

**NO: 01011443/MES/2022**

**ANALISA BENTUK PENAMPANG TANGKI BAHAN BAKAR MINYAK  
KAPASITAS 16000 LITER TERHADAP STABILITAS KENDARAAN AKIBAT  
EFEK SLOSHING MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan penyelesaian program S-1  
Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Kristen Petra

Oleh:  
Timotius Kevin Ronald Santoso NRP: C12180001

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**



**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
UNIVERSITAS KRISTEN PETRA  
SURABAYA  
2022**

## LEMBAR PENGESAHAN

### SKRIPSI

# ANALISA BENTUK PENAMPANG TANGKI BAHAN BAKAR MINYAK KAPASITAS 16000 LITER TERHADAP STABILITAS KENDARAAN AKIBAT EFEK SLOSHING MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Oleh:

Timotius Kevin Ronald Santoso

NRP: C12180001

Diterima Oleh:

Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Kristen Petra

Surabaya, 8 Juni 2022

Pembimbing I:



(Amelia, S.T., M.T.)  
(NIP: 98-008)

Pembimbing II:



(Fandi Dwiputra Suprianto, S.T., M.Sc.)  
(NIP: 04-038)

Ketua Tim Penguji:



(Prof. Dr. Willyanto Anggono, S.T., M.Sc.)  
(NIP: 98-023)



(Dr. Ir. Oegik Soegihardjo, M.Sc., M.A.)  
(NIP: 87-007)

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai mahasiswa Universitas Kristen Petra, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : Timotius Kevin Ronald Santoso

NRP : C12180001

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Kristen Petra Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif katas karya ilmiah saya yang berjudul "Analisa Bentuk Penampang Tangki Bahan Bakar Minyak Kapasitas 16000 Liter Terhadap Stabilitas Kendaraan Akibat Efek *Sloshing* Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*". Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif, Universitas Kristen Petra berhak menyimpan, mendistribusikan, dan mempublikasikan untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta izin dari selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis.

Saya bersedia untuk menanggung segala bentuk tuntutan hukum atas pelanggaran hak cipta karya ilmiah atau tuntutan hukum serupa atas karya ilmiah yang saya buat tanpa melibatkan pihak Universitas Kristen Petra.

Surabaya, 8 Juni 2022



T. Kevin Ronald Santoso

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yesus Kristus atas segala karunia dan penyertaanNya, sehingga Laporan Tugas Akhir dengan judul “Analisa Bentuk Penampang Tangki Bahan Bakar Minyak Kapasitas 16000 Liter Terhadap Stabilitas Kendaraan Akibat Efek *Sloshing* Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*” dapat diselesaikan. Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan kelulusan.

Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Amelia, S.T., M.T. dan Bapak Fandi Dwiputra Suprianto, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah membantu penulis dalam menyusun laporan ini. Penulis menyadari bahwa penulisan laporan ini masih jauh dari kata sempurna karena pengalaman dan pengetahuan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi perbaikan penulisan di masa mendatang.

Akhir kata, mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kekurangan maupun salah kata dalam penulisan laporan ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, 8 Juni 2022

Penulis,



T. Kevin Ronald Santoso

## **ABSTRAK**

Timotius Kevin Ronald Santoso

Skripsi

Analisa Bentuk Penampang Tangki Bahan Bakar Minyak Kapasitas 16000 Liter Terhadap Stabilitas Kendaraan Akibat Efek *Sloshing* Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*

*Sloshing* adalah gerakan *free surface* cairan yang menghantam dinding pembatas pada tangki akibat volume cairan yang tidak penuh. Bahan cair yang terkocok-kocok di dalam tangki akibat efek *sloshing* dapat membahayakan pengemudi truk dan pengguna jalan. Pada kecepatan tinggi, truk dapat terguling saat tikungan akibat pergerakan cairan di dalam tangki. Penelitian ini berfokus pada analisa bentuk penampang truk tangki terhadap efek *sloshing* yang terjadi pada saat akselerasi, penggereman, dan tikungan. Terdapat 3 model tangki yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu model 1 (*ellipse*), model 2 (*semi-ellipse*), dan model 3 (*reuleaux*). Desain dan geometri tangki yang digunakan dalam penelitian ini akan mengacu pada standar dari PT Pertamina, yaitu perusahaan bahan bakar terbesar di Indonesia. Penelitian yang dilakukan berdasarkan simulasi dengan *software Solidworks 2021*. *Static rollover threshold* (SRT) dari masing-masing model tangki akan diperoleh untuk menentukan stabilitas kendaraan. Ketiga model tangki akan menggunakan kapasitas volume pengisian 60% dan diuji pada akselerasi, penggereman, dan manuver tikungan yang berbeda-beda. Dari hasil simulasi, diperoleh bahwa tangki model 3 adalah model efisien dalam meredam momen *roll* akibat efek *sloshing*. Selain itu, dari hasil perhitungan SRT, model 3 adalah model tangki yang paling stabil.

Kata kunci: *sloshing*, tangki, simulasi, *static rollover threshold* (SRT), stabilitas kendaraan

## **ABSTRACT**

Timotius Kevin Ronald Santoso

Undergraduate Thesis

Analysis of Oil Fuel Tank Cross-Sectional Shape with a Capacity of 16000 Liters on Vehicle Stability due to the Sloshing Effect Using Computational Fluid Dynamics

Sloshing is the movement of the liquid free surface that hits the wall of the tank due to the partial volume of liquid. Liquid material movement due to the sloshing effect can be unsafe to truck drivers and road users. At high speeds, the truck may roll over due to the movement of fluids in the tank. This research focuses on analysing the cross-sectional shape of the tanker truck on the sloshing effect that occurs during acceleration, braking, and cornering. There are 3 tank models used in this study, namely model 1 (ellipse), model 2 (semi-ellipse), and model 3 (reuleaux). The design and geometry of the tank used will refer to the standards of PT Pertamina, the largest fuel company in Indonesia. This simulations-based research will use Solidworks 2021 software. Static rollover threshold (SRT) of each tank model will be obtained to determine vehicle stability. All tank models will use 60% volume capacity and are tested at different accelerations, braking and cornering maneuvers. From the simulation results, the model 3 is the efficient model in reducing the roll moment due to the sloshing effect. In addition, from the calculation of the SRT, model 3 is the most stable tank model.

Keywords: sloshing, tank, simulation, static rollover threshold (SRT), vehicle stability

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK.....	iv
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
1. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.4.1. Manfaat Praktis .....	4
1.4.2. Manfaat Akademis .....	5
1.5. Batasan Masalah .....	5
1.6. Sistematika Penelitian .....	5
2. TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1. Efek <i>Sloshing</i> .....	7
2.1.1. Analisa <i>Quasi-Static</i> .....	8
2.1.2. Analisa Dinamik <i>Sloshing</i> .....	10
2.1.3. Analisa Level Pengisian Cairan .....	11
2.1.4. Analisa <i>Roll Moment</i> .....	12
2.1.5. Analisa Static Rollover Threshold .....	15
2.2. Truk Tangki .....	17
2.2.1. Truk Tangki Bahan Bakar LPG.....	17
2.2.2. Truk Tangki Bahan Bakar Minyak .....	18
2.2.3. Truk Tangki Lainnya.....	19
2.3. Standar dan Persyaratan Truk Tangki Bahan Bakar .....	20
2.3.1. Lingkup (Pertamina, n.d.) .....	20
2.3.2. Persyaratan Konstruksi Tangki (Pertamina, n.d.) .....	21

2.3.3.	Bahan Tangki (Pertamina, n.d.) .....	24
2.3.4.	Ketebalan Tangki (Pertamina, n.d.) .....	25
2.3.5.	Penguat Struktur, Partisi Kompartemen, dan Penahan Guncangan (Pertamina, n.d.).....	28
2.3.6.	Stabilitas Mobil Tangki (Pertamina, n.d.) .....	30
2.4.	<i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i> .....	30
3.	METODE PENELITIAN.....	33
3.1.	Jenis Penelitian.....	33
3.2.	Pendekatan Penelitian .....	33
3.2.1.	Identifikasi Masalah.....	33
3.2.2.	Studi Pustaka .....	34
3.2.3.	Perancangan Geometri Tangki .....	34
3.2.4.	Penentuan Ukuran dan Model Meshing .....	35
3.2.5.	Penentuan Parameter-Parameter Simulasi.....	36
3.2.6.	Simulasi <i>Sloshing</i> .....	39
3.2.7.	Perhitungan Analisa Ambang Batas Guling .....	39
3.2.8.	Analisa Data dan Perbandingan Hasil.....	39
3.2.9.	Penyusunan Laporan .....	39
3.3.	Metode dan Prosedur Pengumpulan Data .....	39
3.4.	Metode Analisa Data.....	40
4.	ANALISA DATA .....	41
4.1.	Perancangan Geometri Tangki .....	41
4.1.1.	Tangki Model 0 .....	42
4.1.2.	Tangki Model 1 .....	43
4.1.3.	Tangki Model 2 .....	43
4.1.4.	Tangki Model 3 .....	44
4.2.	Parameter-Parameter Simulasi .....	46
4.2.1.	Tipe Analisis.....	46
4.2.2.	Fluida .....	47
4.2.3.	<i>Wall Conditions</i> dan <i>Initial Conditions</i> .....	48
4.2.4.	<i>Global Goals</i> .....	49
4.2.5.	<i>Mesh</i> .....	49
4.2.6.	<i>Calculation Control</i> .....	51
4.3.	Validasi Perhitungan.....	51
4.3.1.	Analisa <i>Quasi-Static</i> .....	52

4.3.2. Perbandingan Dengan Metode Simulasi Lain.....	54
4.4. Simulasi <i>Sloshing</i> .....	59
4.4.1. Variasi Akselerasi.....	59
4.4.2. Variasi Kecepatan pada saat di Tikungan .....	82
4.5. Analisa Stabilitas Kendaraan .....	87
4.5.1. Analisa <i>Static Rollover Threshold</i> Model 1 .....	88
4.5.2. Analisa <i>Static Rollover Threshold</i> Model 2 .....	90
4.5.3. Analisa <i>Static Rollover Threshold</i> Model 3 .....	92
5. KESIMPULAN DAN SARAN .....	95
5.1. Kesimpulan .....	95
5.2. Saran.....	96
DAFTAR PUSTAKA.....	97

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Kesesuaian bahan dengan kapasitas tangki (Pertamina, n.d.) .....	20
Tabel 2.2 Konfigurasi kompartemen yang diijinkan (Pertamina, n.d.).....	22
Tabel 2.3 Ketebalan minimal dinding tangki (Pertamina, n.d.).....	27
Tabel 4.1 Tinggi fluida pada masing-masing model tangki .....	46
Tabel 4.2 Momen (X) maksimum kondisi 1.....	80
Tabel 4.3 Momen (Z) maksimum kondisi 1 .....	80
Tabel 4.4 Momen (X) maksimum kondisi 2.....	80
Tabel 4.5 Momen (Z) maksimum kondisi 2 .....	81
Tabel 4.6 Momen (X) maksimum kondisi 3.....	81
Tabel 4.7 Momen (Z) maksimum kondisi 2 .....	81
Tabel 4.8 Parameter perhitungan SRT .....	87
Tabel 4.9 Rangkuman nilai SRT, kecepatan maksimum, dan <i>roll angle</i> maksimum tiap model tangki.....	94

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kecelakaan truk tangki Pertamina di Jalan Soekarno Hatta Kota Bandung pada 22 Desember 2018.....	2
Gambar 1.2 Geometri tangki bentuk (a) elips (atau lingkaran jika $a=b$ ), (b) <i>modified-oval</i> , dan (c) <i>reuleaux</i> .....	3
Gambar 2.1 Efek <i>sloshing</i> pada truk tangki.....	7
Gambar 2.2 <i>Quasi-static free surface</i> pada percepatan lateral <i>steady</i> .....	8
Gambar 2.3 Perbandingan (a) gaya lateral $F_x$ dan (b) gaya longitudinal $F_y$ pada <i>clearbone tank</i> dengan menggunakan $g_x = 0.3g$ dan $g_y = 0.25g$ .....	12
Gambar 2.4 Perbandingan (a) roll moment $M_x$ dan (b) pitch moment $M_y$ pada <i>cleanbore tank</i> dengan $g_x = 0.3g$ dan $g_y = 0.25g$ .....	12
Gambar 2.5 Skema dari <i>six-axle tractor-semitrailer</i> .....	13
Gambar 2.6 Model bidang <i>roll</i> dari kendaraan tangki yang dilengkapi dengan suspensi .....	13
Gambar 2.7 Skema analisa <i>static rollover threshold</i> .....	16
Gambar 2.8 Interpretasi garis lurus UNECE111 dari <i>static rollover threshold</i> .....	16
Gambar 2.9 Truk tangki muatan bahan bakar LPG .....	18
Gambar 2.10 Truk tangki bahan bakar minyak .....	19
Gambar 2.11 Truk tangki muatan <i>bulk cement</i> .....	19
Gambar 2.12 Contoh penampang (a) Lingkaran, (b) Elips, (c) Semi-Elips.....	21
Gambar 2.13 Batasan lebar tangki dan ban .....	23
Gambar 2.14 Ilustrasi batas ketinggian.....	23
Gambar 2.15 Ilustrasi kemiringan tangki .....	24
Gambar 2.16 Ilustrasi kecembungan minimal partisi kompartemen dan <i>Baffles</i> (A) <i>Bulk head</i> depan, (B) <i>Baffles</i> , (C) Partisi kompartemen, (D) <i>Bulk head</i> belakang .....	29
Gambar 2.17 Ilustrasi area <i>Baffles</i> . Bagian kiri adalah luasan penampang tangki dan bagian kanan adalah luasan <i>Baffles</i> .....	29
Gambar 2.18 Ilustrasi <i>center of gravity</i> .....	30
Gambar 2.19 Klasifikasi hirarki dari berbagai metode CFD.....	31
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	34
Gambar 3.2 Desain penampang tangki berbentuk (a) elips, (b), semi-elips semi-elips, dan (c) <i>reuleaux</i> .....	35

Gambar 3.3 <i>Layout</i> tikungan sebagai jalur truk tangki saat simulasi.....	37
Gambar 3.4 Stabilitas kendaraan truk normal dengan kapasitas beban 50% .....	37
Gambar 3.5 Jejak kendaraan pada berbagai variasi sudut .....	38
Gambar 4.1 Orientasi dan istilah yang digunakan dalam perancangan dan simulasi .....	41
Gambar 4.2 Desain tangki Model 0.....	42
Gambar 4.3 Desain tangki Model 1.....	43
Gambar 4.4 Desain tangki Model 2.....	44
Gambar 4.5 Desain tangki Model 3.....	45
Gambar 4.6 <i>Mesh</i> pada tangki model 0 .....	49
Gambar 4.7 <i>Mesh</i> pada tangki model 1 .....	50
Gambar 4.8 <i>Mesh</i> pada tangki model 2 .....	50
Gambar 4.9 <i>Mesh</i> pada tangki model 3 .....	50
Gambar 4.10 Gaya lateral pada tangki model 0.....	53
Gambar 4.11 Gaya vertikal pada tangki model 0 .....	54
Gambar 4.12 Konfigurasi tangki (a) <i>cleanbore</i> atau tanpa <i>baffle</i> , (b) <i>open baffle</i> , (c) <i>closed baffle</i> .....	55
Gambar 4.13 Dimensi tangki yang digunakan untuk simulasi validasi perhitungan (a) <i>cleanbore</i> , (b) <i>open baffle</i> , (c) <i>closed baffle</i> .....	56
Gambar 4.14 Grafik perubahan kecepatan pada simulasi untuk validasi perhitungan .....	56
Gambar 4.15 Grafik percepatan simulasi validasi perhitungan .....	57
Gambar 4.16 Perbandingan gaya <i>sloshing</i> terhadap sumbu X .....	57
Gambar 4.17 Perbandingan gaya <i>sloshing</i> terhadap sumbu Y .....	58
Gambar 4.18 Perbandingan momen <i>sloshing</i> terhadap sumbu Z .....	58
Gambar 4.19 Kecepatan longitudinal kondisi 1 .....	61
Gambar 4.20 Percepatan longitudinal kondisi 1 .....	61
Gambar 4.21 Percepatan lateral kondisi 1.....	61
Gambar 4.22 Grafik torsi (X) kondisi 1 .....	62
Gambar 4.23 Grafik torsi (Y) kondisi 1 .....	62
Gambar 4.24 Grafik torsi (Z) kondisi 1 .....	62
Gambar 4.25 Grafik gaya (X) kondisi 1 .....	63
Gambar 4.26 Grafik gaya (Y) kondisi 1 .....	63
Gambar 4.27 Grafik gaya (Z) kondisi 1 .....	63
Gambar 4.28 Efek <i>sloshing</i> model 0 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan).....	64

Gambar 4.29 Efek <i>sloshing</i> model 1 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan).....	64
Gambar 4.30 Efek <i>sloshing</i> model 2 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan).....	64
Gambar 4.31 Efek <i>sloshing</i> model 3 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan).....	64
Gambar 4.32 Kecepatan longitudinal kondisi 2 .....	68
Gambar 4.33 Percepatan longitudinal kondisi 2 .....	68
Gambar 4.34 Percepatan lateral kondisi 2 .....	68
Gambar 4.35 Grafik torsi (X) kondisi 2 .....	69
Gambar 4.36 Grafik torsi (Y) kondisi 2 .....	69
Gambar 4.37 Grafik torsi (Z) kondisi 2 .....	69
Gambar 4.38 Grafik gaya (X) kondisi 2 .....	70
Gambar 4.39 Grafik gaya (Y) kondisi 2 .....	70
Gambar 4.40 Grafik gaya (Z) kondisi 2 .....	70
Gambar 4.41 Efek <i>sloshing</i> model 0 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan).....	71
Gambar 4.42 Efek <i>sloshing</i> model 1 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan).....	71
Gambar 4.43 Efek <i>sloshing</i> model 2 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan).....	71
Gambar 4.44 Efek <i>sloshing</i> model 3 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan).....	71
Gambar 4.45 Kecepatan longitudinal kondisi 3 .....	75
Gambar 4.46 Percepatan longitudinal kondisi 3 .....	75
Gambar 4.47 Percepatan lateral kondisi 3 .....	75
Gambar 4.48 Grafik torsi (X) kondisi 3 .....	76
Gambar 4.49 Grafik torsi (Y) kondisi 3 .....	76
Gambar 4.50 Grafik torsi (Z) kondisi 3 .....	76
Gambar 4.51 Grafik gaya (X) kondisi 3 .....	77
Gambar 4.52 Grafik gaya (Y) kondisi 3 .....	77
Gambar 4.53 Grafik gaya (Z) kondisi 3 .....	77
Gambar 4.54 Efek <i>sloshing</i> model 0 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan).....	78
Gambar 4.55 Efek <i>sloshing</i> model 1 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan).....	78
Gambar 4.56 Efek <i>sloshing</i> model 2 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan).....	78
Gambar 4.57 Efek <i>sloshing</i> model 3 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan).....	78
Gambar 4.58 Variasi percepatan lateral saat tikungan.....	82
Gambar 4.59 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 10 km/jam .....	83
Gambar 4.60 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 12 km/jam .....	83
Gambar 4.61 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 14 km/jam .....	83

Gambar 4.62 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 16 km/jam .....	84
Gambar 4.63 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 18 km/jam .....	84
Gambar 4.64 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 20 km/jam .....	84
Gambar 4.65 Efek <i>sloshing</i> model 0 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan) .	85
Gambar 4.66 Efek <i>sloshing</i> model 1 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan) .	85
Gambar 4.67 Efek <i>sloshing</i> model 2 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan) .	85
Gambar 4.68 Efek <i>sloshing</i> model 3 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan) .	85
Gambar 4.69 Momen <i>roll</i> maksimum setiap kecepatan pada saat tikungan .....	86

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Dalam operasinya, truk tangki yang membawa beban cair memiliki resiko kecelakaan yang tinggi dibandingkan kendaraan yang mengangkut benda padat, mayoritas terguling saat melewati tikungan (Kurniawan, 2017). Salah satu penyebab utama truk tangki terguling adalah adanya gerak periodik permukaan bebas cairan dalam tangki yang tidak terisi penuh atau yang dikenal dengan *sloshing* (Koli & Kulkarni, 2010). *Sloshing* adalah gerakan *free surface* cairan yang menghantam dinding pembatas pada tangki akibat volume cairan yang tidak penuh. Pada beberapa kasus, *sloshing* yang terjadi pada kendaraan tangki, akan berpengaruh terhadap gerak *rolling* dan *pitching* pada tangki (Hanafi, 2017).

Bahan cair yang terkocok-kocok di dalam tangki akibat efek *sloshing* dapat membahayakan pengemudi truk dan pengguna jalan. Pada kecepatan tinggi, truk dapat terguling saat tikungan akibat pergerakan cairan di dalam tangki. Tidak hanya membahayakan keselamatan, kecelakaan tunggal akibat truk terguling juga dapat menyebabkan kerugian material yang cukup besar. Berdasarkan laporan investigasi kecelakaan lalu lintas dan angkutan jalan, kerugian material dari kecelakaan tunggal truk Pertamina dapat mencapai 120 juta rupiah (Komite Nasional Keselamatan Transportasi Republik Indonesia, 2021). Biaya tersebut termasuk biaya kerusakan kendaraan, kerusakan prasarana jalan, kehilangan BBM, serta evakuasi dan koordinasi.

Salah satu cara untuk meredam fenomena *sloshing* adalah dengan menggunakan *baffle*. Pelat peredam atau *baffle* dalam tangki biasa digunakan sebagai cara yang efektif untuk meredam gerakan cairan selain berfungsi memperkuat struktur tangki (Kandasamy, Rakheja, & Ahmed, 2010). Terdapat berbagai bentuk desain *baffle*, dimana setiap desain dan konfigurasi pemasangannya akan menghasilkan peredaman *sloshing* yang berbeda juga. Pada beberapa perusahaan besar seperti PT Pertamina biasanya sudah memiliki ukuran standar untuk desain dan konfigurasi *baffle*. Oleh karena desain dan konfigurasi *baffle* harus mengikuti standar yang ada, maka alternatif lain untuk meredam efek *sloshing* adalah dengan mengubah-ubah luas penampangx tangki.



Gambar 1.1 Kecelakaan truk tangki Pertamina di Jalan Soekarno Hatta Kota Bandung pada 22 Desember 2018

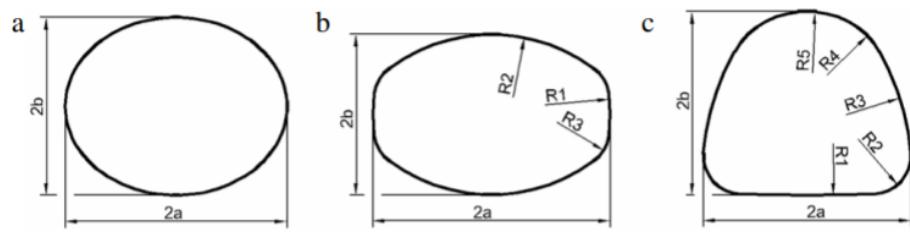
Sumber: Komite Nasional Keselamatan Transportasi Republik Indonesia. (2021). *Laporan Investigasi Kecelakaan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan*. Jakarta: Komite Nasional Keselamatan Transportasi Republik Indonesia, p. 4.

(Kurniawan, 2017) melakukan Analisa terhadap posisi pelat untuk mengetahui posisi *baffle* yang paling optimal untuk meredam gaya *sloshing* dan momen guling yang dihasilkan. Simulasi yang dilakukan menggunakan satu kompartemen tangki penampang oval yang dimodifikasi dengan variasi ketinggian air dalam tangki 30%, 50%, 70% dan 90% serta menggunakan besar percepatan lateral 0.3g. Dari hasil penelitian diketahui bahwa pelat peredam H-V-D (*horizontal-vertical-diagonal*) *Baffle* adalah pelat peredam terbaik untuk truk tangki oval yang dimodifikasi, karena mampu meredam momen guling lebih baik dari pelat peredam lain pada tinggi cairan 30%, 70% dan 90% (Kurniawan, 2017).

(Kandasamy, Rakheja, & Ahmed, 2010) menyatakan bahwa *baffle* transversal konvensional memberikan ketahanan terhadap *slosh* cairan di bawah manuver penggereman, sementara *baffle* yang ditempatkan secara miring dapat membantu membatasi *slosh* cairan longitudinal dan lateral di bawah gabungan percepatan lateral dan longitudinal.

(Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014) meneliti pengaruh penampang tangki terhadap beban *slosh* dinamik fluida dan stabilitas guling truk. Terdapat 4 penampang yang digunakan, yaitu penampang lingkaran, elips, *modified-oval*, dan *reuleaux*. Penelitian tersebut menyatakan bahwa tangki dengan penampang segitiga *reuleaux* adalah bentuk yang efisien dalam meredam *sloshing* pada cairan dengan volume pengisian sedang hingga tinggi. Hal tersebut sebagian besar

diakibatkan oleh panjang *free surface* yang lebih rendah dan letak pusat gravitasi yang rendah dari penampang segitiga *reuleaux*.



Gambar 1.2 Geometri tangki bentuk (a) elips (atau lingkaran jika  $a=b$ ), (b) *modified-oval*, dan (c) *reuleaux*

Sumber: Kolaei, A., Rakheja, S., & Richard, M. J. (2014). Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll stability of a partly-filled tank truck. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, p. 51.

(Rakheja, Stiharu, Kang, & Romero, 2002) menyelidiki respon dinamik dan karakteristik stabilitas menggunakan model *quasi-static* tiga dimensi pada beberapa bentuk penampang tangki yang terisi cairan sebagian ketika manuver penggereman saat di tikungan. Dari hasil penelitian didapatkan tangki akan lebih rentan terguling ketika mengalami penggereman saat tikungan di jalan yang kering, sementara di jalan yang licin kendaraan menunjukkan kecenderungan gerakan berayun.

(Dasgupta, 2011) menganalisa pengaruh penampang tangki terhadap pergeseran beban dinamis, gaya *sloshing*, *roll moment*, dan momen inersia massa. Pengaruh penampang tangki terhadap *slosh* transien ditekankan dengan membandingkan respon dinamik dari tangki pada level pengisian yang berbeda-beda saat mengalami pindah lajur dan manuver tikungan dengan akselerasi lateral. Hasil menunjukkan bahwa *slosh* transien saat manuver dapat sangat mengganggu arah dinamika kendaraan tangki elips dan *modified-oval* pada level pengisian rendah dan sedang. Sementara itu, pada level pengisian yang lebih tinggi, tangki yang lebih lebar dapat menghasilkan karakteristik dinamis yang lebih terarah.

Penelitian ini berfokus pada analisa efek *sloshing* pada truk tangki bahan bakar dengan kapasitas 16000 liter pada saat akselerasi, penggereman, dan tikungan. Desain *baffle* yang digunakan akan menggunakan desain standar dari PT Pertamina. Penelitian ini akan menggunakan 3 macam desain penampang tangki bahan bakar minyak, yaitu penampang elips, semi-elips, serta *reuleaux*.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh perbedaan jenis penampang truk tangki terhadap efek *sloshing* yang terjadi pada saat akselerasi, pengereman, dan tikungan?
2. Bagaimana stabilitas kendaraan yang terjadi akibat efek *sloshing* pada saat akselerasi, pengereman, dan tikungan?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mendapatkan jenis penampang truk tangki yang paling efisien dalam meredam efek *sloshing* saat akselerasi, pengereman, dan tikungan.
2. Menganalisa efek *sloshing* terhadap stabilitas kendaraan berdasarkan analisa ambang batas guling yang terjadi pada saat akselerasi, pengereman, dan tikungan.

## **1.4. Manfaat Penelitian**

### **1.4.1. Manfaat Praktis**

Penelitian yang dilakukan ini diharapkan dapat bermanfaat bagi:

1. Bagi pengguna truk tangki mulai dari produsen hingga pengendara, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan dan informasi mengenai dampak dari efek *sloshing* bahan bakar pada stabilitas kendaraan truk tangki.
2. Bagi para peneliti, dengan hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan bagi penelitian-penelitian selanjutnya demi mengembangkan ilmu pengetahuan.

#### **1.4.2. Manfaat Akademis**

Penelitian yang dilakukan ini diharapkan dapat bermanfaat bagi:

1. Bagi penulis, penelitian ini diharapkan bermanfaat untuk mengetahui desain penampang pada truk tangki yang paling efisien dalam meredam efek *sloshing*.
2. Bagi pembaca, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan mengenai dampak dari efek *sloshing* bahan bakar pada stabilitas kendaraan truk tangki.

#### **1.5. Batasan Masalah**

Pada penelitian yang dilakukan ini memiliki batasan-batasan penelitian sebagai berikut.

1. Tangki untuk penelitian ini hanya menggunakan kapasitas 16000 liter dengan 2 kompartemen.
2. Kecepatan truk tangki pada saat simulasi hanya menggunakan kecepatan maksimum truk tangki, yaitu 60 km/jam dan kecepatan penggereman 20 km/jam.
3. Cairan di dalam tangki bahan bakar yang digunakan untuk simulasi hanya menggunakan etanol dan volume pengisian di dalam tangki adalah 60% kapasitas pada masing-masing kompartemen.
4. Jalur tikungan yang digunakan pada simulasi sudah ditentukan dan digunakan di semua simulasi desain truk tangki. Jalur tikungan merupakan sebuah belokan dengan radius belok 7.08 m.

#### **1.6. Sistematika Penelitian**

Laporan penelitian Tugas Akhir ini akan disusun secara sistematis dibagi dalam beberapa bab, dengan perincian sebagai berikut.

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini, akan diuraikan latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan penelitian, serta sistematika penulisan.

**BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini, akan dibahas teori-teori yang sesuai dengan penelitian yang mendasari penggerjaan Tugas Akhir ini.

**BAB III METODE PENELITIAN**

Pada bab ini, akan berisi tahapan penelitian mulai awal sampai akhir beserta langkah-langkah yang harus dilalui untuk mencapai tujuan dan simpulan akhir dari penelitian

**BAB IV ANALISA DATA**

Bab ini berisi tentang perancangan model tangki, pemilihan material tangki, simulasi *sloshing*, perhitungan, dan analisa data berdasarkan simulasi yang dilakukan. Pada bab ini juga akan dilakukan perbandingan antar desain penampang dan *ballfront* tangki terhadap efek *sloshing* dengan kecepatan truk tangki yang telah ditentukan.

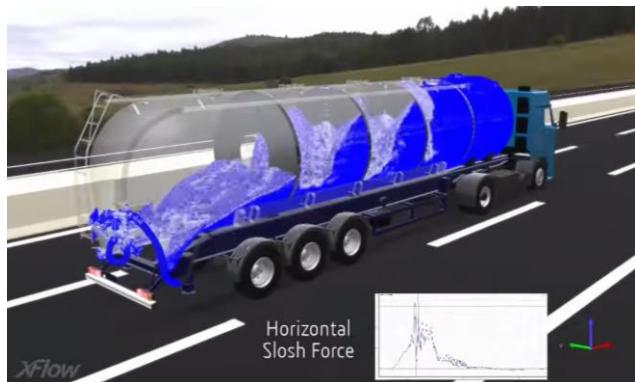
**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi tentang kesimpulan pokok dari seluruh penelitian atau Tugas Akhir yang telah dilakukan dan saran yang dapat dijadikan sebagai pengembangan penelitian selanjutnya.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Efek *Sloshing*

*Sloshing* adalah gerakan *free surface* cairan yang menghantam dinding pembatas pada tangki akibat volume cairan yang tidak penuh (Hanafi, 2017). Efek *sloshing* dapat berakibat fatal pada pengemudi atau pengguna jalan lainnya. Hal tersebut dikarenakan hantaman cairan akibat efek *sloshing* dapat menimbulkan gaya ataupun torsi yang dapat menyebabkan truk terguling. Selain itu, efek *sloshing* akan menyebabkan ketidakstabilan pada kendaraan. Ketika tangki bergerak, cairan yang tidak penuh dalam tangki juga ikut bergerak sehingga pusat massanya berubah-ubah dan menimbulkan gaya tambahan pada kendaraan (Hanafi, 2017).



Gambar 2.1 Efek *sloshing* pada truk tangki

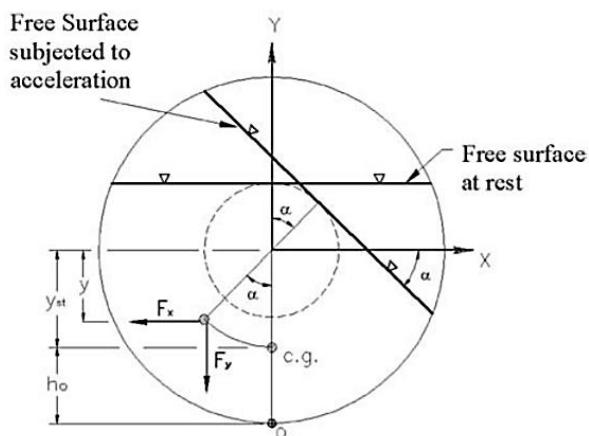
Sumber: Scanscot (Director). (2019). *SIMULIA XFlow - Tank Sloshing Simulation*

Umumnya, efek *sloshing* terjadi pada saat akselerasi, penggereman, dan tikungan. Pada saat akselerasi, truk tangki akan terasa berat saat bergerak karena cairan akan terdorong ke belakang akibat kelembaman dari fluida di dalam tangki. Sebaliknya pada saat penggereman, fluida akan terdorong ke depan akibat perubahan kecepatan secara tiba-tiba. Penggereman yang terlalu mendadak dapat mengakibatkan tangki terlepas dan menghantam pengemudi truk. Demikian juga ketika truk melakukan manuver di tikungan, fluida akan menghantam dinding ke arah samping dan menimbulkan momen guling akibat gaya *sloshing*. Apabila kecepatan truk tangki di tikungan terlalu tinggi, maka truk tangki bisa terguling.

*Sloshing* dapat mengakibatkan beban hidrodinamik yang berlebihan di dinding tangki, dan dapat menyebabkan destabilisasi dinamika struktur saat eksitasi frekuensi mendekati frekuensi alami terendah dari wadah yang terisi sebagian (Demirel & Aral, 2018). Oleh karena itu, sangat penting untuk menganalisa dan mencari solusi untuk meredam efek *sloshing* pada kendaraan tangki.

### 2.1.1. Analisa Quasi-Static

Metode *quasi-static* merupakan metode sederhana untuk memprediksi posisi *steady* dari *free surface* cairan ketika kendaraan berjalan dimana *free surface* cairan digantikan dengan garis lurus sesuai dengan gerak *pitch* dan percepatan longitudinal pada model kendaraan *pitch plane* (Hanafi, 2017). Metode *quasi-static* hanya akurat untuk kasus *steady state sloshing*, dimana metode tersebut bisa menghitung posisi dari pusat massa yang kemudian dihubungkan dengan dinamika pergeseran beban (*dynamic load shift*) (Hanafi, 2017).



Gambar 2.2 *Quasi-static free surface* pada percepatan lateral *steady*

Sumber: Tehrani, K. M., Rakheja, S., & Sedaghati, R. (2005). Analysis of the overturning moment caused by transient liquid slosh inside a partly filled moving tank. *Journal of Automobile Engineering*, p. 291.

