

**1015/FT.01/SKRIP/06/2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PERILAKU TANGKI SILINDER BETON PRATEKAN  
DENGAN BERBAGAI MACAM PERLETAKAN**

**SKRIPSI**

**ERIC HARTONO  
0706163464**

**UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
DEPOK  
JUNI 2011**

**1015/FT.01/SKRIPT/06/2011**



**UNIVERSITY OF INDONESIA**

**BEHAVIOUR STUDY OF CYLINDRICAL PRESTRESSED  
CONCRETE STORAGE TANKS WITH VARIATION OF BASE  
SUPPORT**

**UNDERGRADUATE THESIS**

**ERIC HARTONO  
0706163464**

**UNIVERSITY OF INDONESIA  
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT  
ENGINEERING FACULTY  
DEPOK  
JUNE 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PERILAKU TANGKI SILINDER BETON PRATEKAN  
DENGAN BERBAGAI MACAM PERLETAKAN**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana  
Teknik**

**ERIC HARTONO  
0706163464**

**UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
DEPOK  
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**BEHAVIOUR STUDY OF CYLINDRICAL PRESTRESSED  
CONCRETE STORAGE TANKS WITH VARIATION OF BASE  
SUPPORT**

**UNDERGRADUATE THESIS**

**This undergraduate thesis is proposed to complete one of the requirement  
to achieve the title of Bachelor of Engineering**

**ERIC HARTONO  
0706163464**

**UNIVERSITY OF INDONESIA  
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT  
ENGINEERING FACULTY  
DEPOK  
JUNE 2011**

## **HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

Nama : Eric Hartono  
NPM : 0706163464  
Tanda Tangan :   
Tanggal : 23 Juni 2011

## **STATEMENT OF AUTHENTICITY**

**This undergraduate thesis is my own work and  
every sources both are cited and refered had I stated correctly**

Name	:	Eric Hartono
Student ID	:	0706163464
Signature	:	
Date	:	Juni 23 <sup>th</sup> , 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Eric Hartono  
NPM : 0706163464  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Skripsi : Studi Perilaku Tangki Silinder Beton  
Pratekan Dengan Berbagai Macam Perletakan

Telah berhasil dipertahankan 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

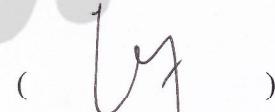
Pembimbing : Ir. Sjahril A. Rahim, M. Eng.



Penguji : Dr. -Ing Josia Irwan Rastandi, ST, MT



Penguji : Mulia Orintilize, ST, M. Eng.



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 23 Juni 2011

## **STATEMENT OF LEGITIMATION**

This final report submitted by:

Name : Eric Hartono  
NPM : 0706163464  
Study Program : Civil Engineering  
Title : Behaviour Study Of Cylindrical Prestressed Concrete Storage Tanks With Variation Of Base Support

**Has been successfully defended in front of the examiner and was accepted as part of the necessary requirement to obtain Engineer Bachelor Degree in Civil Engineering Program, Engineering Faculty, University of Indonesia.**

### **EXAMINERS**

Counselor : Ir. Sjahril A. Rahim, M. Eng.

Examiners : Dr. -Ing Josia Irwan Rastandi, ST., MT.

Examiners : Mulia Orintilize, ST, M. Eng.

Decided at : Depok

Date : June, 23<sup>th</sup> 2011

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana 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 skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ir. Sjahril A. Rahim, M. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan materi dan moral;
3. Indra Nurudin Fathoni, teman satu tema skripsi yang telah memberikan koreksi dan masukan terhadap perhitungan skripsi saya;
4. Teman-teman Mahasiswa Teknik Sipil angkatan 2007 yang sama-sama berjuang dan saling memberikan semangat dalam kuliah sampai pada pengerjaan skripsi ini;
5. Teman-teman Persekutuan Oikumene Fakultas Teknik UI yang terus mendukung dan mendoakan pengerjaan skripsi untuk mahasiswa tingkat akhir.

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

Depok, 23 Juni 2011

Penulis

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

---

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

Nama : Eric Hartono  
NPM : 0706163464  
Program Studi : Teknik Sipil  
Departemen : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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 :

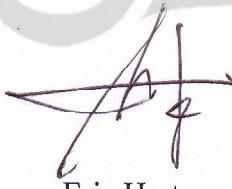
“Studi Perilaku Tangki Silinder Beton Pratekan Dengan Berbagai Macam Perletakan”

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari 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 : 23 Juni 2011

Yang menyatakan



A handwritten signature in black ink, appearing to read "Eric Hartono".

Eric Hartono

**PAGE STATEMENT OF FINAL APPROVAL  
FOR PUBLICATION OF ACADEMIC INTEREST**

---

As an academic community of Universitas Indonesia, I undersigned below:

Name : Eric Hartono  
Student Number : 0706163464  
Study Program : Civil Engineering  
Department : Civil Engineering  
Faculty : Faculty of Engineering Universitas Indonesia  
Type of Work : Undergraduate Thesis

for the sake of development of science, agreed to grant to the Universitas Indonesia Non-exclusive Royalty-Free Right of my scientific work, entitled:

“Behaviour Study Of Cylindrical Prestressed Concrete Storage Tanks With  
Variation Of Base Support”

along with existing devices (if necessary). With this non-exclusive royalty-free right University of Indonesia reserve the right to store, media transfer/formatting, managing in the form of a database, maintain, and publish my final project without asking permission from me as long as include my name as the author/creator of the copyright owner.

Thus, I properly made this statement.

Made in : Depok  
On : June 23<sup>th</sup>, 2011

Stated by



Eric Hartono

## **ABSTRAK**

Nama : Eric Hartono  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul : Studi Perilaku Tangki Silinder Beton Pratekan Dengan Berbagai Macam Perletakan

Tangki silinder beton prategang merupakan pilihan yang terbaik dalam desain tangki saat ini. Tekanan hidrostatik mengakibatkan terjadinya beban aksisimetris pada dinding sehingga desain klasik memerlukan analisis dengan teori cangkang silindris. Dari hasil penelitian dengan memperhitungkan tekanan hidrodinamik terhadap rasio tinggi dengan diameter tangki melalui permodelan dengan menggunakan SAP2000 disimpulkan bahwa rasio 1 : 4 merupakan rasio yang paling ekonomis. Hubungan dinding dan dasar dinding yang dapat bergerak bebas (*free sliding*) juga menunjukkan perilaku yang paling optimal dibandingkan perletakan lainnya untuk dimensi tangki yang besar. Disamping itu, penggunaan prategang arah melingkar dan vertikal memperkecil kemungkinan terjadinya retak akibat tegangan tarik saat tangki penuh maupun kosong.

Kata kunci :

beton prategang, cangkang, ekonomis, *free sliding*, hidrodinamik, hidrostatik, optimal, retak, silinder, tangki, tegangan tarik

## **ABSTRACT**

Name : Eric Hartono  
Study Program : Civil Engineering  
Title : Behaviour Study of Cylindrical Prestressed Concrete Storage Tanks with Variation of Base Support

Cylindrical Prestressed Concrete is the best choice of tank design these days. Hydrostatic pressure implies on axissymetrical loading on the tank wall that cylindrical shell analysis should be done for classical design. Considering the hydrodynamic pressure and using SAP2000, this research concludes that the most economical ratio height-diameter of tank is 1 : 4. Free sliding wall base also shows the most optimum behaviour among other base supports on large dimension. At the other side, circular and vertical prestressing decreases the probability of crack due to tension stress when the tank in full or empty condition.

Keyword :

Prestressed concrete, crack, cylindrical, economical, free sliding, hydrodynamic, hydrostatic, optimum, tank, shell, tension stress

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	v
UCAPAN TERIMA KASIH .....	vii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	viii
ABSTRAK .....	x
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiv
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xviii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Batasan Studi .....	2
1.3 Tujuan Studi .....	3
1.4 Hipotesa .....	3
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2 STUDI LITERATUR .....</b>	<b>5</b>
2.1 Beton Prategang.....	5
2.2 Tangki Lingkaran Beton Prategang.....	5
2.3 Lantai tangki.....	6
2.4 Pertemuan dinding tangki dan pelat dasar .....	7
2.5 Pembebanan.....	8
2.5.1 Beban internal .....	8
2.5.2 Teori Membran.....	11
2.5.3 Teori lentur.....	13
2.5.4 Persamaan gaya.....	15
2.5.5 Persamaan momen.....	15
2.5.6 Persamaan umum gaya-gaya dan peralihan.....	16
2.6 Efek Prategang Terhadap Tegangan Dinding untuk Dasar Berupa Jepit Penuh, Sendi Penuh, dan Bergerak Bebas .....	21
2.6.1 Dasar dinding yang dapat bergerak dengan bebas .....	21
2.6.2 Dasar dinding sendi .....	22
2.6.3 Dasar dinding jepit penuh .....	23
2.7 Syarat-syarat desain tangki bejana lingkaran beton prategang berdasarkan ACI 373-97 .....	25
2.7.1 Tegangan.....	25
2.7.2 Faktor beban dan kekuatan yang dibutuhkan.....	26
2.7.3 Persyaratan dinding minimum .....	26
2.7.4 Kontrol retak tangki.....	28
2.8 Desain pembebanan gempa berdasarkan ACI 350.3 .....	28
2.8.1 Tekanan gempa di atas dasar .....	29

2.8.2	Gaya lateral dinamik.....	29
2.8.3	Gaya geser dasar total.....	30
2.9	Distribusi beban gempa.....	31
2.9.1	Transfer Geser ( <i>Shear Transfer</i> ).....	32
2.9.2	Distribusi gaya dinamik di atas dasar.....	33
2.10	Tegangan akibat gempa .....	35
2.11	Osilasi Gempa .....	36
2.12	Permodelan dinamik .....	37
2.12.1	Massa ekivalen pada cairan yang terakselerasi.....	39
2.12.2	Tinggi ke pusat gravitasi, tidak termasuk tekanan dasar .....	39
2.12.3	Tinggi ke pusat gravitasi, termasuk tekanan dasar.....	40
2.12.4	Properti dinamik .....	41
2.12.5	Faktor $C_i$ dan $C_c$ .....	43
2.12.6	Koefisien efektif massa .....	44
2.13	Perencanaan Gempa untuk wilayah Indonesia.....	44
2.14	Permodelan Tanah sebagai pondasi elastis .....	46
2.15	Desain atap tangki.....	46
2.16	Prosedur desain tangki beton prategang lingkaran dan desain atap tangki beton (Nawy, 2001) .....	48
2.17	Dimensi ekonomis .....	52
<b>BAB 3</b>	<b>METODOLOGI .....</b>	<b>53</b>
3.1	Prosedur Analisis .....	53
3.2	Studi parameter.....	55
3.3	Informasi Model .....	55
3.4	Properti Material.....	57
3.5	Faktor kombinasi beban .....	58
3.6	Beban Gempa .....	58
3.7	Permodelan Struktur .....	59
3.7.1	Elemen Area- <i>Shell</i> .....	59
3.7.2	Sumbu Lokal .....	60
3.7.3	Permodelan tanah sebagai <i>area spring</i> .....	60
3.7.4	<i>Property Modifier</i> (khusus untuk pelat dasar sendi) .....	60
3.7.5	Perletakan ( <i>restraint support</i> ) .....	61
3.7.6	Elemen <i>Link</i> .....	62
3.7.7	Penggunaan <i>Joint Pattern</i> .....	63
3.8	Pembebanan.....	64
3.8.1	Beban Hidrostatis .....	64
3.8.2	Beban Hidrodinamik .....	65
3.8.3	Permodelan Prategang Sebagai Beban .....	67
3.8.4	Kontur Beban Prategang.....	68
3.9	Intensitas Penulangan Baja Lunak Dengan SAP2000 .....	69
3.10	Elemen yang Ditinjau .....	69
<b>BAB 4</b>	<b>PEMBAHASAN.....</b>	<b>70</b>
4.1	Akurasi Model Tangki Silinder .....	70
4.2	Perbandingan Perilaku Tangki Untuk Rasio Yang Berbeda .....	71
4.2.1	Kapasitas dan Volume Tangki .....	71
4.2.2	Respons Terhadap Beban Gempa .....	73
4.2.3	Gaya Dalam Akibat Beban Terkombinasi .....	77

4.2.4	Dimensi Optimum .....	80
4.3	Perbandingan perilaku tangki untuk pengekangan yang berbeda .....	80
4.3.1	Rasio Volume Beton Terhadap Volume Air.....	80
4.3.2	Respons Struktur Terhadap Beban Gempa.....	81
4.3.3	Gaya Dalam Tangki Untuk Pengekangan yang Berbeda .....	86
4.3.4	Deformasi Pada Dinding.....	93
4.4	Perbandingan perilaku tangki dengan penggunaan beton prategang.....	97
4.4.1	Gaya Dalam .....	97
4.4.2	Deformasi.....	98
4.4.3	Pemberian Prategang ( <i>Prestressing</i> ) .....	100
4.4.4	Perbandingan penulangan dengan baja lunak dengan baja prategang untuk 1 meter lebar dalam 1 strip vertikal .....	104
4.4.5	Pengaruh Pemberian Prategang Terhadap Tegangan Dinding dan Dasar Dinding .....	106
4.5	Pengaruh kubah atap terhadap dinding tangki .....	123
4.5.1	Perbandingan gaya dalam dengan dan tanpa kubah atap .....	123
4.5.2	Pemberian Balok cincin tepi .....	126
4.6	Sloshing.....	127
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN.....</b>	<b>129</b>
5.1	Kesimpulan.....	129
5.2	Saran .....	130
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>		<b>132</b>

## DAFTAR GAMBAR

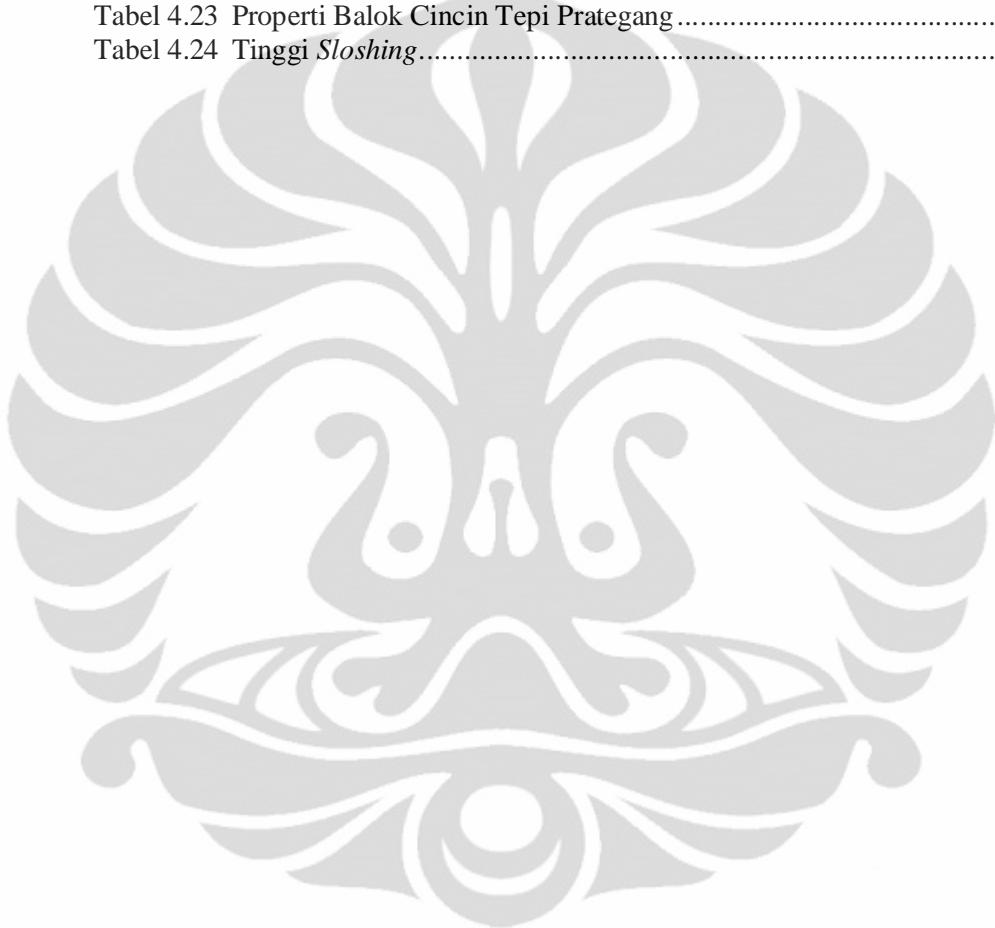
Gambar 2.2	Macam-Macam Perletakkan .....	8
Gambar 2.3	Diagram tekanan internal tangki .....	9
Gambar 2.4	Tegangan Lentur dan tarik cincin. ....	11
Gambar 2.5	Gaya-gaya membran dalam tangki silinder. ....	12
Gambar 2.6	Elemen cangkang silinder.....	13
Gambar 2.7	Tangki bebas bergerak.....	22
Gambar 2.8	Tangki dasar sendi.....	23
Gambar 2.9	Tangki terjepit penuh .....	24
Gambar 2.10	Shear transfer pada dasar tangki lingkaran.....	32
Gambar 2.11	Distribusi tekanan hidrodinamik pada dinding tangki .....	33
Gambar 2.12	Distribusi Tekanan Impulsif dan Konvektif .....	34
Gambar 2.13	Distribusi gaya vertikal pada tangki lingkaran .....	34
Gambar 2.14	Model Dinamik Ekivalen .....	37
Gambar 2.15	Keseimbangan dinamik gaya-gaya horisontal .....	38
Gambar 2.16	Wilayah Gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan perioda ulang 500 tahun .....	44
Gambar 2.17	Respons Spektrum Gempa Rencana .....	45
Gambar 2.18	Tangki Bertumpu di Atas Pondasi Elastis .....	46
Gambar 2.19	Perletakan atap pada dinding tangki .....	47
Gambar 2.20	Bagan alir untuk desain tangki prategang lingkaran dan atap kubahnya.....	49
Gambar 2.21	Penjelasan tabel dimensi ekonomis.....	52
Gambar 3.1	Prosedur Analisis .....	54
Gambar 3.2	Acuan Dimensi Tangki.....	56
Gambar 3.3	Sudut Inklinasi Kabel dan Spasi Antar Set Kabel .....	57
Gambar 3.4	Sumbu Lokal Elemen Area.....	60
Gambar 3.5	<i>Modification Factor</i> untuk pelat perletakan sendi .....	61
Gambar 3.6	Sumbu Lokal Perletakan.....	61
Gambar 3.7	Arah Sumbu Lokal Pada Link .....	63
Gambar 3.8	<i>Joint Pattern</i> .....	64
Gambar 3.9	Kontur Beban Hidrostatis .....	64
Gambar 3.10	Distribusi Beban Hidrodinamik .....	65
Gambar 3.11	Kontur Beban Hidrodinamik akibat tekanan impulsif,konvektif,gempa vertikal (kiri) dan inersia dinding ( kanan) .....	66
Gambar 3.12	Permodelan Prategang .....	67
Gambar 3.13	Tekanan yang diterapkan pada dinding tangki .....	68
Gambar 3.14	Kontur Beban Prategang.....	68
Gambar 3.15	Potongan Elemen yang Ditinjau .....	69
Gambar 4.1	Akurasi model dengan aktual .....	70
Gambar 4.2	Deformasi Akibat Tekanan Hidrostatis Perletakan Jepit .....	96
Gambar 4.3	Deformasi Akibat Tekanan Hidrodinamik Perletakan Jepit.....	96
Gambar 4.4	Deformasi Akibat Tekanan Hidrostatis Perletakan Sendi .....	96

Gambar 4.5	Deformasi Akibat Tekanan Hidrodinamik Perletakan Sendi .....	96
Gambar 4.6	Deformasi Akibat Tekanan Hidrostatis Perletakan <i>Free sliding</i> ...	97
Gambar 4.7	Deformasi Akibat Tekanan Hidrodinamik Perletakan <i>Free Sliding</i> .....	97
Gambar 4.8	Peralihan Dasar Dinding Perletakan Free Sliding Akibat Tekanan Hidrostatis.....	97
Gambar 4.9	Peralihan Dasar Dinding Perletakan Free Sliding Akibat Tekanan Hidrodinamik .....	97
Gambar 4.10	Deformasi Akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Jepit-Tangki Kosong .	98
Gambar 4.11	Deformasi Akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Sendi-Tangki Kosong.....	98
Gambar 4.12	Deformasi Akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Free Sliding-Tangki Kosong.....	98
Gambar 4.13	Deformasi Pada Dasar Dinding akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Free Sliding-Tangki Kosong .....	98
Gambar 4.14	Deformasi Akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Jepit-Tangki Penuh....	99
Gambar 4.15	Deformasi Akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Sendi-Tangki Penuh ..	99
Gambar 4.16	Deformasi Akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Free Sliding-Tangki Penuh .....	99
Gambar 4.17	Deformasi Pada Dasar Dinding akibat <i>Prestressing</i> Perletakan Free Sliding-Tangki Penuh.....	100
Gambar 4.18	Diagram Tegangan Pada Dinding Maksimum Diameter 17.2 m Perletakan Jepit .....	108
Gambar 4.19	Diagram Tegangan Pada Dasar Dinding Diameter 17.2 m Perletakan Jepit .....	109
Gambar 4.20	Diagram Tegangan Pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 17.2 m Perletakan Sendi .....	111
Gambar 4.21	Diagram Tegangan Pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 36.8 m Perletakan Jepit .....	113
Gambar 4.22	Diagram Tegangan Pada Dasar Dinding Tangki Diameter 36.8 m Perletakan Jepit .....	114
Gambar 4.23	Tegangan pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 36.8 m Perletakan Sendi.....	116
Gambar 4.24	Tegangan Pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 79.2 m Perletakan Jepit .....	118
Gambar 4.25	Tegangan Pada Dasar Dinding Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Jepit .....	119
Gambar 4.26	Tegangan Pada Dinding Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Sendi.....	121

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel fungsi $\Phi, \psi, \theta, \zeta$ .....	18
Tabel 2.2	Tegangan Izin Beton Pada Tangki Lingkaran.....	25
Tabel 2.3	Tegangan di baja penulangan.....	25
Tabel 2.4	Faktor pembebahan.....	26
Tabel 2.5	Nilai S, I dan R .....	30
Tabel 2.6	Kategori okupansi berdasarkan faktor kepentingan .....	36
Tabel 2.7	Freeboard minimum yang diperlukan.....	36
Tabel 2.8	Respon spektrum gempa rencana .....	45
Tabel 2.9	Koefisien $\psi$ untuk menghitung faktor respons gempa vertikal $C_v$ .....	45
Tabel 2.10	Perbandingan dimensi ekonomis untuk tangki air.....	52
Tabel 3.1	Informasi Model .....	55
Tabel 3.2	Modelisasi 1 .....	56
Tabel 3.3	Modelisasi 2 .....	56
Tabel 3.4	Properti Perletakan Free Sliding.....	56
Tabel 3.5	Properti Material.....	57
Tabel 3.6	Faktor-faktor dalam pembebahan.....	58
Tabel 3.7	Kombinasi Pembebahan.....	58
Tabel 3.8	Properti Elemen Area.....	59
Tabel 3.9	Parameter Desain Beton Dinding .....	59
Tabel 3.10	Meshing Dinding .....	59
Tabel 3.11	Sumbu Lokal Perletakan .....	61
Tabel 3.12	Derajat Kebebasan Perletakan .....	62
Tabel 3.13	Sumbu Lokal <i>Link</i> .....	62
Tabel 3.14	Derajat Kebebasan <i>Link</i> .....	62
Tabel 3.15	Tekanan ekivalen akibat prategang .....	67
Tabel 4.1	Akurasi Model.....	71
Tabel 4.2	Perbandingan Volume Beton dan Berat Struktur antar rasio .....	72
Tabel 4.3	Partisipasi Massa .....	74
Tabel 4.4	Properti Dinamik .....	75
Tabel 4.5	Perbandingan Periode Impulsif Untuk Tangki Rigid dan Tangki Fleksibel .....	84
Tabel 4.6	Perbandingan Gaya dalam Maksimum Pada 3 Macam Perletakan ...	91
Tabel 4.7	Rasio Beban Hidrostatis, Beban Hidrodinamik dan Beban Mati terhadap Beban Total .....	92
Tabel 4.8	Translasi pada dasar dinding D 17.2 m.....	94
Tabel 4.9	Translasi pada dasar dinding D 36.8 m.....	94
Tabel 4.10	Translasi pada dasar dinding D 79.2 m.....	95
Tabel 4.11	Perbedangan Translasi Pada Dasar Dinding Saat Tangki Kosong dan Tangki Penuh.....	95
Tabel 4.12	Distribusi Jumlah <i>Prestressing</i> yang Dipakai per 1 m Tinggi .....	101
Tabel 4.13	Distribusi Tendon per 1 meter tinggi.....	102
Tabel 4.14	Distribusi Tendon per 1 m Tinggi .....	103
Tabel 4.15	<i>Prestressing</i> Vertikal .....	104

Tabel 4.16 Perbandingan penulangan dengan baja lunak dengan baja prategang arah melingkar.....	105
Tabel 4.17 Tegangan Pada Tangki Diameter 17.2 m Perletakan Jepit .....	107
Tabel 4.18 Tegangan Pada Tangki Diameter 17.2 m Perletakan Sendi.....	110
Tabel 4.19 Tegangan Pada Tangki Diameter 36.8 m Perletakan Jepit .....	112
Tabel 4.20 Tegangan pada Tangki Diameter 36.8 m Perletakan Sendi .....	115
Tabel 4.21 Tegangan Pada Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Jepit .....	117
Tabel 4.22 Tegangan Pada Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Sendi.....	120
Tabel 4.23 Properti Balok Cincin Tepi Prategang .....	127
Tabel 4.24 Tinggi <i>Sloshing</i> .....	127



## DAFTAR LAMPIRAN

**Lampiran A1** Perbandingan Gaya Dalam Tanpa Atap  
**Lampiran A2** Gaya Dalam akibat Beban Prategang

**Lampiran B** Contoh Input Data Beban Pada SAP2000 D 36.8 m – *free sliding*

**Lampiran C** Contoh Perhitungan Beban Gempa D 36.8 m

**Lampiran D1** Perhitungan Desain Tangki Beton Lingkaran D 17.2 m

**Lampiran D2** Perhitungan Desain Tangki Beton Lingkaran D 36.8 m

**Lampiran D3** Perhitungan Desain Tangki Beton Lingkaran D 79.2 m



## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Desain struktur untuk bangunan-bangunan dengan fungsi tertentu dalam studi teknik sipil saat ini merupakan materi yang sifatnya pilihan. Penulis tertarik untuk mempelajari dan mendalami desain struktur-struktur lengkung yang terkait dengan teori cangkang (*shell*) yang merupakan mata kuliah pilihan dalam program studi teknik sipil karena keunikannya yang cukup berbeda dengan elemen struktur lain seperti balok.

Salah satu aplikasi dari struktur lengkung adalah tangki beton silinder. Saat ini pembungkus tangki beton konvensional telah ditinggalkan dengan adanya teknologi beton prategang yang jauh lebih kuat dan ekonomis, sehingga tangki beton sekarang umumnya merupakan tangki beton prategang. Tangki beton prategang biasa dipakai untuk penyimpanan zat-zat cair seperti air, minyak, gas, air, limbah, bahan-bahan butiran seperti semen, proses cairan dan bahan-bahan kimia. Tangki penyimpanan air dengan kapasitas besar selalu dibuat dengan beton prategang (Raju, 1993).

Tangki beton prategang umumnya berbentuk silinder dengan dasar bertumpu pada tanah (*ground supported*) dengan diameter sampai 100 m dan dengan ketinggian cairan sampai 36 m yang mempunyai kapasitas kira-kira 50-100 juta liter. Sejauh ini tangki silinder merupakan tipe yang secara umum paling banyak dipakai berdasarkan pertimbangan-pertimbangan struktural dan konstruksi. Bentuk silinder sesuai untuk pembungkusan kawat keliling yang merupakan operasi prategangan utama pada tangki.

## 1.2 Batasan Studi

Pada pembahasan ini penulis melakukan pembatasan penulisan untuk menghindari pembahasan yang terlalu luas. Adapun masalah yang dibahas yaitu :

- a. Tangki yang ditinjau berbentuk silinder dan berfungsi sebagai penampung cairan (*liquid containing*) berupa air
- b. Struktur dinding tangki menggunakan struktur beton pratekan dan hanya menahan beban yang diakibatkan oleh berat sendiri dan tekanan cairan baik statik maupun dinamik
- c. Tangki merupakan *ground supported structure* atau bertumpu di atas tanah dengan bahasan terhadap 3 tipe perletakan *fixed base*, *hinged base* dan *free sliding base*
- d. Analisis dilakukan terhadap dinding tangki akibat pengaruh pengekangannya
- e. Struktur atap tangki diasumsikan bertumpu dengan *bearing pad* terhadap dinding dengan demikian atap akan memberikan gaya kepada dinding.
- f. Struktur lantai untuk perletakan jepit dan sendi diasumsikan monolit dengan dinding, sedangkan untuk perletakan *free sliding* dinding dan pelat tidak monolit.

Peraturan yang digunakan pada pembuatan skripsi ini adalah:

- ASCE 7-05 *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*
- ACI 373-97 *Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons*
- ACI 350.3 – 01 *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures*
- Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)
- Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-1726-2002)
- Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung

### 1.3 Tujuan Studi

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk mengetahui perilaku struktur tangki beton pratekan dengan berbagai macam perletakan yang dimodelkan sesuai standar ACI 373-97 *Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons* dan ACI 350.3 – 01 *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures* sehingga dapat diperoleh suatu struktur tangki yang kuat terhadap gempa, optimal dan juga ekonomis

### 1.4 Hipotesa

Hipotesa yang akan diuji dalam penelitian ini adalah

- Penggunaan prestressed akan menambah kekuatan beton, mencegah keretakan dan menjadikan tangki lebih ekonomis
- Sambungan antara dinding tangki dengan pelat dasar dimana dasarnya bergerak bebas merupakan alternatif perletakan yang terbaik dibandingkan dengan perletakan lainnya pada tangki beton pratekan

### 1.5 Metodologi

Metodologi penulisan dan pengolahan data yang digunakan pada penulisan ini adalah

- Melakukan studi literatur terhadap standar ACI 373-97 *Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons* dan ACI 350.3 – 01 *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures*
- Melakukan desain awal (*preliminary design*) struktur tangki beton pratekan berdasarkan standar ACI 350.3-01, ACI 373-97 dan peraturan lain yang terkait
- Menganalisis beban-beban yang bekerja pada dinding tangki beton pratekan.
- Melakukan analisis untuk optimasi dimensi tangki
- Menganalisis tangki silinder beton pratekan, dengan berbagai macam perletakan untuk dimensi yang optimum melalui studi perilaku dengan modelisasi menggunakan bantuan aplikasi SAP2000 dengan

parameter utama dimensi tangki dan kebebasan pergeseran dasar tangki serta penggunaan beton prategang.

- Melakukan evaluasi dan mengambil kesimpulan terhadap analisis yang dilakukan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan skripsi ini berisikan :

### a. BAB 1 PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, tujuan studi, batasan masalah, hipotesa, metodologi penulisan yang berhubungan dengan permasalahan yang akan dibahas.

### b. BAB 2 STUDI LITERATUR

Berisikan studi literatur terhadap peraturan, syarat dan pedoman dalam desain tangki, teori klasik cangkang, beban gempa pada tangki silinder, dan pengaruh penggunaan prategang.

