



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PERILAKU TANGKI MINYAK PELAT BAJA TERHADAP  
BEBAN INTERNAL DAN BEBAN SEISMIK**

**SKRIPSI**

**Oleh :**

**INDRA NURUDIN FATHONI**

**0706266310**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
DEPOK  
GASAL 2010/2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PERILAKU TANGKI MINYAK PELAT BAJA TERHADAP  
BEBAN INTERNAL DAN BEBAN SEISMIK**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana  
Teknik

Oleh :

**INDRA NURUDIN FATHONI**

**0706266310**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
KEKHUSUSAN STRUKTUR  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Indra Nurudin Fathoni  
NPM : 0706266310  
Tanda Tangan :   
Tanggal : Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Indra Nurudin Fathoni  
NPM : 0706266310  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Seminar : Studi Perilaku Tangki Minyak Pelat Baja

Terhadap Beban Internal dan Beban Seismik

Telah berhasil diujikan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Sjahril A Rahim M.Eng

Penguji : Dr-Ing Josia Irwan Rastandi ST. MT

Penguji : Mulia Orientilize, ST., M.Eng

Ditetapkan di: Depok

Tanggal : Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan seminar ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- Ir. Sjahril A Rahim M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- Orang tua dan adik saya yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan material;
- Iris Lisfiyah, Pacar saya, yang selalu mensupport sampe bantuin input beban gempa, memang pintar dia;
- Seluruh sahabat khususnya Teknik Sipil 2007 yang telah memberikan bantuan/dukungan semangat dan doa untuk kelancaran penyusunan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Indra Nurudin Fathoni  
NPM : 0706266310  
Program Studi : Teknik Sipil  
Departemen : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free-Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Studi Perilaku Tangki Minyak Pelat Baja Terhadap Beban Internal dan Beban Seismik

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : Juni 2011

Yang menyatakan



(Indra Nurudin Fathoni)

## ABSTRAK

Nama : Indra Nurudin Fathoni  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul : Studi Perilaku Tangki Minyak Pelat Baja terhadap  
Beban Internal dan Beban Seismik

Tangki minyak pelat baja merupakan struktur yang perannya semakin vital seiring dengan kebutuhan akan bahan bakar yang terus meningkat. Dalam penelitian ini akan dibahas bagaimana cara mendesain tangki minyak pelat baja sesuai dengan peraturan *API 650 10th Edition "Welded Steel Tank For Oil Storage"* terutama untuk bagian dinding tangki, kemudian bagaimana kita menerapkan beban gempa pada tangki hingga perilaku tangki berupa gaya dalam yang dialami oleh dinding tangki akibat beban internal dan beban gempa tadi.

Dalam penelitian ini akan diberikan variasi perbandingan diameter dan tinggi tangki serta perbedaan wilayah gempa namun pada volume yang dijaga tetap sebesar 150.000 Barrel. Dari variasi tersebut akan didapatkan variasi manakah yang paling efektif dari sudut pandang penelitian ini serta seberapa besar pengaruh beban gempa pada dinding tangki.

Kata kunci : Tangki Minyak, Pelat Baja, API 650

## DAFTAR ISI

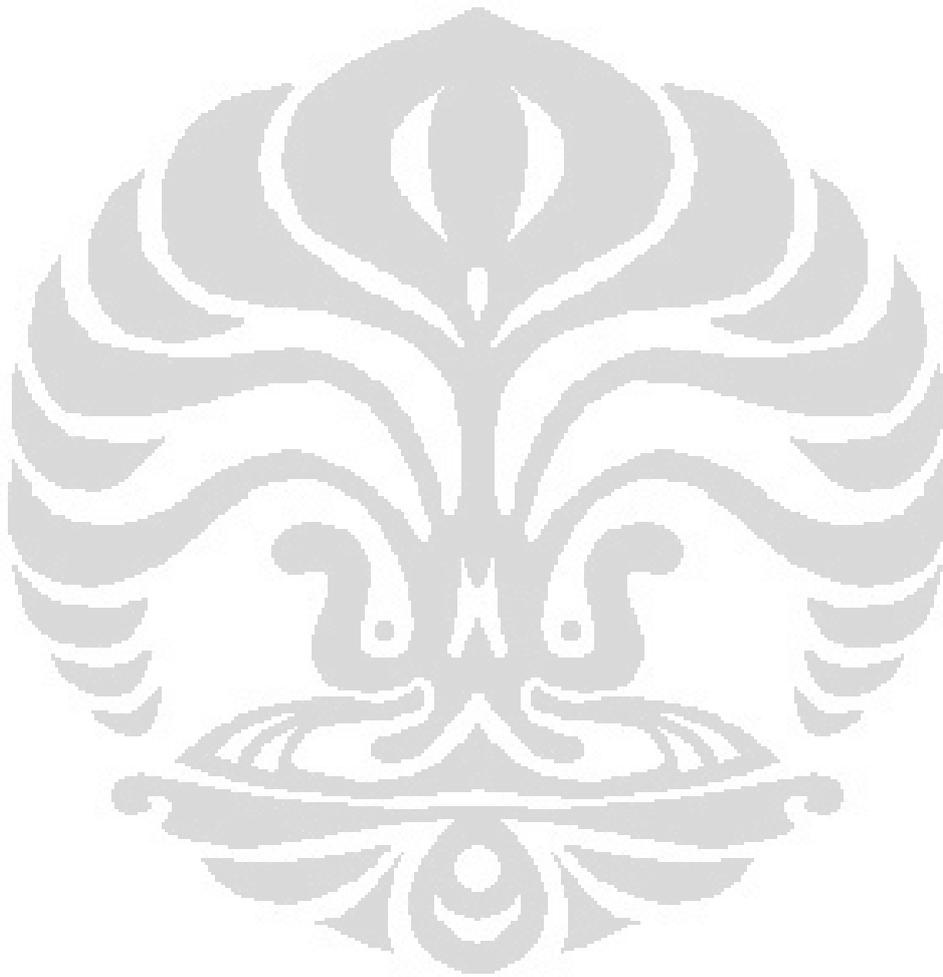
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xii</b>
<b>BAB 1    Pendahuluan .....</b>	<b>1</b>
1.1.    Latar Belakang.....	1
1.2.    Perumursan Masalah.....	2
1.3.    Tujuan .....	2
1.4.    Hipotesa .....	2
1.5.    Pembatasan Masalah.....	3
1.6.    Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB 2    Landasan Teori.....</b>	<b>5</b>
2.1.    Teori Umum Tentang Cangkang Silindris .....	5
2.2.    Perencanaan.....	12
2.3.    Jenis-Jenis Tangki Penimbun .....	13
2.3.1    Jenis-Jenis Tangki Berdasarkan Letaknya .....	13
2.3.2    Jenis Tangki Berdasarkan Bentuk Atap.....	14
2.4.    Standar Desain.....	15
2.5.    Persyaratan Untuk Elemen Elemen Tangki .....	15
2.5.1    Material .....	15
2.5.2    Roof Plate.....	16
2.5.3    Rafter and Girder.....	16
2.5.4    Kolom .....	16
2.5.5    Top angle.....	17
2.5.6    Shell Plate ( Pelat Dinding ).....	17
2.5.7    Pelat dasar Tangki .....	18
2.6.    Pembebanan Pada Struktur.....	19
2.6.1    Beban Mati dan Beban Hidup .....	19
2.7.    Beban Seismik (Gempa) .....	19
2.7.1    Tekanan Akibat Gempa .....	19
2.7.2    Gempa Vertikal .....	20
2.7.3    Distribusi Beban Gempa .....	23
2.7.4    Tegangan Pada Circular Tank .....	26
2.7.5    Freeboard .....	26
2.7.6    Model Dinamik.....	28
<b>BAB 3    Metodologi penelitian .....</b>	<b>36</b>
3.1.    Desain Tangki.....	36
3.2.    Identifikasi Perilaku Tangki.....	36

3.3.	Studi Parameter .....	39
3.3.1	Perbandingan Tinggi dan Diameter Tangki .....	39
3.3.2	Perbandingan Wilayah Gempa.....	39
<b>BAB 4</b>	<b>Analisis.....</b>	<b>41</b>
4.1.	Data Umum Perencanaan.....	41
4.2.	Perancangan Tangki Minyak.....	41
4.2.1	Pelat Dinding.....	41
4.2.2	Bottom Plate.....	42
4.2.3	Annular plate.....	43
4.2.4	Roof plate.....	43
4.2.5	Top Angle.....	43
4.2.6	Rafter Girder dan Kolom .....	43
4.3.	Pembebanan.....	44
4.3.1	Berat Sendiri Struktur.....	44
4.3.2	Hidrostatik .....	44
4.3.3	Live Load .....	44
4.3.4	Beban Hidrodinamik.....	44
4.4.	Permodelan.....	47
4.5.	Output SAP .....	56
4.6.	Analisa .....	56
4.6.1	Analisa Perbandingan Penggunaan Pelat Baja.....	56
4.6.2	Analisa perbandingan nilai tekanan maksimum akibat gempa.....	58
4.6.3	Analisa Gaya Dalam.....	59
4.6.4	Analisa Perbandingan Beban Gempa dan Beban Hidrostatik .....	66
4.6.5	Analisa Perbandingan Deformasi.....	69
4.6.6	Analisa Perbandingan Perletakan Jepit dan Sendi.....	70
4.6.7	Analisa Optimasi Ketebalan Pelat Dinding.....	73
4.6.8	Analisa Properti Dinamik Tangki.....	76
4.6.9	Analisa Pengaruh Tutup Pada Tangki .....	77
<b>BAB 5</b>	<b>Kesimpulan dan saran.....</b>	<b>80</b>
5.1.	Kesimpulan.....	80
5.2.	Saran .....	80
	<b>Daftar Referensi .....</b>	<b>82</b>
	<b>Lampiran .....</b>	<b>83</b>

## DAFTAR GAMBAR

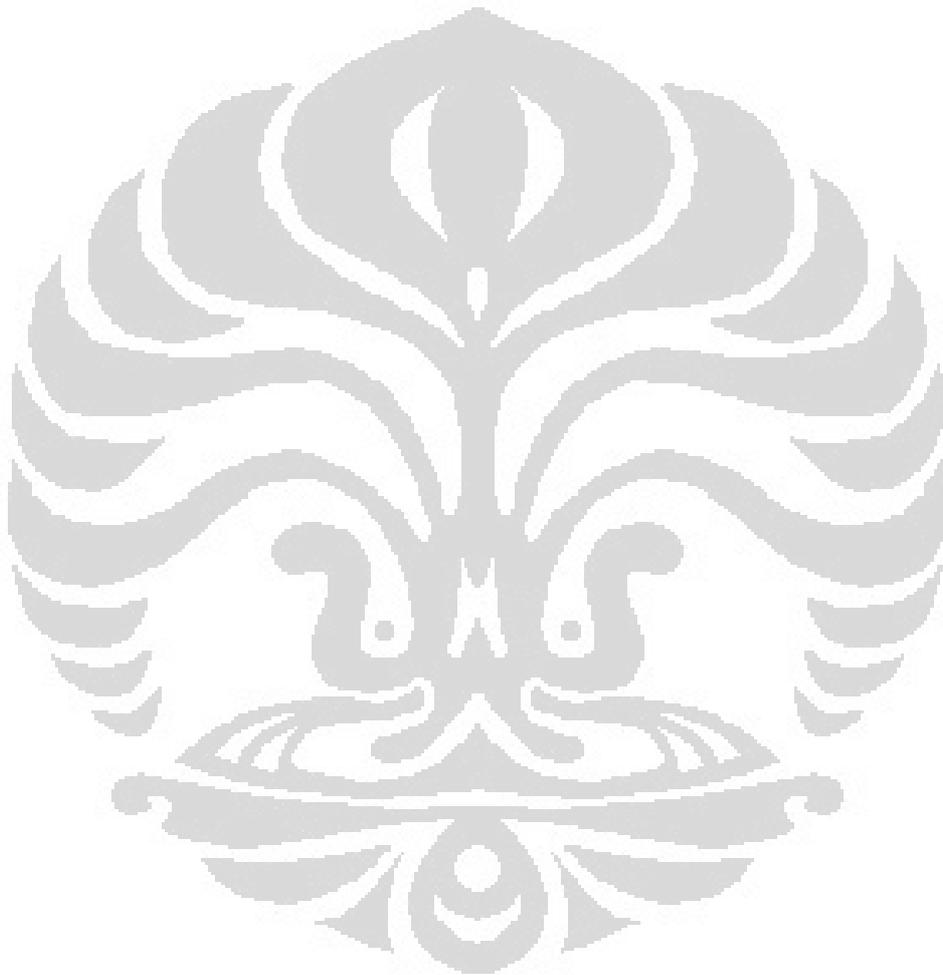
Gambar 1. 1 Tangki Penimbun Minyak.....	2
Gambar 2. 1 Elemen pelat.....	5
Gambar 2. 2 Tabel nilai $\varphi$ , $\psi$ , $\theta$ , dan $\zeta$ .....	12
Gambar 2. 3 Contoh Tangki yang dibangun diatas tanah.....	13
Gambar 2. 4 Beberapa contoh cone roof dengan beberapa tipe support.....	14
Gambar 2. 5 Contoh <i>dome roof tank</i> .....	15
Gambar 2. 6 Tabel ketebalan nominal <i>shell plate</i> .....	17
Gambar 2. 7 Tabel ketebalan <i>annular bottom plate</i> .....	18
Gambar 2. 8 Tabel <i>Seismic zone factor</i> .....	21
Gambar 2. 9 <i>Soil profile coefficient</i> .....	22
Gambar 2. 10 Tabel <i>Importance factor</i> .....	22
Gambar 2. 11 tabel <i>response modification factor</i> .....	22
Gambar 2. 12 Distribusi geser akibat gaya gempa pada dasar tangki.....	24
Gambar 2. 13 Guncangan yang menyebabkan kenaikan permukaan fluida.....	27
Gambar 2. 14 Pemodelan dinamik dari tangki.....	31
Gambar 2. 15 Gaya gaya dinamik yang terjadi.....	32
Gambar 3. 1 Bagan alir desain tangki.....	38
Gambar 3. 2. Gambar Peta Gempa Indonesia.....	40
Gambar 4.1. Permodelan Kosong Hasil Template SAP 2000.....	48
Gambar 4.2. Define Material Pada SAP 2000.....	49
Gambar 4.3. Gambar Pendefinisian <i>Frame Section Properties</i> (atas) dan <i>Area Section Properties</i> (bawah) pada SAP 2000.....	50
Gambar 4.4. Gambar Pelat Dasar Tangki Minyak Pelat Baja.....	51
Gambar 4.5. Gambar Struktur Penahan Atap.....	52
Gambar 4.6. Pembagian Potongan Dinding Depan dan Dinding Belakang.....	53
Gambar 4.7. Beban Hidup Pada Atap Tangki.....	53
Gambar 4.8. Grafik Penggunaan Shell Plate Pada 9 Model Tangki.....	57
Gambar 4.9. Grafik Tekanan Maksimum Pada Pelat Dinding Akibat Gempa.....	59
Gambar 4.10. Gambar Pelat Dinding Yang Ditinjau Beserta Arah Gempanya.....	60
Gambar 4.11. Pedoman Arah Pada Pelat yang Ditinjau.....	61
Gambar 4.12. Grafik Gaya Dalam F11 Pada Semua Model Melebar.....	62
Gambar 4.13. Gaya Dalam F11 Semua Model Pada Wilayah Gempa 6.....	63
Gambar 4.14. Grafik Gaya Dalam F11 Tangki Model 2 Untuk Masing Masing Beban.....	63
Gambar 4.15. Grafik Gaya Dalam Momen 2-2 Pada Model 1.....	64
Gambar 4.16. Gaya Dalam Momen 2-2 Pada Semua Model Melebar.....	65
Gambar 4.17. Gaya Dalam Momen 2-2 Pada Setiap Model Wilayah Gempa 6.....	66
Gambar 4.18. Grafik Perbandingan Deformasi Yang Terjadi Pada Model Sama.....	69
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Deformasi Semua Model Pada Wilayah Gempa 3.....	70
Gambar 4.20. Grafik Gaya Dalam Momen 2-2 Untuk Dua Jenis Perletakan.....	71
Gambar 4.21. Grafik Perbandingan Momen 2-2 Pada Semua Model Sama Dengan Dua Jenis Perletakan.....	72
Gambar 4.22. Grafik Gaya Dalam Axial 1-1 (Gaya Cincin) Pada Model 1 dengan Dua Jenis Perletakan.....	73
Gambar 4.23. Grafik Ketebalan Pelat Sebelum dan Sesudah Optimasi.....	74
Gambar 4.24. Ketebalan Pelat Semua Jenis Model Pada Wilayah Gempa 6.....	75

Gambar 4.25. Grafik Plot Periode Semua Model Tangki ..... 76  
Gambar 4.26. Grafik Gaya Dalam Dengan Kondisi Tertutup dan Tanpa Tutup .. 78



## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Tabel Hasil Perhitungan Ketebalan Dinding Pelat Baja Tangki.....	42
Tabel 4.2. Tabel Perbandingan Kebutuhan Material Pelat Baja .....	57
Tabel 4.3. Tabel Tekanan Maksimum Akibat Gempa.....	58
Tabel 4.4. Tabel Perbandingan Gaya Hidrodinamik dan Gaya Hidrostatik.....	68
Tabel 4.5. Tabel Nilai Periode Impulsif Tangki.....	76



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan minyak bumi terus meningkat seiring berjalannya waktu. Hal ini disebabkan beberapa hal, diantaranya adalah perkembangan sektor industri, peningkatan jumlah penduduk, peningkatan jumlah penjualan kendaraan, dan kurang tertatanya sistem transportasi yang baik. Ketergantungan masyarakat, terutama masyarakat perkotaan, terhadap minyak bumi sudah sangat tinggi. Tingginya tingkat ketergantungan ini mengindikasikan pentingnya menjaga ketersediaan minyak. Oleh karena itu, maka dibutuhkan tempat sebagai penampung sementara minyak sebelum nantinya akan diolah atau didistribusikan untuk memenuhi kebutuhan pasar. Jenis produk yang biasa ditimbun adalah pertamax, premium, solar, minyak tanah dan produk turunan minyak lainnya atau bahkan bahan dasar dari produk-produk minyak itu sendiri yaitu minyak mentah.

Tempat yang biasanya digunakan sebagai penimbun adalah sebuah tangki. Pada umumnya, tangki ini berbentuk silinder yang memiliki diameter cukup besar. Sebelum dilakukan proses pembangunan, suatu tangki penimbun tentunya harus melewati fase perancangan yang disesuaikan dengan kebutuhan.

Indonesia, sebagai negara yang cukup kaya akan sumber daya minyak, sedang membangun sebuah terminal pusat penampungan minyak mentah (*centralized crude terminal-CCT*) yang diklaim sebagai terminal minyak terbesar kedua di Asia setelah Bahrain. Rencananya terminal ini akan menampung 17,720 juta barrel minyak dengan total tangki penampungan sebanyak 20 buah. Menurut Fetty, *Corporate Public Relations* PT. Pertamina Balikpapan, CCT ini akan membuat stock minyak Indonesia menjadi lebih stabil. Dengan stok yang stabil, harga juga bisa dijaga lebih konstan.



Gambar 1. 1 Tangki Penimbun Minyak

Menjawab kebutuhan akan tangki minyak penampung ini, maka kita sebagai calon sarjana teknik sipil harusnya dapat melakukan proses perancangan tangki yang mempunyai kapasitas penuh hingga 880.000 barrel minyak ( 140.000 kiloliter minyak) kemudian dapat mempelajari perilakunya. Tujuan dari merancang tangki ini adalah untuk menghasilkan suatu struktur yang stabil, kuat menahan beban, awet dan memenuhi kaidah kaidah lainnya seperti ekonomis dan kemudahan dalam penggunaan dan perawatan.

### 1.2. Perumursan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas adalah bagaimana perilaku dari struktur berbagai tangki minyak yang diberikan variasi tertentu sesuai standart terhadap kekuatannya, keamanannya dan keekonomisannya apabila diberikan beban internal dan beban seismik

### 1.3. Tujuan

Tujuan dari permasalahan ini adalah mengetahui perilaku dari berbagai tangki minyak sehingga dapat memilih tangki minyak mana yang teraman, terkuat namun tetap ekonomis

### 1.4. Hipotesa

- Tangki yang didesain melebar lebih ekonomis dari segi jumlah material dinding baja yang digunakan jika dibandingkan dengan tangki yang lain pada volume yang sama
- Tangki yang didesain melebar memiliki gaya dalam maksimum yang lebih kecil dibandingkan dengan yang lain dalam volume yang sama
- Tangki yang didesain meninggi menghasilkan lendutan maksimum dinding yang terbesar
- Untuk daerah dengan zona gempa yang lebih besar membutuhkan material dinding baja yang semakin besar

### 1.5. Pembatasan Masalah

- Pembahasan ini dibatasi hanya menggunakan Solar dengan  $\gamma = 800 \text{ kg/m}^3$  sebagai fluida yang akan disimpan.
- Material yang digunakan adalah baja dengan mutu A 573 m (70) untuk pelat dan A36 untuk struktur pendukung.
- Tangki yang digunakan adalah tangki berbentuk silindris yang berdiri diatas pondasi pile lengkap dengan pilecap yang terbuat dari beton.
- Proses perancangan dan pemahaman perilaku dibatasi pada bagian dinding tangki saja (tidak termasuk pondasi)
- Asumsi Tangki dibangun diatas tanah yang stabil sehingga tidak terjadi penurunan tanah
- Standar yang digunakan adalah “*Welded Steel Tank for Oil Storage API 650, 10th edition, addendum 2, November 2001*”
- Jenis tangki yang akan didesain adalah *Aboveground tank, fixed cone roof with support.*
- Perilaku di analisa berdasarkan beban internal dan beban gempa saja.

### 1.6. Sistematika Penulisan

- BAB I : Pendahuluan

Pada bagian ini dijabarkan latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan diadakan penelitian dan pembatasan masalah agar tetap fokus dan pembahasan tidak keluar dari jalurnya

- **BAB II** : Landasan Teori

Pada bagian ini diuraikan landasan teori apa saja yang dipakai dalam penelitian ini. Diantaranya adalah teori umum mengenai plat silindris, perencanaan, jenis-jenis tangki apa saja yang ada, uraian singkat terkait peraturan yang dipakai, hingga beban-beban apa saja yang mempengaruhi struktur termasuk pengaruh gempa

- **BAB III** : Metodologi Penelitian

Berisikan metode penelitian yang akan digunakan dalam rangka memenuhi tujuan dari penelitian. Pada bagian ini, berisi proses secara garis besar mengenai penelitian yang berjalan beserta variabel-variabel apa saja yang digunakan dalam penelitian

- **BAB IV** : Pengolahan Data

Bagian ini merupakan inti dari penelitian. Struktur yang telah ditentukan kemudian didesain menjadi lebih detail kemudian dibebani sehingga dapat diketahui perilakunya

- **BAB V** : Penutup

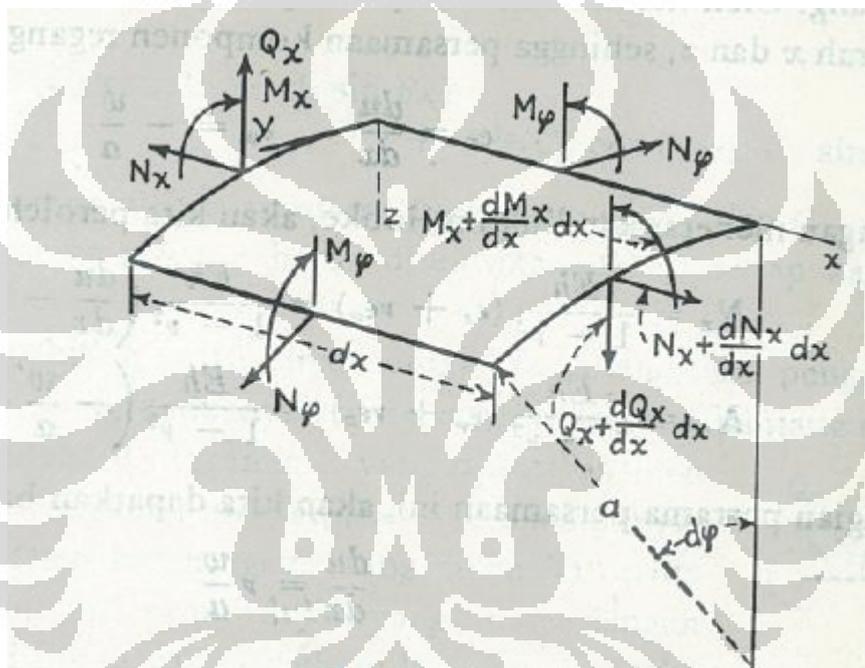
Dalam bagian ini merupakan rangkuman hasil penelitian, berisi kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang berlangsung.

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Teori Umum Tentang Cangkang Silindris

Dalam penerapan praktis, sering kali kita dihadapkan pada permasalahan cangkang silindris yang bundar dan mengalami pembebanan yang merata terhadap sumbu silinder. Contohnya adalah distribusi tegangan pada ketel uap, tegangan pada tabung silindris yang memiliki sumbu vertikal dan tekanan yang dialami sebuah tangki yang didalamnya terdapat cairan yang disimpan untuk jangka waktu tertentu.



Gambar 2. 1 Elemen pelat

Untuk menetapkan persamaan yang dibutuhkan guna memecahkan permasalahan ini, maka kita harus meninjau suatu elemen seperti yang diperlihatkan pada gambar diatas. Mengingat sifat simetrisnya, maka dapat disimpulkan bahwa gaya geser selaput tipis  $N_{x\varphi} = N_{\varphi x}$  dalam hal ini akan hilang dan gaya  $N_\varphi$  konstan sepanjang kelilingnya. Berdasarkan gaya geser melintang, maka dapat disimpulkan juga bahwa gaya  $Q_x$  yang tidak hilang. Dengan memperhatikan momen-momen yang bekerja pada elemen pada gambar diatas kita dapat juga menyimpulkan bahwa momenn puntir  $M_{x\varphi} = M_{\varphi x}$  akan hilang dan momen lentur  $M_\varphi$  konstan sepanjang kelilingnya. Di bawah keadaan simetris seperti ini, maka tiga dari enam buah persamaan keseimbangan elemen itu akan

dipenuhi secara identik, dan kita hanya perlu memperhitungkan tiga buah persamaan lain yang tersisa saja, yaitu persamaan yang diperoleh dengan memproyeksikan gaya pada sumbu x dan y dan dengan mengambil momen gaya itu terhadap sumbu y. Dengan mengasumsikan bahwa gaya luar hanya terdiri atas tekanan yang tegak lurus pada permukaan, maka ketiga persamaan keseimbangan ini adalah

$$\frac{dN_x}{dx} \cdot a \cdot dx \cdot d\varphi = 0$$

$$\frac{dQ_x}{dx} \cdot a \cdot dx \cdot d\varphi + dN_\varphi \cdot dx \cdot d\varphi + Z \cdot a \cdot dx \cdot d\varphi = 0$$

$$\frac{dM_x}{dx} \cdot a \cdot dx \cdot d\varphi - Q_x \cdot a \cdot dx \cdot d\varphi = 0$$

Persamaan yang pertama memperlihatkan bahwa gaya  $N_x$  konstan, dan selanjutnya akan kita sama dengankan dengan nol. Jika gaya itu tidak nol, deformasi dan tegangan yang bertalian dengan gaya konstan seperti itu dapat dihitung dengan mudah serta disuperposisikan ke dalam tegangan dan deformasi yang ditimbulkan oleh beban internal. Dua buah persamaan yang masih tersisa adalah

$$\frac{dQ_x}{dx} + \frac{1}{a} \cdot N_\varphi = -Z$$

$$\frac{dM_x}{dx} - Q_x = 0$$

Kedua persamaan ini mengandung tiga besaran yang tidak diketahui :  $N_\varphi$ ,  $Q_x$ , dan  $M_x$ . Untuk menyelesaikan persamaan ini, kita harus mempertimbangkan perpindahan dari titik-titik di permukaan bagian tengah cangkang tersebut.

Dari sifat simetri, dapat kita simpulkan bahwa komponen perpindahan v dalam arah kelilingnya akan hilang. Oleh karena itu, cukup kita perhitungkan komponen u dan w, masing-masing dalam arah x dan z sehingga persamaan komponen regangan menjadi

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx}$$

$$\epsilon_\varphi = -\frac{w}{a}$$

Oleh karena itu, dengan menerapkan hukum hooke, akan kita peroleh

$$N_x = \frac{Eh}{1 - \nu^2} \cdot (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_\varphi) = \frac{Eh}{1 - \nu^2} \cdot \left( \frac{du}{dx} - \nu \cdot \frac{w}{a} \right) = 0$$

$$N_\varphi = \frac{Eh}{1 - \nu^2} \cdot (\epsilon_\varphi + \nu \cdot \epsilon_x) = \frac{Eh}{1 - \nu^2} \cdot \left( -\frac{w}{a} + \nu \cdot \frac{du}{dx} \right)$$

Selanjutnya dari bagian pertama persamaan ini, akan kita dapatkan bahwa

$$\frac{du}{dx} = \nu \cdot \frac{w}{a}$$

Dan persamaan kedua menghasilkan

$$N_\varphi = -\frac{Ehw}{a} \quad (e)$$

Dengan memperhatikan momen lenturnya, maka sifat simetri dapatlah kita simpulkan bahwa tidak ada perubahan apa pun pada kelengkungan arah keliling. Kelengkungan dalam arah x ternyata sama dengan  $\frac{-d^2w}{dx^2}$ . Dengan mempergunakan persamaan yang sama seperti yang dipergunakan untuk pelat, akan kita peroleh

$$M_\varphi = \nu \cdot M_x$$

$$M_x = -D \cdot \frac{-d^2w}{dx^2} \quad (f)$$

$$D = \frac{Eh}{12(1 - \nu^2)}$$

D adalah ketegaran lentur cangkang.

Kembali ke persamaan sebelumnya dan dengan menghilangkan  $Q_x$  dari persamaan-persamaan ini, kita dapatkan

$$\frac{d^2M_x}{dx^2} + \frac{1}{a} N_\varphi = -Z$$

Dari sini, dengan mempergunakan persamaan-persamaan diatas akan kita peroleh

$$\frac{d^2}{dx^2} \cdot D \cdot \frac{d^2w}{dx^2} + \frac{Eh}{a^2} w = Z$$

Oleh karena itu semua permasalahan deformasi simetris dari cangkang silindris yang bundar dapat disederhanakan dengan mengintegrasikan persamaan di atas.