Gambar 2.2 menunjukkan momen guling  $M_z$  yang terjadi terhadap titik O pada dasar tangki akibat gerakan cairan di dalam tangki bundar dengan jari-jari  $R$  yang bergerak dengan percepatan lateral  $a_x$  dan percepatan gravitasi  $g$  di rumuskan sebagai berikut (Tehrani, Rakheja, & Sedaghati, 2005).

$$M_z = F_x(R - y) + F_yx \quad (2.1)$$

Gaya sloshing lateral  $F_x$  dan gaya sloshing vertikal  $F_y$  pada kondisi *quasi-static* dihitung dengan persamaan berikut (Kurniawan, 2017).

$$F_x = ma_x \quad (2.2)$$

$$F_y = mg \quad (2.3)$$

Dimana:

$M_z$  : Momen guling terhadap titik O (Nm)

$F_x$  : Gaya *sloshing* lateral kondisi *quasi-static* (N)

$F_y$  : Gaya *sloshing* vertikal kondisi *quasi-static* (N)

$R$  : Jari-jari tangki (m)

$x$  : Koordinat lateral sesaat pusat massa cairan arah sumbu x (m)

$y$  : Koordinat vertikal sesaat pusat massa cairan arah sumbu y (m)

$m$  : Massa cairan dalam tangki (kg)

$a_x$  : Percepatan lateral ( $m/s^2$ )

$g$  : Percepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ )

Pergeseran koordinat lateral pusat massa (CG) dari cairan dapat dihitung berdasarkan gradien *free surface* dan geometri tangki seperti persamaan berikut (Tehrani, Rakheja, & Sedaghati, 2005).

$$x = y_{st} \sin \alpha = \frac{y_{st} G_x}{\sqrt{1+G_x^2}} \quad (2.4)$$

Koordinat vertical pusat massa juga bervariasi karena mengikuti orbit melingkar seperti pada Gambar 2.2. Koordinat vertikal sesaat dari pusat massa dapat dirumuskan sebagai berikut (Tehrani, Rakheja, & Sedaghati, 2005).

$$y = y_{st} \cos \alpha = \frac{y_{st}}{\sqrt{1+G_x^2}} \quad (2.5)$$

Dimana:

$y_{st}$  : Koordinat vertikal

$\alpha$  : Gradien *free surface* terhadap sumbu horizontal

$G_x$  : Percepatan normal lateral dalam satuan g

Dari persamaan (2.1), dapat dilihat bahwa semakin besar gaya lateral dan gaya vertikal pada truk tangki, semakin besar juga momen gulingnya. Pusat massa terhadap sumbu x serta ketinggian pusat massa terhadap titik O juga akan mempengaruhi momen guling. Dengan demikian, semakin besar gaya sloshing lateral dan vertikal yang terjadi, dan semakin besar pergeseran pusat massa cairan, maka momen guling akan semakin besar (Kurniawan, 2017).

Berdasarkan hasil penelitian (Tehrani, Rakheja, & Sedaghati, 2005) dan (Kandasamy, Rakheja, & Ahmed, 2010), nilai rata-rata gaya *sloshing* hasil simulasi memiliki hasil yang akurat dibandingkan nilai dari analisis *quasi-static* (Kurniawan, 2017).

$$F_x \approx \bar{F}_x \quad (2.6)$$

$$F_y \approx \bar{F}_y \quad (2.7)$$

Dimana:

$\bar{F}_x$  : Gaya *sloshing* lateral rata-rata (N)

$\bar{F}_y$  : Gaya *sloshing* vertikal rata-rata (N)

Jika nilai  $\bar{F}_x$  mendekati nilai  $F_x$  dan nilai  $\bar{F}_y$  mendekati nilai  $F_y$  atau diperoleh deviasi yang kecil maka simulasi valid (Kurniawan, 2017).

### 2.1.2. Analisa Dinamik *Sloshing*

Analisa ini menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD) untuk mengidentifikasi efek dari *sloshing*. Analisis dinamik *sloshing* sangat sesuai digunakan untuk menganalisa fenomena *sloshing* transien yang mana tidak bisa dilakukan oleh metode *quasi-static* (Hanafi, 2017). Pada metode ini, gerakan dari cairan dalam tangki dijelaskan dengan persamaan Navier-Stokes. Pada metode ini juga dapat diketahui secara luas bagaimana analisa *sloshing* untuk kasus linier maupun nonlinier (Hanafi, 2017).

Berdasarkan hasil studi, *slosh* cairan dinamis dalam wadah yang terisi sebagian menggunakan kode *computational fluid dynamics* (CFD) selalu menyimpulkan bahwa gaya *slosh* puncak dan momen lebih besar secara substansial dibanding dengan prediksi dari model *quasi-static* (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014). Hal tersebut menyatakan bahwa hanya metode

*quasi-static* memiliki validitas terbatas dalam memprediksi arah respon kendaraan, khususnya pada manuver transien atau input kemudi dan penggereman yang cukup tinggi. Pendekatan *quasi-static* tidak dapat diaplikasikan untuk mempelajari *sloshing* pada tangki yang dilengkapi dengan *baffle* (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014).

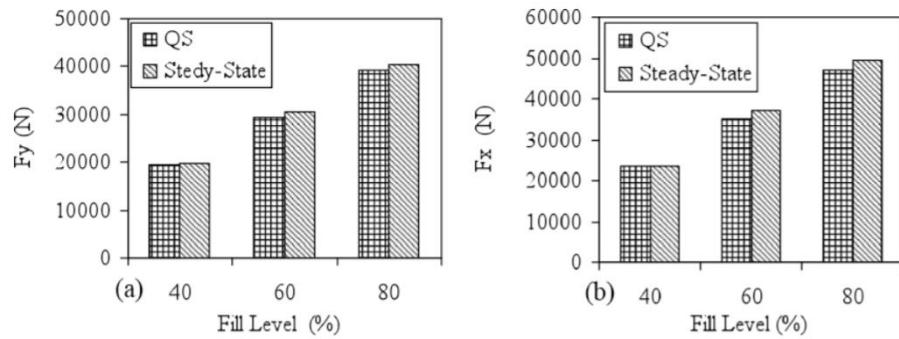
### 2.1.3. Analisa Level Pengisian Cairan

Karakteristik gerakan cairan dalam tangki memiliki ketergantungan yang kuat terhadap level cairan dan bentuk penampang tangki (Kurniawan, 2017). Semakin tinggi cairan di dalam tangki akan menyebabkan momen guling semakin besar akibat inersia fluida dan pusat massa yang lebih tinggi.

Tangki yang terisi sebagian dengan penampang tangki yang lebih lebar seperti *modified-oval* dan elips akan menghasilkan pergeseran muatan yang besar. Oleh karena itu, momen guling akan semakin besar walaupun pusat massanya lebih rendah. Tangki dengan penampang lingkaran cenderung memiliki pusat massa yang lebih tinggi namun menghasilkan pergeseran muatan yang relatif lebih rendah. Sebaliknya, semakin rendah cairan di dalam tangki akan menghasilkan variasi yang lebih besar pada momen guling yang disebabkan peningkatan pergeseran pusat massa dan gerakan cairan yang lebih besar (Dasgupta, 2011).

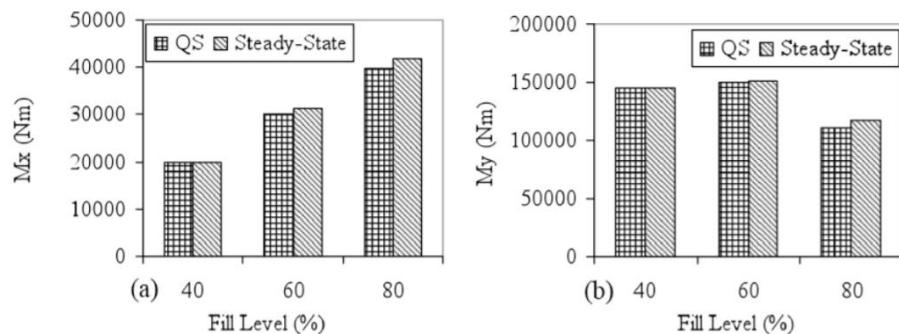
Sebuah penelitian oleh (Kandasamy, Rakheja, & Ahmed, 2010) menganalisa pengaruh level pengisian pada *cleanbore tank*, sebuah tangki tanpa *baffle*. Pengujian dilakukan menggunakan level pengisian 40% hingga 80% dan dilakukan pada kondisi *steady state*. Berikut merupakan perbandingan respon gaya lateral dan longitudinal menggunakan  $g_x = 0.3g$  dan  $g_y = 0.25g$

Dari Gambar 2.3 dan Gambar 2.4, diperoleh perbandingan yang cukup bagus antara kondisi *steady-state* atau *mean dynamic* dan *quasi-static* untuk semua tingkat pengisian. Kedua grafik di atas menyatakan bahwa gaya lateral, gaya longitudinal, dan *roll moment* akan semakin besar apabila level pengisian cairan di dalam tangki semakin tinggi. *Pitch moment* akan semakin rendah apabila level pengisian semakin tinggi. Pernyataan tersebut berlaku pada kondisi  $g_x = 0.3g$  dan  $g_y = 0.25g$ .



Gambar 2.3 Perbandingan (a) gaya lateral  $F_x$  dan (b) gaya longitudinal  $F_y$  pada *clearbone tank* dengan menggunakan  $g_x = 0.3g$  dan  $g_y = 0.25g$

Sumber: Kandasamy, T., Rakheja, S., & Ahmed, A. (2010). An Analysis of Baffles Designs for Limiting Fluid Slosh in Partly Filled Tank Trucks. *The Open Transportation Journal*, p. 28.

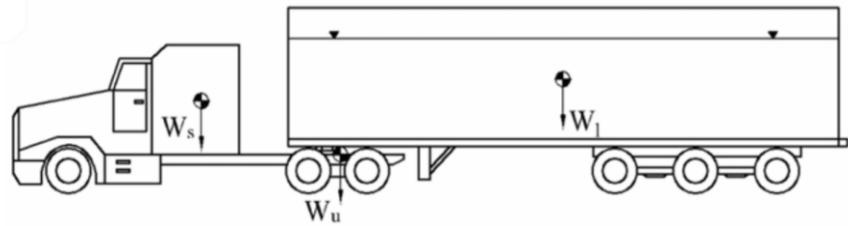


Gambar 2.4 Perbandingan (a) roll moment  $M_x$  dan (b) pitch moment  $M_y$  pada *cleanbore tank* dengan  $g_x = 0.3g$  dan  $g_y = 0.25g$

Sumber: Kandasamy, T., Rakheja, S., & Ahmed, A. (2010). An Analysis of Baffles Designs for Limiting Fluid Slosh in Partly Filled Tank Trucks. *The Open Transportation Journal*, p. 29.

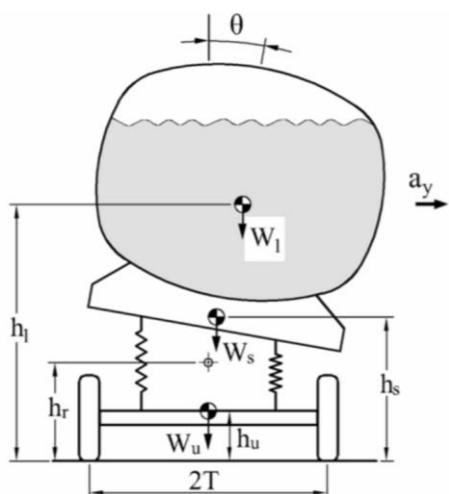
#### 2.1.4. Analisa Roll Moment

*Roll moment* akibat efek *sloshing* dari fluida di dalam tangki yang terisi sebagian dapat diintegrasikan ke dalam model bidang *roll* untuk mempelajari efek fluida dinamis dan batas stabilitas *roll* kendaraan. Oleh karena itu, model bidang *roll* dari *six-axle tractor-semitrailer* dikembangkan menggunakan persamaan kesetimbangan momen seperti pada Gambar 2.5 (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014).



Gambar 2.5 Skema dari *six-axle tractor-semitrailer*

Sumber: Kolaei, A., Rakheja, S., & Richard, M. J. (2014). Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll stability of a partly-filled tank truck. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, p. 50.



Gambar 2.6 Model bidang *roll* dari kendaraan tangki yang dilengkapi dengan suspensi

Sumber: Kolaei, A., Rakheja, S., & Richard, M. J. (2014). Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll stability of a partly-filled tank truck. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, p. 50.

Gambar 2.6 menunjukkan model sederhana bidang *roll* dari kendaraan tangki yang dilengkapi suspensi dengan asumsi mengabaikan gerakan *roll* dari *unsprung mass*. Ambang batas guling diperkirakan sebagai akselerasi lateral maksimum yang dapat dicapai kendaraan sebelum ban di bagian dalam tikungan terangkat dari tanah. Akibatnya, seluruh beban kendaraan ditahan oleh ban bagian luar pada kondisi tersebut. Dengan mengasumsikan *roll angle* kecil, persamaan kesetimbangan momen terhadap pusat *roll* dapat dirumuskan sebagai berikut (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014).

$$(W_s h_s + W_u h_u) a_y + M_d \theta + M_l = WT \quad (2.8)$$

Dimana:

- $W_s$  : *Sprung weight* atau berat yang ditopang pegas (N)
- $W_u$  : *Unsprung weight* atau berat yang tidak ditopang pegas (N)
- $W$  : Berat total kendaraan (N)
- $h_s$  : *Center of gravity* dari *sprung mass* (m)
- $h_u$  : *Center of gravity* dari *unsprung mass* (m)
- $T$  : Setengah *track width* (m)
- $M_l$  : *Roll moment* total terhadap pusat *roll*
- $a_y$  : Akselerasi lateral ( $m/s^2$ )
- $M_d$  : Momen *displacement* lateral dalam satuan *roll angle*, yang dirumuskan sebagai berikut.

$$M_d = W_s(h_s - h_r) + W_l \left( h_l - h_r + \frac{2}{3} \frac{y_h^3}{V_l} \right) \quad (2.9)$$

Dimana:

- $W_l$  : Beban cairan kargo (N)
- $h_r$  : Tinggi pusat *roll* (m)
- $h_l$  : Tinggi *center of gravity* dari cairan kargo di dalam tangki (m)
- $V_l$  : Volume cairan kargo per satuan panjang ( $m^2$ )
- $y_h$  : Setengah panjang *free surface* (m)

Selain itu, momen *rolling resistance* akibat sistem suspensi berhubungan dengan *restoring moment* adalah sebagai berikut (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014).

$$k_s \theta = WT - Wa_y h_r + W_u a_y (h_r - h_u) \quad (2.10)$$

Dimana:

- $k_s$  : *equivalent roll stiffness* akibat suspensi

Dengan melakukan substitusi  $\theta$  dari persamaan (2.10) ke persamaan (2.8) diperoleh persamaan kesetimbangan momen sebagai berikut (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014).

$$a_y \left[ W_s h_s + W_u h_u + \frac{M_d}{k_s} (W_u(h_r - h_u) - Wh_r) \right] + M_l = WT \left( 1 - \frac{M_d}{k_s} \right) \quad (2.11)$$

### 2.1.5. Analisa Static Rollover Threshold

*Rollover* adalah ketidakstabilan dari kendaraan yang menghasilkan setidaknya rotasi 90° terhadap sumbu *roll*nya (Tomar, 2015). *Rollover* tau terguling dapat diakibatkan karena muatan ataupun manuver dari pengemudi kendaraan. *Rollover* bermula saat salah satu *axle* kendaraan mulai terangkat dari tanah. Apabila semua *axle* kendaraan terangkat sepenuhnya, maka kendaraan dapat terguling. Dalam perhitungan *Static Rollover Threshold* (SRT), diperlukan percepatan saat *axle* pertama terangkat dan percepatan saat seluruh *axle* kendaraan terangkat. Berikut merupakan perhitungan dari percepatan-percepatan tersebut (Tomar, 2015).

$$a_{yT} = \frac{m_T g^2 l_{tT}}{2 \left[ (m_T g h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g h_s}{c_{resT} - m_T g h_s} \right]} \quad (2.12)$$

$$a_{yS} = \frac{m_S g^2 l_{tS}}{2 \left[ (m_T g s_f h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g s_f h_s}{c_{resT} - m_T g s_f h_s} \right]} \quad (2.13)$$

$$s_f = \frac{c_{ress}}{c_{resT}} \quad (2.14)$$

$$SRT = a_{yC} = a_{yT} - (a_{yT} - a_{yS}) \frac{m_S}{m_T} \quad (2.15)$$

Dimana:

$a_{yT}$  : Percepatan lateral saat pengangkatan roda pertama ( $m/s^2$ )

$a_{yS}$  : Percepatan lateral saat semua roda dalam terangkat dari tanah ( $m/s^2$ )

$m_T$  : Massa total kendaraan (kg)

$m_S$  : *Sprung mass* (kg)

$m_{uT}$  : *Unsprung mass* (kg)

$g$  : Percepatan gravitasi ( $9.81 m/s^2$ )

$l_{tT}$  : *Track width* (m)

$l_{tS}$  : *Track width* pada *axle* terkaku (m)

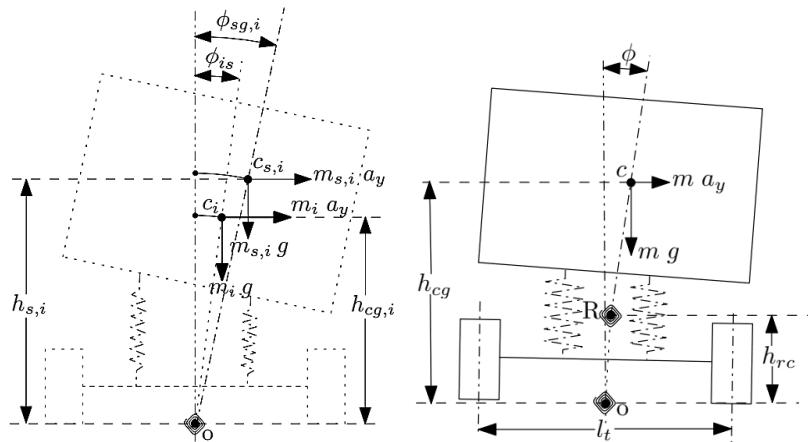
$h_{cg}$  : Pusat massa kendaraan (m)

$h_s$  : Pusat massa *sprung mass* (m)

$s_f$  : stiffness factor

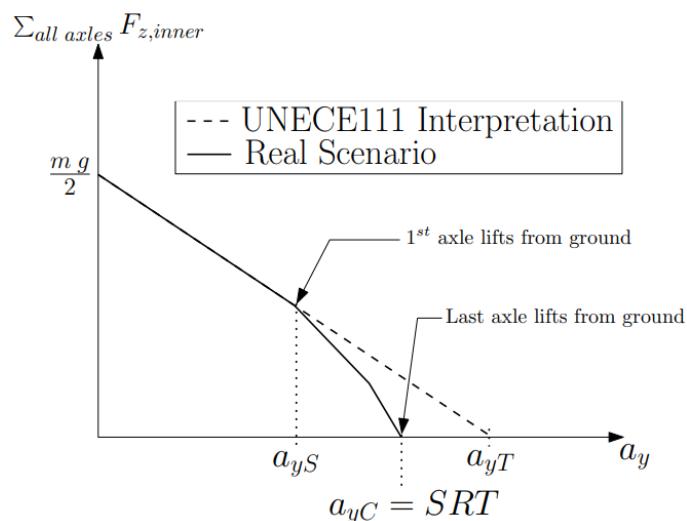
$C_{resT}$ : Resultan roll stiffness dari axle terkaku (Nm/rad)

$C_{ress}$ : Resultan roll stiffness dari kendaraan (Nm/rad)



Gambar 2.7 Skema analisa static rollover threshold

Sumber: Tomar, A. S. (2015). *Estimation of Steady State Rollover Threshold for High-Capacity Transport Vehicles using RCV Calculation Method*. Goteborg: Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology, p. 61.



Gambar 2.8 Interpretasi garis lurus UNECE111 dari static rollover threshold

Sumber: Tomar, A. S. (2015). *Estimation of Steady State Rollover Threshold for High-Capacity Transport Vehicles using RCV Calculation Method*. Goteborg: Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology, p. 26.

Pada realitanya, SRT terdapat di antara kedua percepatan yang dinyatakan pada persamaan (2.12) dan (2.13). SRT dapat ditentukan dengan mempertimbangkan hubungan linear antara kedua percepatan. Jadi, percepatan lateral yang berkorelasi saat *overturn* dapat ditunjukkan melalui persamaan berikut. Metode perhitungan yang digunakan untuk mengkalkulasikan SRT adalah dengan interpretasi UNECE111. Grafik dari perhitungan SRT dapat dilihat melalui Gambar 2.8.

## 2.2. Truk Tangki

Sekitar 80% dari produk kimia dan minyak bumi global ditransportasikan oleh kendaraan tangki. Angkutan transportasi kargo telah mencapai 4 miliar ton per tahun (Li, Zheng, Wang, & Cheng, 2013). Data tersebut menyatakan bahwa kendaraan tangki atau truk tangki adalah kendaraan yang banyak digunakan dan cukup penting dalam bidang industri, terutama transportasi. Terdapat bermacam-macam bentuk dari truk tangki, dimana bentuk dari truk tangki menyesuaikan material atau bahan yang diangkut. Truk tangki tidak hanya digunakan untuk mengangkut cairan, namun truk tangki juga dapat mengangkut muatan padat dan gas. Berikut merupakan beberapa contoh truk tangki yang umum digunakan.

### 2.2.1. Truk Tangki Bahan Bakar LPG

Jenis truk tangki ini mengangkut bahan bakar dalam wujud gas yang dicairkan. Muatan bahan bakar gas biasanya disimpan dengan tekanan yang tinggi. Hal tersebut menyebabkan penampang dan *ballfront* truk tangki LPG berbentuk *circular*. Bentuk *circular* akan membantu struktur tangki dalam menahan tekanan dari dalam. Tangki bahan bakar LPG terbuat dari pelat logam yang cukup tebal, yaitu sekitar 18 mm. Kapasitas truk tangki LPG dinyatakan dalam kg atau ton dan bukan liter, hal tersebut disebabkan karena lebih mudah untuk menakar bahan bakar gas dalam satuan massa dibandingkan dengan satuan volume. Gambar 2.9 merupakan salah satu contoh truk tangki LPG dengan kapasitas 15 ton.



Gambar 2.9 Truk tangki muatan bahan bakar LPG

Sumber: PT Geluran Adikarya. (2018). *LPG Storage & Transport Tanks*.

Retrieved November 9, 2021, from PT Geluran Adikarya:  
<https://geluran.co.id/product/lpg-storage-transport-tanks/>

### 2.2.2. Truk Tangki Bahan Bakar Minyak

Jenis truk tangki ini memuat bahan bakar dalam wujud cair, yaitu bahan bakar minyak. Terdapat berbagai kapasitas yang biasa digunakan dalam tangki, dimana kapasitas tangki bahan bakar minyak akan dibahas lebih lanjut di subbab 2.3.2. Tidak seperti tangki LPG, tangki bahan bakar minyak terbuat dari pelat logam yang cukup tipis, yaitu sekitar 3 mm. Hal tersebut dikarenakan muatan dalam wujud cair tidak memiliki tekanan sebesar muatan dalam wujud gas. Kapasitas truk tangki bahan bakar minyak dinyatakan dalam liter karena muatan cair lebih mudah diukur dalam satuan volume. Gambar 2.10 merupakan salah satu contoh truk tangki bahan bakar minyak dengan kapasitas 40000 liter.



Gambar 2.10 Truk tangki bahan bakar minyak

Sumber: PT Geluran Adikarya. (2018). *Aluminum & Steel Fuel Road Tanks*.

Retrieved November 9, 2021, from PT Geluran Adikarya:  
<https://geluran.co.id/product/aluminium-steel-fuel-road-tankersaluminium-steel-fuel-road-tankers/>

### 2.2.3. Truk Tangki Lainnya

Selain muatan cair dan gas, truk tangki juga bisa digunakan untuk mengangkut muatan padat. Muatan padat pada truk tangki umumnya dalam bentuk serbuk seperti tepung, semen, dan lainnya. Bentuk truk tangki muatan padat juga bervariasi, bergantung pada kegunaan dan muatan yang digunakan. Gambar 2.11 merupakan salah satu contoh truk tangki yang didesain untuk muatan *bulk cement*.



Gambar 2.11 Truk tangki muatan *bulk cement*

Sumber: PT Geluran Adikarya. (2018). *Others*. Retrieved November 9, 2021, from PT Geluran Adikarya: <https://geluran.co.id/product/others/>

### **2.3. Standar dan Persyaratan Truk Tangki Bahan Bakar**

Salah satu standar dan persyaratan dalam manufaktur truk tangki adalah berdasarkan standar dari Pertamina. Berikut merupakan standar dan persyaratan dalam desain dan pembuatan truk tangki berdasarkan Panduan Mobil Tangki: Manajemen Pabrikasi (Pertamina, n.d.).

#### **2.3.1. Lingkup (Pertamina, n.d.)**

Standar dan persyaratan tangki BBM ini untuk digunakan pada kendaraan *rigid* dan *semi-trailer*. Jenis produk yang dapat dimuat adalah semua produk BBM baik *white oil* maupun *black oil* dan *solvent*, namun tidak termasuk untuk angkutan produk BBM yang mengandung campuran etanol atau tangki lebih dari 10% Volume.

Tangki dari bahan *aluminium alloy* hanya boleh untuk angkutan produk *white oil* atau *solvent* jenis tertentu, tidak semua jenis *solvent* sesuai untuk diangkut menggunakan tangki aluminium. Tangki untuk angkutan *black oil* dan yang membutuhkan pemanasan seperti aspal/bitumen harus menggunakan tangki dari bahan *steel*. Tabel 2.1 merupakan ketentuan bahan sesuai dengan volume tangki.

Tabel 2.1 Kesesuaian bahan dengan kapasitas tangki (Pertamina, n.d.)

	Volume Tangki (l)			
	40000	32000	24000	16000
Bahan Tangki	<i>Aluminium alloy</i>	<i>Aluminium alloy</i>	<i>Aluminium alloy</i>	<i>Aluminium alloy/Mild Steel</i>
	Volume Tangki (l)			
	15000	10000	8000	5000
Bahan Tangki	<i>Mild Steel</i>	<i>Mild Steel</i>	<i>Mild Steel</i>	<i>Mild Steel</i>

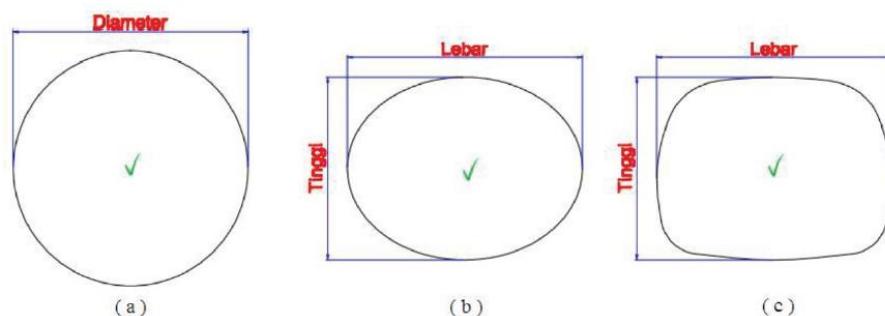
Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 16.

Tangki kapasitas 16 KL tidak disarankan menggunakan material *Aluminium Alloy* dikarenakan biaya investasi yang tangki lebih tinggi daripada Mild Steel, kecuali untuk mobil tangki yang dilengkapi dengan *dispensing system*. Beberapa jenis *solvent* dan etanol atau methanol kadar tinggi harus menggunakan tangki dan aksesoris yang sesuai dari bahan *Stainless steel*.

### 2.3.2. Persyaratan Konstruksi Tangki (Pertamina, n.d.)

Tangki harus dirancang dan dibuat sesuai dengan persyaratan teknis, dengan bahan logam pilihan dan ketebalan tangki yang memperhitungkan rentang suhu terendah dan tertinggi saat operasi, dengan persyaratan minimum harus terpenuhi. Bentuk tangki yang diperbolehkan adalah tangki dengan penampang melintang berbentuk lingkaran, elips atau semi-elips. Tangki dengan penampang melintang berbentuk kotak (ujung runcing) tidak boleh digunakan karena tangki keselamatan saat terjadi hantaman fluida.

Total volume nominal mobil tangki yang diizinkan adalah 5000 liter, 8000 liter dan kelipatannya. Khusus untuk kompartemen 4000 liter dapat dibuat mobil tangki dengan kombinasi kompartemen 8000 liter. Tabel 2.2 berikut merupakan tabel kapasitas mobil tangki.



Gambar 2.12 Contoh penampang (a) Lingkaran, (b) Elips, (c) Semi-Elips

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 17.

Kapasitas total kompartemen tangki adalah kapasitas nominal kompartemen ditambah dengan ruang kosong. Ruang kosong tangki dengan pengisian secara *bottom loading* adalah minimal 227 liter. Tangki harus dirancang untuk mampu menanggung beban sesuai kapasitas maksimal jenis produk yang akan dimuat. Untuk tangki angkutan multi-produk, tangki harus

dirancang untuk angkutan kapasitas volume terbesar, dengan *density* terberat dari jenis produk yang akan diangkut. Untuk konfigurasi tangki yang mengandung kompartemen 4 KL dan 8 KL maka kompartemen 4 KL diletakkan dibelakang head truck dan 8 KL dibagian belakang.

Tangki, perlengkapan bongkar / muat, dan bagian struktur lainnya harus dirancang untuk tahan dari kemungkinan terjadinya rembesan / bocor (selain gas muatan yang ke luar dari pressure vent) yang disebabkan oleh tegangan statis dan dinamis dalam kondisi pengangkutan normal serta tangki minimum. Tangki dan semua pengencangnya (*fastening*) serta *chassis* tangki, pada kondisi bermuatan penuh harus mampu menyerap semua beban yang timbul dari:

- Searah lintasan depan belakang sebesar dua kali total massa;
- Arah samping sebesar satu kali total massa.
- Arah vertikal ke atas sebesar total massa.
- Arah vertikal ke bawah sebesar dua kali total massa.

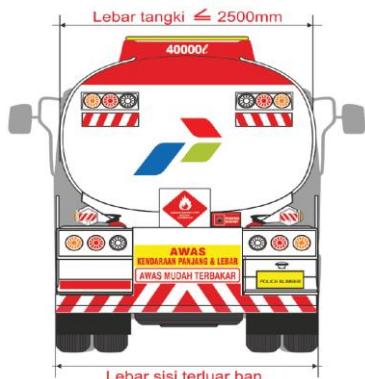
Lebar maksimal tangki tidak boleh melebihi lebar keseluruhan dinding terluar ban di sisi kiri dan kanan dan tidak melebihi 2.500 mm seperti terlihat pada Gambar 2.13.

Tabel 2.2 Konfigurasi kompartemen yang diijinkan (Pertamina, n.d.)

Konfigurasi	Kapasitas
Kelipatan 5 KL	
1 × 5 KL	5 KL
2 × 5 KL	10 KL
3 × 5 KL	15 KL
Kelipatan 8 KL	
1 × 8 KL	8 KL
2 × 8 KL	16 KL
3 × 8 KL	24 KL
XS4 × 8 KL	32 KL
5 × 8 KL	40 KL

Kombinasi	
2 × 4 KL	8 KL
2 × 4 KL + 1 × 8 KL	16 KL
4 × 4 KL	16 KL
2 × 4 KL + 2 × 8 KL	24 KL
4 × 4 KL + 1 × 8 KL	24 KL
6 × 4 KL	24 KL
2 × 4 KL + 3 × 8 KL	32 KL
2 × 4 KL + 4 × 8 KL	40 KL

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 17.



Gambar 2.13 Batasan lebar tangki dan ban

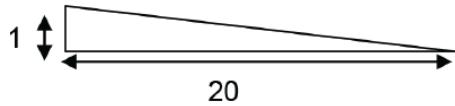
Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 18.



Gambar 2.14 Ilustrasi batas ketinggian

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 19.

Pembongkaran muatan harus dapat dilakukan sampai habis pada setiap kompartemen, walaupun mobil tangki parkir di area pembongkaran yang miring (kemiringan area bongkar tidak lebih dari 1 banding 20 pada semua arah). Kemiringan 1/20 merupakan perbandingan selisih tinggi bagian depan dan belakang tangki dengan panjang tangki. Gambar ilustrasi dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 2.15 Ilustrasi kemiringan 24tangki

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 19.

Tangki yang dirancang dengan konstruksi bagian bawah dimiringkan (*inclined slope*) dari depan ke belakang untuk semi-trailer, harus memiliki kemiringan minimal 3% dan dipasang *internal valve* pada bagian belakang dasar di setiap kompartemen. Jika tangki dirancang dengan konstruksi leher bertingkat, pada dasar tangki dipasang siring (*sump*), kemiringan siring seminimal mungkin. Jumlah muatan tersisa dalam kompartemen, termasuk pada pipa bongkar/muat dan valve, pada tangki aluminium adalah maksimal 0.02% Volume dan pada tangki steel adalah maksimal 0,04% Volume dari kapasitas nominal kompartemen tersebut.

### 2.3.3. Bahan Tangki (Pertamina, n.d.)

Tangki harus dibuat dari bahan logam yang tahan terhadap *brittle fracture* dan *stress corrosion cracking* dengan batas suhu 0°C sampai dengan +70°C. Bahan tangki yang boleh digunakan harus dengan kualitas material sesuai standar industri migas untuk tangki mobil dan harus mendapat persetujuan dari PERTAMINA meliputi *Mild steel* dan *Aluminium Alloy*.

Bahan tangki atau lapisan pelindung dalam tangki yang kontak langsung dengan isi muatan tidak boleh dari bahan yang dapat menimbulkan reaksi berbahaya dengan isi muatan, senyawa berbahaya, atau dapat melemahkan bahan tangki. Jika kontak antara isi muatan dengan bahan tangki menyebabkan penipisan bahan tangki, ketebalan bahan tangki harus

dingkatkan. Tambahan ketebalan bahan tangki ini tidak masuk dalam perhitungan untuk ketebalan tangki terhadap tekanan.

Rasio  $Re/Rm$  melebihi 0,85 tidak diperbolehkan untuk penggunaan steel pada konstruksi pengelasan tangki (Pertamina, n.d.).

$Re$  = *apparent yield strength* untuk *steel* dengan *yield point* pasti atau dijamin 0,2% *proof strength* untuk *steel* dengan *yield point* tidak pasti (1% untuk *austenitic steel*)

$Rm$  = *tensile strength*. Nilai yang ditunjukkan dalam sertifikat inspeksi material harus digunakan sebagai dasar penentuan rasio ini.

Untuk bahan *steel*, *elongation fracture* dalam persen (%) tidak boleh kurang dari:

$$\frac{10000}{Tensile\ Strength\ (N/mm^2)} \quad (2.16)$$

Untuk *fine-grained steel* minimal 16% dan untuk *steel* lainnya minimal 20%, Untuk bahan *Aluminium alloy*, *elongation fracture* harus minimal 24% dan *tensile strength* minimal 275 Mpa.