### c. BAB 3 METODOLOGI

Merupakan metodologi yang berisikan tentang prosedur penelitian yang didalamnya terkait dengan modelisasi struktur bangunan dan parameter-parameter yang digunakan.

### d. BAB 4 PEMBAHASAN

Pada bagian pembahasan disajikan hasil penelitian yang telah dilakukan dan diberikan pandangan penulis terhadap hasil penelitian melalui analisis dan perbandingan terhadap literatur

### e. BAB 5 KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian yang dilakukan disajikan secara ringkas pada bagian ini dan penulis juga menyarankan tentang pengembangan penelitian ini untuk memperoleh perilaku tangki silinder yang lebih komprehensif.

## **BAB 2**

### **STUDI LITERATUR**

#### **2.1 Beton Prategang**

Beton prategang pada dasarnya adalah beton dimana tegangan internal dengan besar serta distribusi yang sesuai diberikan sedemikian rupa sehingga tegangan-tegangan yang diakibatkan oleh beban-beban luar dilawan dalam suatu tingkat yang diinginkan (Raju, 1993).

Beton prategang memiliki perlawanan yang meningkat terhadap gaya geser, disebabkan oleh pegaruh prategang tekan, yang mengurangi tegangan tarik utama. Pemakaian kabel yang dilengkungkan, khususnya pada balok berbentang panjang membantu mengurangi gaya geser yang timbul pada penampang ditumpuan.

#### **2.2 Tangki Lingkaran Beton Prategang**

Tangki lingkaran beton prategang merupakan kombinasi terbaik antara material dan bentuk struktural untuk menampung cairan dan padatan. Kinerjanya selama setengah abad yang lalu menunjukkan bahwa apabila didesain dengan keahlian dan ketelitian yang baik, struktur tersebut dapat berfungsi selama 50 tahun atau lebih tanpa mengalami masalah perawatan yang signifikan.

Upaya pertama memperkenalkan penggunaan prategang melingkar pada struktur lingkaran dilakukan oleh W.S. Hewett, yang menerapkan prinsip wartel (*turnbuckle*) dan batang tarik di awal 1920-an. Namun demikian, baja yang tersedia pada masa itu mempunyai kuat leleh yang sangat rendah hanya sampai 241.3 MPa (35.000 psi) sampai pada tahun 1940-an, J.M Crom, Sr. berhasil mengembangkan prinsip-prinsip menggulung kawat tarik disekeliling dinding lingkaran tangki prategang dengan tersedianya baja berkekuatan tinggi. Sejak saat itu telah dibangun lebih dari 3000 struktur penampung lingkarang dengan berbagai dimensi dan diameter.

Keuntungan utama dari penggunaan prategang lingkaran pada tangki beton dibandingkan perkuatan lainnya adalah persyaratan bahwa tidak ada retak yang dizinkan. Tegangan tekan melingkar yang ditimbulkan oleh kawat prategang

eksternal yang melingkar di sekeliling cangkang tangki adalah cara alami untuk mengeliminasi retak pada dinding eksterior akibat beban cairan, padatan, atau gas internal yang ditampung di dalam tangki. Cara lain pemberian prategang melingkar adalah dengan menggunakan tendon *individual* yang diangkur di suatu penyangga. Cara ini lebih banyak digunakan di Eropa dari pada di Amerika Utara karena alasan teknologi dan ekonomi lokal.

Bejana penampung yang menggunakan prategang melingkar, yang segmen-segmennya bisa di cor di tempat, atau dipracetak meliputi tangki penampung air, tangki air buangan, *silo*, tangki minyak dan bahan kimiawi, struktur *platform* minyak lepas pantai, bejana kriogenik, dan bejana tekan reaktor nuklir. Semua struktur ini dianggap sebagai cangkang tipis karena sangat kecilnya rasio antara tebal cangkang dan diameternya. Karena retak pada level beban-kerja tidak diperkenankan, maka cangkang tersebut diharapkan berperilaku secara elastis pada kondisi beban-kerja dan kondisi kelebihan-beban (*overload*).



Gambar 2.1 Tangki Lingkaran Beton Prategang

Sumber : (Nawy, 2001)

### 2.3 Lantai tangki

Pelat dasar yang membentuk lantai tangki pada umumnya dibuat dari beton bertulang yang dibangun di atas permukaan bitumen datar atau ikatan tipis dengan sisipan suatu lapisan geser seperti kertas minyak, sehingga pelat tersebut dapat bergerak di atas dasar tanah yang dipadatkan. Pelat didesain cukup fleksibel sehingga dapat menyesuaikan diri terhadap deformasi lokal dari tanah di

**Universitas Indonesia**

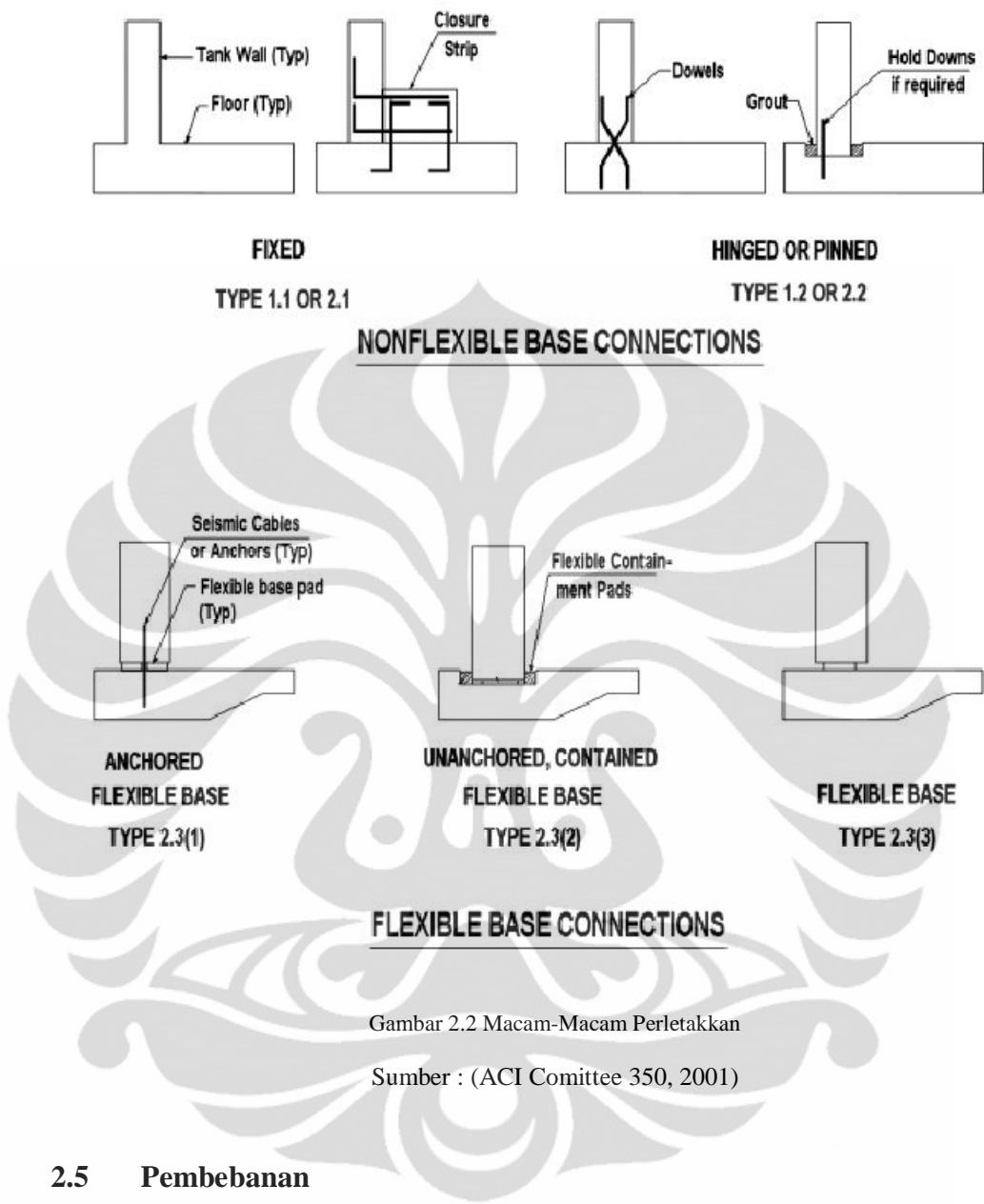
bawahnya yang telah dipadatkan terlebih dahulu. Tulangan pada pelat harus terbagi dengan baik guna menahan retakan pelat akibat susut dan perubahan temperatur. Pelat lantai dapat mengalami retak apabila dikosongkan dan dibiarkan mengering dalam waktu yang lama, namun hal ini dapat diatasi dengan pemberian prategang merata.

#### 2.4 Pertemuan dinding tangki dan pelat dasar

Struktur tangki pada dasarnya dapat dibedakan jenisnya berdasarkan bentuk konfigurasinya (kotak atau lingkaran), jenis perletakannya dan metode konstruksinya. Sambungan antara dinding-dinding tangki dan pelat dasar yang kemudian penulis sebut dengan perletakan dapat terdiri dari salah satu dari tiga tipe berikut

- Dasar terjepit (“*fixed base*”)
- Dasar bersendi (“*hinged base*”)
- Dasar bergeser (“*sliding or flexible base*”)

Tarikan pada cincin dan momen lentur yang timbul pada dinding tangki terutama dipengaruhi oleh jenis sambungan antara dinding dan pelat dasar. Pertemuan antara dinding tangki dan pondasi merupakan tempat yang paling berbahaya yang menyangkut bocoran, dan untuk mencegah terjadinya hal seperti ini sangat perlu diperhatikan terkait dengan desain dan konstruksinya (Raju, 1993).



Gambar 2.2 Macam-Macam Perletakan

Sumber : (ACI Comittee 350, 2001)

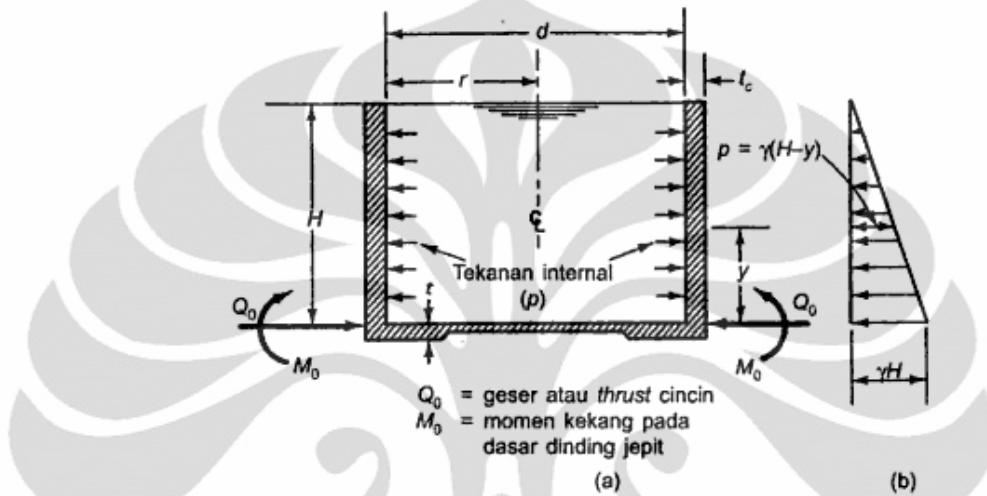
## 2.5 Pembebanan

### 2.5.1 Beban internal

Tinjauan perilaku tangki lingkaran meliputi tinjauan tekanan dalam akibat material yang terkandung di dalamnya yang bekerja pada sebuah penampang cangkang silinder berdinding-tipis dan gaya luar prategang radial dan kadang-kadang vertikal yang mengimbangi gaya internal. Tekanan dalam ini mempunyai arah yang radial horizontal, tetapi bervariasi dalam arah vertikal yang bergantung pada jenis material yang terkandung di dalam tangki. Apabila materialnya adalah air atau cairan sejenis, maka distribusi tekanan vertikal terhadap dinding tangki adalah *segitiga*, dengan intensitas maksimum terjadi di dasar dinding. Cairan lain

Universitas Indonesia

yang disertai dengan gas akan menghasilkan tekanan horisontal yang *konstan* di seluruh tinggi dinding. Distribusi tekanan vertikal di tangki yang digunakan untuk menampung material berbutiran seperti butiran batu bara pada dasarnya sama dengan distribusi tekanan gasnya dengan nilai konstan hampir di seluruh tinggi material di dalam tangki. Gambar dibawah ini menunjukkan distribusi tekanan untuk ketiga kasus pembebanan tersebut.



Gambar 2.3 Diagram tekanan internal tangki. (a) Potongan tangki menunjukkan geser radial  $Q_0$  dan momen kekang  $M_0$  pada dasar dinding jepit dasar. (b) tekanan cairan beban segitiga

Sumber : (Nawy, 2001)

Teori dasar elastis mengenai cangkang silinder digunakan dalam analisis dan desain dinding tangki bertekanan. Gaya cincin akan menyebabkan terjadinya tarik cincin di dinding silinder tipis, diasumsikan tak terkekang di ujung-ujung setiap penampang horisontal. Besar gaya ini sebanding dengan tekanan yang bekerja secara internal, dan *tidak ada* momen vertikal yang ditimbulkan di seluruh tinggi dinding. Apabila ujung-ujung dindingnya dikekang, besar gaya cincin akan berubah dan timbulah momen lentur di potongan vertikal dinding tangki. Besar gaya cincin dan besar momen vertikal dengan demikian merupakan fungsi dari derajat kekangan dari cangkang silinder di tepi-tepiinya dan dapat dihitung dengan teori cangkang elastis.

#### 2.5.1.1 Beban cairan dan dasar yang dapat bergeser dengan bebas

Gaya cincin adalah

$$F = \frac{pD}{2} = pR \quad (2.1)$$

Tegangan cincing adalah

$$f_R = \frac{pD}{2t} = \frac{pR}{t} \quad (2.2)$$

Dimana

D = diameter silinder

R = radius silinder

t = tebal inti dinding

p = tekanan internal satuan di dasar dinding =  $\gamma H$

$\gamma$  = berat satuan material yang terkandung di dalam bejana

Tegangan cincin tarik di titik manapun di bawah permukaan material yang terkandung dalam bejana menjadi

$$f_R = \gamma(H - y) \frac{D}{2t} = \gamma(H - y) \frac{R}{t} \quad (2.3)$$

Dimana H adalah tinggi cairan yang terkandung dan y adalah jarak di atas dasar. Gaya cincin yang berkaitan dengan ini adalah

$$F = \gamma(H - y) \frac{r}{t} \quad (2.4)$$

Tegangan cincin tarik maksimum di dasar dinding tangki yang bergeser dengan bebas untuk  $y = 0$  menjadi

$$f_R = \gamma H \frac{D}{2t} = \gamma H \frac{R}{t} \quad (2.5)$$

#### 2.5.1.2 Beban cairan di dasar dinding yang terkekang.

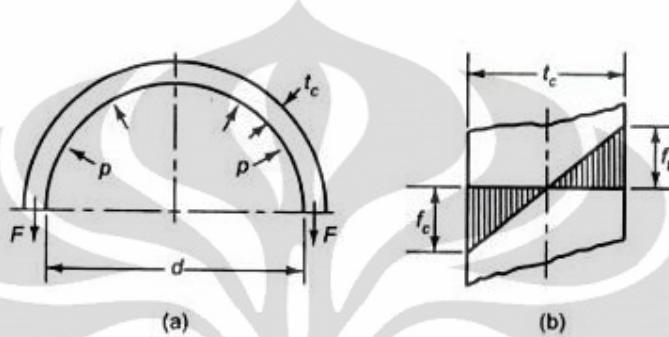
Apabila dasar dinding berupa jepit atau sendi, tarik cincin di dasar akan hilang. Karena dasarnya terkekang, maka teori membran sederhana tidak berlaku sebagai akibat adanya deformasi dari gaya kekangan di dasar dinding. Sebagai gantinya, modifikasi pada tegangan membran menjadi satu keharusan, dan deviasi dari tarik cincin pada bidang-bidang antara di sepanjang tinggi dinding harus didekati dengan cara yang lain.

Apabila momen lentur vertikal pada bidang horizontal dinding ini pada berbagai tinggi adalah  $M_y$ , tegangan lentur tekan atau tarik di beton akan menjadi

$$f_t = f_c = \frac{M_y}{S} = \frac{6M_y}{t^2} \quad (2.6)$$

per tinggi satuan

Distribusi tegangan lentur di seluruh ketebalan dinding tangki ditunjukkan dalam gambar berikut

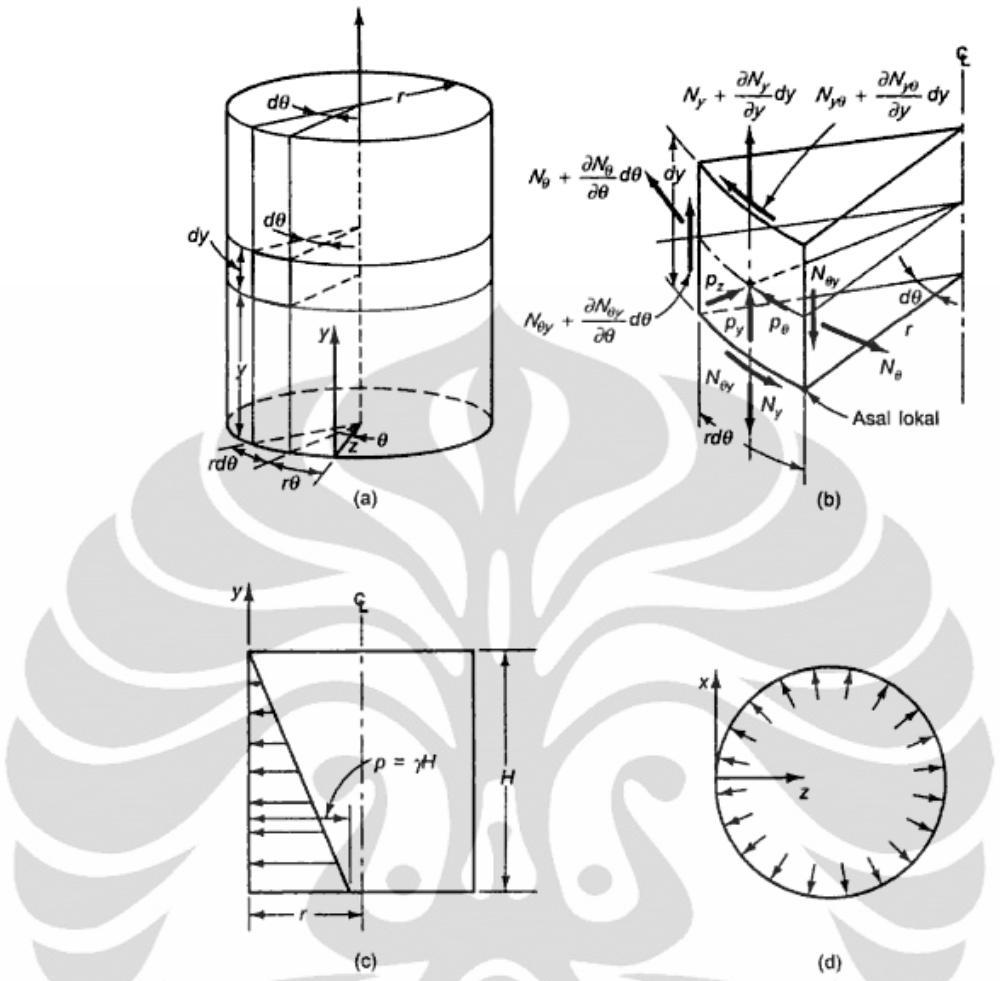


Gambar 2.4 Tegangan Lentur dan tarik cincin. (a) Gaya internal tarik cincin  $F$  dalam penampang horisontal (b) Tegangan lentur akibat momen lentur  $M$  pada ketebalan dinding dari penampang vertical

Sumber : (Nawy, 2001)

### 2.5.2 Teori Membran

Teori ini disampaikan untuk mengetahui dasar dari teori lentur di bagian berikutnya. Penelitian mengenai gaya-gaya dan tegangan di dinding tangki lingkaran yang tak retak merupakan masalah elastisitas di dalam analisis cangkang silinder. Apabila cangkang tersebut bebas berdeformasi sebagai akibat dari adanya tekanan cairan internal, persamaan dasar keseimbangan membran berlaku. Gaya satuan longitudinal  $N_y$ , gaya satuan melingkar  $N_{\theta}$ , dan geser satuan tengah  $N_{y\theta}$  dan  $N_{\theta y}$  ditunjukkan pada elemen differensial dari gambar di bawah ini. Dari gambar dapat dilihat bahwa keempat bilangan anu bekerja di bidang cangkang.



Gambar 2.5 Gaya-gaya membran dalam tangki silinder. (a) geometri cangkang (b) gaya-gaya membran cangkang. (c) Elevasi tangki diisi cairan. (d) Tekanan internal tak simetris pada bidang horisontal manapun

Sumber : (Nawy, 2001)

Tiga persamaan untuk keempat gaya satuan yang tidak diketahui adalah

$$\frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + r \frac{\partial N_{y\theta}}{\partial y} + p_\theta r = 0 \quad (2.7)$$

$$r \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{\theta y}}{\partial \theta} + p_y r = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{N_\theta}{r} = p_z = 0 \quad (2.9)$$

Dimana  $\partial N_{y\theta} = \partial N_{\theta y}$  karena kondisi simetri pembebanan. Dengan demikian, hal tidak diketahuinya berkurang menjadi tiga, yang menunjukkan suatu struktur statis tertentu yang hanya mengalami gaya-gaya langsung.

Untuk pembebanan aksi simetris (*axisymmetrical loading*) seperti dalam gambar c,  $p_\theta = p_y = 0$  dan  $p_z = p \cdot f(y)$  yang tidak bergantung pada  $\theta$ . Jadi,

$$p_z = -\gamma(H - y) \quad (2.10)$$

Dan solusi dari 3 persamaan di atas adalah

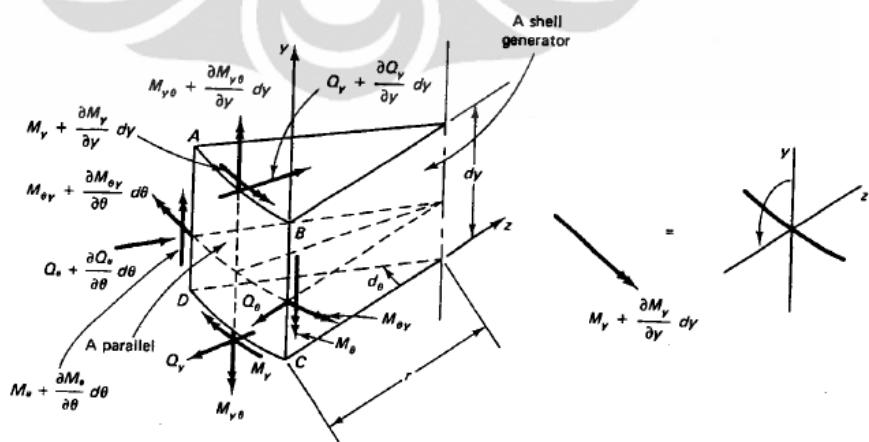
$$N_{y\theta} = N_y = 0 \quad (2.11)$$

$$N_\theta = \gamma(H - y)r \quad (2.12)$$

### 2.5.3 Teori lentur

Adanya kekekangan di tepi dari bejana menimbulkan geser cincin horizontal dan momen vertikal di cangkang tersebut. Karena itu, persamaan gaya membran yang dibahas sebelum ini harus dimodifikasi dengan menggabungkan geser dan momen tambahan. Teori yang menggunakan rumus termodifikasi ini disebut teori lentur cangkang lingkaran. Teori ini menjelaskan persyaratan keserasian regangan di dalam deformasi yang ditimbulkan oleh geser dan momen.

Momen lentur dan geser tengah pada cangkang silinder yang dibebani aksisimetris ditunjukkan dengan vektor momen dan gaya di dalam gambar. Elemen sangat kecil ABCD menunjukkan titik tangkap dan titik arah dari momen satuan  $M_y$  terhadap sumbu x dan  $M_\theta$  terhadap sumbu y, momen satuan melingkar  $M_{y\theta}$  dan  $M_{\theta y}$ , geser normal satuan  $Q_y$  yang bekerja pada bidang pembentuk cangkang vertikal dan tegak lurus sumbu cangkang, dan geser radial satuan  $Q_\theta$  yang bekerja dalam arah jari-jari cangkang.



Gambar 2.6 Elemen cangkang silinder

Sumber : (Nawy, 2001)

**Universitas Indonesia**

Berikut ini persamaan-persamaan keseimbangan

$$\frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + r \frac{\partial N_{y\theta}}{\partial y} - Q_\theta + p_\theta r = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial N_y}{\partial y} r + \frac{\partial N_{\theta y}}{\partial \theta} + p_y r = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} r + N_\theta + p_z r = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} r + \frac{\partial M_{y\theta}}{\partial \theta} + Q_y r = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial M_{y\theta}}{\partial y} r - Q_\theta r = 0 \quad (2.17)$$

Karena simetrisnya pembebanan,  $N_{y\theta} = N_{\theta y} = M_{y\theta} = M_{\theta y} = 0$ , dan  $dQ_\theta$  dapat diabaikan, maka persamaan differensial parsial di atas dapat direduksi menjadi persamaan differensial biasa

$$\frac{dN_y}{dy} r + p_y r = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{dQ_y}{dy} r + N_\theta + p_z r = 0 \quad (2.19)$$

$$-\frac{dM_y}{dy} r + Q_y r = 0 \quad (2.20)$$

Karena gaya-gaya membran tengah  $N_y$  konstan dan dianggap nol persamaan-persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk sederhana yang mempunyai tiga bilangan anu.  $N_\theta$ ,  $Q_y$ , dan  $M_y$  sebagai berikut

$$\frac{dQ_y}{dy} + \frac{1}{r} N_\theta = -p_z \quad (2.21)$$

$$\frac{dM_y}{dy} - Q_y = 0 \quad (2.22)$$

Untuk mencari solusi dari persamaan di atas, kita harus memperhitungkan peralihan dan membuat persamaan-persamaan geometri.

#### 2.5.4 Persamaan gaya

Apabila  $v$  dan  $w$  adalah peralihan dalam arah  $y$  dan  $z$ , maka regangan satuan dalam arah ini masing-masing adalah

$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{w}{r} \quad (2.24)$$

Sehingga

$$N_y = \frac{Et}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu \varepsilon_\theta) = \frac{Et}{1-\mu^2} \left( \frac{dv}{dy} - \mu \frac{w}{r} \right) = 0 \quad (2.25)$$

$$N_\theta = \frac{Et}{1-\mu^2} (\varepsilon_\theta + \mu \varepsilon_y) = \frac{Et}{1-\mu^2} \left( -\frac{w}{r} + \mu \frac{dv}{dy} \right) = 0 \quad (2.26)$$

Dimana

$\mu$  = rasio poisson

$t$  = tebal inti dinding

Sehingga dapat diperoleh

$$\frac{dv}{dy} = \mu \frac{w}{r} \quad (2.27)$$

$$N_\theta = -Et \frac{w}{r} \quad (2.28)$$

#### 2.5.5 Persamaan momen

Karena simetri, tidak akan ada perubahan kelengkungan dalam arah melingkar. Jadi kelengkungan dalam arah  $y$  harus sama dengan  $-\frac{d^2 v}{dy^2}$ . Dengan menggunakan rumus momen yang sama untuk plat elastis yang tipis, akan kita dapatkan

$$M_\theta = \mu M_y \quad (2.29)$$

$$M_y = -D \frac{d^2 w}{dy^2} \quad (2.30)$$

Dimana

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2.31)$$

Dengan menggabungkan persamaan-persamaan di atas diperoleh

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( D \frac{d^2 w}{dy^2} \right) + \frac{Et}{r^2} w = p_z \quad (2.32)$$

apabila tebal dinding t konstan, maka persamaan menjadi

$$D \frac{d^4 w}{dy^4} + \frac{Et}{r^2} w = p_z \quad (2.33)$$

Dengan menuliskan

$$\beta^4 = \frac{Et}{4r^2 D} = \frac{3(1-\mu^2)}{(rt)^2} \quad (2.34)$$

maka persamaan menjadi

$$\frac{d^4 w}{dy^4} + 4\beta^4 w = \frac{p_z}{D} \quad (2.35)$$

Ekspresi terakhir sama dengan yang diperoleh pada balok prismatic dengan rigiditas lentur D yang ditumpu di atas pondasi elastis dan mengalami aksi dari intensitas beban satuan  $p_z$ . Solusi umum persamaan ini untuk peralihan radial dalam arah z adalah (S. P. Timoshenko dan S. Woinowsky-Krieger, 1959)

$$w = e^{\beta y} (C_1 \cos \beta y + C_2 \sin \beta y) + e^{-\beta y} (C_3 \cos \beta y + C_4 \sin \beta y) + f(y) \quad (2.36)$$

Dengan  $f(y)$  merupakan solusi khusus dan peralihannya adalah

$$w = \frac{p_z r^2}{Et} \quad (2.37)$$

## 2.5.6 Persamaan umum gaya-gaya dan peralihan

Solusi persamaan differensial

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

adalah

$$\Phi(\beta y) = e^{-\beta y} (\cos \beta y + \sin \beta y) \quad (2.38)$$

$$\Psi(\beta y) = e^{-\beta y} (\cos \beta y - \sin \beta y) \quad (2.39)$$

$$\theta(\beta y) = e^{-\beta y} (\cos \beta y - \sin \beta y) \quad (2.40)$$

$$\zeta(\beta y) = e^{-\beta y} \sin \beta y \quad (2.41)$$

Maka rumus untuk deformasi radial dalam arah z dan turunan-turunannya pada sembarang tinggi y di atas dasar dinding dapat dievaluasi dari rumus-rumus sederhana berikut ini yang merupakan fungsi dari momen satuan dasar dinding  $M_o$  dan geser radial satuan  $Q_o$ .

Defleksi

$$w = -\frac{1}{2\beta^3 D} [\beta M_o \Psi(\beta y) + Q_o \theta(\beta y)] \quad (2.42)$$

Rotasi

$$\frac{dw}{dy} = \frac{1}{2\beta^2 D} [2\beta M_o \theta(\beta y) + Q_o \psi(\beta y)] \quad (2.43)$$

$$\frac{d^2 w}{dy^2} = -\frac{1}{2\beta D} [2\beta M_o \Phi(\beta y) + Q_o \zeta(\beta y)] \quad (2.44)$$

$$\frac{d^3 w}{dy^3} = -\frac{1}{D} [2\beta M_o \zeta(\beta y) - Q_o \Psi(\beta y)] \quad (2.45)$$

Fungsi cangkang  $\Phi(\beta y)$ ,  $\Psi(\beta y)$ ,  $\theta(\beta y)$ , dan  $\zeta(\beta y)$  dicantumkan sebagai koefisien pengaruh standar di dalam tabel berikut ini.

Tabel 11.1 Tabel Fungsi  $\Phi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ , dan  $\zeta$ .