Penerapan yang paling sederhana dari persamaan ini dapat diperoleh bila ketebalan cangkang ini tetap. Dalam kondisi seperti ini, persamaan di atas akan berubah menjadi

$$D \cdot \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Eh}{a^2} w = Z$$

Dengan mempergunakan notasi

$$\beta^4 = \frac{Eh}{4a^2 D} = \frac{3(1-\nu^2)}{a^2 h^2}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan di atas, dapat digambarkan dalam bentuk yang lebih sederhana

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{Z}{D}$$

Persamaan ini ternyata sama dengan yang diperoleh untuk suatu balok prismatis yang ketegaran lenturnya  $D$  dan ditumpu oleh pondasi elastis kontinu (menerus) serta mengalami pengaruh suatu pembebanan yang intensitasnya  $Z$ . Penyelesaian umum persamaan ini adalah

$$w = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + f(x)$$

Dimana  $f(x)$  merupakan penyelesaian utama persamaan sebelum ini dan  $C_1, \dots, C_4$  merupakan konstanta-konstanta integrasi yang harus ditentukan dalam setiap kasus khusus kondisi ujung-ujung silinder.

Sebagai contoh ambillah suatu pipa bundar yang mengalami pengaruh momen lentur  $M_0$  dan gaya geser  $Q_0$ , Yang keduanya terbagi secara merata sepanjang tepi  $x = 0$ . Dalam hal ini tidak ada tekanan  $Z$  yang didistribusikan ke seluruh permukaan cangkang ini, dan  $f(x) = 0$  pada penyelesaian umum di atas. Oleh karena gaya yang dikenakan pada ujung  $x = 0$  menimbulkan lenturan lokal yang hilang dengan cepat bila jarak  $x$  dari ujung yang dibebani bertambah, maka dapatlah kita simpulkan bahwa suku pertama pada ruas kanan persamaan di atas harus hilang. Sehingga  $C_1 = C_2 = 0$  dan akan kita peroleh

$$w = e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x)$$

Sekarang kedua konstanta  $C_3$  dan  $C_4$  dapat ditentukan dari kondisi ujung yang dibebani. Hal ini dapat dituliskan sebagai

$$(M_x)_{x=0} = -D \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right)_{x=0} = M_0$$

$$(Q_x)_{x=0} = \left( \frac{dM_x}{dx} \right)_{x=0} = -D \left( \frac{d^3 w}{dx^3} \right)_{x=0} = Q_0$$

Dengan mengganti  $w$  dengan persamaan pertama, dapat kita peroleh dari kondisi ujung ini

$$C_3 = -\frac{1}{2\beta^3 D} (Q_0 + \beta M_0)$$

$$C_4 = \frac{M_0}{2\beta^2 D}$$

Jadi persamaan akhir  $w$  adalah

$$w = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 D} [\beta M_0 (\sin \beta x - \cos \beta x) - Q_0 \cos \beta x]$$

Lendutan maksimum didapatkan pada ujung yang dibebani, dimana

$$(w)_{x=0} = \frac{1}{2\beta^3 D} (\beta M_0 + Q_0)$$

Tanda negatif pada lendutan ini dihasilkan dari adanya kenyataan bahwa  $w$  diambil positif menurut arah sumbu silinder. Kemiringan pada ujung yang dibebani didapatkan dengan mengadakan diferensiasi persamaan diatas. Hal ini akan memberikan

$$\left( \frac{dw}{dx} \right)_{x=0} = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^2 D} [2\beta M_0 \cos \beta x + Q_0 (\cos \beta x + \sin \beta x)]_{x=0} = \frac{1}{2\beta^2 D} (2\beta M_0 + Q_0)$$

Dengan mengaasumsikan beberapa notasi sebagai berikut

$$\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

$$\psi(\beta x) = e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)$$

$$\theta(\beta x) = e^{-\beta x} \cos \beta x$$

$$\zeta(\beta x) = e^{-\beta x} \sin \beta x$$

Persamaan lendutan dan turunannya yang berurutan dapat dinyatakan menurut bentuk yang disederhanakan ini

$$w = -\frac{1}{2\beta^2 D} [\beta M_o \psi(\beta x) + Q_o \theta(\beta x)]$$

$$\frac{dw}{dx} = \frac{1}{2\beta^2 D} [2\beta M_o \theta(\beta x) + Q_o \varphi(\beta x)]$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{1}{2\beta^2 D} [2\beta M_o \varphi(\beta x) + 2Q_o \zeta(\beta x)]$$

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = -\frac{1}{D} [2\beta M_o \zeta(\beta x) - Q_o \psi(\beta x)]$$

Besarnya fungsi  $\varphi(\beta x)$ ,  $\psi(\beta x)$ ,  $\theta(\beta x)$ , dan  $\zeta(\beta x)$  dapat dilihat pada tabel (84). Fungsi  $\varphi(\beta x)$  dan  $\psi(\beta x)$  digambarkan secara grafik pada gambar 237. Dari kurva ini, dan dari tabel tampaklah bahwa fungsi yang menentukan lenturan cangkang akan mendekati nol bila  $\beta x$  menjadi besar sekali. Hal ini menunjukkan bahwa lenturan yang dihasilkan pada cangkang merupakan karakter lokal, sebagaimana yang telah disebutkan pada bagian permulaan ketika dilakukan perhitungan konstanta integrasi.

Jika momen  $M_x$  dan lendutan  $w$  didapatkan dari persamaan yang terdahulu, maka momen lentur  $M_\varphi$  diperoleh dari bagian pertama persamaan (f) dan besarnya gaya  $N_\varphi$  didapatkan dari persamaan (e). Oleh karena itu, semua penjelasan untuk menghitung tegangan pada cangkang akan dapat kita peroleh.

$\beta z$	$e$	$\psi$	$\theta$	$\tau$
0	1,0000	1,0000	1,0000	0
0,1	0,9907	0,8100	0,9003	0,0903
0,2	0,9651	0,6398	0,8024	0,1627
0,3	0,9267	0,4888	0,7077	0,2189
0,4	0,8784	0,3564	0,6174	0,2610
0,5	0,8231	0,2415	0,5323	0,2908
0,6	0,7628	0,1431	0,4530	0,3099
0,7	0,6997	0,0599	0,3798	0,3199
0,8	0,6354	-0,0093	0,3131	0,3223
0,9	0,5712	-0,0657	0,2527	0,3185
1,0	0,5083	-0,1108	0,1988	0,3096
1,1	0,4476	-0,1457	0,1510	0,2967
1,2	0,3899	-0,1716	0,1091	0,2807
1,3	0,3355	-0,1897	0,0729	0,2626
1,4	0,2849	-0,2011	0,0419	0,2430
1,5	0,2384	-0,2068	0,0158	0,2226
1,6	0,1959	-0,2077	-0,0059	0,2018
1,7	0,1576	-0,2047	-0,0235	0,1812
1,8	0,1234	-0,1985	-0,0376	0,1610
1,9	0,0932	-0,1899	-0,0484	0,1415
2,0	0,0667	-0,1794	-0,0563	0,1230
2,1	0,0439	-0,1675	-0,0618	0,1057
2,2	0,0244	-0,1548	-0,0652	0,0895
2,3	0,0080	-0,1416	-0,0668	0,0748
2,4	-0,0056	-0,1282	-0,0669	0,0613
2,5	-0,0166	-0,1149	-0,0658	0,0492
2,6	-0,0254	-0,1019	-0,0636	0,0383
2,7	-0,0320	-0,0895	-0,0608	0,0287
2,8	-0,0369	-0,0777	-0,0573	0,0204
2,9	-0,0403	-0,0666	-0,0534	0,0132
3,0	-0,0423	-0,0563	-0,0493	0,0071
3,1	-0,0431	-0,0469	-0,0450	0,0019
3,2	-0,0431	-0,0383	-0,0407	-0,0024
3,3	-0,0422	-0,0306	-0,0364	-0,0058
3,4	-0,0408	-0,0237	-0,0323	-0,0085
3,5	-0,0389	-0,0177	-0,0283	-0,0103
3,6	-0,0366	-0,0124	-0,0245	-0,0121
3,7	-0,0341	-0,0079	-0,0210	-0,0131
3,8	-0,0314	-0,0040	-0,0177	-0,0137
3,9	-0,0286	-0,0008	-0,0147	-0,0140

$\beta x$	$\varphi$	$\psi$	$\theta$	$\zeta$
4,0	-0,0258	0,0019	-0,0120	-0,0139
4,1	-0,0231	0,0040	-0,0095	-0,0136
4,2	-0,0204	0,0057	-0,0074	-0,0131
4,3	-0,0179	0,0070	-0,0054	-0,0125
4,4	-0,0155	0,0079	-0,0038	-0,0117
4,5	-0,0132	0,0085	-0,0023	-0,0108
4,6	-0,0111	0,0089	-0,0011	-0,0100
4,7	-0,0092	0,0090	0,0001	-0,0091
4,8	-0,0075	0,0089	0,0007	-0,0082
4,9	-0,0059	0,0087	0,0014	-0,0073
5,0	-0,0046	0,0084	0,0019	-0,0065
5,1	-0,0033	0,0080	0,0023	-0,0057
5,2	-0,0023	0,0075	0,0026	-0,0049
5,3	-0,0014	0,0069	0,0028	-0,0042
5,4	-0,0006	0,0064	0,0029	-0,0035
5,5	0,0000	0,0058	0,0029	-0,0029
5,6	0,0005	0,0052	0,0029	-0,0023
5,7	0,0010	0,0046	0,0028	-0,0018
5,8	0,0013	0,0041	0,0027	-0,0014
5,9	0,0015	0,0036	0,0026	-0,0010
6,0	0,0017	0,0031	0,0024	-0,0007
6,1	0,0018	0,0026	0,0022	-0,0004
6,2	0,0019	0,0022	0,0020	-0,0002
6,3	0,0019	0,0018	0,0018	+0,0001
6,4	0,0018	0,0015	0,0017	0,0003
6,5	0,0018	0,0012	0,0015	0,0004
6,6	0,0017	0,0009	0,0013	0,0005
6,7	0,0016	0,0006	0,0011	0,0006
6,8	0,0015	0,0004	0,0010	0,0006
6,9	0,0014	0,0002	0,0008	0,0006
7,0	0,0013	0,0001	0,0007	0,0006

Gambar 2. 2 Tabel nilai  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ , dan  $\zeta$ 

## 2.2. Perencanaan

Perencanaan atau Perancangan merupakan suatu fase yang terjadi sebelum konstruksi berlangsung. Tujuan perancangan adalah untuk mendapatkan suatu struktur yang memenuhi persyaratan atau kriteria desain yang benar.

Secara umum, ada tiga kriteria utama dalam perancangan suatu struktur. Yang pertama adalah keamanan. Struktur yang kita rancang harus mampu memikul beban yang telah kita perkirakan akan membebani struktur tersebut tanpa kelebihan tegangan pada materialnya. Yang kedua adalah kriteria kenyamanan. Biasanya kriteria ini ditinjau dari segi deformasi atau lendutan yang terjadi harus sesuai dengan peraturan yang diijinkan. Karena sering kali sebuah struktur mengalami deformasi yang cukup besar namun secara kekuatan struktur

tersebut masih mampu memikul bebannya. Kriteria yang ketiga adalah ekonomis. Suatu struktur sebisa mungkin kita rancang dengan biaya yang relatif efisien.

Ketiga kriteria utama ini berhubungan satu sama lain dengan prioritas yang berurutan dari kriteria pertama hingga ketiga. Namun belakangan ini banyak pihak yang mendahulukan kriteria ketiga dengan alasan modal yang terbatas. Kriteria lain yang perlu diperhatikan juga adalah metode konstruksi, yaitu kemudahan dalam pelaksanaan sehingga mempengaruhi masa konstruksi. Sedangkan jika kita meninjau perancangan sebuah tangki minyak, maka yang tidak kalah pentingnya adalah sistem operasional dan pendistribusian barang di masa penggunaannya nanti.

### 2.3. Jenis-Jenis Tangki Penimbun

Tangki penimbun minyak terdiri dari beberapa jenis yang dapat kita golongkan menurut beberapa hal sebagai berikut

#### 2.3.1 Jenis-Jenis Tangki Berdasarkan Letaknya

2.3.1.1 *Aboveground* tank, yaitu tangki penimbun yang terletak di atas permukaan tanah. Tangki penimbun dengan jenis ini bisa berada dalam posisi horizontal (melebar) maupun dalam posisi vertikal (tegak)



Gambar 2. 3 Contoh Tangki yang dibangun diatas tanah

2.3.1.2 *Underground tank*, yaitu tangki penimbun yang terletak di bawah permukaan tanah.

### 2.3.2 Jenis Tangki Berdasarkan Bentuk Atap

2.3.2.1 *Fixed Roof Tank*, dengan dua jenis bentuk atapnya :

- *Cone roof*, jenis tangki ini memiliki kelemahan, yaitu terdapat *vopour space* diantara permukaan fluida dengan atap, jika *vopour space* berada pada kondisi yang mudah terbakar, sehingga dapat menimbulkan ledakan. Oleh karena itu *fixed cone roof tank* dilengkapi dengan semacam ventilasi sehingga tekanan yang ada didalam dapat diatur sedemikian rupa sehingga tidak mengalami tekanan yang berlebihan. Jenis tangki ini biasanya digunakan untuk menyimpan minyak tanah, air, atau solar. Terdapat dua jenis tipe *cone roof* berdasarkan struktur yang menyangga atap itu sendiri :
  - *A supported cone roof* yang mana pelat atap akan didukung oleh *rafter* pada *girder* dan kolom atau oleh rangka batang dengan atau tanpa kolom
  - *A self supported cone roof* yang mana pelat atap berdiri tanpa penyangga sehingga langsung didukung oleh dinding tangki.



Gambar 2. 4 Beberapa contoh cone roof dengan beberapa tipe support

- *Dome roof*, yaitu jenis tangki yang memiliki atap dengan bentuk *dome*. Jenis tangki ini biasanya digunakan untuk menyimpan cairan kimia dalam skala besar.



Gambar 2. 5 Contoh *dome roof tank*

2.3.2.2 *Floating roof tank*, yang biasanya digunakan untuk menyimpan minyak mentah dan premium. Keuntungannya yaitu tidak dapat *vopour space* dan mengurangi kehilangan akibat penguapan. *Floating roof tank* terbagi menjadi *external floating roof* dan *internal floating roof*.

#### 2.4. Standar Desain

Berikut merupakan peraturan-peraturan yang dipakai dalam merancang sebuah tangki baja penimbun minyak

- Perencanaan tebal Shell plate, annular plate, bottom plate, roof plate, rafter, girder dan kolom sesuai dengan “Welded Steel Tank for Oil Storage API 650 10th edition, Addendum 2, November 2001.”
- Peraturan pembebanan seperti untuk beban hidup dan beban angin sesuai dengan “Welded Steel Tank for Oil Storage API 650 10th edition, Addendum 2, November 2001.”
- Peraturan pembebanan untuk gempa disesuaikan (mengacu) pada ACI 350.3
- Peraturan pembebanan untuk gempa disesuaikan dengan SNI 03-1726-2002
- Pengecekan terhadap struktur pendukung seperti rafter, girder dan kolom disesuaikan dengan AISC ASD 01 sesuai default yang ada pada program SAP

#### 2.5. Persyaratan Untuk Elemen Elemen Tangki

##### 2.5.1 Material

Material yang dipakai dalam mendesain tangki ini adalah material yang direkomendasikan oleh API 650 yang secara kekuatan dan komposisinya telah sesuai dengan standar. Mengacu pada Website Krakatau Steel, bahwa jenis material yang digunakan dalam struktur sebuah pelat adalah A283. Sedangkan dalam API 650 *grade* yang disebutkan adalah *grade C*. Maka ditarik kesimpulan bahwa material yang digunakan adalah A283 Grade C untuk pelat. Namun untuk struktur pendukung tetap menggunakan material A36

Pelat atau profil yang digunakan dalam perancangan harus disesuaikan dengan ketersediaan material di pasaran. Selain itu ukuran panjang yang kita desain juga harus sesuai dengan ukuran panjang yang ada untuk kemudahan pengangkutan dan konstruksi. Ukuran pelat baja yang dapat disediakan oleh salah satu perusahaan baja ternama di Indonesia adalah hingga 2 x 12 meter. Sedangkan profile baja yang digunakan pada tangki penimbun adalah profile baja siku untuk *top angle*, profile baja *WF* (*wide flange*) untuk *rafter* dan *girder*, serta profil pipa untuk kolom.

#### 2.5.2 Roof Plate

Merupakan pelat yang menyusun bagian atap dengan ketebalan minimum pelat atap adalah 5 mm (API 650 pasal 3.10.2.2). Ketebalan yang melebihi nilai ini biasanya digunakan untuk *self supporting roofs*. Sedangkan untuk kemiringan atap, tidak lebih dari 19 mm dalam 300 mm atau lebih sesuai dengan keinginan *purchaser*.

#### 2.5.3 Rafter and Girder

*Rafter dan Girder* terbuat dari profil baja yang merupakan rangka atap tangki. *Rafter* harus diatur sedemikian rupa sedemikian hingga pada *outer ring* jarak *rafter* tidak lebih dari  $0,6\pi$  m di sepanjang keliling tangki. Sedangkan jarak *rafter* pada *inner ring* tidak lebih dari 1,7 m. (API 650 pasal 3.10.4.4)

#### 2.5.4 Kolom

Kolom pada tangki terbuat dari profile baja pipa (API 650 pasal 3.10.4.5)

### 2.5.5 Top angle

*Top angle* terbuat dari profil siku yang menempel pada sisi sebelah atas *course shell plate* teratas. Kegunaan top angle adalah untuk memperkaku shell plates. Untuk tangki dengan atap tertutup, ukuran top angle tidak berdasarkan beban angin tetapi berdasarkan jenis atap yang akan direncanakan. Dimana atap diklasifikasikan menjadi dua kategori yaitu *supported* dan *self supported*. Menurut API 650 pasal 3.1.5.9 point e , Ukuran top angle tidak kurang dari mengikuti ukuran berikut : untuk tangki dengan diameter kurang dari 11 m (35 ft), 51 x51 x 4,8 mm ( 2 x 2 x 3/16 in) , untuk lebih dari 11 m namun tidak lebih dari 18 m (60 ft), 51 x 51 x 6,4 mm (2 x 2 x ¼ in) , dan untuk tangki dengan diameter diatas 18 m, 76 x 76 x 9,5 mm ( 3 x 3 x 3/8 in)

### 2.5.6 Shell Plate ( Pelat Dinding )

Ketebalan pelat dinding yang digunakan sebaiknya lebih besar ketebalan pelat dinding rencana, termasuk penambahan korosi atau ketebalan berdasarkan test hidrostatis. Tetapi ketebalan dinding tidak boleh kurang dari yang disyaratkan pada tabel dibawah ini

Nominal Tank Diameter (See Note 1)		Nominal Plate Thickness (See Note 2)	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 15	< 50	5	3/16
15 to < 36	50 to < 120	6	1/4
36 to 60	120 to 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Gambar 2. 6 Tabel ketebalan nominal *shell plate*

Perhitungan shell plate dilakukan dengan metode one-foot yaitu menghitung tebal shell pada titik peninjauan satu kaki di atas dasar atau alas masing masing bagian shell. Rumus perhitungan tebal shell plate menurut API 650 pasal 3.6.3.2

- Berdasarkan cairan yang direncanakan

$$t_d = \frac{4,9 D(H - 0,3)G}{Sd} + CA$$

- Berdasarkan *Hydrotest* (diisi dengan air)

$$t_1 = \frac{4,9 D(H - 0,3)}{St}$$

Dimana :

- $t_d$  = tebal desain dinding tangki, (mm)
- $t_t$  = Hydrostatic test shell thickness, (mm)
- D= nominal tank diameter, (m)
- H = Desain tinggi fluida (m)
- G = Berat jenis desain dari fluida yang ditimbun dalam tangki
- CA = Corrosion allowance (mm)
- Sd = tekanan yang diijinkan untuk kondisi desain, (Mpa)
- St = tekanan yang diijinkan untuk kondisi *hydrostatic test* , (Mpa)

### 2.5.7 Pelat dasar Tangki

Ada dua jenis pelat dasar tangki yaitu annular plate dan bottom plate. Ketebalan annular plate dan bottom plate sebaiknya tidak boleh kurang dari ketebalan pelat yang terdapat pada tabel dibawah ini

**Table 3-1—Annular Bottom-Plate Thicknesses**

SI Units				
Nominal Plate Thickness <sup>a</sup> of First Shell Course (mm)	Hydrostatic Test Stress <sup>b</sup> in First Shell Course (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 230	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 38$	8	11	14	17
$38 < t \leq 45$	9	13	16	19

Gambar 2. 7 Tabel ketebalan *annular bottom plate*

- Annular Plate
  - Annular plate memiliki lebar radial minimal 600 mm (24 in) dan proyeksi dibagian luar dinding minimal 50mm (2 in) API std 650 pasal 3.5.2

- Bottom Plate
  - Sesuai API std 650 pasal 3.4.1, semua bottom plate memiliki ketebalan minimum yaitu 6mm (1/4 in) dengan lebar minimum 1800mm (72 in)

## 2.6. Pembebanan Pada Struktur

### 2.6.1 Beban Mati dan Beban Hidup

Beban Mati adalah beban tetap yang disebabkan karena bekerjanya gaya gravitasi pada elemen struktur (berat sendiri struktur). Sedangkan beban hidup adalah beban yang suatu waktu ada pada struktur dan tidak sepanjang waktu.

Untuk semua jenis atap dan struktur pendukung atap pada tangki penimbun harus direncanakan mampu menahan beban mati ditambah dengan beban hidup merata sebesar 1,2 Kpa

### 2.7. Beban Seismik (Gempa)

Untuk perhitungan dan penerapan beban gempa maka akan dipakai standart ACI 350.3 “*Seismic Design of Liquid Containing Concrete Structures*”. Ini dikarenakan API tidak memiliki standart yang pasti untuk desain gempa dan API sendiri mengacu pada standar ini.

#### 2.7.1 Tekanan Akibat Gempa

Selain dibebani oleh beban statik, dinding pelat sebuah tangki minyak yang dibangun di atas permukaan tanah, harus didesign terhadap beberapa gaya dinamik. Gaya gaya dinamik yang dialami oleh dinding tangki antara lain gaya inersia pelat dinding ( $P_w$ ) dan atap ( $P_r$ ), tekanan akibat *hydrodinamic impulsive* ( $P_i$ ), *hydrodynamic convective pressure* ( $P_c$ ) dan efek dari percepatan vertikal gempa. Gaya-gaya tersebut diatas dapat dihitung menggunakan rumus

$$P_w = Z.S.I.C_i \cdot \frac{\varepsilon W_w}{R_{wi}}$$

$$P_w' = Z.S.I.C_i \cdot \frac{\varepsilon W_w'}{R_{wi}}$$

$$P_r = Z.S.I.C_i \cdot \frac{W_r}{R_{wi}}$$

$$P_i = Z.S.I.C_i \cdot \frac{W_i}{R_{wi}}$$

$$P_c = Z.S.I.C_c \cdot \frac{W_c}{R_{wc}}$$

Total gaya *baseshear* yang bekerja pada bagian bawah dari dinding tangki adalah

$$V = \sqrt{(P_i + P_w + P_r)^2 + P_c^2}$$

Sedangkan untuk menghitung Momen akibat gempa pada seluruh cross section

$$M_w = P_w \cdot h_w$$

$$M_r = P_r \cdot h_r$$

$$M_i = P_i \cdot h_i$$

$$M_c = P_c \cdot h_c$$

$$M_b = \sqrt{(M_i + M_w + M_r)^2 + M_c^2}$$

Sedangkan untuk menghitung overturning momen, maka harus mengikutsertakan dasar tangki dan struktur pendukung sehingga ada sedikit perbedaan dalam menghitung nilai-nilai berikut

$$M_i' = P_i \cdot h_i'$$

$$M_c' = P_c \cdot h_c'$$

$$M_b = \sqrt{(M_i' + M_w + M_r)^2 + M_c'^2}$$

### 2.7.2 Gempa Vertikal

Dalam perancangan suatu tangki minyak, perlu dipertimbangkan efek dari percepatan gempa ke arah vertikal. Beban *hydrostatic* ( $q_{hy}$ ) akibat isi dari tangki harus dikalikan dengan percepatan ( $\ddot{u}_v$ ) untuk menghitung efek dari percepatan gempa arah vertikal. Hasilnya adalah tekanan ( $p_{hy}$ ) yang dapat kita tulis dengan rumus

$$P_{hy} = \ddot{u}_v \times q_{hy}$$

Dimana

$$\ddot{u}_v = ZSC_v I \frac{b}{R_{wi}}$$

Untuk tangki lingkaran

$$C_v = \frac{1,25}{T_v^{2/3}} \leq \frac{2,75}{S}$$

Dimana

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma_L D H_L^2}{2g t_w E_c}}$$

Berikut merupakan tabel tabel yang dapat digunakan dalam menghitung beban gempa pada tangki

**Table 4(a)—Seismic zone factor  $Z$ <sup>†</sup>**

Seismic map zone <sup>†</sup>	Factor Z
1	0.075
2A	0.15
2B	0.2
3	0.3
4	0.4

<sup>\*</sup>The seismic zone factor Z represents the maximum effective peak acceleration (EPA) corresponding to a ground motion having a 90% probability of not being exceeded in a 50-year period.<sup>12</sup>

<sup>†</sup>See Fig. 4.1.

Gambar 2. 8 Tabel *Seismic zone factor*

**Table 4(b)—Soil profile coefficient  $S$** 

Type	Soil profile description	Coefficient
A	A soil profile with either: (a) a rock-like material characterized by a shear wave velocity greater than 2500 ft/s (762 m/s), or by other suitable means of classification; or (b) medium-dense to dense or medium-stiff to stiff soil conditions where the soil depth is less than 200 ft (60 960 mm).	1.0
B	A soil profile with predominantly medium-dense to dense or medium-stiff to stiff soil conditions, where the soil depth exceeds 200 ft (60 960 mm).	1.2
C	A soil profile containing more than 20 ft (6096 mm) of soft to medium-stiff clay but not more than 40 ft (12 192 mm) of soft clay.	1.5
D	A soil profile containing more than 40 ft (12 192 mm) of soft clay characterized by a shear wave velocity less than 500 ft/s (152.4 m/s).	2.0

Note: The site factor shall be established from properly substantiated geotechnical data. In locations where the soil properties are not known in sufficient detail to determine the soil profile, Type C shall be used. Soil Profile D need not be assumed unless the building official determines that Soil Profile D may be present at the site, or in the event that Soil Profile D is established by geotechnical data.

Gambar 2. 9 Soil profile coefficient

**Table 4(c)—Importance factor  $I$** 

Tank use	Factor $I$
Tanks containing hazardous materials*	1.5
Tanks that are intended to remain usable for emergency purposes after an earthquake, or tanks that are part of lifeline systems.	1.25
All other tanks	1.0

\*For tanks containing hazardous materials, engineering judgment may require a factor  $I > 1.5$  to account for the possibility of an earthquake greater than the design earthquake.

Gambar 2. 10 Tabel Importance factor

**Table 4(d)—Response modification factor  $R_w$** 

Type of structure	$R_{wi}$ on or above grade	Buried*	$R_{wc}$
(a) Anchored, flexible-base tanks	4.5	4.5 <sup>†</sup>	1.0
(b) Fixed- or hinged-base tanks	2.75	4.0	1.0
(c) Unanchored, contained, or uncontained tanks <sup>‡</sup>	2.0	2.75	1.0
(d) Elevated tanks	3.0	—	1.0

\*Buried tank is defined as a tank whose maximum water surface at rest is at or below ground level. For partially buried tanks, the  $R_{wi}$  value may be linearly interpolated between that shown for tanks on grade, and for buried tanks.

<sup>†</sup> $R_{wi} = 4.5$  is the maximum  $R_{wi}$  value permitted to be used for any liquid-containing concrete structure.

<sup>‡</sup>Unanchored, uncontained tanks may not be built in Zones 2B or higher.

Gambar 2. 11 tabel response modification factor

### 2.7.3 Distribusi Beban Gempa

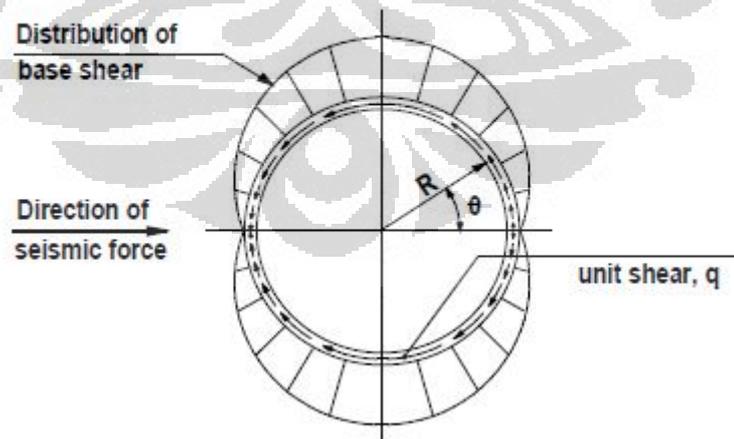
Setelah menghitung beban yang ditimbulkan akibat terjadinya gempa pada sebuah tangki minyak. Langkah selanjutnya adalah mendistribusikan beban yang tadi telah terhitung ke tangki itu sendiri.