#### 2.3.4. Ketebalan Tangki (Pertamina, n.d.)

##### 2.3.4.1. Perhitungan Ketebalan Tangki (Pertamina, n.d.)

Nilai *Pressure* yang menjadi dasar menghitung ketebalan tangki tidak boleh lebih rendah dari *calculation pressure*, tapi *stress statis* dan *dinamis* harus juga diperhitungkan, dan jika perlu termasuk *stress* berikut:

- Dalam hal tangki dibuat dengan self-supporting member (langsung tanpa tambahan rangka bawah sebagai chassis), badan tangki harus dirancang untuk tahan terhadap stress yang berasal dari sumber lainnya.
- Titik pada tangki dan pengencangnya (fastening) yang paling besar menerima stress tidak boleh melampai nilai  $\sigma$  yang didefinisikan pada persamaan (2.17).

*Calculation pressure* berikut berlaku untuk angkutan BBM:

- Tangki dengan *gravity-discharge* untuk angkutan produk BBM dengan *vapour pressure* tidak melebihi 110 kPa pada suhu 50°C harus dirancang untuk *calculation pressure* atau

- dua kali *static pressure* untuk produk tetapi tidak kurang dari dua kali *static pressure* untuk air.
- *Pressure-filled* atau *pressure-discharge* pada tangki untuk angkutan produk BBM dengan *vapour pressure* tidak melebihi 110 kPa pada suhu 50°C dan harus dirancang untuk *calculation pressure* setara 1,3 kali dari filling pressure dan discharge pressure.

Pada *test pressure*, *stress statis* dan *dinamis*  $\sigma$  pada titik yang paling besar menerima *stress* tidak boleh melebihi batasan tiap bahan berikut di bawah ini. Penambahan harus dibuat untuk titik-titik yang dihitung akan mengalami pelemahan karena pengelasan. Untuk semua logam dan *alloy*, *stress*  $\sigma$  pada *test pressure* harus lebih rendah dari nilai terkecil dari formula berikut (Pertamina, n.d.).

$$\sigma \leq 0.75Re \text{ atau } \sigma \leq 0.5 Rm \quad (2.17)$$

Dimana:

$Re$  = *apparent yield strength* untuk *steel* dengan *yield point* pasti; atau dijamin 0,2% *proof strength* untuk *steel* dengan *yield point* tidak pasti (1 % untuk *austenitic steel*)

$Rm$  = *tensile strength*

Nilai  $Re$  dan  $Rm$  yang akan digunakan harus menspesifikasikan nilai minimum sesuai dengan material standar. Jika tidak ada material standar untuk logam dan *alloy*, nilai  $Re$  dan  $Rm$  yang digunakan harus dengan persetujuan PERTAMINA.

#### 2.3.4.2. Ketebalan Minimal Tangki (Pertamina, n.d.)

Ketebalan tangki tidak boleh kurang dari nilai terbesar yang ditentukan oleh formula berikut (Pertamina, n.d.).

$$e = \frac{P_t D}{2\sigma\lambda} \quad (2.18)$$

$$\alpha = \frac{P_c D}{2\sigma\lambda} \quad (2.19)$$

Dimana:

$e$  = ketebalan minimum tangki (mm)

$P_t$  = test pressure (Mpa)

$P_c$  = calculation pressure dalam (Mpa)

$D$  = internal diameter dari tangki (mm)

$\sigma$  = stress yang diizinkan, (N/mm<sup>2</sup>)

$\lambda$  = koefisien < 1

Untuk perlindungan tangki terhadap kerusakan atas benturan lateral dan belokan tajam, ketebalan dinding tangki tidak boleh kurang dari Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Ketebalan minimal dinding tangki (Pertamina, n.d.)

	Maksimal radius kurva tangki (m)	$\leq 1.80$	$> 1.80$
	Kapasitas tangki atau kompartemen (KL)	di bawah 8,0	8,0 atau lebih
Minimal ketebalan dinding tangki	<i>Stainless steel</i> (mm)	2,5	3,0
	<i>Mild steel</i>	3,0	4,0
	<i>Aluminium alloy</i>	4,0	5,0
	<i>Aluminium</i> murni 99,8% (mm)	6,0	8,0

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 22.

Khusus tangki *Aluminium Alloy*, untuk penguatan tangki, ketebalan minimum dinding tangki ditingkatkan 1,0 mm atau lebih pada bagian bawah / perut tangki, ujung dinding tangki, partisi kompartemen dan bagian lainnya yang diperhitungkan dapat menjadi titik lemah. Direkomendasikan untuk dinding tangki menggunakan material selebar mungkin sehingga dapat meminimalkan jumlah pengelasan sambungan material untuk membentuk badan tangki yang dapat menjadi sumber *stress*.

Lebar material plat pada dasarnya sudah standar dari produsen baja/alumunium. Untuk dapat memaksimalkan penggunaan material, pembuatan tangki dapat dilakukan dengan metode 3-4 plat disambung memanjang/longitudinal sepanjang tangki untuk kemudian dilakukan 1x *rolling* sehingga hanya ada 3-4 las longitudinal disepanjang tangki. Untuk dapat menggunakan metode ini diperlukan alat *roll* yang sangat panjang (12-14 meter).

Apabila terdapat banyak pengelasan baik searah badan tangki maupun melintang, untuk membuat tangki maka agar dapat diyakini kekuatan pengelasannya dan tidak ada cacat las seperti *crack*, *pit*, *porous*, dll, harus dilakukan NDT radiografi 100% pada setiap pengelasan *circumference*.

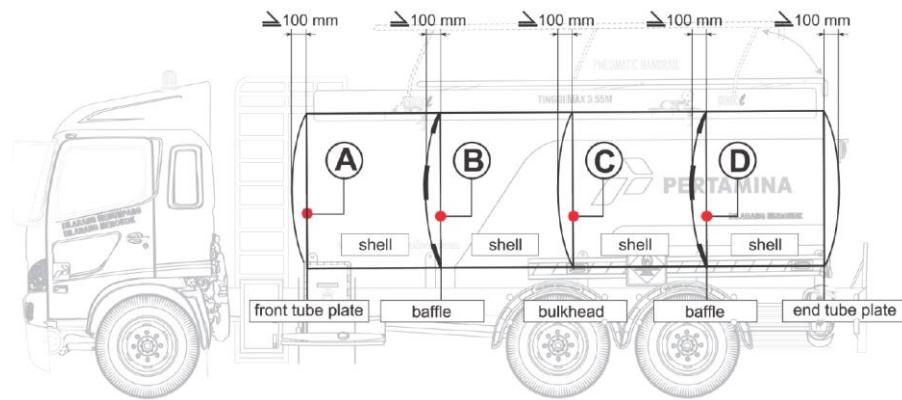
### **2.3.5. Penguat Struktur, Partisi Kompartemen, dan Penahan Guncangan (Pertamina, n.d.)**

Untuk tangki dengan penampang lingkaran, elips atau semi-elips dengan maksimum radius kurva 2.0 meter, tangki harus dilengkapi dengan penguat berupa partisi kompartemen/*bulkhead* dan atau penahan guncangan (*Baffles*) seperti pada Gambar 2.16 untuk memberikan tambahan perlindungan terhadap kerusakan atas benturan lateral dan belokan tajam.

Volume antara *Baffles* dengan *Baffles* atau partisi kompartmen adalah maksimal 7.500 liter dan jarak antara kedua *Baffles* tidak lebih dari 1,75 meter. Volume kompartemen yang dapat tidak dilengkapi *Baffles* adalah maksimal 7.500 liter.

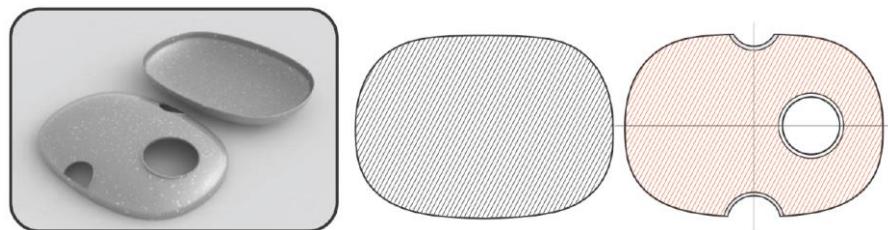
*Bulkhead*, partisi kompartemen, dan *Baffles* harus jenis material yang sama dengan yang digunakan untuk dinding tangki. Ketebalan ujung / *bulkhead* tangki, partisi kompartemen atau *Baffles* harus minimal sama dengan ketebalan minimal dinding tangki. *Bulkhead*, partisi kompartmen dan *Baffles* terbuat dari pelat utuh tanpa sambungan. *Bulkhead*, partisi kompartemen dan *Baffles* harus dicembungkan, dengan kecembungan minimal 100 mm dipasang menghadap ke depan, kecuali bulkhead belakang menghadap ke belakang, untuk mengurangi dampak gesekan dari penggereman.

Posisi lubang inspeksi *Baffles* letaknya harus berbeda antar kompartemen. Untuk tangki dengan jumlah kompartemen genap maka posisi *Baffles* selang seling di bagian kiri dan kanan. Untuk tangki dengan jumlah kompartemen ganjil maka posisi *Baffles* selang seling antara di bagian kanan, tengah dan kiri. *Chassis* (dudukan tangki) harus tanpa sambungan pada kendaraan *rigid* (tronton) dan dibolehkan menggunakan sambungan pada kendaraan *trailer* (panjang). Sambungan *chassis* pada kendaraan *trailer* tidak boleh berada berdekatan dengan sumbu roda dan harus diberikan penguat tambahan.



Gambar 2.16 Ilustrasi kecembungan minimal partisi kompartemen dan *Baffles* (A) *Bulk head* depan, (B) *Baffles*, (C) Partisi kompartemen, (D) *Bulk head* belakang

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 24.

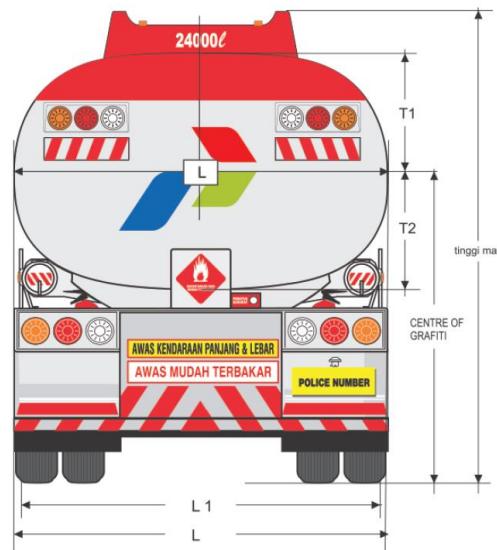


Gambar 2.17 Ilustrasi area *Baffles*. Bagian kiri adalah luasan penampang tangki dan bagian kanan adalah luasan *Baffles*

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 24.

### 2.3.6. Stabilitas Mobil Tangki (Pertamina, n.d.)

Ketinggian titik pusat gravitasi (*centre of gravity*) pada setengah panjang tangki dari jalan, tidak boleh melebihi 95% terhadap jarak lebar antara titik-titik terluar dari ban di sisi kiri dengan ban di sisi kanan yang menyentuh tanah pada sumbu yang sama. Distribusi berat dari total massa pada sumbu semi-trailer tidak boleh melebihi 60% dari nominal total massa kendaraan dengan muatan penuh dan disesuaikan dengan ketentuan lalu lintas angkutan barang untuk distribusi berat pada sumbu semi-trailer.



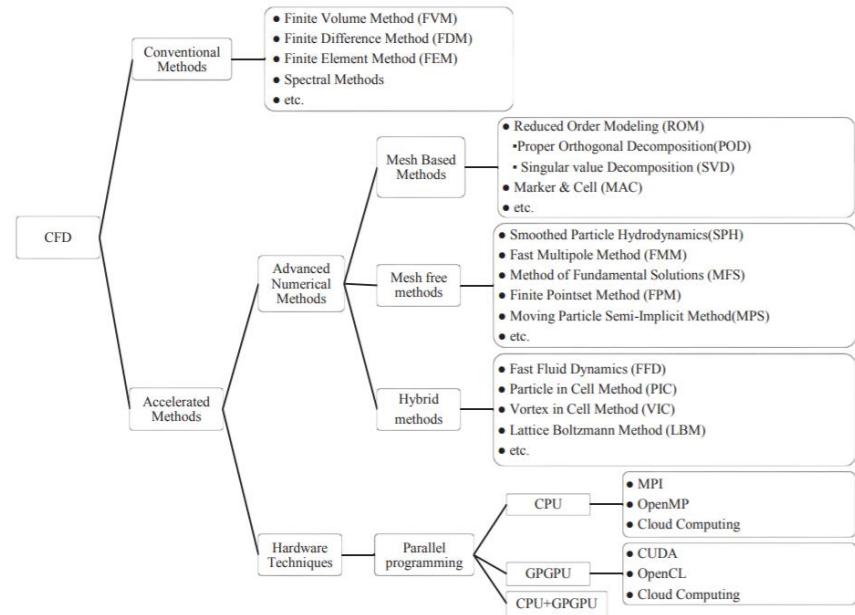
Gambar 2.18 Ilustrasi *center of gravity*

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 77.

### 2.4. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Dalam melakukan *flow simulation* atau simulasi aliran, metode yang biasanya digunakan adalah *computational fluid dynamics* (CFD). *Computational fluid dynamics* adalah alat yang efektif untuk mensimulasikan aliran fluida dan perpindahan panas secara numerik (Hosain & Fdhila, 2015). Dalam CFD, Sebagian besar metode menyelesaikan persamaan Navier-Stokes baik dalam pendekatan Eulerian atau Lagrangian. Selain itu, beberapa metode menyelesaikan persamaan Boltzmann daripada persamaan Navier-Stokes (Hosain & Fdhila, 2015). Gambar 2.19 merupakan klasifikasi dari variasi metode yang ada di CFD.

Metode konvensional atau *conventional methods* adalah metode yang paling banyak digunakan karena memiliki keakuratan tinggi dan biasanya digunakan dalam *software* komersial. Meskipun demikian, metode konvensional tergolong sangat lambat dalam hal waktu komputasi dimana hal tersebut hampir mustahil untuk menyelesaikan permasalahan yang besar dalam waktu yang cepat (Hosain & Fdhila, 2015).



Gambar 2.19 Klasifikasi hirarki dari berbagai metode CFD

Sumber: Hosain, M. L., & Fdhila, R. B. (2015). Literature Review of accelerated CFD Simulation Methods towards Online Application. *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015*, p. 3308.

Metode konvensional yang paling popular di CFD adalah *Finite Volume Method* (FVM), *Finite Element Method* (FEM), *Finite Difference Method* (FDM), dan *Spectral Methods*. Metode ini menyelesaikan persamaan nonlinear Navier-Stokes yang merupakan persamaan yang mengatur CFD dan menggambarkan kekekalan massa, momentum, dan energi. Metode ini biasanya memiliki kompleksitas komputasi  $O(N^3)$  dimana  $N$  adalah jumlah derajat kebebasan (Hosain & Fdhila, 2015). Berikut merupakan persamaan Navier-Stokes *Incompressible*.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (2.20)$$

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i \quad (2.21)$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \phi + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2.22)$$

Dimana:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (2.23)$$

$$\phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.24)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_r}{\partial x_r} \delta_{ij} \right) \quad (2.25)$$

$$e = c_v T \quad (2.26)$$

$$h = c_p T \quad (2.27)$$

$$p = \rho R T \quad (2.28)$$

### **3. METODE PENELITIAN**

#### **3.1.Jenis Penelitian**

Penulisan ini menggunakan metode penelitian kuantitatif berdasarkan perhitungan dan eksperimen menggunakan simulasi menggunakan *software-software* yang ada. Melalui metode ini diharapkan dapat menganalisa efek *sloshing* pada tangki bahan bakar minyak kapasitas 16000 liter untuk variasi desain penampang yang berbeda-beda. Penelitian kuantitatif ini sifatnya menggunakan model matematis, teori-teori, atau hipotesis yang berkaitan dalam permasalahan yang ada.

Penelitian ini berfokus pada simulasi dan perhitungan dari efek *sloshing* yang terjadi saat truk melakukan akselerasi, penggereman, dan belok di tikungan. Penentuan parameter-parameter dari simulasi juga perlu dilakukan untuk memastikan simulasi yang dijalankan dapat mendekati kondisi nyata. Oleh karena itu, dibutuhkan model matematis, teori-teori, atau hipotesis yang dapat digunakan untuk menganalisa sebagai pendukung dalam penelitian ini.

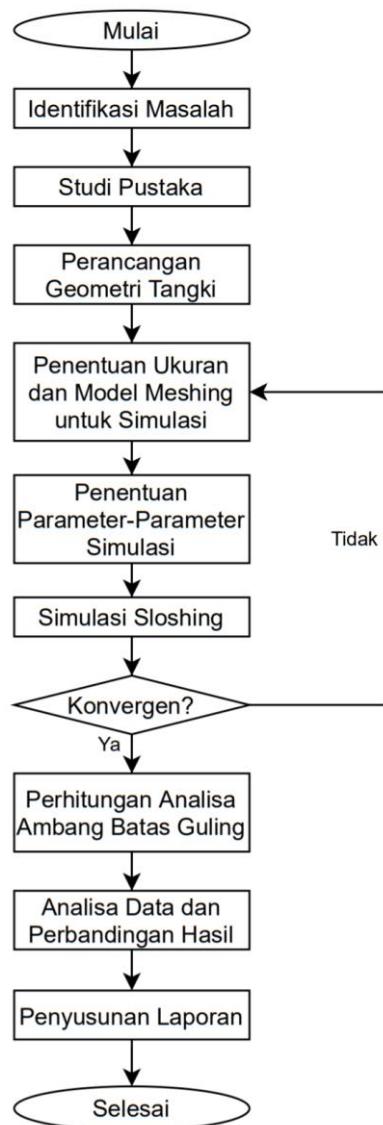
#### **3.2.Pendekatan Penelitian**

Langkah-langkah penelitian berdasarkan diagram alir penelitian pada

Gambar 3.1 akan dijelaskan sebagai berikut.

##### **3.2.1. Identifikasi Masalah**

Tahap awal sebelum melakukan penelitian adalah mengidentifikasi permasalahan yang ada dan merumuskan permasalahan. Hal tersebut bertujuan untuk memfokuskan penelitian yang akan dilakukan ke arah permasalahan yang hendak diselesaikan atau diperbaiki. Pada penelitian ini, identifikasi masalah berfokus pada efek *sloshing* truk tangki dengan kapasitas 16000 liter dalam melakukan akselerasi, penggereman, dan tikungan menggunakan bentuk penampang yang berbeda-beda.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

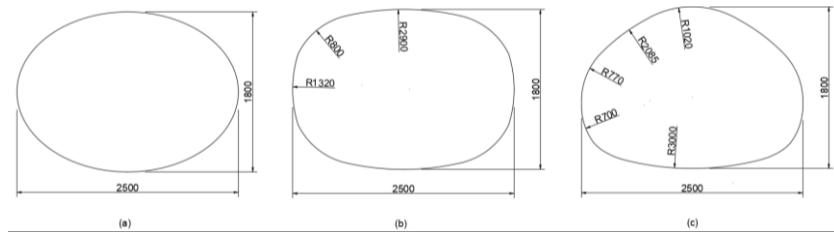
### 3.2.2. Studi Pustaka

Setelah mengetahui permasalahan yang ada, langkah selanjutnya adalah melakukan studi pustaka melalui jurnal, buku, dan sumber-sumber lainnya untuk mengumpulkan informasi dan data-data yang dapat membantu dalam penelitian.

### 3.2.3. Perancangan Geometri Tangki

Penelitian ini berfokus pada desain penampang yang cocok untuk meredam efek *sloshing* pada saat akselerasi, penggereman, dan tikungan. Terdapat 3 desain penampang yang akan digunakan untuk mencari desain

yang paling optimal dalam meredam efek *sloshing* pada saat tikungan. Ketiga jenis penampang tersebut antara lain: elips, semi-elips, dan *reuleaux*. Berikut merupakan desain penampang tangki yang akan digunakan dalam simulasi *sloshing*.



Gambar 3.2 Desain penampang tangki berbentuk (a) elips, (b), semi-elips semi-elips, dan (c) *reuleaux*

Geometri tangki yang dibuat untuk penelitian ini akan menyesuaikan dengan standar tangki yang ada berdasarkan standar dari Pertamina. Oleh karena itu, desain tangki akan dilengkapi dengan *baffle* mengacu pada subbab 2.3.5. dalam hal ukuran, material, dan konfigurasi. Desain dan geometri tangki akan dibuat menggunakan *software Autodesk Inventor Professional 2022*.

### 3.2.4. Penentuan Ukuran dan Model Meshing

Sebelum melakukan simulasi, diperlukan ukuran dan model *meshing* yang sesuai. Ukuran *meshing* yang terlalu besar akan menyebabkan hasil simulasi yang kurang akurat, sedangkan ukuran *meshing* yang terlalu kecil akan membuat durasi simulasi menjadi lama. Oleh karena itu, model dan ukuran *meshing* perlu ditentukan untuk mengoptimalkan simulasi. Terdapat 3 cara untuk menentukan ukuran dan model *meshing*.

- Menggunakan model dan ukuran *meshing* dari sumber referensi seperti jurnal penelitian.
- Mencari model dan ukuran *meshing* dengan melakukan simulasi berdasarkan jurnal yang ada. Apabila hasil simulasi memiliki *error* yang cukup tinggi, maka model *meshing* harus diubah dan ukuran *meshing* harus diperkecil.

- Membandingkan hasil simulasi berdasarkan ukuran *meshing* tertentu dengan kondisi aslinya. Apabila hasil simulasi memiliki *error* yang cukup tinggi terhadap kondisi aslinya, maka model *meshing* harus diubah dan ukuran *meshing* harus diperkecil.

Dalam membandingkan hasil perhitungan dengan hasil simulasi, batasan *error* yang digunakan untuk menentukan validasi perhitungan adalah 5%. Apabila batasan *error* yang didapatkan adalah lebih besar dari 5%, maka perhitungan dan simulasi perlu ditinjau lebih lanjut hingga mendapatkan nilai *error* yang lebih kecil dari 5%.

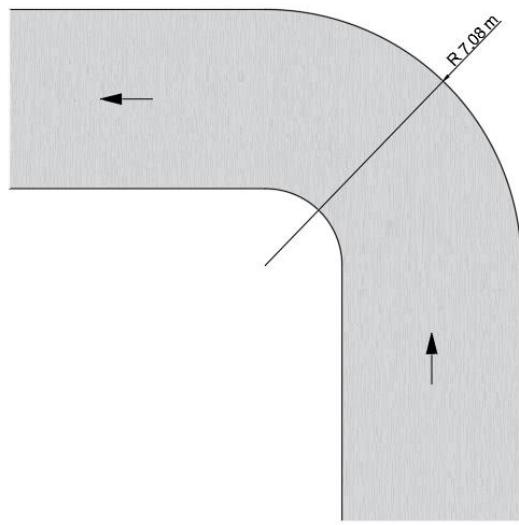
### 3.2.5. Penentuan Parameter-Parameter Simulasi

Terdapat banyak parameter yang harus dilakukan sebelum menjalankan simulasi untuk memastikan kondisi pada saat simulasi mendekati kondisi asli. Beberapa parameter yang harus ditentukan antara lain sebagai berikut.

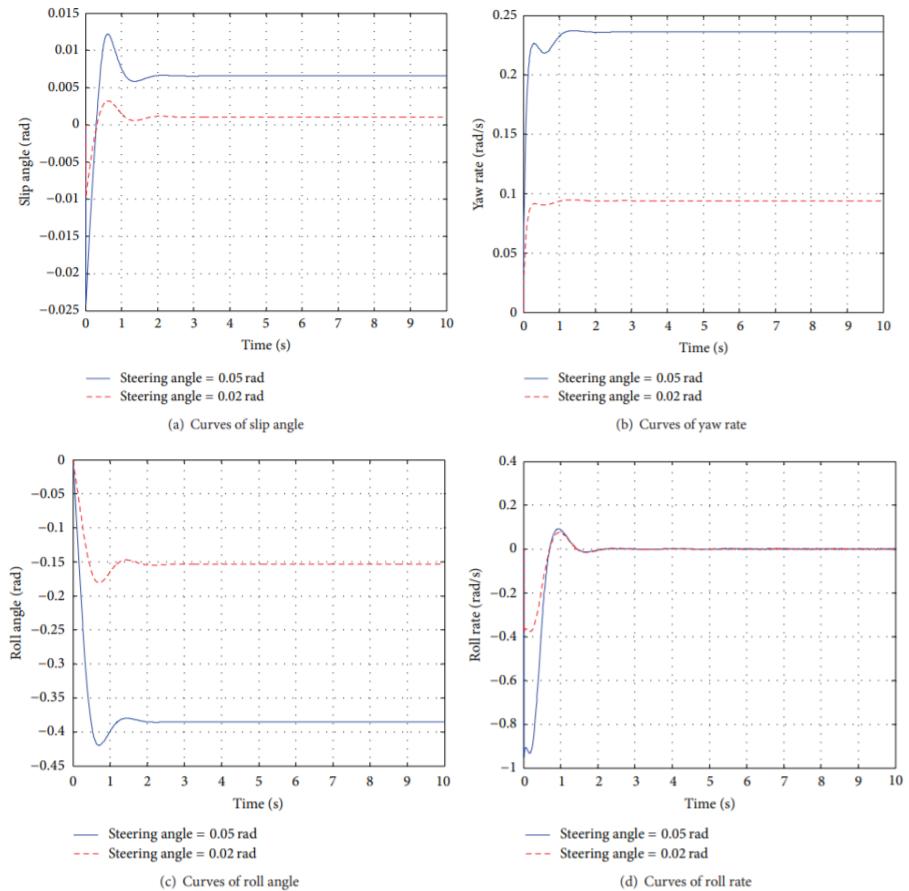
- Tipe Analisis : *Internal flow*
- *Time-Dependent* : Ya
- Fluida : Udara (gas), etanol (*liquid*)
- Tekanan : 101325 Pa
- Temperatur : 30°C
- Percepatan Gravitasi : 9.81 m/s<sup>2</sup>
- Output Parameter : *Torque & Force*

Selain parameter-parameter di atas, *layout* tikungan juga akan ditentukan untuk digunakan sebagai jalur pada saat simulasi *sloshing*. Setiap simulasi yang dilakukan akan menggunakan jalur yang sudah ditentukan tersebut. Adapun *layout* tikungan yang akan digunakan adalah pada Gambar 3.3.

(Li, Zheng, Wang, & Cheng, 2013) meneliti stabilitas kendaraan dengan kapasitas beban truk 20%, 50%, dan 80%. Gambar 3.4 menunjukkan stabilitas kendaraan truk dengan kapasitas 50% pada *steering angle step test*. Stabilitas kendaraan dianalisa dengan mengidentifikasi *slip angle*, *yaw rate*, *roll angle*, dan *roll rate*. Melalui Gambar 3.4, diperoleh kendaraan mulai stabil setelah 3 detik.



Gambar 3.3 Layout tikungan sebagai jalur truk tangki saat simulasi



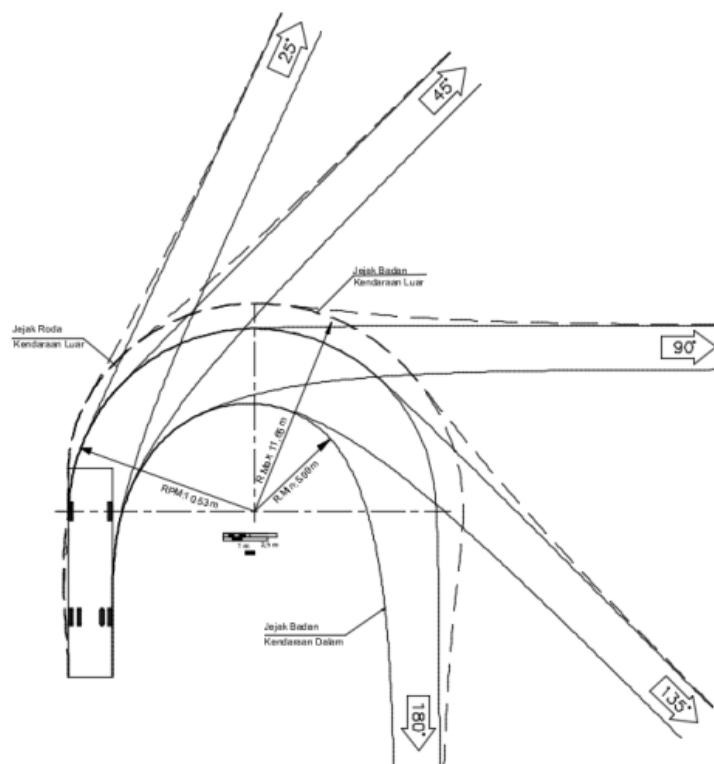
Gambar 3.4 Stabilitas kendaraan truk normal dengan kapasitas beban 50%

Sumber: Li, X. S., Zheng, X. L., Wang, Y. Y., & Cheng, Z. Q. (2013). Study on

Driving Stability of Tank Trucks Based on Equivalent Trammel Pendulum

for Liquid Sloshing. *Hindawi Publishing Corporation*, p. 11.

Oleh karena itu, dalam simulasi *sloshing* pada penelitian ini, truk tangki akan melakukan akselerasi aksial sebelum melakukan manuver pada tikungan. Setelah itu, truk akan melakukan pengereman dan manuver tikungan  $90^\circ$  kemudian dilanjutkan akselerasi aksial, lalu berhenti. Radius tikungan yang digunakan adalah 7.08 m, yang merupakan radius putar dari truk 3 sumbu pada sudut belok kendaraan  $90^\circ$  (Lawalata & Rahman, 2020). Berdasarkan Gambar 3.4, maka simulasi yang dilakukan harus minimal menganalisa hingga 3 detik setelah truk tangki melakukan berbagai manuver.



Gambar 3.5 Jejak kendaraan pada berbagai variasi sudut

Sumber: Lawalata, G. M., & Rahman, F. (2020). Kendaraan Desain dan Radius Putar untuk Desain Geometrik Jalan di Indonesia. *Jurnal Jalan-Jembatan*, p. 54.

Radius putar minimum merupakan kelengkungan jalur dari ban luar yang dapat mampu ditempuh kendaraan dalam melakukan putaran atau tikungan. Gambar 3.5 merupakan jejak dari kendaraan berdasarkan sudut beloknya. Pada Gambar 3.5, radius putar minimum dilambangkan dengan tulisan RPM.

### **3.2.6. Simulasi *Sloshing***

Setelah *meshing* dan parameter simulasi sudah diberikan, langkah berikutnya adalah simulasi *sloshing*. Simulasi ini dilakukan menggunakan software *Solidworks* 2021 dengan fitur *flow simulation*. Simulasi akan dinyatakan berhasil apabila diperoleh hasil yang konvergen. Apabila hasil simulasi divergen, maka akan dilakukan perubahan ukuran *meshing*, model *meshing*, *boundary*, dan parameter-parameter simulasi lain. Hal tersebut akan terus dilakukan hingga diperoleh hasil yang konvergen. Data konvergen yang diperoleh dari simulasi selanjutnya akan diuji atau dibandingkan untuk menjamin kevalidan hasil simulasi.

### **3.2.7. Perhitungan Analisa Ambang Batas Guling**

Dari hasil simulasi *sloshing* akan diperoleh parameter-parameter seperti gaya *sloshing*, dan torsi. Parameter-parameter tersebut akan digunakan sebagai *input* dalam menghitung ambang batas guling. Perhitungan yang dilakukan akan mengacu pada subbab 2.1.4.

### **3.2.8. Analisa Data dan Perbandingan Hasil**

Setelah dilakukan berbagai pengujian, data kemudian dianalisa dan dibandingkan. Analisa yang dilakukan meliputi analisa hasil simulasi, analisa *meshing*, analisa parameter-parameter simulasi, hingga analisa ambang batas guling. Hasil perhitungan ambang batas guling akan dianalisa untuk mengetahui stabilitas guling kendaraan akibat efek *sloshing*.

### **3.2.9. Penyusunan Laporan**

Setelah melakukan seluruh alur penelitian, seluruh hasil perhitungan, analisa, simulasi, dan pengujian akan disusun ke dalam laporan tugas akhir.

## **3.3. Metode dan Prosedur Pengumpulan Data**

Metode pengumpulan data atau cara yang digunakan dalam mengumpulkan sumber data dilakukan dengan studi pustaka, simulasi, dan studi lapangan.

a. Studi Pustaka

Dalam memperoleh data-data, diperlukan studi pustaka untuk memperoleh referensi-referensi yang berhubungan dengan permasalahan. Studi pustaka diperoleh dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, dan literatur-literatur lainnya.

b. Perhitungan dan Simulasi

Berdasarkan sumber dan referensi yang diperoleh, simulasi dapat dilakukan menggunakan *software* tertentu. Dari simulasi yang dilakukan, akan diperoleh hasil simulasi berupa data angka, grafik, visual, dan animasi. Dari hasil simulasi tersebut, selanjutnya data dapat dianalisa sebagai materi penelitian ini. Selain simulasi, perhitungan ambang batas guling juga akan dilakukan untuk mengetahui stabilitas guling kendaraan.

c. Studi Lapangan

Data-data mengenai truk tangki bahan bakar diperoleh berdasarkan kondisi lapangan. Dalam pengambilan data dimensi truk tangki bahan bakar, pengamatan akan dilakukan pada truk tangki yang sebenarnya. Proses desain penampang truk tangki bahan bakar juga akan mempertimbangkan kondisi asli dan menggunakan referensi dari bentuk truk tangki bahan bakar dari beberapa perusahaan.

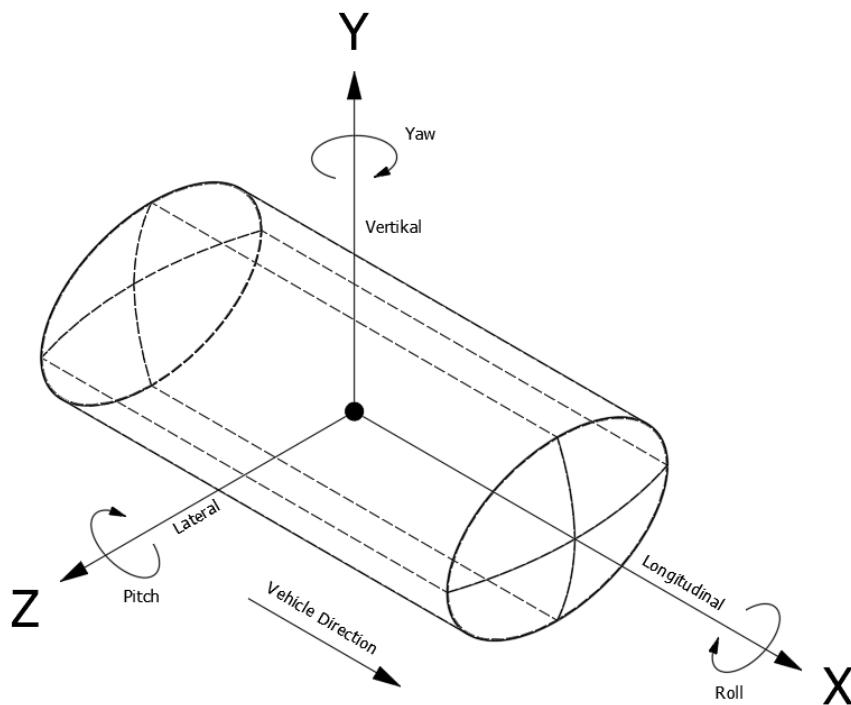
### **3.4. Metode Analisa Data**

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode analisis isi (*Content Analysis*). Dalam analisis ini akan dilakukan proses memilih, membandingkan, menggabungkan dan memilah berbagai pengertian hingga ditemukan yang relevan. Setelah ditemukan data-data yang relevan, maka dapat dilakukan perhitungan dan analisa menggunakan teori-teori yang ada.