$\beta y$	$\Phi$	$\psi$	$\theta$	$\zeta$
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	-0,0106
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

Tabel 2.1 Tabel fungsi  $\Phi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\zeta$ 

Sumber : (S. P. Timoshenko dan S. Woinowsky-Krieger, 1959)

Defleksi atau peralihan radial maksimum di dasar dinding yang terkekang adalah

$$w_{y=0} = -\frac{1}{2\beta^3 D} [\beta M_o + Q_o] \quad (2.46)$$

sehingga rotasi maksimum dinding di dasar menjadi

$$\left( \frac{dw}{dy} \right)_{y=0} = \frac{1}{2\beta^2 D} [2\beta M_o + Q_o] \quad (2.47)$$

Dimana  $M_o$  dan  $Q_o$  masing-masing adalah momen kekangan dan geser cincin di dasar.

Untuk tangki dengan tebal dinding konstan, gaya satuan di seluruh tinggi dinding adalah sebagai berikut

$$N_\theta = -\frac{Etw}{r} \quad (2.48)$$

$$Q_y = -D \frac{d^3 w}{dy^3} \quad (2.49)$$

$$M_\theta = \mu M_y \quad (2.50)$$

$$M_y = -D \frac{d^2 w}{dy^2} \quad (2.51)$$

Dengan menggabungkan persamaan-persamaan di atas, maka dapat dicari rumus untuk momen vertikal dan geser radial horisontal di dasar dinding, dimana  $y$  adalah nol

$$M_{y=0} = M_o = \left( 1 - \frac{1}{\beta H} \right) \frac{\gamma H r t}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \quad (2.52)$$

$$Q_{y=0} = Q_o = -(2\beta H - 1) \frac{\gamma r t}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \quad (2.53)$$

Rumus untuk momen vertikal di sembarang level  $y$  di atas dasar dinding dapat diperoleh dari

$$M_y = \frac{1}{\beta} [\beta M_o \Phi(\beta y) + Q_o \zeta(\beta y)] \quad (2.54)$$

Gaya geser cincin offset  $Q_y$  berkaitan dengan peralihan radial  $w_y$  dari dinding ini pada ketinggian  $y$  di atas dasar apabila tangki tersebut kosong dan nilai  $Q_o$  dan  $M_o$  akibat cairan penuh disertakan. Gaya ini dinyatakan sebagai

$$\Delta Q_y = \frac{Et}{2r\beta^3 D} [\beta M_o \Psi(\beta y) + Q_o \theta(\beta y)] \quad (2.55)$$

atau

$$\Delta Q_y = \frac{6(1-\mu^2)}{\beta^3 rt^2} [\beta M_o \Psi(\beta y) + Q_o \theta(\beta y)] \quad (2.56)$$

Gaya geser cincin  $Q_y$  di bidang setinggi  $y$  di atas dasar akan sama dengan selisih antara gaya cincin untuk dasar yang dapat bergerak bebas dan  $\Delta Q_y$

$$Q_y = F - \Delta Q_y \quad (2.57)$$

Supaya perhitungan yang dilakukan konsisten, maka asumsi yang digunakan untuk tanda positif

- Momen yang menyebabkan tarik di serat ekstrem luar
- Gaya radial tarik cincin
- Gaya thrust ke dalam menuju sumbu vertikal. Di sini, digunakan arah yang sama dengan arah untuk gaya tarik cincin agar kita bisa menggambar diagram untuk gaya prategang penyeimbang di sisi yang sama seperti gaya tarik cincin untuk perbandingan
- gerakan dinding lateral ke dalam menuju sumbu vertikal
- rotasi berlawanan jarum jam

Dari ekspresi-ekspresi di atas, kita dapat menghitung gaya geser dasar untuk perlakuan sendi

$$Q_o = \frac{2\beta^3 \gamma H (rt)^2}{12(1-\mu^2)} = \frac{\gamma H}{12(1-\mu^2)^{1/4}} (rt)^{1/2} \quad (2.58)$$

Nilai konstanta-konstanta cangkang  $\beta$ ,  $\beta^2$ , dan  $\beta^4$  di dalam persamaan-persamaan di atas adalah sebagai berikut

$$\beta^4 = \frac{Et}{4r^2 D} = \frac{3(1-\mu^2)}{(rt)^2} \quad (2.59)$$

$$\beta^3 = \frac{[3(1-\mu^2)]^{3/4}}{(rt)^{3/2}} \quad (2.60)$$

$$\beta^2 = \frac{[3(1-\mu^2)]^{1/4}}{(rt)} \quad (2.61)$$

$$\beta_s = \frac{[3(1-\mu^2)]^{1/4}}{(rt)^{1/2}} \quad (2.62)$$

## 2.6 Efek Prategang Terhadap Tegangan Dinding untuk Dasar Berupa Jepit Penuh, Sendi Penuh, dan Bergerak Bebas (Nawy, 2001)

Cairan yang terkandung dalam tangki silinder menyebabkan terjadinya tekanan radial ke arah luar  $\gamma h$  atau  $p$  pada dinding tangki, menghasilkan tarik cincin di setiap potongan horizontal dinding di seluruh tingginya. Gaya tarik cincin menyebabkan tegangan tarik di beton pada serat dinding ekstrim luar, yang dapat menimbulkan retak.

Untuk mencegah retak yang dapat menyebabkan kebocoran dan kerusakan struktural ini, prategang horisontal eksternal diberikan, yang menimbulkan gaya radial ke arah dalam yang dapat mengimbangi tarik radial ke luar. Selain itu, untuk mencegah terjadinya retak di dinding dalam ketika tangki tersebut kosong, prategang vertikal diberikan untuk mengurangi tarik residual di dalam jangkauan modulus raptur beton dan dengan menggunakan faktor keamanan yang memadai.

Untuk bisa mencegah terjadinya retak di muka luar dinding tangki, gaya prategang horisontal yang diberikan harus lebih besar daripada yang dibutuhkan untuk menetralisir atau mengimbangi gaya radial ke luar yang ditimbulkan oleh cairan, sehingga didapatkan tekan residual di tangki apabila tangki tersebut kosong. Peningkatan gaya prategang melingkar tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan baja prategang horisontal, dan kadang-kadang dengan baja lunak vertikal, juga menetralisir efek temperatur dan gradien kadar air di seluruh tebal dinding.

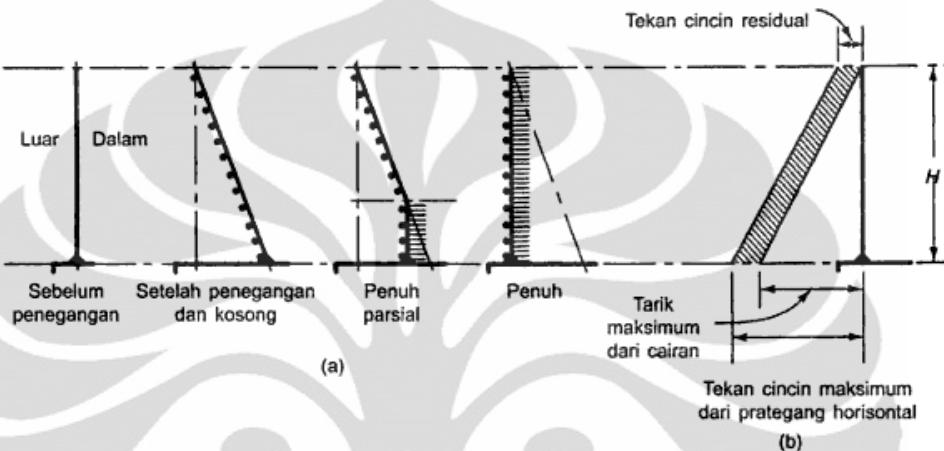
### 2.6.1 Dasar dinding yang dapat bergerak dengan bebas

Apabila kondisi tepinya sedemikian hingga dinding di dasar tangki dapat bergerak apabila tangki tersebut dibebani secara internal, maka tidak akan ada momen di dinding vertikal yang timbul akibat beban cairan maupun prategang ketika tangki dipenuhi sampai tinggi  $H$ . Hanya momen dengan nilai nominal kecil saja yang terjadi apabila tangki terisi sebagian, diberi prategang parsial, atau

Universitas Indonesia

kosong, dan prategang vertikal tidak diperlukan. Bentuk terdefleksi dari tangki yang bebas bergerak ditunjukkan dalam gambar.

Meskipun gerakan bebas merupakan kondisi ideal yang menjadikan struktur tersebut statis tertentu dan struktur yang paling ekonomis, kondisi ini sulit dicapai. Gaya-gaya gesekan yang dihasilkan di dasar dinding sesudah tangki digunakan menyebabkan alternatif ini tidak dapat diterapkan.



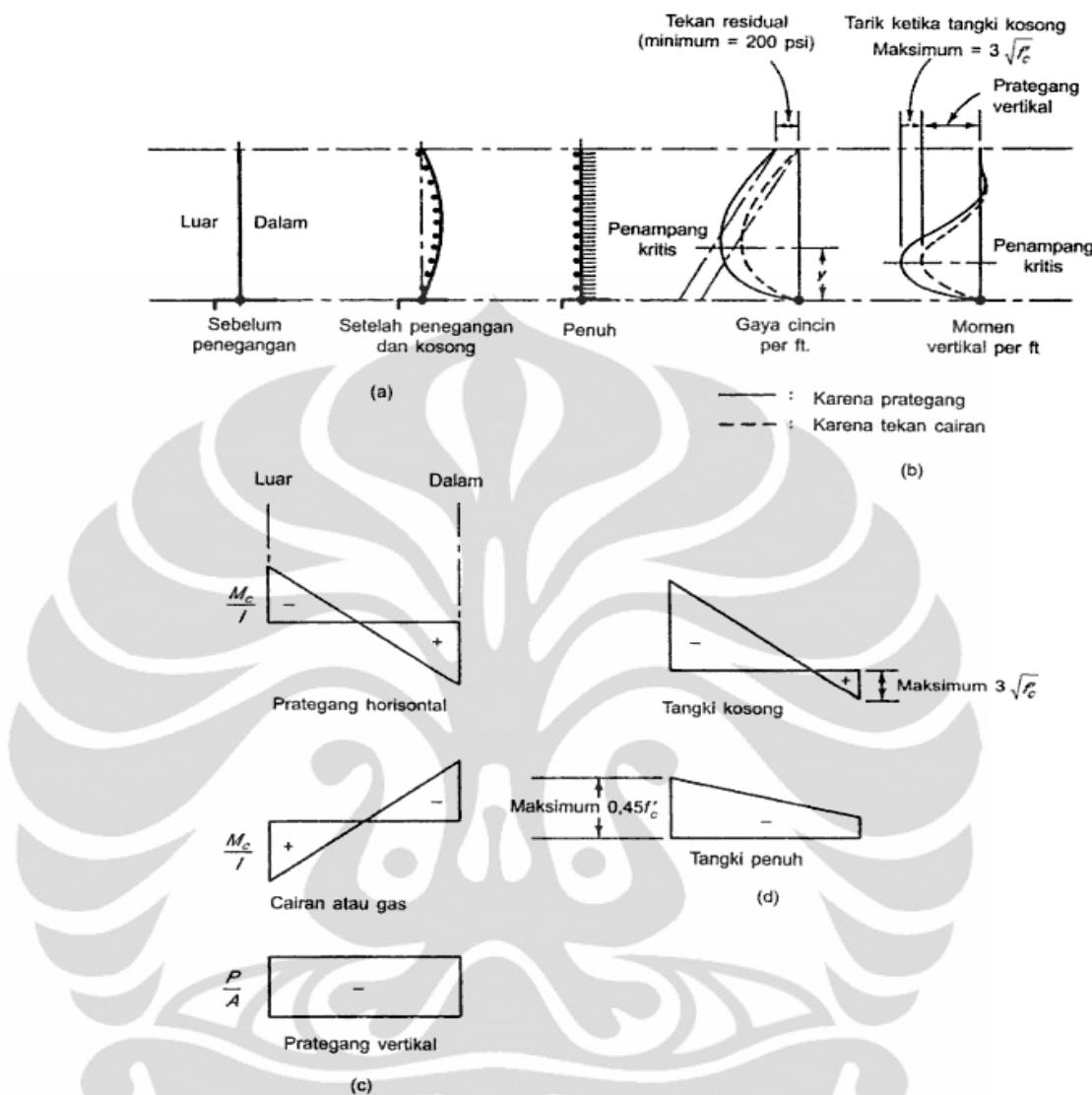
Gambar 2.7 Tangki bebas bergerak (a) Bentuk terdefleksi (b)Tekan Cincin Residual

Sumber : (Nawy, 2001)

### 2.6.2 Dasar dinding sendi.

Untuk dinding dengan sambungan sendi di dasarnya, gaya-gaya radial maksimum akibat cairan terkandung dan prategang pada penampang kritis sejauh  $y$  di atas dasar hampir sama dengan yang ada pada kasus dinding yang dapat bergerak bebas pada ketinggian  $y$ . Namun demikian, momen vertikal akan timbul, sehingga prategang vertikal menjadi perlu untuk mengurangi tegangan tarik di beton pada muka dinding luar.

Bentuk kurva defleksi dari dinding bersendi ditunjukkan di dalam gambar dan dapat dilihat bahwa penampang kritis untuk gaya cincin tidak selalu pada ketinggian yang sama dengan penampang kritis momennya.



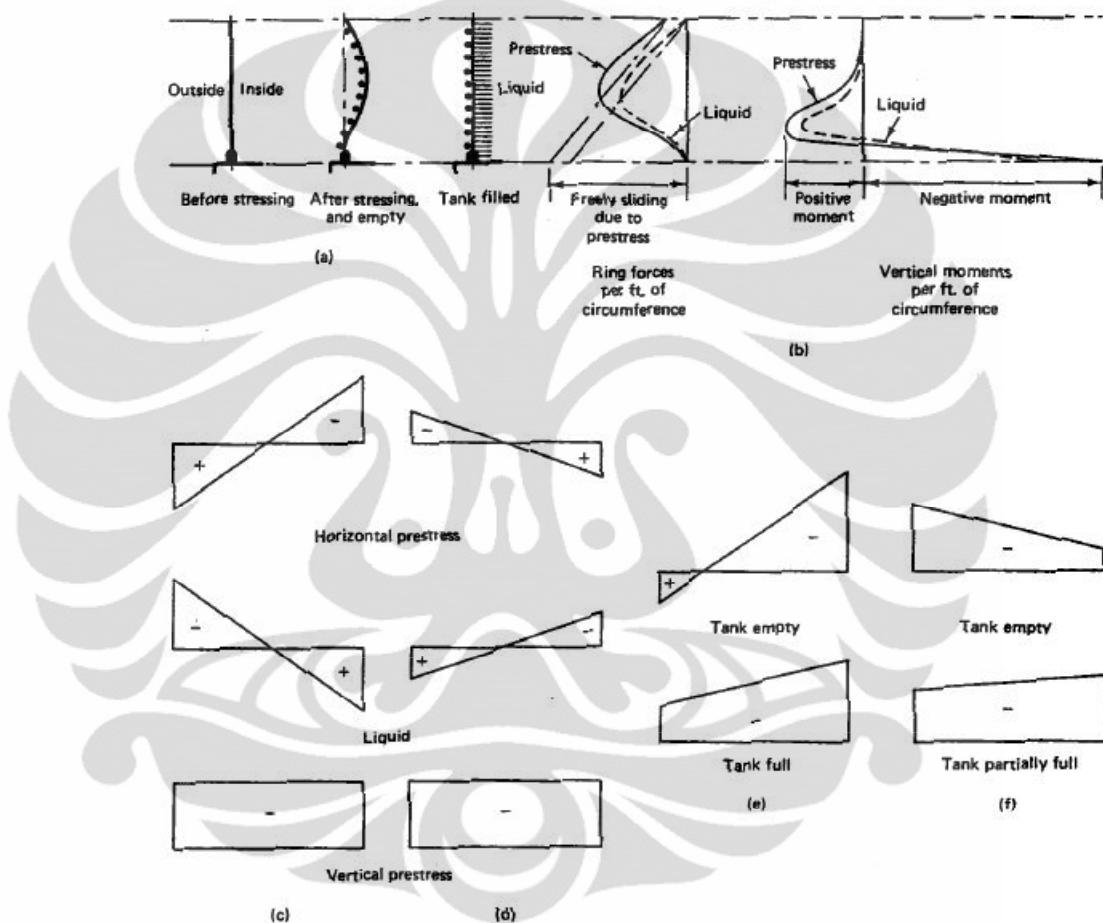
Gambar 2.8 Tangki dasar sendi. (a) Bentuk terdefleksi dari dinding tangki. (b) Gaya cincin horisontal dan momen vertikal. (c) Tegangan beton melalui ketebalan dinding. (d) tegangan dinding resultan

Sumber : (Nawy, 2001)

### 2.6.3 Dasar dinding jepit penuh

Perlakuan jepit penuh memberikan kekangan penuh terhadap rotasi di dasar dinding. Kondisi ini dapat dicapai apabila segmen yang lebih rendah dari dinding dicor secara monolit dan diangker penuh ke slab dasar yang mempunyai kekakuan serupa. Akan tetapi, sistem statis tak tentu seperti ini sulit dicapai, dan juga tidak ekonomis karena dasar tangki yang sangat besar dan penjepitan parsial menjadi diperlukan. Gaya horisontal radial dari prategang dan tekanan internal

tidak berubah dari bentuk segitiga untuk cairan. Namun demikian, kekangan yang diberikan oleh dasar slab horizontal mengubah gaya cincin dan menimbulkan momen tambahan di potongan vertikal dari dinding. Penjepitan di dasar mengakibakan peralihan tidak terjadi di bagian bawah maupun atas dari dasar dinding, dan perubahan kelengkungan di seluruh ketinggian dinding di atas dasar terjadi apabila tangki tersebut kosong.



Gambar 2.9 Tangki terjepit penuh (a) Deformasi dinding (b) Gaya cincin horizontal dan momen vertikal (c) tegangan pada dinding beton dalam keadaan penuh (d) tegangan pada dinding beton dalam keadaan penuh sebagian (e) Resultan tegangan tangki penuh (f) Resultan tegangan tangki penuh sebagian

Sumber : (Nawy, 2001)

Prategang vertikal yang dibutuhkan untuk tangki dengan dasar jepit penuh jauh lebih besar daripada prategang vertikal yang dibutuhkan untuk kondisi tepi lainnya. Ini diperlukan untuk mengatasi tegangan tarik yang tinggi pada dasar dinding di muka luar yang ditimbulkan oleh pergerakan negatif yang besar di dasar dan membalikkan kelengkungan di dekatnya. Dalam beberapa kasus, akan

lebih ekonomis apabila digunakan penulangan baja lunak di bagian bawah dinding selain prategang agar prategang vertikal yang dibutuhkan lebih sedikit, dan momen negatif selebihnya diberikan ke penulangan non prategang.

## 2.7 Syarat-syarat desain tangki bejana lingkaran beton prategang berdasarkan ACI 373-97

### 2.7.1 Tegangan

Tegangan izin untuk beton diberikan pada tabel berikut

Tabel 2.2 Tegangan Izin Beton Pada Tangki Lingkaran

Tipe dan limit tegangan	Beton dicor ditempat dan pracetak		Shortcrete dicor ditempat	
	Tegangan sementara $f_{ci}$ , psi	Tegangan beban-kerja $f_c$ , psi	Tegangan sementara $f_{ci}$ , psi	Tegangan beban-kerja $f_c$ , psi
Tekan aksial, $f_c$	$0.55 f_{ci}^{'}$	$0.45 f_c^{'}$	$0.45 f_{gi}^{'}$ tetapi tidak lebih dari $1600 + 40t_c$ psi	$0.38 f_{gi}^{'}$
Tarik aksial	0	0	0	0
Tekan lentur, $f_c$	$0.55 f_{ci}^{'}$	$0.4 f_c^{'}$	$0.45 f_{gi}^{'}$	$0.38 f_g^{'}$
Tekan lentur maksimum, $f_t$	$\approx 3\sqrt{f_c^{'}}$	$3\sqrt{f_c^{'}}$		
Tekan residual minimum, $f_{cv}$	$200 \left( \frac{f_{ci}}{f_c} \right)$	200 psi	$200 \left( \frac{f_{ci}}{f_c} \right)$	200 psi

Tabel 2.3 Tegangan di baja penulangan

Tipe tegangan	Tegangan izin maksimum
Gaya dongkrak tendon	$0.94 f_{py} \leq 0.85 f_{pu}$
Sesaat sesudah transfer prategang	$0.82 f_{py} \leq 0.75 f_{pu}$
Tendon pascatarik di angker dan coupler sesaat sesudah pengangkeraan tendon	$0.7 f_{pu}$
Tegangan beban kerja $f_{pe}$	$0.55 f_{pu}$
Baja lunak non prategang pada prategang awal, $f_{si}$	$f_y/1.6$
Tegangan beban-kerja akhir, $f_s$ (psi)	

Tipe tegangan	Tegangan izin maksimum
penyimpanan air minum	
Baja grade 60	24000
Penampungan korosif	18000
Penampungan kering	$f_y/1.8$

### 2.7.2 Faktor beban dan kekuatan yang dibutuhkan

Struktur bersama dengan komponen-komponen dan pondasinya, harus didesain sedemikian hingga kuat desainnya melebihi efek dari kombinasi beban terfaktor yang ditetapkan dalam ACI 318, ANSI/ASCE 7-05, atau sebagaimana dipertimbangkan oleh insinyur yang didasarkan atas analisis rasional.

Hal	Faktor beban
Tekanan cairan awal	1.2
Tekanan lateral beban dari material kering	1.6
Gaya-gaya prategang (ACI Committee 373, 1997)	
Prategang sebelum kehilangan	1.2
Prategang akhir setelah kehilangan	0.9

Tabel 2.4 Faktor pembebanan

Persamaan kuat momen nominal  $M_n$  serupa dengan yang digunakan untuk prategang linear, yaitu

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left( d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (2.63)$$

Dimana

$A_{ps}$  = baja prategang vertikal lebar per keliling satuan in<sup>2</sup>

$f_{ps}$  = tegangan di penulangan prategang pada kuat nominal, psi

$f_y$  = kuat leleh baja lunak, psi

### 2.7.3 Persyaratan dinding minimum

#### 2.7.3.1 Gaya melingkar

Cairan

$$F_i \text{ awal} = \gamma r (H - y) \frac{f_{pi}}{f_p} \quad (2.64)$$

per ft dinding

### 2.7.3.2 Tebal dan tegangan

Tebal dinding inti

$$t_{co} = \frac{F_i}{f_{ci}}, \text{ tidak kurang dari tebal dinding minimum}$$

### 2.7.3.3 Defleksi

Defleksi radial elastis awal tak terkekang (*unrestrained*) dinding akibat prategang awal adalah

$$\Delta_i = \frac{F_i r}{t_{co} E_c} \quad (2.65)$$

Dimana

$r$  = jari-jari dalam tangki

$t_{co}$  = tebal inti dinding di atas atau di bawah dinding

$E_c = 57000\sqrt{f_c}$  untuk beton berbobot normal dan *shortcrete*

Defleksi radial akhir  $\Delta_f$  dapat mencapai 1,5 sampai 3 kali defleksi tak terkekang awal. Untuk kondisi normal, defleksi radial akhir yang diizinkan dapat diambil sebesar  $\Delta_f = 1.7\Delta_i$

### 2.7.3.4 Tebal dinding minimum

Dinding yang dicor di tempat

Tipe Tangki	Tebal dinding minimum
Tangki diafragma shortcrete baja	3.5 in.
Tangki tanpa prategang vertikal	8 in.
Tangki dengan prategang vertikal	7 in.

Dinding pracetak

Tipe Tangki	Tebal dinding minimum
Tangki dengan pratarik vertikal dan prategang melingkar eksternal	5 in.
Tangki dengan pratarik vertikal dan prategang melingkar internal	6 in.
Tangki dengan pratarik vertikal dan prategang melingkar internal	7 in.

Untuk tangki yang diberi prategang dengan menggunakan tendon, tebalnya tidak dapat kurang dari 9 in. berdasarkan tinjauan praktis

#### 2.7.4 Kontrol retak tangki

Vessey dan Preston menyarankan rumus-rumus berikut yang didasarkan atas penelitian Nawy mengenai lebar retak maksimum di permukaan eksterior dari dinding tangki prategang

$$w_{maks} = 4,1 \times 10^{-6} \varepsilon_{ct} E_{ps} \sqrt{I_x} \quad (2.66)$$

dimana

$\varepsilon_{ct}$  = regangan permukaan tarik di beton

$$I_x = \text{indeks grid} = \frac{8}{\pi} \left( \frac{s_2 s_1 t_b}{\phi_1} \right)$$

$s_2$  = jarak penulang dalam arah "2"

$s_1$  = jarak penulang dalam arah tegak lurus "1" (horisontal)

$t_b$  = selimut beton sampai pusat baja

$\phi_1$  = diameter baja dalam arah utama "1"

Regangan tarik dapat dihitung dari

$$\varepsilon_{ct} = \frac{\alpha_t f_{pi}}{E_{ps}} \quad (2.67)$$

$\alpha_t$  = parameter tegangan  $\approx f_p/f_{pi}$

dimana  $f_p$  = tegangan aktual di baja prategang

$f_{pi}$  = tegangan awal sebelum kehilangan

Untuk tangki yang menampung cairan, lebar retak maksimum yang diperkenankan adalah 0.004 in.

### 2.8 Desain pembebahan gempa berdasarkan ACI 350.3

ACI 350.3 mencakup seluruh tipe tangki (prategang, non prategang, silinder dan rektangular). Standar ACI yang baru memberikan bagaimana cara mendesain yang cukup akurat sebagai suplemen pasal 21 ACI 350 sehingga dapat memperlengkapi *engineer* dengan alat yang komprehensif untuk menganalisis dan mendesain tangki dengan berbagai macam tipe. (Munshi & Legatos, 2003)

### 2.8.1 Tekanan gempa di atas dasar

Dinding dari struktur penampung cairan harus didesain untuk gaya-gaya dinamik berikut ini sebagai tambahan dari tekanan statis

- Gaya inersia  $P_w$  dan  $P_r$
- Tekanan impulsif hidrodinamik  $P_i$  dari cairan di dalamnya
- Tekanan konvektif hidrodinamik  $P_c$  dari cairan di dalamnya
- Tekanan dinamik dari tanah dari tanah tersaturasi dan tak tersaturasi terhadap bagian dinding yang tertimbun.
- Pengaruh dari percepatan vertikal

### 2.8.2 Gaya lateral dinamik

Gaya-gaya dinamik lateral di atas dasar dapat ditentukan sebagai berikut

$$P_w = ZSIC_i \times \frac{\varepsilon W_w}{R_{wi}} \quad (2.68)$$

$$P_w' = ZSIC_i \times \frac{\varepsilon W_w'}{R_{wi}} \quad (2.69)$$

$$P_r = ZSIC_i \times \frac{W_r}{R_{wi}} \quad (2.70)$$

$$P_j = ZSIC_i \times \frac{W_i}{R_{wi}} \quad (2.71)$$

$$P_c = ZSIC_c \times \frac{W_c}{R_{wc}} \quad (2.72)$$

Gerakan tanah yang terjadi dapat direpresentasikan sebagai sebuah respon spektrum elastis yang diperoleh dari data rekam aktual gempa pada suatu wilayah atau dibentuk dari perbandingan dengan wilayah lain dengan karakteristik gempa dan tanah yang relatif mirip.

Profil respons spektrum ditentukan dari hasil kali ZC. Faktor Z merupakan percepatan maksimum efektif pada site, sedangkan C merupakan *period-dependent spectral-amplification factor* yang terkait dengan impulsif dan konvektif komponen ( $C_i$  dan  $C_c$ ). Nilai I berfungsi sebagai faktor keamanan untuk beberapa kategori struktur. Faktor respons termodifikasi  $R_{wc}$  dan  $R_{wi}$  mengurangi respons elastis spektrum akibat duktilitas struktur, properti energi terdisipasi, dan

**Universitas Indonesia**

redundansi. Dengan demikian respons inelastis spektrum direpresentasikan sebagai ZISC/R<sub>w</sub>

Nilai S, I dan R dapat diambil berdasarkan tabel berikut ini

Tabel 2.5 Nilai S, I dan R

**Table 4(a)—Seismic zone factor Z\***

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

\*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>

†See Fig. 4.1.

**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.

**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.

**Table 4(d)—Response modification factor R<sub>w</sub>**

Type of structure	R <sub>w</sub> on or above grade	Buried*	R <sub>wC</sub>
(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<sub>w</sub> value may be linearly interpolated between that shown for tanks on grade, and for buried tanks.

<sup>†</sup>R<sub>w</sub> = 4.5 is the maximum R<sub>w</sub> 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.

Sumber : (ACI Committee 350, 2001)

### 2.8.3 Gaya geser dasar total

Besar gaya geser dasar akibat gaya gempa yang terjadi pada dasar tangki dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut

$$V = \sqrt{(P_i + P_w + P_r)^2 + P_c^2} \quad (2.73)$$

Momen lentur pada keseluruhan penampang melintang tangki tepat diatas dasar dinding tangki (*Exclude Base Pressure*)

$$M_w = P_w \times h_w \quad (2.74)$$

$$M_r = P_r \times h_r \quad (2.75)$$

$$M_i = P_i \times h_i \quad (2.76)$$

$$M_c = P_c \times h_c \quad (2.77)$$

$$M_b = \sqrt{(M_i + M_w + M_r)^2 + M_c^2} \quad (2.78)$$

Momen guling pada dasar tangki termasuk bagian bawah tangki dan struktur pendukung (*Include Base Pressure*)

$$M_w = P_w \times h_w$$

$$M_r = P_r \times h_r$$

$$M_i' = P_i \times h_i' \quad (2.79)$$

$$M_c' = P_c \times h_c' \quad (2.80)$$

$$M_o = \sqrt{(M_i' + M_w + M_r)^2 + M_c'^2} \quad (2.81)$$

Tangki harus didesain untuk menahan efek dari percepatan vertikal. Salah satu penyebabnya adalah tekanan efektif fluida akan dapat meningkat atau menurun dikarenakan percepatan vertikal. Dalam analisis yang lebih rinci berat efektif pada struktur beton juga dapat mengalami perubahan serupa. Apabila respons spektrum pada daerah site tersebut tidak ada, maka rasio b antara percepatan vertikal dan horizontal tidak boleh kurang daripada 2/3.

Beban hidrostatis  $q_{hy}$  dari isi tangki harus dikalikan dengan percepatan spektral  $\ddot{u}_v$  untuk memperhitungkan pengaruh dari percepatan vertikal. Tekanan hidrodinamik dapat dihitung sebagai

$$P_{hy} = \ddot{u}_v \times q_{hy} \quad (2.82)$$

Dimana

$$\ddot{u}_v = ZSC_v I \frac{b}{R_{wi}} \quad (2.83)$$

dengan  $C_v = \frac{1.25}{T^{2/3} v} \leq \frac{2.75}{S}$  untuk tangki bulat (*circular*)

dan

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma_L D H_L^2}{2g t_w E_c}} \quad (2.84)$$

## 2.9 Distribusi beban gempa

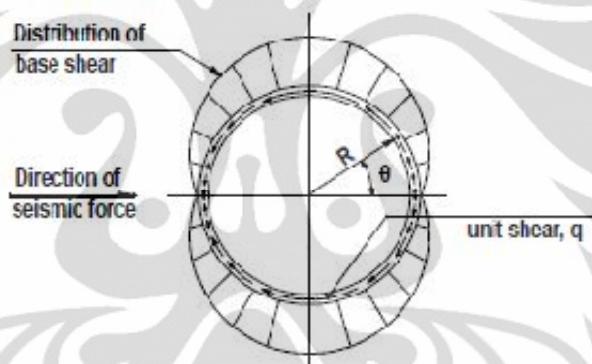
Struktur penampung cairan harus dapat didesain untuk menahan gaya geser dinamik dan distribusi tekanan sebagai tambahan distribusi beban statis.