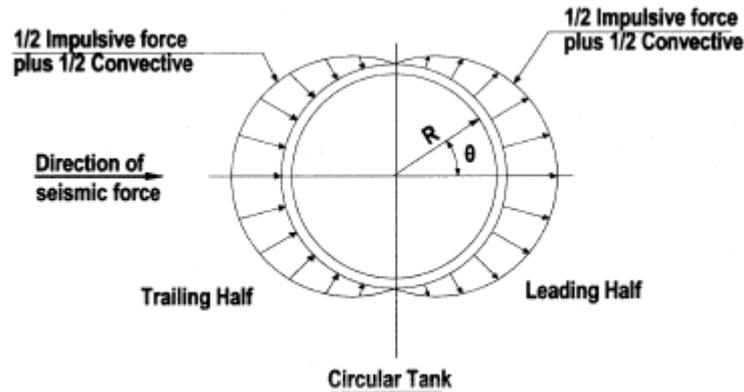
#### 2.7.3.1 Transfer Geser

Pada bagian *wall to footing* dan *wall to roof* harus didesain terhadap gaya geser yang ditimbulkan akibat gempa. Pada perletakan jepit maupun sendi dari sebuah tangki, gaya geser gempa yang ada pada perletakan di tansmisikan sebagian melalui *tangential* geser dan sisanya melalui geser radial yang menyebabkan *vertical bending*. Untuk tangki dengan perbandingan tinggi dan diameter 1:4, sekitar 20 % dari gaya geser gempa ditransmisikan menjadi *radial base reaction* menjadi *vertical bending*. Sedangkan sisa 80 % lagi di transmisikan menjadi *tangential shear* (Q). Untuk mentransmisikan gaya ini, (Q), maka dibutuhkan gaya geser terdistribusi (q) pada permukaan dinding tangki atau pondasi tangki. Dimana

$$q = \frac{Q}{\pi R} \sin \theta$$

Pendistribusiannya dapat dilihat pada gambar berikut





Gambar 2. 12 Distribusi geser akibat gaya gempa pada dasar tangki

Nilai maksimum *tangential shear* terjadi pada saat dinding berdiri tepat  $90^\circ$  dari gempa sehingga nilai sin sama dengan 1

$$q = \frac{Q}{\pi R} = \frac{0,8V}{\pi R}$$

Pada tangki yang di angkur, dan memiliki perletakan *flexible* , diasumsikan bahwa seluruh gaya geser di transmisikan menjadi *tangential shear* sehingga

$$q_{max} = \frac{Q}{\pi R} = \frac{V}{\pi R}$$

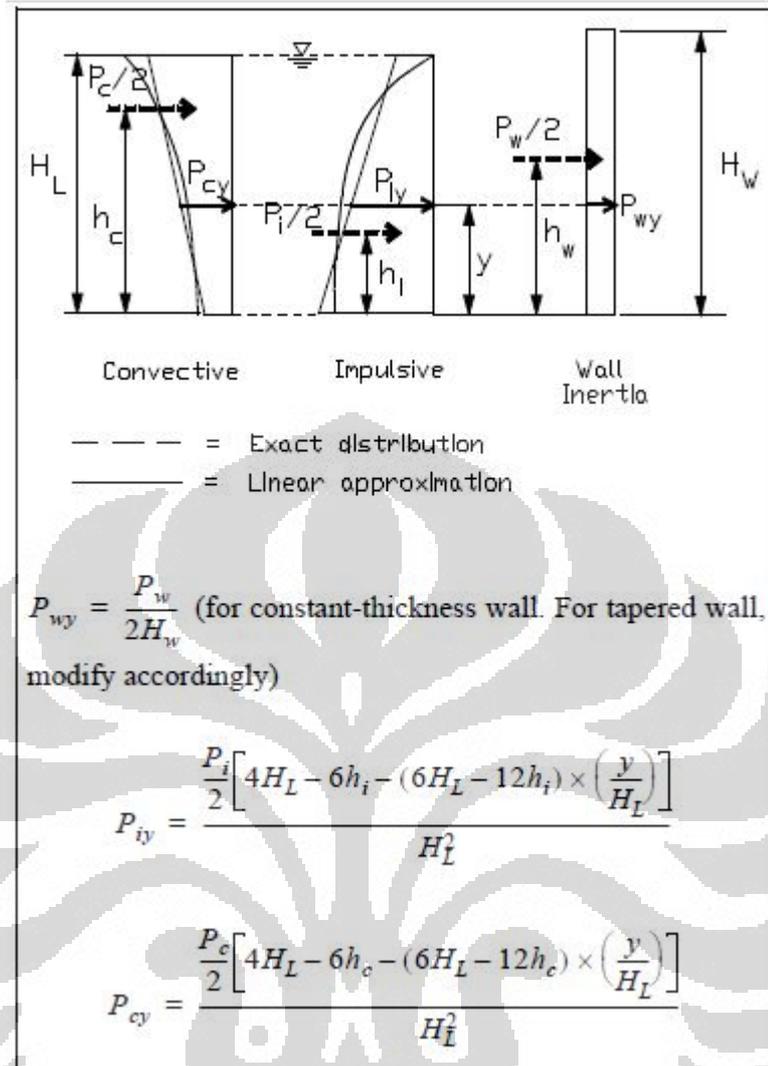
Sedangkan untuk titik-titik antara atap dan dinding tangki, distribusi gaya geser tetap menggunakan drumus biasa dengan nilai maksimum

$$q_{max} = \frac{Q}{\pi R} = \frac{0,8P_r}{\pi R}$$

Dimana  $P_r$  adalah gaya horizontal akibat percepatan gempa pada atap.

### 2.7.3.2 Distribusi Gaya Dinamik

Pada dinding silindris sebuah tangki, akibat gempa, akan mengalami beban berupa : gaya inersia dinding itu sendiri, *impulsive force*



Dimana nilai

$$P_{wy} = \frac{P_{wy}}{\pi R}$$

$$P_{cy} = \frac{16P_{cy}}{9\pi R} \cos \theta$$

$$P_{iy} = \frac{2P_{iy}}{\pi R} \cos \theta$$

$$P_{hy} = \ddot{u}_v \times q_{hy}$$

#### 2.7.4 Tegangan Pada Circular Tank

*Vertical bending stresses* dan *shear stresses* pada dinding dan perletakan akibat gaya gempa lateral dapat dihitung dengan dasar aksi cangkang menggunakan teori distribusi tegangan yang dapat diterima. Gaya *Hydrodynamic membrane* pada dinding silindris bergantung pada ketinggian cairan,  $y$ , diatas permukaan dasar tangki dapat dihitung menggunakan persamaan

$$N_y = \sqrt{(N_{iy} + N_{wy})^2 + N_{cy}^2 + N_{hy}^2}$$

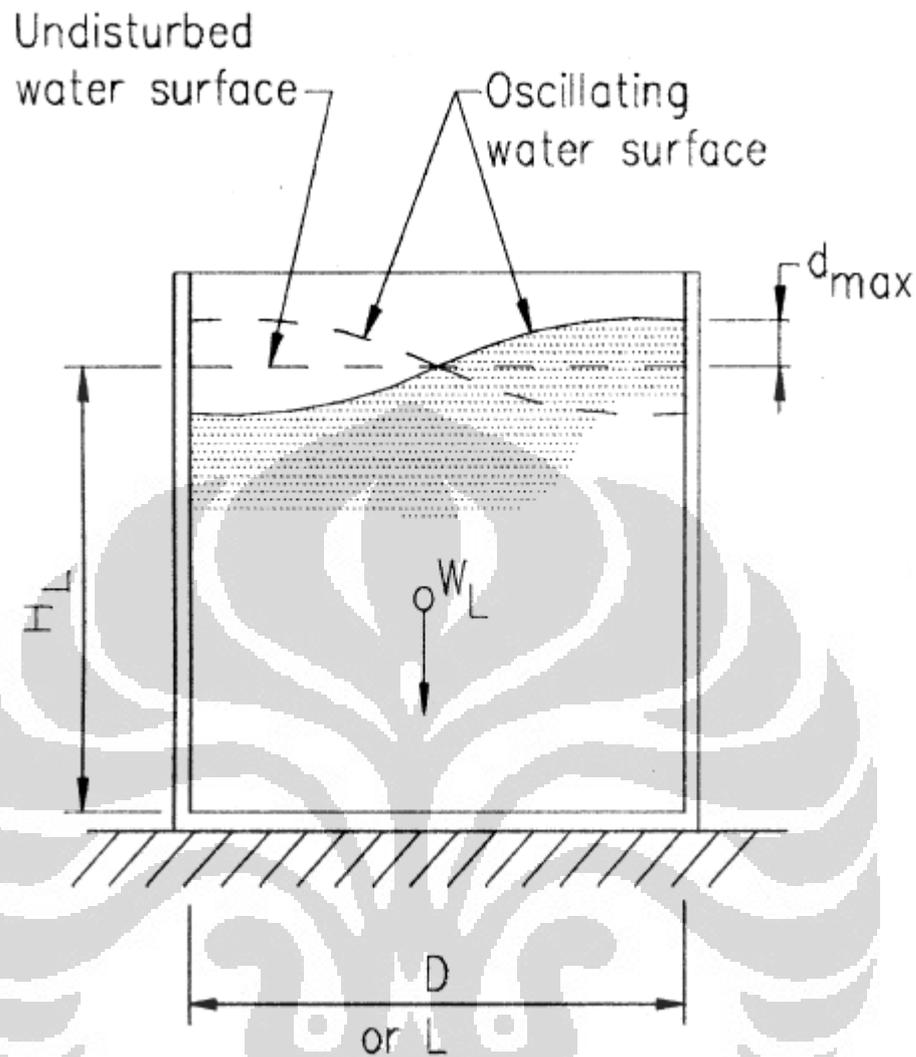
Dan Hoop stress

$$\sigma_y = \frac{N_y}{t_w}$$

Dimana nilai  $t_w$  adalah ketebalan dinding pada daerah yang sedang ditinjau

#### 2.7.5 Freeboard

Perancang harus memperhitungkan nilai  $d_{max}$  akibat carian yang berguncang pada saat terjadi percepatan gempa. Percepatan gempa pada arah horizontal dapat menyebabkan fluida yang ada didalam tangki berguncang sehingga terdapat perubahan ketinggian pada permukaan fluida. Nilai maksimum perubahan ketinggian permukaan air ( $d_{max}$ ) dapat dihitung dengan persamaan



Gambar 2. 13 Guncangan yang menyebabkan kenaikan permukaan fluida

$$d_{max} = \left(\frac{D}{2}\right) (ZSIC_c)$$

Dimana nilai  $C_c$  adalah faktor amplifikasi spectral

Nilai dari freeboard pada waktu mendesain dapat bervariasi. Ketika *overtopping* dapat diijinkan, maka keputusan tidak memberikan *freeboard* dapat diambil. Namun pada saat fluida yang disimpan tidak diijinkan untuk tumpah, seperti cairan kimia berbahaya, atau tumpahnya cairan dapat merusak bagian dari tangki maka beberapa keputusan harus diambil diantaranya

- Memberikan *freeboard*

- Desain atap yang dapat menahan tekanan *uplift*
- Memberikan *overflow spillway*

Jika respons spectra yang spesifik dilapangan digunakan maka nilai  $d_{max}$  dapat dihitung dengan persamaan

$$d_{max} = \left(\frac{D}{2}\right) I A_c = \left(\frac{D}{2}\right) I \eta_c \frac{S_D}{g} \left(\frac{2\pi}{T_c}\right)^2$$

Dimana  $A_c$ ,  $\eta_c$  dan  $S_D$  didefine pada bagian sebelumnya

### 2.7.6 Model Dinamik

Massa ekivalen dari suatu cairan yang mengalami percepatan dapat dihitung dengan persamaan

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh\left[0,866\left(\frac{D}{H_L}\right)\right]}{0,866\left(\frac{D}{H_L}\right)}$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0,230\left(\frac{D}{H_L}\right) \tanh\left[3,68\left(\frac{D}{H_L}\right)\right]$$

Sedangkan jarak untuk pusat massa (diluar tekanan dasar, EBP)

Untuk tangki dengan  $\frac{D}{H_L} < 1,333$

$$\frac{h_i}{H_L} = 0,5 - 0,09375\left(\frac{D}{H_L}\right)$$

Untuk tangki dengan  $\frac{L}{H_L} \geq 1,333$

$$\frac{h_i}{H_L} = 0,375$$

Sedangkan secara umum

$$\frac{H_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh\left[3,68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right] - 1}{3,68\left(\frac{H_L}{D}\right) \cdot \sinh\left[3,68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right]}$$

Sedangkan jarak untuk pusat massa (termasuk tekanan dasar, IBP)

Untuk tangki dengan  $\frac{D}{H_L} < 0,75$

$$\frac{h_i'}{H_L} = 0,45$$

Untuk tangki dengan  $\frac{D}{H_L} \geq 0,75$

$$\frac{h_i'}{H_L} = \frac{0,866 \left(\frac{D}{H_L}\right)}{2 \cdot \tanh \left[0,866 \left(\frac{D}{H_L}\right)\right]} - \frac{1}{8}$$

Sedangkan secara umum

$$\frac{H_c'}{H_L} = 1 - \frac{\cosh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D}\right)\right] - 2,01}{3,68 \left(\frac{H_L}{D}\right) \cdot \sinh \left[3,68 \left(\frac{H_L}{D}\right)\right]}$$

#### 2.7.6.1 Properti Dinamik

Untuk tangki dengan tipe *fixed base* dan *hinged base*

$$\omega_i = C_i \cdot \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{10^3 E_c}{\rho_c}}$$

$$C_i = C_w \cdot \sqrt{\frac{t_w}{10R}}$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}$$

Untuk tipe Flexible based

$$T_i = \sqrt{\frac{8\pi(W_w + W_r + W_i)}{gDk_a}}$$

Namun nilai  $T_i$  tidak melebihi 1,25 s

$$K_a = 10^3 \left[ \left( \frac{A_s E_s \cos^2 \alpha}{L_s S_s} \right) + \left( \frac{2G_p W_p L_p}{t_p S_p} \right) \right]$$

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{D}}$$

Dimana

$$\lambda = \sqrt{3,68 g \tanh \left[ 3,68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right]}$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{D}$$

Nilai  $\left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)$  dapat dilihat pada grafik berikut

#### 2.7.6.2 Spektra Amplifikasi Faktor

Nilai  $C_i$  dapat diambil sesuai dengan

Untuk  $T_i \leq 0,31$

$$C_i = \frac{2,75}{S}$$

Sedangkan untuk  $T_i > 0,31$

$$C_i = \frac{1,25}{T_i^{2/3}} \leq \frac{2,75}{S}$$

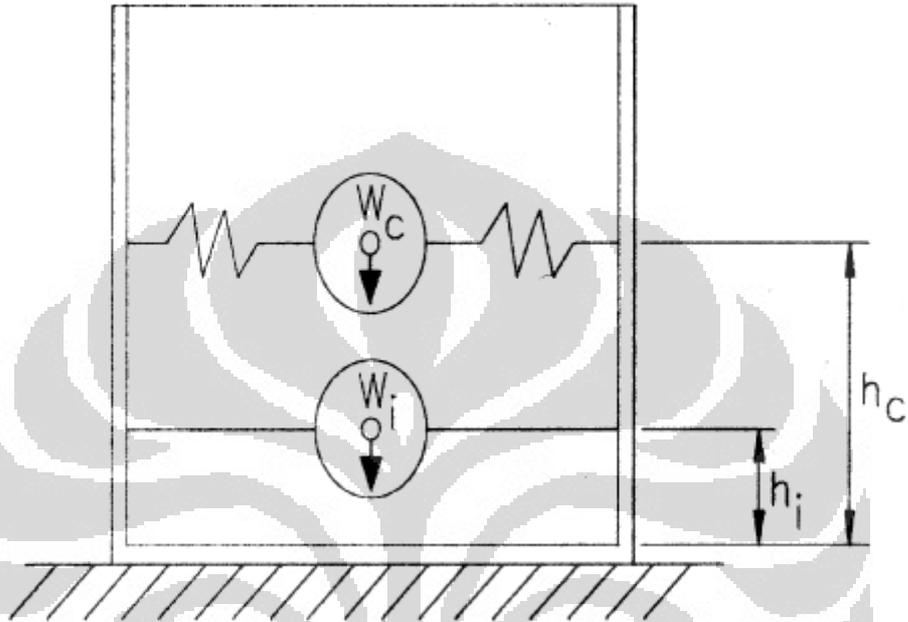
Nilai  $C_c$  dapat diambil sesuai dengan

Untuk  $T_c \geq 2,4$  s

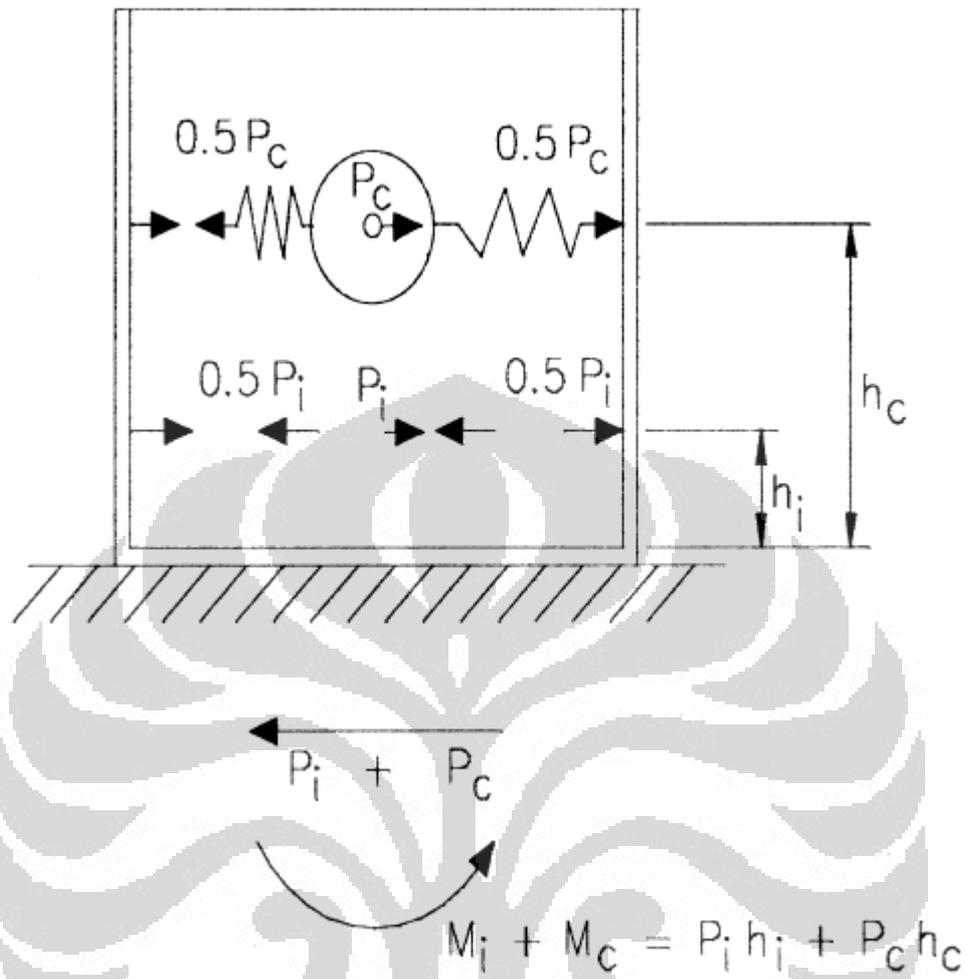
$$C_c = \frac{6}{T_c^2}$$

#### 2.7.6.3 Koefisien Massa Efektif ( $\epsilon$ )

$$\varepsilon = \left[ 0,0151 \left( \frac{D}{H_L} \right)^2 - 0,1908 \left( \frac{D}{H_L} \right) + 1,021 \right] \leq 1,0$$

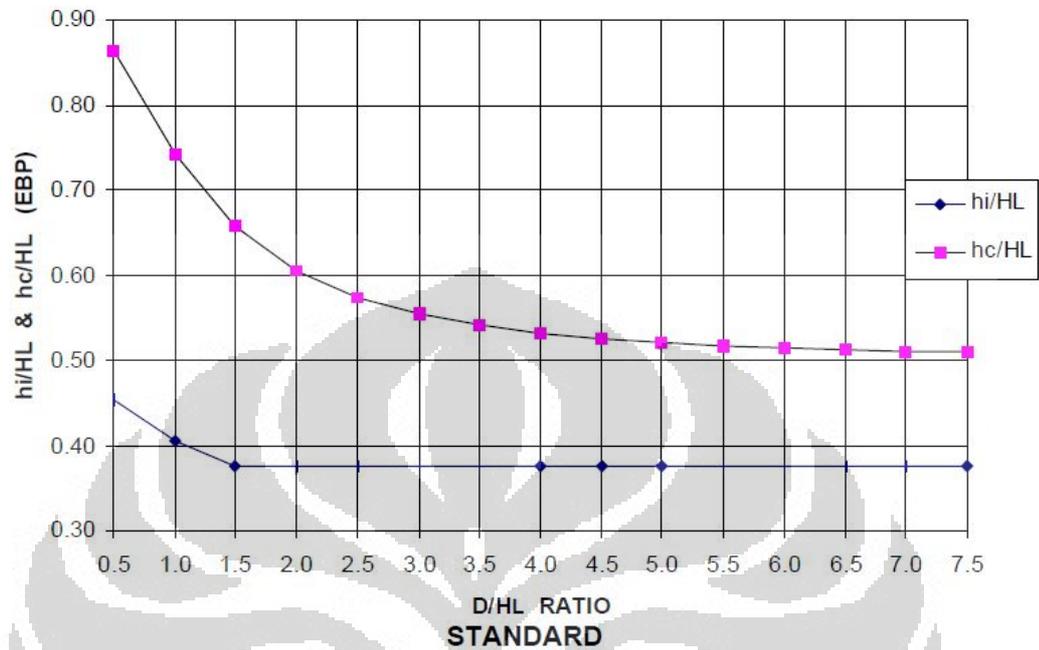
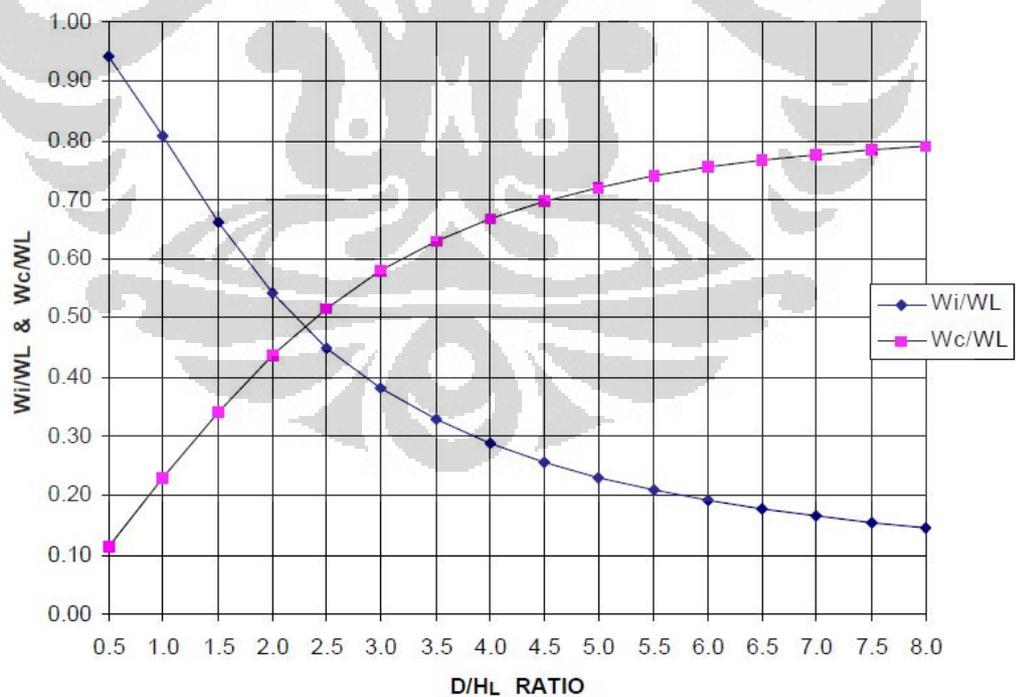


Gambar 2. 14 Pemodelan dinamik dari tangki

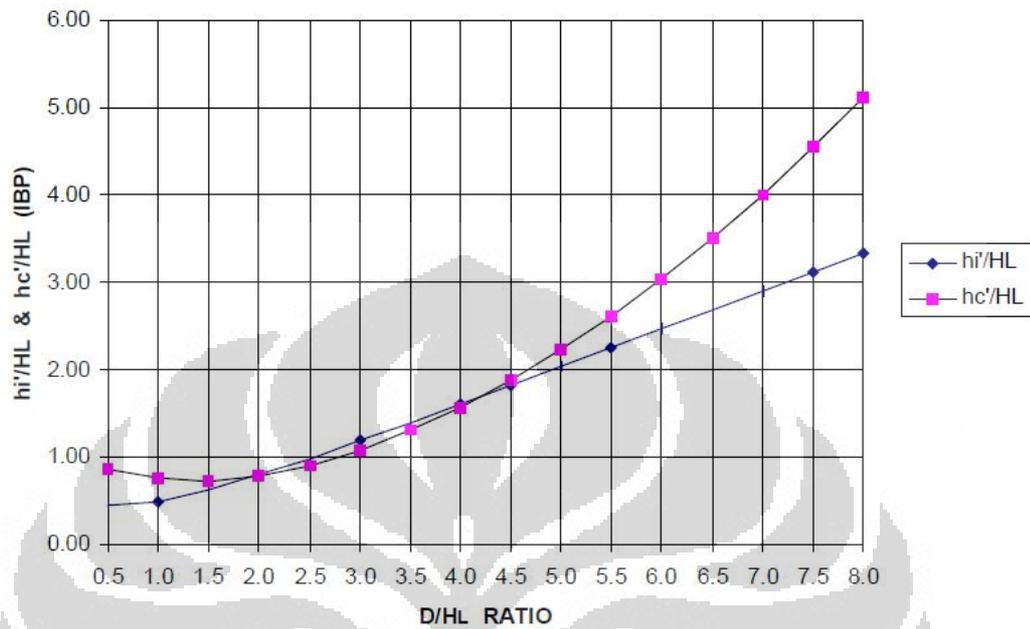


Gambar 2. 15 Gaya gaya dinamik yang terjadi

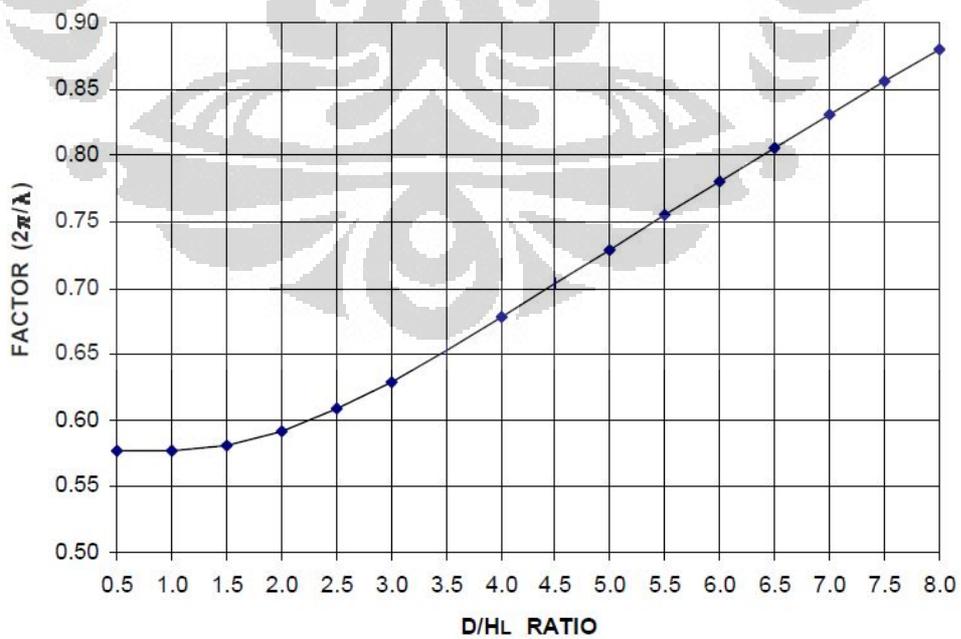
## STANDARD

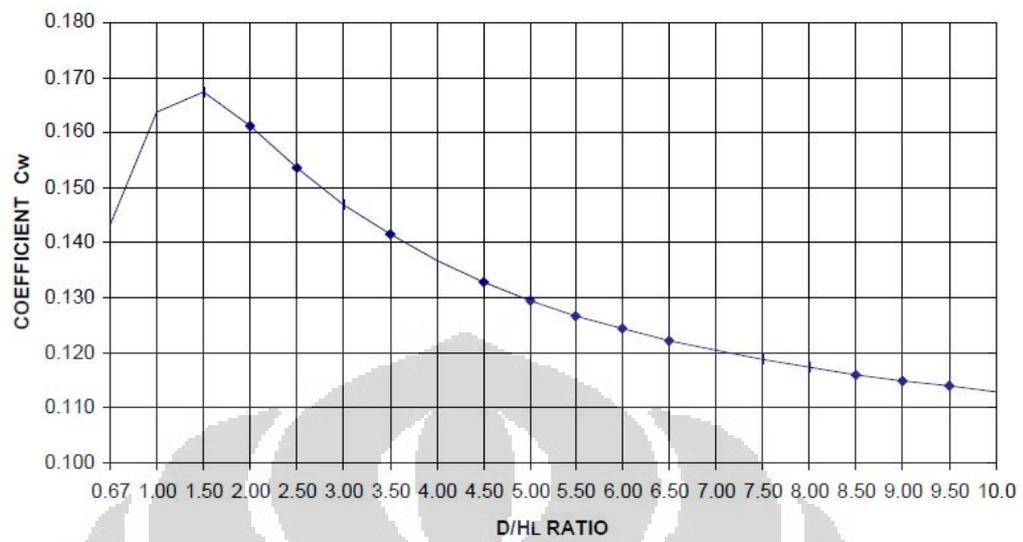
IMPULSIVE AND CONVECTIVE HEIGHT FACTORS vs.  $D/H_L$  RATIOIMPULSIVE AND CONVECTIVE MASS FACTORS vs.  $D/H_L$  RATIO

## STANDARD

IMPULSIVE AND CONVECTIVE HEIGHT FACTORS vs.  $D/H_L$  RATIO

## STANDARD

FACTOR ( $2\pi/\lambda$ )

COEFFICIENT  $C_w$ 

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini akan dibahas langkah langkah yang digunakan dalam mempelajari perilaku tangki penimbun bahan bakar minyak. Secara garis besar, penelitian ini terdiri dari 2 bagian utama. Yang pertama adalah proses desain dari tangki minyak dan yang kedua adalah mempelajari perilaku dari tangki yang telah kita desain pada bagian pertama tadi.

