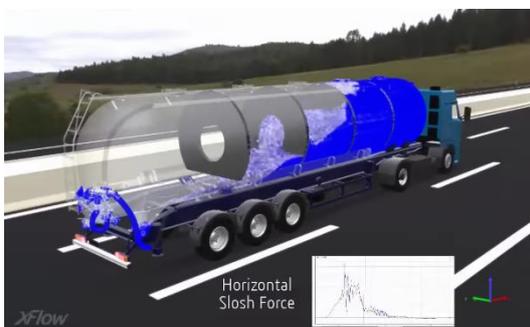


2. STUDI LITERATUR

2.1. Efek slohing

Sloshing adalah gerakan permukaan bebas cairan yang menghantam dinding pembatas tangki akibat volume cairan yang tidak penuh. Efek *sloshing* dapat berakibat fatal bagi pengemudi atau pengguna jalan lainnya. Hal ini disebabkan oleh hantaman cairan yang dapat menghasilkan gaya atau torsi, yang bisa menyebabkan truk terguling. Selain itu, efek *sloshing* menyebabkan ketidakstabilan pada kendaraan. Ketika tangki bergerak, cairan yang tidak penuh dalam tangki juga bergerak, sehingga pusat massanya berubah-ubah dan menimbulkan gaya tambahan pada kendaraan. (Hanafi, 2017).

Umumnya, efek *sloshing* terjadi saat akselerasi, pengereman, dan menikung. Saat akselerasi, truk tangki akan terasa lebih berat karena cairan terdorong ke belakang akibat kelembaman fluida di dalam tangki. Sebaliknya, saat pengereman, fluida akan terdorong ke depan akibat perubahan kecepatan mendadak. Pengereman yang terlalu tiba-tiba dapat menyebabkan tangki terlepas dan menghantam pengemudi truk. Begitu juga saat truk menikung, fluida akan menghantam dinding samping dan menimbulkan momen guling akibat gaya *sloshing*. Jika kecepatan truk tangki saat menikung terlalu tinggi, truk tangki bisa terguling.



Gambar 2.1 Kondisi *Sloshing* pada truk tangki

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

Sloshing dapat menyebabkan beban hidrodinamik yang berlebihan pada dinding tangki, serta dapat mendestabilisasi dinamika struktur saat frekuensi eksitasi mendekati frekuensi alami terendah dari wadah yang terisi sebagian (Demirel & Aral, 2018). Oleh karena itu, sangat penting untuk menganalisis 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 menunjukkan momen guling M_2 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 , dan percepatan gravitasi g di rumuskan sebagai berikut (Tehrani, Rakheja, & Sedaghati, 2005).

$$M_z = Fx(R - y) + Fyx \quad (2.1)$$

Gaya *sloshing lateral* F , dan gaya *sloshing vertical* 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 vertical* kondisi quasi-static (N)

R: Jari-jari tangki (m)

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

y: Koordinat *vertical* sesaat pusat massa cairan arah sumbu y (m)

m: Massa cairan dalam tangki (kg)

a_x : Percepatan *lateral* (m/s²)

g : Percepatan gravitasi bumi (m/s²)

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

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

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

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

Dimana:

y_{st} : Koordinat *vertical*

a : 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 *vertical* 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 *vertical* 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).

$$F_x = F_x \quad (2.6)$$

$$F_y = F_y \quad (2.7)$$

Dimana:

F_x : Gaya *sloshing lateral* rata-rata (N)

F_y : Gaya *sloshing vertical* rata-rata (N)

Jika nilai F_x , mendekati nilai F_x , dan nilai 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).

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 2.2. Truk tangki muatan LPG

Sumber: *LPG Storage & Transport Tanks - MECO*. (n.d.). <https://www.meco.co.id/lpg.html>

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. 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 2.3 Truk tangki muatan BBM

Sumber: *Aluminium Fuel - MECO*. (n.d.). <https://www.meco.co.id/aluminium.html>

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 2.6 merupakan salah satu contoh truk tangki yang didesain untuk muatan tepung.



Gambar 2.4. Truk tangki muatan tepung

Sumber: *Tanker Tepung Terigu - CLW GROUP*. (n.d.). <http://id.chengli-specialtruck.com/tank-truck/powder-tanker/wheat-flour-tanker.html>

2.3. Syarat 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

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.

Table 2.1. Kesesuaian bahan dengan kapasitas tangki (pertamina, n.d.)