**Universitas Indonesia**

### 2.9.1 Transfer Geser (*Shear Transfer*)

Sambungan dinding ke dasar dan dinding ke atap harus didesain untuk menahan gaya geser akibat gempa. Pada perletakan jepit dan sendi pada tangki silinder, gaya geser gempa pada dasar ditransmisikan sebagian oleh geser membran (tangensial) dan sisanya oleh geser radial yang menyebabkan lentur vertikal. Untuk tangki dengan perbandingan tinggi dan diameter 1:4 ( $D/H_L = 4.0$ ), kira-kira sekitar 20% gaya geser dasar ditransmisikan oleh reaksi dasar radial. Sekitar 80% sisanya ditransmisikan oleh geser tangensial  $Q$ . Untuk mentransfer geser tangensial  $Q$  ini, diperlukan gaya geser merata,  $q$  pada muka dinding/dasar dimana

$$q = \frac{q}{\pi R} \sin \theta, \text{ distribusi gaya ini disajikan dalam gambar berikut}$$



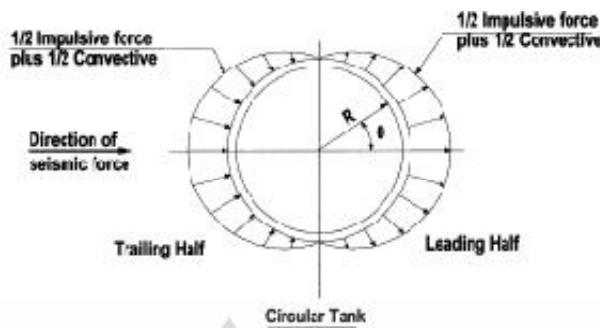
Gambar 2.10 Shear transfer pada dasar tangki lingkaran

Sumber : (ACI Committee 350, 2001)

Nilai maksimum geser tangensial terjadi pada titik di tangki yang memiliki orientasi sebesar  $90^\circ$  terhadap arah gempa yang ditinjau, dan diberikan sebagai

$$q_{\max} = \frac{Q}{\pi R} = \frac{0.8V}{\pi R}$$

Gaya geser radial dibentuk oleh respon lentur pada dinding dekat dengan dasar dan proporsional terhadap gaya hidrodinamik yang ditunjukkan pada gambar berikut ini



Gambar 2.11 Distribusi tekanan hidrodinamik pada dinding tangki

Sumber : (ACI Committee 350, 2001)

Gaya geser radial mencapai nilai maksimumnya ketika dinding tangki terorientasi 0 sampai  $180^\circ$  terhadap gerakan tanah dan dapat ditentukan dengan menggunakan teori cangkang silindris dan dimensi tangki. Desain kaki dinding harus memperhitungkan gaya geser radial ini.

Untuk dasar yang terangkur, fleksibel pada tangki silinder, diasumsikan bahwa seluruh gaya geser dasar ditransmisikan oleh gesek membran (tangensial) dengan lentur vertikal yang tidak signifikan ( $Q = 1.0V$ )

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

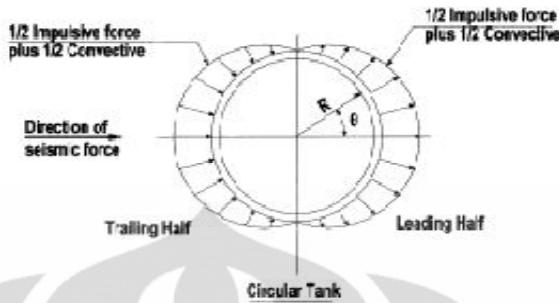
Pada tangki yang dapat bergerak bebas, gaya geser ditransmisikan melalui gaya gesek saja. Jika gaya gesek antara dasar dinding dan kaki atau antar dasar dinding dan *bearing pad* tidak memadai untuk menahan gaya geser gempa, maka diperlukan penahan mekanis lainnya seperti dowel atau kabel galvanis

### 2.9.2 Distribusi gaya dinamik di atas dasar

Dinding silinder pada tangki silinder dibebani oleh

- Gaya inersia pada dinding yang terdistribusi merata pada sekelilingnya
- Setengah dari gaya impulsif  $P_i$  diberikan simetris pada  $\theta = 0$  dan mengarah ke luar pada setengah dinding dan setengah  $P_i$  lainnya simetris terhadap  $\theta = \pi$  dan bekerja masuk ke dalam pada setengah dinding diseberangnya
- Setengah dari gaya impulsif  $P_c$  diberikan simetris pada  $\theta = 0$  dan mengarah ke luar pada setengah dinding dan setengah  $P_c$  lainnya

simetris terhadap  $\theta = \pi$  dan bekerja masuk ke dalam pada setengah dinding diseberangnya

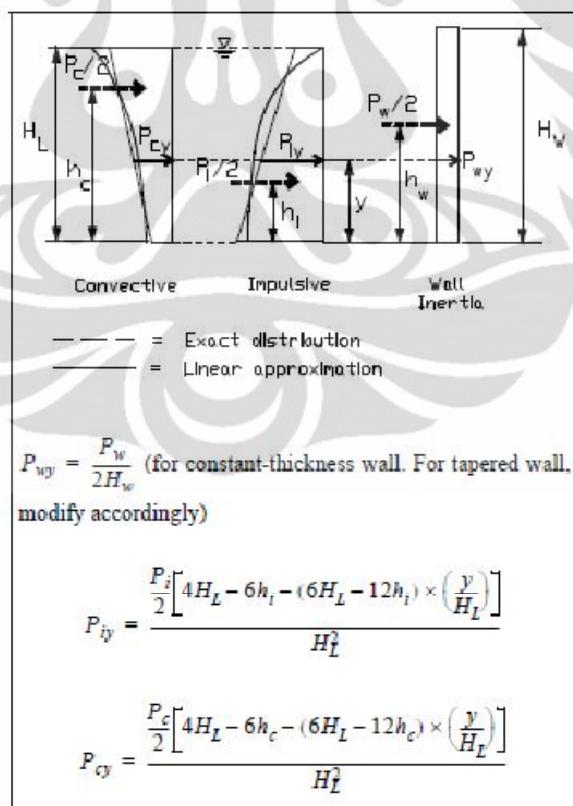


Gambar 2.12 Distribusi Tekanan Impulsif dan Konvektif

Sumber : (ACI Comittee 350, 2001)

- Gaya dinamik tanah dan tekanan air tanah terhadap *trailing half* pada bagian dinding yang terkubur.

Distribusi vertikal gaya dinamik yang bekerja pada setengah dinding dapat diasumsikan sebagai berikut



Gambar 2.13 Distribusi gaya vertikal pada tangki lingkaran

Sumber : (ACI Comittee 350, 2001)

**Universitas Indonesia**

Distribusi horizontal pada tekanan dinamik sepanjang diameter D dapat diasumsikan sebagai berikut

$$P_{wy} = \frac{P_{wy}}{\pi R} \quad (2.85)$$

$$P_{iy} = \frac{2P_{iy}}{\pi R} \times \cos \theta \quad (2.86)$$

$$P_{cy} = \frac{16P_{cy}}{9\pi R} \times \cos \theta \quad (2.87)$$

$$P_{hy} = \ddot{u}_v q_{hy} \quad (2.88)$$

## 2.10 Tegangan akibat gempa

Tegangan lentur vertikal dan tegangan geser pada dinding dan dasar dinding karena gaya gempa dihitung berdasarkan aksi cangkang menggunakan distribusi tekanan yang dapat diterima

Gaya membran hidrodinamik (hoop) pada dinding silinder terkait dengan ketinggian cairan y diatas dasar tangki dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut

$$N_y = \sqrt{(N_{iy} + N_{wy})^2 + N_{cy}^2 + N_{hy}^2} \quad (2.89)$$

dan hoop stress yang terjadi

$$\sigma = \frac{N_y}{t_w} \quad (2.90)$$

dimana  $t_w$  merupakan ketebalan dinding yang ditinjau.

Nilai-nilai pada persamaan diatas adalah sebagai berikut

$$N_{iy} = P_{iy} \times R = \frac{2P_{iy}}{\pi} \quad (2.91)$$

$$N_{cy} = P_{cy} \times R = \frac{2P_{cy}}{\pi} \quad (2.92)$$

$$N_{hy} = \ddot{u}_v \times Q_{hy} \quad (2.93)$$

$$N_{wy} = P_{wy} \times R = \frac{P_{wy}}{\pi} \quad (2.94)$$

dimana

$$Q_{hy} = q_{hy} \times R \quad (2.95)$$

## 2.11 Osilasi Gempa

Percepatan gempa horizontal dapat menyebabkan cairan menjadi tumpah akibat perpindahan permukaan cairan arah vertikal. Perpindahan maksimum vertikal  $d_{max}$  dapat dihitung dari ekspresi berikut

$$d_{max} = \left( \frac{D}{2} \right) (ZSI \times C_c) \quad (2.96)$$

dimana  $C_c$  merupakan spectral amplification factor

Besaran freeboard apabila diinginkan dapat ditentukan setelah diketahui nilai  $d_{max}$  ini

Berdasarkan ASCE 7-05, untuk faktor kepentingan berikut kategorinya, dapat ditentukan berapakah batas freeboard minimum dimana notasi  $\delta_s = d_{max}$  pada persamaan di atas

Tabel 2.6 Kategori okupansi berdasarkan faktor kepentingan

Occupancy Category	I
I or II	1.0
III	1.25
IV	1.5

Tabel 2.7 Freeboard minimum yang diperlukan

Value of $S_{DS}$	Occupancy Category		
	I or II	III	III
$S_{DS} < 0.167g$	a	a	$\delta_s^c$
$0.167g \leq S_{DS} < 0.33g$	a	a	$\delta_s^c$
$0.33g \leq S_{DS} < 0.50g$	a	$0.7\delta_s^b$	$\delta_s^c$
$S_{DS} \geq 0.50g$	a	$0.7\delta_s^b$	$\delta_s^c$

<sup>a</sup>No minimum freeboard is required.

<sup>b</sup>A freeboard equal to  $0.7\delta_s$  is required unless one of the following alternatives is provided: (1) Secondary containment is provided to control the product spill. (2) The roof and supporting structure are designed to contain the sloshing liquid.

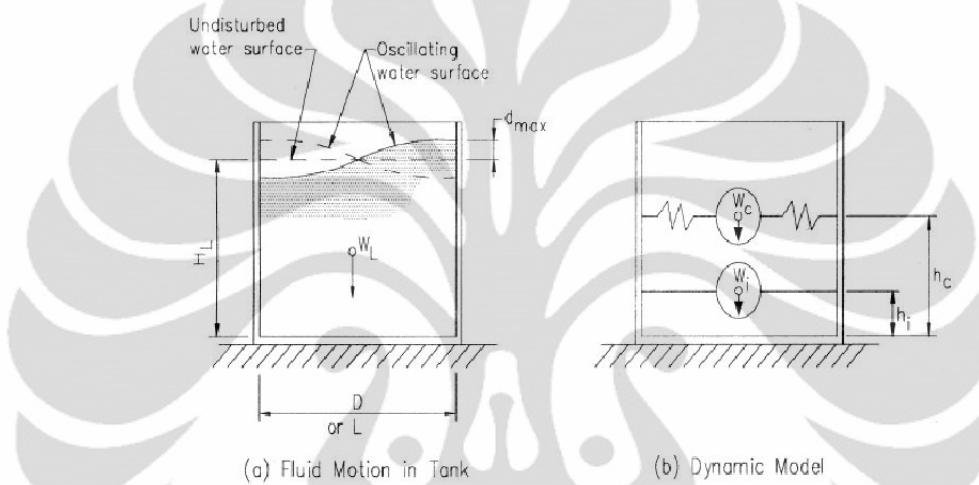
<sup>c</sup>Freeboard equal to the calculated wave height,  $\delta_s$ , is required unless one of the following alternatives is provided: (1) Secondary containment is provided to control the product spill. (2) The roof and supporting structure are designed to contain the sloshing liquid.

Sumber : (American Society of Civil Engineers, 2006)

## 2.12 Permodelan dinamik

Prosedur desain dari tangki silinder memperhatikan analisis seismik struktur penampung cairan yang terkait dengan percepatan horizontal harus melibatkan gaya-gaya inersia yang dihasilkan dari percepatan struktur itu sendiri dan gaya-gaya hidrodinamik yang dihasilkan oleh cairan yang tertampung.

Gambar berikut menunjukkan model dinamik ekivalen untuk menghitung resultan dari gaya-gaya seismik yang bekerja pada dasar penampung dengan dinding kaku.



Gambar 2.14 Model Dinamik Ekivalen

Sumber : (ACI Committee 350, 2001)

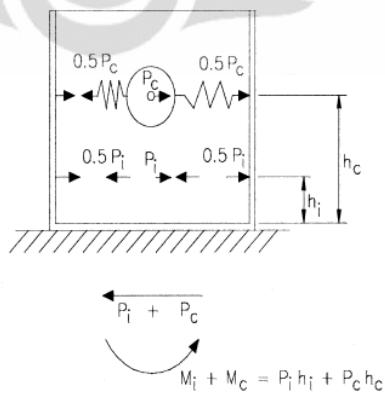
Model ini telah diterima selama 30 tahun terakhir. Dalam model ini,  $W_i$  merepresentasikan efek resultan dari tekanan impulsif gempa pada dinding tangki.  $W_c$  merepresentasikan resultan dari tekanan fluida yang tumpah.

Pada model,  $W_i$  sangat kaku menempel pada dinding tangki pada ketinggian  $h_i$  di atas dasar tangki yang terhubung dengan lokasi resultan gaya impulsif  $P_i$ .  $W_i$  bergerak bersama dengan dinding tangki ketika keduanya merespon guncangan tanah (fluida diasumsikan tidak dapat menahan tekanan[inkompresibel]). Tekanan impulsif dihasilkan dari percepatan seismik dinding tangki sedemikian hingga gaya  $P_i$  terbagi rata menjadi tekanan pada dinding yang kemudian mengakselerasi fluida. Selama gempa bumi, gaya  $P_i$  berubah arah beberapa kali per detik, terkait dengan perubahan percepatan dasar. Momen guling akibat  $P_i$  dengan demikian sering menjadi tidak efektif untuk menjadi acuan gaya yang menggulingkan tangki.

**Universitas Indonesia**

$W_c$  merupakan massa ekivalen dari fluida yang berosilasi yang menghasilkan tekanan konvektif pada dinding tangki dengan gaya resultan  $P_c$ , yang bekerja pada tinggi  $h_c$  di atas dasar tangki. Pada model,  $W_c$  dikaitkan pada dinding tangki dengan menggunakan pegas yang menghasilkan getaran periodik yang terkait dengan periode gerakan air *sloshing*. Tekanan tumpah pada dinding tangki menghasilkan gerakan fluida yang terkait dengan osilasi gelombang. Periode osilasi pada gerakan ini bergantung pada rasio kedalaman cairan terhadap diameter tangki dan biasanya beberapa detik. Momen guling yang dihasilkan oleh  $P_c$  bekerja pada beberapa waktu dan dapat mengangkat dinding tangki jika penahannya kurang kuat. Gaya-gaya  $P_i$  dan  $P_c$  bekerja independen dan bersamaan pada tangki. Gaya  $P_i$  utamanya memberi tegangan pada dinding tangki dimana  $P_c$  utamanya memberi gaya angkat pada dinding tangki. Getaran vertikal tanah ditransmisikan pada fluida, dengan demikian menghasilkan tekanan yang bekerja pada dinding tangki. Keduanya bekerja untuk meningkatkan atau menurunkan tegangan cincin.

Gaya  $P_c$  berfluktuasi sinusoidal dengan periode getaran yang bergantung pada dimensi tangki selama beberapa detik atau lebih. Durasi dari *sloshing* ini sekitar 20 sampai 40 detik untuk gempa dengan magnitudo 6.5 sampai 7.5. Perhatikan bahwa peredaman air yang *sloshing* ini kecil, sekitar 0.5% sampai 1% terhadap *critical damping*. *Sloshing* ini meningkatkan dan menurunkan tekanan fluida pada dinding. Secara umum nilainya lebih kecil dari efek impulsif, tetapi jika bobot mati yang tersedia kurang memadai, tangki dapat cenderung terangkat.



Gambar 2.15 Keseimbangan dinamik gaya-gaya horisontal

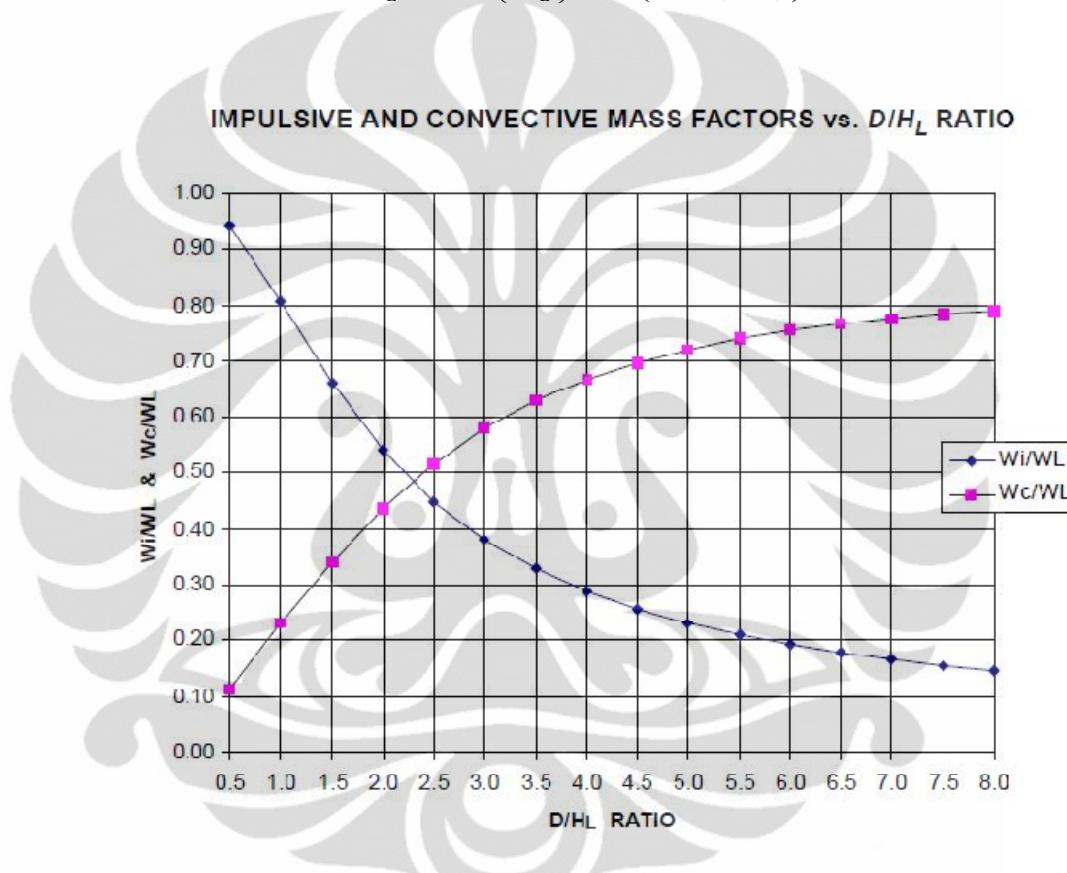
Sumber : (ACI Comittee 350, 2001)

Universitas Indonesia

### 2.12.1 Massa ekivalen pada cairan yang terakselerasi

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh\left(0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)\right)}{0.866\left(\frac{D}{H_L}\right)} \quad (2.97)$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0.23\left(\frac{D}{H_L}\right)\tanh\left(3.68\left(\frac{H_L}{D}\right)\right) \quad (2.98)$$



Grafik 2.1 Faktor massa Impulsif dan convektif vs ratio D/H<sub>L</sub>

### 2.12.2 Tinggi ke pusat gravitasi, tidak termasuk tekanan dasar

Untuk tangki dengan  $\frac{D}{H_L} < 1.333$ ,

$$\frac{h_i}{H_L} = 0.5 - 0.09375\left(\frac{D}{H_L}\right) \quad (2.99)$$

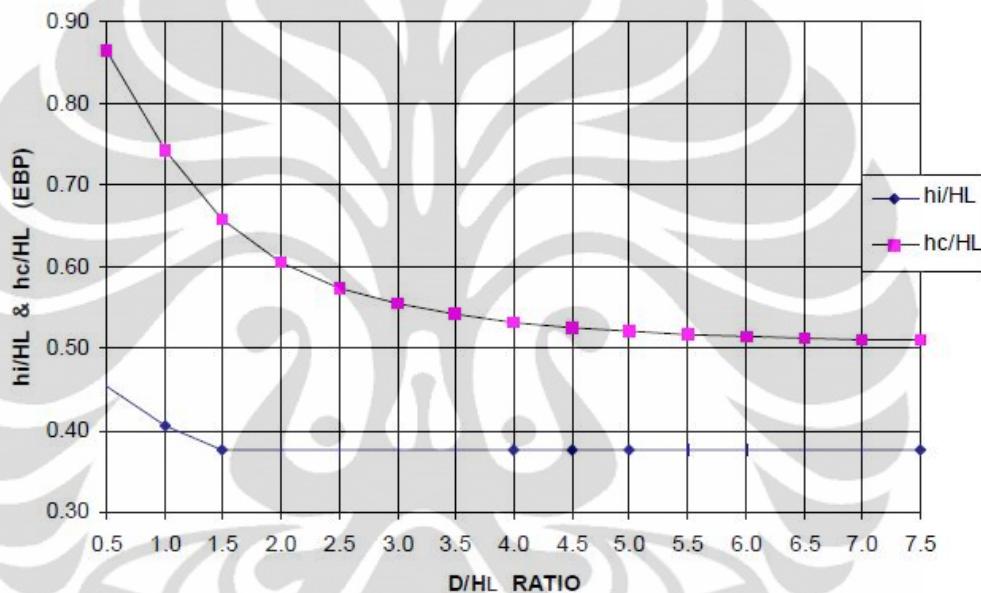
Untuk tangki dengan  $\frac{L}{H_L} \geq 1.333$ ,

$$\frac{h_i}{H_L} = 0.375 \quad (2.100)$$

Untuk semua tangki

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right] - 1}{3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \times \sinh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right]} \quad (2.101)$$

**IMPULSIVE AND CONVECTIVE HEIGHT FACTORS vs. D/H<sub>L</sub> RATIO**



Grafik 2.2 Faktor tinggi impulsif dan convektif vs ratio D/H<sub>L</sub>

### 2.12.3 Tinggi ke pusat gravitasi, termasuk tekanan dasar

Untuk tangki dengan  $\frac{D}{H_L} < 0.75$ ,

$$\frac{h_i'}{H_L} = 0.45 \quad (2.102)$$

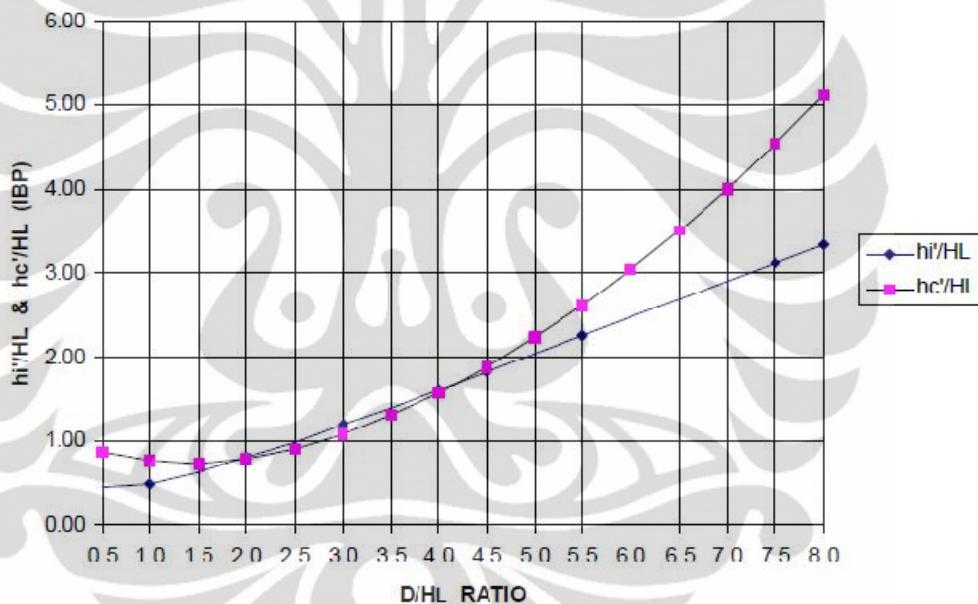
Untuk tangki dengan  $\frac{L}{H_L} \geq 0.75$ ,

$$\frac{h_i'}{H_L} = \frac{0.866 \left( \frac{D}{H_L} \right)}{2 \times \tanh \left[ 0.866 \left( \frac{D}{H_L} \right) \right]} - \frac{1}{8} \quad (2.103)$$

Untuk semua tangki

$$\frac{h_c'}{H_L} = 1 - \frac{\cosh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right] - 2.01}{3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \times \sinh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right]} \quad (2.104)$$

**IMPULSIVE AND CONVECTIVE HEIGHT FACTORS vs. D/H<sub>L</sub> RATIO**



Grafik 2.3 Faktor tinggi impulsif dan convektif vs ratio D/HL

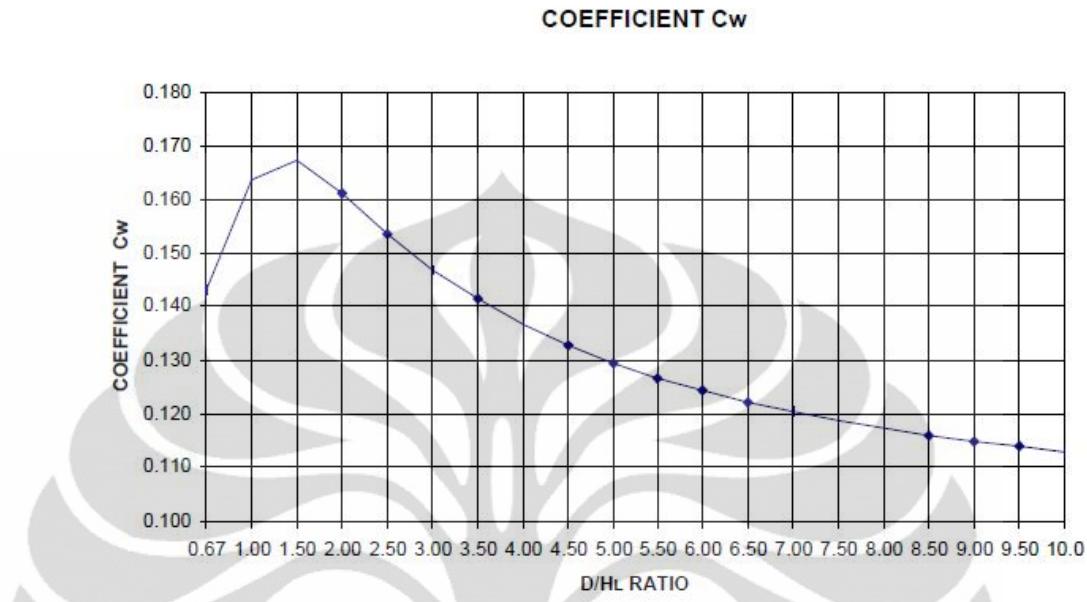
#### 2.12.4 Properti dinamik

Untuk tangki tipe 2.1 dan 2.2, periode impulsif dirumuskan sebagai berikut

$$\omega_i = C_I \times \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{10^3 E_c}{\rho_c}} \quad (2.105)$$

$$C_I = C_w \times \sqrt{\frac{t_w}{10R}} \quad (2.106)$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (2.107)$$

Grafik 2.4 Koefisien C<sub>w</sub>

Untuk tangki tipe 2.3 periode impulsifnya dirumuskan sebagai berikut

$$T_i = \sqrt{\frac{8\pi (W_w + W_r + W_i)}{gDk_a}} \quad (2.108)$$

tetapi nilai T<sub>i</sub> tidak boleh melebihi 1.25 s

$$k_a = 10^3 \left[ \left( \frac{A_s E_s \cos^2 \alpha}{L_s S_s} \right) + \left( \frac{2G_p w_p L_p}{t_p S_p} \right) \right] \quad (2.109)$$

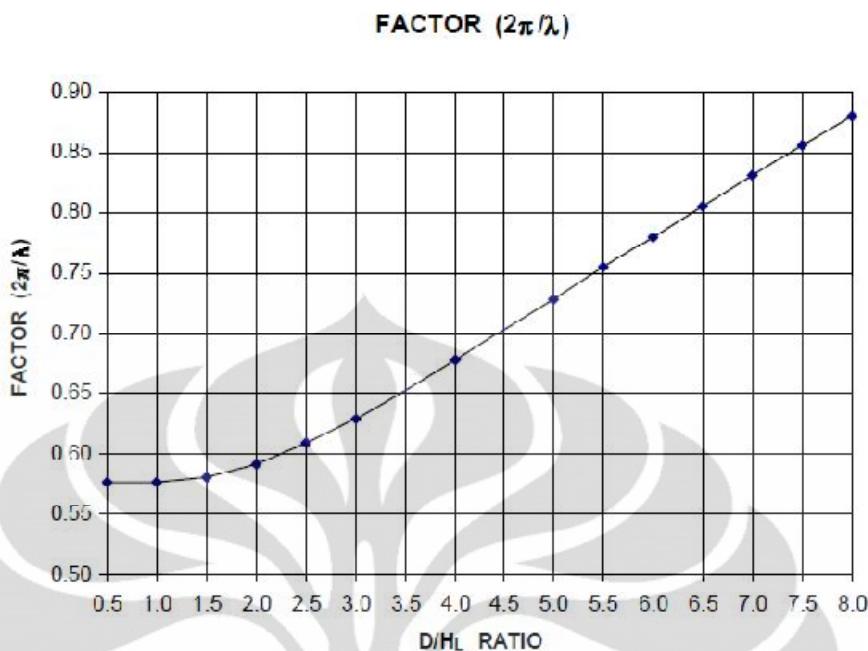
Periode konvektif tangki silinder

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{D}} \quad (2.110)$$

dimana

$$\lambda = \sqrt{3.68 g \tanh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right]} \quad (2.111)$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{D} \quad (2.112)$$



Grafik 2.5 Faktor (2π/λ)

### 2.12.5 Faktor C<sub>i</sub> dan C<sub>c</sub>

C<sub>i</sub> dapat ditentukan sebagai berikut

Untuk  $T_i \leq 0.31\text{s}$

$$C_i = \frac{2.75}{S} \quad (2.113)$$

$T_i > 0.31\text{s}$

$$C_i = \frac{1.25}{T_i^{2/3}} \frac{2.75}{S} \quad (2.114)$$

C<sub>c</sub> dapat ditentukan sebagai berikut

$T_i \geq 2.4\text{s}$

$$C_c = \frac{6.0}{T_c^2} \quad (2.115)$$

Dalam praktik nyata, T<sub>c</sub> memiliki nilai yang lebih besar dari 2.4 s. Dalam kondisi dimana T<sub>c</sub> < 2.4 s, C<sub>c</sub> dapat diperkirakan berdasarkan persamaan berikut

$$C_c = 1.5 \times \frac{1.25}{T_c^{2/3}} = \frac{1.875}{T_c^{2/3}} \leq \frac{2.75}{S} \quad (2.116)$$

Atau  $C_i$  dan  $C_c$  secara konservatif dapat diambil  $\frac{2.75}{S}$  untuk tangki apapun

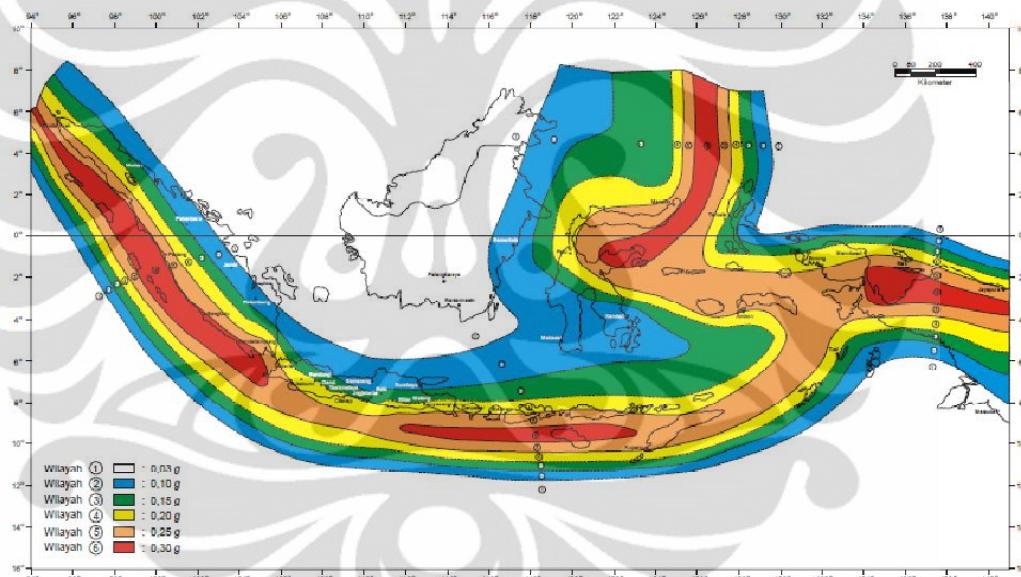
#### 2.12.6 Koefisien efektif massa

Koefisien efektif massa merupakan rasio dari massa dinamik ekivalen (tergeneralisasi) terhadap total massa sebenarnya

$$\varepsilon = \left[ 0.0151 \left( \frac{D}{H_L} \right)^2 - 0.1908 \left( \frac{D}{H_L} \right) + 1.021 \right] \leq 1 \quad (2.117)$$

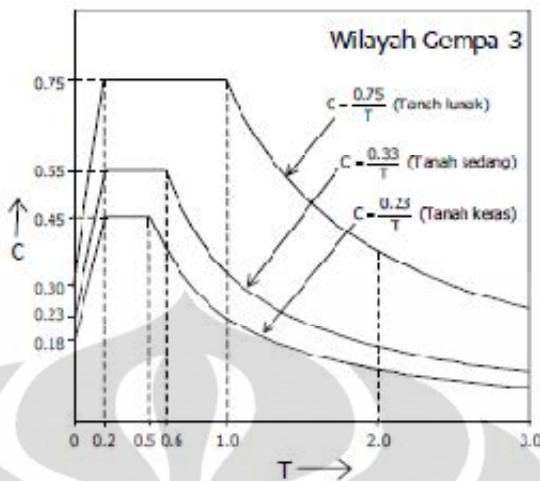
### 2.13 Perencanaan Gempa untuk wilayah Indonesia

Dalam mendesain tangki di wilayah Indonesia, terdapat beberapa parameter yang perlu disuaikan untuk kondisi tanah Indonesia.



