm^2
Tegangan yield material	R_{eH}	N/mm^2
Tegangan <i>yield</i> 0,2% material	$R_{p0,2}$	N/mm^2
<i>Ultimate stress</i> material	R_m	N/mm^2
Faktor keamanan	S_1	
Luas permukaan gerbong	A_w	m^2
Koefisien <i>roll</i>	α	
Koefisien <i>bounce</i>	β	
Koefisien gesek	μ	

A.5 Sistem koordinat

Gambar A.1 menunjukkan sistem koordinat yang diadopsi dari standar eropa



Gambar A.1 – Sistem koordinat

Kunci

1. Puntir
2. Geser

Tabel A.5 mendefinisikan pergerakan dan deformasi dan arahnya

Tabel A.5 – Pergerakan dan deformasi pada rangkaian bogie perkeretaapian

Arah	Simbol	Penjelasan
Longitudinal	x	Linier pada arah tempuh
Transversal	y	Pararel linier pada bidang jalur, tegak lurus pada arah tempuh
Vertikal	z	Linier tegak lurus pada bidang tempuh
<i>Roll</i>	θ_x	Rotasi pada sumbu longitudinal
<i>Pitch</i>	θ_y	Rotasi pada sumbu transversal

<i>Yaw</i>	θ_z	Rotasi pada sumbu vertikal
Puntir	-	Gerakan diluar sumbu (x-y) menghasilkan rotasi relatif dari <i>sideframe</i>
Geser	-	Tegangan geser akibat gerakan longitudinal dari <i>sideframe</i>

A.6 Klasifikasi bogie

Standar eropa ini melingkupi variasi tipe bogie yang luas. Untuk tujuan referensi, mudah untuk mengkategorikan dalam annex-annex. Meskipun identifikasi biasanya berdasarkan jenis kendaraan, pemilihan kategori dari bogie sebaiknya juga berdasarkan kebutuhan struktural dari rangka bogie.

Kebutuhan struktural dari bogie pada kategori tertentu tidak khusus dan sebaiknya selalu didefinisikan menurut kebutuhan saat beroperasi. Akan ada perbedaan dalam memilih antara aplikasi-aplikasi. Hal ini yang diharapkan dan tidak dianggap bertentangan dengan standar eropa. Beberapa dari bogie tidak sesuai pada beberapa kategori yang ditetapkan.

Kategori B-I bogie bakal pelanting memuat penumpang untuk jalur utama dan dalam kota termasuk kecepatan tinggi dan kendaraan sangat cepat, bertenaga mesin dan listrik;

Kategori B-II bogie kendaraan memuat penumpang untuk dalam dan luar pinggiran kota, bertenaga mesin dan listrik;

Kategori B-III bogie untuk bakal pelanting metro dan transit, bertenaga mesin dan listrik;

Kategori B-IV bogie untuk kereta ringan dan trem;

Kategori B-V bogie untuk bakal pelanting kargo dengan suspesi satu tahap;

Kategori B-VI bogie untuk bakal pelanting kargo dengan suspesi dua tahap;

Kategori B-VII bogie untuk lokomotif.

Note Klasifikasi-klasifikasi serupa (tetapi tidak selalu) dengan badan kendaraan di EN 12663 [1, 2].

Annex C (Beban yang disebabkan oleh bogie saat beroperasi)

C.5 Contoh beban untuk bogie kereta *metro, rapid transit, light rail vehicle* dan trem – kategori B-III dan B-IV.

C.5.1 Aplikasi

Kasus pembebanan diaplikasikan pada banyak, berartikulasi dan satu gerbong dengan bogie. Untuk kendaraan dengan bentuk lain yang memiliki prinsip yang sama dapat digunakan untuk menentukan alternatif pembebanan lain yang sesuai.

C.5.1 Kasus Pembebanan

Kasus pembebanan dasar dibawah ini diturunkan dari [14]. Kasus ini menyatakan beban tiap bogie sesuai dengan masing-masing beban axle pada bogie. Kombinasi beban dinyatakan pada Annex F

Untuk beban gerbong m_1 beban luar biasa, termasuk penumpang, pada bogie tertentu adalah:

$$m_1 = \frac{(M_V + P_1)c}{100} - m^+ \tag{C.23}$$

Untuk beban gerbong m_1 beban normal, termasuk penumpang, pada bogie tertentu adalah:

$$m_1 = \frac{(M_V + P_2)c}{100} - m^+ \quad (C.24)$$

Dimana

M_V adalah masa gerbong saat beroperasi

P_1, P_2 adalah masa dari penumpang (seperti dijelaskan dengan fungsi masa pada EN 15663)

c adalah beban roda dari bogie dalam %

m^+ adalah masa bogie

mengingat gaya dari tekanan angin, proporsi dari permukaan lateral gerbong, A_w , pada setiap bogie ditentukan berdasarkan beban axle seperti diatas.