## 4. ANALISA DATA

### 4.1. Perancangan Geometri Tangki

Dalam penelitian ini, terdapat 3 geometri tangki yang digunakan dalam simulasi *sloshing*. Ketiga desain tangki yang digunakan mengacu pada standar dan persyaratan truk tangki bahan bakar dari PT Pertamina. Oleh karena tangki bahan bakar yang digunakan adalah tangki dengan kapasitas 16000 liter, maka berdasarkan Tabel 2.2, konfigurasi yang digunakan adalah  $2 \times 8000$  L. Ketiga desain penampang dari tangki bahan bakar akan mengacu pada Gambar 3.2. Dalam perancangan desain dan geometri tangki, terdapat orientasi dan beberapa istilah yang perlu ditetapkan. Gambar 4.1 menunjukkan orientasi yang digunakan dalam perancangan tangki dan simulasi *sloshing*.



Gambar 4.1 Orientasi dan istilah yang digunakan dalam perancangan dan simulasi

Berdasarkan Gambar 4.1, sumbu X merupakan arah longitudinal, dimana arah tersebut merupakan arah gerak dari truk tangki. Arah samping, yaitu sumbu Z, disebut arah lateral, sedangkan sumbu Y merupakan arah vertikal. Momen yang terjadi pada sumbu longitudinal disebut gerak *roll*, sedangkan momen pada sumbu lateral disebut gerak *pitch*, dan momen pada sumbu vertikal disebut gerak *yaw*.

#### 4.1.1. Tangki Model 0

Desain pertama adalah tangki model 0, yaitu tangki dengan penampang *ellipse* namun tidak menggunakan *baffle*. Tangki model 0 ini akan digunakan sebagai validasi perhitungan untuk simulasi *sloshing*. Dimensi tangki model ini memiliki panjang diagonal horizontal 2500 mm dan diagonal vertikal 1800 mm.

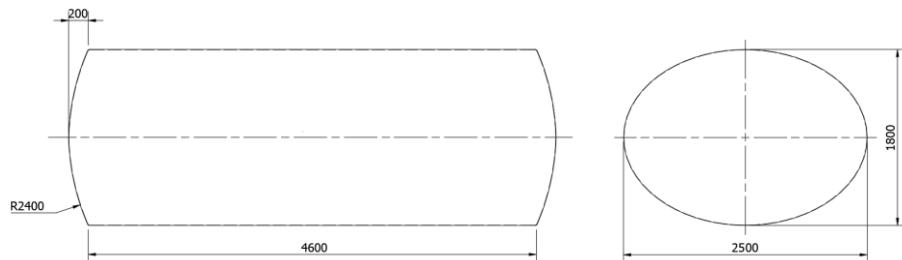
Berdasarkan subbab 2.3.2, ruang kosong tangki dengan pengisian secara *bottom loading* adalah minimal 227 liter (Pertamina, n.d.). Oleh karena itu, volume pada model tangki harus ditambahkan 227 liter sebagai persyaratan. Dengan dimensi tangki model 0 sebesar 2500 mm × 1800 mm, maka total luas penampang tangki adalah  $3,534,291.735 \text{ mm}^2$ . Luas tersebut diperoleh menggunakan *software Autodesk Inventor Professional 2022*. Dari data-data tersebut, maka dapat diperoleh panjang tangki model 0 adalah sebagai berikut.

$$V = L_a T$$

$$16 \times 10^9 \text{ mm}^3 + 227 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 3,534,291.735 \text{ mm}^2 \times T$$

$$T = 4591.302 \text{ mm} \approx 4600 \text{ mm}$$

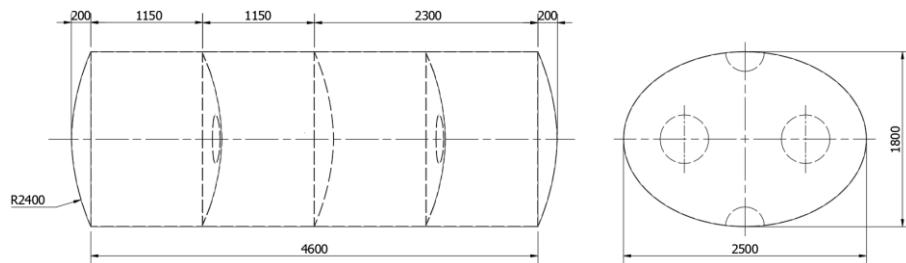
Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh panjang tangki model 0 adalah 4600 mm. Lebar tangki model 0 adalah 2500 mm, dimana hal tersebut telah memenuhi persyaratan PT Pertamina pada Gambar 2.13. Model tangki ini juga telah memenuhi persyaratan batas ketinggian, karena tinggi total dari tanah adalah 3050 mm (menggunakan tinggi rata-rata dari tanah ke *hitch* adalah 1250 mm). Jadi, dimensi tangki model 0 telah memenuhi persyaratan dari PT Pertamina. Berikut merupakan gambar dan dimensi dari tangki model 0.



Gambar 4.2 Desain tangki Model 0

#### 4.1.2. Tangki Model 1

Desain berikutnya adalah tangki model 1, dimana dimensi model ini sama persis dengan model 0, hanya saja model 1 menggunakan *baffle* yang mengacu pada standar PT Pertamina. Panjang tangki yang digunakan untuk model 1 adalah 4600 mm, panjang yang sama dengan model 0. Berikut merupakan gambar dan dimensi dari tangki model 1.



Gambar 4.3 Desain tangki Model 1

*Baffle* yang digunakan dalam tangki model 1 memiliki kecembungan 200 mm, dimana menurut persyaratan dari PT Pertamina, kecembungan minimal adalah 100 mm seperti pada Gambar 2.16. Jarak antar *baffle* pada model 1 dibuat sama, yaitu 1150 mm. Hal tersebut juga telah memenuhi persyaratan PT Pertamina seperti pada subbab 2.3.5. Standar dan persyaratan *baffle* dari PT Pertamina juga mengharuskan lubang pada *baffle* memiliki diameter minimal 400 mm. Pada model 1, ukuran lubang *baffle* adalah 500 mm dan luasan yang tidak dilubangi adalah 90.36%. Jadi desain tangki model 1 telah memenuhi standar dan persyaratan PT Pertamina.

#### 4.1.3. Tangki Model 2

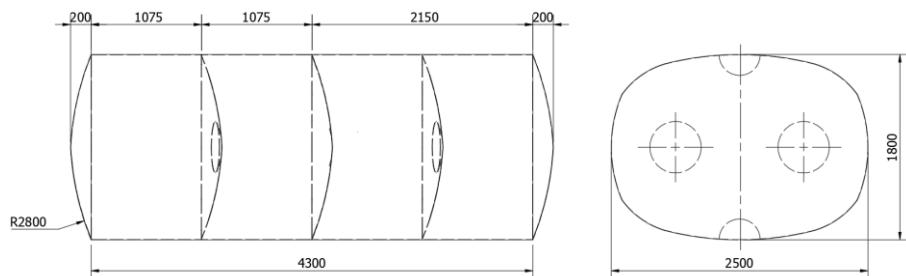
Model dari desain tangki 2 ini memiliki bentuk *semi-ellipse* dengan dimensi diagonal horizontal 2500 mm dan diagonal vertikal 1800 mm. Sama dengan tangki model 0 dan 1, volume pada model tangki harus ditambahkan 227 liter karena ruang kosong tangki dengan pengisian secara *bottom loading* adalah minimal 227 liter (Pertamina, n.d.). Dengan dimensi tangki model 0 sebesar 2500 mm × 1800 mm dan terdapat beberapa radius-radius kelengkungan sisi tangki seperti pada Gambar 4.4, maka total luas penampang tangki adalah  $3,820,299.427 \text{ mm}^2$ . Dari data-data tersebut, maka dapat diperoleh panjang tangki model 2 adalah sebagai berikut.

$$V = L_a T$$

$$16 \times 10^9 \text{ mm}^3 + 227 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 3,820,299,427 \text{ mm}^2 \times T$$

$$T = 4247.573 \text{ mm} \approx 4300 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, maka panjang tangki model 2 adalah 4300 mm. Lebar tangki model 2 telah memenuhi persyaratan dari PT Pertamina, yaitu lebar maksimum lebih kecil sama dengan 2500 mm seperti pada Gambar 2.13. Model tangki ini juga telah memenuhi persyaratan batas ketinggian, karena tinggi total dari tanah adalah 3050 mm (menggunakan tinggi rata-rata dari tanah ke *hitch* adalah 1250 mm). Berikut merupakan gambar dan dimensi dari tangki model 2.



Gambar 4.4 Desain tangki Model 2

*Baffle* pada tangki model 2 memiliki kecembungan yang sama dengan model 0 dan 1, yaitu 200 mm. Jarak antar *baffle* pada model 2 dibuat sama, yaitu 1075 mm. Hal tersebut juga telah memenuhi persyaratan PT Pertamina seperti pada subbab 2.3.5. Ukuran lubang *baffle* pada model 2 memiliki diameter 500 mm, dimana hal tersebut sudah memenuhi persyaratan dari PT Pertamina yang mengharuskan diameter lubang *baffle* minimal adalah 400 mm. Luasan bagian *baffle* model 2 yang tidak dilubangi adalah 91.01%. Jadi, dimensi tangki model 2 telah memenuhi persyaratan dari PT Pertamina.

#### 4.1.4. Tangki Model 3

Desain terakhir adalah tangki model 3, yaitu tangki dengan bentuk penampang *reuleaux*. Dimensi total dari model ini sama dengan tangki model 0 hingga 2, yaitu diagonal horizontal 2500 mm dan diagonal vertikal 1800 mm. Berdasarkan *software Autodesk Inventor Professional* 2022, diperoleh

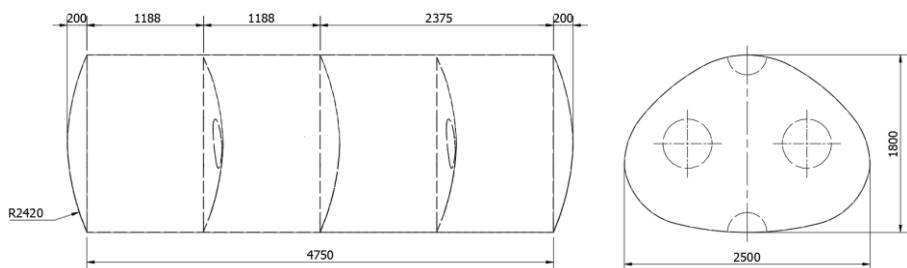
luas penampang dari tangki model 3 adalah  $3,439,177.260 \text{ mm}^2$ . Dengan menambahkan volume 227 liter pada tangki dengan alasan untuk memenuhi persyaratan dan standar dari PT Pertamina, maka diperoleh perhitungan sebagai berikut.

$$V = L_a T$$

$$16 \times 10^9 \text{ mm}^3 + 227 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 3,439,177.260 \text{ mm}^2 \times T$$

$$T = 4718.288 \text{ mm} \approx 4750 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas, maka panjang tangki model 2 adalah 4750 mm. Lebar tangki model 3 adalah 2500 mm, dimana hal tersebut telah memenuhi persyaratan dari PT Pertamina, yaitu lebar maksimum lebih kecil sama dengan 2500 mm seperti pada Gambar 2.13. Model tangki ini juga telah memenuhi persyaratan batas ketinggian, karena tinggi total dari tanah adalah 3050 mm (menggunakan tinggi rata-rata dari tanah ke *hitch* adalah 1250 mm). Berikut merupakan gambar dan dimensi dari tangki model 3.



Gambar 4.5 Desain tangki Model 3

Tangki model 3 memiliki kecembungan *baffle* sebesar 200 mm, dimana hal tersebut juga telah memenuhi persyaratan kecembungan minimum dari PT Pertamina, yaitu 100 mm. Jarak antar *baffle* pada model 3 dibuat sama, yaitu 1187.5 mm. Hal tersebut juga telah memenuhi persyaratan PT Pertamina seperti pada subbab 2.3.5. Lubang *baffle* pada model 3 memiliki dimensi sebesar 500 mm, yaitu 100 mm lebih besar dari persyaratan minimum PT Pertamina. Luasan bagian *baffle* model 3 yang tidak dilubangi adalah 90.17%. Jadi, dimensi tangki model 3 telah memenuhi persyaratan dari PT Pertamina.

Pada simulasi yang dilakukan, volume pengisian dari masing-masing tangki adalah 60% dari kapasitas maksimum tangki. Dengan melakukan perhitungan volume menggunakan *software Autodesk Inventor Professional* 2022, maka tinggi fluida dari masing-masing tangki dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Tinggi fluida pada masing-masing model tangki

Model	Panjang Tangki (Length)	Tinggi Fluida ( <i>Fill Depth</i> )	Pusat massa (CoG)
Model 1 ( <i>Ellipse</i> )	4600 mm	1028.361 mm	2116.381 mm
Model 2 ( <i>Semi-Ellipse</i> )	4300 mm	1026.494 mm	2093.893 mm
Model 3 ( <i>Reuleaux</i> )	4750 mm	937.811 mm	2046.442 mm

Setiap simulasi yang dilakukan, model tangki beserta tinggi fluida di dalamnya akan selalu mengacu pada Tabel 4.1. Model 0 hanya akan digunakan untuk validasi perhitungan, sedangkan model 1 sampai 3 akan dibandingkan untuk dicari model tangki mana yang paling efisien dalam meredam efek *sloshing*.

## 4.2. Parameter-Parameter Simulasi

Penentuan parameter-parameter untuk simulasi dipilih berdasarkan *software Solidworks* 2021, dimana parameter-parameter yang ditentukan akan terus digunakan dalam melakukan simulasi *sloshing*. Berikut merupakan parameter-parameter simulasi yang akan digunakan dalam simulasi *sloshing*.

### 4.2.1. Tipe Analisis

Data berikut merupakan parameter yang ditentukan pada bagian *analysis type* (tipe analisis) berdasarkan *flow simulation* di *software Solidworks* 2021.

- Tipe analisis: *Internal flow*
- Physical features:
  - *Heat Conduction in Solids* : Tidak
  - *Radiation* : Tidak

- *Time-Dependent* : Ya
- *Gravity*
  - X Component : *Dependedcy*
  - Y Component :  $-9.81 \text{ m/s}^2$
  - Z Component : *Dependedcy*
- *Free Surface* : Ya

Pemilihan parameter di atas didasarkan pada kondisi *sloshing* pada truk tangki. Pada saat fluida berada di dalam tangki, simulasi yang dilakukan menggunakan *internal flow* dengan memilih *boundary* fluida terdapat pada permukaan tangki. Simulasi yang dilakukan tidak melibatkan *heat conduction* pada bagian solid (tangki) serta *radiation* dianggap tidak ada pada simulasi ini. Selain itu, simulasi *sloshing* ini bersifat *time-dependent* yang berarti hasil dan kondisi simulasi akan selalu bergantung pada waktu yang ditentukan. Fluida pada simulasi ini dianggap sebagai *free surface* karena fluida di dalam tangki akan bebas bergerak saat tangki bergoyang. Nilai *gravity* untuk Y *component* adalah  $-9.81 \text{ m/s}^2$ , dimana angka tersebut merupakan nilai percepatan gravitasi di bumi. Untuk nilai *gravity* pada X dan Z *component* akan dibuat bervariasi bergantung pada jenis simulasi yang dilakukan.

#### 4.2.2. Fluida

Terdapat 2 jenis fluida yang digunakan, dimana salah satu fluida merupakan cairan (*liquid*) dan fluida yang lainnya merupakan gas. Jenis *liquid* yang digunakan pada simulasi ini adalah etanol dan gas yang digunakan adalah udara. Berikut merupakan *material properties* dari kedua etanol.

##### Etanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ; *Ethyl Alcohol*)

- Massa Jenis :  $0.7893 \text{ g/cm}^3$
- Viskositas :  $1.074 \text{ cP}$
- Berat Molekul :  $46.07 \text{ g/mol}$
- Titik Beku :  $-114.14^\circ\text{C}$
- Titik Didih :  $78.29^\circ\text{C}$

#### **4.2.3. Wall Conditions dan Initial Conditions**

Berikut merupakan parameter yang ditentukan pada bagian *wall conditions* dan *initial conditions* berdasarkan *flow simulation* di *software Solidworks 2021*.

- *Flow Type* : *Laminar and turbulent*
- *Default Wall Thermal Condition* : *Adiabatic wall*
- *Roughness* : 0 micrometer
- *Pressure* : 101325 Pa
- *Temperature* : 30°C
- *Turbulence Parameter*
  - *Turbulence Intensity* : 2%
  - *Turbulence Length* : 0.01506 m

Parameter *flow type* yang dipilih untuk simulasi *sloshing* adalah *laminar and turbulent* karena dalam simulasi ini mempertimbangkan aliran laminar dan turbulen. *Wall conditions* pada simulasi ini adalah *adiabatic wall* dengan kekasaran permukaan 0 mikrometer. *Adiabatic wall* dipilih dengan mempertimbangkan tidak ada kalor yang dapat keluar dan masuk tangki bahan bakar. Tekanan yang digunakan adalah tekanan atmosfer, yaitu 101325 Pa dan suhu 30°C mempertimbangkan temperatur rata-rata Indonesia.

Intensitas turbulen yang digunakan adalah 2%, dimana angka tersebut termasuk dalam kategori *medium-turbulence case* (CFD Online, 2022). Kategori tersebut digunakan dalam menganalisa aliran yang tidak terlalu kompleks seperti aliran dalam pipa, aliran ventilasi, dan aliran yang pelan (CFD Online, 2022). Oleh karena itu, nilai intensitas turbulen yang digunakan adalah 2% dengan panjang turbulen 0.01506 m.

#### 4.2.4. *Global Goals*

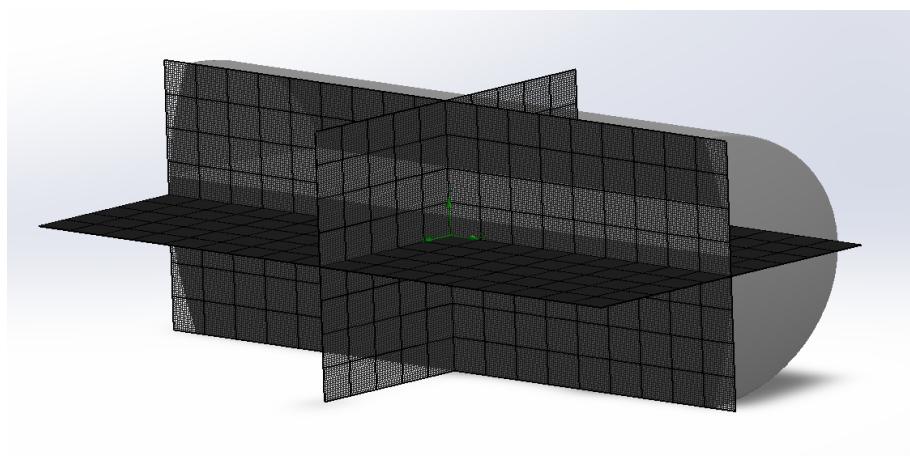
Dari beberapa parameter yang telah ditentukan, diperlukan beberapa *goals* yang harus dipilih. *Global goals* yang ditentukan bertujuan untuk memfokuskan hasil simulasi hanya pada *goals* yang dipilih. Tujuan utama dari *global goals* adalah untuk mendefinisikan tujuan akhir dan kriteria penting, *convergence control*, dan menyelesaikan kalkulasi. Adapun *global goals* yang dipilih dalam simulasi *sloshing* adalah sebagai berikut.

- Maximum Force (X)
- Maximum Force (Y)
- Maximum Force (Z)
- Maximum Torque (X)
- Maximum Torque (Y)
- Maximum Torque (Z)

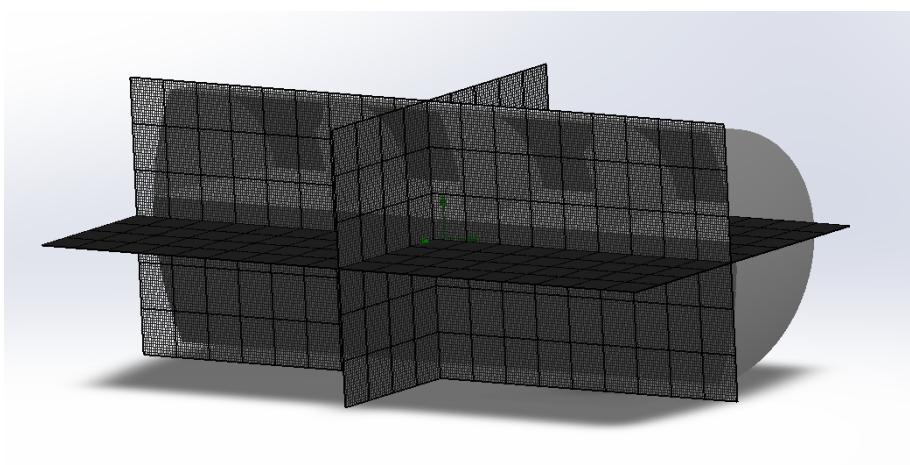
Dari global goals di atas akan didapatkan grafik dari masing-masing *global goals* terhadap waktu yang akan digunakan dalam analisa efek *sloshing*.

#### 4.2.5. *Mesh*

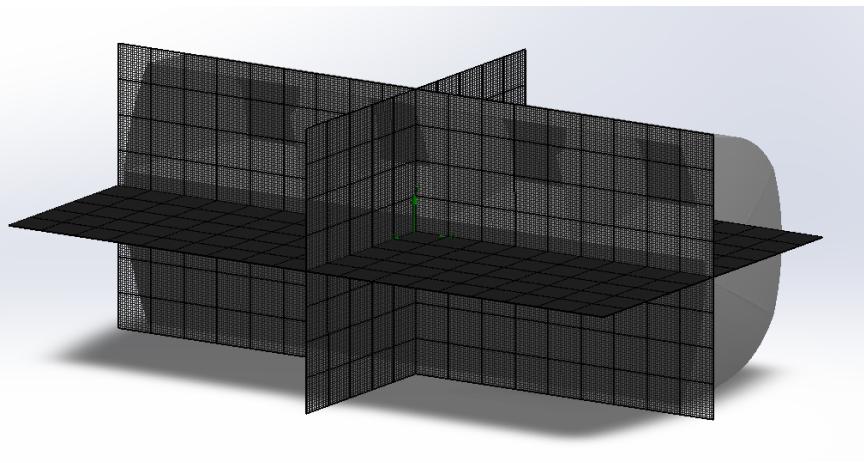
Jenis *mesh* yang digunakan dalam analisa simulasi *sloshing* ini menggunakan *global mesh* dengan tipe manual menggunakan *refinement level* 9. Dengan konfigurasi demikian, akan menghasilkan *meshing* persegi dengan ukuran  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ . Gambar 4.6 hingga Gambar 4.9 berikut merupakan *mesh* dari tangki untuk masing-masing model.



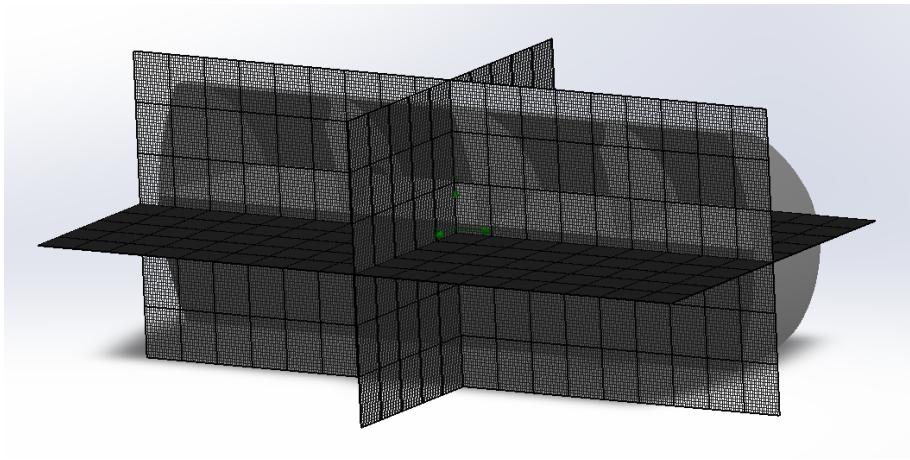
Gambar 4.6 *Mesh* pada tangki model 0



Gambar 4.7 *Mesh* pada tangki model 1



Gambar 4.8 *Mesh* pada tangki model 2



Gambar 4.9 *Mesh* pada tangki model 3

#### **4.2.6. Calculation Control**

Bagian terakhir dalam menentukan parameter simulasi adalah *calculation control*. Berikut merupakan parameter yang ditentukan pada bagian *calculation control* pada *flow simulation* berdasarkan *software Solidworks 2021*.

- *Criterion to stop* : *All satisfied*
- *Goals Criteria* : *Auto*
- *Transient Explorer* : *Periodic*
  - *Start* : 0 s
  - *Period* : 0.1 s
  - *Customize Parameter* : *Immiscible Air, Immiscible Ethanol, Volume Fraction of Air, Volume Fraction of Ethanol*

*Flow simulation* akan terus berjalan hingga hasil dinyatakan konvergen. Perameter *convergence criterion* atau *criterion to stop* yang dipilih adalah *all satisfied*, yang berarti simulasi akan berhenti ketika semua *goal* dinyatakan konvergen. Penentuan konvergen atau *goals criteria* dari simulasi *sloshing* adalah *auto*, yang berarti *solver* pada *software Solidworks* akan menentukan sendiri kapan saat untuk menghentikan perhitungan. Simulasi ini juga menggunakan *periodic transient explorer*, dimana fitur tersebut memungkinkan untuk melihat hasil simulasi secara periodik. *Transient explorer* dimulai pada detik ke 0 s dan menggunakan interval waktu 0.1 s. Adapun spesifikasi PC atau komputer yang digunakan untuk simulasi ini adalah sebagai berikut.

- *Windows edition* : *Windows 10 Pro Education*
- *Processor* : *Intel® Core™ i9-9900K CPU @3.60 GHz*
- *Installed Memory* : *64.0 GB (63.8 GB usable) – RAM*

#### **4.3. Validasi Perhitungan**

Berdasarkan parameter-parameter simulasi yang ada di atas, langkah selanjutnya adalah melakukan validasi perhitungan untuk memastikan hasil dari simulasi *sloshing*. Validasi perhitungan yang dilakukan pada penelitian ini terdapat

2 macam, yaitu menggunakan analisa *quasi-static* dan dengan membandingkan hasil simulasi dengan salah satu jurnal yang ada.

#### 4.3.1. Analisa *Quasi-Static*

Pada analisa *quasi-static*, hasil simulasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan dari *quasi-static*. Dengan menetapkan batas *error* sebesar 5%, maka apabila perbedaan hasil analisa *quasi-static* dengan hasil simulasi lebih besar dari 5%, maka parameter-parameter simulasi yang digunakan dianggap tidak akurat. Penggantian parameter-parameter simulasi akan terus dilakukan hingga mendapatkan batas *error* di bawah 5%. Pendekatan *quasi-static* tidak dapat diaplikasikan untuk mempelajari *sloshing* pada tangki yang dilengkapi dengan *baffle* (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014). Oleh karena itu, dalam validasi perhitungan menggunakan analisa *quasi-static*, model tangki yang digunakan adalah tangki model 0, yaitu tangki yang tidak dilengkapi dengan *baffle*.

Untuk analisa *quasi-static*, akan digunakan persamaan 2.2 dan 2.3 untuk menentukan gaya lateral dan gaya vertikal. Dengan menggunakan kecepatan longitudinal truk tangki sebesar 10 km/jam atau setara dengan 2.777 m/s dan radius belok sebesar 7.080 m seperti yang telah ditentukan pada subbab 3.2.5, dapat ditentukan percepatan lateral adalah sebagai berikut.

$$a_z = a_s = \frac{v_x^2}{r}$$

$$a_z = \frac{2.777^2}{7.080}$$

$$a_z = 1.08983 \text{ m/s}^2$$

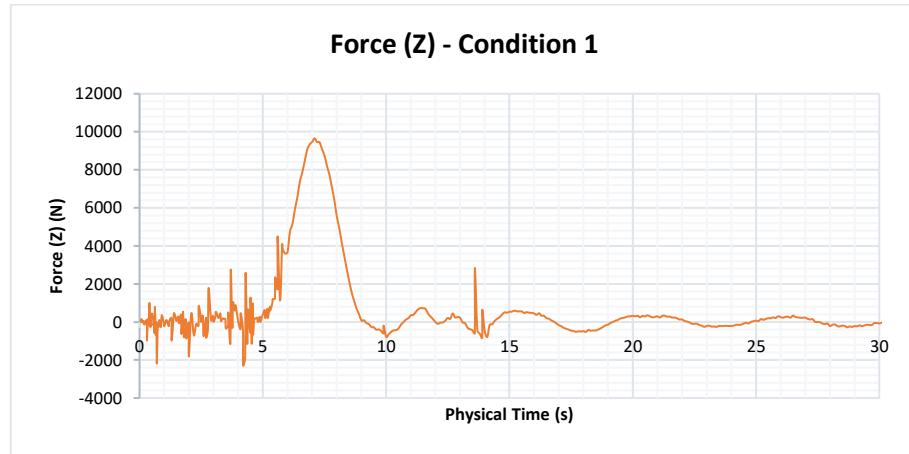
Percepatan lateral  $a_z$  dianggap sebagai percepatan sentripetal. Dengan menggunakan massa jenis dari etanol yaitu 789.3 kg/m<sup>3</sup>, maka diperoleh massa dari fluida di dalam tangki adalah 7897.7358 kg. Besar gaya lateral untuk tangki model 0 adalah sebagai berikut.

$$F_z = m a_z$$

$$F_z = 7897.7358 \times 1.08983$$

$$F_z = 8607.248 \text{ N}$$

Setelah diketahui besar gaya lateral berdasarkan analisa *quasi-static*, yaitu sebesar 8607.248 N, langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil perhitungan dengan hasil simulasi. Setelah dilakukan simulasi pada tangki model 0, Gambar 4.10 berikut merupakan grafik gaya lateral yang didapatkan.



Gambar 4.10 Gaya lateral pada tangki model 0

Dari grafik pada Gambar 4.10, bisa didapatkan nilai maksimum akibat efek *sloshing* adalah 9034.8543 N. Apabila kedua nilai dari hasil perhitungan dan hasil simulasi dibandingkan, maka didapatkan nilai *error* sebagai berikut.

$$e_t = \frac{9034.8543 - 8607.248}{8607.248} \times 100\%$$

$$e_t = 4.968\%$$

Setelah perhitungan gaya lateral, validasi perhitungan juga dilakukan pada gaya vertikal. Untuk perhitungan gaya vertikal dari *quasi-static*, percepatan yang digunakan adalah percepatan gravitasi. Berikut merupakan perhitungan *quasi-static* dari gaya vertikal.

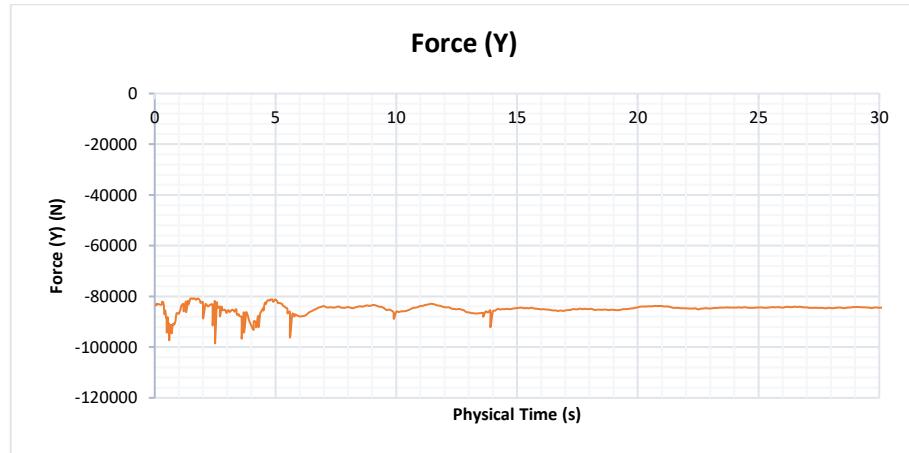
$$F_y = mg$$

$$F_y = 7897.7358 \times 9.81$$

$$F_y = 77476.7882 \text{ N}$$

Hasil perhitungan gaya vertikal *quasi-static* adalah 77476.7882 N, sedangkan hasil simulasi berdasarkan Gambar 4.11 menunjukkan gaya vertikal maksimum adalah 80747.3499 N. Dengan membandingkan hasil

perhitungan gaya vertikal *quasi-static* dengan hasil simulasi, diperoleh nilai *error* sebagai berikut.



Gambar 4.11 Gaya vertikal pada tangki model 0

$$e_t = \frac{80747.3499 - 77476.7882}{77476.7882} \times 100\% \\ e_t = 4.221\%$$

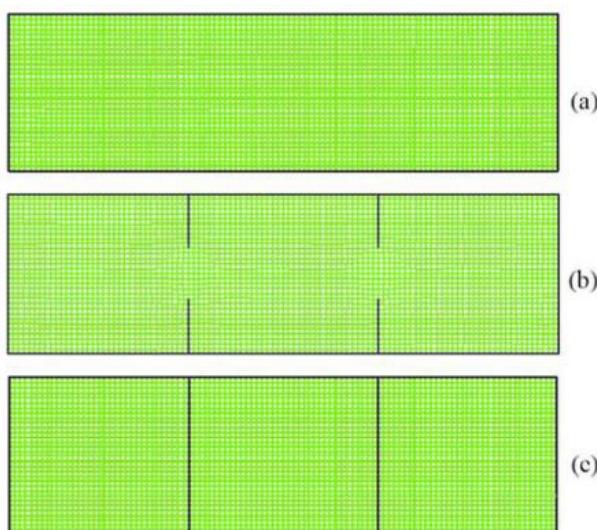
Dari perhitungan nilai *error* pada perhitungan *quasi-static* pada gaya vertikal maupun gaya vertikal yang dibandingkan dengan hasil simulasi, diperoleh angka di bawah 5%. Nilai tersebut berarti hasil simulasi tidak berbeda jauh dari analisa *quasi-static* karena di bawah dari nilai *error* yang telah ditentukan pada subbab 3.2.4. Oleh karena itu, ukuran *meshing*, parameter simulasi, dan kondisi-kondisi simulasi yang telah digunakan dalam validasi perhitungan dapat digunakan dalam simulasi selanjutnya.