Gambar 2.16 Wilayah Gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan periode ulang 500 tahun

Sumber : (SNI-1726-2002, 2002)



Gambar 2.17 Respons Spektrum Gempa Rencana

Sumber : (SNI-1726-2002, 2002)

Ringkasan spektrum gempa rencana untuk berbagai wilayah dengan berbagai kondisi tanah

Wilayah Gempa	Tanah Keras $T_c = 0,5$ det.		Tanah Sedang $T_c = 0,6$ det.		Tanah Lunak $T_c = 1,0$ det.	
	$A_m$	$A_r$	$A_m$	$A_r$	$A_m$	$A_r$
1	0,10	0,05	0,13	0,08	0,20	0,20
2	0,30	0,15	0,38	0,23	0,50	0,50
3	0,45	0,23	0,55	0,33	0,75	0,75
4	0,60	0,30	0,70	0,42	0,85	0,85
5	0,70	0,35	0,83	0,50	0,90	0,90
6	0,83	0,42	0,90	0,54	0,95	0,95

Tabel 2.8 Respon spektrum gempa rencana

Sumber : (SNI-1726-2002, 2002)

Koefisien untuk menghitung respons gempa vertikal

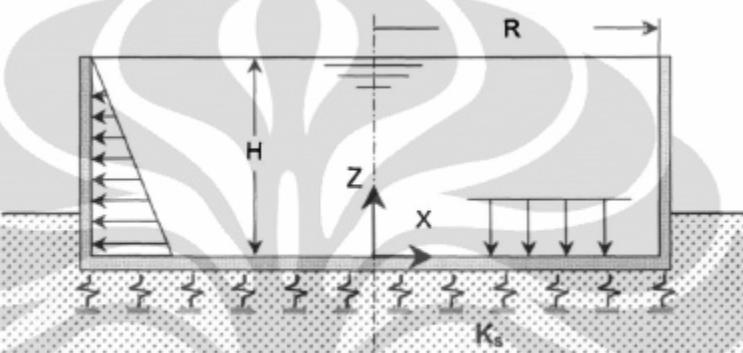
Wilayah gempa	$\psi$
1	0,5
2	0,5
3	0,5
4	0,6
5	0,7
6	0,8

Tabel 2.9 Koefisien  $\psi$  untuk menghitung faktor respons gempa vertikal  $C_v$ 

Sumber : (SNI-1726-2002, 2002)

## 2.14 Permodelan Tanah sebagai pondasi elastis

Tangki beton silinder umumnya berada pada daerah pinggiran disekitar pelabuhan ataupun sungai. Fondasi tanah dekat dengan wilayah ini umumnya berupa tanah lunak hingga tanah sedang sehingga perlu diperhatikan interaksi struktur dengan tanah (Larkin, 2008). Tanah lunak dapat diasumsikan memiliki *subgrade reaction constant* ( $K_s$ )  $25000 \text{ kN/m}^2$  (Canadian Prestressed Concrete Institute, 1996).



Gambar 2.18 Tangki Bertumpu di Atas Pondasi Elastis

Sumber : (Mezzaini, 2006)

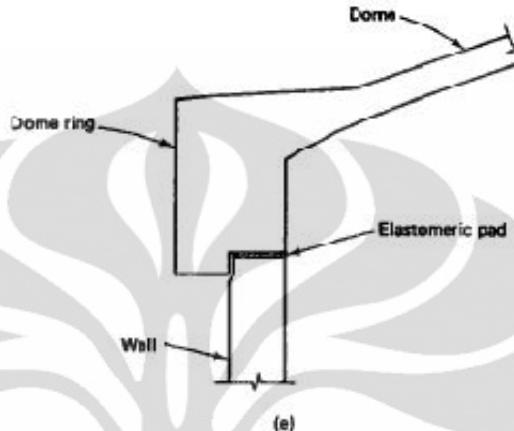
## 2.15 Desain atap tangki

Atap untuk tangki penampung dibuat dalam bentuk kubah cangkang atau atap datar yang ditumpu secara internal di atas kolom-kolom. Biaya atap biasanya sekitar sepertiga dari biaya total strukturnya.

Atap cangkang dalam bentuk kubah mempunyai keuntungan tersendiri untuk tangki yang diameternya tidak melebihi 45 m, yaitu bahwa kubah tersebut tidak membutuhkan kolom interior pendukung. Dengan demikian, bentuk cangkang dan sambungannya dengan tangki mempunyai efek yang signifikan terhadap biaya. Kubah atap disarankan ditumpu oleh dinding tangki dengan *joint yang fleksibel* penuh. Jika tidak, desain dinding tangki dan kubah atap harus dimodifikasi dari sisi derajat kekangan dan kekakuan relatifnya beserta biaya pelaksanaannya.

Kubah bola dengan rasio antara tinggi dan diameter  $h/d$  kira-kira 1/8 merupakan pilihan yang tepat. Kubah datar atau cangkang aksisimetris seperti ini menghasilkan gaya horizontal ke luar di tumpuannya, yang harus ditahan oleh

balok cincin prategang yang didesain secara benar pada level tumpuannya. Jenis tumpuan dari balok cincin menentukan sejauh mana momen dan reaksi akibat kekangan ujung menghasilkan tegangan lentur tambahan di cangkang di dekat tumpuan.



Gambar 2.19 Perletakan atap pada dinding tangki

Gaya prategang radial horisontal  $P$  untuk balok tepi dari persamaan

$$P = \frac{bh}{t} (N_\theta - \mu N_\theta) + \frac{d(N_\varphi \cos \varphi)}{2} \quad (2.118)$$

Di mana

$$N_\theta = \frac{w_D d}{2 \sin \varphi} \left( \frac{1}{1 + \cos \varphi} - \cos \varphi \right) - \frac{w_L}{4 \sin \varphi} (\cos 2\varphi) \quad (2.119)$$

$$N_\varphi = -a \left( \frac{w_D}{1 + \cos \varphi} + \frac{w_L}{2} \right) \quad (2.120)$$

Dan

$h$  = tinggi balok rim

$b$  = lebar balok cincin

$w_D$  = intensitas berat sendiri cangkang per luas satuan

$w_L$  = intensitas proyeksi beban hidup

untuk menghitung penampang balok cincin tepi

$$A_c = \frac{P_i}{f_c} \quad (2.121)$$

di mana

$$P_i = \text{gaya prategang awal} = P/\bar{\gamma}$$

$\bar{\gamma}$  = persentase tegangan residual

$f_c$  = tegangan tekan izin beton, tidak dapat melebihi  $0.2f'_c$ ,  
tidak dapat melebihi 800 - 900 psi, di balok tepi

Luas tendon prategang balok tepi adalah

$$A_{ps} = \frac{P_i}{f_{si}} \quad (2.122)$$

dimana  $f_{si}$  adalah tegangan izin di baja prategang sebelum kehilangan

Pengecekan tebal kubah minimum untuk mencegah tekuk dapat dilakukan sebagai berikut

$$h_d \text{ minimal} = a \sqrt{\frac{1.5 p_u}{\phi \beta_i \beta_c E_c}} \quad (2.123)$$

Dengan

$a$  = radius cangkang kubah

$P_u$  = tekanan satuan desain terdistribusi rata ultimit akibat  
beban mati dan beban hidup =  $(1.2D + 1.6L)/144$

$\phi$  = faktor reduksi kekuatan untuk variabilitas material

$\beta_i$  = faktor reduksi tekuk untuk deviasi dari permukaan bola sebenarnya,  
akibat ketidaksempurnaan

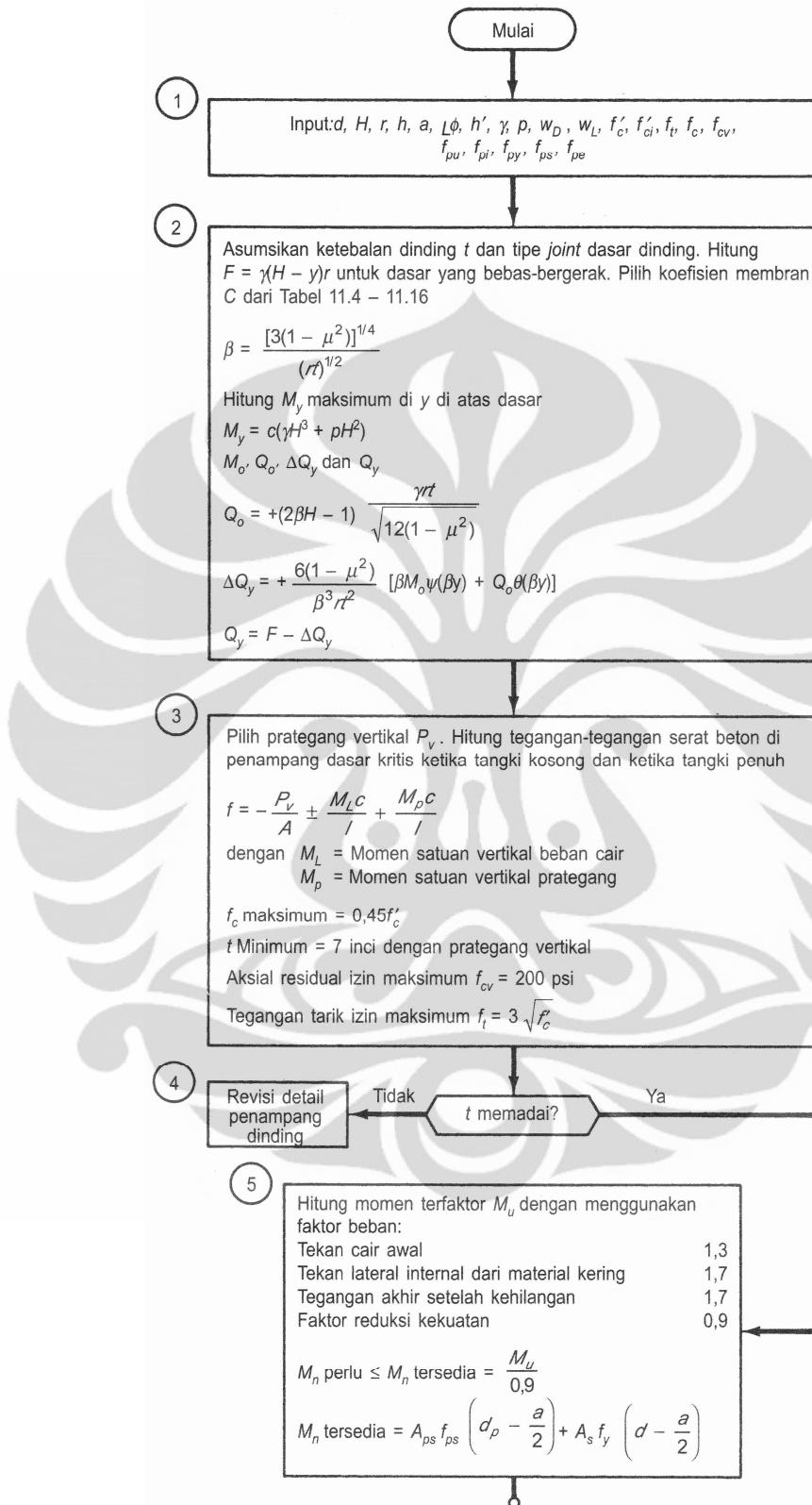
$\beta_i = (a/r_i)^2$ , dengan  $r_i \leq 1.4a$

$\beta_c$  = faktor tekuk untuk rangkak, ketidaklinearan material, dan retak =  $0.44 + 0.003WL$ ,  
tetapi tidak melebihi 0.53

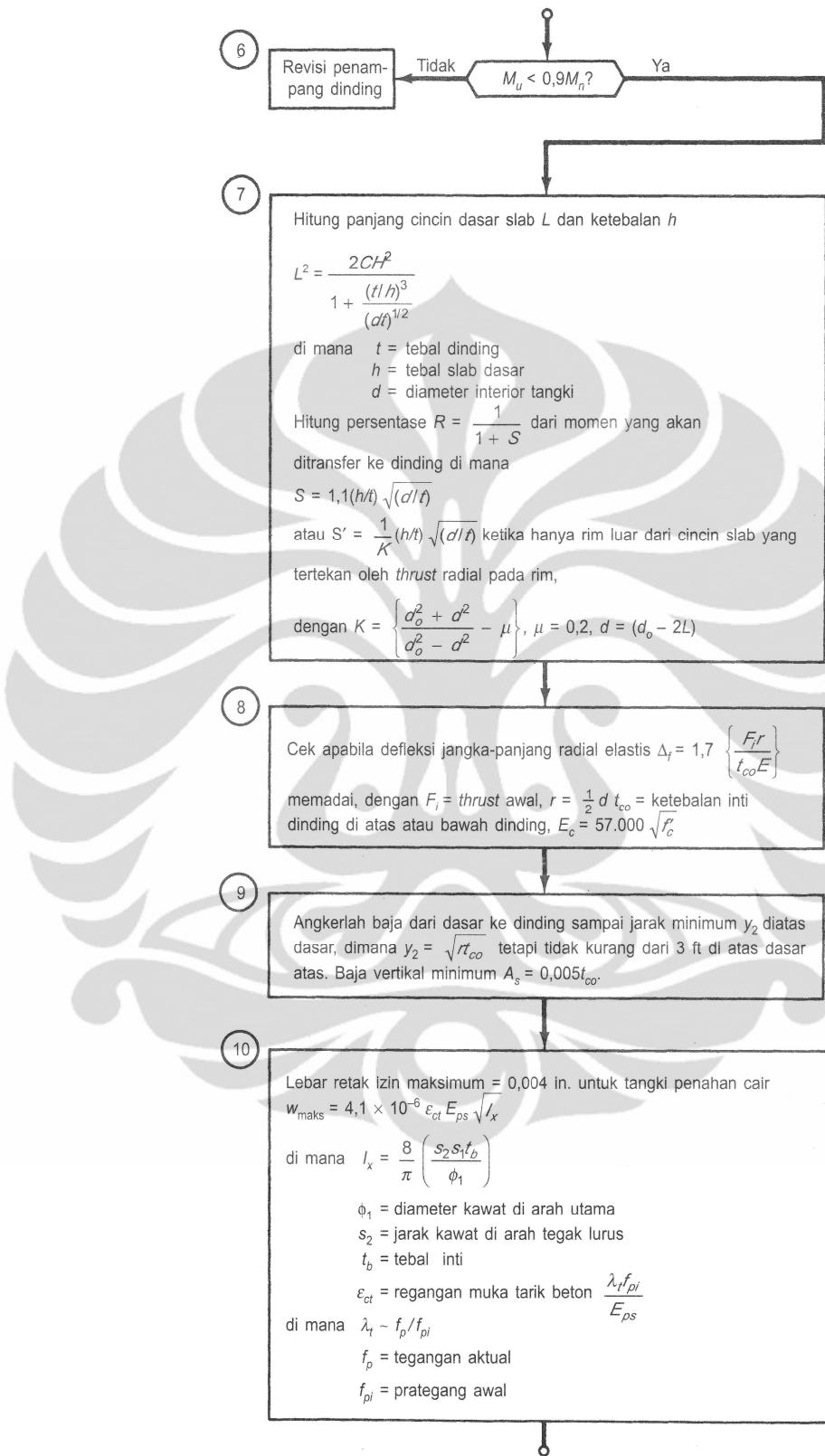
$E_c$  = modulus awal beton =  $57000\sqrt{f'_c}$ , psi

## 2.16 Prosedur desain tangki beton prategang lingkaran dan desain atap tangki beton (Nawy, 2001)

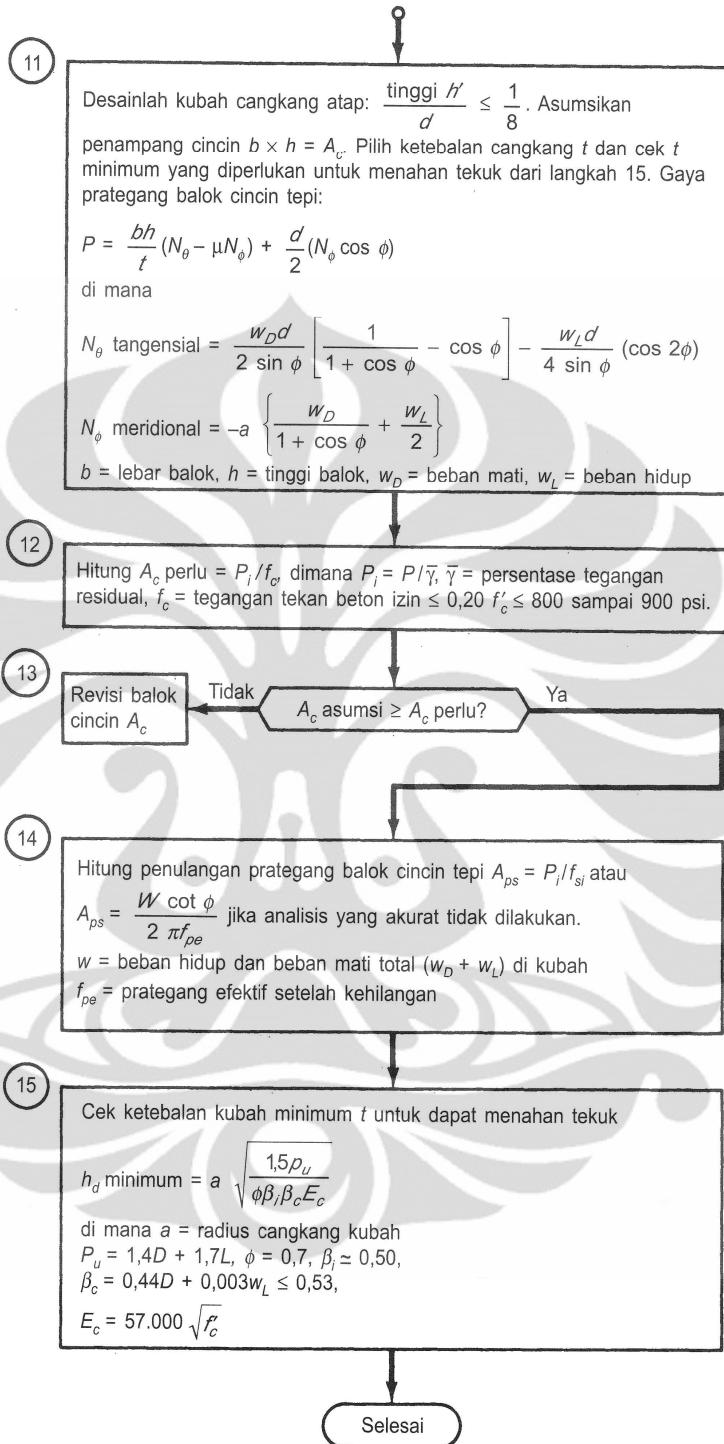
Langkah-langkah berikut ini dapat menjadi acuan mendesain suatu tangki lingkaran beton prategang berikut cangkang atapnya. Tahapan mendesain disajikan secara ringkas dalam bentuk diagram alir berikut ini.



Gambar 2.20 Bagan alir untuk desain tangki prategang lingkaran dan atap kubahnya



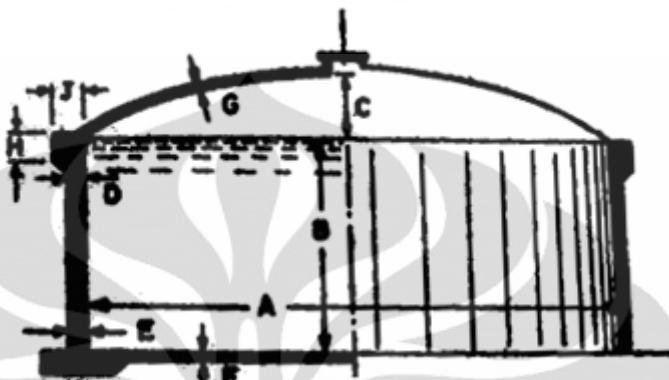
(Lanjutan gambar 2.20)



lanjutan gambar 2.20

## 2.17 Dimensi ekonomis

Berdasarkan data dari *Preload Engineering Co*, New York yang telah mendesain tangki selama 50 tahun, terdapat perbandingan dimensi yang ekonomis (Preload Engineering Company, Inc.)



Gambar 2.21 Penjelasan tabel dimensi ekonomis

Tabel 2.10 Perbandingan dimensi ekonomis untuk tangki air

Kapasitas (m <sup>3</sup> )	Dimensi, m								
	A	B	C	D	E	F	G	H	J
378	12.5	3.15	1.56	0.12	0.12	0.05	0.05	0.2	0.15
945	16.9	4.3	2.11	0.12	0.12	0.05	0.05	0.22	0.15
1890	21.35	5.35	2.67	0.12	0.12	0.05	0.05	0.3	0.17
2835	24.4	6.1	3.05	0.12	0.15	0.05	0.05	0.36	0.19
3780	26.95	6.7	3.36	0.12	0.18	0.05	0.05	0.38	0.22
5670	30.8	7.8	3.86	0.12	0.23	0.05	0.05	0.43	0.25
7570	33.85	8.55	4.23	0.12	0.24	0.05	0.05	0.48	0.27
9450	36.4	9.15	4.55	0.22	0.26	0.05	0.06	0.51	0.3
18900	46	11.45	5.75	0.22	0.44	0.05	0.1	0.69	0.38
37800	57.9	14.5	7.24	0.22	0.74	0.05	0.11	0.89	0.49

Perbandingan ekonomis B : A = 1 : 4 (U.S.A)

Sumber : (Raju, 1993)

## BAB 3

### METODOLOGI

#### 3.1 Prosedur Analisis

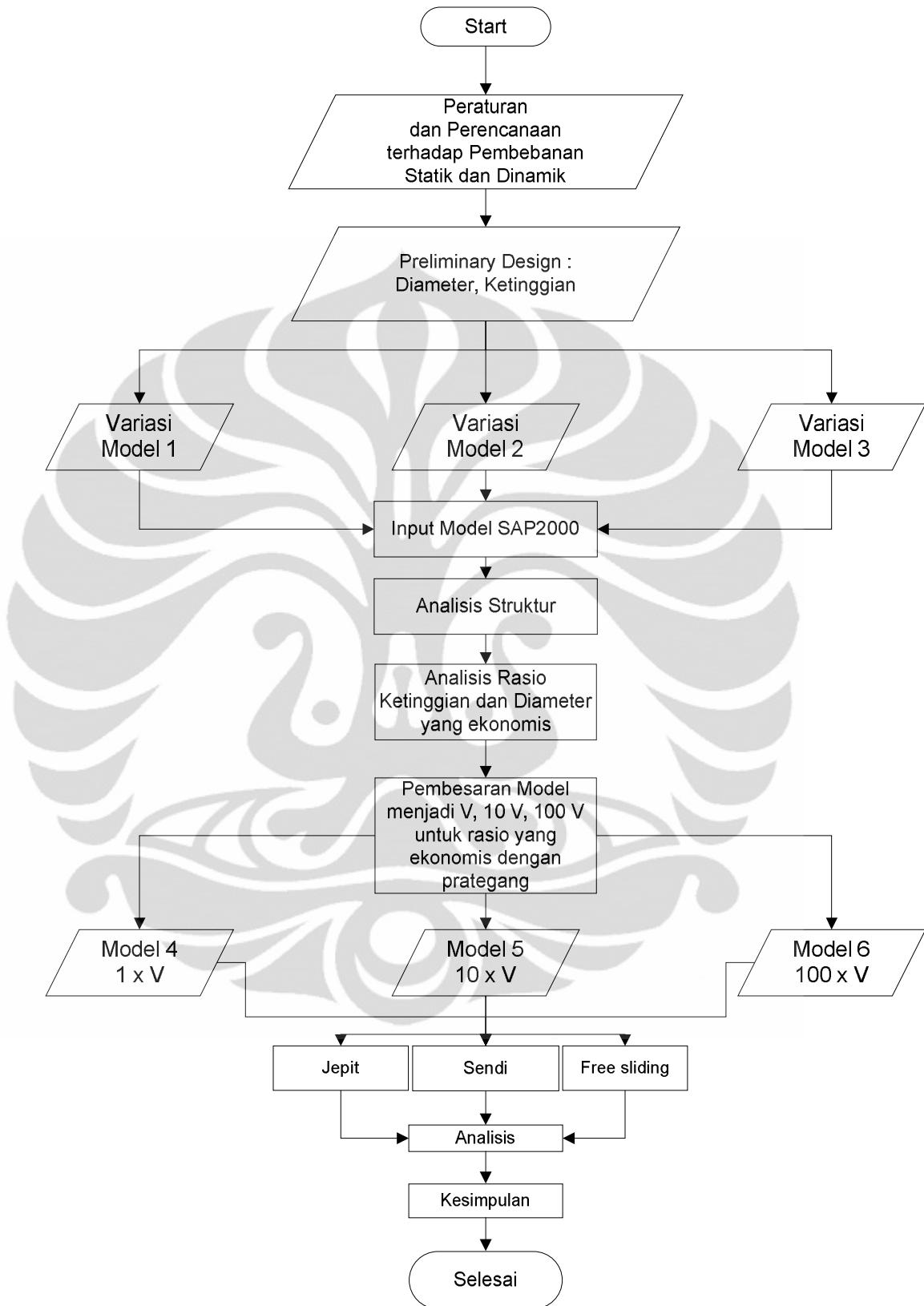
Dalam penelitian ini, akan dilakukan studi perilaku tangki beton pratekan berdasarkan standar yang berlaku untuk memperoleh tangki beton yang terbaik dari sisi struktural maupun dalam aspek ekonomis. Salah satu hal yang penting yang ketentuannya diatur berdasarkan standar adalah terkait pembebanan, kombinasi pembebanan dan syarat-syarat batas.

Analisis ini dilakukan untuk memperoleh desain terbaik sehingga perlu dilakukan variasi model desain untuk mengamati perilaku yang terjadi. Model ini divariasikan berdasarkan rasio ketinggian dan diameter yang juga diperoleh dari literatur yang ada. Proses tahap pertama ini dilakukan untuk membuktikan bahwa rasio ketinggian dan diameter yang terdapat pada literatur (1 : 4) merupakan rasio yang ekonomis dengan menggunakan perbandingan model dengan rasio diameter banding tinggi 1 : 3, 1 : 4, dan 1 : 5.

Tingkat keekonomisan dari tangki diharapkan dapat dilihat dari rasio volume beton terhadap kapasitas air tertampung dan penulangan penunjang didalamnya, semakin sedikit beton dan penulangan yang diperlukan maka tangki menjadi semakin ekonomis.

Setelah rasio ekonomis ini telah dibuktikan, maka analisis dapat dilanjutkan pada studi perilaku tangki silinder beton pratekan dengan berbagai macam perletakan untuk variasi model dengan perbesaran 10 kali lipat. Jenis perletakan yang akan ditinjau adalah sendi, jepit dan bergerak bebas. Perilaku yang ditinjau adalah gaya dalam momen, gaya cincin (*hoop forces*), tegangan dinding, pengaruh penggunaan beton prategang dan juga deformasi yang terjadi.

Analisis ini akan memberikan keluaran (*output*) berupa rasio dimensi yang ekonomis dan jenis perletakan yang terbaik untuk menahan pembebanan yang terjadi.