	Volume Tangki (l)			
	40000	32000	24000	16000
Bahan Tangki	Alumunium Alloy	Alumunium Alloy	Alumunium Alloy	Alumunium Alloy/Mild steel
	Volume Tangki (l)			
	15000	10000	8000	5000
Bahan Tangki	Mild steel	Mild steel	Mild steel	Mild steel

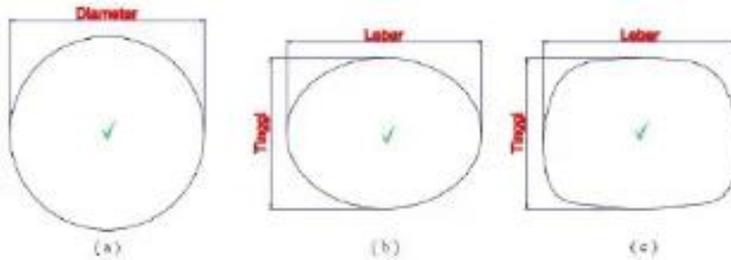
Sumber: Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikasi. In Pertamina, Panduan Mobil Tangki (Vol. 1). Pertamina, p. 16.

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

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 2.5 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 *vertical* ke atas sebesar total massa.
- Arah *vertical* ke bawah sebesar dua kali total massa.

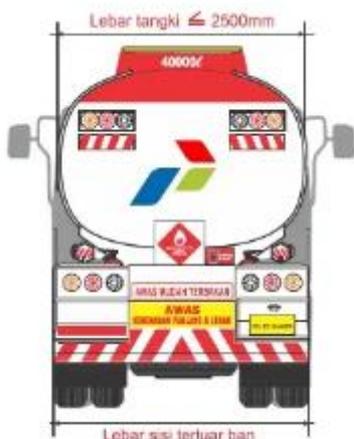
Lebar maksimal tangki tidak boleh melebihi lebar keseluruhan dinding terluar ban di sisi kiri dan kanan dan tidak melebihi 2.500 mm seperti terlihat pada Gambar 2.13.

Tabel 2.2. Konfigurasi Kompartemen yang di ijinakan pertamina

Konfigurasi	Kapasitas
Kelipatan 5 KL	

1 x 5 KL	5 KL
2 x 5 KL	10 KL
3 x 5 KL	15 KL
Kelipatan 8 KL	
1 x 8 KL	8 KL
2 x 8 KL	16 KL
3 x 8 KL	24 KL
4 x 8 KL	32 KL
5 x 8 KL	40 KL
Kombinasi	
2 x 4 KL	8 KL
2 X 4 KL + 1 X 8 KL	16 KL
4 x 4 KL	16 KL
2 X 4 KL + 2 X 8 KL	24 KL
4 X 4 KL + 1 X 8 KL	24 KL
6 x 4 KL	24 KL
2 X 4 KL + 3 X 8 KL	32 KL
2 X 4 KL + 4 X 8 KL	40 KL

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



Gambar 2.6. Batasan lebar tangki dan ban

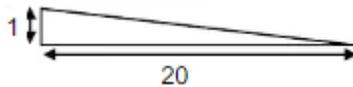
Sumber : Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, Panduan Mobil Tangki (Vol. 1). Pertamina, p. 19.



Gambar 2.7. 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 2.8 Ilustrasi kemiringan tangki

Sumber : Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrikan. In Pertamina, Panduan Mobil Tangki (Vol. 1). Pertamina, p. 20.

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

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 R_e/R_m melebihi 0,85 tidak diperbolehkan untuk penggunaan *steel* pada konstruksi pengelasan tangki (Pertamina, n.d.).

R_e = 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:

$$\frac{1000}{\text{Tensile Strength (N/mm}^2\text{)}} \quad (2.8)$$

Untuk fine-grained *steel* minimal 16% dan untuk *steel* lainnya minimal 0%, Untuk bahan *Aluminium alloy*, *elongation fracture* harus minimal 24% dan *tensile strength* minimal 275 Mpa.