#### 4.3.2. Perbandingan Dengan Metode Simulasi Lain

Selain analisa *quasi-static*, validasi perhitungan juga dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan simulasi lain dari salah satu jurnal dari (Cheli, D'Alessandro, Premoli, & Sabbioni, 2013). Dengan melakukan perbandingan dengan simulasi lain, terutama dengan metode simulasi yang berbeda, maka keakuratan dari hasil simulasi dapat diketahui. Metode simulasi yang digunakan pada jurnal tersebut adalah metode *Volume of Fluid* (VOF), sedangkan metode yang digunakan untuk simulasi pada penelitian ini adalah *Finite Volume Method* (FVM).

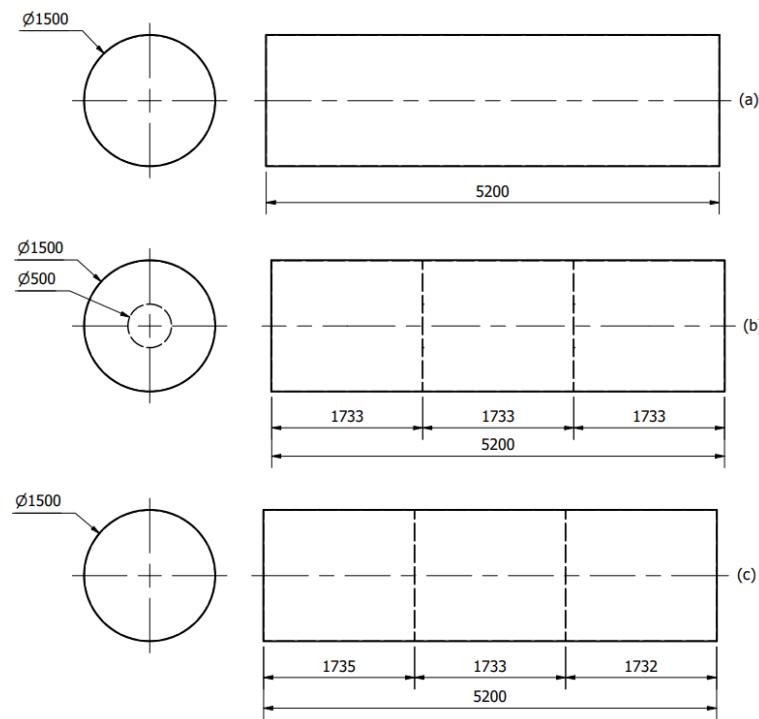
Pada validasi perhitungan yang dilakukan, terdapat 3 desain tangki yang dibuat menggunakan dimensi yang sama dengan jurnal dari (Cheli, D'Alessandro, Premoli, & Sabbioni, 2013). Desain tangki yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 1.5 m dan panjang tangki 5.2 m. Konfigurasi desain pertama adalah *cleanbore tank* (tangki yang tidak dilengkapi dengan *baffle*). Untuk konfigurasi desain kedua adalah tangki dengan *open baffle*, sedangkan konfigurasi ketiga adalah tangki dengan *closed baffle* atau kompartemen. Gambar 4.12 merupakan ketiga konfigurasi desain tangki yang digunakan pada jurnal (Cheli, D'Alessandro, Premoli, & Sabbioni, 2013) dan Gambar 4.13 merupakan desain tangki yang digunakan untuk simulasi validasi perhitungan.

Jenis *mesh* yang digunakan untuk simulasi ini adalah *square mesh* dengan ukuran *mesh* 25 mm × 25 mm. Level pengisian yang digunakan adalah 25% kapasitas maksimum untuk tiap konfigurasi tangki. Saat simulasi, kendaraan berjalan dengan kecepatan konstan 80 km/jam dan pada t = 1 s, kendaraan mulai mengerem dengan perlambatan puncak sekitar 7 m/s<sup>2</sup> (Cheli, D'Alessandro, Premoli, & Sabbioni, 2013). Gambar 4.14 merupakan grafik kecepatan dari simulasi yang dilakukan.

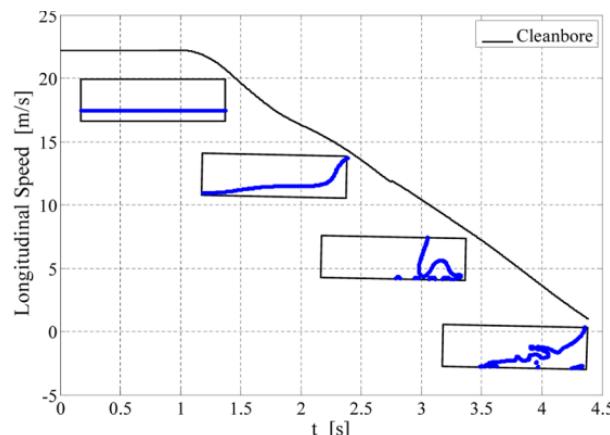


Gambar 4.12 Konfigurasi tangki (a) *cleanbore* atau tanpa *baffle*, (b) *open baffle*, (c) *closed baffle*

Sumber: Cheli, F., D'Alessandro, V., Premoli, A., & Sabbioni, E. (2013). Simulation of sloshing in tank trucks. *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, p. 5.



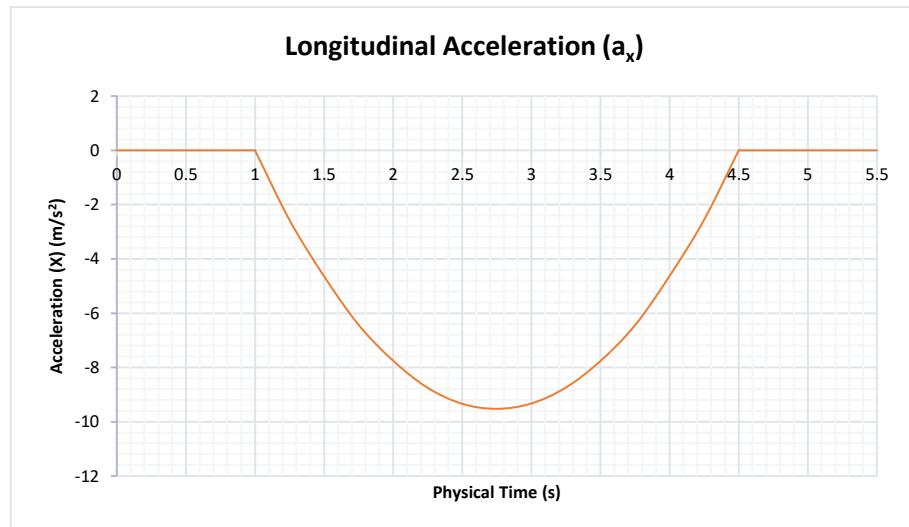
Gambar 4.13 Dimensi tangki yang digunakan untuk simulasi validasi perhitungan (a) *cleanbore*, (b) *open baffle*, (c) *closed baffle*



Gambar 4.14 Grafik perubahan kecepatan pada simulasi untuk validasi perhitungan

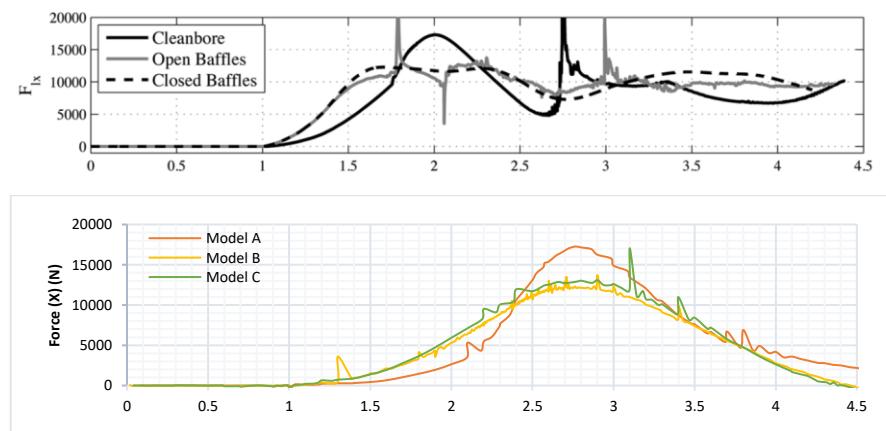
Sumber: Cheli, F., D'Alessandro, V., Premoli, A., & Sabbioni, E. (2013).  
Simulation of sloshing in tank trucks. *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, p. 11.

Dari grafik pada Gambar 4.14, maka apabila grafik kecepatan diubah menjadi grafik percepatan menggunakan derivatif, akan diperoleh grafik seperti pada Gambar 4.15 berikut.



Gambar 4.15 Grafik percepatan simulasi validasi perhitungan

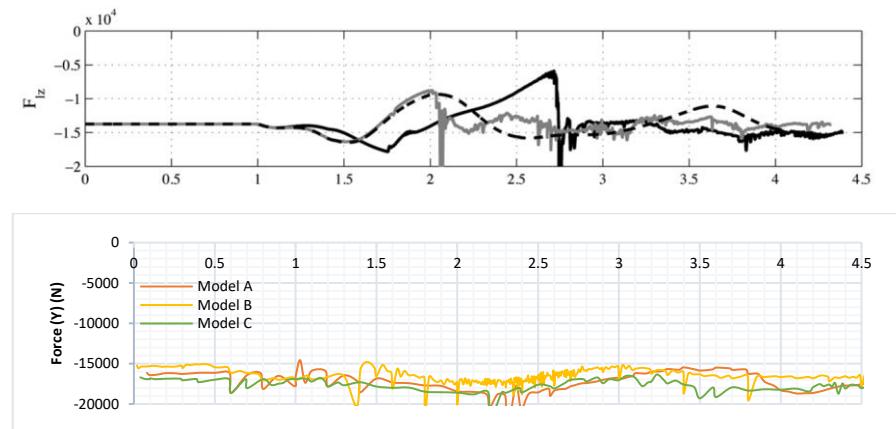
Semua kondisi simulasi akan disamakan sesuai dengan jurnal dari (Cheli, D'Alessandro, Premoli, & Sabbioni, 2013), namun parameter-parameter simulasi yang digunakan akan mengacu pada subbab 4.2. Setelah simulasi dilakukan, perbandingan hasil akan dilakukan. Perbandingan yang dilakukan adalah pada grafik gaya *sloshing* terhadap sumbu X, gaya *sloshing* terhadap sumbu Y, dan momen atau torsi terhadap sumbu Z. Gambar 4.16 merupakan perbandingan hasil simulasi pada grafik gaya *sloshing* terhadap sumbu X.



Gambar 4.16 Perbandingan gaya *sloshing* terhadap sumbu X

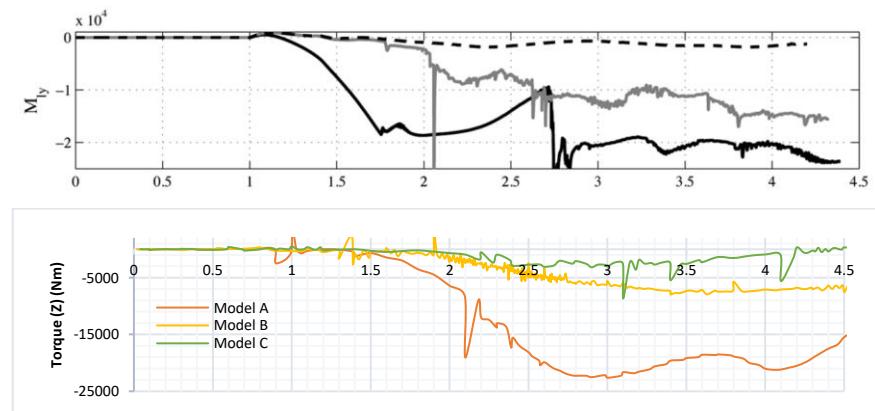
Dari grafik pada Gambar 4.16, dapat dilihat bahwa bentuk grafik simulasi menyerupai grafik dari jurnal (Cheli, D'Alessandro, Premoli, & Sabbioni, 2013). Gaya *sloshing* maksimum dari kedua grafik sama-sama menunjukkan nilai 17000 N untuk model A (*cleanbore*), 12000 N untuk model

B (*open baffles*), dan 13000 N untuk model C (*closed baffles*). Secara keseluruhan, terdapat beberapa perbedaan pada kedua grafik dikarenakan sedikit perbedaan akselerasi dan perbedaan metode, namun nilai maksimum dari kedua grafik adalah sama. Selain melakukan perbandingan hasil simulasi pada grafik gaya *sloshing* terhadap sumbu X, perbandingan juga dilakukan terhadap sumbu Y.



Gambar 4.17 Perbandingan gaya *sloshing* terhadap sumbu Y

Pada Gambar 4.17, karakteristik grafik sedikit berbeda, namun nilai gaya *sloshing* terhadap sumbu Y secara keseluruhan hampir sama. Besar gaya *sloshing* sumbu Y rata-rata pada kedua grafik adalah sekitar 15000 N. Perbandingan terakhir yang dilakukan adalah pada momen *sloshing* terhadap sumbu Z. Gambar 4.18 merupakan perbandingan momen *sloshing* terhadap sumbu Z.



Gambar 4.18 Perbandingan momen *sloshing* terhadap sumbu Z

Perbandingan antara kedua grafik pada Gambar 4.18 menunjukkan kesamaan karakteristik dari jurnal (Cheli, D'Alessandro, Premoli, & Sabbioni, 2013) dibandingkan dengan hasil simulasi. Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa tangki model A (*cleanbore*) pada kedua grafik memiliki gaya *sloshing* yang paling besar, yaitu sekitar 24000 N. Model B (*open baffles*) dan model C (*closed baffles*) memiliki gaya *sloshing* yang lebih kecil dibandingkan model A. Model B memiliki gaya *sloshing* yang lebih tinggi dibandingkan model C.

Dari kedua validasi perhitungan pada subbab 4.3.1 dan 4.3.2, dapat disimpulkan bahwa parameter-parameter simulasi yang digunakan pada subbab 4.2 dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada penelitian ini. Hal tersebut dikarenakan hasil simulasi menggunakan parameter tersebut memiliki hasil yang mendekati dengan analisa *quasi-static* dan simulasi dengan metode yang berbeda. Oleh karena itu, metode dan parameter simulasi tersebut dapat digunakan untuk mencari efek *sloshing*.

#### **4.4. Simulasi *Sloshing***

Dalam melakukan simulasi *sloshing*, analisa akan dibagi menjadi 2 bagian. Pada analisa simulasi yang pertama, ketiga model tangki akan diuji pada akselerasi yang berbeda-beda. Berbeda dengan analisa simulasi pertama, analisa simulasi kedua akan memvariasikan kecepatan pada saat di tikungan. Dari kedua analisa simulasi yang berbeda, dapat ditentukan model tangki yang dapat menahan efek *sloshing* pada saat akselerasi dan tikungan.

##### **4.4.1. Variasi Akselerasi**

Pada analisa simulasi yang pertama, akselerasi truk tangki akan divariasikan dalam 3 kondisi. Kondisi pertama adalah akselerasi ekstrim, kondisi kedua adalah akselerasi menengah, dan kondisi ketiga adalah akselerasi tidak ekstrim. Pada simulasi ini, truk tangki akan mengikuti *layout* jalan yang telah ditentukan pada Gambar 3.3.

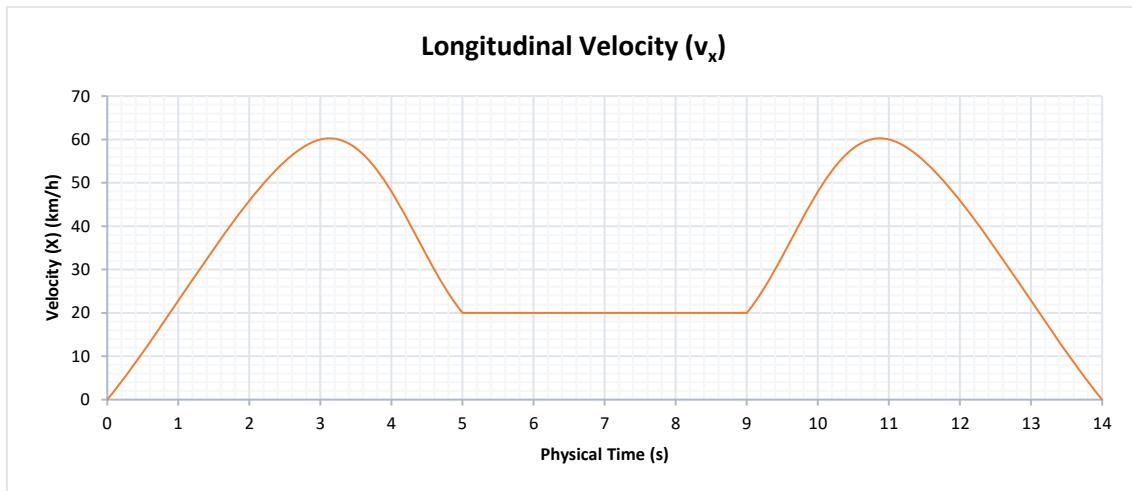
#### 4.4.1.1. Akselerasi Kondisi 1

Kecepatan dari kondisi pertama dapat dilihat melalui grafik pada Gambar 4.19. Pada kondisi pertama, truk tangki akan melakukan akselerasi dari kecepatan 0 km/jam ke 60 km/jam dalam waktu 3 detik. Setelah itu, truk akan melakukan deselerasi dari 60 km/jam ke 20 km/jam dalam waktu 2 detik. Ketika truk mencapai kecepatan 20 km/jam, truk tangki akan melakukan manuver tikungan dengan kecepatan longitudinal konstan sebesar 20 km/jam. Dengan radius belok sebesar 7.08 m, seperti yang sudah ditentukan di subbab 3.2.5, maka waktu yang diperlukan untuk belok adalah 4 detik.

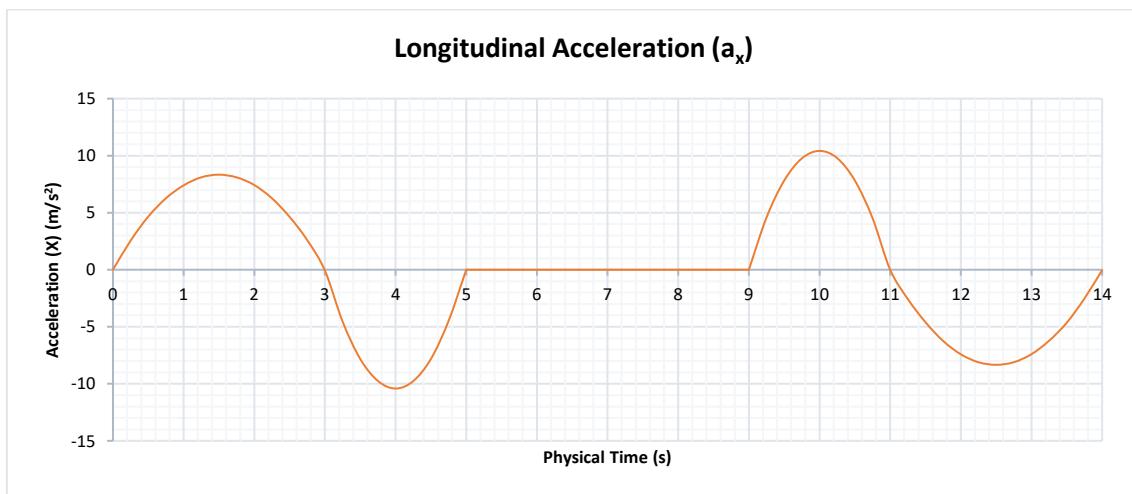
Akselerasi kembali dilakukan setelah truk tangki selesai melakukan manuver tikungan, dimana akselerasi yang dilakukan adalah dari kecepatan 20 km/jam ke 60 km/jam dalam 2 detik. Deselerasi terakhir dilakukan dengan mempertimbangkan penggereman mendadak pada truk tangki, yaitu dari kecepatan 60 km/jam hingga berhenti dalam 3 detik.

Setelah diketahui grafik kecepatan longitudinal seperti pada Gambar 4.19, dapat ditentukan grafik percepatan longitudinal dengan menggunakan derivatif. Dengan bantuan *software Solidworks 2021*, grafik percepatan longitudinal bisa didapatkan seperti pada Gambar 4.20. Selain grafik percepatan longitudinal, grafik percepatan lateral juga bisa ditentukan. Dengan menganggap percepatan sentripetal maksimum terdapat pada detik ke 7, maka diperoleh grafik percepatan lateral seperti pada Gambar 4.21. Kedua grafik percepatan longitudinal dan grafik percepatan lateral akan digunakan untuk parameter pada *flow simulation software Solidworks 2021* (*Dependency* untuk X dan Z *Component* pada subbab 4.2.1).

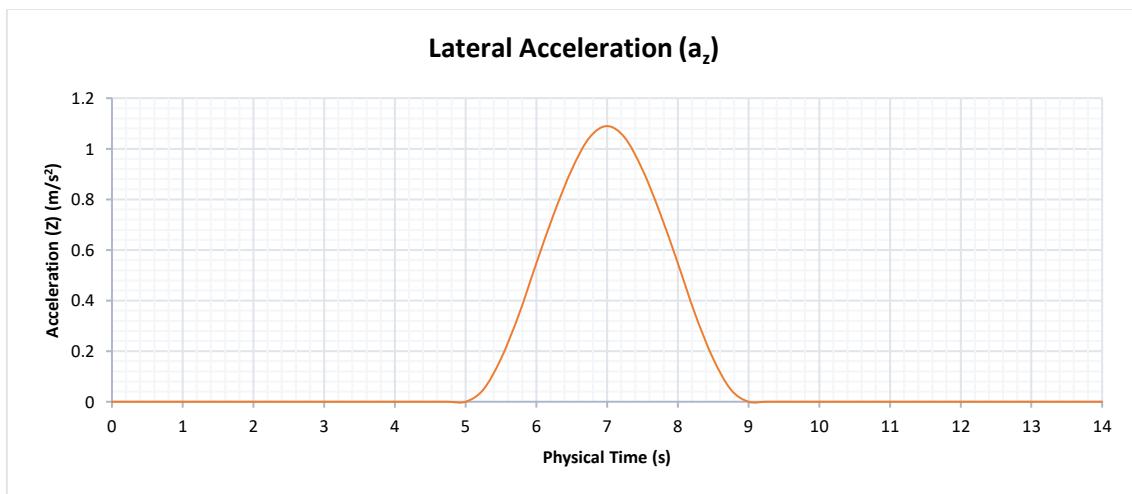
Dengan menggunakan parameter-parameter simulasi pada subbab 4.2 serta akselerasi berdasarkan kondisi 1, maka simulasi dapat dijalankan. Hasil simulasi dari kondisi 1 dapat dilihat pada Gambar 4.22 hingga Gambar 4.27.



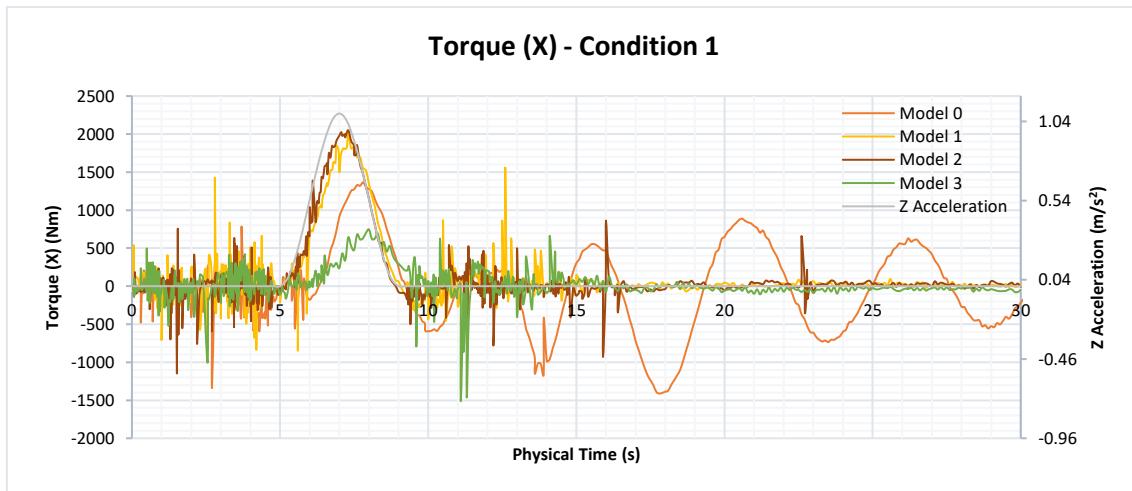
Gambar 4.19 Kecepatan longitudinal kondisi 1



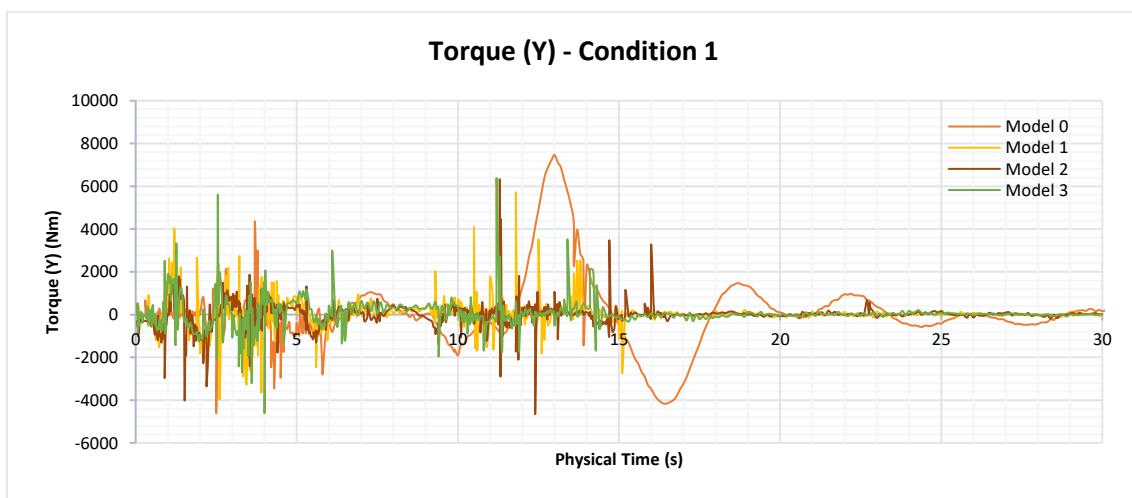
Gambar 4.20 Percepatan longitudinal kondisi 1



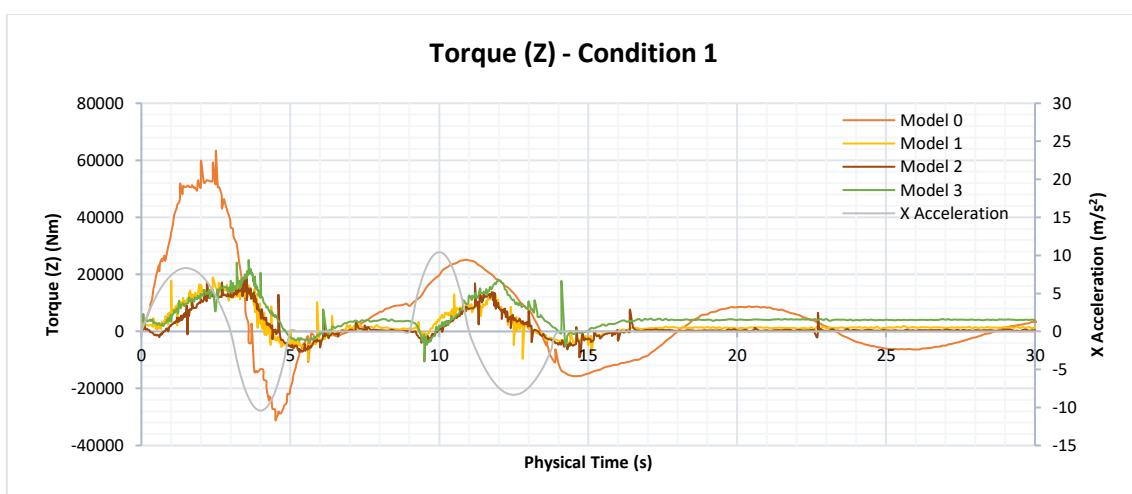
Gambar 4.21 Percepatan lateral kondisi 1



Gambar 4.22 Grafik torsi (X) kondisi 1



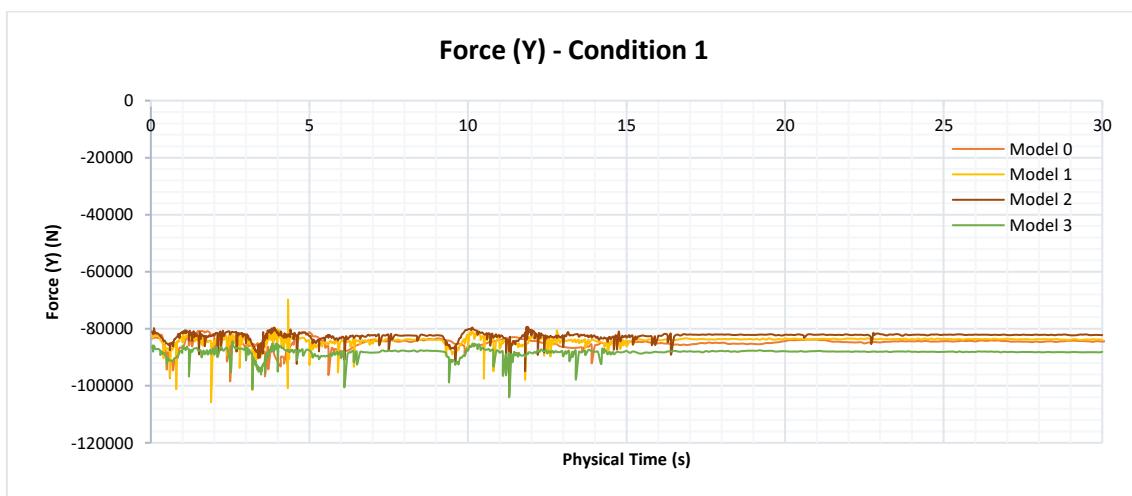
Gambar 4.23 Grafik torsi (Y) kondisi 1



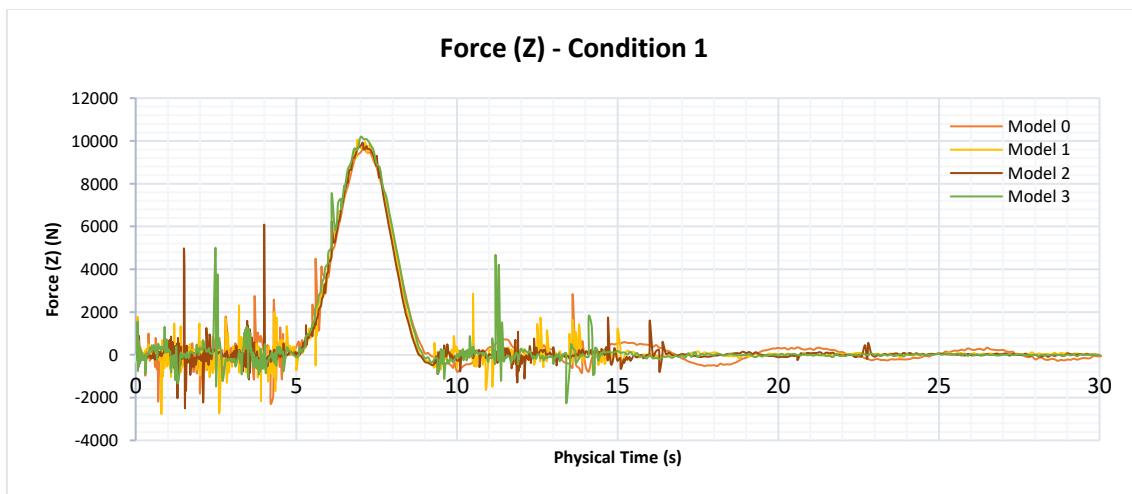
Gambar 4.24 Grafik torsi (Z) kondisi 1



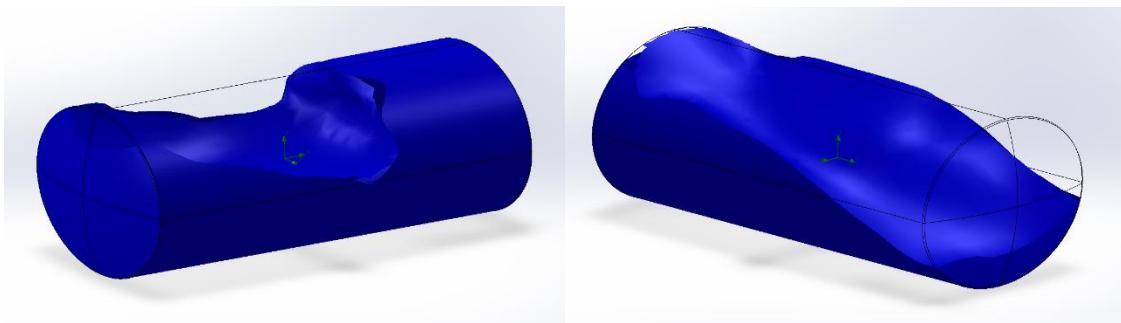
Gambar 4.25 Grafik gaya (X) kondisi 1



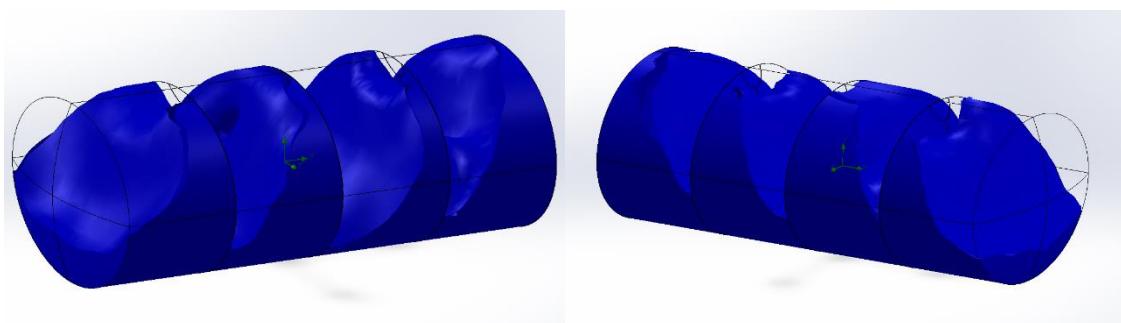
Gambar 4.26 Grafik gaya (Y) kondisi 1



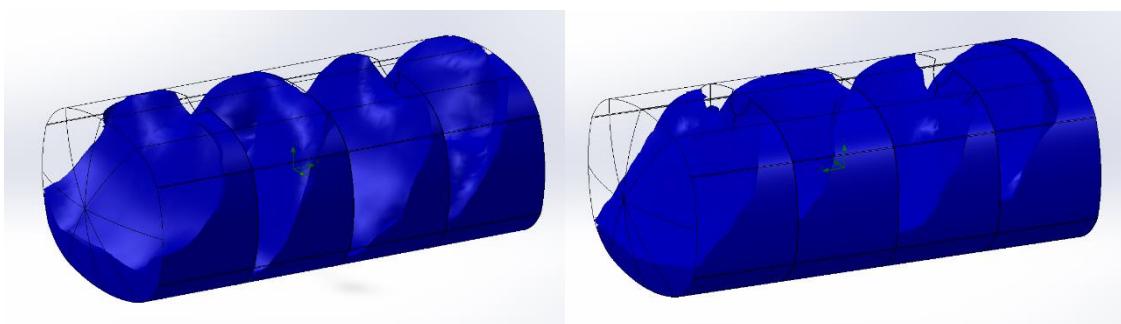
Gambar 4.27 Grafik gaya (Z) kondisi 1



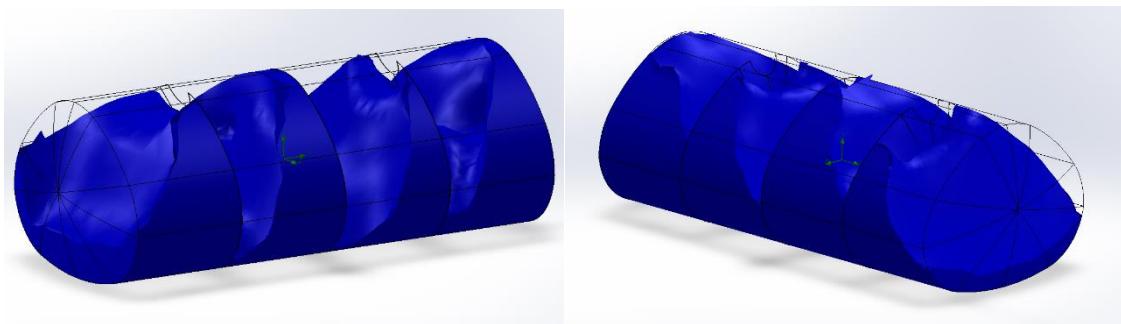
Gambar 4.28 Efek *sloshing* model 0 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan)



Gambar 4.29 Efek *sloshing* model 1 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan)



Gambar 4.30 Efek *sloshing* model 2 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan)



Gambar 4.31 Efek *sloshing* model 3 pada kondisi 1, t=4 s (kiri) dan t=10 s (kanan)

Simulasi dilakukan hingga mencapai *physical time* selama 30 detik, hal tersebut bertujuan untuk melihat efek *sloshing* setelah truk tangki berhenti bergerak. Grafik pada Gambar 4.22 menunjukkan grafik torsi atau momen yang terjadi pada sumbu X (longitudinal), yang berarti momen *roll* dari tangki. Model 2 (*semi-ellipse*) memiliki nilai momen *roll* yang paling tinggi dibandingkan dengan model lainnya. Setelah model 2, urutan nilai momen *roll* dari tertinggi ke terendah secara berturut-turut adalah model 1 (*ellipse*), model 0 (*ellipse tanpa baffle*), dan model 3.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.22, penampang *semi-ellipse*, yaitu penampang yang cenderung kotak, kurang bisa menahan momen *roll* dari efek *sloshing*. Tangki model 0, 1, dan 3 memiliki dinding yang lebih lengkung dibandingkan tangki model 2. Ketika terjadi guncangan akibat *sloshing*, maka fluida pada tangki model 0, 1, dan 3 dapat berayun mengikuti kelengkungan dari tangki. Sementara itu, pada tangki model 2, bagian samping dari penampang tangki tidak terlalu lengkung. Oleh karena itu, saat terjadi guncangan akibat *sloshing*, fluida yang terlempar ke samping akan cenderung menabrak dinding samping ketimbang berayun seperti pada model 0, 1, dan 3.