Gambar 3.1 Prosedur Analisis

Universitas Indonesia

### 3.2 Studi parameter

Parameter-parameter yang akan mempengaruhi analisis tangki beton pratekan berbentuk silinder adalah

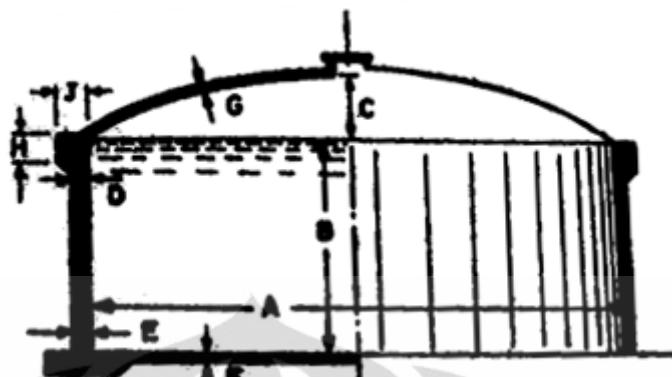
- Perbandingan dimensional antara diameter tangki dengan tinggi tangki
- Kebebasan pergeseran pada dasar tangki beton pratekan (sendi, jepit penuh, bergerak bebas)
- Penggunaan Beton Pratekan dengan tingkat keterisian tangki terhadap tegangan izin beton
- Pengaruh atap dalam desain tangki

### 3.3 Informasi Model

Tabel 3.1 Informasi Model

Parameter	Penjelasan										
	Optimasi			Studi Perilaku							
<b>Perletakan</b>	<b>Jepit Penuh-Tangki diasumsikan berada di atas pile cap</b>				<b>Masing-masing Jepit, Sendi, Free Sliding</b>						
<b>Sambungan Atap dengan dinding</b>	Atap bertumpu pada dinding (misal menggunakan : neoprene), kekakuan dianggap tak hingga										
<b>Pelat Lantai</b>	Tidak dimodelkan			Dimodelkan							
<b>Interaksi tanah</b>	diabaikan			Tanah Lunak sebagai pondasi elastis							
<b>Mutu Beton</b>	35 Mpa										
<b>Mutu Baja</b>	60 ksi										
<b>Arah Pembebahan Gempa</b>	100% Y										
<b>Analisis Gempa</b>	statik ekivalen pada fluida dan dinding										
<b>Kombinasi Pembebahan</b>	1.2(D)+1.2(Hstat)+1Hdin										
<b>Model</b>	1	2	3	4	5	6					
<b>Rasio H:D</b>	1:3	1:4	1:5	1:4	1:4	1:4					
<b>Diameter (m)</b>	18.5	17.2	15.6	17.2	36.8	79.2					
<b>Tinggi (m)</b>	3.7	4.3	5.2	4.3	9.2	19.8					
<b>Ketinggian air sebagai beban (m)</b>	3.7	4.3	5.2	4.3	9.2	19.8					
<b>Volume maksimum - m<sup>3</sup></b>	994.06	994.78	994.82	994.78	9812.2	97864					
<b>Ketebalan dinding (cm)</b>	25	25	25	25	35	100					
<b>Kubah Atap</b>											
<b>Balok Cincin Tepi Kubah Atap</b>	Tidak dimodelkan										
<b>sudut cangkang atap (derajat)</b>	18	18	18	18	26	26					
<b>ketebalan atap (cm)</b>	7.5	7.5	7.5	7.5	12	25					
<b>jari-jari kubah atap (m)</b>	29.934	27.795	25.253	27.795	41.974	90.334					

Universitas Indonesia



Gambar 3.2 Acuan Dimensi Tangki

Sumber : (Raju, 1993)

Tabel 3.2 Modelisasi 1

<b>Rasio</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dimensi (m)</b>			<b>Dimensi (cm)</b>					
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>J</b>
1 : 3	994	15.6	5.2	1.24	25	25	-	7.5	-	-
1 : 4	994	17.2	4.3	1.36	25	25	-	7.5	-	-
1 : 5	994	18.5	3.7	1.47	25	25	-	7.5	-	-

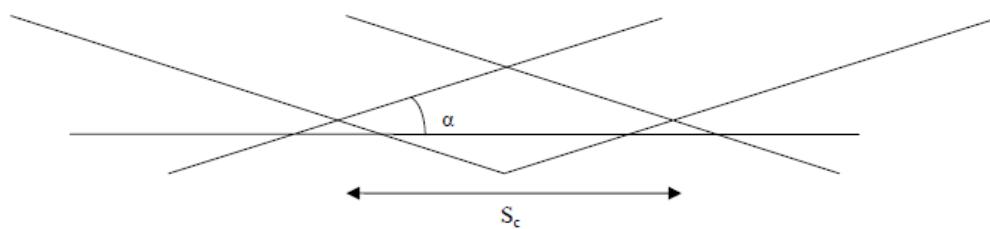
Tabel 3.3 Modelisasi 2

<b>Model</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dimensi (m)</b>			<b>Dimensi (cm)</b>					
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>J</b>
1	994	17.2	4.3	1.36	25	25	50	7.5	-	-
2	9812	36.8	9.2	4.25	35	35	70	12	-	-
3	97864	79.2	19.8	9.14	100	100	200	25	-	-

Tabel 3.4 Properti Perletakan Free Sliding

<i>Seismic Cables</i>	
Panjang kabel	600 mm
<i>Elastomeric Bearing Pad</i>	
Lebar	120 mm
Ketebalan Bearing Pad, t <sub>b</sub>	30 mm
Spasi Bearing Pad, S <sub>p</sub>	1 m ( <i>pad</i> kontinu)
Panjang Bearing Pad, L <sub>p</sub>	1 m ( <i>pad</i> kontinu)

Universitas Indonesia



Gambar 3.3 Sudut Inklinasi Kabel dan Spasi Antar Set Kabel

Sumber : (Baltas, 2005)

### 3.4 Properti Material

Tabel 3.5 Properti Material

<b>Beton</b>		
Berat Jenis		24 kN/m <sup>3</sup>
$f_c'$	Beton bobot normal	35 MPa
$f_{ci}'$		25.9 MPa
Kondisi tekan $f_c$	$0.45f_c'$	15.5 MPa
Kondisi tarik $f_t$		0.86 Mpa
<b>Baja Prategang</b>		
Tegangan baja pratekan ultimate $f_{pu}$	K-270 ksi	1862 MPa
	K-250 ksi	1724 MPa
Tegangan baja pratekan initial $f_{pi}$	$0.7f_{pu}$	
Modulus Elastisitas (Es)		200.000 MPa
Tendon Horizontal	0.25" dan 0.5"	
Tendon Vertikal	0.5"	400 Mpa
Kehilangan Prategang Total		26%
<b>Seismic Cable</b>		
Kuat Ultimit		1862 MPa
Modulus Elastisitas (Es)		200000 MPa
Luas Penampang Kabel		98.7 mm <sup>2</sup>
Sudut Inklinasi		30°
<b>Elastomeric Bearing Pad</b>		
Modulus Elastisitas		6895 kPa
Modulus Geser		1500 kPa

### 3.5 Faktor kombinasi beban

Struktur, bersama dengan komponen-komponen dan pondasinya, harus didesain sedemikian hingga kuat desainnya melebihi efek dari kombinasi beban terfaktor yang ditetapkan dalam ACI 318, ANSI/ASCE 7-05.

Hal	Faktor beban
Tekanan cairan awal	1.2
Tekanan lateral beban dari material kering	1.6
Gaya-gaya prategang	
Prategang sebelum kehilangan	1.2
Prategang setelah kehilangan	0.9

Tabel 3.6 Faktor-faktor dalam pembebanan

Kombinasi beban yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.7

Tabel 3.7 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi	Dead	Fluida	Hidrodinamik
COMB1	1.2	1.2	1
COMB1 tanpa atap	1.2	1.2	1

### 3.6 Beban Gempa

Tata cara pelaksanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung (SNI-03-1726-2002), dan standar terkait ASCE 7.05 serta ACI 350.3 – 01 *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures*. Namun demikian, untuk menyesuaikan setiap perhitungan yang telah diatur di ACI 350.3 – 01, maka perhitungan yang dilakukan tetap menggunakan setiap rumus dan ketentuan yang tertera pada standar tersebut akan tetapi menggunakan percepatan gempa maksimum untuk wilayah Jakarta yang disetarakan dengan wilayah Amerika.

- |                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| Wilayah Gempa     | : | 3 (Jakarta) setara zona 2A wilayah Amerika |
| Jenis Tanah       | : | Tanah Lunak                                |
| Koefisien tanah   | : | 2  |
| Analisa Gempa     | : | Statik Ekivalen                            |
| Keutamaan         | : | 1,25 (kategori III)                        |
| Daktilitas        | : | 1,25                                       |
| Minimum Freeboard | : | 0.7d <sub>max</sub>                        |

### 3.7 Permodelan Struktur

#### 3.7.1 Elemen Area-Shell

Elemen *shell* merupakan formulasi 3 nodal yang mengkombinasikan perilaku pelat lentur dan membran (Computers and Structures, Inc., 2009). Properti elemen ini diberikan pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.9

Tabel 3.8 Properti Elemen Area

Area	Tipe	Material	Ketebalan (cm)				
			D15m	D18m	D17.2m	D36.8m	D79.2m
Atap	Thin Shell	Beton Fc'35	7.5	7.5	7.5	12	25
Dinding	Thin Shell	Beton Fc'35	25	25	25	35	100
Pelat Dasar (Perletakan Jepit dan Sendi)	Thin Shell	Beton Fc-35	50	50	50	70	200

Tabel 3.9 Parameter Desain Beton Dinding

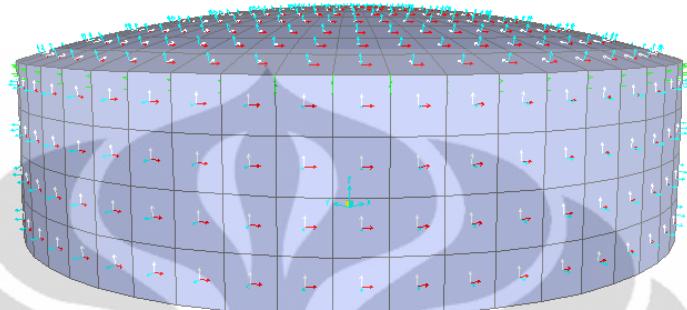
Area-Dinding	Properti
Material Tulangan	A615Gr60
Layout Tulangan	2 Lapis
Jarak Tepi luar ke titik berat tulangan	
Tulangan atas arah horizontal	62.5 mm
Tulangan atas arah vertikal	87.5 mm
Tulangan bawah arah horizontal	62.5 mm
Tulangan atas bawah vertikal	87.5 mm

Tabel 3.10 Meshing Dinding

Diameter (m)	Meshing Dinding
15	5 x 48
18.5	3 x 48
17.2	4 x 54
36.8	9 x 116
79.2	19 x 248

### 3.7.2 Sumbu Lokal

Sumbu lokal elemen area disesuaikan sesuai dengan bawaan program SAP2000 (*default*). Pada kasus tangki silinder, maka sumbu lokal area berbeda per elemen sesuai dengan arah elemen terhadap sumbu global.



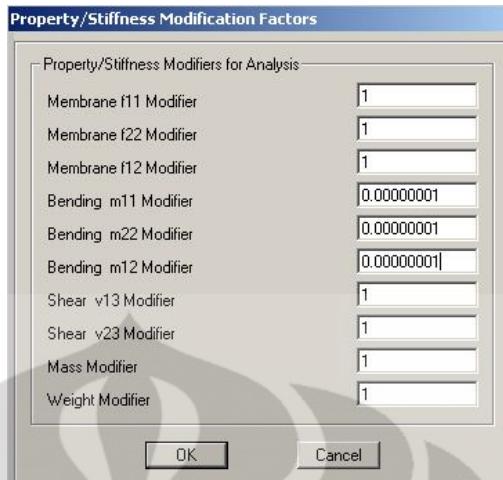
Gambar 3.4 Sumbu Lokal Elemen Area

### 3.7.3 Permodelan tanah sebagai *area spring*

*Area spring* digunakan untuk memodelkan perilaku tanah lunak sehingga tangki seolah berada diatas fondasi yang elastis. Adapun konstanta pegas yang digunakan berdasarkan untuk tanah lunak adalah  $25000 \text{ kN/m}^2$  (Canadian Prestressed Concrete Institute, 1996).

### 3.7.4 *Property Modifier* (khusus untuk pelat dasar sendi)

*Property Modifier* diberikan untuk elemen area pelat dasar yang menyatu dengan dinding untuk memberikan perilaku perletakan sendi dimana nilai momen pada perletakan tersebut 0 dan tidak ada momen yang ditransfer ke pelat dasar. Untuk menyesuaikan terhadap perilaku ini maka untuk semua arah gaya dalam momen pelat diberi faktor  $10^{-8}$  yaitu m11, m22, dan m12.



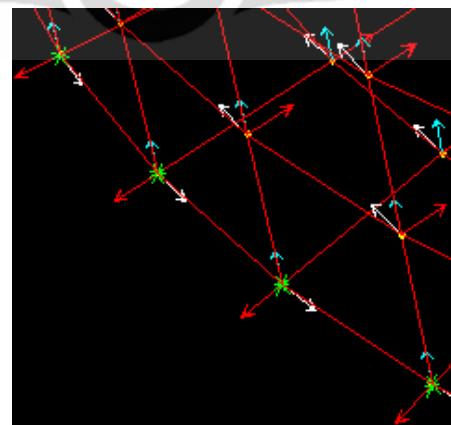
Gambar 3.5 *Modification Factor* untuk pelat perletakan sendi

### 3.7.5 Perletakan (*restraint support*)

Perletakan merupakan elemen yang akan memberikan reaksi terhadap aksi yang diberikan dimana terjadi peralihan pada derajat kebebasan yang tidak dikekang (*Computers and Structures, Inc.*, 2009). Perletakan diatur sedemikian hingga sumbu lokal mengarah sesuai Tabel 3.11 dan untuk derajat kebebasan perletakan diatur sesuai dengan Tabel 3.12

Tabel 3.11 Sumbu Lokal Perletakan

Sumbu	Arah
1 (merah)	Z global
2 (putih)	Radial
3 (biru)	Tangensial



Gambar 3.6 Sumbu Lokal Perletakan

Tabel 3.12 Derajat Kebebasan Perletakan

<b>DOF</b>	<b>Jepit</b>	<b>Sendi</b>	<b>Free sliding</b>
u1	N/A	<i>Fixed</i>	<i>Released</i>
u2	N/A	<i>Fixed</i>	<i>Fixed</i>
u3	N/A	<i>Released</i>	<i>Released</i>
r1	N/A	<i>Released</i>	<i>Released</i>
r2	N/A	<i>Released</i>	<i>Released</i>
r3	N/A	<i>Released</i>	<i>Released</i>

### 3.7.6 Elemen *Link*

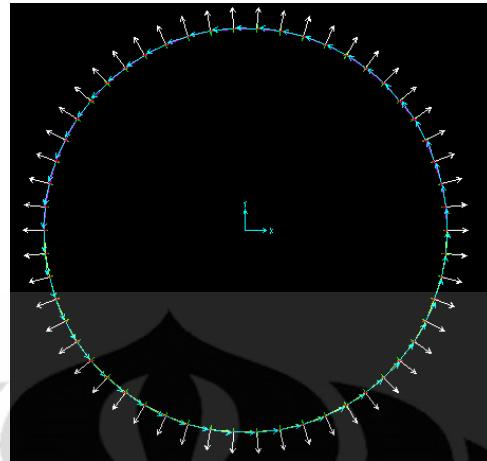
*Link* merupakan elemen penghubung yang tidak memiliki panjang (*Computers and Structures, Inc.*, 2009) dan biasa digunakan untuk memodelkan sejenis *bearing pad*. *Link* yang digunakan bertipe linear. Sumbu lokal *link* diarahkan sesuai dengan Tabel 3.13 dengan derajat kebebasan yang diatur pada Tabel 3.14

Tabel 3.13 Sumbu Lokal *Link*

<b>Sumbu Lokal</b>	<b>Arah</b>
1 (merah)	Z global
2 (putih)	Radial
3 (biru)	Tangensial

Tabel 3.14 Derajat Kebebasan *Link*

<b>DOF</b>	<b>Sendi</b>
u1	Released
u2	Released
u3	Fixed
r1	Fixed
r2	Fixed
r3	Released

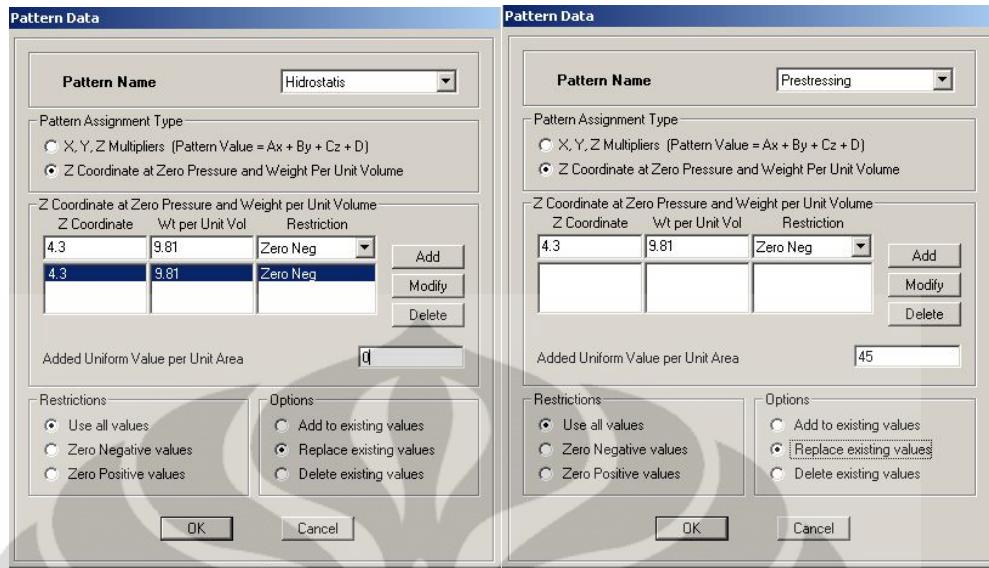


Gambar 3.7 Arah Sumbu Lokal Pada Link

### 3.7.7 Penggunaan *Joint Pattern*

Penggunaan *Joint Pattern* dilakukan untuk memudahkan pembebanan yang akan diberikan. *Joint Pattern* memberikan pola atau referensi yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pembebanan. Keunggulan joint pattern adalah dapat memberikan distribusi beban yang lebih kompleks pada struktur dibandingkan dengan input beban secara manual (Computers and Structures, Inc., 2009), dalam hal ini tekanan hidrostatis dan tekanan akibat gaya prategang (lihat sub bab 3.8.3.)

Baik tekanan hidrostatis maupun tekanan akibat gaya prategang memiliki kesamaan pola beban yang sebanding dengan ketinggian titik nodal (*joint*). Perbedaan pola tekanan hidrostatis dan tekanan akibat gaya prategang adalah adanya tekanan residual yang ditambahkan sebagai tekanan terbagi rata pada tekanan akibat gaya prategang seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.8.



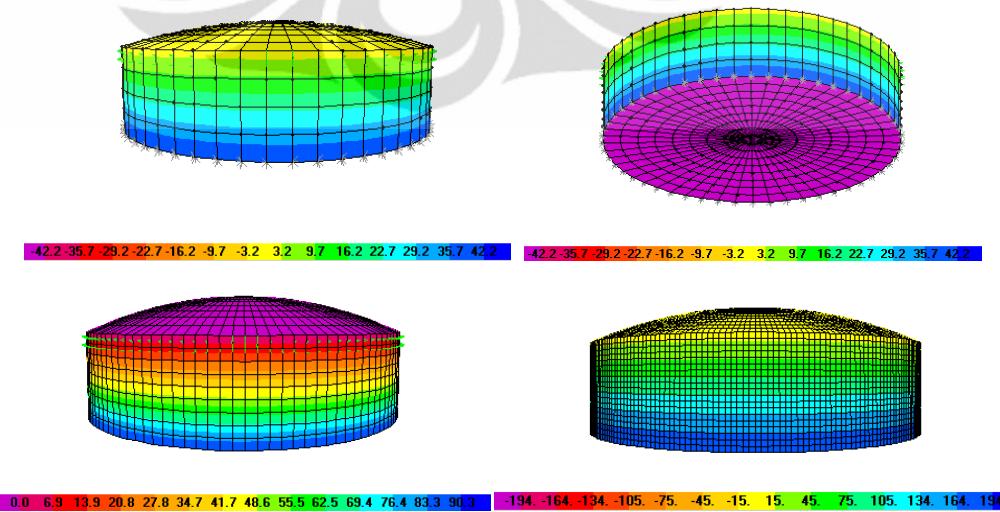
Gambar 3.8 Joint Pattern

### 3.8 Pembebaan

#### 3.8.1 Beban Hidrostatis

Beban hidrostatis merupakan tekanan yang bertambah secara linear berdasarkan ketinggian fluida yang ditinjau. Beban hidrostatis bekerja aksisimetris pada dinding dan pelat dasar dan diberikan sebagai tekanan permukaan (surface pressure) dengan satuan kPa dan diberikan pada *bottom area* sesuai dengan *joint pattern* yang telah ditetapkan yaitu *pattern* hidrostatis. Secara matematis tekanan hidrostatis dirumuskan

$$P(y) = \gamma(H - y)$$



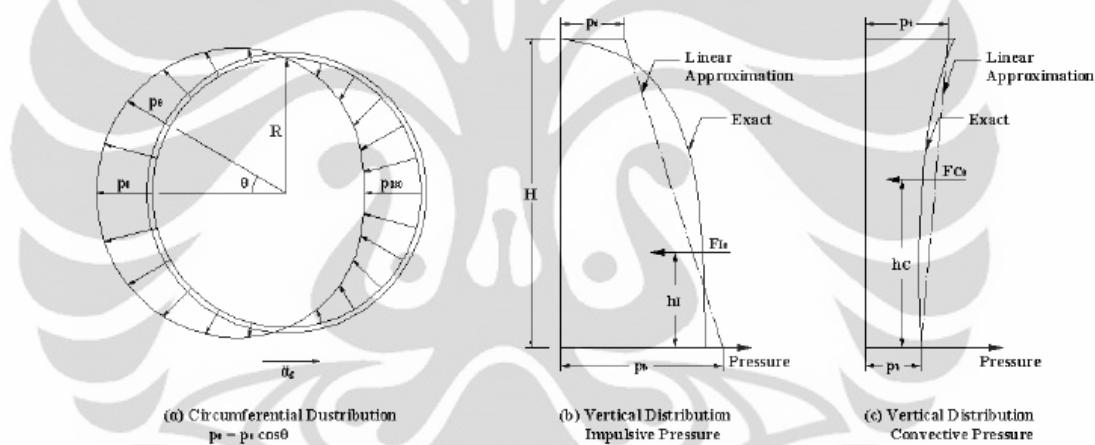
Gambar 3.9 Kontur Beban Hidrostatis

Universitas Indonesia

### 3.8.2 Beban Hidrodinamik

Beban hidrodinamik merupakan beban akibat beban gempa yang terdiri dari tekanan impulsif, tekanan konvektif, tekanan fraksi hidrostatis akibat gempa vertikal dan inersia dinding yang terbagi secara merata. Beban ini diberikan 100% ke arah Y.

Perhitungan beban hidrodinamik dilakukan terpisah dengan menggunakan bantuan software MATHCAD karena SAP2000 tidak dapat memodelkan perilaku fluida. Perhitungan beban hidrodinamik secara detail terdapat pada bagian lampiran namun pada bagian ini akan dipaparkan bagaimana penulis memperoleh nilai beban hidrodinamik dan memasukan beban hidrodinamik ke dalam SAP2000.



Gambar 3.10 Distribusi Beban Hidrodinamik

Sumber : (Baltas, 2005)

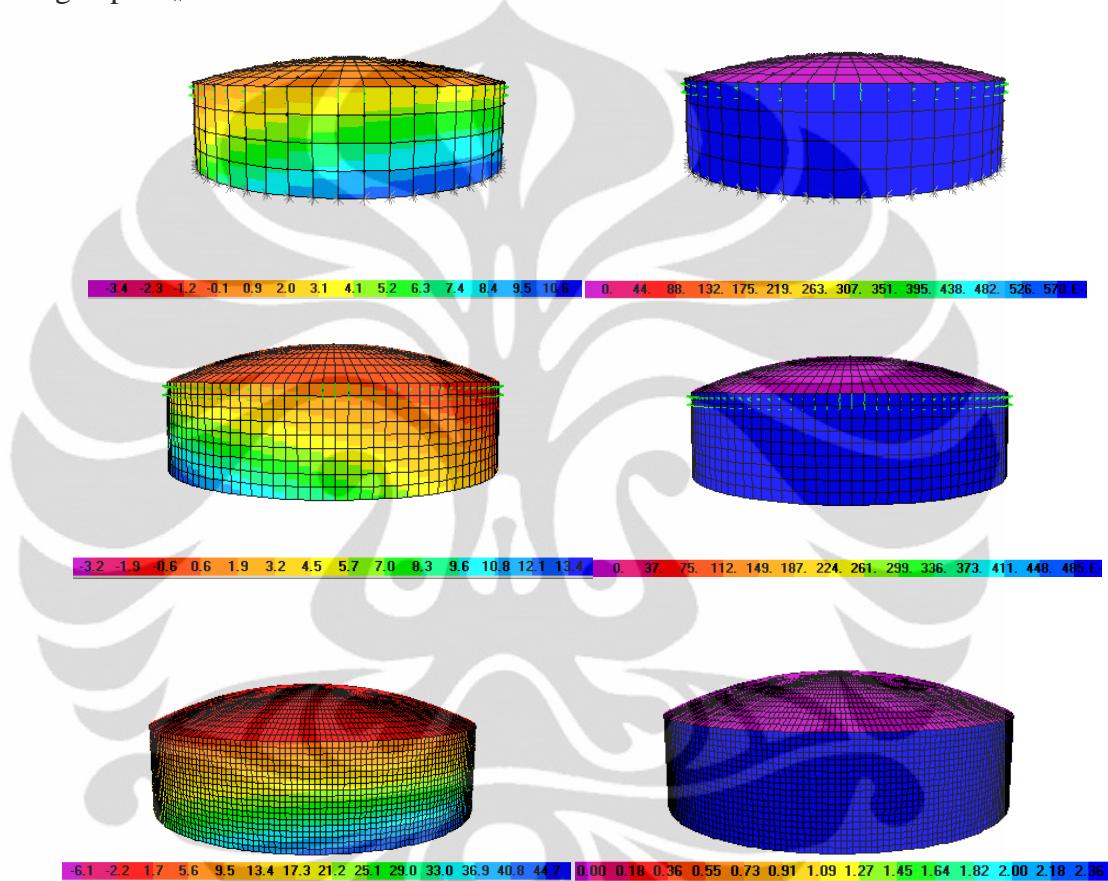
Sesuai dengan prosedur pada ACI 350.3 – 01, perhitungan beban hidrodinamik diawali dengan menghitung berat struktur efektif dinding dan atap dan kemudian melakukan perhitungan terhadap komponen massa efektif impulsif cairan dan komponen massa efektif konvektif.

Frekuensi alami dihitung secara terpisah untuk komponen impulsif dan konvektif untuk memperoleh periode impulsif dan konvektif sesuai dengan rumus perhitungan untuk tangki silinder.

Perhitungan nilai koefisien gempa impulsif  $C_i$  dan konvektif  $C_c$  dapat dilakukan dengan memperhatikan periode impulsif  $T_i$  dan  $T_c$ , faktor keutamaan I

dan profil jenis tanah S. Faktor keutamaan dan kondisi profil diambil sesuai sub bab 3.6.

Dengan kedua koefisien yang telah diperoleh tersebut dapat dihitung gaya lateral dinamik untuk masing-masing komponen. Perhitungan gaya lateral dinamik dipengaruhi oleh faktor wilayah zona gempa Z dan faktor reduksi beban gempa  $R_w$



Gambar 3.11 Kontur Beban Hidrodinamik akibat tekanan impulsif,konvektif,gempa vertikal (kiri) dan inersia dinding ( kanan)

Tekanan impulsif dan Tekanan konvektif terdistribusi pada setengah dinding depan dan setengah dinding belakang (lihat sub bab 2.9.2). Distribusi tekanan kemudian disesuaikan dengan fungsi ketinggian dan arah  $p(y,\theta)$  yang diilustrasikan pada Gambar 3.10 sehingga akan diperoleh beban yang berbeda untuk masing-masing elemen sesuai dengan tinggi dan arah relatif terhadap beban gempa yang ditampilkan pada Gambar 3.11. Perhatikan bahwa pembebanan ini tidak berpola tetap sehingga pada SAP2000 masing-masing elemen harus diberikan beban satu per satu dan bekerja pada *bottom area*.