#### **3.1. Desain Tangki**

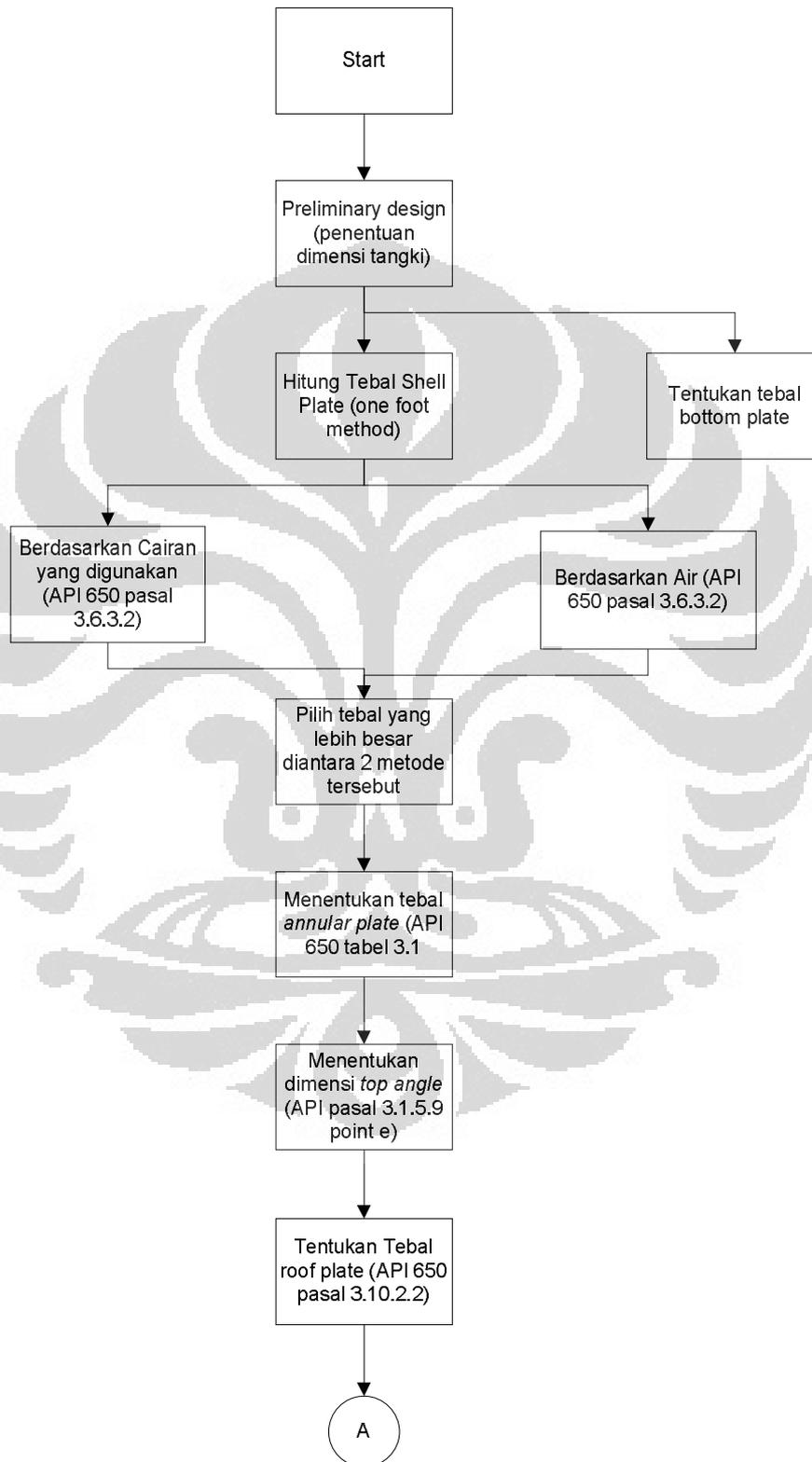
Proses desain dari sebuah tangki minyak sangat bergantung pada kebutuhan akan apa yang akan disimpan dan volume yang akan ditampung. Oleh karena itu, kita harus menentukan berapa kapasitas tangki yang akan di bangun dan apa jenis tangki yang sesuai dengan fluida yang akan mengisinya nanti. Setelah itu, dari volume yang telah terlebih dahulu ditentukan tadi, kita dapat menentukan dimensi berupa diameter dan tinggi dari tangki ini. Hal ini didapat dengan mengasumsikan terlebih dahulu berapa perbandingan antara diameter dan tinggi tangki. Selanjutnya dari diameter dan tinggi nominal tangki kita dapat menentukan seberapa tebal dinding tangki, tebal *annular plate*, tebal plat atap, profile apa yang digunakan untuk struktur pendukung tangki seperti kolom, rafter, girder dll.

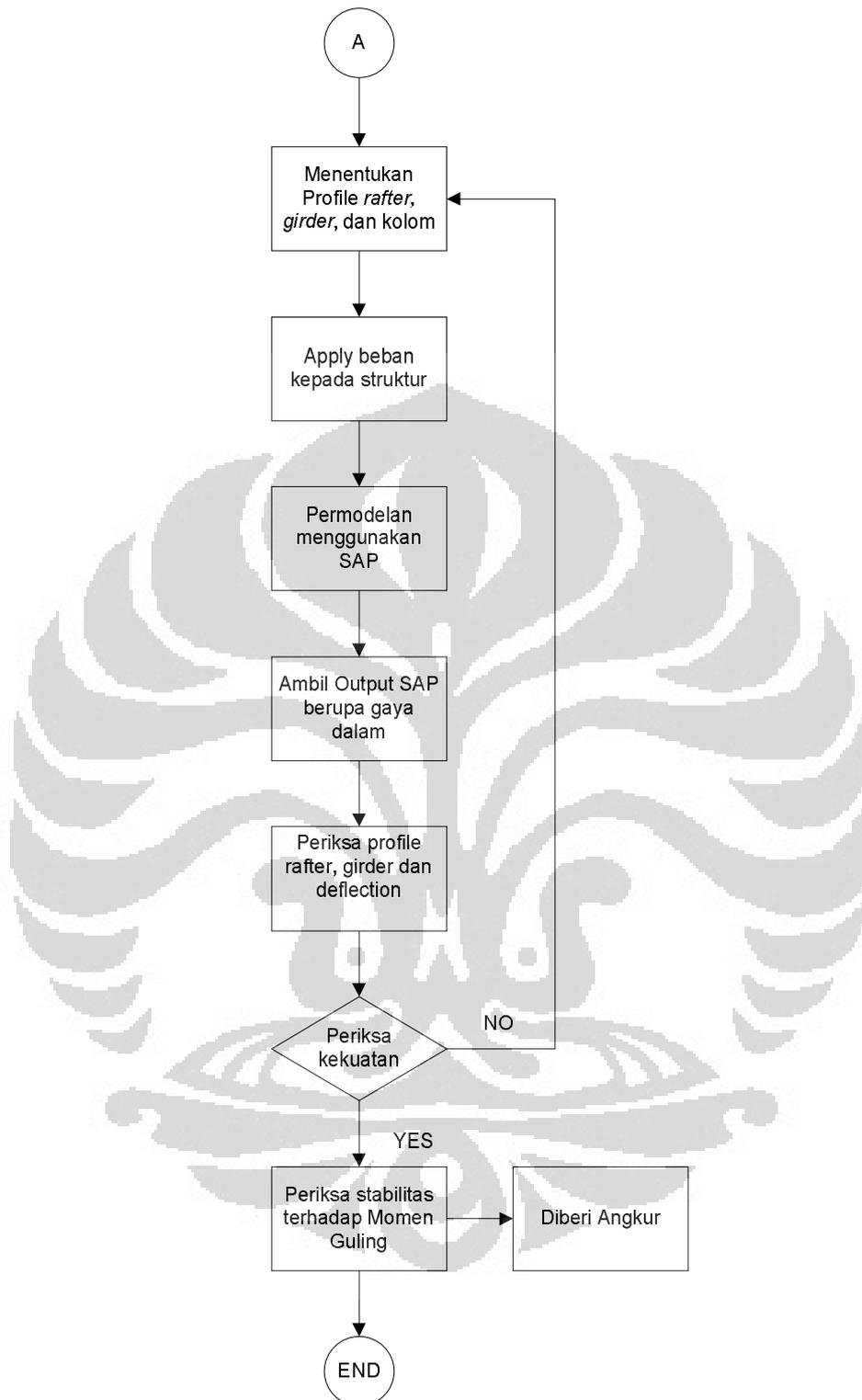
#### **3.2. Identifikasi Perilaku Tangki**

Setelah proses desain selesai, tentunya output yang dapat diterima adalah suatu struktur tangki yang sudah lengkap dari dimensi yang kasar hingga detail seperti tebal plat dan profile struktur. Kemudian struktur ini kita uji dengan beban yang nantinya akan membebani tangki ini sendiri. Beban tersebut dapat berupa beban fluida yang ada didalamnya, beban angin, beban hidup, hingga beban gempa.

Dari pembebanan ini, diharapkan dapat diidentifikasi perilaku dari struktur tangki. Perilaku tersebut dapat berupa gaya dalam hingga ratio kekuatan struktur terhadap beban yang membebaniya.

Secara lengkap proses desain hingga identifikasi perilaku dapat dilihat pada bagan berikut





Gambar 3. 1 Bagan alir desain tangki

### 3.3. Studi Parameter

Dalam mempelajari perilaku sebuah struktur tentunya kita harus memberikan beberapa variabel yang berbeda sehingga dapat diketahui perilakunya terhadap variabel itu sendiri.

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan beberapa variabel yang diantaranya adalah

- Perbandingan Diameter dan Tinggi Tangki
- Perbedaan Zona Gempa

#### 3.3.1 Perbandingan Tinggi dan Diameter Tangki

Variabel yang kedua adalah perbedaan perbandingan tinggi dan diameter tangki. Ini dikarenakan tidak selalu tanah yang tersedia cukup luas, ada kalanya suatu saat tempat dimana kita akan mendirikan tangki merupakan daerah yang sempit sehingga harus membangun tangki yang menjulang keatas. Tangki yang akan kita pelajari perilakunya memiliki perbandingan (tinggi : diameter) sebagai berikut

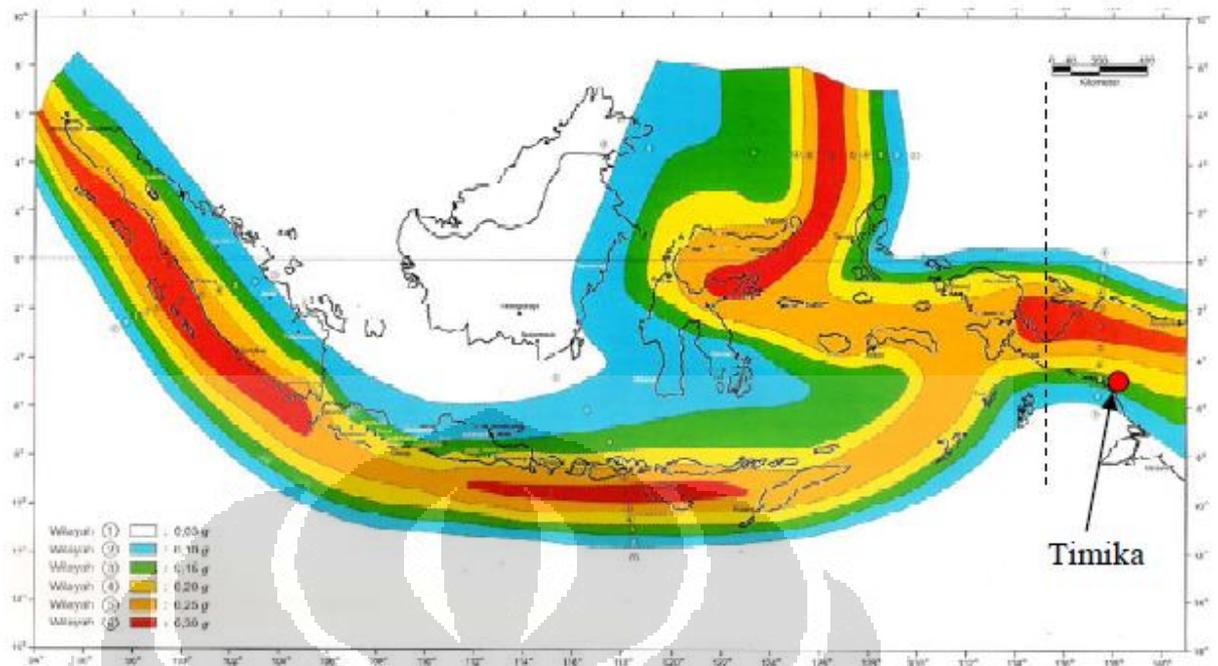
1 : 4 (mendatar)

1 : 1 (sedang)

3 : 1 (Tinggi)

#### 3.3.2 Perbandingan Wilayah Gempa

Variabel yang terakhir adalah perbedaan wilayah tempat berdirinya tangki ini sehingga termasuk pada wilayah gempa yang berbeda beda. Hal ini dikarenakan, Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki wilayah yang sangat luas. Sumber minyak pun berada hampir diseluruh wilayah indonesia. Untuk itu penulis ingin mempelajari seberapa besar pengaruh perbedaan wilayah gempa terhadap desain struktur sebuah tangki minyak.



Gambar 3. 2. Gambar Peta Gempa Indonesia

Untuk itu pembangunan tangki ini akan di uji terhadap gempa pada wilayah-wilayah berikut ini

Zona 1 (Kalimantan)

Zona 3 (Jakarta)

Zona 6 (Selatan Sumatra)

Dari 3 variabel yang telah disebutkan diatas, maka penulis memutuskan untuk membuat preliminary design untuk 3 kapasitas tangki dan 3 perbandingan tinggi dan diameter.

Dari dua variabel tersebut didapatkan 9 dimensi tangki yang berbeda beda dengan detail sebagai berikut

Kapasitas	Satuan	Perbandingan tinggi : Diameter	Tinggi (m)	Diameter (m)
150000	Barrel	1 : 4	15	50
		1 : 1	34	33
		3 : 1	69	22

## BAB 4

### ANALISIS

#### 4.1. Data Umum Perencanaan

Dalam perancangan tangki minyak ini ada beberapa data umum yang dipakai meneruskan pada sepanjang proses perencanaan. Berikut merupakan data umum perancangan yang digunakan:

- Desain *code* : API 650 10th edition
- Material : Baja
- Mutu Baja Pelat : ASTM A 573 M (70)
  - $F_y$  : 290 Mpa
  - $F_u$  : 385 Mpa
- Mutu Baja struktur atap: ASTM A 36
  - $F_y$  : 250 Mpa
  - $F_u$  : 400 Mpa
- Corrosion Allowance
  - Shell : 2 mm
  - Bottom : 1 mm
  - Roof : 1 mm
- Isi Tangki : Solar
- Berat jenis isi tangki : 0,8 kN/m<sup>3</sup>

#### 4.2. Perancangan Tangki Minyak

Perancangan terhadap tangki ini dilakukan berdasarkan design code *API 650 10th Edition*. Karena pada penelitian ini menggunakan 3 jenis tangki yaitu melebar, sama dan meninggi, maka yang akan disajikan disini adalah satu contoh perancangan untuk tangki yang melebar saja. Selanjutnya karena untuk jenis tangki yang sama dan meninggi menggunakan metode yang sama, hasil perancangan akan ditampilkan pada lampiran saja.

##### 4.2.1 Pelat Dinding

Pelat dinding dirancang dengan menggunakan *one foot methode* sesuai peraturan yang telah tertera pada bab 2.5.8 . Ketebalan minimum yang digunakan pada pelat dinding sesuai dengan Tabel 2.6 , tangki melebar yang akan didesain

memiliki diameter sebesar 50 m. Nilai ini termasuk dalam range 36-60 m sehingga tebal minimumnya adalah 8 mm. Ketebalan tangki dihitung urut dari lapisan pertama yaitu lapisan yang bersentuhan langsung dengan annular plate hingga ke lapisan teratas yang berhubungan dengan struktur atap. Setiap lapisan setinggi 2 meter. Artinya ketebalan tiap lapisan digunakan untuk 2 meter.

Metode *one foot methode* menggunakan dua jenis cairan dalam menentukan ketebalan dari pelat dinding yaitu solar sebagai cairan yang akan mengisi tangki ini dan air. Untuk perhitungan dengan solar digunakan rumus :

$$t_d = \frac{4,9 D(H - 0,3)G}{Sd} + CA$$

Sedangkan perhitungan dengan air menggunakan rumus :

$$t_1 = \frac{4,9 D(H - 0,3)}{St}$$

Dengan menggunakan dua perhitungan diatas maka didapatkan nilai ketebalan pelat dinding sesuai tabel berikut ini

Tabel 4.1. Tabel Hasil Perhitungan Ketebalan Dinding Pelat Baja Tangki

Lapisan	dengan solar	dengan Air	diambil
t1	16.92849741	17.314904	18
t2	14.89740933	14.959135	15
t3	12.86632124	12.603365	13
t4	10.83523316	10.247596	11
t5	8.804145078	7.8918269	9
t6	6.773056995	5.5360577	8
t7	4.741968912	3.1802885	8
t8	2.710880829	0.8245192	8

Nilai ketebalan yang kemudian diambil merupakan nilai pembulatan keatas dari nilai terbesar jika dibandingkan 2 hasil perhitungan pada lapisan yang sama.

#### 4.2.2 Bottom Plate

Ketebalan bottom plate diambil sesuai API std 650 pasal 3.4.1, semua bottom plate memiliki ketebalan minimum yaitu 6 mm. Jika ditambah dengan *corrosion allowance* maka menjadi 7 mm.

#### 4.2.3 Annular plate

Dalam menghitung ketebalan annular plate ada beberapa hal yang harus dipenuhi. Hal-hal tersebut itu adalah

- Tebal pelat dinding lapisan pertama = 18 mm
- Hydrotest sesuai keterangan pada tabel 3.1 API 650 yaitu menggunakan rumus

$$\text{hydrotest} = \frac{4,9H(D - 0,3)}{t}$$

dari rumus ini didapat nilai hydrotest sebesar 200,083 Mpa.

Dengan 2 hal tadi, jika kita menggunakan tabel 2.7 didapatkan tebal annular plate sebesar 6 mm. Jika kita jumlahkan dengan *corrosion allowance* maka didapatkan ketebalan annular plate sebesar 7 mm.

#### 4.2.4 Roof plate

Perhitungan kemiringan dari atap sesuai API 650 kemiringannya harus lebih landai dari 19 mm berbanding 300 mm. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan kemiringan roof sebesar 1:16. Sedangkan untuk ketebalan pelat atap, sesuai dengan API 650 pasal 3.10.2.2, ketebalan minimum adalah 5 mm. Jika ditambah dengan *corrosion allowance* maka dapat diambil ketebalan roof plate sebesar 6 mm.

#### 4.2.5 Top Angle

Sesuai dengan dengan sub bab 2.5.6, karena diameter tangki yang akan di desain berdiameter 50 m (diatas 18m) maka menggunakan profil L 3x3x3/8

#### 4.2.6 Rafter Girder dan Kolom

Untuk perancangan struktur pendukung atap digunakan SAP 2000 v 14 untuk mengetahui apakah profil yang ditentukan tidak gagal.

### 4.3. Pembebanan

Seperti struktur pada umumnya, suatu tangki harus didesain kuat terhadap beban yang selalu diterima olehnya atau beban yang suatu waktu akan dikenakan pada struktur tersebut. Beban yang ditinjau pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 4.3.1 Berat Sendiri Struktur

Berat sendiri struktur dihitung secara otomatis oleh software yang digunakan.

#### 4.3.2 Hidrostatik

Beban hidrostatik adalah beban yang dikenakan ke seluruh pelat dinding serta pelat pada dasar tangki. Besarnya tekanan hidrostatik ini dihitung menggunakan rumus

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Dimana nilai  $\rho \cdot g$  dapat digantikan dengan nilai berat jenis dari cairan yang mengisi tangki. Dari rumus diatas dapat dihitung tekanan yang dialami oleh tiap pelat sesuai dengan nilai  $h$  (ketinggian) dihitung dari pelat teratas dengan asumsi tangki penuh terisi.

#### 4.3.3 Live Load

Khusus beban hidup, pada tangki minyak hanya dikenakan pada *roof plate*. Yaitu sebesar  $1,2 \text{ kN/m}^2$ .

#### 4.3.4 Beban Hidrodinamik

Analisa beban gempa menggunakan ACI 350.3 yaitu pembebanan yang biasa digunakan untuk beban gempa tangki yang terbuat dari beton karena API tidak menyediakan perhitungan gempa secara detail. Prinsip dasar yang digunakan dalam ACI 350.3 sendiri mirip seperti prinsip *static equivalen* dimana mengubah beban gempa yang bersifat dinamik menjadi beban statis yang dikenakan pada seluruh pelat dinding.

Perhitungan beban dinamik berdasarkan ACI 350.3 terbagi menjadi beberapa jenis beban yang kemudian dapat dijumlahkan secara SRSS. Inertia

wall, gempa vertical, beban gempa impulsif dan konvektif merupakan jenis-jenis beban tersebut.

Standart analisa prosedur yang digunakan dalam mendesain tangki yang berisi fluida harus dimodelkan sebagai tangki mekanik yang kaku seperti model Housner (1963), dimana gaya hidrodinamik pada arah horizontal yang bekerja pada tangki dibagi menjadi dua komponen utama yaitu beban impulsif dan konvektif. Beban gempa impulsif adalah beban gempa hasil dari ikut Bergeraknya sebagian fluida isi tangki dengan dinding tangki. Sedangkan beban gempa konvektif adalah beban gempa yang terjadi akibat sebagian fluida yang lain, yang tidak ikut bergerak dengan tangki pada mode pertama tadi, yang bergoyang sendiri (Lay, 1989)

Tentunya besarnya beban dinamik ini tidak sama untuk setiap jenis tangki dan wilayah gempa. Yang akan disajikan disini hanya perhitungan untuk model 1 yaitu tangki melebar pada wilayah gempa 3. Sedangkan untuk model yang lain menggunakan langkah langkah yang sama.

Ada beberapa asumsi awal yang digunakan sehingga dapat memulai perhitungan yaitu

- Asumsi perletakan adalah Sendi (hinged)
- Tangki yang berisi bahan bakar solar dianggap cukup penting pada keadaan darurat akibat gempa (faktor keutamaan)
- Tanah tempat berdirinya tangki merupakan tanah type C dimana tanah keras ditemukan pada kedalaman lebih dari 6 meter namun tidak lebih dari 12 meter.

Dari asumsi asumsi diatas didapatkan nilai nilai sebagai berikut

$$Z = 0,15$$

$$R_{wi} = 2,75$$

$$R_{wc} = 1$$

$$\text{Faktor keutamaan} = 1,25$$

$$S = 1,5$$

Perhitungan pertama yang dilakukan adalah perhitungan properti dinamik dari tangki. Namun sebelum itu harus disiapkan beberapa koefisien diantaranya nilai  $C_w$  dan  $C_i$ . Koefisien tersebut dihitung menggunakan rumus

$$C_w = 9,375 \times 10^{-2} + 0,2039 \times \frac{H_L}{D} - 0,1034 \times \frac{H_L^2}{D} - 0,1253 \times \frac{H_L^3}{D} + 0,1267 \times \frac{H_L^4}{D} - 0,03186 \times \frac{H_L^5}{D}$$

Dari rumus diatas didapat nilai  $C_w$  sebesar 0,143. Kemudian nilai ini dimasukkan pada rumus

$$C_i = C_w \sqrt{\frac{t_w}{10R}} = 1,398 \times 10^{-3}$$

Setelah nilai  $C_i$  didapatkan, properti dinamik bisa didapatkan dengan rumus

$$\omega_i = C_i \cdot \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{10^3 E_c}{\rho_c}} = 4,751 \frac{1}{s}$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} = 1,323 \text{ s}$$

Sedangkan untuk  $T_c$  bisa didapatkan dengan rumus

$$\lambda = \sqrt{3,68 g \tanh \left[ 3,68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right]} = 5,374$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{D} = 8,287 \text{ s}$$

Selanjutnya untuk menghitung besarnya beban dinamik tersebut dibutuhkan seberapa besar massa dari tangki dan isinya yang ikut menimbulkan beban baik impulsif maupun konfektif. Untuk itu diperlukan perhitungan nilai  $W_i$  dan  $W_c$  yang merupakan nilai massa ekuivalen dari cairan yang ada di dalam tangki menggunakan rumus rumus dibawah ini

$$W_i = \frac{\tanh \left[ 0,866 \left( \frac{D}{H_L} \right) \right]}{0,866 \left( \frac{D}{H_L} \right)} W_L = 8,15 \times 10^7 \text{ N}$$

$$W_c = 0,230 \left( \frac{D}{H_L} \right) \tanh \left[ 3,68 \left( \frac{D}{H_L} \right) \right] W_L = 14,65 \times 10^7 \text{ N}$$

Dan yang terakhir menghitung spectra amplifikasi factor. Karena nilai  $T_i$  adalah  $1,323 > 0,31$  maka

$$C_i = \frac{1,25}{T_i^{2/3}} \leq \frac{2,75}{S} = 1,037$$

Nilai  $C_c$  dapat diambil sesuai dengan nilai  $T_c$ . Karena nilai  $T_c$  sebesar  $8,287 > 2,4$  maka

$$C_c = \frac{6}{T_c^2} = 0,087$$

Setelah seluruh data yang dibutuhkan sudah siap maka kita dapat menghitung nilai gaya lateral dinamik  $P_i$ ,  $P_c$ , dan  $P_w$ .

$$P_i = Z.S.I.C_i \cdot \frac{W_i}{R_{wi}} = 8,648 \times 10^6 N$$

$$P_c = Z.S.I.C_c \cdot \frac{W_c}{R_{wc}} = 3,601 \times 10^6 N$$

$$P_w = Z.S.I.C_i \cdot \frac{\varepsilon W_w}{R_{wi}} = 1,57 \times 10^5 N$$

Gaya lateral yang terhitung diatas kemudian didistribusikan secara vertikal dengan cara

$$P_{wy} = \frac{P_w}{2H_w} = 5,234 \times 10^3 \frac{N}{m}$$

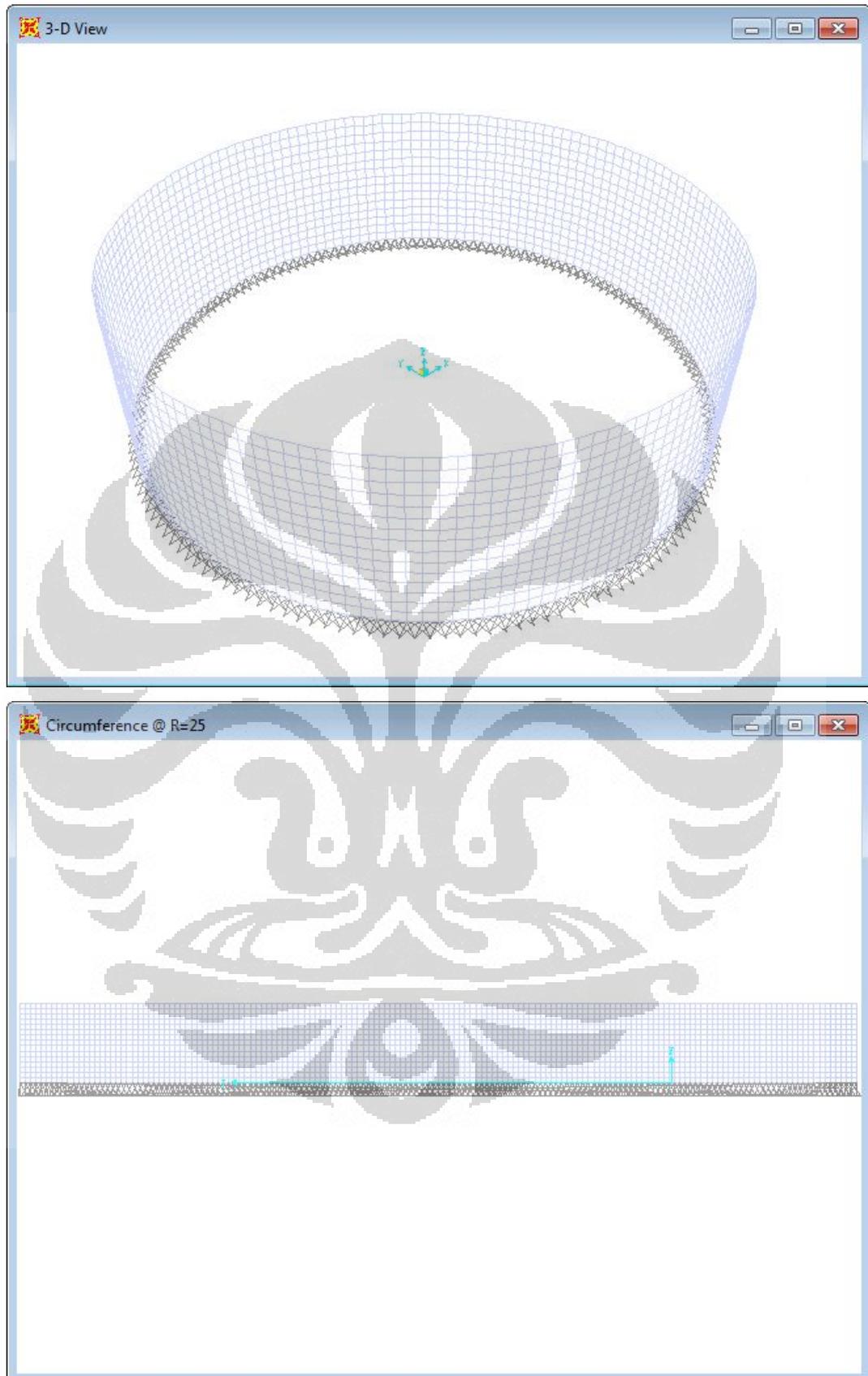
$$P_{cy} = \left(\frac{P_c}{2}\right) \frac{[4H_L - 6h_c - (6H_L - 12h_c) \frac{y}{H_L}]}{H_L^2}$$

$$P_{iy} = \left(\frac{P_i}{2}\right) \frac{[4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i) \frac{y}{H_L}]}{H_L^2}$$

Kemudian gaya yang telah didistribusi secara vertikal tadi kembali didistribusikan kembali ke arah melingkar setengah keliling tangki secara kosinus.

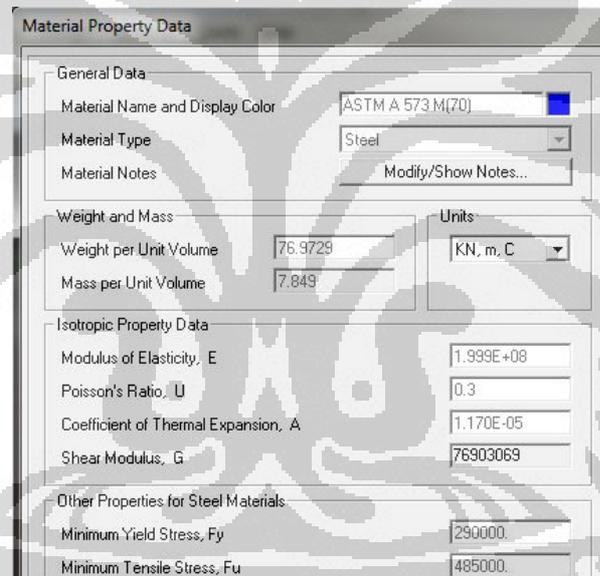
#### 4.4. Permodelan

Permodelan pada penelitian ini akan dibantu dengan *software* SAP 2000 v14. Permodelan yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan output berupa gaya dalam sehingga dapat diketahui perilaku struktur ketika dikenakan beban. Pada dasarnya SAP 2000 telah memiliki *template* umum untuk tangki bentuk silindris. Sehingga dengan memasukkan input berupa diameter dan tinggi dari tangki, maka model secara umum sudah dapat terbentuk.