Gaya inersia diasumsikan terjadi pada *center of gravity* untuk gerbong atau bogie, yang sesuai. Gaya angin diasumsikan terjadi pada *center of pressure* dari sisi gerbong.

Kasus pembebanan dibawah menggunakan simbol yang di definisikan dalam Annex A

C.5.3 Pernyataan umum dari kasus beban dasar

C.5.3.1 Beban Gerbong

Gaya longitudinal (diterapkan pada *center of gravity*)

$$F_{xc} = m_1 \times a_{xc}$$

Gaya transversal (diterapkan pada *center of gravity*)

$$F_{yc} = m_1 (a_{yc} + a_{ycc})$$

Gaya vertical (diterapkan pada *center of gravity*)

$$F_{zc} = m_1(g + a_{zc})$$

Gaya transversal akibat angin (diterapkan pada *center of pressure* dari sisi gerbong)

$$F_{w1} = A_w \times q$$

C.5.3.2 Beban rangka bogie

Gaya longitudinal (diterapkan pada *center of gravity*)

$$F_{xb} = m_2 \times a_{xb}$$

Gaya transversal (diterapkan pada *center of gravity*)

$$F_{yb} = m_2(a_{yb} + a_{ycb})$$

Gaya vertical (diterapkan pada *center of gravity*)

$$F_{zb} = m_2(g + a_{zb})$$

C.5.3.3 Beban pada penghubung antara bogie dan gerbong (kondisi buffing)

$$F_{xb} = m^+ \times 3g$$

Annex F (Contoh dari program tes statis)

F.5 Program tes statis untuk bogie kereta ringan dan trem

F.5.1 Umum

Tes statis meniru beban yang sama seperti yang digunakan pada analisa tegangan berdasarkan Annex C

F.5.2 Tes saat beban luar biasa

Rangka bogie di analisa dengan kasus pembebanan luar biasa yang diturunkan dari akselerasi dan lain-lain seperti pada Tabel F.4. Sebagai tambahan kasus pembebanan juga diaplikasikan dalam kombinasi dengan beban dari komponen yang melekat pada rangka

bogie:

- *Gear box* dan motor dengan akselerasi vertikal. (D.2.2 dan D.2.3)
- 1.3 kali beban pengereman darurat (D.4)
- 1.3 kali maksimum percepatan dan perlambatan (D.5)

Tabel F.4 – Beban luar biasa

Kasus Pembebanan	Masa Gerbong					Masa Bogie			
	σ_{ze} (m/s ²)	σ_{yc} (m/s ²)	σ_{yc} (m/s ²)	σ_{xc} (m/s ²)	q (N/m ²)	σ_{zb} (m/s ²)	σ_{yb} (m/s ²)	σ_{yb} (m/s ²)	σ_{xb} (m/s ²)
Perpindahan Rel	3,2	2,2	-	Angka pengereman darurat	600 ^a	30	16	-	Angka pengereman darurat
Melalui Tikungan	1,6	1,3	2,0	Angka pengereman darurat	600 ^a	12	6,5	2	Angka pengereman darurat

^akecepatan angin 105 km/jam

F.5.3 Tes saat beban normal

Rangka bogie di analisa dengan kasus pembebanan normal yang diturunkan dari akselerasi dan lain-lain seperti pada Tabel F.5. Sebagai tambahan kasus pembebanan juga diaplikasikan dalam kombinasi dengan beban dari komponen yang melekat pada rangka bogie:

- *Gear box* dan motor dengan akselerasi vertikal. (D.2.2 dan D.2.3)
- 1.1 kali beban pengereman darurat (D.4)
- 1.1 kali maksimum percepatan dan perlambatan (D.5)