### 3.8.3 Permodelan Prategang Sebagai Beban

Tegangan residual minimum yang digunakan adalah 225 psi (1.55 MPa) untuk mencegah timbulnya retak. Tegangan residual ini kemudian dikonversi menjadi tekanan ekivalen yang diberikan mulai dari elevasi H meter dari dasar tangki dan kemudian bertambah secara linear (Baltas, 2005)

Pertambahan linear tekanan diberikan berdasarkan persamaan berikut

$$P(y) = p + \gamma(H - y) \quad (3.1)$$

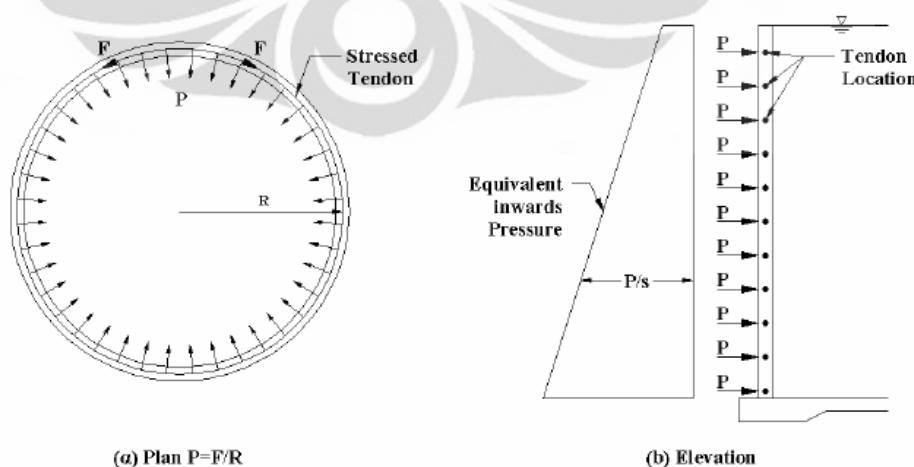
Dimana

$$p = \frac{F_{residual}t}{R} \quad (3.2)$$

Tabel 3.15 Tekanan ekivalen akibat prategang

Diameter	Tebal dinding (cm)	Residual Stress	Tekanan Ekivalen, p (kPa)
17.2 m	25	225 psi	45
36.8 m	35	225 psi	30
79.2 m	100	225 psi	40

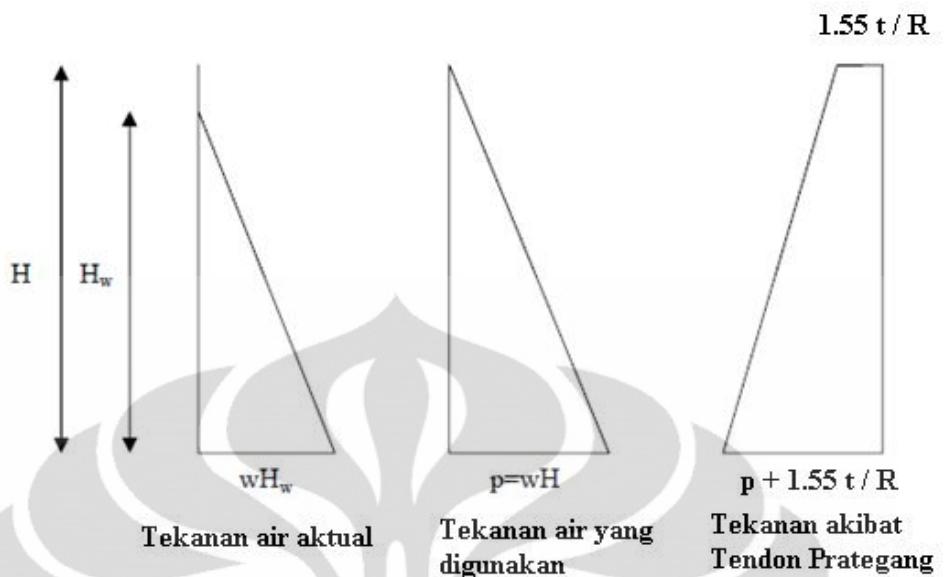
Permodelan prategang yang dilakukan hanya menggunakan prategang horizontal sedangkan prategang vertikal dimodelkan dan dilakukan analisis secara terpisah untuk memudahkan analisis tegangan/



Gambar 3.12 Permodelan Prategang

Sumber : (Baltas, 2005)

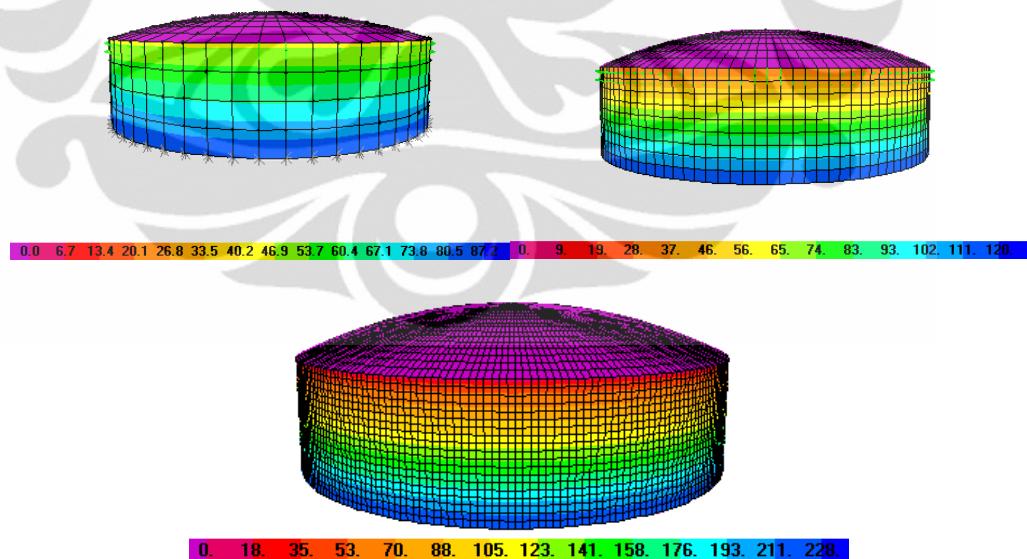
Universitas Indonesia



Gambar 3.13 Tekanan yang diterapkan pada dinding tangki

### 3.8.4 Kontur Beban Prategang

Beban prategang diberikan pada bagian depan dinding atau *area top* diberikan dalam kontur Gambar 3.14 sesuai dengan *joint pattern* prategang yang dijelaskan pada sub bab 3.7.7 dan Gambar 3.8



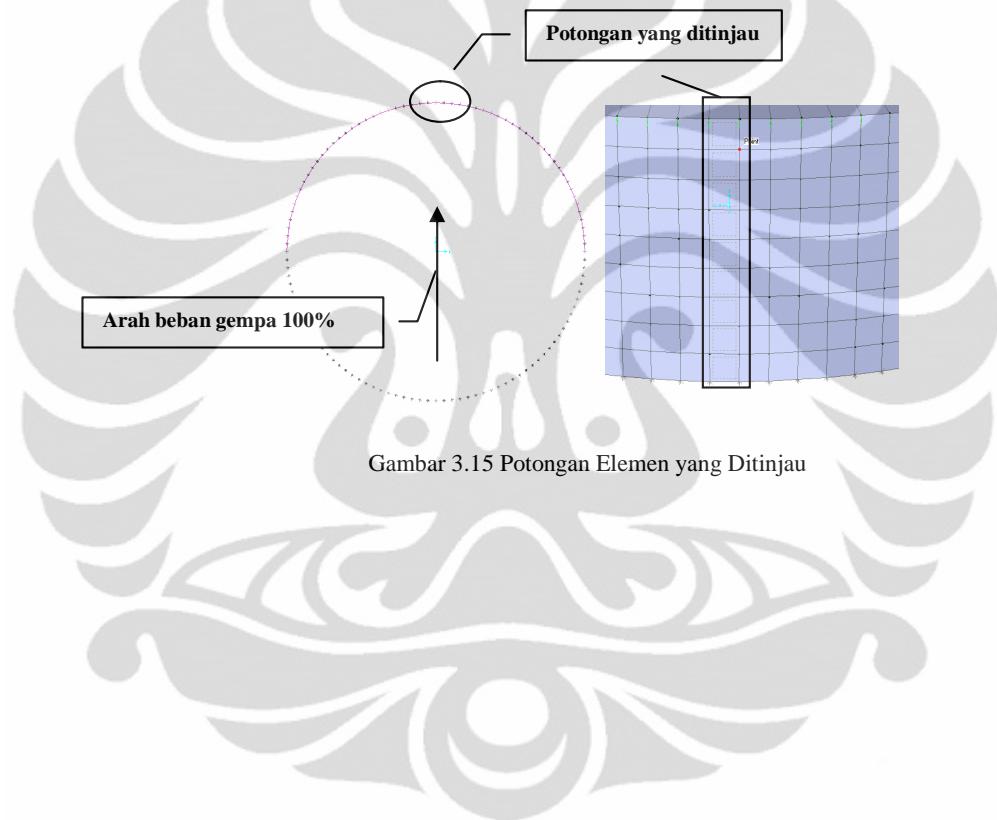
Gambar 3.14 Kontur Beban Prategang

### 3.9 Intensitas Penulangan Baja Lunak Dengan SAP2000

SAP2000 dapat memberikan keluaran berupa intensitas penulangan (area luas tulangan per satuan panjang) untuk shell menggunakan opsi *shell concrete design* yang pengaturannya telah diatur dalam sub bab 3.

### 3.10 Elemen yang Ditinjau

Keluaran yang dihasilkan oleh SAP yang disajikan merupakan keluaran pada potongan elemen yang ditunjukkan yaitu pada strip vertikal dinding dengan arah  $\theta = 0^0$  terhadap arah pembebanan gempa.



Gambar 3.15 Potongan Elemen yang Ditinjau

## BAB 4

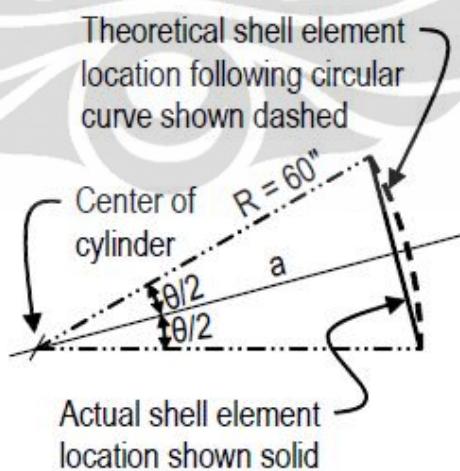
### PEMBAHASAN

#### 4.1 Akurasi Model Tangki Silinder

Silinder yang mengalami tekanan internal dan dimodelkan dengan elemen *shell* pada SAP2000 akan memiliki potongan melintang berupa segi-n dan bukan berupa lingkaran sempurna. SAP2000 tidak dapat memberikan model dengan kelengkungan sempurna sehingga akan terdapat nilai kesalahan dengan persentase tertentu dibandingkan dengan pendekatan analisis lain. Berdasarkan dokumen verifikasi dari SAP2000 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 (Computer and Structures, Inc., 2004), model silinder memiliki jarak dari pusat silinder ke titik tengah elemen *shell* teoritis yang senilai dengan jari-jari silinder R dan jarak dari pusat silinder ke titik tengah elemen shell aktual yang dimodelkan bernilai a. Pada dokumen tersebut disampaikan bahwa kesalahan yang terjadi pada titik di tengah elemen shell yang dimodelkan akan sama dengan nilai kesalahan yang dapat dirumuskan sebagai berikut

$$a = R \left( \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\% \text{ error} = \frac{R - a}{R} * 100\% = \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) * 100\%$$



Gambar 4.1 Akurasi model dengan aktual

Sumber : (Computer and Structures, Inc., 2004)

Nilai kesalahan yang terjadi pada setiap model yang disajikan dalam tulisan ini ditampilkan dalam Tabel 4.1 sesuai dengan rumusan di atas.

Tabel 4.1 Akurasi Model

Diameter (m)	Meshing Dinding	$\Theta$ (derajat)	% error
15	5 x 48	7.5	0.2141%
18.5	3 x 48	7.5	0.2141%
17.2	4 x 54	6.67	0.1694%
36.8	9 x 116	3.1	0.0366%
79.2	19 x 248	1.45	0.0080%

Dengan demikian maka model cukup akurat untuk memberikan gambaran perilaku dari tangki yang berbentuk silinder.

## 4.2 Perbandingan Perilaku Tangki Untuk Rasio Yang Berbeda

### 4.2.1 Kapasitas dan Volume Tangki

Untuk mendapatkan rasio tinggi terhadap diameter struktur yang optimum dilakukan perbandingan kapasitas dan volume beton yang diperlukan untuk membangun struktur tangki beton ini. Struktur tangki yang dimodelkan dalam optimasi ini memiliki elemen atap dan dinding saja, sehingga volume beton yang diperhitungkan dapat dibandingkan secara terpisah.

Dengan properti dinding dan atap yang sama seperti yang diberikan dalam subbab 3.3, dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa semakin besar rasio tinggi dan diameter tangki akan mengakibatkan berat beton untuk dinding tangki yang semakin membesar, sedangkan berat beton untuk atap akan semakin mengecil.

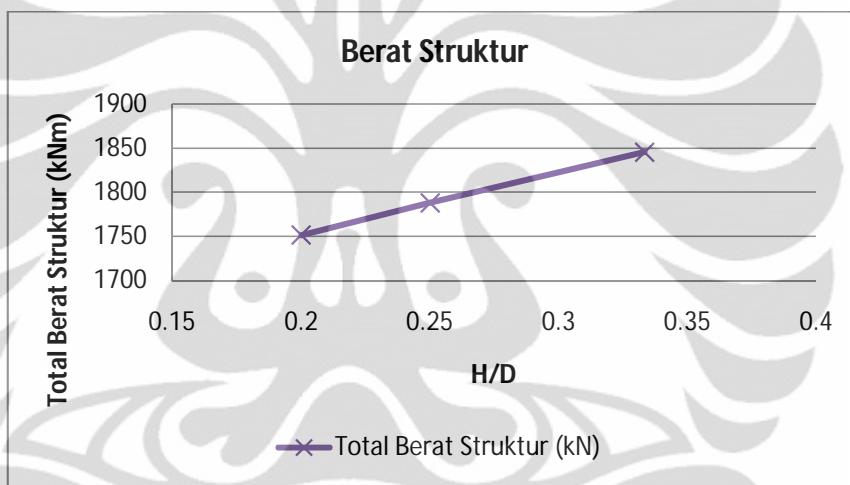
Semakin besar rasio tinggi-diameter untuk volume yang sama akan menyebabkan diameter tangki yang semakin kecil meskipun tangki semakin meninggi. Namun demikian, penambahan tinggi lebih signifikan mengakibatkan bertambahnya luas permukaan dinding beton yang berdampak pada penambahan berat dan volume beton dinding.

Semakin kecil rasio tinggi-diameter mengakibatkan diameter tangki yang makin melebar sehingga berakibat pada bentangan atap yang semakin melebar. Karena atap semakin lebar meskipun dengan sudut cangkang yang sama, kubah atap akan lebih berat dan volume beton yang diperlukan juga semakin besar.

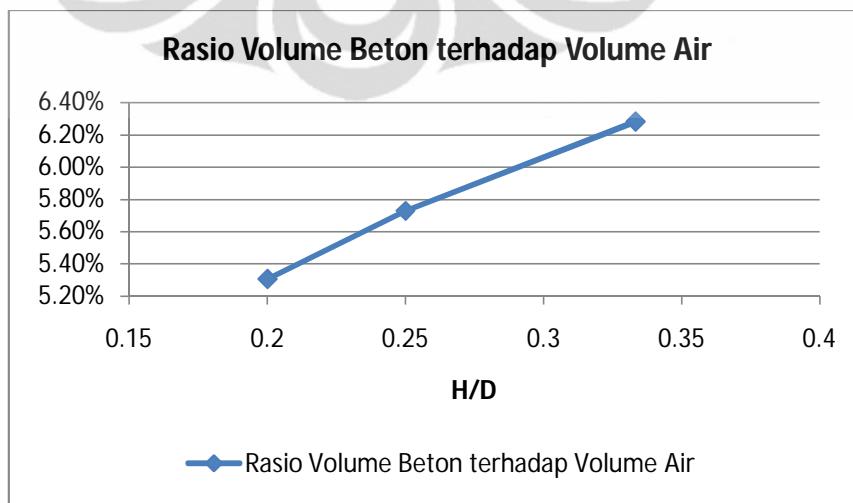
Tabel 4.2 Perbandingan Volume Beton dan Berat Struktur antar rasio

Rasio H/D	1:5	1:4	1:3
Berat Beton Dinding (kN)	1265.861	1367.964	1500.17
Volume Beton ( $m^3$ )	52.744208	56.9985	62.50708
Berat Beton Kubah Atap (kN)	485.521	419.925	345.233
Volume Beton ( $m^3$ )	20.230042	17.496875	14.38471
Total Berat Struktur (kN)	1751.382	1787.889	1845.403
Total Volume Beton	72.97425	74.495375	76.89179

Pada Grafik 4.1 Total Berat Struktur Antar Rasio Grafik 4.1 dan Grafik 4.2 dapat dilihat bahwa rasio tinggi dan diameter berbanding lurus terhadap berat struktur dan rasio volume beton terhadap volume air yang tertampung.



Grafik 4.1 Total Berat Struktur Antar Rasio



Grafik 4.2 Rasio Volume Beton terhadap Volume Air Tertampung

Apabila ditinjau berdasarkan volume beton yang diperlukan untuk konstruksi dinding dan atap tangki terhadap volume air yang dapat ditampung untuk volume yang sama, maka sekalipun dengan ketebalan dinding yang sama, biaya konstruksi dari tangki akan semakin besar untuk rasio yang semakin besar. Dengan demikian rasio 1 : 3 membutuhkan biaya yang paling mahal sedangkan rasio 1 : 4 berada pada nilai yang moderat diantara rasio lainnya. Rasio 1 : 5 merupakan rasio yang paling ekonomis ditinjau dari volume beton yang digunakan.

#### 4.2.2 Respons Terhadap Beban Gempa

Dalam perhitungan beban hidrodinamik, diasumsikan bahwa cairan inkompresibel dan viskositasnya diabaikan serta alirannya irrotasional dan diasumsikan struktur serta gerakan cairan berada dalam respons linear elastis. Gerakan cairan pada kondisi ini memenuhi persamaan Laplace sesuai dengan kondisi batas pada dasar dinding, dinding dan permukaan cairan yang bebas. (Veletsos, 1984)

Solusi dari persamaan Laplace yang tidak dijabarkan detail pada tulisan ini dinyatakan sebagai penjumlahan dua buah komponen yang dikenal sebagai komponen impulsif dan konvektif. Komponen solusi impulsif memenuhi kondisi batas pada dinding, dasar tangki dan nilai 0 tekanan hidrodinamik pada permukaan air ( $z = H$ ) akan tetapi komponen ini tidak memperhitungkan gerakan air pada permukaan akibat *sloshing action* sehingga komponen konvektif akan mengoreksi selisih pada kondisi batas di permukaan air dengan efek *sloshing*.

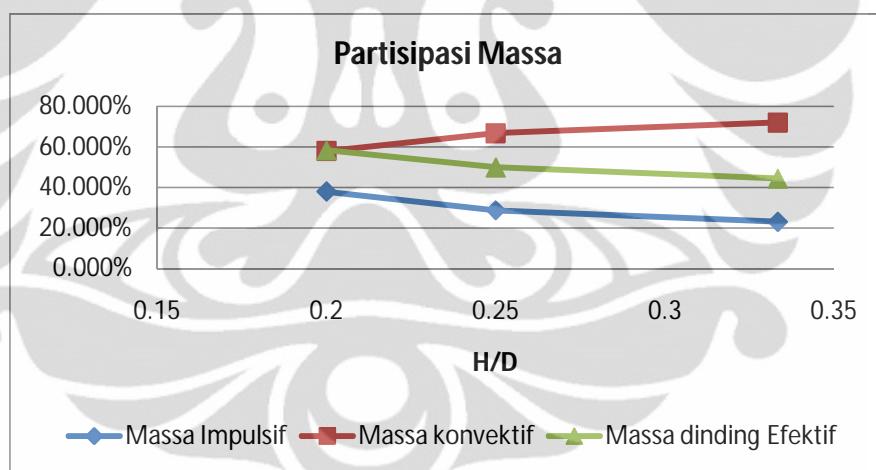
Dari Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa partisipasi massa untuk komponen impulsif dan konvektif cairan apabila dijumlahkan nilainya tidak sama dengan 100% massa total cairan, hal ini dikarenakan adanya selisih dan asumsi dan pembulatan dalam penurunan formula untuk memperoleh nilai ini. (Indian Institute Technology of Kanpur (IITK), 2007)

Tabel 4.3 Partisipasi Massa

Partisipasi Massa	1:5	1:4	1:3
<b>Massa Impulsif</b>	38,067%	28,8120%	23,0870%
<b>Massa konvektif</b>	58,071%	66,7830%	72,0730%
<b>Total</b>	96,14%	95,60%	95,16%
<b>Massa dinding Efektif</b>	58,450%	49,9400%	44,4500%

Dari Grafik 4.3 dapat disimpulkan bahwa semakin besar rasio tinggi banding diameter, maka semakin kecil komponen massa impulsif dan semakin besar komponen massa konvektif.

Massa tangki yang berpartisipasi dalam gempa (massa efektif) merupakan hasil perkalian antara nilai  $\epsilon$  dengan massa dinding dan nilainya akan semakin kecil ketika rasio tinggi dan diameter semakin membesar. Massa efektif ini akan terkait dengan gaya inersia tangki yang nilainya relatif kecil dan dapat diabaikan (Veletsos, 1984).



Grafik 4.3 Partisipasi Massa Untuk Rasio yang Berbeda

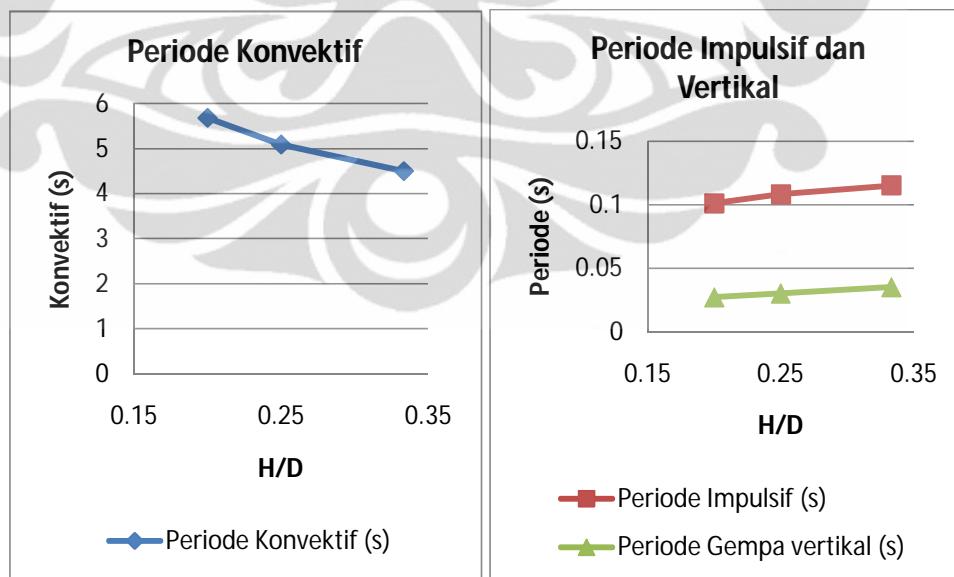
Untuk memperoleh beban hidrodinamik digunakan pendekatan analisis statik ekivalen dimana respons struktur mode pertama (impulsif) dan mode kedua (konvektif) akibat eksitasi gempa lebih dominan/fundamental dari pada mode berikutnya (Wood & Priestley, 2003) sehingga properti dinamik yang akan diperhatikan adalah pada mode pertama. Pada Tabel 4.4 dan Grafik 4.4 ditunjukkan bahwa periode konvektif akan semakin besar sebanding dengan semakin besarnya rasio tinggi dan diameter dan nilainya di atas 2.4 detik. Sedangkan periode impulsif berkisar dibawah 1 detik dan nilainya semakin

mengcil ketik rasio tinggi-diameter tangki semakin besar. Demikian pula untuk periode gempa vertikal.

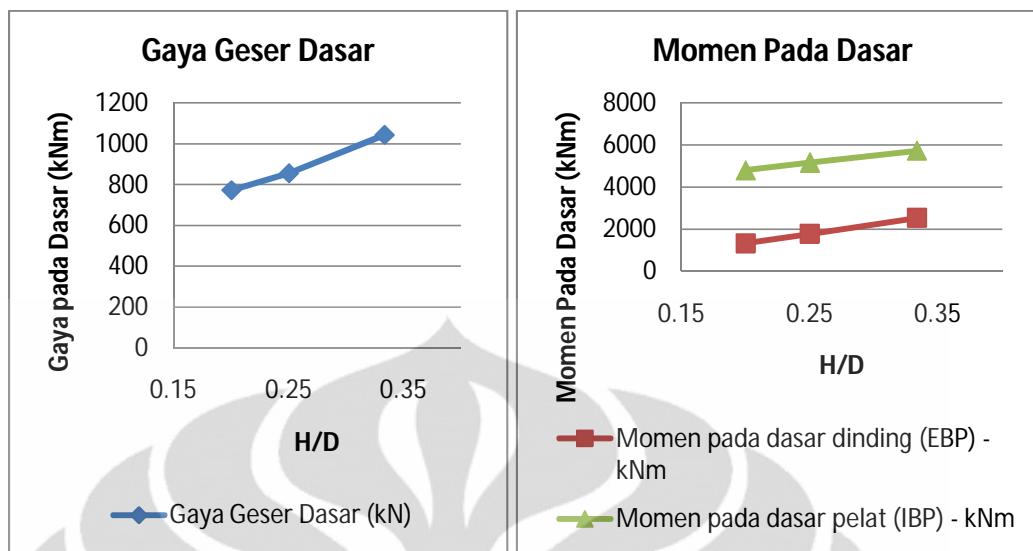
Secara umum, akan lebih banyak energi yang diserap pada periode yang relatif pendek, dalam hal ini periode impulsif daripada periode yang relatif lebih panjang (Larkin, 2008). Dengan demikian, gaya gempa yang terjadi akan lebih dipengaruhi oleh komponen impulsif seperti yang ditunjukkan pada Grafik 4.5 yang menunjukkan bahwa nilai gaya geser dan momen pada dasar semakin membesar ketika rasio tinggi-diameter tangki semakin besar seperti halnya periode impulsif.

Tabel 4.4 Properti Dinamik

Properti dinamik	1:5	1:4	1:3
<b>Periode Impulsif (s)</b>	0,115	0,108	0,101
<b>C<sub>i</sub></b>	1,833	1,833	1,833
<b>Periode Konvektif (s)</b>	4,503	5,091	5,683
<b>C<sub>c</sub></b>	0,186	0,231	0,296
<b>Periode Gempa vertikal (s)</b>	0,035	0,03	0,027
<b>C<sub>v</sub></b>	1,833	1,833	1,833

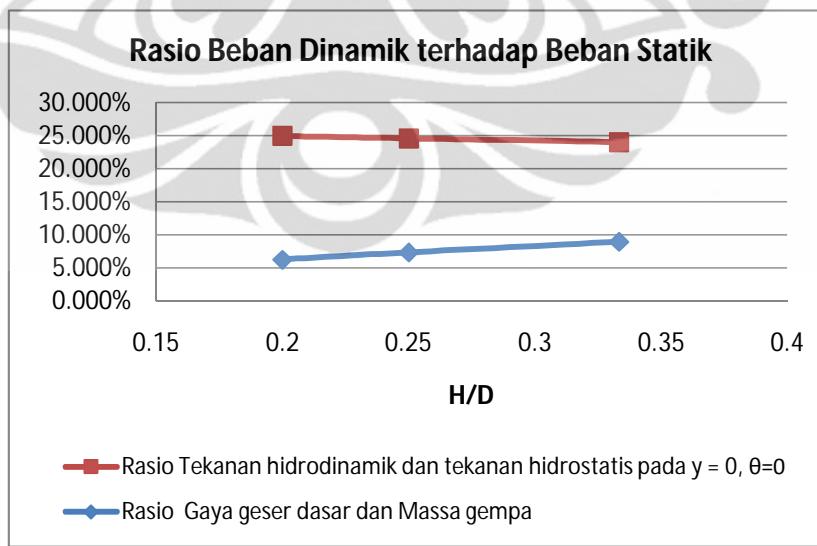


Grafik 4.4 Periode Impulsif, Konvektif dan Gempa Vertikal



Grafik 4.5 Respons Struktur

Pengaruh beban hidrodinamik terhadap struktur tangki berbanding terbalik terhadap rasio tinggi-diameter tangki. Semakin besar rasio tinggi-diameter akan mengakibatkan dinding tangki semakin tinggi sehingga sekalipun gaya geser dasar meningkat sebanding dengan rasio tinggi-diameter (struktur semakin berat), rasio beban hidrodinamik terhadap beban hidrostatik semakin mengecil seperti yang ditunjukkan pada Grafik 4.6 karena beban hidrostatis yang terjadi semakin membesar.



Grafik 4.6 Rasio Beban dinamik terhadap beban statik

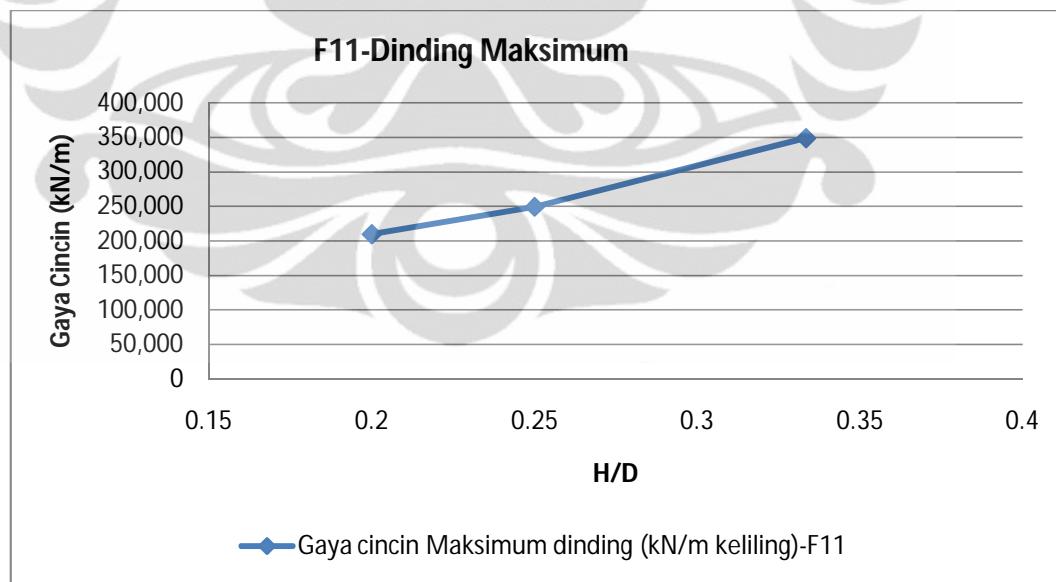
Dengan demikian, untuk volume yang sama rasio 1 : 3 tekanan hidrodinamik memberikan pengaruh yang lebih sedikit dibandingkan dengan rasio

lainnya sekalipun gaya gempa yang harus ditahan lebih besar (pembahasan lebih detail pada sub bab berikutnya). Rasio 1 : 5 memiliki proporsi tekanan hidrodinamik paling besar sekalipun gaya gempa yang diterima paling kecil. Dengan demikian, rasio 1 : 4 dapat diambil sebagai alternatif yang cukup moderat dalam desain awal berdasarkan pertimbangan ini.

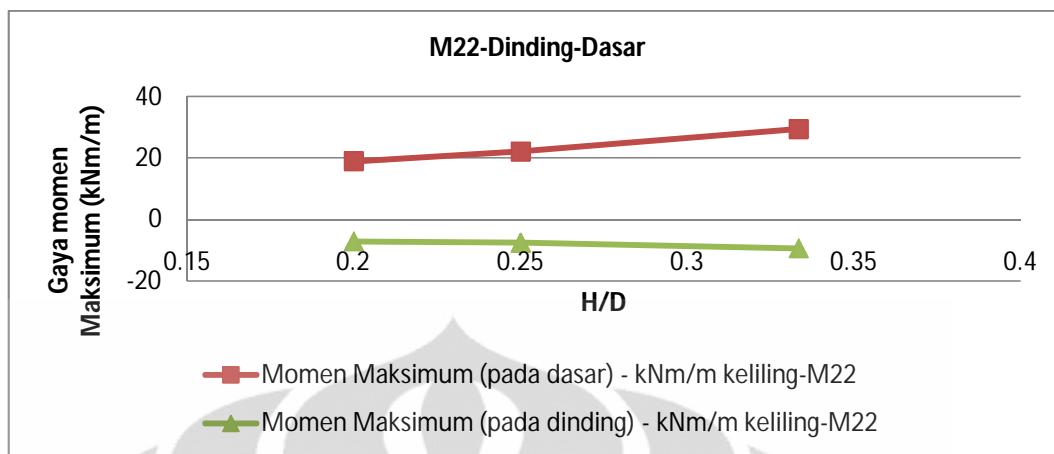
#### 4.2.3 Gaya Dalam Akibat Beban Terkombinasi

Pada Grafik 4.7 dan Grafik 4.8 ditunjukkan gaya dalam maksimum yang terjadi pada potongan dinding maksimum (arah  $\theta = 0^0$  terhadap arah beban gempa). Gaya dalam F11 merupakan gaya tarik cincin dengan arah horizontal-melingkar, sedangkan Gaya dalam M22 merupakan gaya momen vertikal yang memutar dinding tangki dengan sumbu arah tangensial

Gaya dalam pada dinding dengan beban terkombinasi COMB 1 (1.2 D + 1.2 Hidrostatis dan 1 Hidrodinamik) sebanding dengan pembesaran rasio tinggi-diameter tangki. Faktor yang menyebabkan gaya dalam semakin besar adalah semakin tingginya tangki air dimana gaya hidrostatis akan semakin besar. Gaya hidrostatis ini memiliki proporsi terbesar dalam pembebanan yang terjadi (lihat Grafik 4.26)

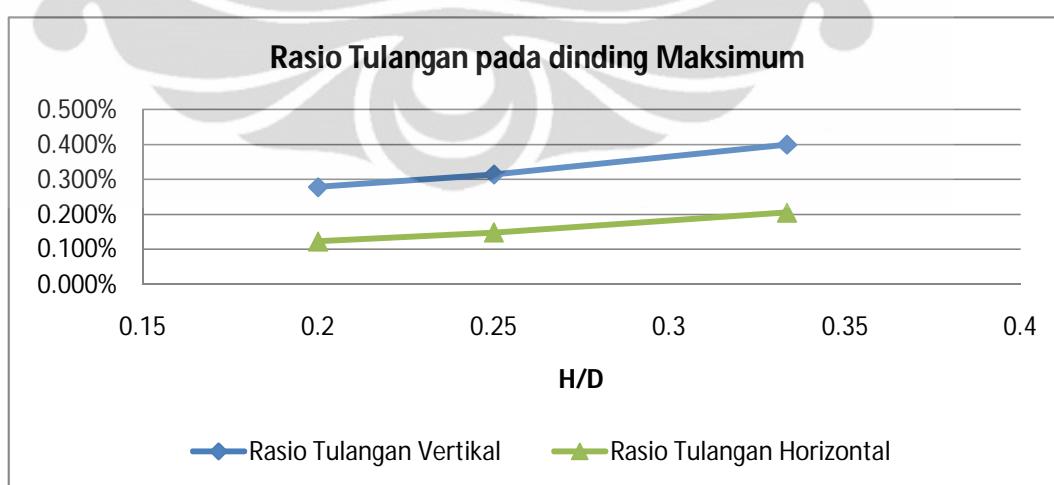


Grafik 4.7 Gaya Dalam Cincin Pada Potongan Dinding Maksimum



Grafik 4.8 Gaya Dalam Momen Pada Potongan Dinding Maksimum

Dengan menggunakan desain penulangan shell pada SAP2000 (lihat sub bab 3.9), dapat diperoleh nilai intensitas tulangan dinding untuk arah vertikal maupun horizontal. Grafik 4.9 menunjukkan rasio tulangan terhadap luas permukaan dinding dimana semakin besar rasio tinggi-diameter tangki mengakibatkan semakin besarnya gaya dalam yang harus ditahan dinding dan mengakibatkan luas tulangan yang dibutuhkan semakin banyak sehingga tangki dengan rasio tinggi-diameter besar seperti 1 : 3 kurang ekonomis untuk digunakan menampung cairan dengan volume yang sama. Rasio 1 : 5 menjadi rasio yang paling ekonomis dalam perbandingan yang telah dilakukan, sementara rasio 1 : 4 kembali berada pada nilai tengah diantara dua rasio lainnya.