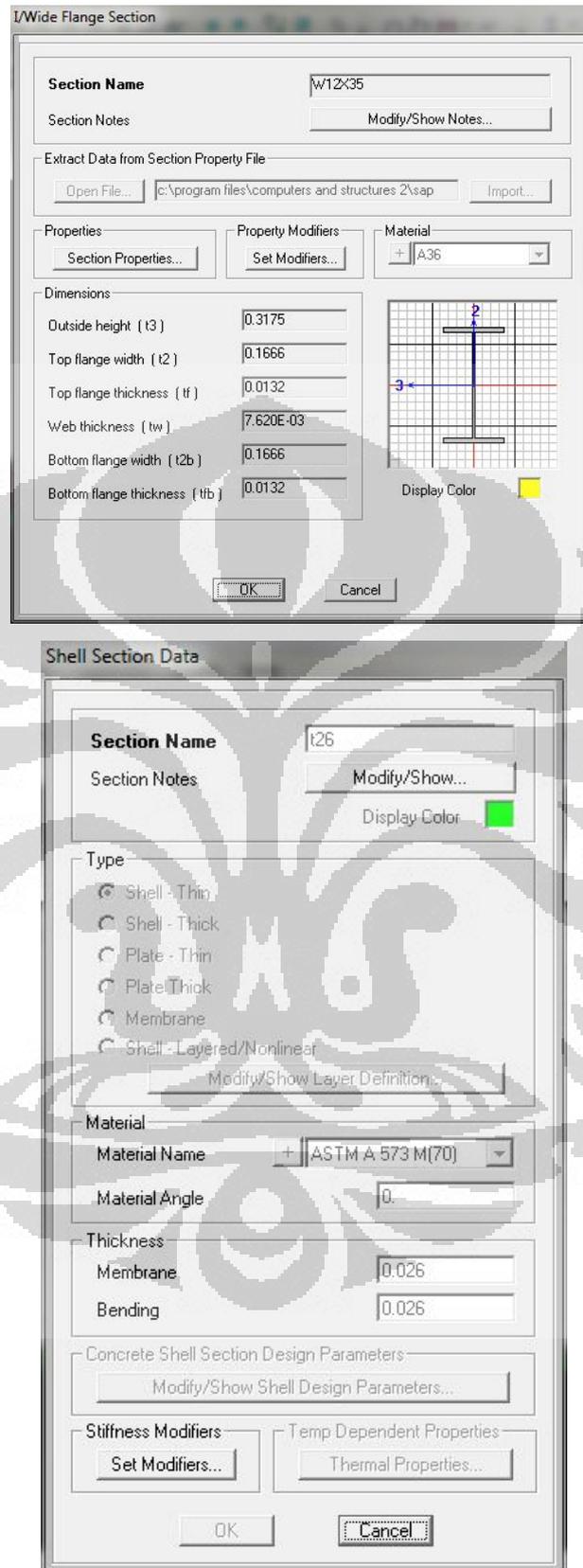


Gambar 4.1. Permodelan Kosong Hasil Template SAP 2000

Seperti langkah-langkah permodelan pada umumnya, yang selanjutnya dilakukan tentunya mendefinisikan material dan *section* apa saja yang akan dibutuhkan dalam permodelan ini. Material baja yang digunakan dalam penelitian ini ada dua mutu yaitu mutu A36 untuk *frame* sedangkan untuk pelat bajanya menggunakan mutu A 573 M (70). Sedangkan untuk *section* yang didefinisikan terbagi menjadi dua juga, yaitu *frame section* dan *area section*. Kebutuhan akan *frame section* disesuaikan dengan kebutuhan rafter, girder, *top angle* dan kolom. Sedangkan untuk *area section* disesuaikan dengan kebutuhan pelat atap, pelat dinding, dan pelat dasar. Pelat atap dan pelat dasar menggunakan ketebalan yang cukup seragam, sedangkan ketebalan pelat dinding berubah sesuai ketinggian, semakin keatas semakin menipis hingga ketebalan minimumnya.

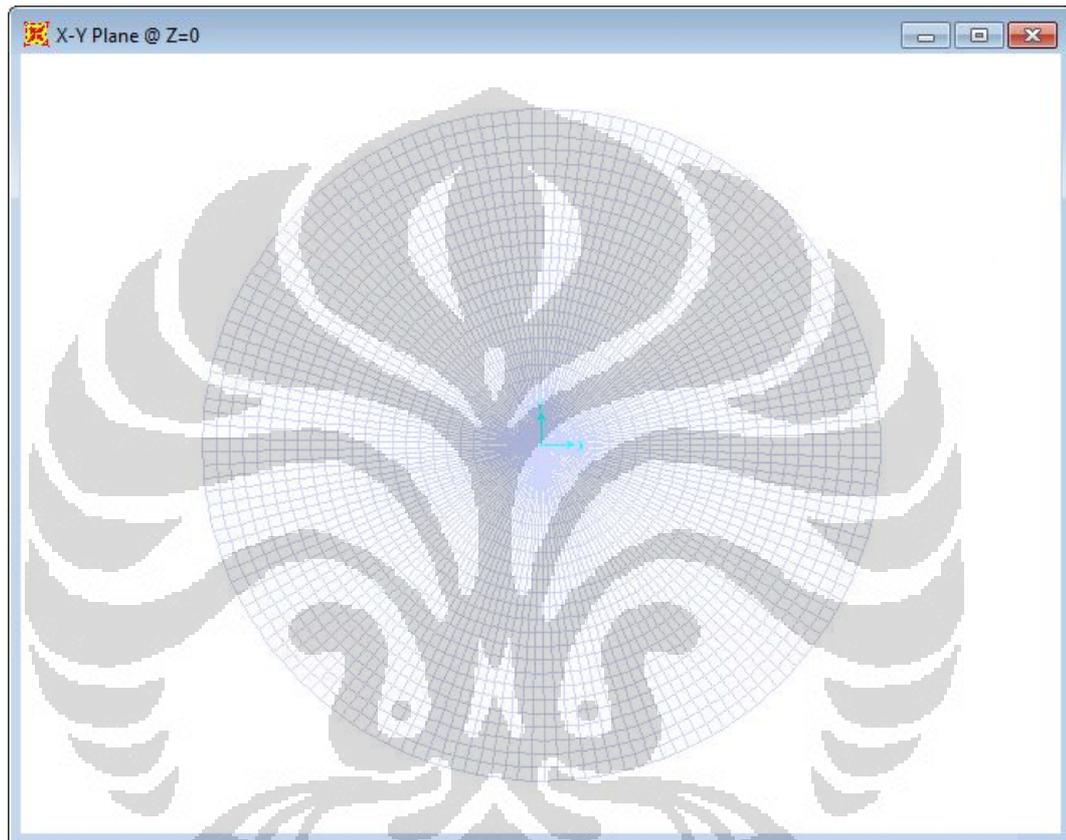


Gambar 4.2. Define Material Pada SAP 2000

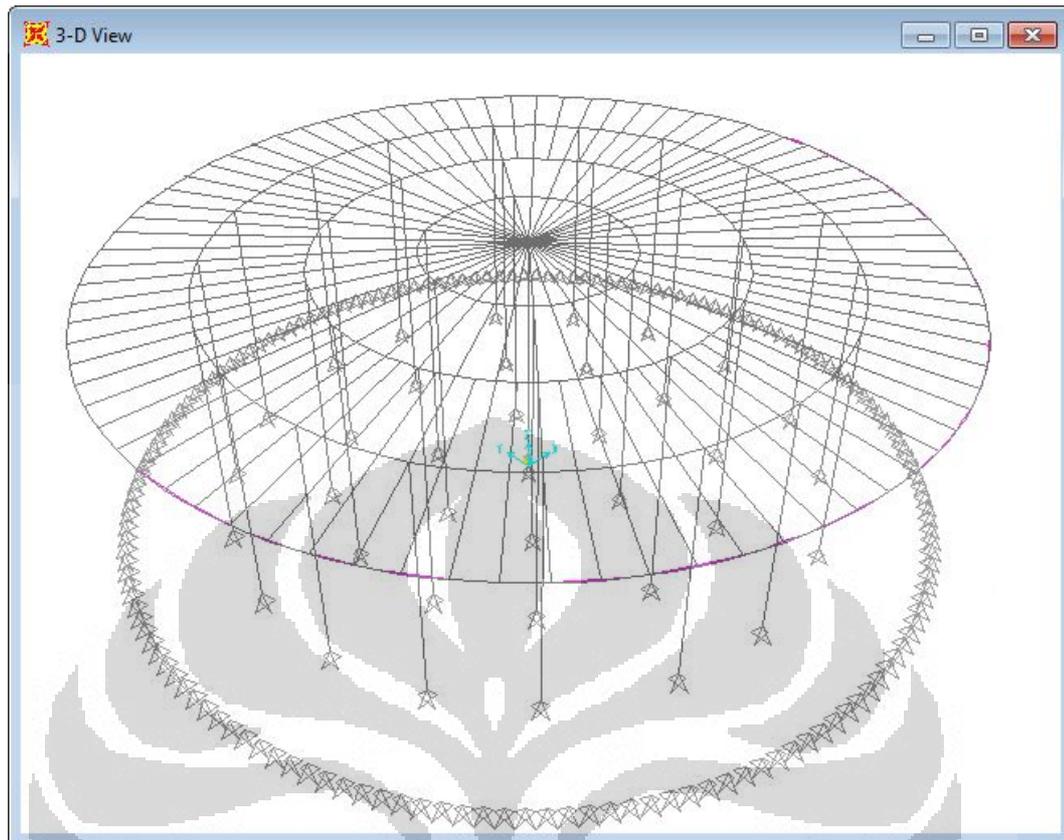


Gambar 4.3. Gambar Pendefinisian *Frame Section Properties* (atas) dan *Area Section Properties* (bawah) pada SAP 2000

Seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 , model template ini belum memiliki pelat dasar maupun atap, oleh karena itu selanjutnya kita menggambar pelat dasarnya. Ketebalan pelat dasar untuk model 1 ini seragam yaitu 7 mm. Kemudian, karena tangki yang kita desain bersifat supported roof, maka kemudian harus dibuat susunan atapnya beserta pelat atap dan hubungan antara atap dan pelat dinding.

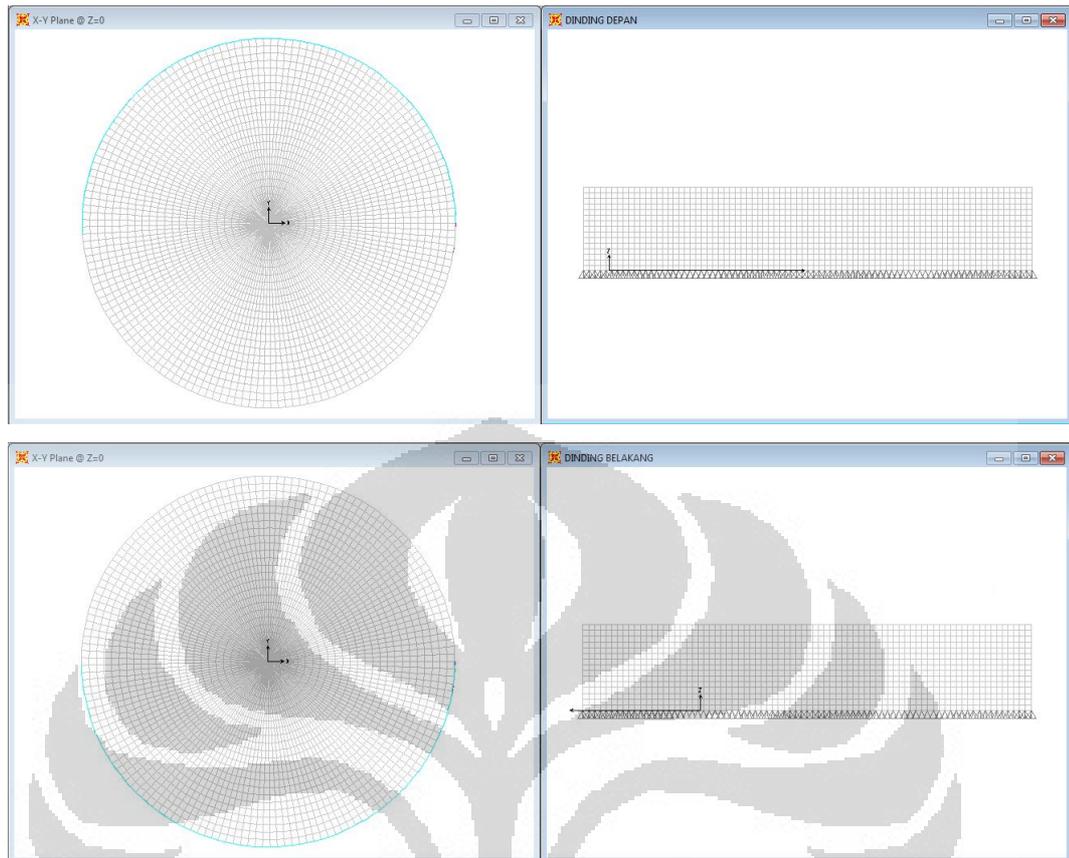


Gambar 4.4. Gambar Pelat Dasar Tangki Minyak Pelat Baja

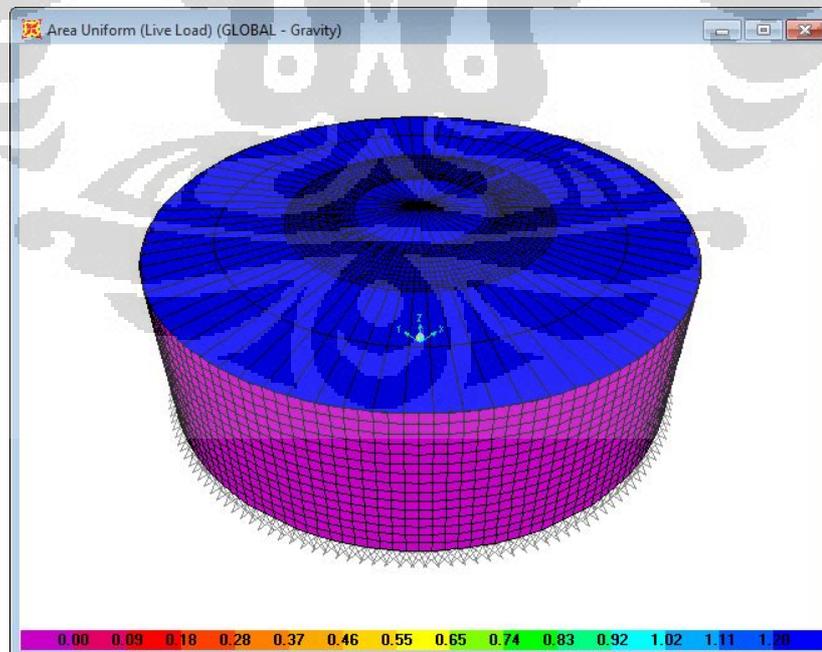


Gambar 4.5. Gambar Struktur Penahan Atap

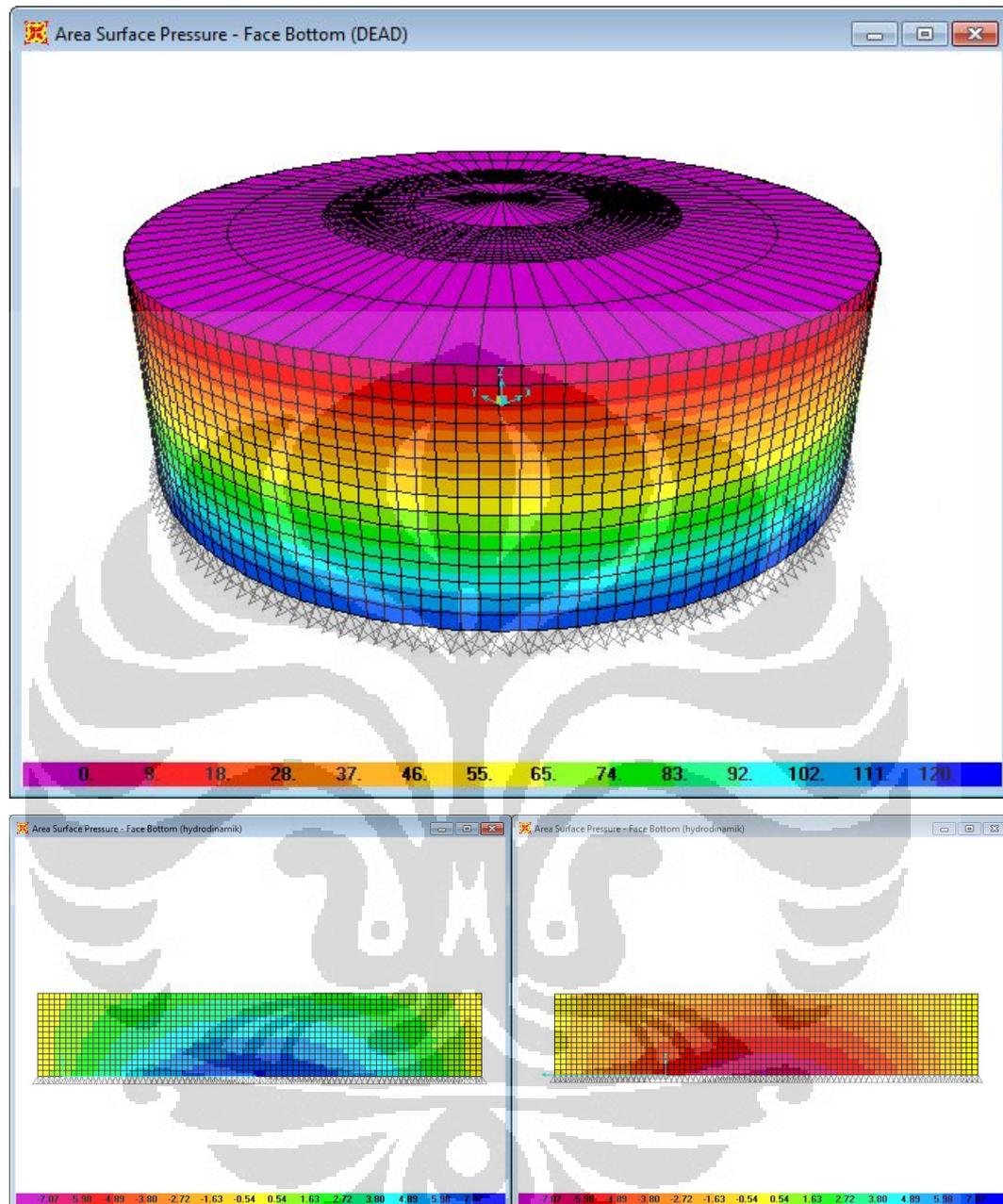
Setelah struktur keseluruhan sudah jadi, proses selanjutnya adalah memberikan pembebanan kepada model. Ada beberapa jenis beban yang diterima oleh struktur tangki. Beban yang pertama adalah berat sendiri struktur yang dihitung secara otomatis oleh SAP 2000. Yang kedua adalah beban hidup yang hanya diterima oleh pelat bagian atap. Yang ketiga adalah beban hidrostatis yang diterima oleh pelat dasar. Dan yang terakhir adalah beban-beban yang di *assign* pada pelat dinding. Beban yang di *assign* untuk pelat dinding diantaranya beban hidrostatis, beban gempa vertikal, beban gempa impulsif dan konvektif, dan beban inertia wall akibat gempa. Karena pembebanan bersifat simetris, maka dinding tangki dibagi menjadi 2 bagian sesuai arah gempa yaitu dinding depan dan dinding belakang.

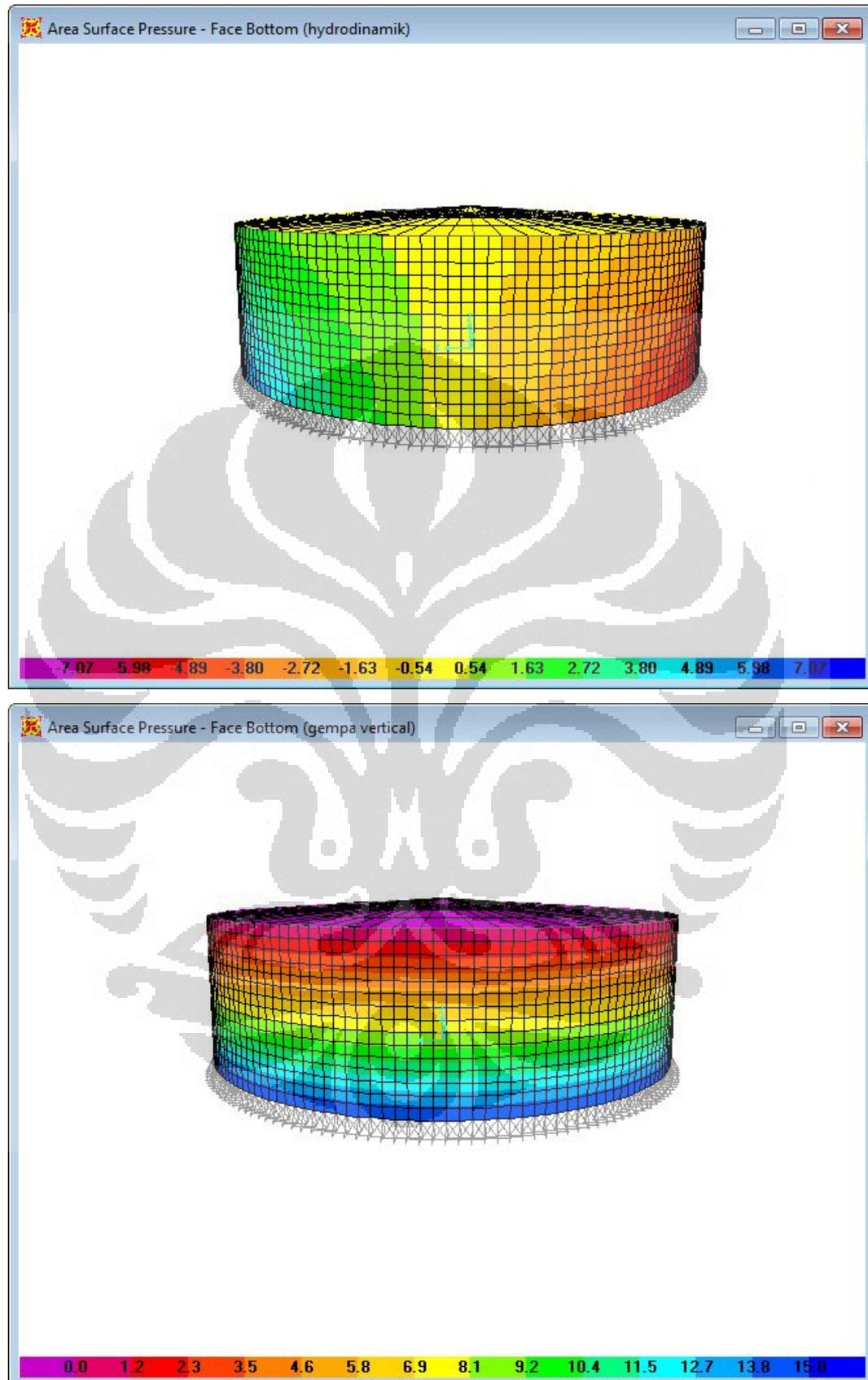


Gambar 4.6. Pembagian Potongan Dinding Depan dan Dinding Belakang



Gambar 4.7. Beban Hidup Pada Atap Tangki





Langkah terakhir pada desain sebuah tangki adalah optimasi dari struktur.

#### 4.5. Output SAP

Setelah seluruh beban telah dikenakan pada struktur maka selanjutnya kita dapat menjalankan model. Model ini dijalankan dengan satu jenis kombinasi yaitu semua beban dikalikan faktor pengali 1,2 kecuali beban-beban yang timbul akibat gempa dibiarkan sesuai jumlahnya (dikalikan faktor pengali 1). Setelah model selesai dijalankan, maka output dari permodelan sudah bisa didapatkan. Output dari permodelan ini dapat berupa gaya dalam hingga tegangan untuk kesemua arah *degree of freedom*. Tegangan dari output permodelan tadi yang dijadikan panduan dalam mengoptimasi struktur. Langkah optimasi yang dimaksud disini adalah optimasi untuk ketebalan pelat dinding tangki. Pelat tangki, yang berbahan baja dengan tegangan ijin menurut API 650 adalah dua per tiga bagian dari tegangan lelehnya, harus diubah-ubah sedemikian rupa sehingga stress yang dialami oleh tangki mendekati nilai tersebut tetapi tidak boleh melebihi atau kurang terlalu jauh. Secara detail mengenai optimasi ini akan di bahas pada bab selanjutnya mengenai analisa optimasi setiap tangki.

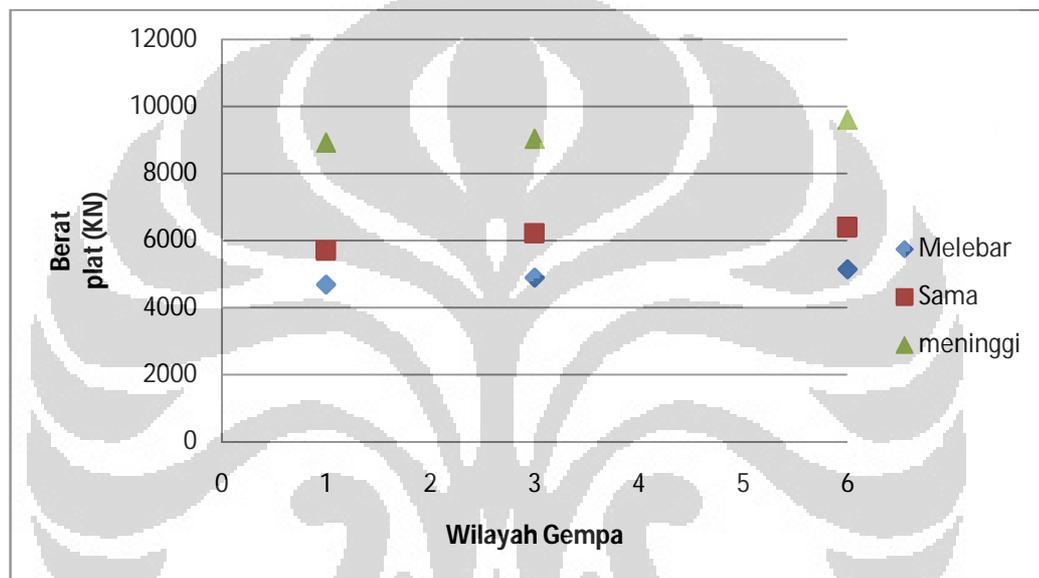
#### 4.6. Analisa

##### 4.6.1 Analisa Perbandingan Penggunaan Pelat Baja

Secara garis besar, sebuah tangki minyak pelat baja terdiri dari 2 struktur utama yaitu dinding plat baja dan struktur atap. Penggunaan pelat baja dalam tangki tentu saja bergantung pada beberapa hal, diantaranya volume tangki, perbandingan diameter dan tinggi tangki, serta tentunya jika kita meninjau gempa maka seberapa besar beban gempa yang akan diterima oleh tangki tersebut. Seberapa banyak pelat yang digunakan pada struktur dapat dilihat dari berapa total berat plat baja yang digunakan.

Tabel 4.2. Tabel Perbandingan Kebutuhan Material Pelat Baja

Model	Jumlah material (kN)	wilayah gempa
Model1	4892.884	3
Model2	5134.686	6
Model3	4687.123	1
Model4	6210.938	3
Model5	5698.602	1
Model6	6386.872	6
Model7	9595.406	6
Model8	9030.296	3
Model9	8908.409	1



Gambar 4.8. Grafik Penggunaan Shell Plate Pada 9 Model Tangki

Grafik diatas merupakan perbandingan antara material plat baja yang digunakan terhadap jenis tangki dan wilayah gempa tangki. Dari grafik dapat dilihat bahwa, semakin meninggi desain sebuah tangki maka semakin banyak material pelat baja yang digunakan. Ini dapat terlihat jika membandingkan semua tangki pada wilayah gempa yang sama. Contohnya pada model 1 ( tangki melebar wilayah gempa 3) membutuhkan material pelat baja sebesar 4892,884 kN. Nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan model 4 (tangki sama wilayah gempa 3). Dan yang membutuhkan material terbanyak untuk wilayah gempa 3 adalah model 8 (tangki meninggi wilayah gempa 3).

Hal ini dapat terjadi karena semakin besar perbandingan tinggi dan diameter suatu tangki semakin besar gaya hidrostatis yang dialami oleh dinding

tangki. Sedangkan semakin besar gaya hidrostatik maka semakin besar tegangan yang dialami oleh plat baja tersebut. Material baja yang digunakan memiliki batas tegangan maksimum. Agar batas tersebut tidak terlampaui maka ketebalan plat baja harus diperbesar. Artinya semakin tinggi sebuah tangki maka semakin tebal pelat baja yang dibutuhkan. Di lain pihak, tegangan pelat terbesar yang dialami oleh sebuah tangki adalah pada bagian selimut tabung, bukan pada tutup atau alasnya. Semakin tinggi sebuah tangki maka semakin besar juga luasan selimut tabungnya.

Jika kedua penjelasan diatas digabungkan tentunya kita dapat menarik kesimpulan bahwa semakin tinggi sebuah tangki maka semakin banyak material pelat baja yang digunakan.

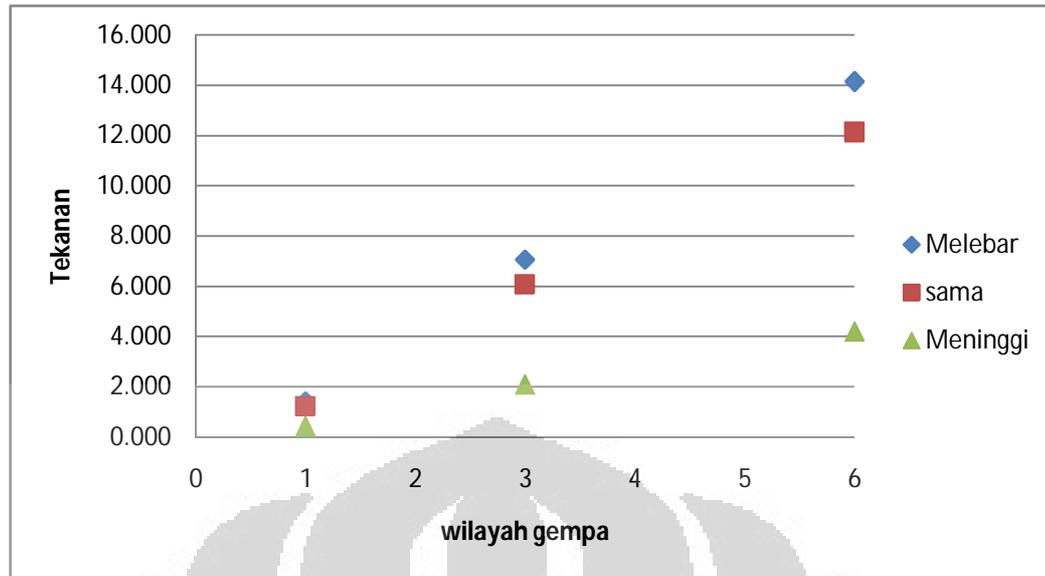
Selain itu, dari grafik juga terdapat kecenderungan jumlah pelat baja yang dibutuhkan juga meningkat seiring dengan bertambahnya gaya gempa yang dialami oleh tangki.

#### 4.6.2 Analisa perbandingan nilai tekanan maksimum akibat gempa.

Suatu struktur pada negara rawan gempa seperti Indonesia harus didesain memiliki ketahanan terhadap gempa itu sendiri, tidak terkecuali sebuah tangki minyak. Karena Indonesia memiliki wilayah yang sangat luas, maka tidak dapat dipungkiri, kebutuhan akan tangki minyak dapat timbul di seluruh wilayah gempa. Untuk itu kita harus mengetahui seberapa besar pengaruh gempa pada struktur tangki.

