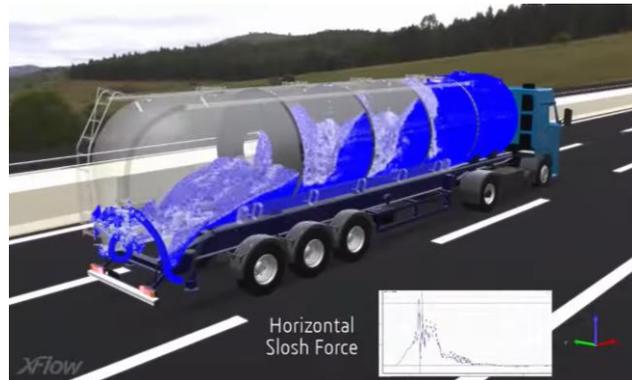


2. TINJAUAN PUSTAKA

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

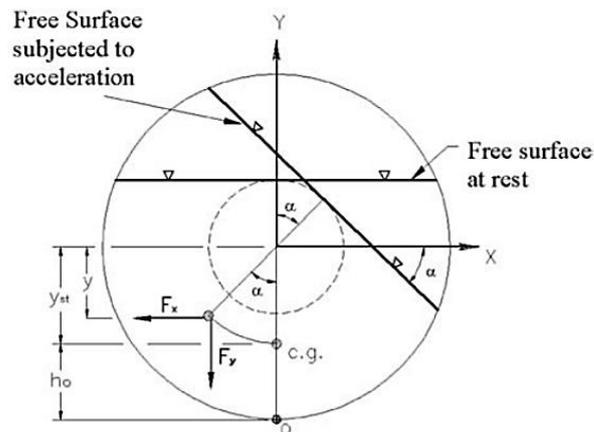
Sumber: Scanscot (Director). (2019). *SIMULIA XFlow - Tank Sloshing Simulation*

Umumnya, efek *sloshing* terjadi pada saat akselerasi, pengereman, 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 pengereman, fluida akan terdorong ke depan akibat perubahan kecepatan secara tiba-tiba. Pengereman 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).

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

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

$$F_x = m a_x \quad (2.2)$$

$$F_y = m g \quad (2.3)$$

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

α : 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 pengereman yang cukup tinggi. Pendekatan *quasi-static* tidak dapat diaplikasikan untuk mempelajari *sloshing* pada tangki yang dilengkapi dengan *baffle* (Kolaei, Rakheja, & Richard, 2014).

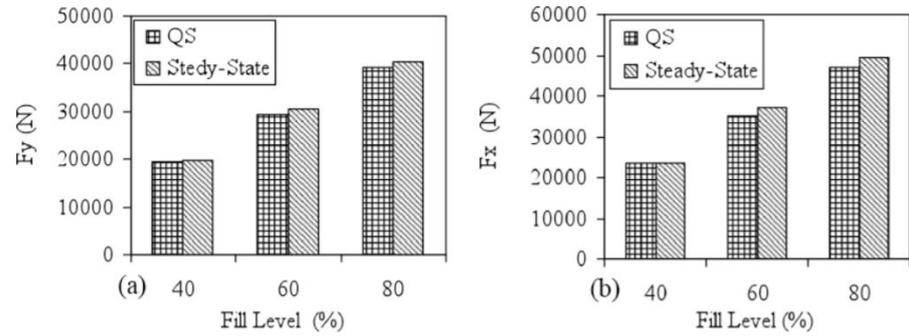
2.1.3. Analisa Level Pengisian Cairan

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).

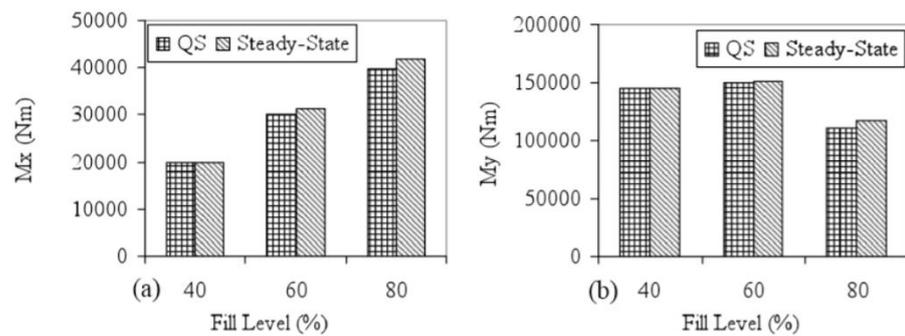
Sebuah penelitian oleh (Kandasamy, Rakheja, & Ahmed, 2010) menganalisa pengaruh level pengisian pada *cleanbore tank*, sebuah tangki tanpa *baffle*. Pengujian dilakukan menggunakan level pengisian 40% hingga 80% dan dilakukan pada kondisi *steady state*. Berikut merupakan perbandingan respon gaya lateral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