2.3.4. Penguat struktur, partisi kompartemen, dan penahan guncangan (Pertamina, n.d.)

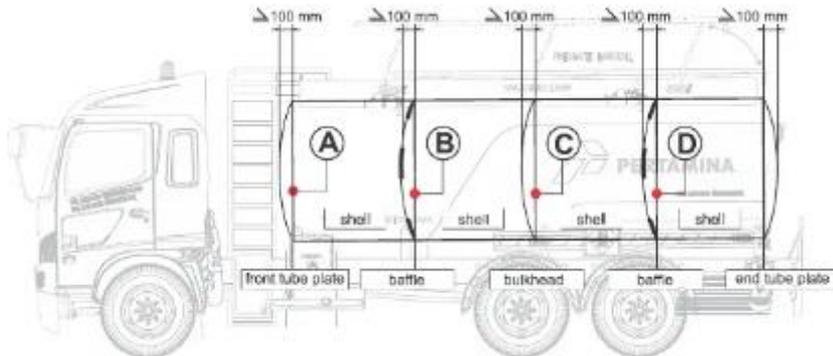
Untuk tangki dengan penampang lingkaran, elips atau semi-elips dengan maksimum radius kurva 2.0 meter, tangki harus dilengkapi dengan penguat berupa partisi kompartemen/*bulkhead* dan atau penahan guncangan (*Baffles*) seperti pada Gambar 2.16 untuk memberikan tambahan perlindungan terhadap kerusakan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

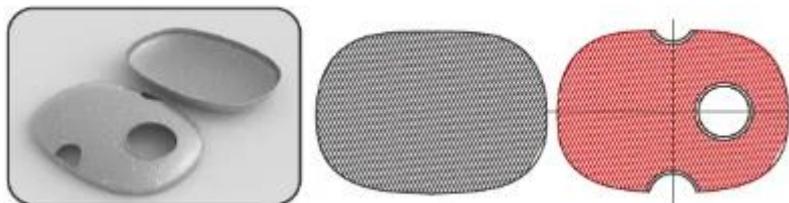
Posisi lubang inspeksi *Baffles* letaknya harus berbeda antar kompartemen. Untuk tangki dengan jumlah kompartemen genap maka posisi *Baffles* selang seling di bagian kiri dan kanan. Untuk tangki dengan Jumlah kompartemen ganjil maka posisi *Baffles* selang seling antara di bagian kanan, tengah dan kiri. *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 2.9 Ilustrasi kecembungan minimal partisi kompartemen dan *baffle* (A) *Bulkhead* depan, (B) *Baffle*, (C) Partisi kompartemen, (D) *Bulkhead* belakang

Sumber : Pertamina. (n.d.). Manajemen Pabrik. In Pertamina, Panduan Mobil Tangki (Vol. 1). Pertamina, p. 23



Gambar 2.12. Ilustrasi area *baffle*. Bagian kiri adalah luasan penampang tangki dan bagian kanan adalah luasan *baffle*

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

2.3.5. Stabilitas Mobil Tangki

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*.

2.4. Stress

Tegangan normal (normal *stress* adalah gaya per satuan luas yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan material. Tegangan ini biasanya diakibatkan oleh beban aksial sejajar dengan sumbu utama dari elemen struktur. Dalam analisis dan desain struktur, penting untuk memastikan bahwa tegangan normal tidak melebihi batas kekuatan material. Setiap material memiliki batas kekuatan tarik dan tekan yang berbeda, dan melebihi batas tersebut dapat menyebabkan keretakan atau keruntuhan.

Rumus dasar untuk menghitung tegangan normal adalah:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

Di mana:

σ adalah tegangan normal (Pa atau N/m²)

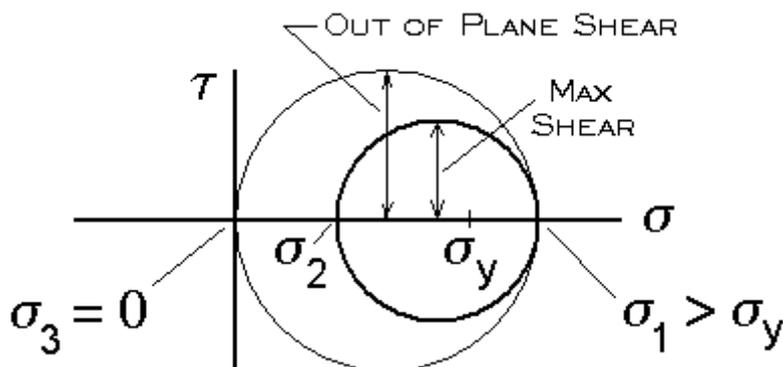
P adalah gaya aksial atau gaya normal yang bekerja pada material (N)

A adalah luas penampang dari material (m²)

Dalam analisis dan desain struktur, penting untuk memastikan bahwa tegangan normal tidak melebihi batas kekuatan material. Setiap material memiliki batas kekuatan tarik dan tekan yang berbeda, dan melebihi batas tersebut dapat menyebabkan keretakan atau keruntuhan.