Tabel 4.3. Tabel Tekanan Maksimum Akibat Gempa

Model	Beban Gempa (kPa)	wilayah gempa
Model1	7.065	3
Model2	14.129	6
Model3	1.413	1
Model4	6.062	3
Model5	1.212	1
Model6	12.125	6
Model7	4.177	6
Model8	2.088	3
Model9	0.418	1



Gambar 4.9. Grafik Tekanan Maksimum Pada Pelat Dinding Akibat Gempa

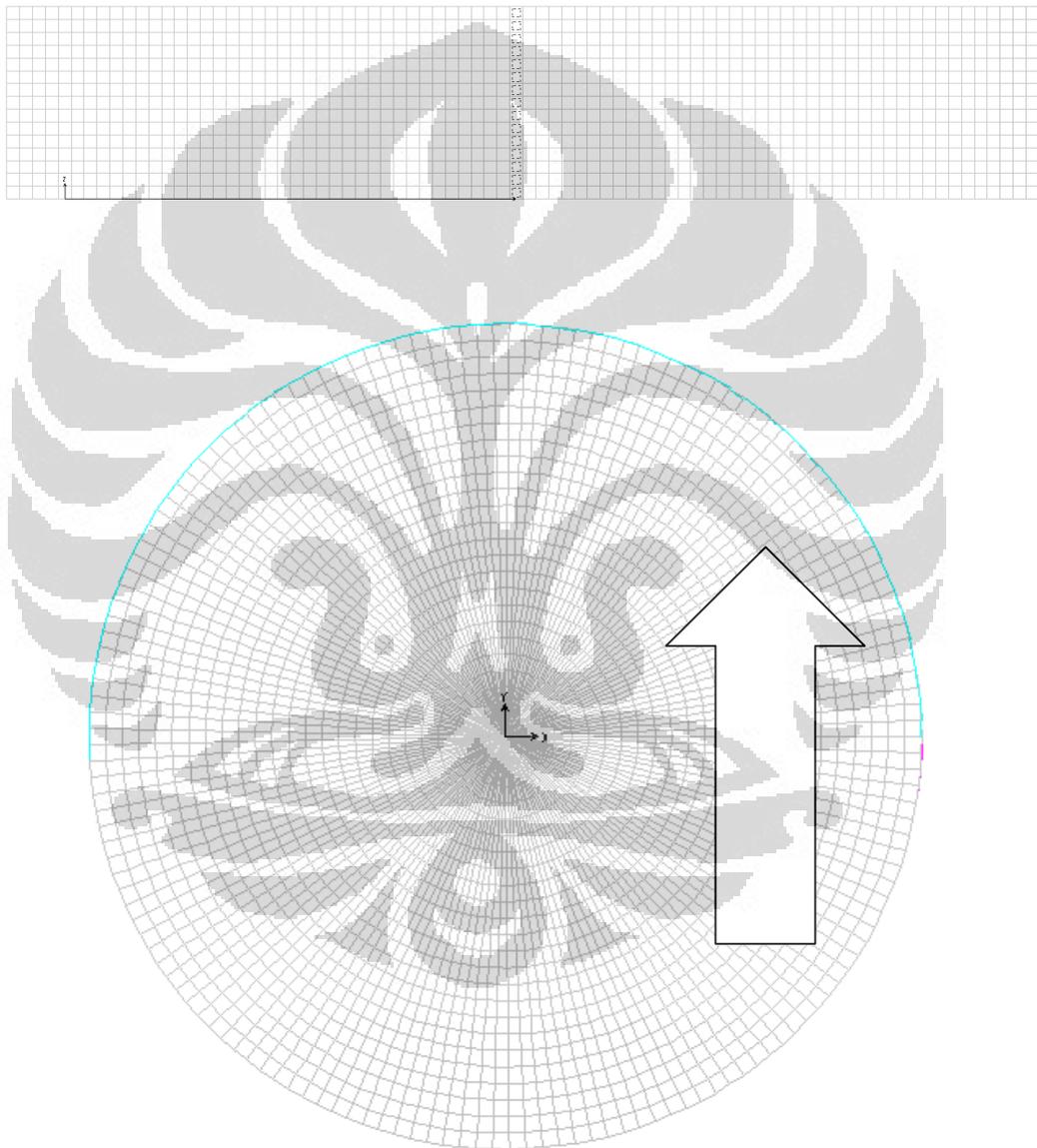
Kita ketahui bersama bahwa semakin naik tingkatan suatu wilayah pada peta gempa, maka kemungkinan dan kekuatan gempa yang akan dialami oleh struktur pada wilayah tersebut semakin besar. Ini dapat dibuktikan oleh grafik diatas. Untuk jenis tangki yang sama, wilayah gempa yang paling besar menghasilkan tekanan maksimum yang terbesar pula. Artinya, semakin besar gaya gempa yang dialami suatu tangki maka semakin besar pula tekanan yang dialami dinding tangki tersebut.

Sedangkan jika kita bandingkan untuk satu wilayah gempa yang sama, maka jenis tangki yang didesain melebar menghasilkan tekanan maksimum yang terbesar. Contohnya untuk wilayah gempa 6. Model 2 mengalami tekanan maksimum terbesar yaitu 14.129 kPa, kemudian model 6 sebesar 12.125 kPa dan yang terkecil model 7 sebesar 4.177 kPa.

Hal ini terjadi karena perilaku dinamik tangki. Semakin kaku sebuah struktur maka semakin besar gaya gempa yang akan dia serap. Hal ini juga berlaku pada tangki. Tangki yang didesain melebar memiliki kekakuan yang terbesar jika dibandingkan dengan yang didesain sama atau meninggi. Oleh karena itu karena tangki yang didesain melebar memiliki kekakuan terbesar maka akan mengalami gaya tekan maksimum yang terbesar.

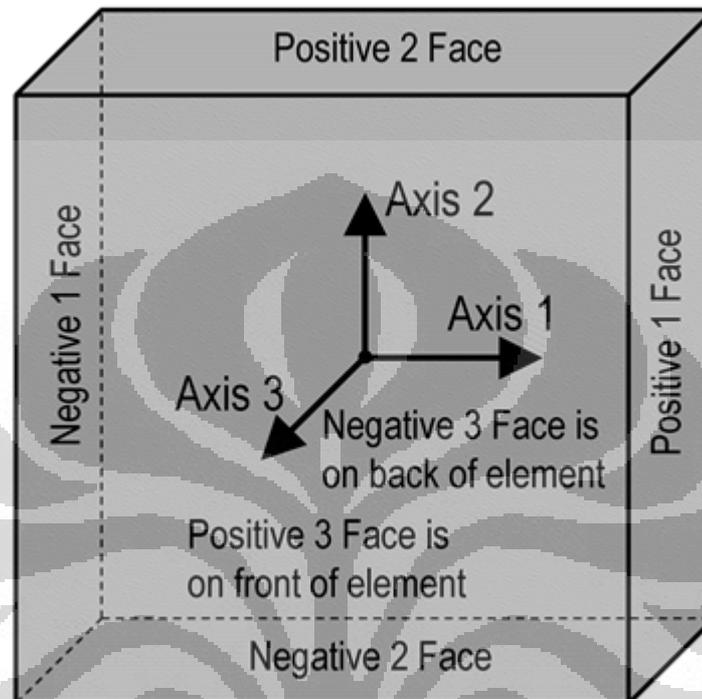
#### 4.6.3 Analisa Gaya Dalam

Gaya dalam yang dialami oleh sebuah struktur pada saat dibebani menggambarkan bagaimana perilaku struktur tersebut dalam menyeimbangi gaya luar yang dikenakan padanya. Pada pembahasan ini, pelat yang akan ditinjau gaya dalamnya adalah pelat pada arah  $90^{\circ}$  dimana asumsi gempa juga pada arah tersebut. Artinya pelat-pelat ini merupakan pelat dinding yang mengalami gaya gempa terbesar karena letaknya yang tegak lurus terhadap arah gempa.



Gambar 4.10. Gambar Pelat Dinding Yang Ditinjau Beserta Arah Gempanya

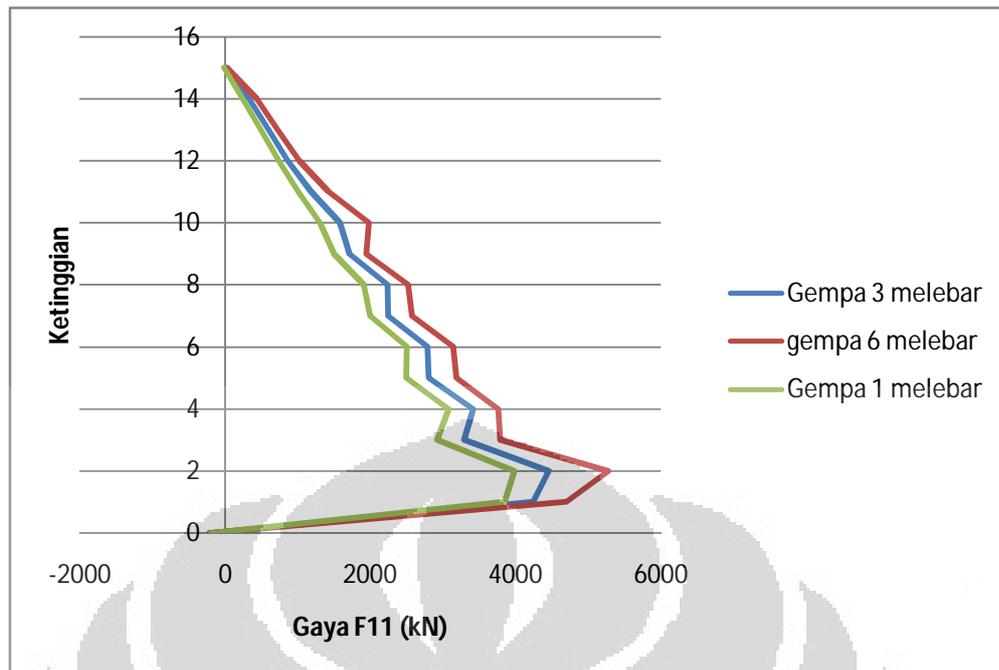
Pada dasarnya, ini dimodelkan dengan pelat yang di assign sebagai *shell thin*, gaya dalam yang timbul pada shell adalah gaya axial, gaya geser, dan gaya dalam momen. Gaya gaya ini bekerja pada ruang tiga dimensi dengan arah acuan seperti gambar dibawah ini



Gambar 4.11. Pedoman Arah Pada Pelat yang Ditinjau

Ada dua buah gaya dalam yang cukup dominan dalam menggambarkan perilaku dinding tangki saat dibebani yaitu gaya  $F_{11}$  untuk gaya axial yang paling dominan dan momen  $M_{22}$  sebagai gaya dalam momen yang paling dominan.

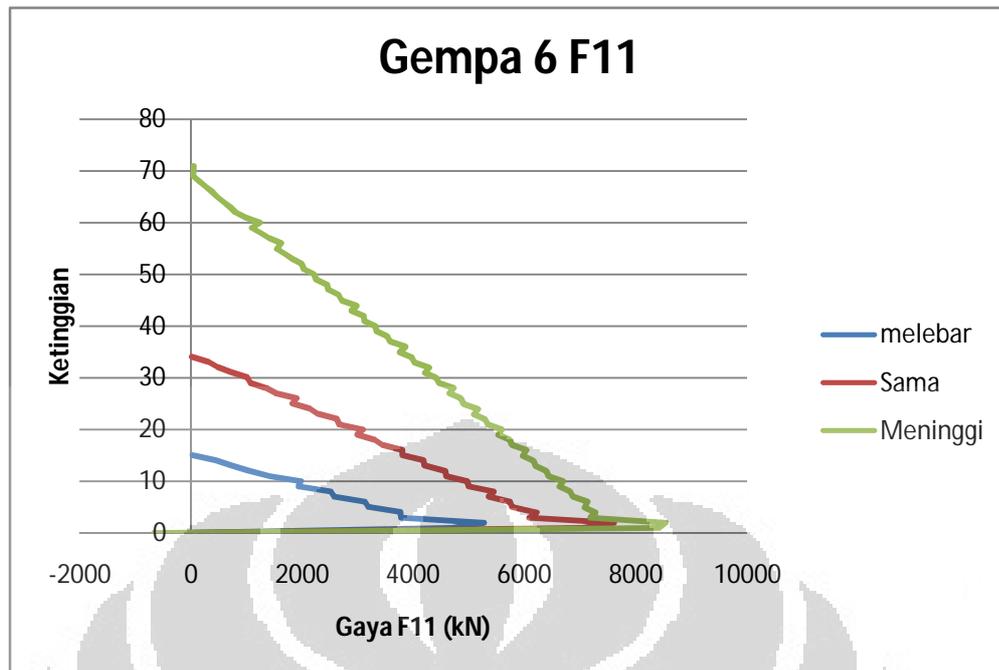
Gaya  $F_{11}$  ini biasa juga disebut dengan sebutan gaya dalam cincin karena arah kerjanya yang melingkari tangki. Gaya axial inilah yang paling dominan pada tangki karena menghasilkan stress yang terbesar jika dibandingkan dengan gaya dalam lainnya. Oleh karena itu, dalam hal optimasi, nilai stress pada arah ini yang dijadikan sebagai nilai acuan.



Gambar 4.12. Grafik Gaya Dalam F11 Pada Semua Model Melebar

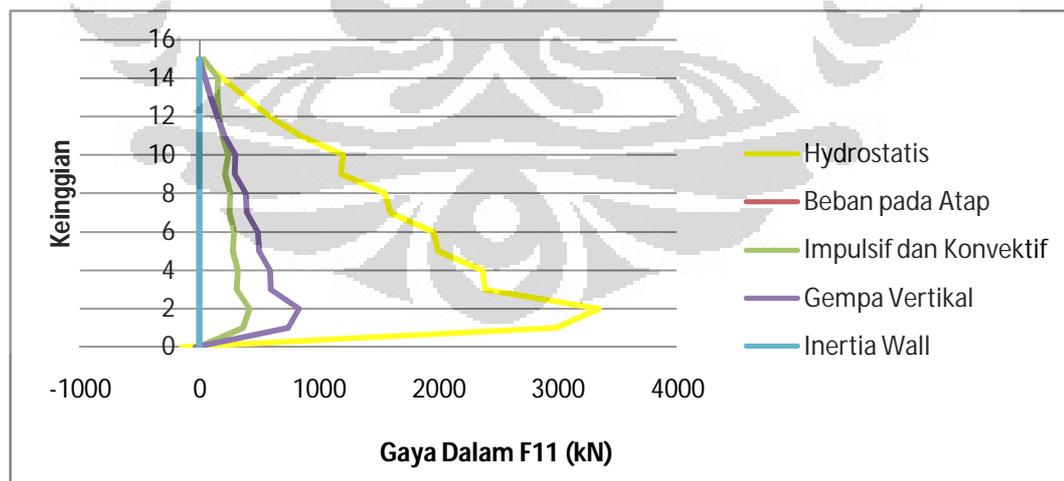
Grafik diatas adalah grafik gaya dalam F11 yang bekerja pada pelat dinding tangki. Jika kita amati nilainya mulai dari dasar tangki, nilai gaya dalam cincin ini memiliki kecenderungan naik dengan gradien yang cukup besar hingga nilai maksimum pada ketinggian 2 m dari dasar tangki kemudian menurun sedikit demi sedikit hingga mendekati nilai nol di titik teratas.

Kemudian, grafik ini menggambarkan gaya dalam F11 yang terjadi pada 3 buah model tangki melebar dengan perbedaan wilayah gempa. Dapat terlihat bahwa semakin meningkat wilayah gempa suatu tangki, maka gaya cincin yang timbul juga semakin besar. Ini terjadi akibat membesarnya gaya gempa yang timbul pada tangki.



Gambar 4.13. Gaya Dalam F11 Semua Model Pada Wilayah Gempa 6

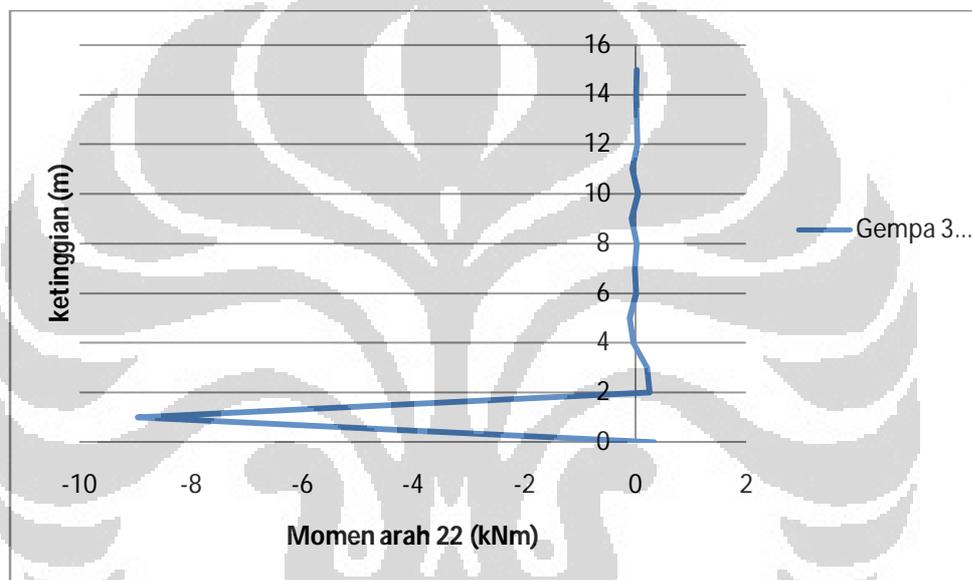
Kemudian jika kita bandingkan mengenai pengaruh perbandingan tinggi dan diameter sebuah tangki, seperti yang terlihat pada grafik diatas semakin meninggi tangki maka gaya dalam cincin yang terjadi juga semakin besar. Namun kecenderungan bahwa nilai maksimum terjadi pada ketinggian 2 meter juga terlihat disini. Artinya semakin meninggi desain tangki nilai maksimum gaya dalam cincin selalu pada ketinggian 2 meter.



Gambar 4.14. Grafik Gaya Dalam F11 Tangki Model 2 Untuk Masing Masing Beban

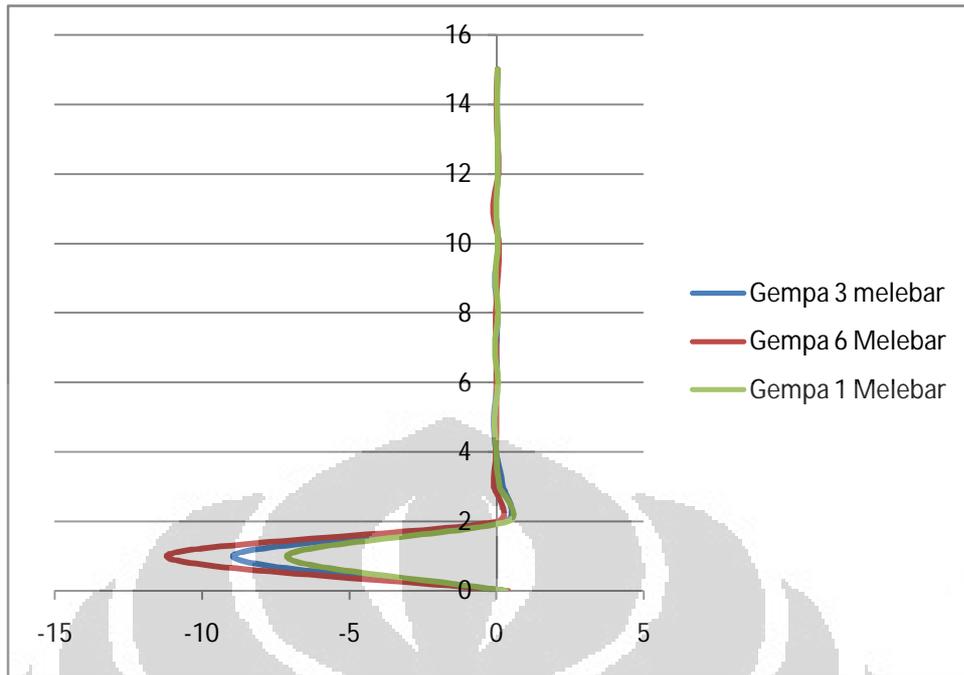
Grafik diatas menggambarkan gaya dalam yang ditimbulkan oleh masing-masing beban yang di assign pada struktur. Dapat terlihat bahwa gaya dalam terbesar dihasilkan oleh beban yang terbesar pula yaitu beban hidrostatis.

Beban ini menghasilkan gaya dalam cincin yang selisihnya cukup jauh dengan yang lainnya. Kemudian jika kita analisa lebih mendetail untuk setiap beban gempa, dapat terlihat bahwa beban gempa yang paling besar menyumbangkan gaya dalam cincin adalah beban gempa vertikal setelah itu beban impulsif dan konvektif. Sedangkan beban hidup yang di assign pada bagian atap dan beban gempa *inertia wall* sangat sedikit memberikan gaya dalam cincin pada struktur. Ini terlihat karena pada grafik, nilai gaya dalam yang dihasilkan hanya mendekati nilai nol.



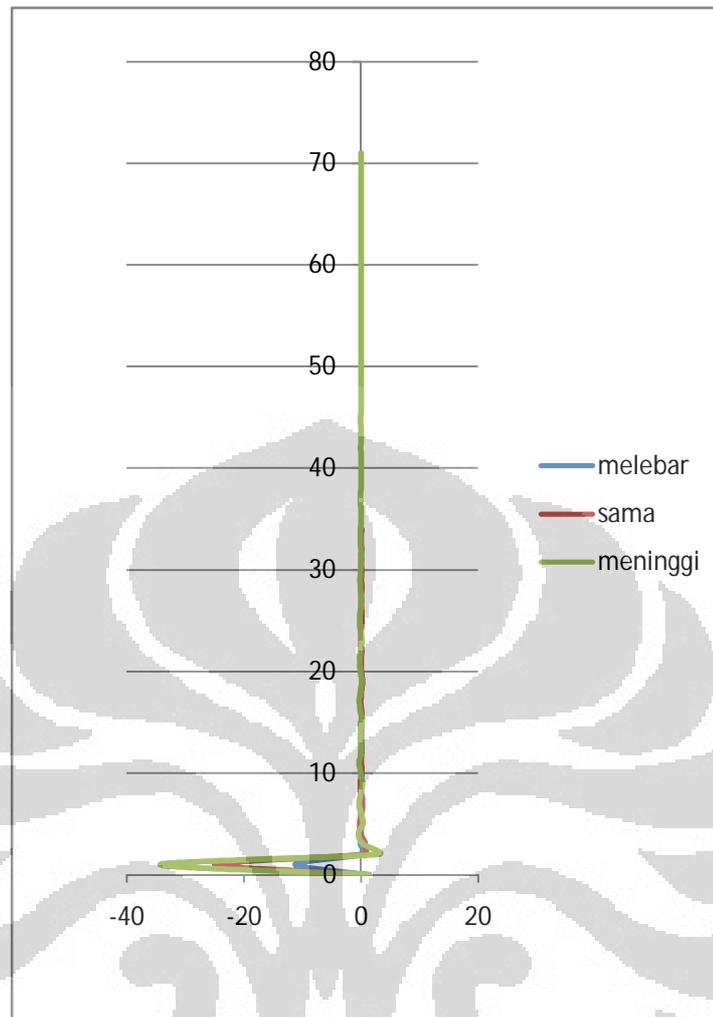
Gambar 4.15. Grafik Gaya Dalam Momen 2-2 Pada Model 1

Grafik diatas melambangkan gaya dalam momen yang terjadi pada pelat dinding tangki yang mengalami gaya maksimum gempa. Nilai maksimum momen yaitu -8,9487 kNm terjadi pada ketinggian 1 meter dari dasar tangki kemudian semakin tinggi nilai momen hanya mendekati nilai nol. Hal serupa ditunjukkan semua jenis tangki dan di semua wilayah gempa. Ini terjadi karena dinding tangki baja sangat tipis sehingga kekakuannya juga sangat kecil.



Gambar 4.16. Gaya Dalam Momen 2-2 Pada Semua Model Melebar

Kemudian jika kita membandingkan pada jenis tangki yang sama namun berbeda wilayah gempa seperti yang digambarkan grafik diatas, dapat terlihat bahwa, semakin besar tingkatan wilayah gempa tempat dibangunnya sebuah tangki, maka momen maksimum yang terjadi semakin besar. Maka nilai momen maksimum pada tangki sebanding dengan besar gaya gempa yang diterima tangki



Gambar 4.17. Gaya Dalam Momen 2-2 Pada Setiap Model Wilayah Gempa 6

Kecenderungan yang sama juga ditunjukkan grafik diatas. Semakin meninggi desain sebuah tangki maka momen maksimum yang timbul juga semakin besar. Ini disebabkan semakin meninggi desain sebuah tangki, beban yang terjadi, baik beban internal maupun beban gempa, semakin membesar.

#### 4.6.4 Analisa Perbandingan Beban Gempa dan Beban Hidrostatik

Dalam analisa struktur tangki ini, ada dua jenis beban yang dominan. Beban yang pertama adalah beban hidrostatik. Beban hidrostatik adalah beban yang timbul pada suatu titik akibat ketinggian suatu fluida di atasnya. Semakin tinggi suatu fluida yang ada di atas titik yang ditinjau maka semakin besar pula tekanan hidrostatiknya. Dalam ketiga jenis tangki yang ada dalam penelitian ini, masing2 dindingnya mengalami tekanan yang berbeda-beda sesuai ketinggiannya. Titik pada dasar tangki model 1, model 2, dan model 3 mengalami tekanan

hydrostatis sebesar 120 kPa Kemudian tangki 4, tangki 5 dan tangki 6 mengalami tekanan sebesar 272 kPa pada titik di dasarnya. Sedangkan untuk tangki 7, tangki 8 dan tangki 9 mengalami tekanan hidrostatik sebesar 552 kPa. Untuk kesembilan jenis model ini tekanan hidrostatiknya akan menurun seiring dengan kenaikan titik yang ditinjau yaitu sebesar 8 kPa setiap kenaikan satu meter dari dasar tangki tadi. Beban akibat hidrostatik ini merupakan beban terbesar yang ditanggung oleh struktur tangki.

Beban yang kedua adalah beban akibat gempa yang selanjutnya akan saya sebut sebagai beban hidrodinamik. Menurut ACI 350.3-01 yang mengatur mengenai beban pada tangki akibat gempa, beban hidrodinamik dapat terdiri dari beberapa jenis yang dapat dijumlahkan dengan metode SRSS. Jenis beban hidrodinamik tersebut adalah beban inerti wall, beban gempa impulsif, beban gempa *convectif*, dan beban gempa akibat gempa vertikal. Sesuai dengan yang telah disinggung diatas, keempat beban ini bisa dijumlahkan namun tidak secara linier melainkan dengan mengakarkan jumlah dari kuadrat beban beban tersebut.

Berbeda dengan beban hidrostatik yang hanya ditentukan dari jenis fluida dan ketinggian fluida yang membebaninya, besar beban hidrodinamik ditentukan juga oleh beberapa hal, diantaranya adalah letak wilayah gempa dari lokasi tangki, konfigurasi perbandingan diameter dan tinggi tangki, kondisi tanah, bentuk perletakan dll. Artinya besar beban hidrodinamik tidak akan sama untuk tangki yang memiliki ukuran sama (diameter maupun ketinggian). (refer to analisa perbandingan beban gempa)

Untuk itu akan dibahas seberapa besar perbandingan antara beban hidrostatik dan hidrodinamik. Karena jika perbandingan antara beban hidrodinamik dan beban hidrostatik lebih besar dari 30 % , maka dianggap beban dinamik tersebut cukup signifikan memberikan pengaruh pada tangki.

Tabel 4.4. Tabel Perbandingan Gaya Hidrodinamik dan Gaya Hidrostatik

Model	wilayah gempa	beban dinamik	Gaya hydrostatis	Presentase
Model1	3	19.850	120	16.54166667
Model2	6	39.700	120	33.08333333
Model3	1	3.970	120	3.308333333
Model4	3	36.400	272	13.38235294
Model5	1	7.279	272	2.676102941
Model6	6	72.790	272	26.76102941
Model7	6	131.900	552	23.89492754
Model8	3	65.950	552	11.94746377
Model9	1	13.190	552	2.389492754

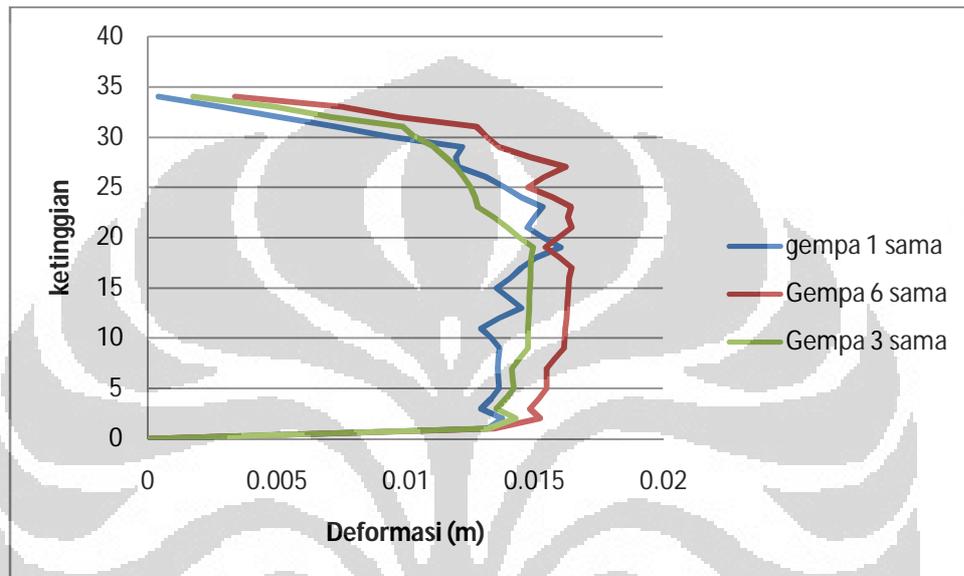
Jika dilihat untuk nilai beban dinamik pada tangki yang berada pada wilayah gempa yang sama, semakin tinggi desain suatu tangki maka beban dinamiknya semakin membesar. Sebagai contoh jika kita membandingkan model 1 (melebar), model 4 (sama), model 8 (meninggi) pada wilayah gempa yang sama (wilayah gempa 3). Model 1 mengalami beban dinamik yang terkecil yaitu 19.850 kPa disusul model 4 sebesar 36.4 kPa dan yang terbesar adalah model 8 sebesar 65,950 kPa. Nilai nilai ini berbanding terbalik dengan tekanan maksimum yang terjadi pada dinding akibat gempa. Pada tekanan maksimum, nilai tekanan yang terbesar justru timbul pada tangki yang melebar. Hal ini terjadi karena pada perhitungan tekanan maksimum hanya memperhitungkan tekanan gempa yang terjadi untuk arah horizontalnya saja. Sedangkan pada perhitungan beban dinamik (hidrodinamik) sudah dihitung seluruh beban yang akan ditimbulkan oleh gempa termasuk pengaruh gempa vertikal. Karena beban gempa vertikal merupakan fungsi dari beban hidrostatik, ketika semakin tinggi tangki dibuat maka semakin tinggi fluida yang menyebabkan tekanan hidrostatik sehingga efek gempa vertical juga semakin besar.