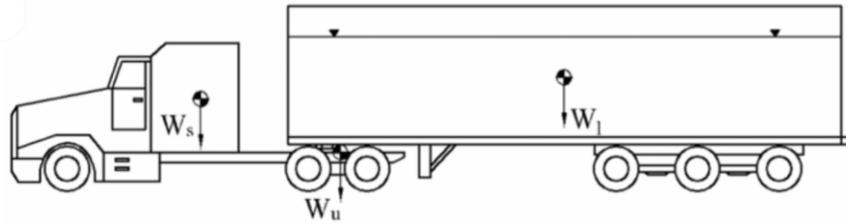


Gambar 2.4 Perbandingan (a) roll moment M_x dan (b) pitch moment M_y pada *cleanbore tank* dengan $g_x = 0.3g$ dan $g_y = 0.25g$

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.

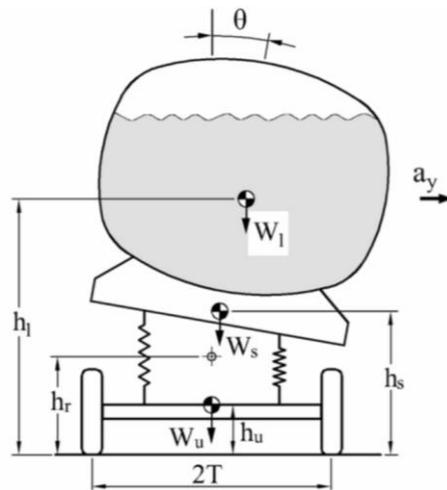
2.1.4. Analisa Roll Moment

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/s²)

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 (m²)

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).

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

Dimana:

k_s : *equivalent roll stiffness* akibat suspensi

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

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

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).

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

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

$$S_f = \frac{C_{resS}}{C_{resT}} \quad (2.14)$$

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

Dimana:

a_{yT} : Percepatan lateral saat pengangkatan roda pertama (m/s²)

a_{yS} : Percepatan lateral saat semua roda dalam terangkat dari tanah (m/s²)

m_T : Massa total kendaraan (kg)

m_S : *Sprung mass* (kg)

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

g : Percepatan gravitasi (9.81 m/s²)

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

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

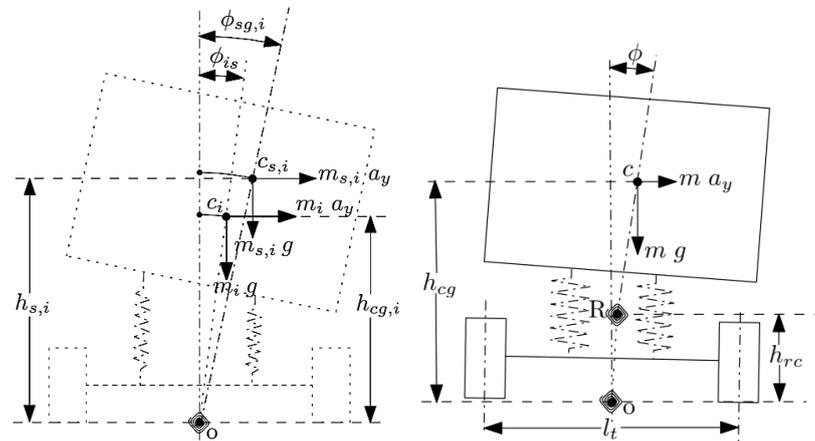
h_{cg} : Pusat massa kendaraan (m)

h_s : Pusat massa *sprung mass* (m)