Selain itu, tangki model 3 memiliki nilai momen *roll* terendah dibandingkan dengan model lainnya. Tangki model 3 memiliki pusat massa (*center of gravity*) yang paling rendah dibandingkan model lainnya, dimana pusat massa dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pusat massa dari tangki model 3 adalah 2046.442 mm dari tanah. Hal tersebut menyebabkan tangki model 3 lebih stabil pada saat manuver tikungan.

Grafik pada Gambar 4.22 juga menunjukkan perbandingan antara momen yang terjadi dengan percepatan Z yang dialami pada truk tangki. Selalu terdapat *delay* antara percepatan dengan momen *roll* yang terjadi, dimana hal tersebut disebabkan oleh inersia fluida di dalam truk tangki.

Pada Gambar 4.23, torsi terhadap sumbu Y, atau disebut momen *yaw* cenderung menunjukkan kestabilan. Momen *yaw* pada model 1 hingga model 3 memiliki rata-rata nilai momen di bawah 2000 Nm. Pada kondisi 1 (akselerasi ekstrim), model 0 (*ellipse* tanpa *baffle*) memiliki momen *yaw* yang kurang stabil. Hal tersebut membuktikan bahwa *baffle* sangat membantu dalam mengurangi momen *yaw* yang terjadi pada truk tangki. Dengan adanya *baffle*, tangki model 1, 2, dan 3 memiliki momen *yaw* yang lebih terkontrol.

Momen atau torsi pada sumbu Z, yang disebut juga sebagai momen *pitch* dapat dilihat melalui grafik pada Gambar 4.24. Momen *pitch* yang terjadi pada model 0 memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding model-model lainnya. Hal tersebut diakibatkan model 0 tidak memiliki *baffle*. Efek penambahan *baffle* sangat terlihat, terutama pada saat akselerasi dan penggereman terjadi. Tangki model 1, 2, dan 3 memiliki momen *pitch* yang lebih terkontrol akibat adanya *baffle* dan kompartemen di dalamnya. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.24, fluida pada tangki model 0 masih terus bergerak hingga detik ke 30, sedangkan pada model 1, 2, dan 3, fluida sudah tidak mengalami *sloshing* pada detik ke 16.

Apabila tangki model 1, 2, dan 3 dibandingkan, momen *pitch* yang terjadi pada model 2 (*semi-ellipse*) lebih kecil dibandingkan model lain dan diikuti oleh model 1, dan model 3 memiliki momen *pitch* paling besar. Salah satu penyebab utama dari hal tersebut adalah tangki model 2 memiliki panjang tangki yang paling pendek dibanding dengan model 1 dan 3. Sementara itu, model 3 memiliki panjang tangki yang paling panjang dibanding dengan model 1 dan 2. Data untuk panjang masing-masing geometri tangki dapat dilihat melalui Tabel 4.1. Dari pernyataan-pernyataan tersebut, maka semakin panjang sebuah tangki, semakin besar momen *pitch* yang akan dihasilkan akibat efek *sloshing* pada saat akselerasi dan penggereman. Untuk gaya *sloshing* yang terjadi berdasarkan Gambar 4.25 hingga Gambar 4.27 besarnya sama untuk setiap model.

#### 4.4.1.2. Akselerasi Kondisi 2

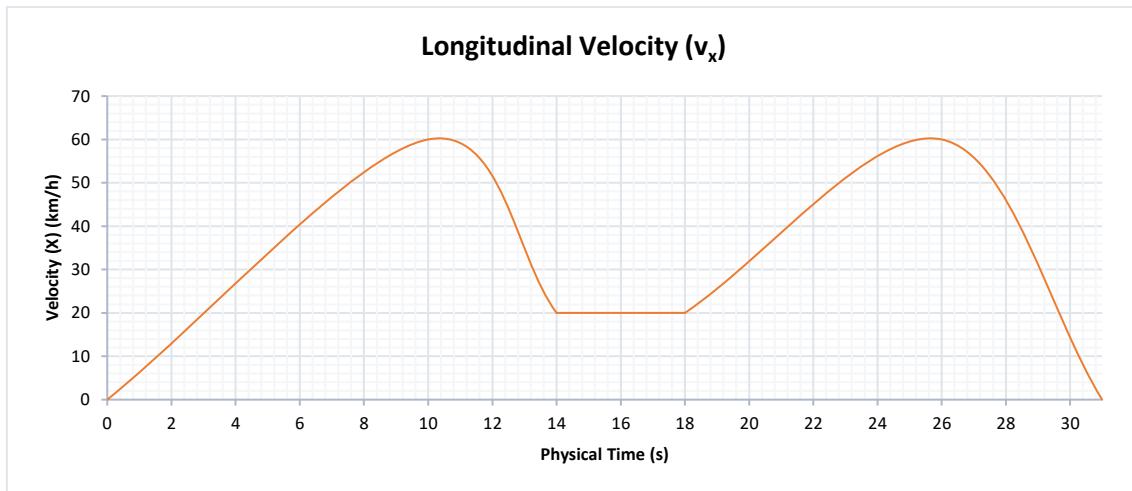
Gambar 4.32 menunjukkan grafik kecepatan dari kondisi kedua.

Pada kondisi kedua, truk tangki akan melakukan akselerasi dari kecepatan 0 km/jam ke 60 km/jam dalam waktu 10 detik. Pengereman sebelum manuver tikungan akan dilakukan truk tangki sehingga terjadi deselerasi dari 60 km/jam ke 20 km/jam dalam waktu 4 detik. Pada detik ke 14 hingga detik ke 18, truk tangki melakukan manuver dengan kecepatan longitudinal konstan sebesar 20 km/jam.

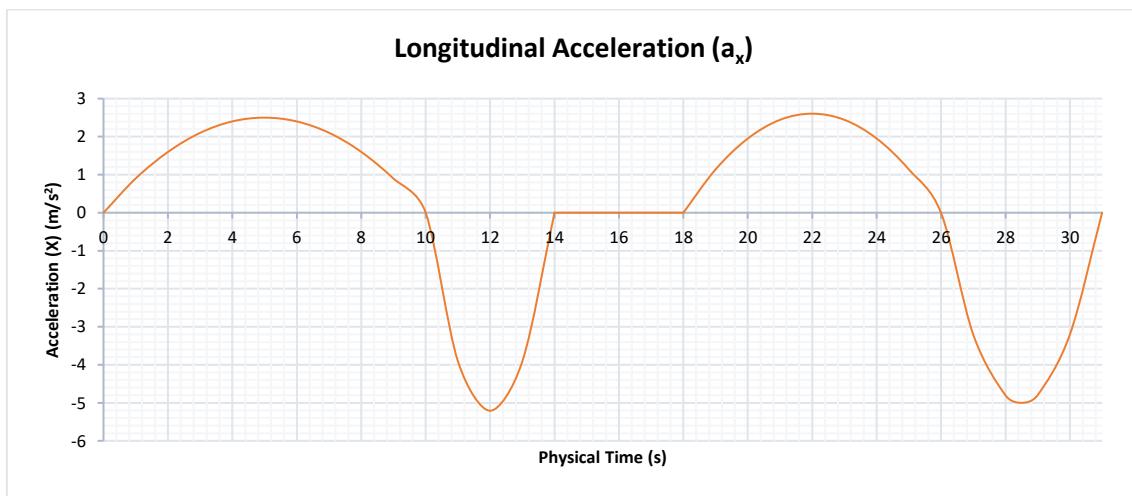
Setelah truk tangki melakukan manuver tikungan, akselerasi kembali dilakukan, dimana akselerasi yang dilakukan adalah dari kecepatan 20 km/jam ke 60 km/jam dalam 8 detik. Terakhir, pengereman mendadak pada truk tangki menyebabkan timbulnya deselerasi, yaitu dari kecepatan 60 km/jam hingga berhenti total dalam 5 detik.

Setelah diketahui grafik kecepatan longitudinal seperti pada Gambar 4.32, grafik percepatan longitudinal dapat ditentukan dengan menggunakan derivatif. Dengan bantuan *software Solidworks 2021*, grafik percepatan longitudinal bisa didapatkan seperti pada Gambar 4.33. Dengan menganggap percepatan sentripetal maksimum terdapat pada detik ke 16, maka diperoleh grafik percepatan lateral seperti pada Gambar 4.34.

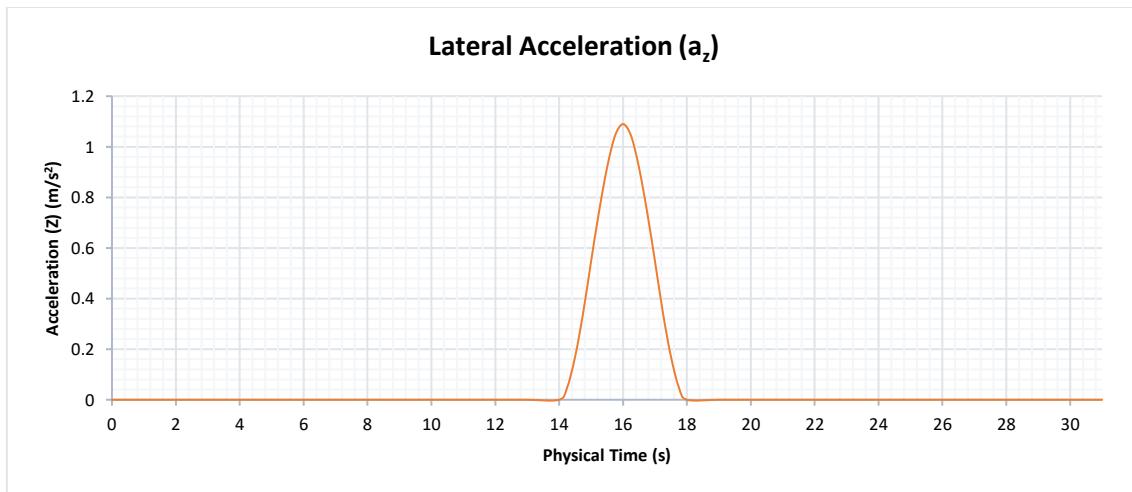
Dengan menggunakan parameter-parameter simulasi pada subbab 4.2 serta akselerasi berdasarkan kondisi 2, maka simulasi dapat dijalankan. Hasil simulasi dari kondisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.35 hingga Gambar 4.40. Simulasi dilakukan hingga mencapai *physical time* selama 45 detik, hal tersebut bertujuan untuk melihat efek *sloshing* setelah truk tangki berhenti bergerak. Gambar 4.35 merupakan grafik torsi atau momen pada sumbu X, atau disebut momen *roll*. Torsi atau momen terhadap sumbu Y ditunjukkan pada Gambar 4.36, dimana grafik tersebut adalah grafik momen *yaw*. Pada Gambar 4.37, ditunjukkan momen terhadap sumbu Z, yaitu momen *pitch* dari truk tangki.



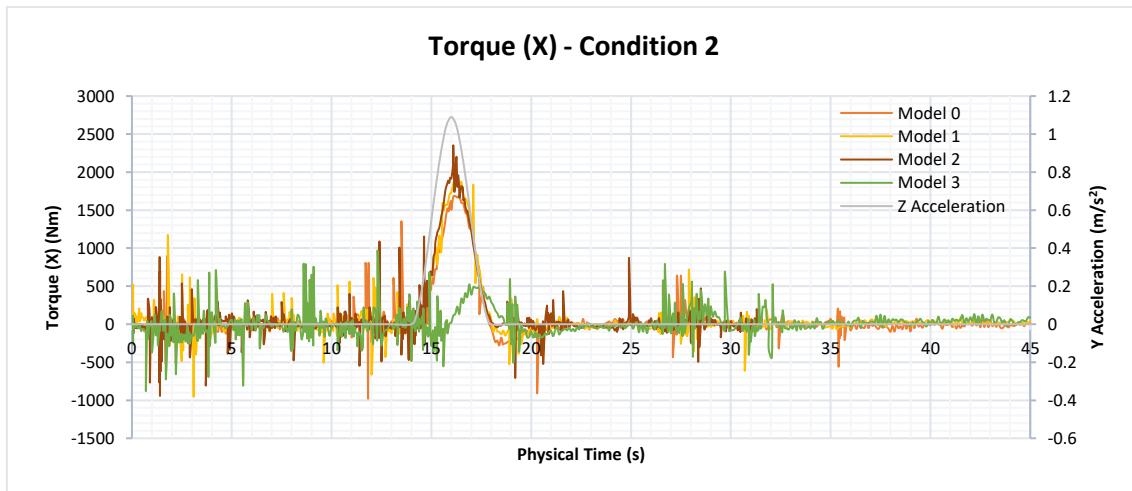
Gambar 4.32 Kecepatan longitudinal kondisi 2



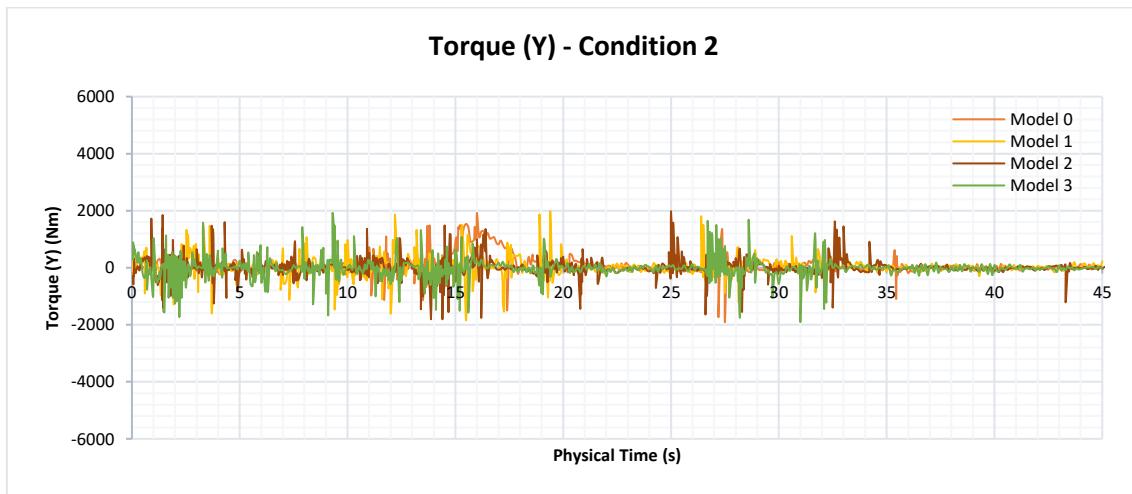
Gambar 4.33 Percepatan longitudinal kondisi 2



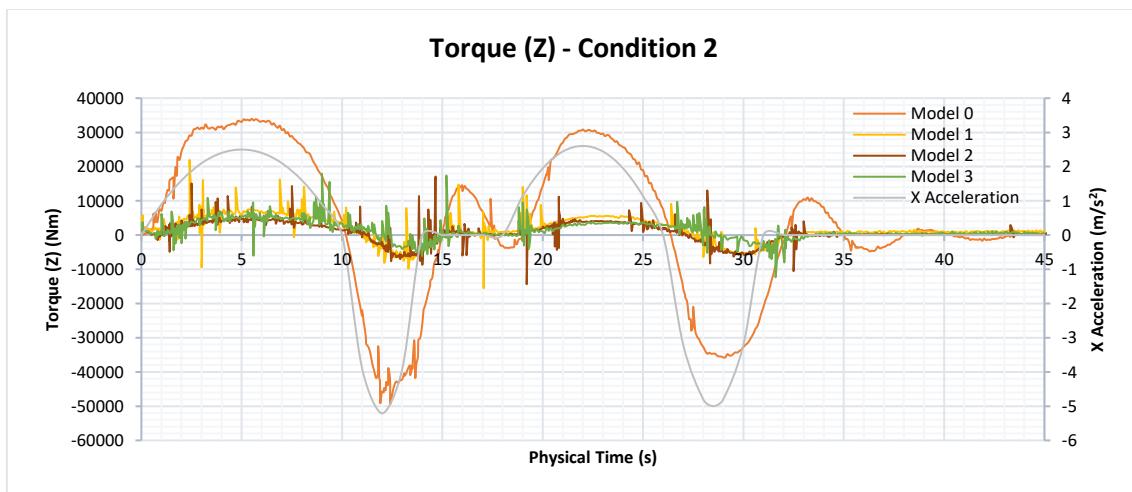
Gambar 4.34 Percepatan lateral kondisi 2



Gambar 4.35 Grafik torsi (X) kondisi 2



Gambar 4.36 Grafik torsi (Y) kondisi 2



Gambar 4.37 Grafik torsi (Z) kondisi 2



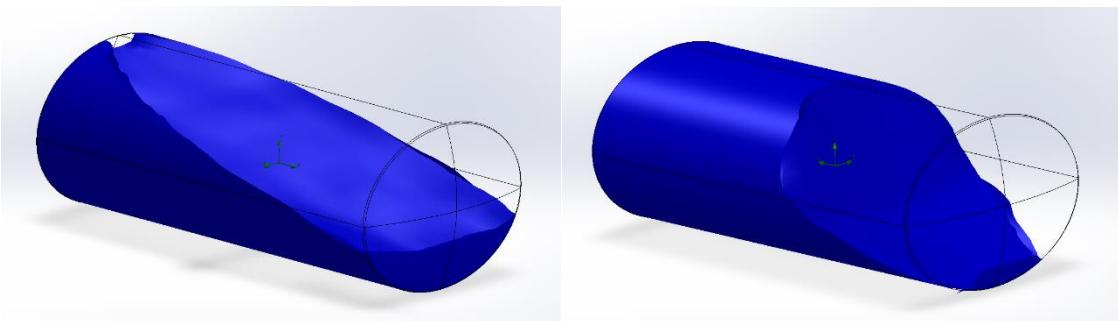
Gambar 4.38 Grafik gaya (X) kondisi 2



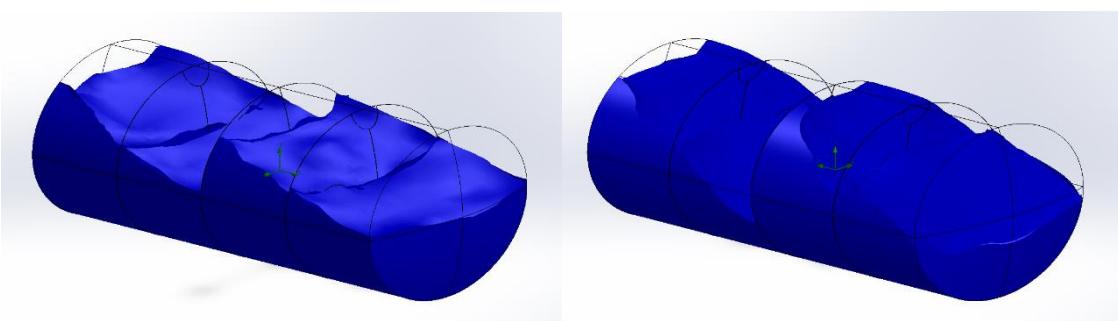
Gambar 4.39 Grafik gaya (Y) kondisi 2



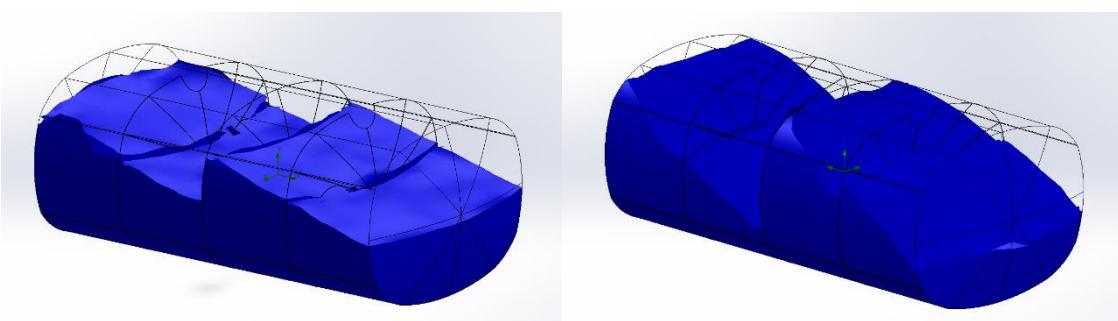
Gambar 4.40 Grafik gaya (Z) kondisi 2



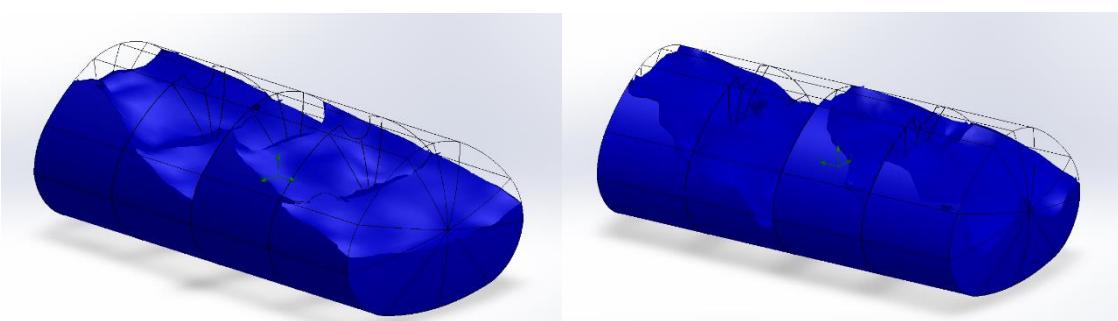
Gambar 4.41 Efek *sloshing* model 0 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan)



Gambar 4.42 Efek *sloshing* model 1 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan)



Gambar 4.43 Efek *sloshing* model 2 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan)



Gambar 4.44 Efek *sloshing* model 3 pada kondisi 2, t=5 s (kiri) dan t=29 s (kanan)

Sama seperti simulasi pada kondisi 1, grafik pada Gambar 4.35 menunjukkan momen *roll* maksimum terdapat pada tangki model 2 (*semi-ellipse*). Setelah tangki model 2, momen *roll* pada tangki model 1 dan 0 memiliki nilai momen *roll* yang sedikit lebih kecil, dan diikuti oleh momen *roll* terkecil adalah pada tangki model 3. Data tersebut memperkuat pernyataan pada kondisi pertama, dimana tangki model 2 memiliki nilai momen *roll* yang besar diakibatkan bentuk penampangnya yang kotak. Penampang yang sedikit kotak menyebabkan fluida di dalam tangki cenderung menabrak bagian samping tangki daripada mengayun pada sisi tangki. Hal tersebut disebabkan karena tangki model 2 lebih tidak lengkung dibanding model tangki lainnya.

Tangki dengan model 3 memiliki nilai momen *roll* yang paling kecil dibandingkan model-model lainnya. Oleh karena bentuk penampangnya yang lengkung beserta pusat massanya yang rendah, maka tangki model 3 memiliki momen *roll* yang relatif kecil. Tangki model 3 memiliki pusat massa setinggi 2046.442 mm dari tanah, sedangkan pusat massa model 1 dan 2 secara berturut-turut adalah 2116.381 mm dan 2093.893 mm dari tanah.

Selain itu, pada grafik di Gambar 4.35 juga terdapat kurva percepatan terhadap sumbu Z yang digunakan sebagai pembanding respon fluida terhadap percepatan yang terjadi. Pada semua model, terdapat sedikit *delay* dari fluida saat diberi percepatan. Adanya *delay* antara percepatan dengan respon fluida diakibatkan adanya inersia dari fluida di dalam truk tangki. Model 0, 1, dan 2 memiliki waktu respon yang hamper sama, melainkan model 3 memiliki respon yang lebih terlambat.

Setelah momen *roll*, analisa berikutnya adalah pada momen *yaw* yang dapat dilihat melalui grafik pada Gambar 4.36. Pada kondisi kedua, yaitu kondisi akselerasi yang tidak terlalu ekstrim, momen *yaw* pada semua model tangki cenderung stabil, dimana momen *yaw* tidak melebihi 2000 Nm untuk semua model. Pada grafik momen *yaw* terdapat sedikit *noise* (gangguan pada nilai di grafik), dimana hal

tersebut disebabkan oleh adanya guncangan pada fluida. Dari grafik pada Gambar 4.36, dapat ditentukan bahwa akselerasi dan deselerasi yang ekstrim akan mempengaruhi gerak *yaw* dari truk tangki. Oleh karena akselerasi dan deselerasi pada kondisi 2 tidak terlalu ekstrim, maka momen *yaw* yang terjadi juga cukup terkontrol.

Momen *pitch* yang terjadi pada kondisi kedua dapat dilihat melalui grafik pada Gambar 4.37. Efek dari penambahan *baffle* sangat terlihat melalui grafik momen *pitch*, dimana model 0 memiliki momen *pitch* yang nilainya cukup tinggi dan tidak terkontrol. Hal tersebut dapat dilihat melalui karakteristik momen *pitch* pada model 0 yang terus berosilasi meskipun truk tangki sudah berhenti bergerak. Naik turun dari grafik model 0 tersebut diakibatkan oleh gerakan fluida yang tidak teredam oleh *baffle*.

Apabila perbandingan dilakukan pada tangki model 1, 2, dan 3, maka tangki model 2 memiliki momen *pitch* yang paling kecil. Tangki dengan model 1 dan 3 memiliki nilai momen *pitch* yang hampir sama. Hal tersebut memperkuat pernyataan yang disampaikan pada akselerasi kondisi pertama, dimana model 2 memiliki geometri tangki terpendek dibandingkan model 1 dan 3. Tangki model 2 memiliki panjang 4300 mm dan model 1 dan 3 berturut-turut adalah 4600 mm dan 4750 mm. Geometri tangki yang semakin panjang akan memberi ruang yang lebih banyak bagi fluida untuk bergerak dan menghantam dinding dan *ballfront* dari tangki.

Grafik pada Gambar 4.37 juga dilengkapi dengan kurva percepatan terhadap sumbu X yang bertujuan untuk membandingkan *delay* yang terjadi antara percepatan dengan respon momen. Fenomena tersebut disebabkan karena adanya inersia dari fluida di dalam tangki. Untuk model 1, 2, dan 3 hanya memerlukan waktu 5 detik untuk fluida menjadi tenang setelah truk tangki berhenti bergerak, sedangkan model 0 (tanpa *baffle*) memerlukan waktu sekitar 15 detik. Gaya *sloshing* yang terjadi berdasarkan Gambar 4.38 hingga besarnya Gambar 4.40 hampir sama untuk setiap model.

#### 4.4.1.3. Akselerasi Kondisi 3

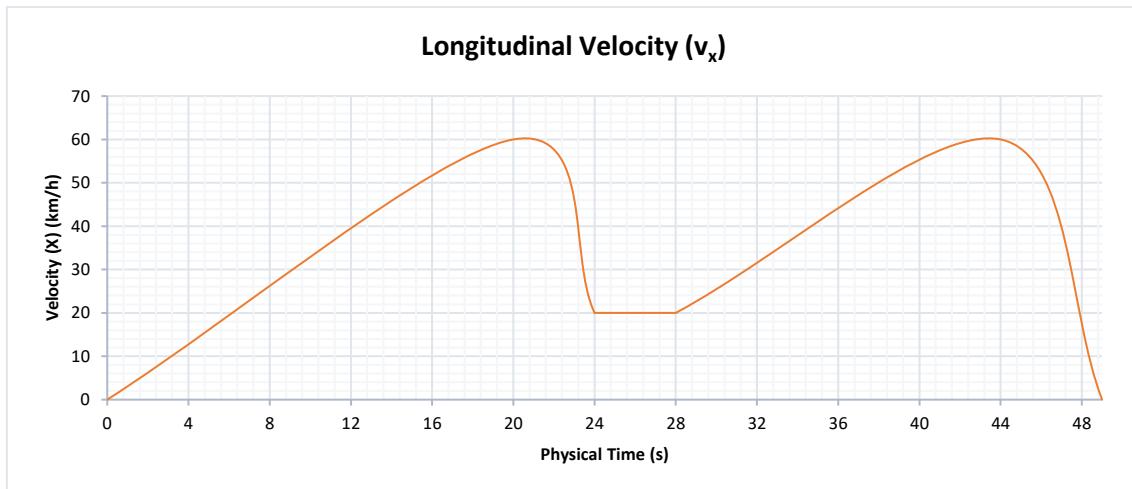
Gambar 4.45 merupakan grafik kecepatan dari kondisi ketiga.

Pada kondisi ketiga, truk tangki akan melakukan akselerasi dari kecepatan 0 km/jam ke 60 km/jam dalam waktu 20 detik dan dilanjutkan pada penggereman dari 60 km/jam ke 20 km/jam dalam waktu 4 detik. Setelah terjadi deselerasi, dilakukan manuver tikungan pada detik ke 24 hingga detik ke 28. Truk tangki melakukan manuver tikungan dengan kecepatan longitudinal konstan sebesar 20 km/jam.

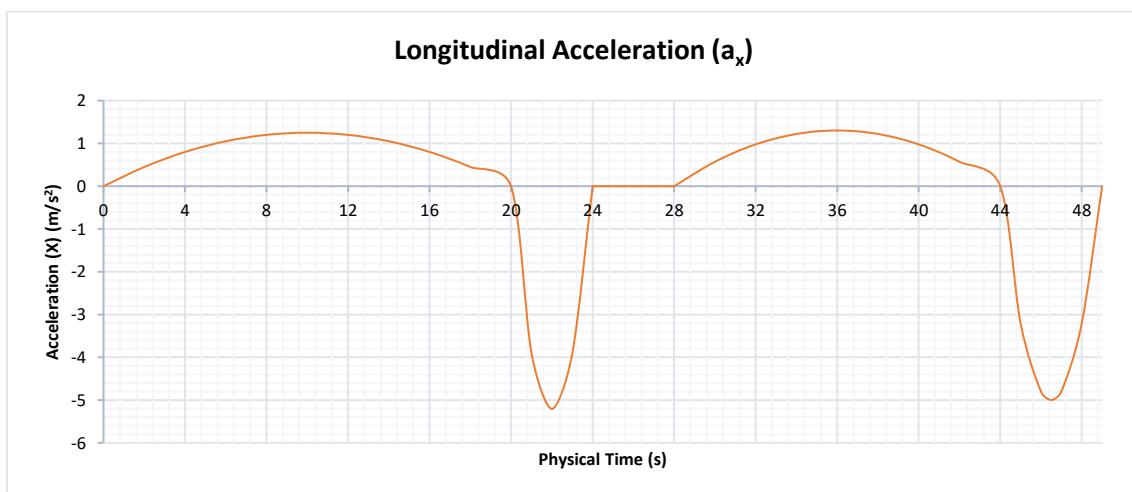
Setelah truk tangki melakukan manuver tikungan, akselerasi kembali dilakukan, dimana akselerasi yang dilakukan adalah dari kecepatan 20 km/jam ke 60 km/jam dalam 16 detik. Pada saat truk tangki mencapai kecepatan 60 km/jam penggereman mendadak dilakukan pada truk tangki menyebabkan timbulnya deselerasi dari kecepatan 60 km/jam hingga berhenti total dalam 5 detik.

Setelah diketahui grafik kecepatan longitudinal seperti pada Gambar 4.45, grafik percepatan longitudinal dapat ditentukan dengan menggunakan derivatif dengan bantuan *software Solidworks* 2021. Grafik percepatan longitudinal bisa didapatkan seperti pada Gambar 4.46. Dengan menganggap percepatan sentripetal maksimum terdapat pada detik ke 26, maka diperoleh grafik percepatan lateral seperti pada Gambar 4.47.