Namun kecenderungan sebaliknya justru ditunjukkan oleh presentase perbandingan antara beban hidrodinamik dan hidrostatik. Semakin tinggi desain suatu tangki pada volume yang sama justru terjadi penurunan nilai presentase. Contohnya jika meninjau beban gempa wilayah 6. Model 2 menghasilkan 33,083% kemudian mengecil pada model 6 yaitu 26,761 % dan yang terkecil untuk model 7 yaitu 23,894 %. Ini menggambarkan bahwa meskipun beban hidrodinamik meningkat ketika desain tangki semakin tinggi,

pengaruhnya semakin tidak signifikan jika dibandingkan dengan beban hidrostatiknya.

#### 4.6.5 Analisa Perbandingan Deformasi.

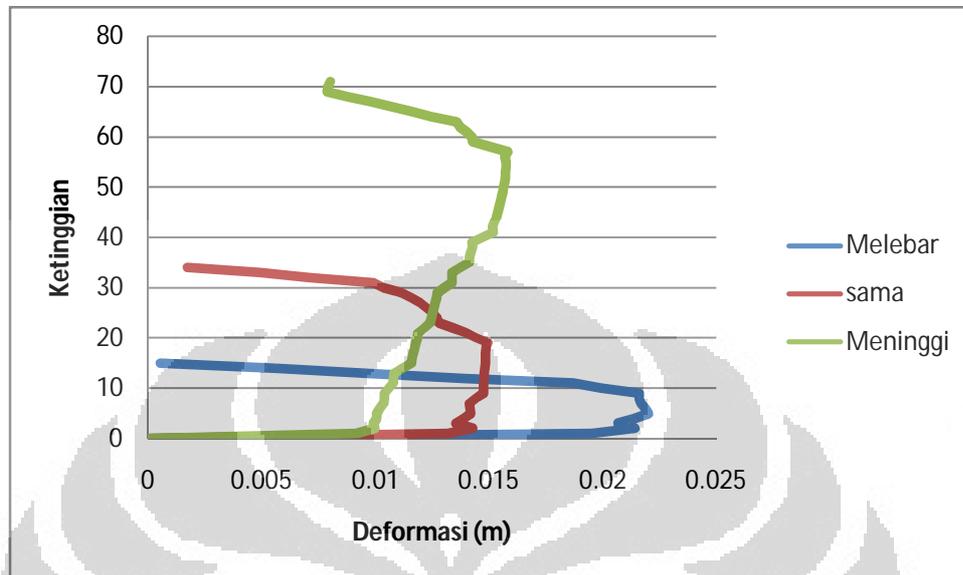
Selanjutnya yang akan dibandingkan adalah deformasi atau perubahan bentuk dari tangki. Besarnya deformasi sangat dipengaruhi oleh tegangan yang dialami oleh elemen tersebut.



Gambar 4.18. Grafik Perbandingan Deformasi Yang Terjadi Pada Model Sama

Grafik diatas merupakan grafik antara ketinggian dan besarnya deformasi yang dialami oleh elemen pada arah gempa maksimum. Pada grafik ini digambarkan perbandingan deformasi pada jenis tangki yang sama, namun mengalami beban gempa yang berbeda. Tidak terlihat bahwa adanya kecenderungan naiknya nilai deformasi ketika beban gempa meningkat dari wilayah gempa 1 hingga wilayah gempa 6 maupun sebaliknya. Ini terjadi karena seperti yang disebutkan diatas, bahwa yang mempengaruhi besarnya deformasi adalah besarnya tegangan yang dialami oleh pelat. Pada dasarnya naiknya beban gempa memang berpotensi untuk memperbesar nilai tegangan, namun adanya proses optimasi pada saat perancangan membuat ketebalan pelat dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki nilai tegangan yang sama. Sebagai contoh, apabila tegangan yang dialami oleh pelat dinding terlalu kecil maka dilakukan optimasi berupa penipisan ketebalan pelat sehingga dapat mendekati nilai tegangan ijinnya. Artinya dapat disimpulkan bahwa, naiknya besaran beban

gempa rencana tidak mempengaruhi besarnya deformasi yang dialami oleh dinding tangki. Penjelasan ini juga dapat berlaku pada grafik dibawah ini

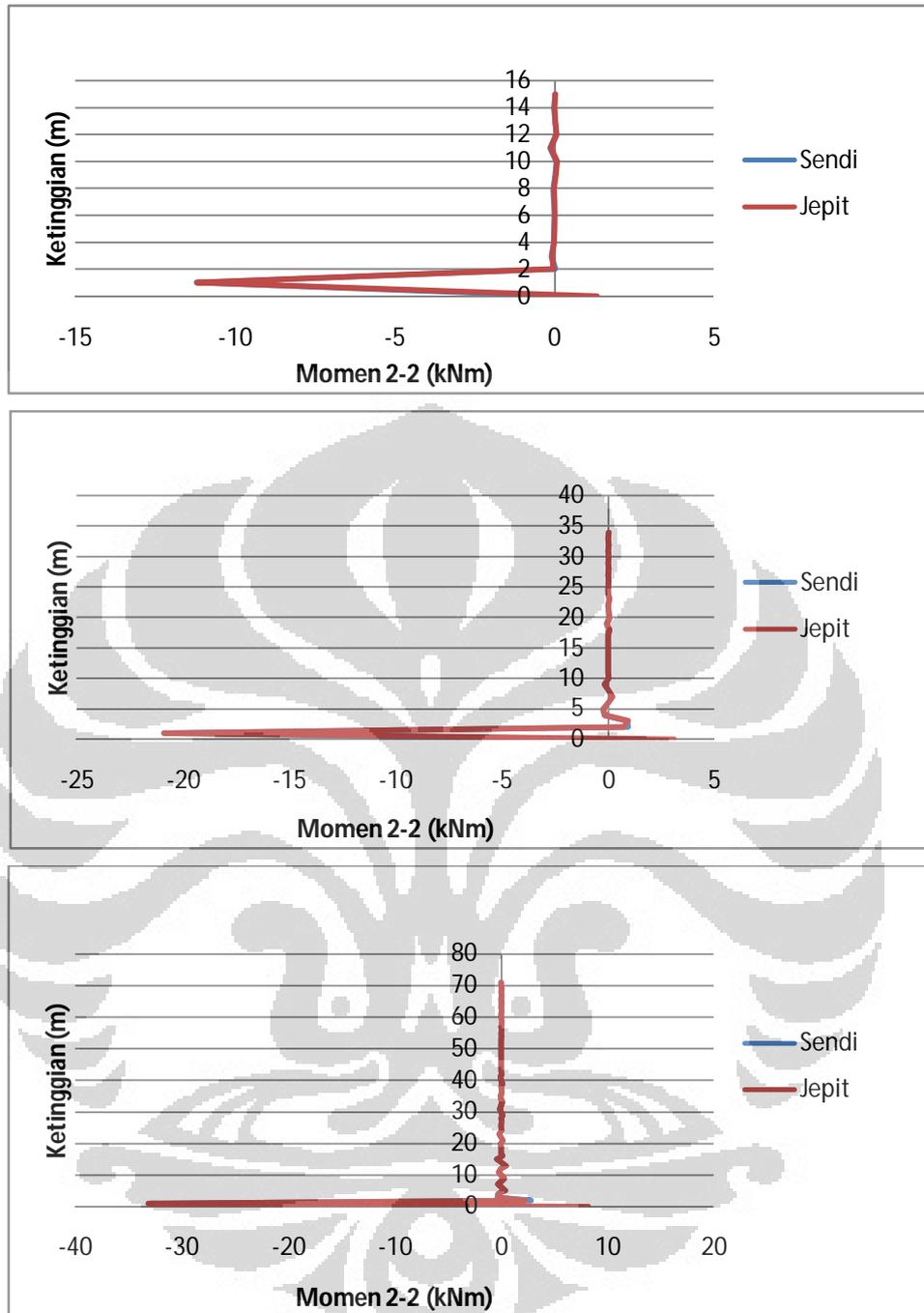


Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Deformasi Semua Model Pada Wilayah Gempa 3

Grafik diatas merupakan grafik antara deformasi dan ketinggian namun yang dibandingkan disini adalah perbedaan bentuk (jenis) tangki yaitu melebar, sama dan meninggi. Sama seperti grafik sebelumnya, pada grafik ini juga tidak terlihat adanya kecenderungan besarnya deformasi jika dibandingkan dengan perbandingan antara diameter dan tinggi tangki. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perbandingan diameter dan tinggi suatu tangki tidak mempengaruhi besarnya deformasi yang terjadi pada pelat dinding tangki.

#### 4.6.6 Analisa Perbandingan Perletakan Jepit dan Sendi

Pada dasarnya pada perancangan tangki ini ada beberapa tipe perletakan yang dapat diterapkan. Hal ini menyangkut bagaimana kita mengasumsikan kinerja pelat pada bagian bawah tangki. Ketika pelat dasar terluar tangki properti kekakuannya tidak diubah maka dapat diasumsikan perilaku struktur mendekati jepit. Namun ketika pelat dasar terluar pada tangki kita modifikasi yaitu kekauannya di kecilkan hingga mendekati nilai nol, maka perilaku yang terjadi adalah momen pada perletakan tidak tertahan dan menggambarkan perilaku mendekati sendi.

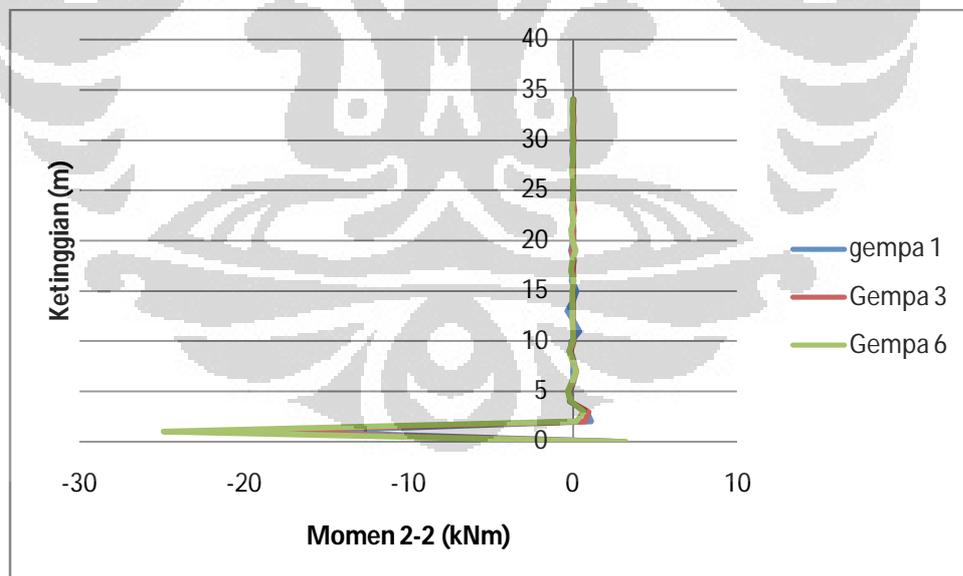


Gambar 4.20. Grafik Gaya Dalam Momen 2-2 Untuk Dua Jenis Perletakan

Grafik diatas merupakan grafik antara Momen pada arah 2-2 dan ketinggian. Ketiga grafik diatas menggambarkan gaya dalam momen 2-2 pada tangki yang didesain meninggi, sama dan melebar. Pada setiap grafik, digambarkan perbandingan ketika tangki tersebut menggunakan perletakan sendi dan terjepit.

Perilaku sendi dan jepit sudah tergambarkan dari grafik grafik diatas. Ketika menggunakan perletakan sendi maka nilai momen pada titik dasaar mendekati nilai nol. Begitu pula sebaliknya, jika perletakan diasumsikan jepit maka terdapat momen pada dasar tangki. Dari sini dapat dilihat perbedaan keduanya. Namun perbedaan ini hanya jelas terlihat pada dasar tangki. Pada ketinggian satu meter hingga puncak dapat terlihat bahwa grafik keduanya berhimpit. Artinya, ketika menggunakan perletakan jepit maupun sendi tidak banyak mempengaruhi gaya dalam momen 2-2 kecuali pada dasar tangki.

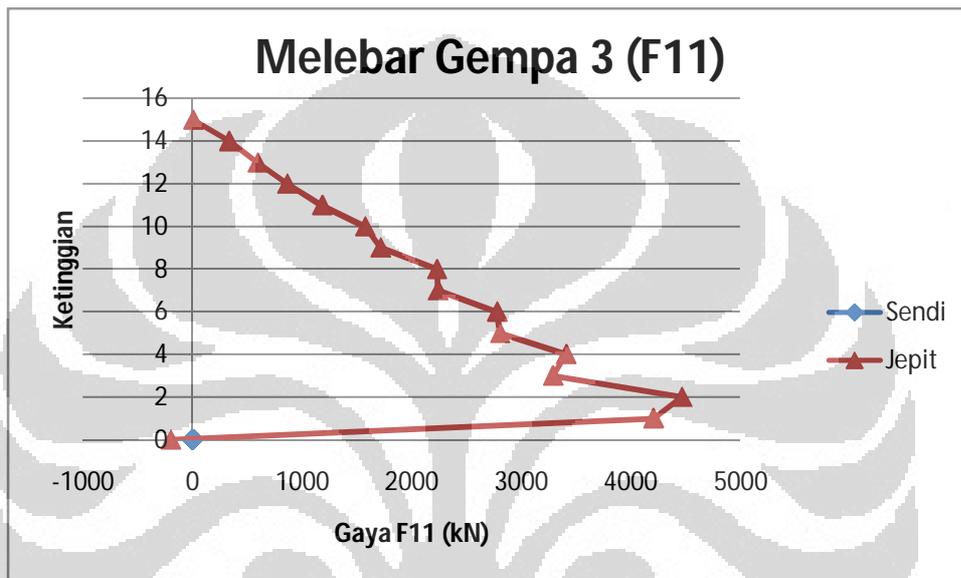
Kemudian jika kita fokuskan pada momen 2-2 yang terjadi pada dasar tangki, dapat dilihat ketika tangki dibangun semakin meninggi maka momen yang terjadi semakin besar nilainya. Contohnya pada tangki yang melebar pada zona gempu 3 memiliki nilai momen pada dasar sebesar 1,2729 kNm, sedangkan tangki yang didesain sama memiliki nilai momen sebesar 3,0294 kNm dan yang terbesar nilai momennya adalah yang didesain meninggi dengan nilai 8,1063 kNm. Hal ini disebabkan karena semakin meninggi maka semakin besar gaya yang terjadi, dan semakin meninggi maka semakin besar juga lengan momen gaya tersebut.



Gambar 4.21. Grafik Perbandingan Momen 2-2 Pada Semua Model Sama Dengan Dua Jenis Perletakan

Grafik diatas merupakan grafik gaya dalam momen 2-2 yang terjadi pada satu jenis tangki yaitu tangki sama namun pada wilayah gempu yang berbeda beda. Melanjutkan pembahasan diatas, jika kita membandingkan nilai Momen 2-2

yang terdapat pada grafik diatas, terlihat bahwa perbedaan wilayah gempa menghasilkan nilai momen pada dasar yang tidak jauh berbeda. Contohnya pada gempa 1 nilai momen yang terjadi adalah 2,9848 kNm, untuk gempa 3 adalah 3,0924 kNm dan untuk gempa 6 adalah 3,3258 kNm. Nilai nilai ini dapat dikategorikan berdekatan jika dibandingkan momen maksimum yang berada 1 meter diatasnya. Untuk gempa 1 nilai momen maksimumnya adalah 17,3439 kNm untuk gempa 3 adalah 20,9087 kNm dan gempa 6 adalah 24,0961 kNm.



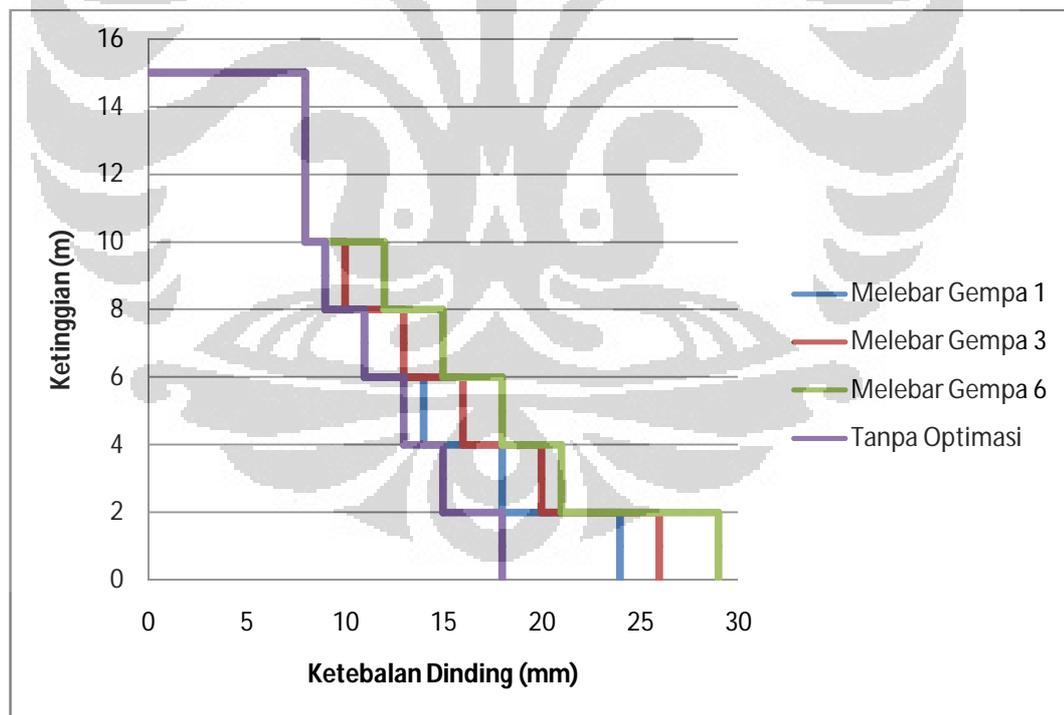
Gambar 4.22. Grafik Gaya Dalam Axial 1-1 (Gaya Cincin) Pada Model 1 dengan Dua Jenis Perletakan

Kemudian grafik diatas menggambarkan gaya dalam lain yang cukup dominan pada dinding tangki yaitu F11. Dapat dilihat bahwa grafik gaya dalam pada saat perletakan dianggap sendi dan jepit berhimpitan. Artinya, berbeda dengan momen 2-2 yang mengalami perbedaan yang cukup signifikan pada dasar tangki, besar momen F11 antara perletakan sendi dan jepit tidak jauh berbeda. Sehingga dapat disimpulkan nilai F1-1 tidak terlalu terpengaruh dengan jenis perletakan.

#### 4.6.7 Analisa Optimasi Ketebalan Pelat Dinding

Pada dasarnya ketebalan pelat dinding tangki minyak sudah diatur pada API 650 10th edition pasal 3.6.3.2 bahwa ketebalan pelat dinding adalah mengambil nilai yang lebih besar dari *hydrottest* atau cairan yang direncanakan untuk tangki tersebut. Namun jika kita lihat hasil atau output dari permodelan

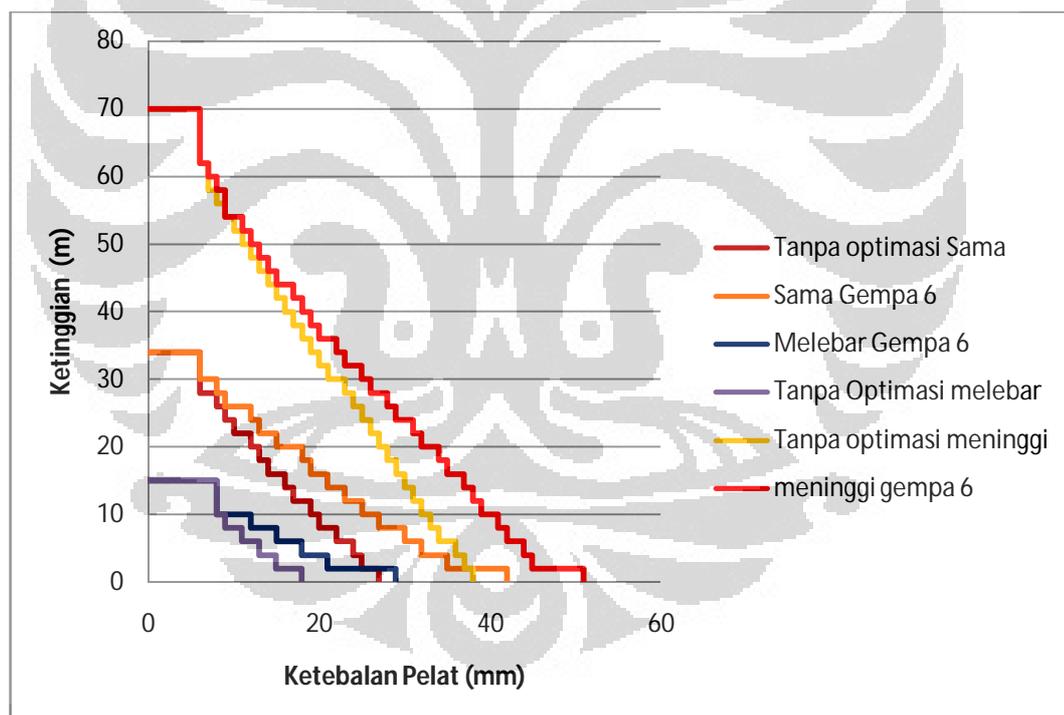
yang berupa stress dari penampang, dapat terlihat bahwa pelat mengalami tegangan yang melebihi tegangan ijinnya atau *overstress*. Sebagai pembandingan, tegangan ijin untuk pelat dinding sebuah tangki sudah disyaratkan oleh API 650 pada pasal 3.6.2.1 dimana tegangan maksimum yang boleh dialami oleh dinding tangki adalah  $\frac{2}{3}$  dari tegangan lelehnya atau  $\frac{2}{5}$  dari tegangan putusnya. Artinya jika kita memakai material A 573 M (70) yang memiliki tegangan leleh sebesar 290 Mpa, maka tegangan ijinnya adalah 193 Mpa. Sedangkan hasil output SAP 2000 menunjukkan nilai tegangan yang melebihi nilai ini pada ketinggian ketinggian tertentu terutama mendekati dasar. Didasari oleh tegangan ijin inilah maka ketebalan dinding tangki harus ditambah dalam rangka menurunkan nilai tegangan pada pelat. Tidak hanya itu, ketika tegangan yang terjadi ternyata terlalu jauh lebih kecil dari pada tegangan ijin maka ketebalan tangki yang tadi sudah dirancang dapat juga dikurangi tanpa melebihi batas minimum ketebalan dinding tangki.



Gambar 4.23. Grafik Ketebalan Pelat Sebelum dan Sesudah Optimasi

Grafik diatas merupakan grafik antara ketebalan dinding tangki dan ketinggian. Dari grafik ini dibandingkan antara ketebalan dinding sebelum dan sesudah optimasi untuk ketiga wilayah gempa pada jenis tangki yang sama. Dapat dilihat

bahwa, semakin meningkat tingkatan wilayah gempa maka semakin besar penambahan ketebalan yang diperlukan oleh dinding tangki. Contohnya untuk ketebalan pelat pada *first course* sebelum optimasi dilakukan ketebalannya adalah 18 mm. Sedangkan setelah dioptimasi, tangki pada gempa wilayah 1 membutuhkan ketebalan 24 mm, wilayah gempa 3 membutuhkan 26 mm dan yang terbesar wilayah 6 membutuhkan 29 mm. Ini disebabkan seiring dengan membesarnya wilayah gempa tangki maka semakin besar pula beban gempanya, sedangkan meningkatnya beban gempa jika tidak diimbangi dengan penebalan dinding tangki akan menyebabkan stress yang besar. Oleh karena itu penebalan dinding yang diperlukan tangki pada wilayah gempa yang lebih tinggi lebih besar dibanding wilayah gempa lain. Kemudian jika kita bandingkan pada wilayah gempa yang sama namun pada berbagai jenis tangki, tangki yang membutuhkan optimasi paling banyak adalah tangki yang meninggi.



Gambar 4.24. Ketebalan Pelat Semua Jenis Model Pada Wilayah Gempa 6

Sebagai contoh pada dasar tangki, tangki yang melebar membutuhkan penambahan ketebalan sebanyak 11 mm, untuk tangki sama membutuhkan 12 mm dan yang terbesar adalah tangki meninggi yang membutuhkan penambahan ketebalan sebanyak 13 mm. Dari sini dapat terlihat bahwa semakin meninggi

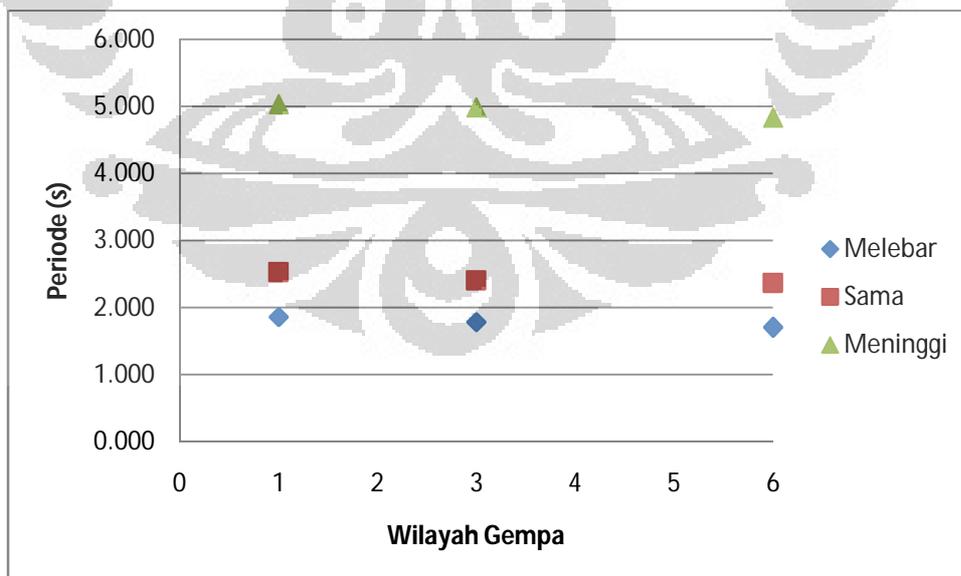
desain tangki maka optimasi yang dilakukan, dalam hal ini penambahan ketebalan pelat baja, semakin besar.

#### 4.6.8 Analisa Properti Dinamik Tangki

Seperti halnya struktur lain, tangki juga memiliki properti dinamik. Salah satu properti dinamik yang paling utama adalah periode getar alami dari struktur. Pada tangki, properti dinamik yang berupa periode dapat diambil dari nilai  $T_i$  pada perhitungan beban gempa *Impulsif*. Nilai  $T_i$  merupakan nilai periode getar alami wall bersama dengan sebagian air yang ada didalamnya. Ini terjadi ketika gempa dialami oleh tangki, ada sebagian cairan yang terguncang dan sebagian lagi ikut bergerak bersama dinding tangki.

Tabel 4.5. Tabel Nilai Periode Impulsif Tangki

Model	Periode bangunan	wilayah gempa
Model1	1.777	3
Model2	1.699	6
Model3	1.857	1
Model4	2.402	3
Model5	2.524	1
Model6	2.360	6
Model7	4.830	6
Model8	4.983	3
Model9	5.024	1



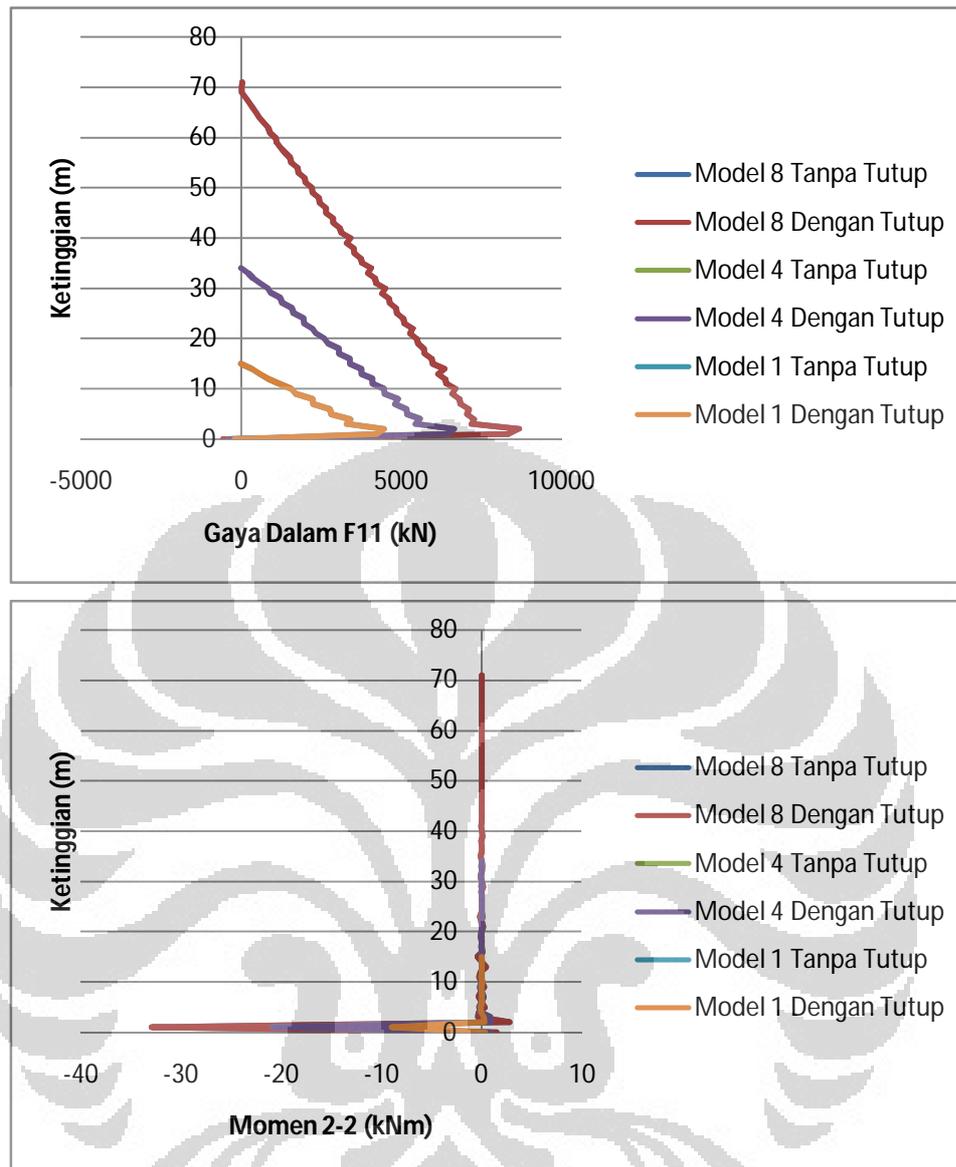
Gambar 4.25. Grafik Plot Periode Semua Model Tangki

Tabel dan grafik sebaran diatas merupakan nilai  $T_i$  untuk ketiga jenis tangki. Karena periode merupakan perilaku dinamik yang berasal dari struktur itu sendiri, maka perbedaan wilayah gempa tidak membedakan terlalu jauh nilai  $T_i$  untuk tangki dengan perbandingan diameter dan tinggi yang sama. Namun, karena rata-rata ketebalan dari setiap tangki jenis yang sama sedikit berbeda maka terdapat sedikit perbedaan nilai  $T_i$ . Dapat dilihat bahwa nilai  $T_i$  terbesar terdapat pada tangki yang didesain melebar disusul oleh tangki sama kemudian yang meninggi. Artinya tangki yang didesain melebar memiliki karakter yang lebih kaku jika dibandingkan dengan yang lainnya. Sehingga wajar jika tangki yang melebar mendapatkan beban gempa yang terbesar jika dibandingkan dengan yang lainnya. Karena semakin kaku suatu struktur maka semakin besar gaya gempa yang di serap oleh struktur tersebut.