S_f : stiffness factor

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

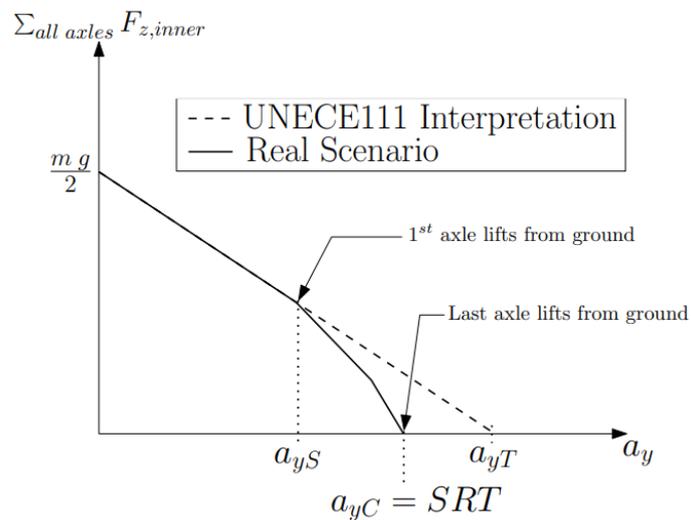
C_{resS} : Resultan roll stiffness dari kendaraan (Nm/rad)



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). *Aluminium & 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>

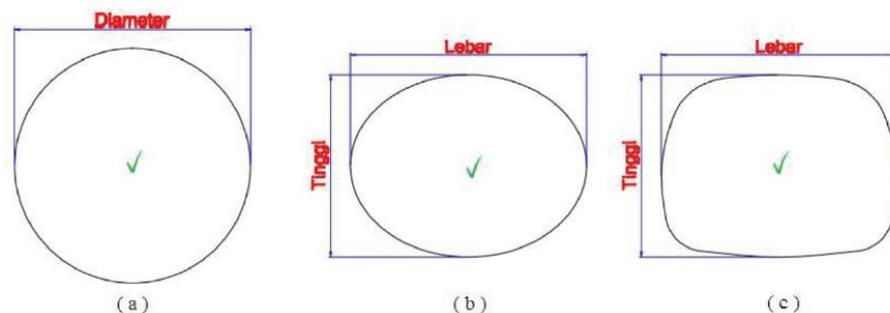
Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikasi. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 16.

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 Pabrikasi. 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.

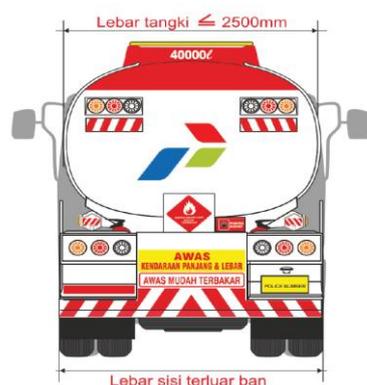
Tabel 2.2.

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 Pabrik. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 17.



Gambar 2.13 Batasan lebar tangki dan ban

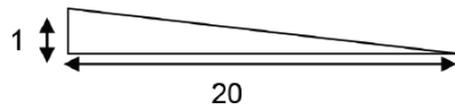
Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrik. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 18.



Gambar 2.14 Ilustrasi batas ketinggian

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrik. 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 Pabrik. 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

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

Rasio Re/R_m 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*)

R_m = *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:

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

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 melampaui nilai σ 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 σ 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* σ 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)

σ = stress yang diizinkan, (N/mm²)

λ = 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)	≤ 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 murni 99.8%</i> (mm)	6,0	8,0

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikasi. 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/aluminium. Untuk dapat memaksimalkan penggunaan material, pembuatan tangki dapat dilakukan dengan metode 3-4 plat disambung memanjang/longitudinal sepanjang tangki untuk kemudian dilakukan 1× *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.)

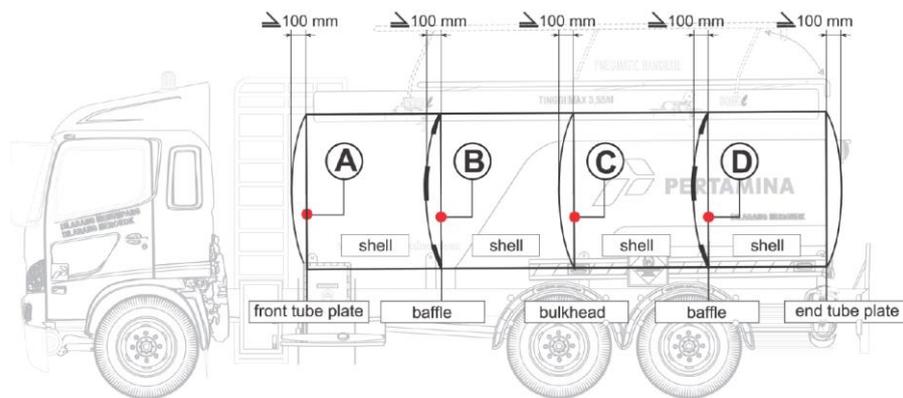
Untuk tangki dengan penampang lingkaran, elips atau semi-elips dengan maksimum radius kurva 2.0 meter, tangki harus dilengkapi dengan penguat berupa partisi kompartemen/*bulkhead* dan atau penahan guncangan (*Baffles*) seperti pada Gambar 2.16 untuk memberikan tambahan perlindungan terhadap kerusakan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