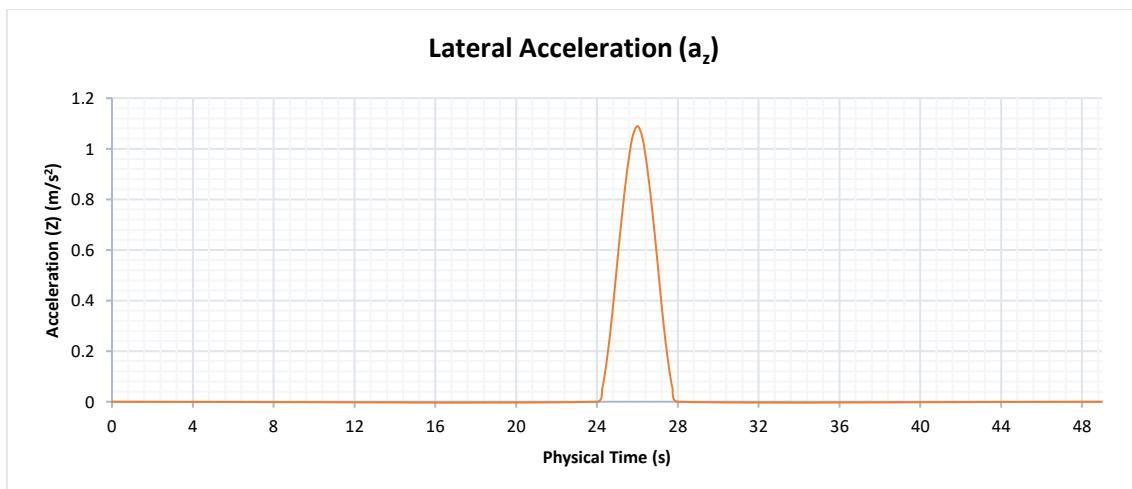
Dengan menggunakan parameter-parameter simulasi pada subbab 4.2 serta akselerasi berdasarkan kondisi 3, maka simulasi dapat dijalankan. Hasil simulasi dari kondisi ketiga dapat dilihat melalui grafik pada Gambar 4.48 hingga Gambar 4.53. Simulasi dilakukan hingga mencapai *physical time* selama 80 detik, hal tersebut bertujuan untuk melihat efek *sloshing* setelah truk tangki berhenti bergerak. Gambar 4.48 merupakan grafik momen *roll*, Gambar 4.49 adalah momen *yaw*, dan Gambar 4.50 merupakan *pitch* dari truk tangki.



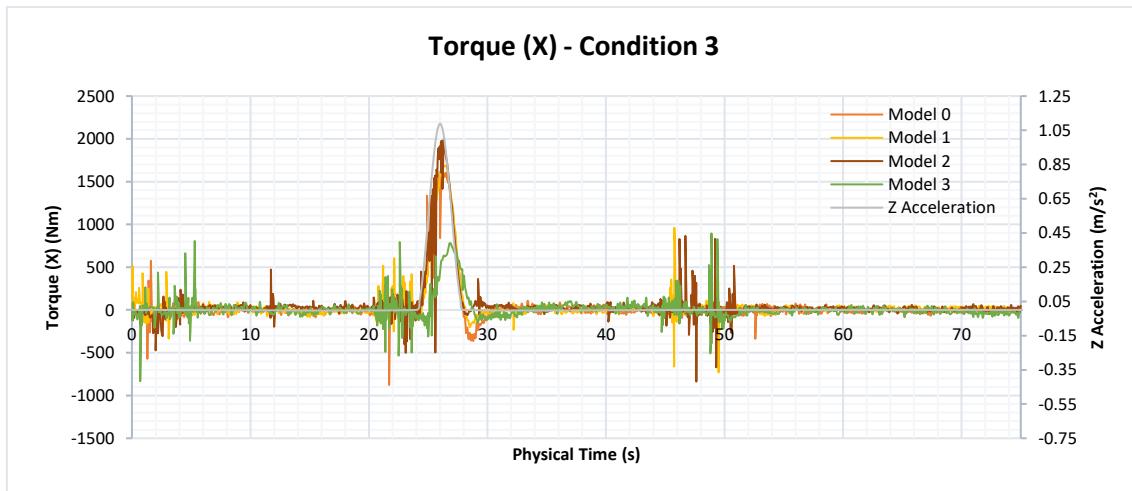
Gambar 4.45 Kecepatan longitudinal kondisi 3



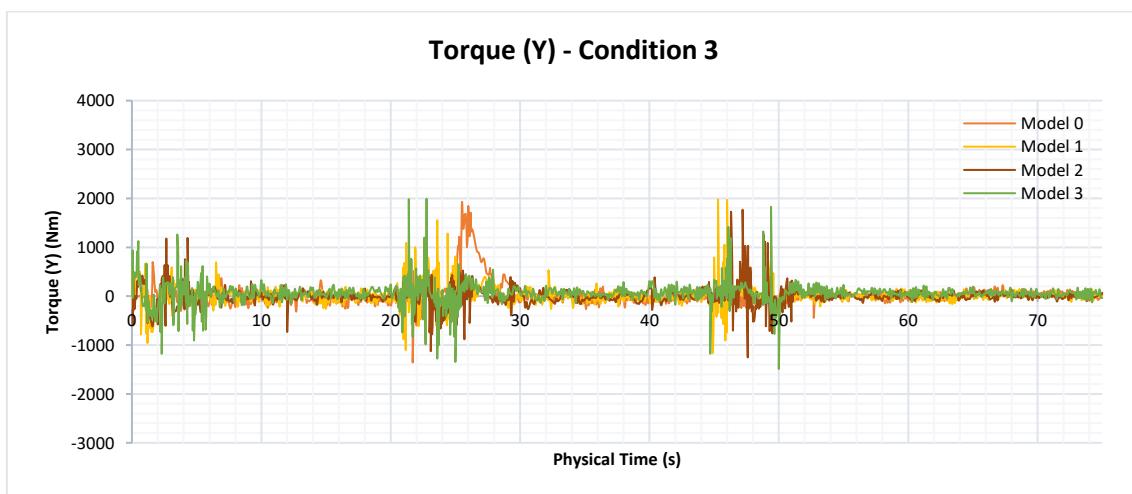
Gambar 4.46 Percepatan longitudinal kondisi 3



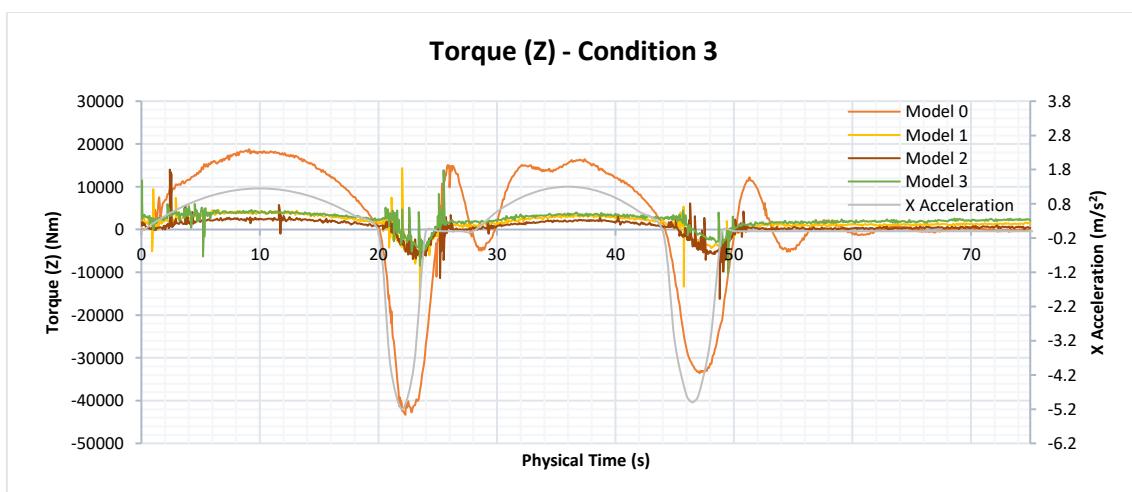
Gambar 4.47 Percepatan lateral kondisi 3



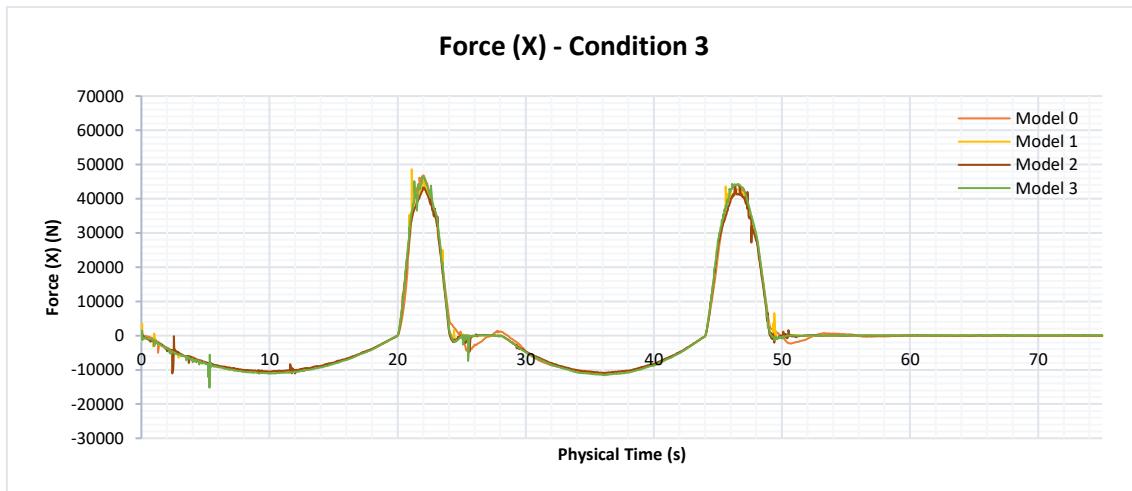
Gambar 4.48 Grafik torsi (X) kondisi 3



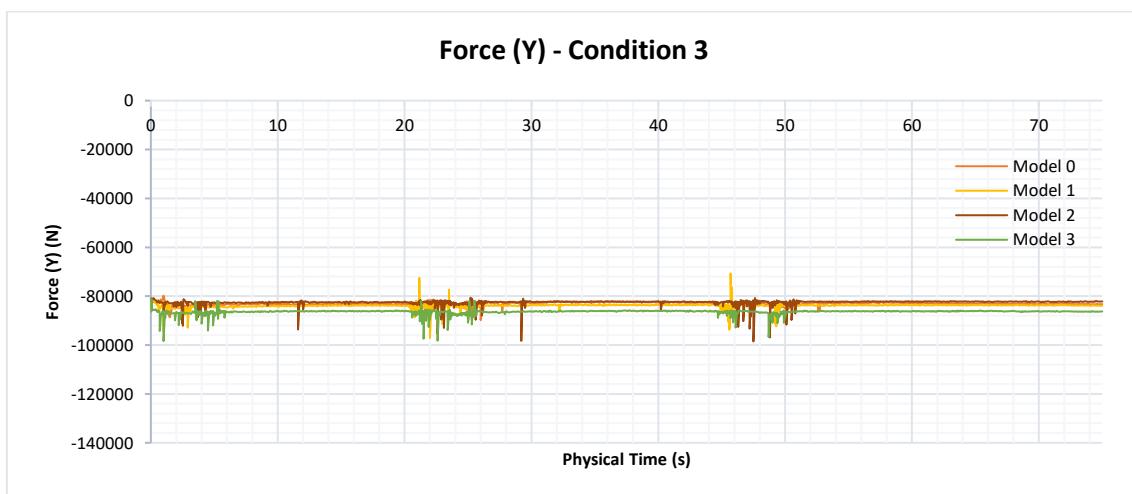
Gambar 4.49 Grafik torsi (Y) kondisi 3



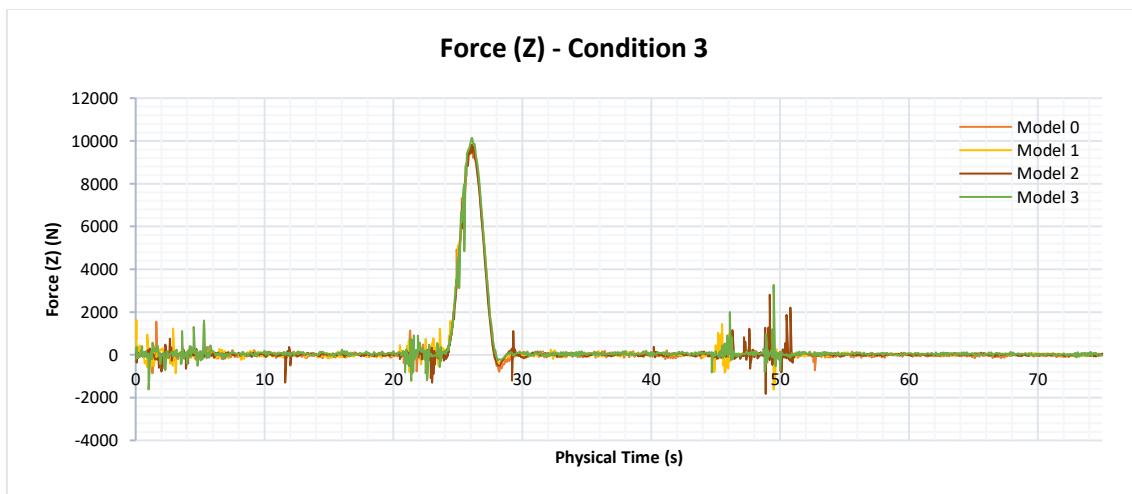
Gambar 4.50 Grafik torsi (Z) kondisi 3



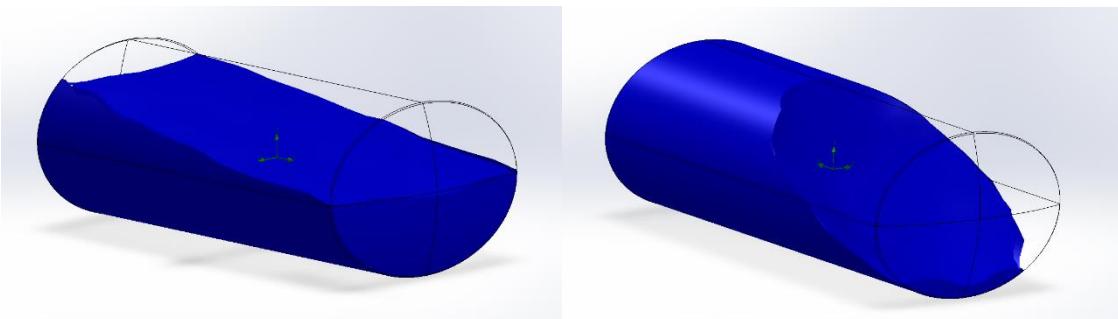
Gambar 4.51 Grafik gaya (X) kondisi 3



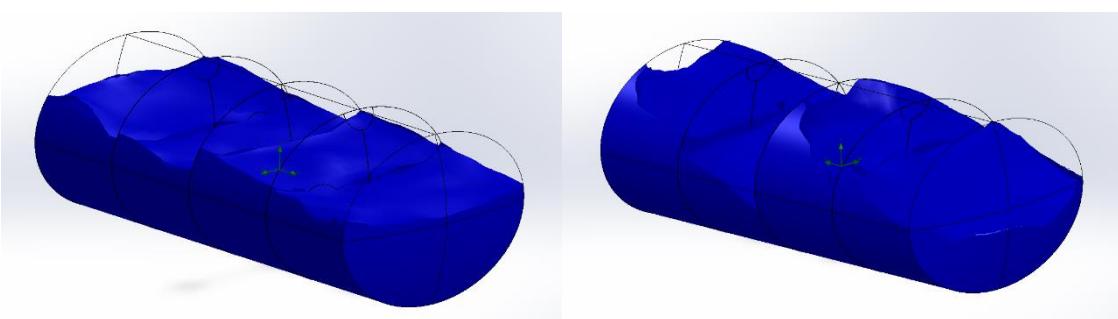
Gambar 4.52 Grafik gaya (Y) kondisi 3



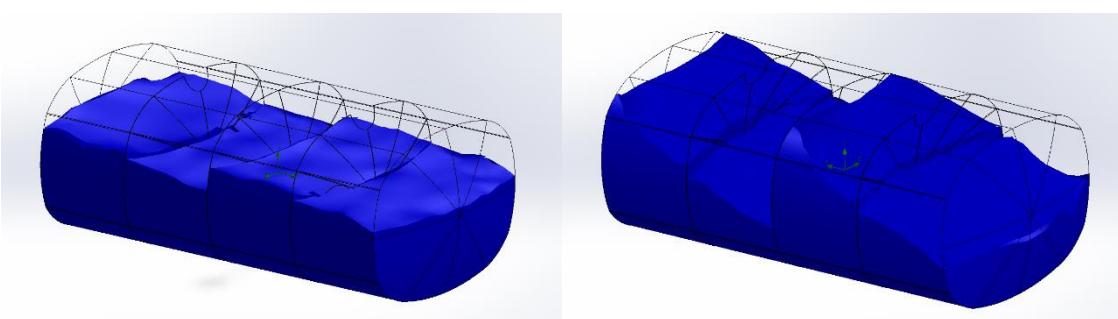
Gambar 4.53 Grafik gaya (Z) kondisi 3



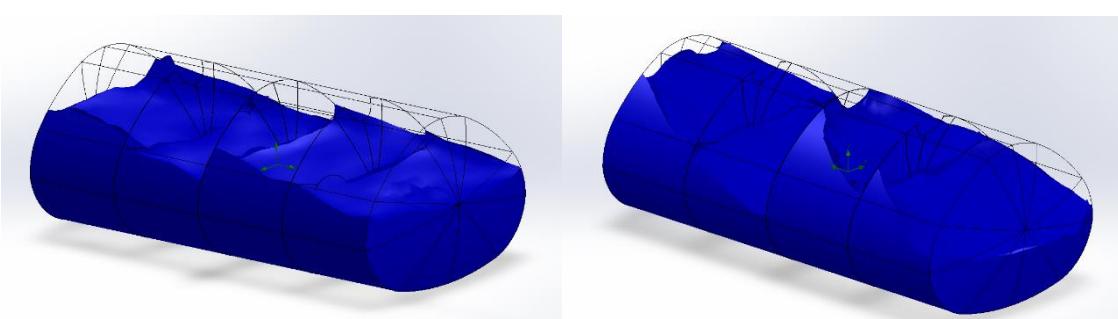
Gambar 4.54 Efek *sloshing* model 0 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan)



Gambar 4.55 Efek *sloshing* model 1 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan)



Gambar 4.56 Efek *sloshing* model 2 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan)



Gambar 4.57 Efek *sloshing* model 3 pada kondisi 3, t=10 s (kiri) dan t=48 s (kanan)

Momen *roll* yang terjadi pada kondisi ketiga dapat dilihat melalui Gambar 4.48, dimana momen *roll* paling tinggi terjadi pada tangki model 2. Tangki dengan model 0 dan 1 memiliki momen *roll* yang serupa, sedangkan tangki model 3 memiliki momen *roll* yang paling kecil. Nilai-nilai tersebut sama dengan simulasi pada kondisi pertama dan kondisi kedua. Data tersebut juga memperkuat pernyataan dari simulasi kondisi pertama dan kedua, dimana penampang tangki model 2 sedikit kotak sehingga menyebabkan momen *roll* cukup tinggi. Di sisi lain, tangki model 3 yang memiliki pusat massa paling rendah dari antara model lain, juga memiliki momen *roll* terendah.

Pada Gambar 4.49, dapat dilihat grafik dari momen *yaw* yang terjadi pada setiap model tangki. Momen *yaw* dari model 0, 1, 2, dan 3 menunjukkan kestabilan, dimana momen yang terjadi selalu di bawah 2000 Nm. Pada grafik terdapat beberapa *noise (disturbance)* pada sekitar detik ke 0 hingga 10, 20 hingga 30, dan 40 hingga 50. Hal tersebut disebabkan karena pada sekitar detik ke 0 hingga 10, truk melakukan akselerasi, pada sekitar detik ke 20 hingga 30, truk tangki melakukan manuver tikungan, dan pada sekitar detik ke 40 hingga 50, truk tangki melakukan penggereman mendadak. Jadi, manuver-manuver tikungan, akselerasi, dan penggereman dapat mempengaruhi momen *yaw* dari truk tangki.

Karakteristik grafik momen *pitch* terdapat pada Gambar 4.50, dimana model 0 selalu memiliki momen *pitch* yang sangat tinggi dan kurang terkontrol. Hal tersebut diakibatkan oleh tidak adanya *baffle* pada tangki model 0. Untuk tangki yang dilengkapi dengan *baffle* (model 1 hingga 3) akan selalu memiliki momen *pitch* yang lebih kecil dan lebih terkontrol. Apabila model 1 hingga 3 dibandingkan, tangki model 2 memiliki momen *pitch* yang paling kecil, diikuti oleh tangki model 1, dan tangki model 3 dengan momen *pitch* paling besar. Hal tersebut memperkuat pernyataan pada simulasi kondisi pertama dan kedua, dimana semakin panjang geometri sebuah tangki, maka momen *pitch* yang dialami akan semakin tinggi.

Dari hasil simulasi pada kondisi 1 hingga 3, maka bila dirangkum maka momen maksimum dari tiap grafik dapat dirangkum seperti pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.7.

Tabel 4.2 Momen (X) maksimum kondisi 1

Condition 1		
Model	Physical Time (s)	Maximum X Torque (Nm)
0	7.8	1363.958
1	7.3	2008.871
2	7.3	2051.158
3	8	746.3909

Tabel 4.3 Momen (Z) maksimum kondisi 1

Condition 1		
Model	Physical Time (s)	Maximum Z Torque (Nm)
0	2.5	63372.42
1	3.228036	19125.58
2	3.534822	20192.91
3	3.6	25041.64

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Tabel 4.3, maka dapat dilihat bahwa nilai momen paling tinggi terjadi pada model 2 untuk momen *roll* dan model 3 untuk momen *pitch*. Momen *roll* maksimum terjadi pada saat manuver tikungan, sedangkan momen *pitch* saat akselerasi.

Tabel 4.4 Momen (X) maksimum kondisi 2

Condition 2		
Model	Physical Time (s)	Maximum X Torque (Nm)
0	16.2	1684.86
1	16.3	1905.489
2	16.1	2345.857
3	16.9	524.4259

Tabel 4.5 Momen (Z) maksimum kondisi 2

Condition 2		
Model	Physical Time (s)	Maximum Z Torque (Nm)
0	12.4	-49237.1
1	13.3	-9802.8
2	13.9	-7588.43
3	14.24255	-5458.55

Tabel 4.4 memperkuat pernyataan dari kondisi 1, dimana momen *roll* maksimum terdapat pada model 2. Berbeda dengan kondisi 1, momen *pitch* maksimum dari kondisi 2 terjadi pada saat penggereman.

Tabel 4.6 Momen (X) maksimum kondisi 3

Condition 3		
Model	Physical Time (s)	Maximum X Torque (Nm)
0	26.5	1605.697
1	26.4	1685.349
2	26.3	1988.332
3	26.8	779.2705

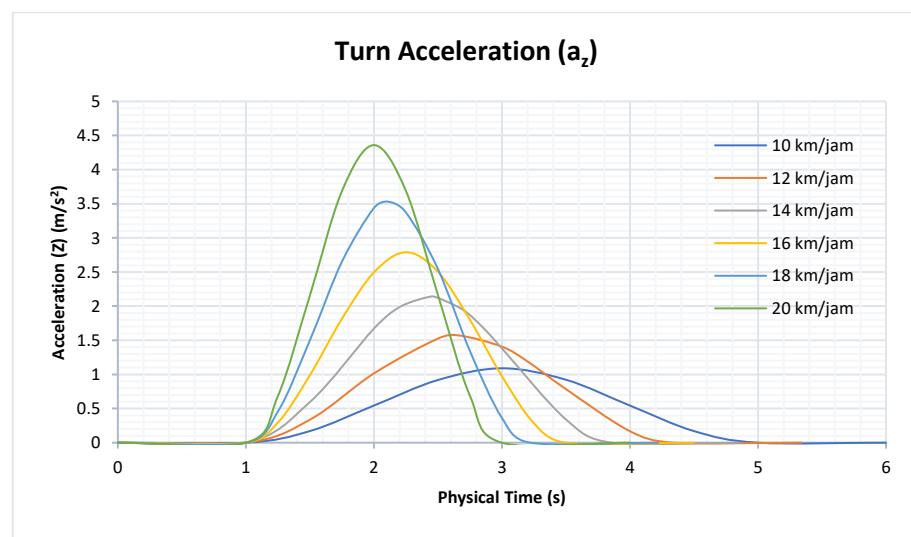
Tabel 4.7 Momen (Z) maksimum kondisi 2

Condition 3		
Model	Physical Time (s)	Maximum Z Torque (Nm)
0	22.28666	-43268.5
1	23.6	-6888.93
2	22.97849	-6384.11
3	23.5	-8412.82

Momen *pitch* maksimum kondisi 3 juga terjadi pada saat penggereman. Berdasarkan Tabel 4.6 dan Tabel 4.7, momen *roll* maksimum terdapat pada model 2 serta momen *pitch* maksimum terdapat pada model 3.

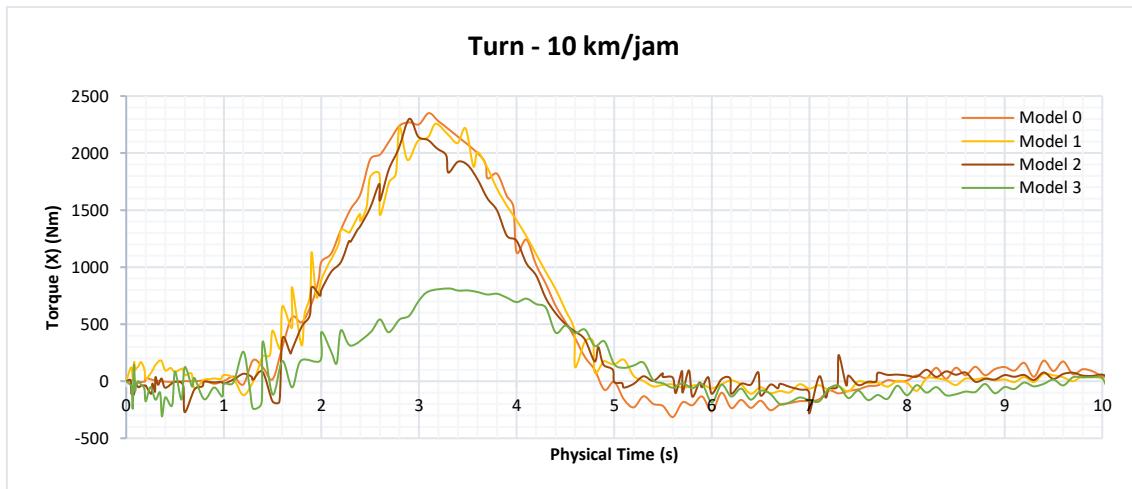
#### 4.4.2. Variasi Kecepatan pada saat di Tikungan

Pada analisa simulasi yang kedua, kecepatan truk tangki pada saat tikungan akan divariasikan menjadi 6 kecepatan. Kecepatan yang digunakan adalah 10 km/jam hingga 20 km/jam dengan masing-masing interval kecepatan 2 km/jam. Setelah menentukan kecepatan untuk simulasi, maka percepatan terhadap sumbu Z dapat ditentukan menggunakan persamaan percepatan sentripetal. Gambar 4.58 merupakan grafik dari percepatan terhadap sumbu Z yang akan dimasukkan ke dalam *software* sebagai parameter percepatan. Semua kecepatan tikungan dilakukan pada radius belok sebesar 7.08 m dan kecepatan yang dilakukan adalah konstan.



Gambar 4.58 Variasi percepatan lateral saat tikungan

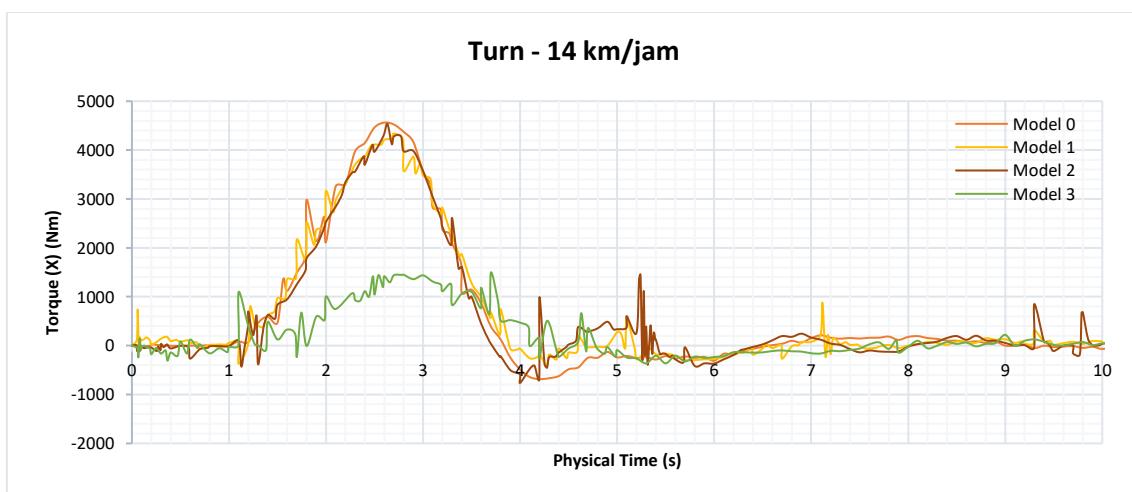
Setelah menentukan percepatan untuk masing-masing kecepatan di tikungan, maka simulasi dapat dilakukan. Parameter-parameter simulasi yang digunakan akan tetap mengacu pada subbab 4.2. Percepatan pada sumbu X (longitudinal) adalah konstan sebesar  $0 \text{ m/s}^2$ , sedangkan percepatan untuk sumbu Z akan mengacu pada Gambar 4.58. Hasil simulasi dapat dilihat melalui grafik pada Gambar 4.59 hingga Gambar 4.64. Simulasi dilakukan hingga mencapai *physical time* selama 10 detik, hal tersebut bertujuan untuk melihat efek *sloshing* setelah truk tangki berhenti bergerak. Hasil simulasi untuk variasi kecepatan pada tikungan hanya berfokus pada efek momen *roll*, yaitu momen terhadap sumbu X.