#### 4.6.9 Analisa Pengaruh Tutup Pada Tangki

Struktur atap pada tangki minyak pelat baja berfungsi agar cairan yang ada di dalam tangki tidak tercampur dengan kontaminan dari luar seperti air hujan, debu, atau kotoran lainnya.

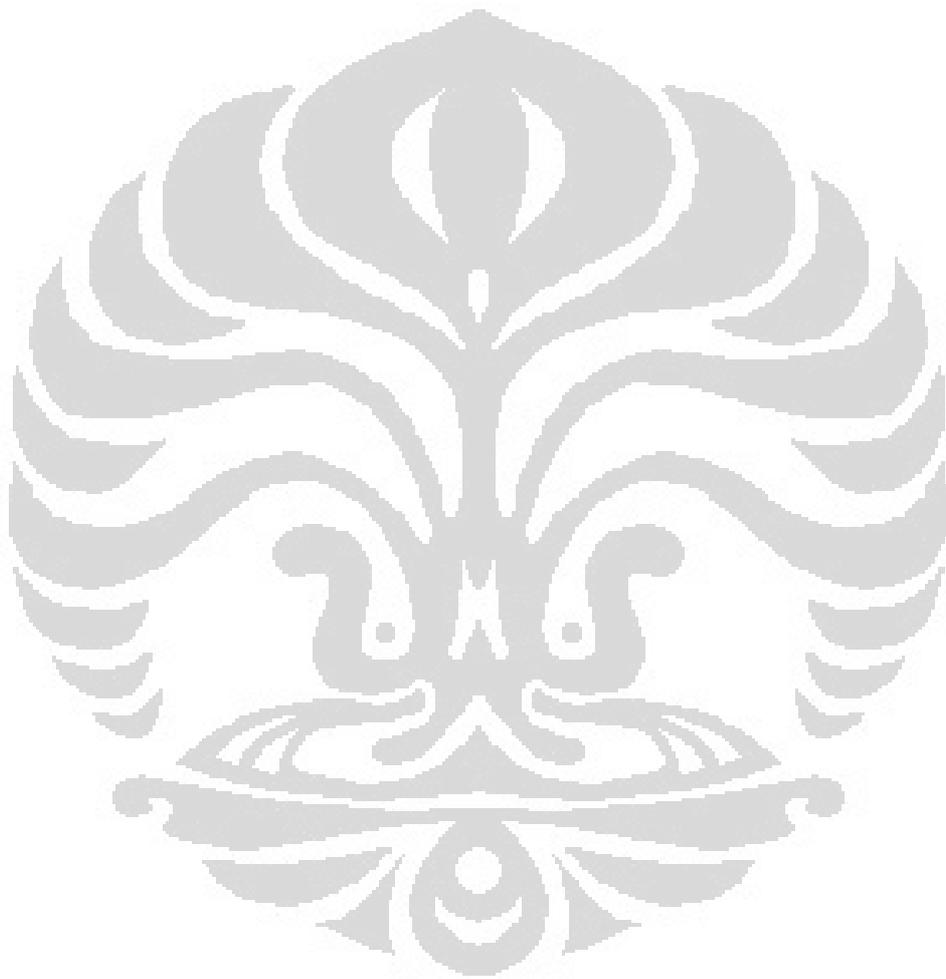
Pada penelitian ini, jenis struktur atap yang digunakan adalah tipe *fixed cone roof with support*. Walaupun struktur atap ini di dukung oleh beberapa kolom, tidak dapat dipungkiri bahwa pada bagian terluarnya, struktur atap ini bertumpu pada pelat dinding melalui *top angle*. Oleh karena itu, akan dibahas disini seberapa besar pengaruh dari struktur atap pada gaya dalam pelat dinding tangki. panjang



Gambar 4.26. Grafik Gaya Dalam Dengan Kondisi Tertutup dan Tanpa Tutup

Dua grafik diatas merupakan grafik gaya dalam F11 dan M22 terhadap ketinggian pada pelat dinding tangki. Pada grafik disajikan perbandingan gaya dalam pada 3 jenis model tangki pada wilayah gempa yang sama dan masing-masing dimodelkan dengan dan tanpa tutup. Dapat dilihat dari grafik, bahwa model yang menggunakan tutup dan yang tidak berperilaku mirip, artinya gaya dalam yang timbul tidak jauh berbeda. Jika kita lihat dari data yang lebih detail, rata-rata selisih dari gaya dalam F11 pada seluruh model pada grafik diatas hanya 0,02262, bahkan rata-rata selisih gaya dalam momen M22 hingga 5 angka dibelakang koma yaitu 0,0000266. Ini dikarenakan hampir seluruh beban yang

ada pada atap dialirkan ke kolom-kolom penunjang yang ada di bagian tengah tangki.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

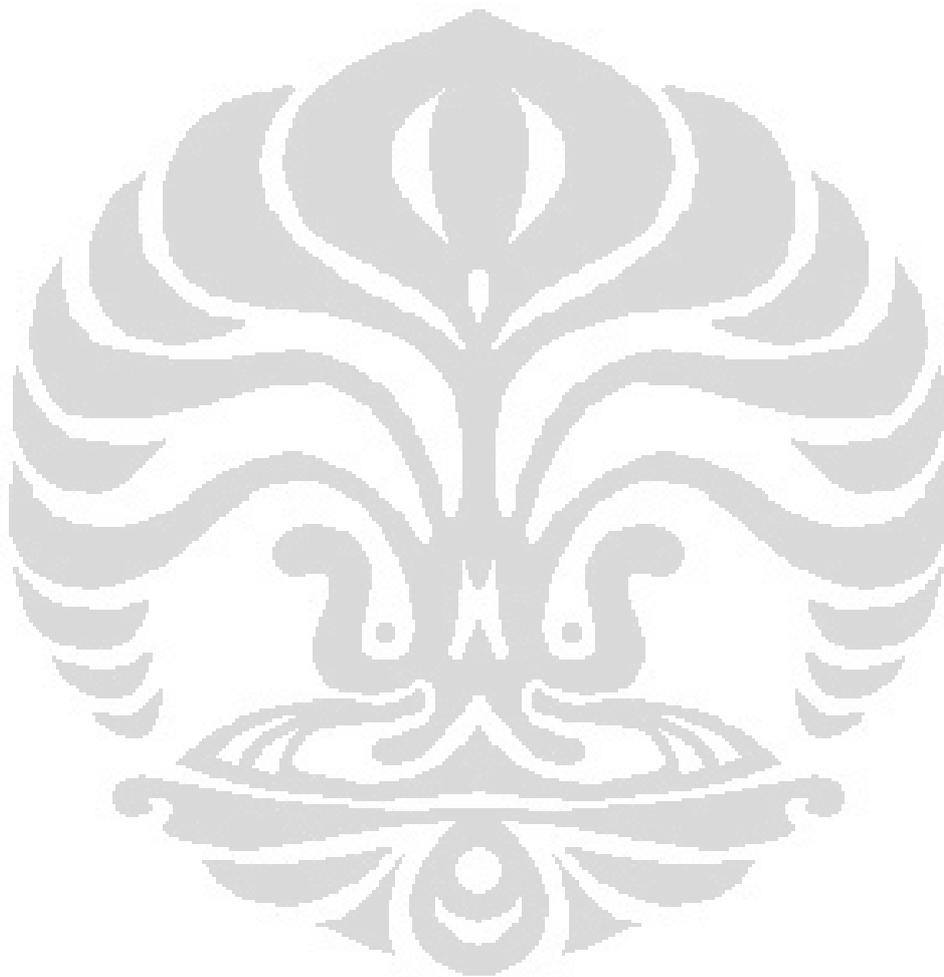
Dari penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal yang pada kemudian hari dapat digunakan sebagai pengetahuan atau landasan penelitian selanjutnya

- Semakin meninggi desain sebuah tangki minyak pelat baja pada volume yang sama maka semakin banyak material pelat baja yang dibutuhkan
- Semakin meninggi tingkat wilayah gempa sebuah tangki minyak pelat baja maka semakin banyak material pelat baja yang dibutuhkan
- Semakin meninggi desain tangki minyak pelat baja pada volume yang sama maka semakin lentur sehingga periodenya semakin besar
- Semakin meninggi desain tangki minyak pelat baja maka semakin besar beban dinamik total yang bekerja
- Beban gempa yang dominan pada tangki adalah beban gempa vertikal.
- Semakin meninggi desain sebuah tangki maka semakin tidak signifikan besar beban dinamikanya jika dibandingkan dengan beban hydrostatisnya.
- Deformasi yang terjadi pada tangki minyak pelat baja tidak dipengaruhi oleh seberapa besar perbandingan diameter dan tingginya atau letak wilayah gempanya, ini disebabkan adanya proses optimasi pada desain tangki sehingga tegangan pada pelat tangki dapat disesuaikan
- Pengaruh atap sangat kecil sekali terhadap perilaku dinding tangki.

#### 5.2. Saran

- Desain tangki melebar merupakan desain tangki yang paling efisien dari segi hal yang ditinjau dalam penelitian ini, namun karena pada penelitian ini belum memperhitungkan hal lain seperti metode konstruksi, perilaku tanah, dll maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memastikan hal ini sehingga didapat kesimpulan yang lebih menyeluruh.
- Hati-hati dalam penggunaan *one foot methode* dalam menentukan ketebalan dinding pelat baja karena dari proses optimasi yang dilakukan pada penelitian ini didapatkan bahwa ketebalan berdasarkan *one foot methode*

tidak ada yang memenuhi ketentuan ketebalan berdasarkan tegangan ijin yang terjadi pada pelat tersebut bahkan untuk peta wilayah gempa terkecil.



### Daftar Referensi

- ACI Comitte 350. (2001). *ACI 350.3-01 Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary*. American Concrete Institute
- API Standard 650. (2002). *Welded Steel Tank For Oil Storage 10th Edition*. American Petroleum Institute, Washington, D.C
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). Standar Nasional Indonesia : SNI 03-1726-2002
- Chopra, Anil K. (1995). *Dynamics of Structures*. New Jersey : Prentice-Hall.
- Hamdan, F.H. (2000). *Seismic Behavior of Cylindrical Steel Liquid Storage Tank*
- Hibbeler. (1997). *Mechanics of Materials*. New Jersey : Prentice-Hall
- Housner, G., & Haroun, M. (1980). *Dynamic Analysis of Liquid Storage Tanks*. Pasadena, California : Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology.
- Lay, Khai Seong. (1993). *Seismic Couple Modeling of Axisymmetric Tanks Containing Liquid*
- Ofner, R., & Greiner, R. (2003). *Large Cylindrical Shell Flat-Bottom Storage Tanks – Design Calculations for Seismic Effects*. Graz University of Technology
- S. P. Timoshenko dan S. Woinowsky-Krieger. (1959). *Theory of Plates and Shell, 2d ed.* New York : McGraw-Hill Book Company.

## Lampiran

### Contoh Perhitungan Beban Gempa Model 7

#### Parameter gempa

$Z := 0.3$   
percepatan gempa horizontal zona 2A (setara wilayah III Jakarta)

Faktor reduksi gempa impulsif  $R_{wi} := 2.75$

Faktor reduksi gempa konvektif  $R_{wc} := 1$

Faktor keutamaan  $I := 1.25$

Profile tanah lunak kategori C  $S_{m} := 1.5$

#### Parameter Tangki Beton

Rasio tinggi : diameter  $\text{rasio} := \frac{1}{3}$

ketinggian tangki  $H_w := 69\text{m}$

diameter  $D := 22.9184\text{m}$

jari - jari  $R := \frac{D}{2} = 11.459\text{m}$

keliling :=  $\pi \cdot D = 72\text{m}$

berat jenis air  $\gamma_L := 8000 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$

Ketinggian cairan  $H_L := \text{floor}\left(\frac{H_w}{m}\right) \cdot m = 69\text{m}$

Volume tangki  $V_L := \pi \cdot R^2 \cdot H_L = 2.846 \times 10^4 \cdot \text{m}^3$

Berat cairan  $W_L := V_L \cdot \gamma_L = 2.277 \times 10^8 \text{N}$

tebal dinding  $t_w := 2.4\text{cm}$

#### mutu beton

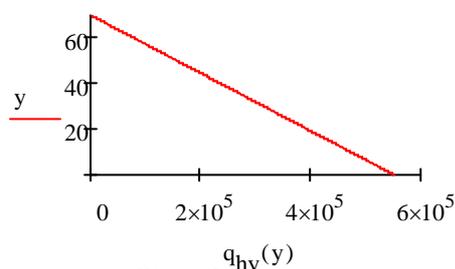
berat jenis beton  $\rho_s := 76.9729 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

berat dinding  $W_w := 10338.175\text{kN}$

modulus elastisitas baja  $E_s := 200000\text{MPa}$

tekan hidrostatik pada  $y := 0\text{m}, 0.1\text{m}.. H_L$   $q_{hy}(y) := \gamma_L \cdot (H_L - y)$   $q_{hy}(0\text{m}) = 5.52 \times 10^5 \text{Pa}$

#### Tekanan Hidrostatik



$$h_w := \frac{H_w}{2} = 34.5\text{m}$$

## Perhitungan

### height to centers of gravity Excluding Base Pressure (EBP)

$$h_i := \begin{cases} 0.375 H_L & \text{if } \frac{D}{H_L} \geq 1.333 \\ \left[ \left( 0.5 - 0.09375 \frac{D}{H_L} \right) \cdot H_L \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad h_i = 32.35 \text{ m}$$

$$h_c := \left( 1 - \frac{\cosh \left( 3.68 \frac{H_L}{D} \right) - 1}{3.68 \frac{H_L}{D} \sinh \left( 3.68 \frac{H_L}{D} \right)} \right) H_L \quad h_c = 62.772 \text{ m}$$

### height to centers of gravity Including Base Pressure (IBP)

$$h'_i := \begin{cases} \frac{0.866 \left( \frac{D}{H_L} \right)}{2 \tanh \left[ 0.866 \left( \frac{D}{H_L} \right) \right]} - \frac{1}{8} \cdot H_L & \text{if } \frac{D}{H_L} \geq 0.75 \\ 0.45 H_L & \text{otherwise} \end{cases} \quad h'_i = 31.05 \text{ m}$$

$$h'_c := \left( 1 - \frac{\cosh \left( 3.68 \frac{H_L}{D} \right) - 2.01}{3.68 \frac{H_L}{D} \sinh \left( 3.68 \frac{H_L}{D} \right)} \right) H_L \quad h'_c = 62.773 \text{ m}$$

### equivalent masses of accelerating liquid

$$W_i := \frac{\tanh \left[ 0.866 \left( \frac{D}{H_L} \right) \right]}{0.866 \frac{D}{H_L}} \cdot W_L \quad W_i = 2.216 \times 10^8 \text{ N}$$

$$W_c := 0.23 \frac{D}{H_L} \tanh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right] \cdot W_L \quad W_c = 1.74 \times 10^7 \text{ N}$$

### Properti dinamik

#### koefisien massa efektif

$$\varepsilon_w := 0.0151 \left( \frac{D}{H_L} \right)^2 - 0.1908 \left( \frac{D}{H_L} \right) + 1.021$$

$$\varepsilon = 0.959$$

perhitungan  $C_w$

$$C_w := 0.12529$$

$$C_w = 0.123$$

$$C_I := C_w \cdot \sqrt{\frac{t_w}{10R}} = 1.784 \times 10^{-3}$$

**perhitungan  $T_i$** 

$$\omega_i := C_I \cdot \frac{1}{H_L} \sqrt{10^3 \cdot \frac{E_s}{\rho_s}} \cdot \frac{\sqrt{m}}{s} = 1.318 \frac{1}{s}$$

$$T_i := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_i} = 4.766s$$

**perhitungan  $T_c$** 

$$\lambda := \sqrt{3.68 \cdot g \cdot \tanh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)} = 6.007 \frac{m^{0.5}}{s}$$

$$\omega_c := \frac{\lambda}{\sqrt{D}} = 1.255 \frac{1}{s}$$

$$T_c := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_c} = 5.007s$$

**Sesuai ACI 350.3****Kondisi tanah lunak profil tanah C**

$$C_i := \begin{cases} \frac{2.75}{S} & \text{if } T_i \leq 0.31s \\ \frac{1.25}{\left(\frac{T_i}{1s}\right)^3} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_c := \begin{cases} \frac{6}{\left(\frac{T_c}{1s}\right)^2} & \text{if } T_c \geq 2.4s \\ \frac{1.875}{\left(\frac{T_c}{1s}\right)^3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{if}\left(C_c \leq \frac{2.75}{S}, 1, 0\right) = 1$$

$$C_i = 0.441$$

$$C_c = 0.239$$

**percepatan gempa vertikal**

$$T_v := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma_L \cdot D \cdot H_L^2}{2 \cdot g \cdot t_w \cdot E_s}} = 0.605s$$

$$C_v := \min\left[\frac{1.25}{\left(\frac{T_v}{1s}\right)^3}, \frac{2.75}{S}\right] = 1.747$$

$$b := \frac{2}{3}$$

$$u_v := Z \cdot S \cdot C_v \cdot I \cdot \frac{b}{R_{wi}} = 0.238$$

### Gaya lateral dinamik

$$P_i := Z \cdot S \cdot C_i \cdot I \cdot \frac{W_i}{R_{wi}} = 2.001 \times 10^7 \text{ N}$$

$$P_c := Z \cdot S \cdot C_c \cdot I \cdot \frac{W_c}{R_{wc}} = 2.342 \times 10^6 \text{ N}$$

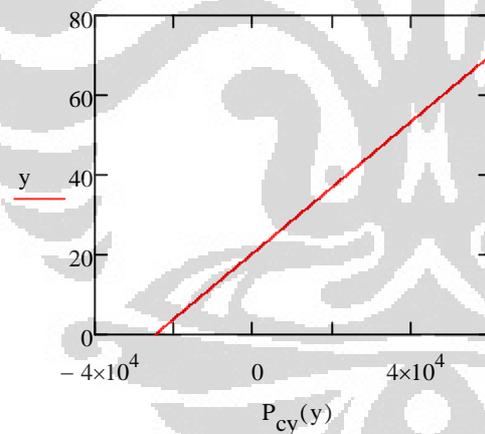
$$P_w := Z \cdot S \cdot C_1 \cdot I \cdot \frac{\varepsilon \cdot W_w}{R_{wi}} = 8.953 \times 10^5 \text{ N}$$

### Distribusi Gaya Vertikal (Pendekatan Linear)

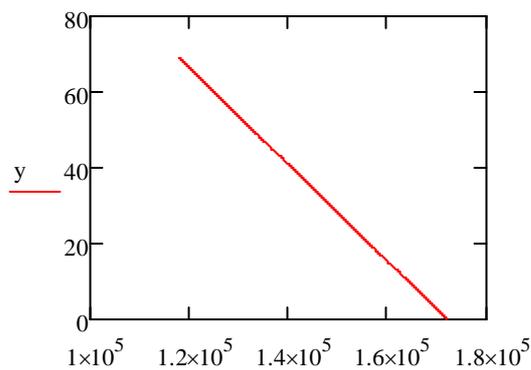
$$P_{wy} := \frac{P_w}{2H_w} = 6.488 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$y := 0 \text{ m}, 0.1 \text{ m} \dots H_L$$

$$P_{cy}(y) := \left( \frac{P_c}{2} \right) \frac{\left[ 4H_L - 6h_c - \left( 6H_L - 12h_c \right) \frac{y}{H_L} \right]}{H_L^2}$$



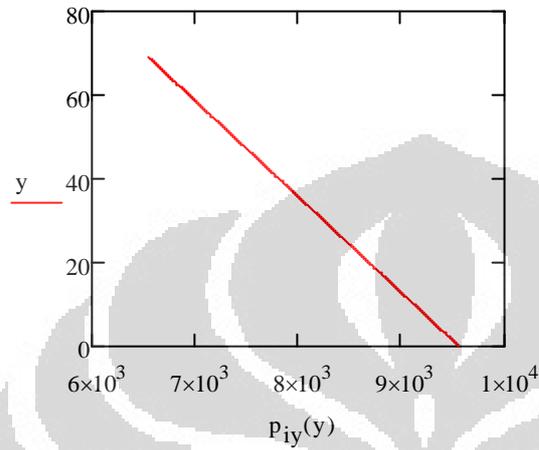
$$P_{iy}(y) := \left( \frac{P_i}{2} \right) \frac{\left[ 4H_L - 6h_i - \left( 6H_L - 12h_i \right) \frac{y}{H_L} \right]}{H_L^2}$$



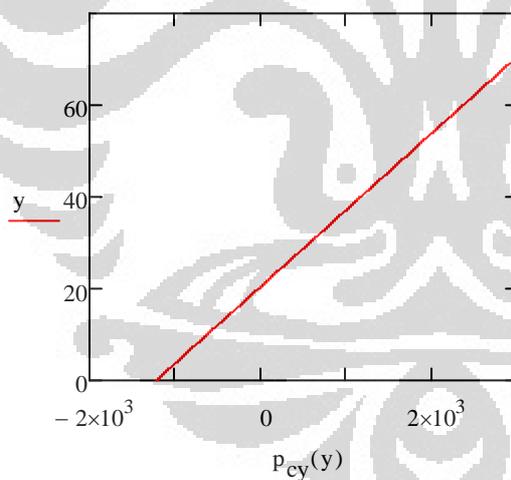
### Horizontal distribution of the dynamic pressure across the tank diameter D

$$P_{wy} := \frac{P_{wy}}{\pi R} = 180.21 \text{ Pa}$$

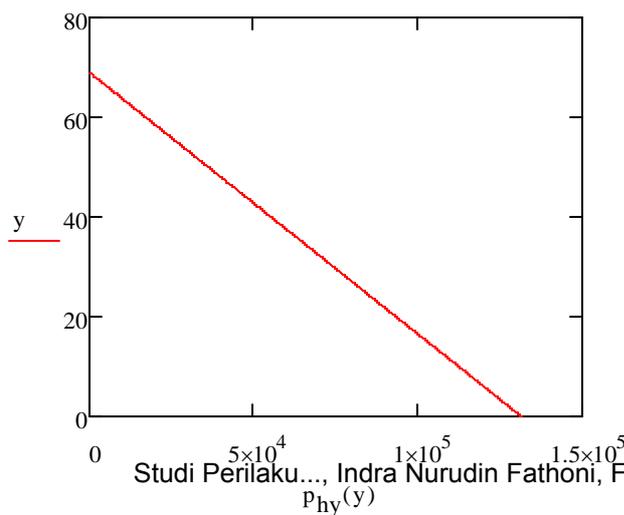
$$P_{iy}(y) := \frac{2P_{iy}(y)}{\pi R}$$



$$P_{cy}(y) := \frac{16P_{cy}(y)}{9\pi R}$$

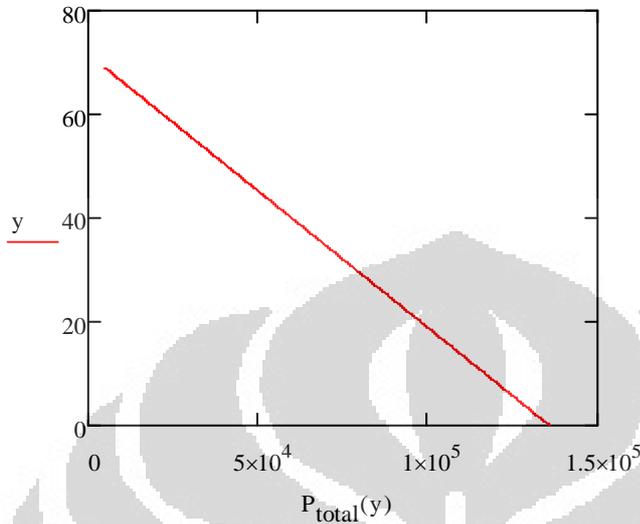


$$P_{hy}(y) := u_v \cdot q_{hy}(y)$$



**Total Pressure setengah dinding pada  $\theta=0$**

$$P_{total}(y) := p_{wy} + \frac{1}{2} p_{iy}(y) + \frac{1}{2} p_{cy}(y) + p_{hy}(y)$$



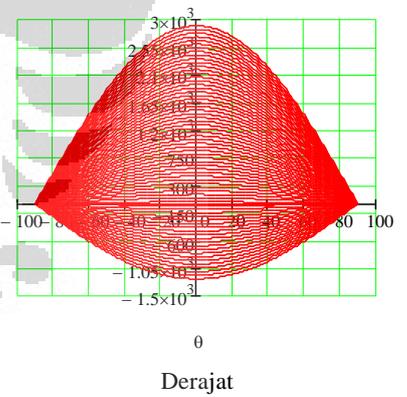
**Pressure berdasarkan fungsi ketinggian dan arah tekanan**

$$\theta := -90..90$$

$$y := 0\text{ m}, 1\text{ m}.. H_L$$

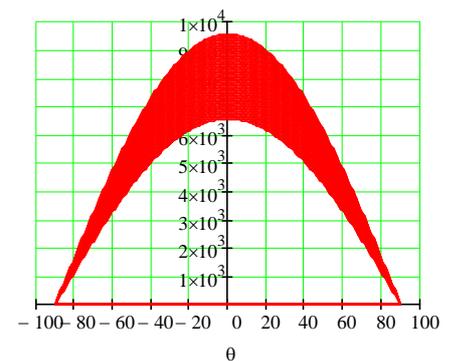
$$p_{cy}(y, \theta) := p_{cy}(y) \cos(\theta \cdot \text{deg})$$

Pa  $p_{cy}(y, \theta)$



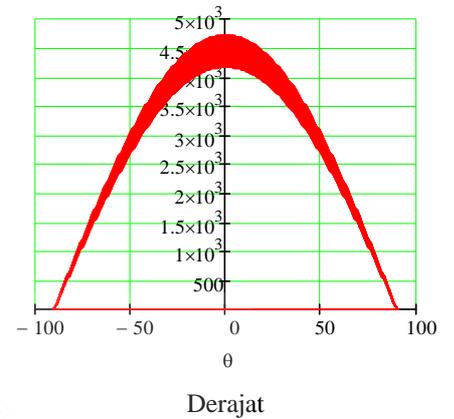
$$p_{iy}(y, \theta) := p_{iy}(y) \cos(\theta \cdot \text{deg})$$

Pa  $p_{iy}(y, \theta)$



$$P_{halfwall}(y, \theta) := \left( \frac{1}{2} p_{cy}(y, \theta) + \frac{1}{2} p_{iy}(y, \theta) \right)$$

Pa P<sub>halfwal</sub>(y, θ)



distribusi gaya hidrodinamik per elemen

$h_t := 1 \cdot m$

sudut arah gaya hidrodinamik per elemen

$$\text{sudut} := \frac{90.4}{\text{Floor}\left(\frac{\text{keliling}}{m}, 2\right)} = 5$$

$\alpha := 0, \text{sudut} \dots 90$

P<sub>halfwal</sub>(1m, α)

P <sub>halfwal</sub> (1m, α) · kPa
4.177
4.161
4.113
4.035
3.925
3.786
3.617
3.421
3.2
2.953
2.685
2.396
2.088
1.765
1.429
...

P<sub>halfwal</sub>(2m, α)

P <sub>halfwal</sub> (2m, α) · kPa
4.185
4.169
4.121
4.042
3.933
3.793
3.624
3.428
3.206
2.959
2.69
2.4
2.092
1.769
1.431
...

P<sub>halfwal</sub>(3m, α)

P <sub>halfwal</sub> (3m, α) · kPa
4.193
4.177
4.129
4.05
3.94
3.8
3.631
3.435
3.212
2.965
2.695
2.405
2.096
1.772
1.434
...

P<sub>halfwal</sub>(4m, α)

P <sub>halfwal</sub> (4m, α) · kPa
4.201
4.185
4.137
4.058
3.948
3.807
3.638
3.441
3.218
2.971
2.7
2.41
2.101
1.775
1.437
...

**Moment at base****EBP(Exclude Base Pressure)**

$$M_w := P_w \cdot h_w = 3.089 \times 10^7 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_i := P_i \cdot h_i = 6.473 \times 10^8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_c := P_c \cdot h_c = 1.47 \times 10^8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_b := \sqrt{(M_i + M_w)^2 + M_c^2} = 6.939 \times 10^8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

**IBP(Include Base Pressure)**

$$M'_i := P'_i \cdot h'_i = 6.213 \times 10^8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M'_c := P'_c \cdot h'_c = 1.47 \times 10^8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_o := \sqrt{(M'_i + M_w)^2 + M'_c^2} = 6.685 \times 10^8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

**Stresses**

$$N_{iy}(y) := p_{iy}(y) \cdot R$$

$$N_{cy}(y) := p_{cy}(y) \cdot R$$

$$Q_{hy}(y) := q_{hy}(y) \cdot R$$

$$N_{hy}(y) := u_v \cdot Q_{hy}(y)$$

$$N_{wy} := p_{wy} \cdot R = 2.065 \times 10^3 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

**Hydrodynamic membrane (hoop forces)**

$$p(y) := \sqrt{(p_{iy}(y) + p_{wy})^2 + p_{cy}(y)^2 + p_{hy}(y)^2}$$

$$\sigma(y) := \frac{N(y)}{t_w}$$

**Ketinggian sloshing maksimum**

$$A_c := 0.15 \quad T_c = 5.007\text{s}$$

$$d_{\max} := \frac{D}{2} (Z \cdot S \cdot I \cdot C_c) = 1.543\text{m}$$

**Keluaran Perhitungan**

Tegangan  $\sigma(y)$

Sloshing max  $d_{\max} = 1.543\text{m}$

$$p(0) = 1.319 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Cek Kebutuhan Angkur

$$M_t := W_L \cdot \frac{D}{2}$$

$$M_t = 2.609 \times 10^9 \text{ J}$$