2.4.1. Von Misses Stress

Tegangan Von Mises adalah konsep yang digunakan dalam mekanika material untuk menentukan kapan suatu material akan mengalami kegagalan atau deformasi plastis di bawah kondisi tegangan multiaxial. Ini adalah pendekatan yang lebih mendalam dibandingkan dengan hanya mempertimbangkan tegangan maksimum pada material.



Gambar 2.10 Arah σ_1 , σ_2 , dan σ_3

Sumber : *FEMCI Book - Yield Criteria Notes*. (n.d.). <https://femci.gsfc.nasa.gov/yield/>

Tegangan Von Mises adalah tegangan ekuivalen yang didasarkan pada teori distorsi energi (*distortion energy theory*). Teori ini menyatakan bahwa kegagalan material terjadi ketika

energi distorsi yang disimpan dalam material mencapai nilai tertentu, yang sama dengan energi distorsi pada titik leleh material dalam uji tarik sederhana.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.9)$$

σ_v : Von mises stress (Mpa)

σ_1 : first principal stress (Mpa)

σ_2 : second principal stress (Mpa)

σ_3 : third principal stress (Mpa)

Tegangan utama (principal stress) adalah tegangan yang terjadi pada bidang di mana tegangan geser adalah nol. Tegangan utama memberikan informasi penting tentang kondisi tegangan maksimum dan minimum yang dialami oleh material pada titik tertentu. Dalam mekanika material, tegangan utama digunakan untuk menganalisis kekuatan material dan prediksi kegagalan.

First Principal Stress (σ_1): Tegangan utama maksimum. Ini adalah tegangan terbesar yang dialami material pada titik tertentu. Second Principal Stress (σ_2): Tegangan utama menengah. Ini adalah tegangan yang berada di antara tegangan utama pertama dan ketiga. Third Principal Stress (σ_3): Tegangan utama minimum. Ini adalah tegangan terkecil yang dialami material pada titik tertentu.

Tegangan Von Mises merupakan alat analisis yang penting dalam mekanika material yang memungkinkan prediksi kegagalan material di bawah kondisi tegangan multiaxial. Dengan menggabungkan berbagai komponen tegangan menjadi satu ukuran skalar, tegangan Von Mises memberikan gambaran yang komprehensif tentang kondisi tegangan dalam material, membantu insinyur merancang struktur yang lebih aman dan andal.

2.5. **Fatigue stress**

Dalam mekanika material, tegangan lelah (*fatigue stress*) merujuk pada fenomena di mana material mengalami kerusakan atau kegagalan setelah terpapar beban siklik atau beban yang berubah-ubah secara berulang kali dalam jangka waktu yang lama, meskipun tegangan yang dialami mungkin jauh di bawah tegangan tarik maksimum material. Kelelahan material terjadi ketika sebuah komponen mengalami kegagalan akibat tegangan siklik yang berulang-ulang, meskipun besarnya tegangan tersebut tidak cukup untuk menyebabkan kerusakan dalam sekali pembebanan. Proses ini melibatkan pembentukan dan pertumbuhan retakan mikro yang akhirnya menyebabkan patahan total pada material.

Analisis tegangan lelah sangat penting dalam desain struktur yang akan mengalami beban siklik. Memahami dan memperhitungkan tegangan lelah dapat mencegah kegagalan yang tidak diinginkan dan memastikan keandalan serta keamanan komponen dalam jangka panjang.

2.6. **Strain**

Dalam mekanika material, regangan normal (*normal strain*) adalah ukuran deformasi suatu material yang diakibatkan oleh tegangan normal. Regangan ini mengukur perubahan panjang relatif dari suatu material dalam arah beban yang diterapkan.

Regangan normal didefinisikan sebagai perubahan panjang dibagi dengan panjang awal dari material. Rumus dasar untuk regangan normal adalah:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.10)$$

di mana:

- ϵ adalah regangan normal (tanpa satuan, karena merupakan rasio)
- ΔL adalah perubahan panjang material (m)
- L_0 adalah panjang awal material (m)

Dalam analisis struktural, penting untuk menghitung regangan normal untuk memastikan bahwa material tidak melebihi batas elastisnya, yang dapat menyebabkan deformasi permanen atau kerusakan. Regangan normal yang berlebihan dapat mengindikasikan bahwa material berada dalam kondisi berbahaya dan mungkin mengalami kegagalan.

Regangan normal adalah ukuran penting dalam mekanika material yang menunjukkan sejauh mana suatu material mengalami deformasi akibat beban aksial. Memahami regangan normal dan hubungannya dengan tegangan melalui modulus elastisitas memungkinkan insinyur untuk merancang dan menganalisis struktur yang aman dan efektif.