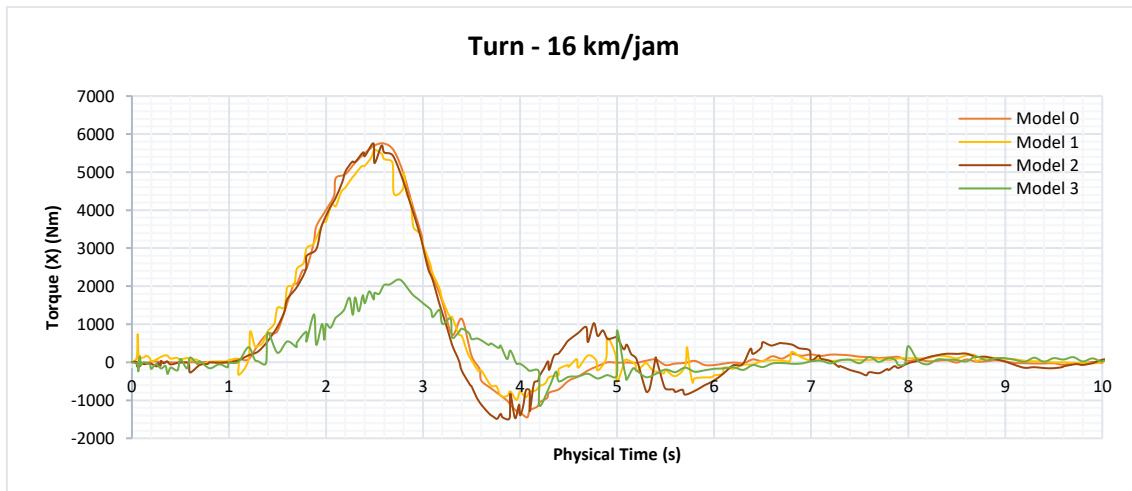
Gambar 4.59 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 10 km/jam



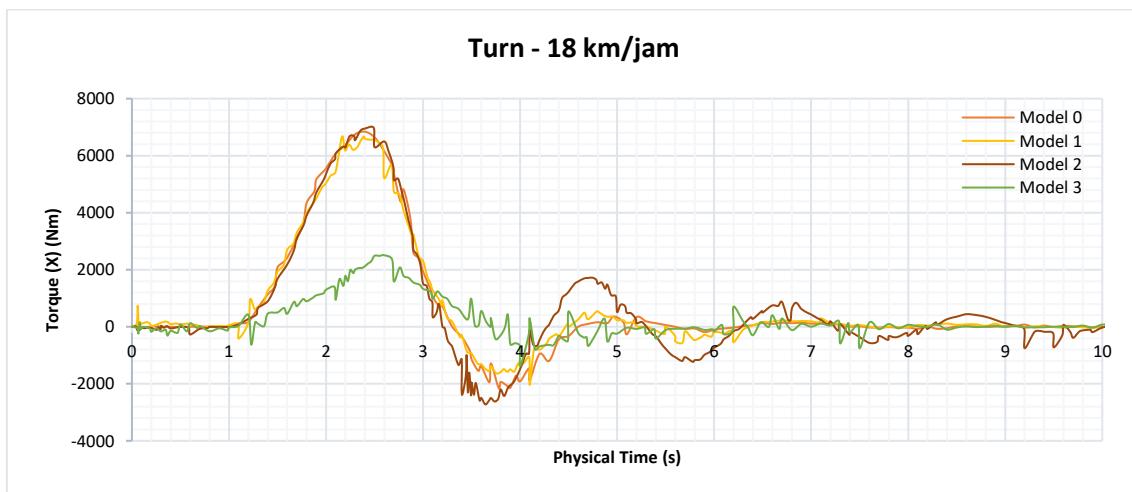
Gambar 4.60 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 12 km/jam



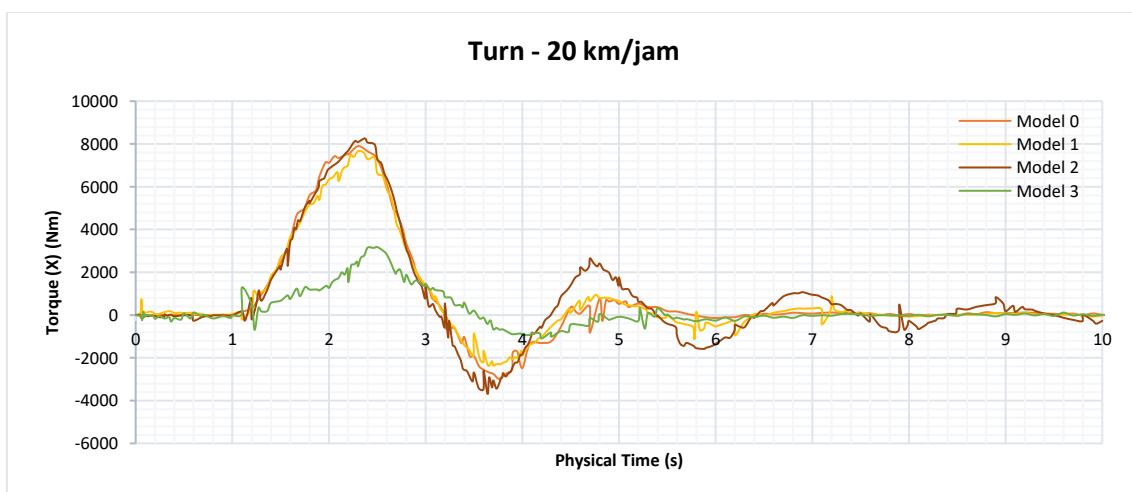
Gambar 4.61 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 14 km/jam



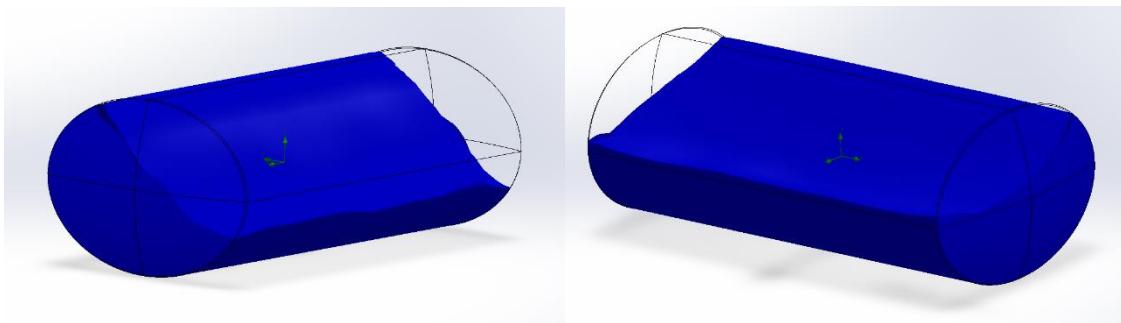
Gambar 4.62 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 16 km/jam



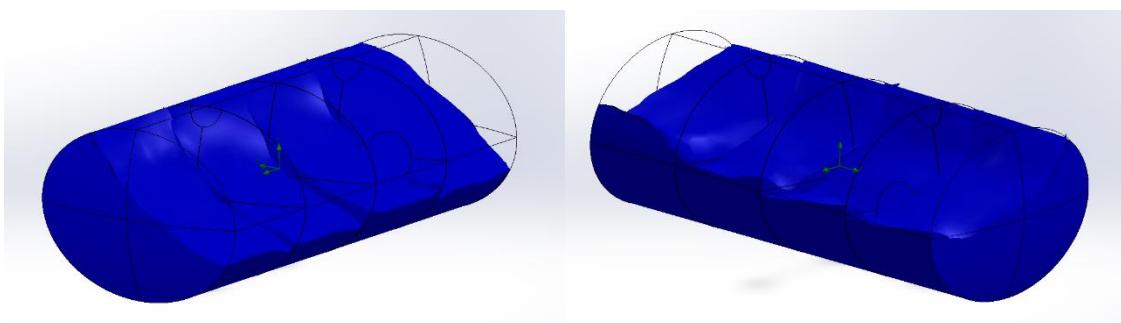
Gambar 4.63 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 18 km/jam



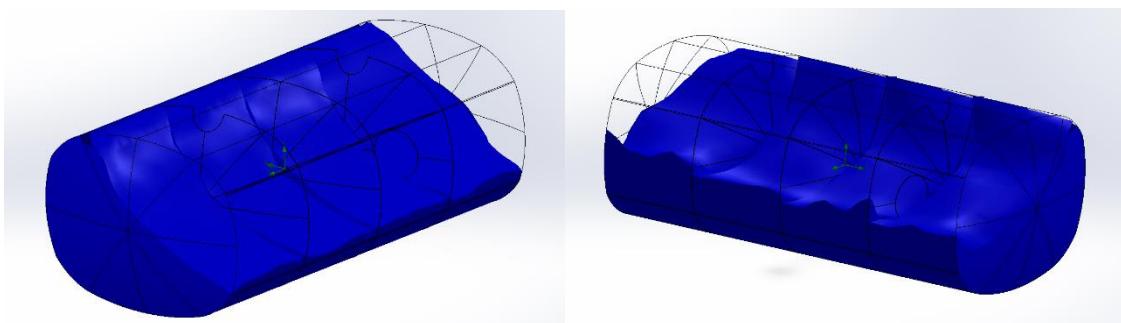
Gambar 4.64 Grafik torsi (X) pada tikungan dengan kecepatan 20 km/jam



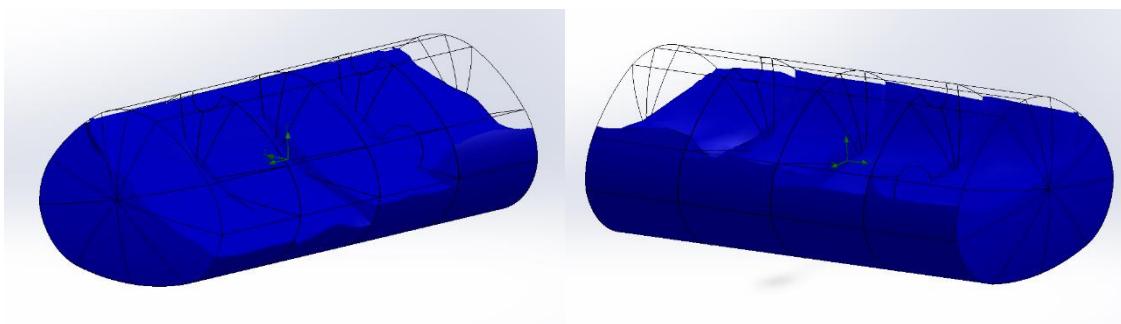
Gambar 4.65 Efek *sloshing* model 0 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan)



Gambar 4.66 Efek *sloshing* model 1 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan)



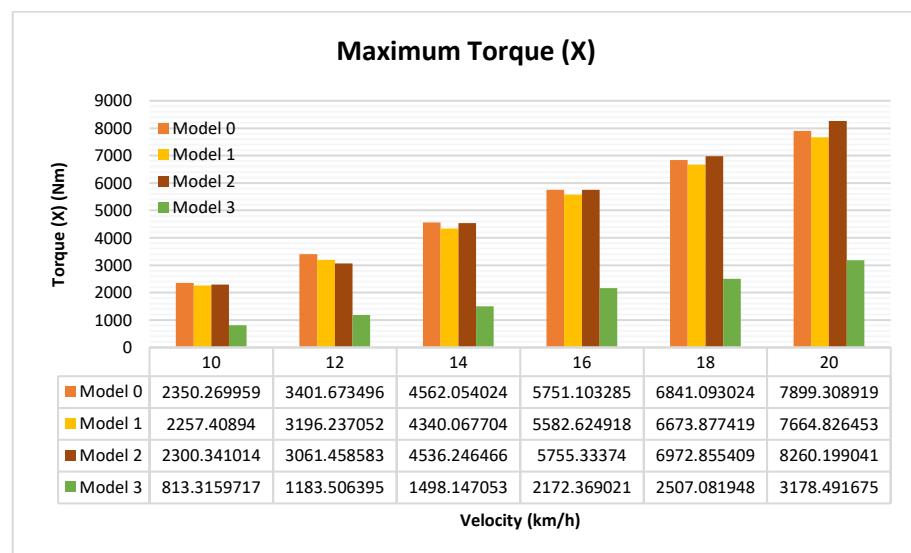
Gambar 4.67 Efek *sloshing* model 2 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan)



Gambar 4.68 Efek *sloshing* model 3 di tikungan 20 km/jam, t=2.4 s (kiri) dan t=3.7 s (kanan)

Dari hasil simulasi, dapat dilihat bahwa momen *roll* pada tangki model 2 (*semi-ellipse*) cenderung untuk kurang stabil pada saat manuver tikungan. Hal tersebut terlihat melalui karakteristik kurva momen *roll* dari model 2 yang masih terus berosilasi meskipun manuver tikungan telah selesai. Berbeda dengan tangki model 0, 1, dan 3, dimana model tangki tersebut memiliki momen *roll* yang lebih terkontrol.

Secara keseluruhan, tangki model 3 sangat stabil pada saat manuver tikungan. Hal tersebut diakibatkan oleh rendahnya pusat massa, sisi penampang tangki yang lengkung, serta tangki model 3 memiliki luas penampang yang paling kecil dibandingkan model lain. Oleh karena luas penampang tangki yang kecil, maka geometri tangki model 3 harus dibuat panjang untuk memenuhi volume yang dikehendaki. Akibatnya, tangki model 3 lebih stabil dalam momen *roll*, namun tangki model 3 kurang stabil dalam momen *pitch*. Hal tersebut juga dibuktikan melalui tingginya momen *pitch* model 3 dibanding dengan model lain berdasarkan grafik pada Gambar 4.24, Gambar 4.37, dan Gambar 4.50.



Gambar 4.69 Momen *roll* maksimum setiap kecepatan pada saat tikungan

Dari grafik momen *roll*, jika setiap nilai maksimum momen digabungkan dapat dirangkum menjadi grafik pada Gambar 4.69. Berdasarkan grafik tersebut, nilai momen *roll* maksimum meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan. Tangki model 2 memiliki nilai momen *roll* maksimum yang terbesar, diikuti oleh tangki model 0, model 1, dan model 3.

#### 4.5. Analisa Stabilitas Kendaraan

Setelah hasil simulasi ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah menentukan kestabilan kendaraan dari masing-masing model tangki. Analisa stabilitas kendaraan akan menggunakan persamaan-persamaan dari subbab 2.3.6 dan 2.3.5. Tujuan utama dari analisa stabilitas kendaraan ini adalah untuk menentukan *static rollover threshold* (SRT) dari masing-masing model tangki. Untuk menentukan SRT dari masing-masing model, akan digunakan persamaan (2.12) hingga (2.15).

Parameter-parameter yang akan digunakan dalam perhitungan SRT dapat dilihat melalui Tabel 4.8. *Sprung mass*  $m_s$  dari kendaraan merupakan berat total dari *chassis* (7945 kg) (Hino, 2019), tangki (931.4 kg), dan fluida di dalam tangki (7574.4 kg). Total *unsprung mass*  $m_{uT}$  terdiri dari massa *axle* (*steer axle*: 350 kg; *drive axle*: 700 kg) (Waka Kotahi NZ Transport Agency, 2017) dan massa 10 ban 295/80R22.5 (Heuver, 2022). *Track width*  $l_{tT}$ , *track width axle* terkaku  $l_{tS}$ , dan Pusat massa kendaraan  $h_{cg}$  didapat melalui ukuran truk tangki yang sebenarnya. *Roll stiffness* yang digunakan untuk semua *axle* adalah 1110 kNm/rad (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014).

Tabel 4.8 Parameter perhitungan SRT

Parameter	Nilai
Massa total kendaraan, $m_T$	18834.5 kg
<i>Sprung mass</i> , $m_s$	16450.8 kg
<i>Unsprung mass</i> , $m_{uT}$	2383.7 kg
<i>Track width</i> , $l_{tT}$	2.2 m
<i>Track width axle</i> terkaku, $l_{tS}$	2.2 m
Pusat massa kendaraan, $h_{cg}$	2.05 m
<i>Stiffness factor</i> , $s_f$	1
<i>Roll stiffness axle</i> terkaku, $C_{resT}$	1110 kNm/rad
<i>Roll stiffness kendaraan</i> , $C_{ress}$	1110 kNm/rad

#### 4.5.1. Analisa Static Rollover Threshold Model 1

Untuk menghitung SRT pada tangki model 1, diperlukan nilai percepatan  $a_{yT}$ , yaitu percepatan lateral pada saat *axle* pertama terangkat.

Dengan menggunakan parameter seperti pada Tabel 4.8, diperoleh percepatan lateral  $a_{yT}$  berdasarkan persamaan (2.12) sebagai berikut.

$$a_{yT} = \frac{m_T g^2 l_{tT}}{2 \left[ (m_T g h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g h_s}{C_{resT} - m_T g h_s} \right]}$$

$$a_{yT} = \frac{18834.5 \times 9.81^2 \times 2.2}{2 \left[ (18834.5 \times 9.81 \times 2.05) + \frac{((18834.5 - 2383.7) \times 9.81 \times 2.116)^2}{1.11 \times 10^6 - 18834.5 \times 9.81 \times 2.116} \right]}$$

$$a_{yT} = 3.6852 \text{ m/s}^2$$

Setelah menentukan percepatan lateral  $a_{yT}$ , percepatan lateral  $a_{yS}$  juga harus ditentukan supaya nilai SRT dapat dihitung. Dengan mengacu pada parameter-parameter perhitungan seperti pada Tabel 4.8, diperoleh percepatan lateral  $a_{yS}$  berdasarkan persamaan (2.13) sebagai berikut.

$$a_{yS} = \frac{m_S g^2 l_{tS}}{2 \left[ (m_T g s_f h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g s_f h_s}{C_{resT} - m_T g s_f h_s} \right]}$$

$$a_{yS} = \frac{16450.8 \times 9.81^2 \times 2.2}{2 \left[ (18834.5 \times 9.81 \times 1 \times 2.05) + \frac{((18834.5 - 2383.7) \times 9.81 \times 1 \times 2.116)^2}{1.11 \times 10^6 - 18834.5 \times 9.81 \times 1 \times 2.116} \right]}$$

$$a_{yS} = 3.7867 \text{ m/s}^2$$

Dengan nilai percepatan lateral  $a_{yT}$  sebesar  $3.6852 \text{ m/s}^2$  dan percepatan lateral  $a_{yS}$  sebesar  $3.7867 \text{ m/s}^2$ , maka berikut merupakan nilai SRT dapat dihitung menggunakan persamaan (2.15).

$$a_{yc} = a_{yT} - (a_{yT} - a_{yS}) \frac{m_S}{m_T}$$

$$a_{yc} = 3.6852 - (3.6852 - 3.7867) \frac{16450.8}{18834.5}$$

$$SRT = a_{yc} = 3.7738 \text{ m/s}^2$$

Dari perhitungan tersebut, dapat diketahui bahwa *static rollover threshold* dari tangki model 1 adalah dengan percepatan lateral  $3.7738 \text{ m/s}^2$  atau setara dengan  $0.385g$ . Artinya, truk tangki dengan model 1 tidak boleh melakukan manuver tikungan melebihi  $3.7738 \text{ m/s}^2$ . Kecepatan maksimum saat manuver tikungan yang diijinkan dari truk tangki model 1 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{a_{yc}r} \\ v &= \sqrt{3.7738 \times 7.08} \\ v &= 5.1690 \text{ m/s} \\ v &= 18.6084 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

Perhitungan di atas merupakan persamaan dari percepatan sentripetal yang menggunakan percepatan sentripetal sebesar  $3.7738 \text{ m/s}^2$ , yaitu nilai SRT dan radius putar  $7.08 \text{ m}$ , seperti yang dinyatakan pada Gambar 3.3. Dari perhitungan tersebut, maka kecepatan maksimum yang diijinkan truk tangki model 1 pada tikungan dengan radius putar  $7.08 \text{ m}$  adalah  $18.6084 \text{ km/jam}$ .

Dengan nilai SRT yang sudah diketahui, maka nilai tersebut bisa digunakan untuk menentukan *roll angle* maksimum yang dapat ditahan oleh truk sebelum terguling. Perhitungan *roll angle* akan menggunakan persamaan (2.10). Tinggi pusat *roll*  $h_r$  dari truk adalah  $0.604 \text{ m}$  didapat dari ukuran truk sebenarnya, dan pusat massa *unsprung mass*  $h_u$  adalah  $0.534 \text{ m}$ . Berat total kendaraan, berat *unsprung mass*, setengah *track width*, dan *roll stiffness* suspensi akan mengacu pada Tabel 4.8. Dengan menggunakan SRT sebagai parameter percepatan lateral pada perhitungan, maka diperoleh hasil perhitungan *roll angle* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} k_s\theta &= WT - Wa_y h_r + W_u a_y (h_r - h_u) \\ 1.11 \times 10^6 \theta &= 184766.5 \times 1.1 - 184766.5 \times 3.7738 \times 0.604 \\ &\quad + 23384.1 \times 3.7738 \times (0.604 - 0.534) \\ \theta &= -0.19075 \text{ rad} \\ \theta &= -10.9293^\circ \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka dapat ditentukan bahwa *roll angle* maksimum dari truk tangki model 1 sebelum terguling adalah  $-10.9293^\circ$ . Tanda negatif pada perhitungan *roll angle* berarti sudut yang terbentuk berlawanan dengan arah percepatan lateral. Apabila truk diberi percepatan lateral ke arah kanan, maka sudut yang terbentuk adalah ke arah kiri akibat gaya reaksi dari kendaraan.

#### 4.5.2. Analisa Static Rollover Threshold Model 2

Analisa SRT berikutnya adalah pada tangki model 2, dimana percepatan lateral  $a_{yT}$  dapat ditemukan menggunakan persamaan (2.12). Sesuai dengan parameter-parameter pada Tabel 4.8, maka berikut merupakan perhitungan dari percepatan lateral  $a_{yT}$ .

$$a_{yT} = \frac{m_T g^2 l_{tT}}{2 \left[ (m_T g h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g h_s}{C_{resT} - m_T g h_s} \right]}$$

$$a_{yT} = \frac{18834.5 \times 9.81^2 \times 2.2}{2 \left[ (18834.5 \times 9.81 \times 2.05) + \frac{((18834.5 - 2383.7) \times 9.81 \times 2.094)^2}{1.11 \times 10^6 - 18834.5 \times 9.81 \times 2.094} \right]}$$

$$a_{yT} = 3.7151 \text{ m/s}^2$$

Dalam menentukan nilai SRT, diperlukan juga percepatan lateral  $a_{ys}$  yang bisa didapatkan melalui persamaan (2.13). Dengan mengacu pada Tabel 4.8, maka berikut merupakan perhitungan dari percepatan lateral  $a_{ys}$ .

$$a_{ys} = \frac{m_S g^2 l_{tS}}{2 \left[ (m_T g s_f h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g s_f h_s}{C_{resT} - m_T g s_f h_s} \right]}$$

$$a_{ys} = \frac{16450.8 \times 9.81^2 \times 2.2}{2 \left[ (18834.5 \times 9.81 \times 1 \times 2.05) + \frac{((18834.5 - 2383.7) \times 9.81 \times 1 \times 2.094)^2}{1.11 \times 10^6 - 18834.5 \times 9.81 \times 1 \times 2.094} \right]}$$

$$a_{ys} = 3.8046 \text{ m/s}^2$$

Setelah percepatan lateral  $a_{yT}$  dan percepatan lateral  $a_{ys}$  diketahui, maka nilai SRT dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.15). Dengan nilai percepatan lateral  $a_{yT}$  sebesar  $3.7151 \text{ m/s}^2$  dan percepatan lateral  $a_{ys}$  sebesar  $3.8046 \text{ m/s}^2$ , maka berikut merupakan perhitungan dari nilai SRT.

$$a_{yc} = a_{yT} - (a_{yT} - a_{ys}) \frac{m_s}{m_T}$$

$$a_{yc} = 3.7151 - (3.7151 - 3.8046) \frac{16450.8}{18834.5}$$

$$SRT = a_{yc} = 3.7933 \text{ m/s}^2$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka nilai *static rollover threshold* dari tangki model 2 adalah dengan percepatan lateral  $3.7933 \text{ m/s}^2$  atau setara dengan  $0.387g$ . Hal tersebut berarti truk tangki dengan model 2 tidak boleh melakukan manuver tikungan dengan percepatan lateral melebihi  $3.7933 \text{ m/s}^2$ . Dengan menggunakan persamaan dari percepatan sentripetal, maka kecepatan maksimum saat manuver tikungan yang diijinkan dari truk tangki model 2 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{a_{yc} r} \\ v &= \sqrt{3.7933 \times 7.08} \\ v &= 5.1823 \text{ m/s} \\ v &= 18.6564 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, maka kecepatan maksimum yang diijinkan truk tangki model 2 pada saat melakukan manuver tikungan dengan radius putar  $7.08 \text{ m}$  adalah  $18.6564 \text{ km/jam}$ . Setelah diketahui nilai SRT, *roll angle* maksimum yang dapat ditahan oleh truk sebelum terguling bisa diketahui. Perhitungan *roll angle* akan menggunakan persamaan (2.10). Tinggi pusat *roll*  $h_r$  yang digunakan dalam perhitungan adalah  $0.604 \text{ m}$ , dimana data didapat dari ukuran truk yang sebenarnya. Pusat massa *unsprung mass*  $h_u$  adalah  $0.534 \text{ m}$ . Berat total kendaraan, berat *unsprung mass*, setengah *track width*, dan *roll stiffness* suspensi akan mengacu pada Tabel 4.8. Dengan menggunakan SRT sebagai parameter percepatan lateral pada perhitungan, maka diperoleh hasil perhitungan *roll angle* adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
k_s \theta &= WT - Wa_y h_r + W_u a_y (h_r - h_u) \\
1.11 \times 10^6 \theta &= 184766.5 \times 1.1 - 184766.5 \times 3.7933 \times 0.604 \\
&\quad + 23384.1 \times 3.7933 \times (0.604 - 0.534) \\
\theta &= -0.19267 \text{ rad} \\
\theta &= -11.0398^\circ
\end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan *roll angle* maksimum dari truk tangki model 2 sebelum terguling adalah  $-11.0398^\circ$ . Tanda negatif pada perhitungan *roll angle* berarti sudut yang terbentuk berlawanan dengan arah percepatan lateral.

#### 4.5.3. Analisa Static Rollover Threshold Model 3

Perhitungan SRT yang terakhir adalah pada tangki model 3, dimana persamaan (2.12) akan digunakan untuk menentukan percepatan lateral  $a_{yT}$ . Sesuai dengan parameter-parameter pada Tabel 4.8, maka berikut merupakan perhitungan dari percepatan lateral  $a_{yT}$ .

$$\begin{aligned}
a_{yT} &= \frac{m_T g^2 l_{tT}}{2 \left[ (m_T g h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g h_s}{C_{resT} - m_T g h_s} \right]} \\
a_{yT} &= \frac{18834.5 \times 9.81^2 \times 2.2}{2 \left[ (18834.5 \times 9.81 \times 2.05) + \frac{((18834.5 - 2383.7) \times 9.81 \times 2.046)^2}{1.11 \times 10^6 - 18834.5 \times 9.81 \times 2.046} \right]} \\
a_{yT} &= 3.7776 \text{ m/s}^2
\end{aligned}$$

Setelah percepatan lateral  $a_{yT}$  diketahui, maka percepatan lateral  $a_{ys}$  harus ditentukan untuk menghitung SRT. Dengan menggunakan persamaan (2.13) dan Tabel 4.8, maka berikut merupakan perhitungan dari percepatan lateral  $a_{ys}$ .

$$a_{ys} = \frac{m_S g^2 l_{ts}}{2 \left[ (m_T g s_f h_{cg}) + \frac{(m_T - m_{uT}) g s_f h_s}{C_{resT} - m_T g s_f h_s} \right]}$$

$$a_{ys} = \frac{16450.8 \times 9.81^2 \times 2.2}{2 \left[ (18834.5 \times 9.81 \times 1 \times 2.05) + \frac{((18834.5 - 2383.7) \times 9.81 \times 1 \times 2.046)^2}{1.11 \times 10^6 - 18834.5 \times 9.81 \times 1 \times 2.046} \right]}$$

$$a_{ys} = 3.8419 \text{ m/s}^2$$

Berdasarkan kedua perhitungan di atas, maka nilai SRT dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.15). Dengan percepatan lateral  $a_{yT}$  sebesar  $3.7776 \text{ m/s}^2$  dan percepatan lateral  $a_{ys}$  sebesar  $3.8419 \text{ m/s}^2$ , serta mengacu pada Tabel 4.8, maka diperoleh perhitungan nilai SRT dari tangki model 3 adalah sebagai berikut.

$$a_{yc} = a_{yT} - (a_{yT} - a_{ys}) \frac{m_s}{m_T}$$

$$a_{yc} = 3.7776 - (3.7776 - 3.8419) \frac{16450.8}{18834.5}$$

$$SRT = a_{yc} = 3.8338 \text{ m/s}^2$$

Dari perhitungan di atas, dapat ditentukan bahwa nilai *static rollover threshold* tangki model 3 adalah dengan percepatan lateral  $3.8338 \text{ m/s}^2$  atau setara dengan  $0.391g$ . Jadi, truk tangki dengan model 2 tidak boleh melakukan manuver tikungan dengan percepatan lateral melebihi  $3.8338 \text{ m/s}^2$ . Dengan menggunakan persamaan dari percepatan sentripetal, maka kecepatan maksimum saat manuver tikungan yang diijinkan dari truk tangki model 3 adalah sebagai berikut.

$$v = \sqrt{a_{yc} r}$$

$$v = \sqrt{3.8338 \times 7.08}$$

$$v = 5.2099 \text{ m/s}$$

$$v = 18.7556 \text{ km/jam}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka kecepatan maksimum yang diijinkan truk tangki model 3 pada saat melakukan manuver tikungan dengan radius putar  $7.08 \text{ m}$  adalah  $18.7556 \text{ km/jam}$ . Dari nilai SRT, *roll angle* maksimum yang dapat ditahan oleh truk sebelum terguling bisa diketahui. Menggunakan parameter-parameter yang sama dengan model 1 dan 2, berikut merupakan perhitungan dari *roll angle*.

$$k_s \theta = WT - Wa_y h_r + W_u a_y (h_r - h_u)$$

$$1.11 \times 10^6 \theta = 184766.5 \times 1.1 - 184766.5 \times 3.8338 \times 0.604$$

$$+ 23384.1 \times 3.8338 \times (0.604 - 0.534)$$

$$\theta = -0.19669 \text{ rad}$$

$$\theta = -11.2695^\circ$$

Berdasarkan perhitungan-perhitungan di atas, maka Tabel 4.9 berikut merupakan rangkuman dari nilai SRT, kecepatan maksimum, dan *roll angle* maksimum untuk tiap-tiap model tangki.

Tabel 4.9 Rangkuman nilai SRT, kecepatan maksimum, dan *roll angle* maksimum tiap model tangki

Model	SRT (m/s <sup>2</sup> )	Kecepatan maks (km/jam)	<i>Roll angle</i> maks (°)
1	3.7738	18.6084	-10.9293
2	3.7933	18.6564	-11.0398
3	3.8338	18.7556	-11.2695

Dari Tabel 4.9 serta membandingkan dengan Tabel 4.1, dapat ditentukan bahwa semakin rendah pusat massa dari sebuah model tangki, maka nilai SRT akan semakin tinggi. Hal tersebut berarti semakin rendah pusat massa dari sebuah model tangki, maka kendaraan akan menjadi lebih stabil dalam melakukan manuver tikungan. Semakin tinggi nilai SRT, maka kecepatan maksimum yang bisa dicapai kendaraan saat tikungan akan semakin tinggi. Selain itu, dengan nilai SRT yang lebih tinggi, kendaraan dapat mencapai *roll angle* yang semakin tinggi sebelum terguling. Perlu diingat bahwa semua data dari Tabel 4.9 didapatkan pada radius putar maksimum dari truk 3 sumbu, yaitu 7.08 m.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Dari penelitian, simulasi, dan perhitungan yang telah dilakukan maka berikut merupakan hal-hal yang dapat disimpulkan

- Berdasarkan hasil simulasi, model tangki yang paling efisien dalam meredam momen *roll* akibat efek *sloshing* secara berturut-turut adalah model 3 (*reuleaux*), model 1 (*ellipse*), dan model 2 (*semi-ellipse*). Selain itu, model tangki yang paling efisien dalam meredam momen *pitch* akibat efek *sloshing* secara berturut-turut adalah model 2 (*semi-ellipse*), model 1 (*ellipse*), dan model 3 (*reuleaux*).
- Semakin panjang geometri sebuah tangki, maka momen *pitch* pada saat akselerasi dan penggeraman akan semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena geometri tangki yang semakin panjang akan memberi ruang gerak yang lebih panjang bagi fluida untuk bergerak dan menghantam dinding dan *ballfront* dari tangki.
- Untuk menahan efek *sloshing* pada saat manuver tikungan, diperlukan bentuk penampang samping yang lengkung. Permukaan sisi tangki yang lengkung akan memungkinkan fluida untuk berayun pada sisi tangki saat terjadi guncangan akibat efek *sloshing*. Di sisi lain, Permukaan sisi tangki yang datar akan cenderung menyebabkan fluida menabrak dinding tangki daripada berayun pada saat terjadi *sloshing*.
- Model penampang tidak terlalu berpengaruh dalam meredam momen *yaw*. Untuk meredam momen *yaw*, tangki perlu dilengkapi dengan *baffle*.
- Semakin rendah pusat massa dari model tangki, maka nilai *static rollover threshold* (SRT) dari kendaraan akan semakin tinggi. Hal tersebut berarti kendaraan akan lebih stabil, terutama pada saat manuver tikungan, jika pusat massa kendaraan semakin rendah.
- Desain truk tangki yang paling efektif dalam menahan efek *sloshing* adalah tangki dengan geometri yang pendek, memiliki kelengkungan pada dinding samping, memiliki pusat massa yang rendah, serta dilengkapi dengan *baffle*.

## 5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, adapun beberapa saran yang bisa dilakukan untuk penelitian yang lebih lanjut sebagai berikut.

- Variasi desain *baffle* pada model tangki, mulai dari *baffle* horisontal, vertikal, maupun diagonal karena penggunaan *baffle* sangat membantu dalam meredam efek *sloshing*.
- Simulasi *sloshing* menggunakan kondisi-kondisi sekitar yang lebih kompleks, seperti kondisi tanjakan, jalan bergelombang, dan lainnya.
- Variasi radius kelengkungan pada sisi bagian tangki untuk melihat dampaknya terhadap guncangan akibat efek *sloshing*. Seperti yang dilihat dari hasil penelitian, kelengkungan sisi bagian tangki memberi pengaruh dalam meredam efek *sloshing*.

## DAFTAR PUSTAKA

- CFD Online. (2022, March 15). *CFD Online*. Retrieved from Turbulence intensity: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_intensity](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity)
- Cheli, F., D'Alessandro, V., Premoli, A., & Sabbioni, E. (2013). Simulation of sloshing in tank trucks. *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, 20, 1-18.
- Dasgupta, A. (2011). *Effect of Tank Cross-Section and Longitudinal Baffles on Transient Liquid Slosh in Partly-Filled Road Tankers*. Montreal: The Department of Mechanical and Industrial Engineering Concordia University.
- Demirel, E., & Aral, M. M. (2018). Liquid Sloshing Damping in an Accelerated Tank Using a Novel Slot-Baffle Design. *Molecular Diversity Preservation International*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.3390/w10111565>
- Hanafi, A. (2017). *Perhitungan Gaya Sloshing akibat Pitching pada Tangki Silinder dengan Metode Analogi Mekanik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Heuver. (2022). 295/80R22.5 BRIDGESTONE R297 152/148M TL M+S. Retrieved from Heuver: <https://www.heuver.com/product/b29580225brm29701/295-80r22-5-bridgestone-r297-152-148m-tl-m-s>
- Hino. (2019). *Hino Product Detail*. Retrieved from FM 280 JW - Euro4: <https://www.hino.co.id/product-detail/euro4/2/fm-280-jw>
- Hosain, M. L., & Fdhila, R. B. (2015). Literature Review of accelerated CFD Simulation Methods towards Online Application. *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015*, 3307-3314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.714>
- Kandasamy, T., Rakheja, S., & Ahmed, A. (2010). An Analysis of Baffles Designs for Limiting Fluid Slosh in Partly Filled Tank Trucks. *The Open Transportation Journal*, 23-32.
- Kolaei, A., Rakheja, S., & Richard, M. J. (2014). Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll stability of a partly-filled tank truck. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 46-58. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.01.008>
- Koli, G. C., & Kulkarni, V. V. (2010). Simulation of Fluid Sloshing in a Tank. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, II, 1-6.
- Komite Nasional Keselamatan Transportasi Republik Indonesia. (2021). *Laporan Investigasi Kecelakaan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan*. Jakarta: Komite Nasional Keselamatan Transportasi Republik Indonesia.

- Kurniawan, I. (2017). Analisis Posisi Pelat Peredam Gerak Lateral Cairan di Dalam Truk Tangki Oval yang Dimodifikasi Menggunakan Komputasi Dinamika Fluida. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 6, 48-55. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/205142024.pdf>
- Lawalata, G. M., & Rahman, F. (2020). Kendaraan Desain dan Radius Putar untuk Desain Geometrik Jalan di Indonesia. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 37, 46-60.
- Li, X. S., Zheng, X. L., Wang, Y. Y., & Cheng, Z. Q. (2013). Study on Driving Stability of Tank Trucks Based on Equivalent Trammel Pendulum for Liquid Sloshing. *Hindawi Publishing Corporation*, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1155/2013/659873>
- Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina.
- PT Geluran Adikarya. (2018). *Aluminium & Steel Fuel Road Tanks*. Retrieved November 9, 2021, from PT Geluran Adikarya: <https://geluran.co.id/product/aluminium-steel-fuel-road-tankers/>
- PT Geluran Adikarya. (2018). *LPG Storage & Transport Tanks*. Retrieved November 9, 2021, from PT Geluran Adikarya: <https://geluran.co.id/product/lpg-storage-transport-tanks/>
- PT Geluran Adikarya. (2018). *Others*. Retrieved November 9, 2021, from PT Geluran Adikarya: <https://geluran.co.id/product/others/>
- Rakheja, S., Stiharu, I., Kang, X., & Romero, J. A. (2002). Influence of tank cross-section and road adhesion on dynamic response of partly-filled tank trucks under braking-in-a-turn. *International Journal of Vehicle Design*, 3, 223-240.
- Scanscot (Director). (2019). *SIMULIA XFlow - Tank Sloshing Simulation* [Motion Picture]. Retrieved November 9, 2021, from [https://www.youtube.com/watch?v=56cxOzgl-mc&ab\\_channel=SCANSCOT](https://www.youtube.com/watch?v=56cxOzgl-mc&ab_channel=SCANSCOT)
- Tehrani, K. M., Rakheja, S., & Sedaghati, R. (2005). Analysis of the overturning moment caused by transient liquid slosh inside a partly filled moving tank. *Journal of Automobile Engineering*, 289-301. doi:<https://doi.org/10.1243/09544070D01705>
- Tomar, A. S. (2015). *Estimation of Steady State Rollover Threshold for High Capacity Transport Vehicles using RCV Calculation Method*. Goteborg: Department of Applied Mechanics Chalmers University of Technology.
- Waka Kotahi NZ Transport Agency. (2017). *Method for Estimating the SRT of a Vehicle*. New Zealand: Waka Kotahi NZ Transport Agency.