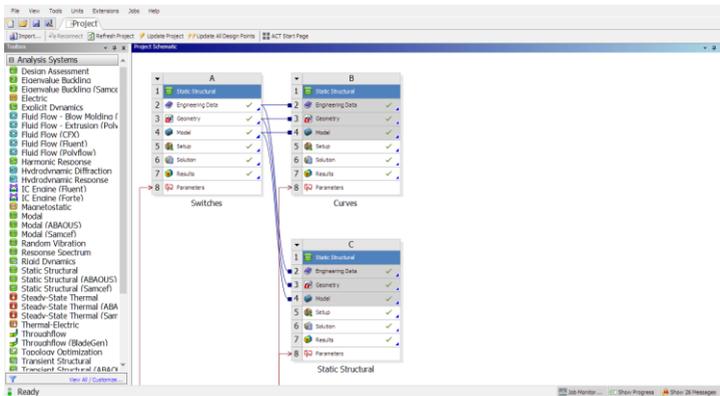
Tabel F.5 – Beban Normal

Kasus Pembebanan	Masa Gerbong					Masa Bogie			
	α_{zc} (m/s ²)	α_{yc} (m/s ²)	α_{yc} (m/s ²)	α_{xc} (m/s ²)	q (N/m ²)	α_{zb} (m/s ²)	α_{yb} (m/s ²)	α_{yxb} (m/s ²)	α_{xb} (m/s ²)
Perpindahan Rel	2,24	1,6	-	-	200*	25	12	-	-
Lintasan Lurus	1,2	0,9	-	Angka pengereman	-	8,5	4,5	-	Angka pengereman
Melalui Tikungan	1,2	0,9	1,0	Angka pengereman	-	8,5	4,5	1,0	Angka pengereman

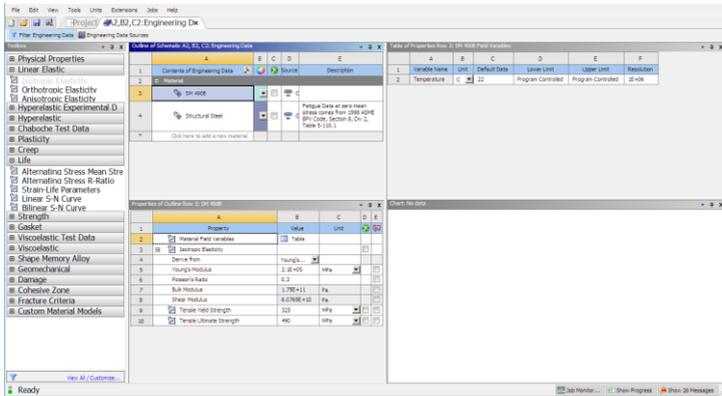
*kecepatan angin 60 km/jam

2. Screenshot Simulasi

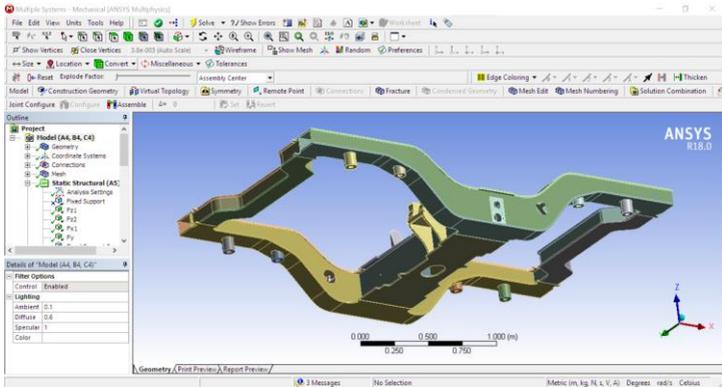
Berikut merupakan langkah-langkah dalam melakukan simulasi:



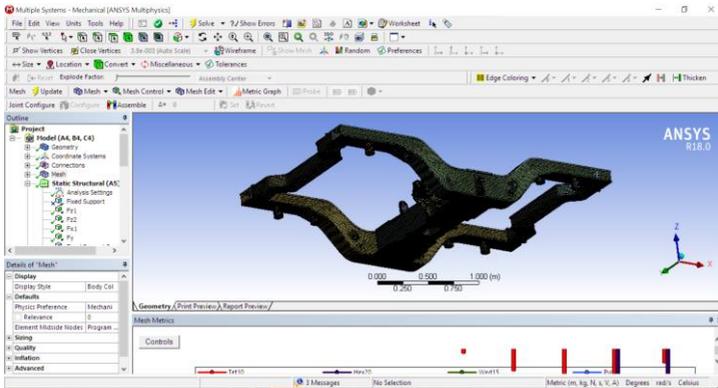
Gambar 1 Analisis *Static Structural*



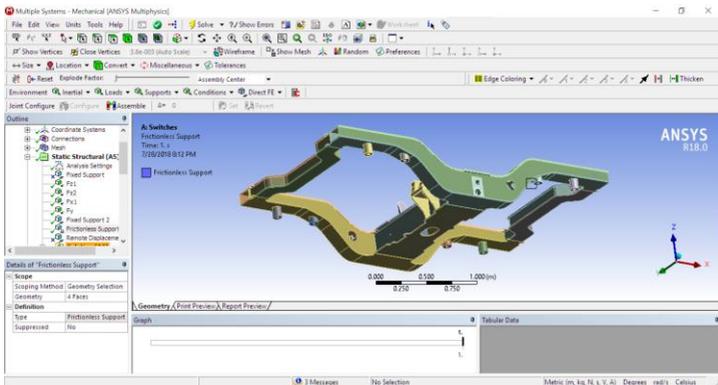
Gambar 2 Memasukkan Data Material



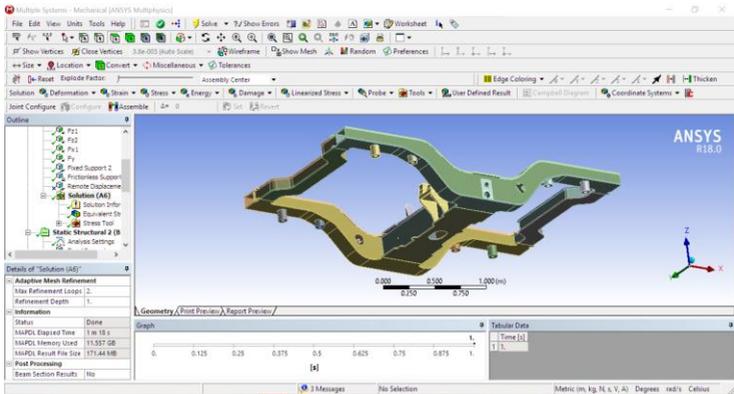
Gambar 3 Memasukkan Model



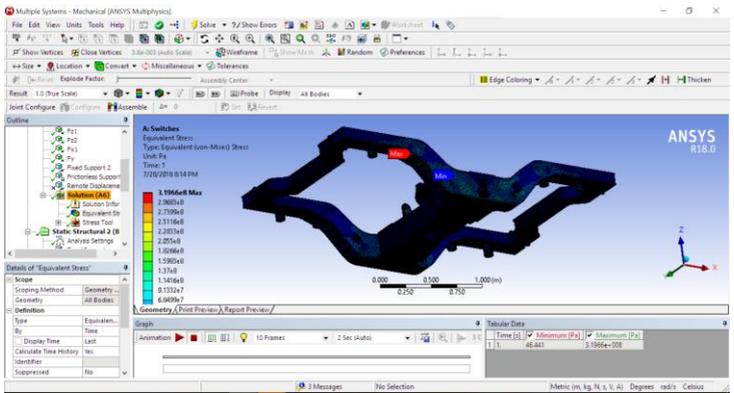
Gambar 4 Proses Mesh



Gambar 5 Pemberian Pembebanan dan Kondisi



Gambar 6 Menentukan Solusi



Gambar 7 Hasil Solusi

Biodata Penulis



Kelvin Yohanes Yordanius merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Kediri pada 25 September 1996 ini merupakan anak kedua dari pasangan Benny Sugiapranata Yordanius dan Hendrawati Sarjono. Penulis memulai pendidikan formal di TK Katolik Santa Maria Pare-Kediri kemudian melanjutkan ke SD Katolik Santa Maria Pare-Kediri. Setelah lulus tahun 2008 penulis melanjutkan ke SMPN 2 Pare-Kediri. Setelah lulus tahun 2011 penulis melanjutkan ke SMA Kristen Petra 1 Surabaya. 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 0211144000029.

Selama menuntut ilmu S1, penulis juga aktif ikut serta dalam berbagai kegiatan dan organisasi. Tahun 2014-2015 penulis menjadi panitia pada divisi Perlengkapan sebagai staf di acara *Mechanical City* 2015. Tahun 2015-2016 penulis menjadi panitia pada divisi Transportasi dan Komunikasi sebagai staf di acara *Mechanical City* 2016. Tahun 2016-2017 penulis menjadi panitia pada divisi Keamanan dan Perijinan sebagai Chief Keamanan di acara *Mechanical City* 2017. Kemudian pada Tahun 2015-2016 menjabat sebagai staf Kewirausahaan Keluarga Mahasiswa Katolik ITS. Pada Tahun 2016-2017 menjabat sebagai Ketua Departemen Kewirausahaan Keluarga Mahasiswa Katolik ITS.