Volume antara *Baffles* dengan *Baffles* atau partisi kompartemen 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 kompartemen 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

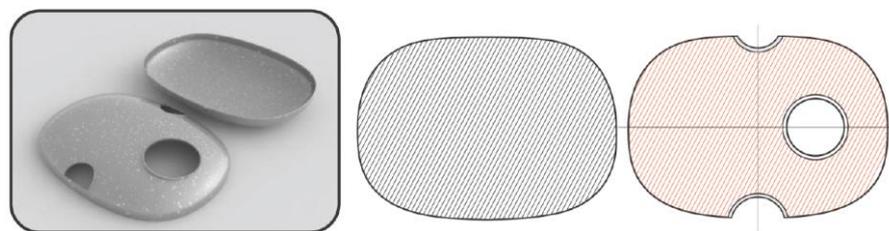
menghadap ke belakang, untuk mengurangi dampak gesekan dari pengereman.

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 Pabrikasi. In Pertamina, *Panduan Mobil Tangki* (Vol. 1). Pertamina, p. 24.

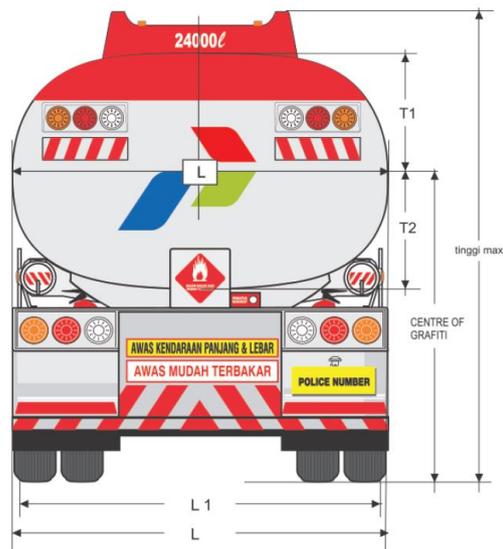


Gambar 2.17 Ilustrasi area *Baffles*. Bagian kiri adalah luasan penampang tangki dan bagian kanan adalah luasan *Baffles*

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikasi. 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.



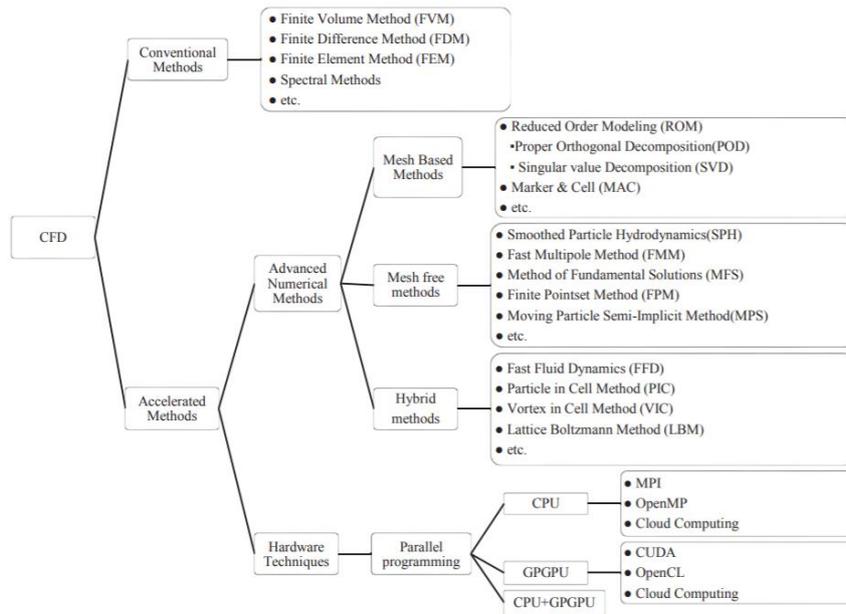
Gambar 2.18 Ilustrasi *center of gravity*

Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikasi. 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 populer 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:

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

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

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

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

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

$$p = \rho RT \quad (2.28)$$