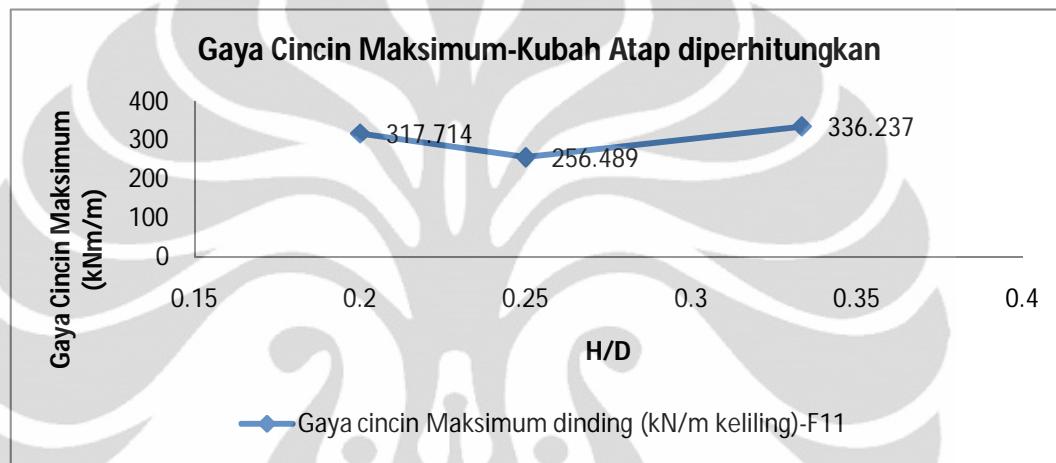


Grafik 4.9 Rasio Tulangan Vertikal dan Horizontal dengan Baja Lunak

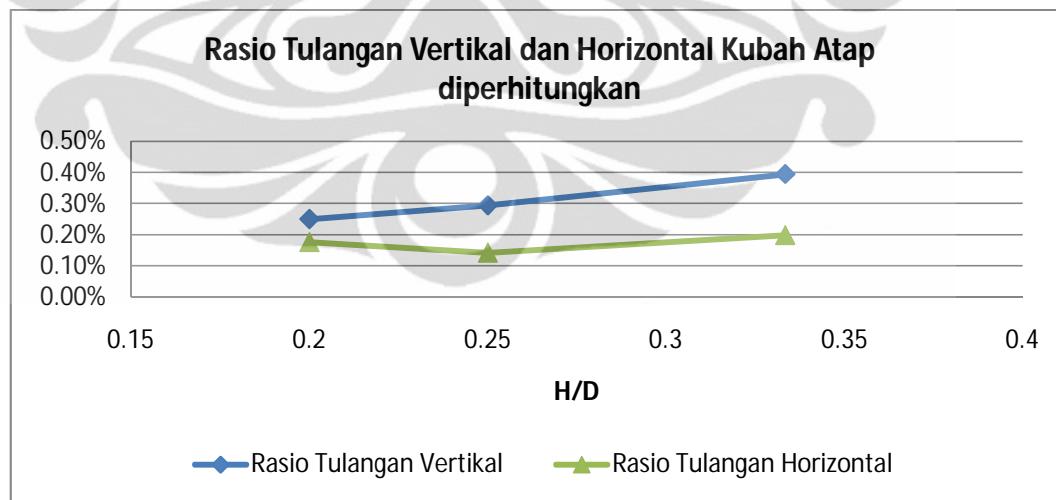
Namun demikian apabila pengaruh kubah atap diperhitungkan, maka terjadi perubahan yang signifikan pada nilai gaya cincin dimana nilai maksimum

justru tercapai pada daerah dinding yang mendekati atap. Penjelasan detail tentang hal ini akan dijelaskan pada sub bab 4.5 dimana kubah atap sangat mempengaruhi perilaku dinding tangki.

Yang perlu diperhatikan pada bagian ini seperti yang ditampilkan pada Grafik 4.10 dan Grafik 4.11 adalah bahwa atap dengan sudut cangkang yang sama tetapi dengan bentangan yang berbeda sesuai rasio tinggi-diameter tangki tampak memiliki titik balik pada rasio 1 : 4 sedemikian hingga rasio 1 : 4 menjadi lebih ekonomis dalam hal penulangan horizontal.



Grafik 4.10 Gaya Cincin Maksimum-Kubah Atap diperhitungkan



Grafik 4.11 Rasio Tulangan Vertikal dan Horizontal Kubah Atap Diperhitungkan

Rasio 1 : 5 memiliki diameter yang paling lebar dibandingkan dengan rasio lainnya, hal ini sangat berpengaruh pada gaya dalam dinding karena kubah atap yang bertumpu pada dinding akan memberikan gaya tekan kubah (gaya

meridional) atap sebanding dengan diameter tangki. Dengan demikian semakin kecil rasio tinggi-diameter tangki akan berakibat pada semakin lebarnya tangki dan semakin berat kubah atap tangki (lihat Tabel 4.2 Perbandingan Volume Beton dan Berat Struktur antar rasio) sehingga aksi pada dinding tangki akan semakin besar.

#### 4.2.4 Dimensi Optimum

Dengan memperhatikan pertimbangan-pertimbangan pada sub bab sebelumnya, dapat diambil kesimpulan bahwa rasio 1 : 3 tidak optimal karena gaya dalam pada dinding tangki lebih besar dan berakibat pada penulangan yang diberikan serta rasio ini memerlukan volume beton yang lebih banyak dibandingkan dengan rasio lainnya.

Rasio 1 : 5 merupakan rasio yang paling ekonomis ditinjau dari volume beton dan penulangan yang diperlukan. Namun demikian, ketika kubah atap diperhitungkan, maka kubah akan memberikan aksi yang cukup besar pada dinding sehingga berakibat pada semakin besarnya penulangan yang harus diberikan. Disamping itu, rasio tekanan hidrodinamik dan hidrostasis yang terjadi pun paling besar dibandingkan rasio lainnya sehingga gaya gempanya pun paling besar.

Rasio 1 : 4 dengan demikian paling optimal dibandingkan dengan rasio lainnya karena perlakunya cukup moderat pada aspek-aspek yang ditinjau pada bagian ini yaitu selalu berada pada nilai tengah. Hal ini kemungkinan menjadi sebagian alasan dalam laporan preload engineering tentang rasio dimensi tangki yang ekonomis (Preload Engineering Company, Inc.) seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.10 Perbandingan dimensi ekonomis untuk tangki air.

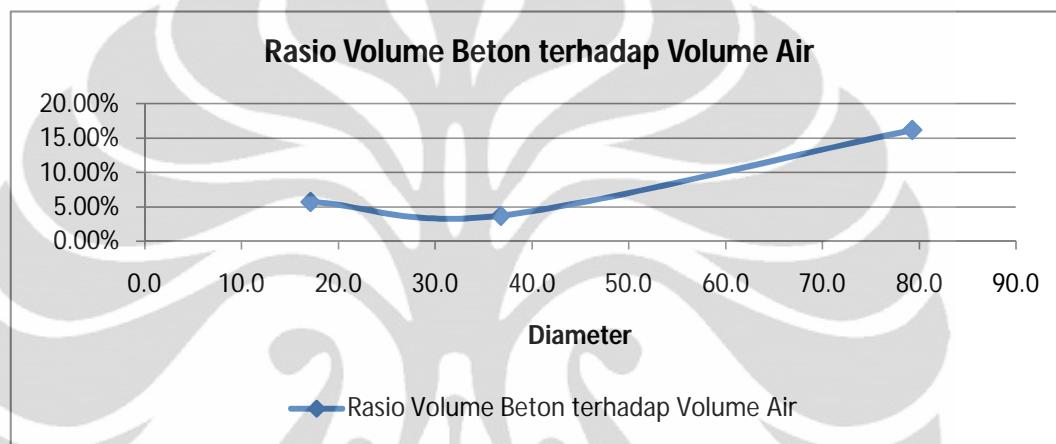
### 4.3 Perbandingan perilaku tangki untuk pengekangan yang berbeda

#### 4.3.1 Rasio Volume Beton Terhadap Volume Air

Pada Grafik 4.12 ditunjukkan bahwa semakin besar diameter tangki untuk rasio tinggi-diameter yang sama volume beton yang diperlukan menjadi semakin besar. Hal ini dikarenakan pada permodelan yang dilakukan diperbandingkan antara model dengan diameter kecil hingga diameter besar yang propertiya telah diatur pada sub bab 3.3. Perhatikan bahwa ketebalan dinding yang diperlukan

semakin besar bahkan sampai 1 meter untuk diameter tangki 79 m sehingga berakibat pada semakin besarnya berat dan volume beton yang diperlukan sehingga tangki semakin mahal sekalipun kapasitas air tertampung sangat besar.

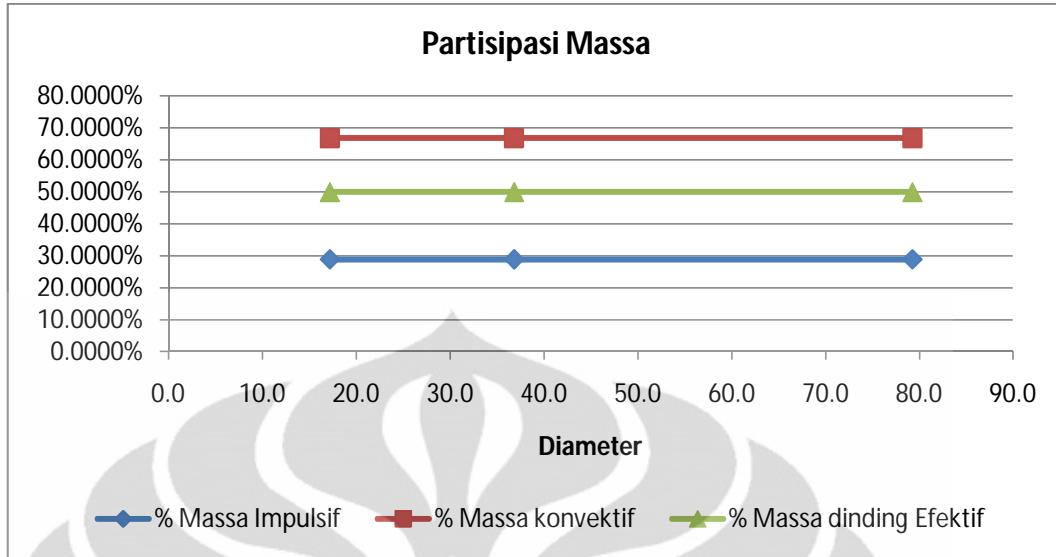
Ketebalan dinding yang semakin besar ini terkait dengan tegangan yang terjadi pada dinding dimana sesuai dengan karakteristiknya beton tidak terlalu kuat untuk menahan tegangan tarik. Pembahasan lebih detail tentang tegangan akan dibahas pada sub bab 4.4.5 Pengaruh Pemberian Prategang Terhadap Tegangan Dinding dan Dasar Dinding.



Grafik 4.12 Rasio Volume Beton Terhadap Volume Air Untuk Diameter yang Berbeeda

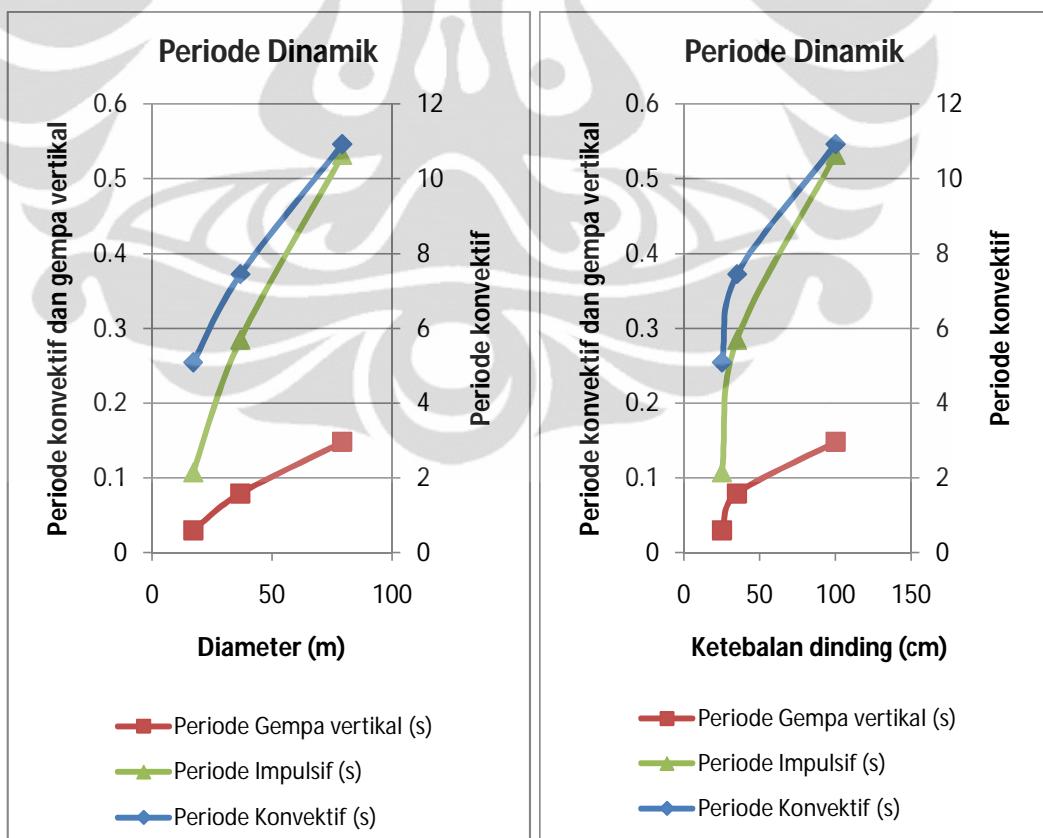
#### 4.3.2 Respons Struktur Terhadap Beban Gempa

Partisipasi massa ditunjukkan pada Grafik 4.13 dan dapat dilihat bahwa baik komponen massa impulsif dan massa konvektif serta massa dinding efektif semuanya konstan sekalipun diameter tangki semakin membesar. Nilai konstan ini dikarenakan pada penentuan nilai komponen partisipasi massa seluruh persamaannya dipengaruhi oleh rasio tinggi-diameter yang ditunjukkan pada Grafik 2.1 Faktor massa Impulsif dan convektif vs ratio  $D/H_L$ , sehingga ketika rasio tinggi-diameter konstan maka akan memberikan komponen massa yang relatif konstan juga. Hal ini berlaku untuk semua tipe pengekangan dasar dinding tangki.



Grafik 4.13 Partisipasi Massa Untuk Pengekangan yang Berbeda

Periode dinamik yang diperhitungkan pada perhitungan beban gempa yang dipakai dalam ACI 350.3 – 01 merupakan periode yang fundamental saja (Veletsos, 1984).



Grafik 4.14 Periode Tangki dengan Dinding Rigid (Perletakan Jepit dan Sendi)

Dari Grafik 4.14 dibandingkan periode yang terjadi terhadap diameter dan ketebalan dinding untuk tangki dengan asumsi dinding yang terkekang Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa semakin besar diameter tangki semakin besar periode impulsif, konvektif, dan periode vertikal.

Pada periode impulsif, pengaruh ketebalan tangki  $t_w$  tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan jari-jari tangki karena ketebalan tangki jauh lebih kecil daripada diameter tangki seperti yang dibuktikan pada persamaan berikut ini

$$\omega_i = C_I \times \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{10^3 E_c}{\rho_c}}$$

$$C_I = C_w \times \sqrt{\frac{t_w}{10R}}$$

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

Sehingga

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{2\pi}{\omega_i} = \frac{2\pi}{C_I \times \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{10^3 E_c}{\rho_c}}} = \frac{2\pi}{C_w \times \sqrt{\frac{t_w}{10R}} \times \frac{1}{H_L} \sqrt{\frac{10^3 E_c}{\rho_c}}} \\ &= \frac{2\pi}{C_w} \sqrt{\frac{10R}{t_w}} H_L \sqrt{\frac{\rho_c}{10^3 E_c}} \end{aligned}$$

Pada rasio yang tetap, periode konvektif hanya dipengaruhi oleh variabel diameter sesuai dengan persamaan

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{D}}, \text{ dimana } \lambda = \sqrt{3.68g \tanh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right]}$$

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

Demikian pula untuk periode gempa vertikal sesuai persamaan

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

Dengan demikian, untuk ketiga periode tersebut nilainya akan sebanding dengan akar variabel dari jari-jari sehingga kurva peningkatan periode berbentuk setengah parabola yang terbuka ke kanan.

Pada tangki dengan dasar yang dapat bergerak bebas yang menggunakan kabel seismik didasarnya akan memberikan perilaku yang lebih fleksibel dimana kekakuan didasar dinding relatif terhadap kekakuan yang diberikan oleh kabel dan juga *elastomeric bearing pad*. Perhitungan terhadap periode impulsif untuk tangki yang fleksibel berbeda dengan tipe yang terkekang didasarnya seperti yang ditunjukkan pada sub bab 2.12.4. Hasil dari perhitungan tersebut diberikan pada Tabel 4.5 dan dapat simpulkan bahwa periode impulsif tangki dasar yang dapat bergerak bebas cenderung lebih besar daripada tangki dengan dasar terkekang

Tabel 4.5 Perbandingan Periode Impulsif Untuk Tangki Rigid dan Tangki Fleksibel

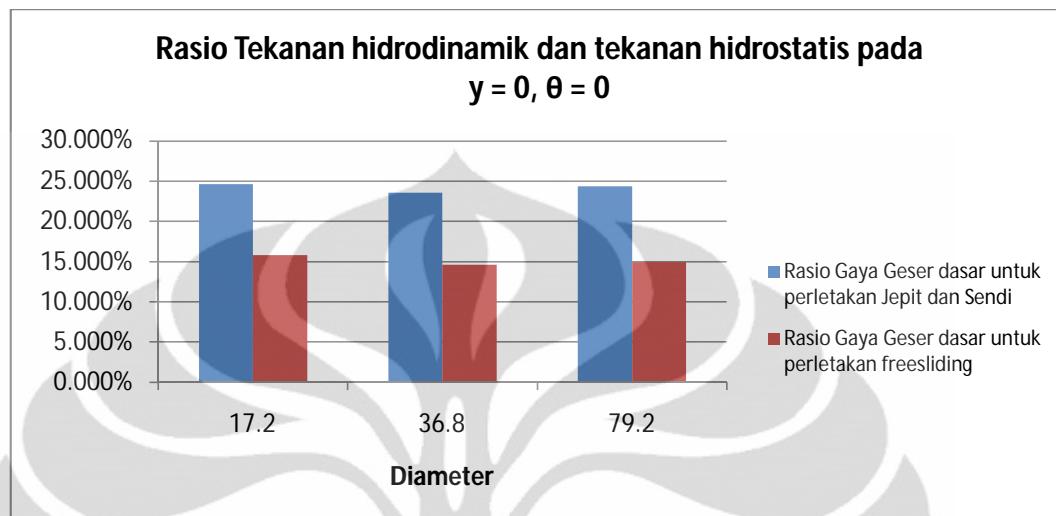
Diameter	17.2 m	36.8 m	79.2 m
<b>Dinding Tangki Rigid</b>	0,108	0,285	0,532
<b>Dinding Tangki Fleksibel</b>	0,139	0,307	0,599
<b>Rasio</b>	1,293	1,08	1,127

Periode impulsif yang lebih besar tidak selalu menimbulkan pengaruh tekanan impulsif yang lebih besar karena terdapat interval nilai periode impulsif dimana faktor koefisien gempa  $C_i$  dipengaruhi oleh nilai periode impulsif secara langsung yaitu ketika periode impulsif diatas 2,5 detik.

Disamping periode impulsif yang berbeda, pada dinding tangki yang dapat bergerak bebas (fleksibel) faktor reduksi beban gempa  $R_{wi}$  lebih besar daripada tangki dengan dasar berupa sendi ataupun jepit sehingga beban gempa yang diterima oleh tangki dengan dasar bergerak bebas akan selalu lebih kecil daripada tangki dengan dasar yang terkekang seperti yang ditunjukkan pada Grafik 4.15 Rasio Tekanan hidrodinamik dan tekanan hidrostatis pada  $y = 0, \theta = 0$ .

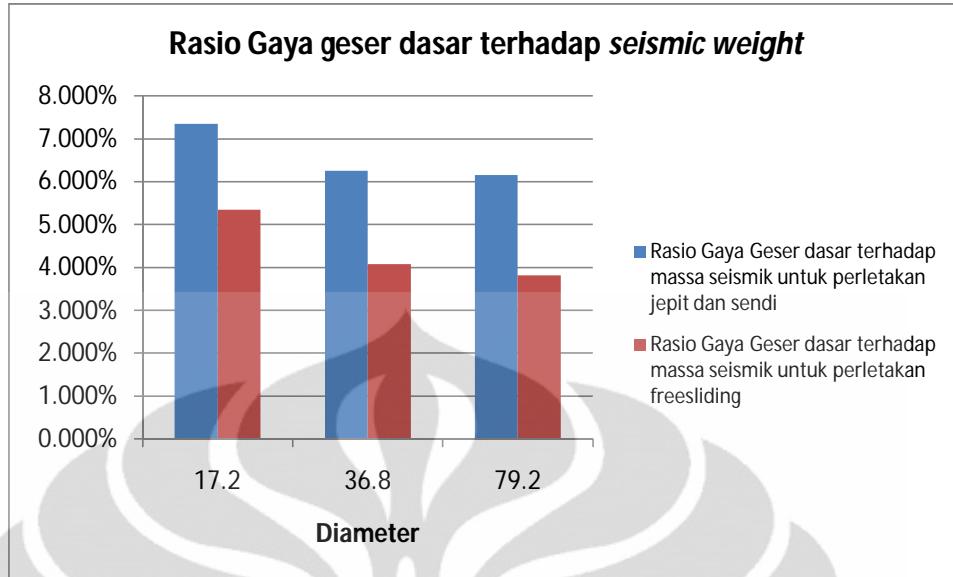
Tekanan hidrodinamik sangatlah dipengaruhi oleh percepatan gempa zona tertentu dan merupakan penjumlahan kombinasi dari akar jumlah kuadrat (SRSS) baik tekanan impulsif, tekanan konvektif, tekanan akibat gempa vertikal dan Inersia dinding. Grafik 4.15 juga memperlihatkan bahwa untuk tangki dengan rasio yang sama namun dengan diameter yang membesar akan memiliki rasio tekanan hidrodinamik terhadap tekanan hidrostatis sekitar 24%. Pada kondisi gempa yang sifatnya sementara, peningkatan tegangan sebesar 33% diijinkan (Jaiswal & Jain, 2005), sehingga tekanan hidrodinamik dapat dikatakan memiliki

pengaruh yang kecil terhadap desain awal tangki untuk wilayah gempa zona 2A atau setara wilayah 3 Jakarta yang umumnya secara sederhana didesain berdasarkan tekanan hidrostatis.



Grafik 4.15 Rasio Tekanan hidrodinamik dan tekanan hidrostatik pada  $y = 0, \theta = 0$

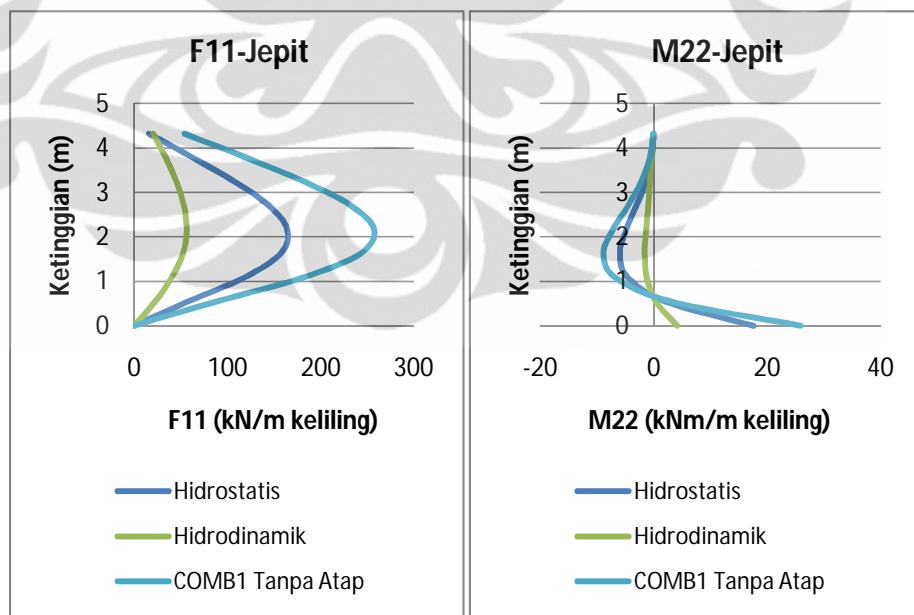
Grafik 4.16 menunjukkan rasio gaya geser dasar terhadap beban total yang cenderung mengcil ketika diameter membesar. Penurunan gaya geser dasar ini seharusnya sebanding dengan semakin lebarnya diameter tangki dan ketebalan dinding tangki, namun demikian pada diameter 79.2 m penurunan nilai rasio gaya geser dasar terhadap beban mati dari nilai disampingnya untuk diameter 36.8 m tidak begitu signifikan hal ini merupakan akibat dari peningkatan ketebalan dinding tangki yang bertambah dari ketebalan 35 cm (diameter 36.8 m) sampai 100 cm (diameter 79.2 m). Penambahan ketebalan dinding yang cukup besar ini diperlukan untuk menahan tegangan yang besar pada dinding yang akan dibahas pada sub bab 4.4.5.



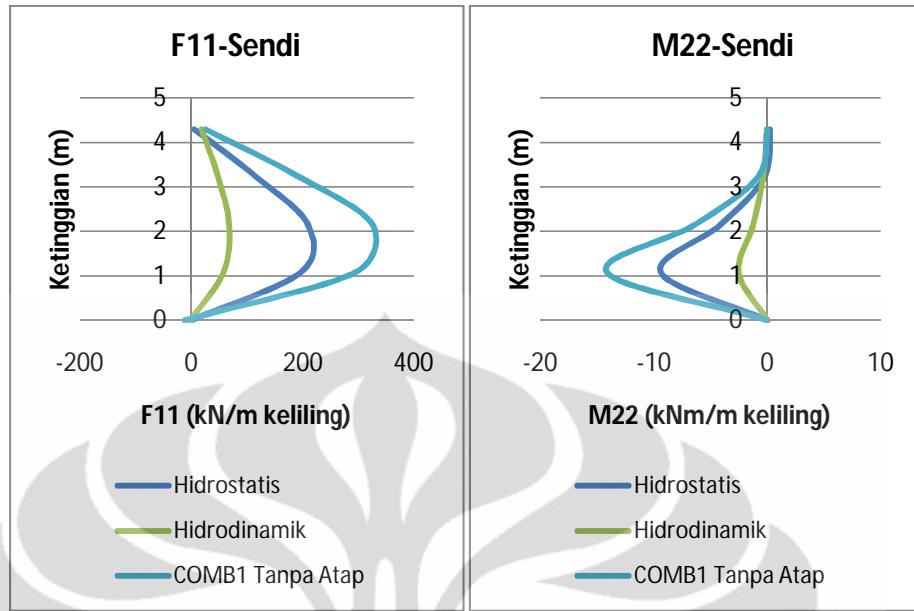
Grafik 4.16 Rasio Gaya geser dasar terhadap seismic weight

#### 4.3.3 Gaya Dalam Tangki Untuk Pengekangan yang Berbeda

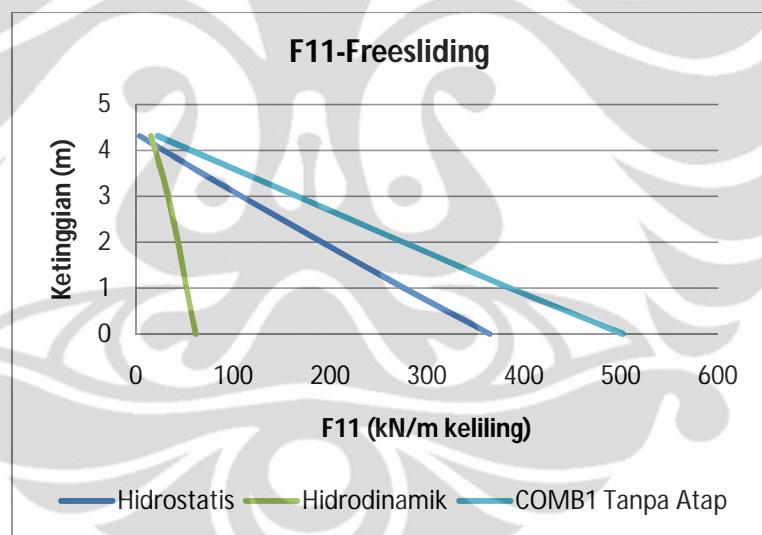
Gaya dalam merupakan gaya yang menahan gaya rambat pada sebuah elemen struktur untuk mencapai keseimbangan. (Arbintarso, 2007). Grafik 4.17 sampai Grafik 4.25 menunjukkan gaya dalam pada strip vertikal dinding yang maksimum (arah  $\theta = 0^0$ ) terhadap arah pembebahan gempa.



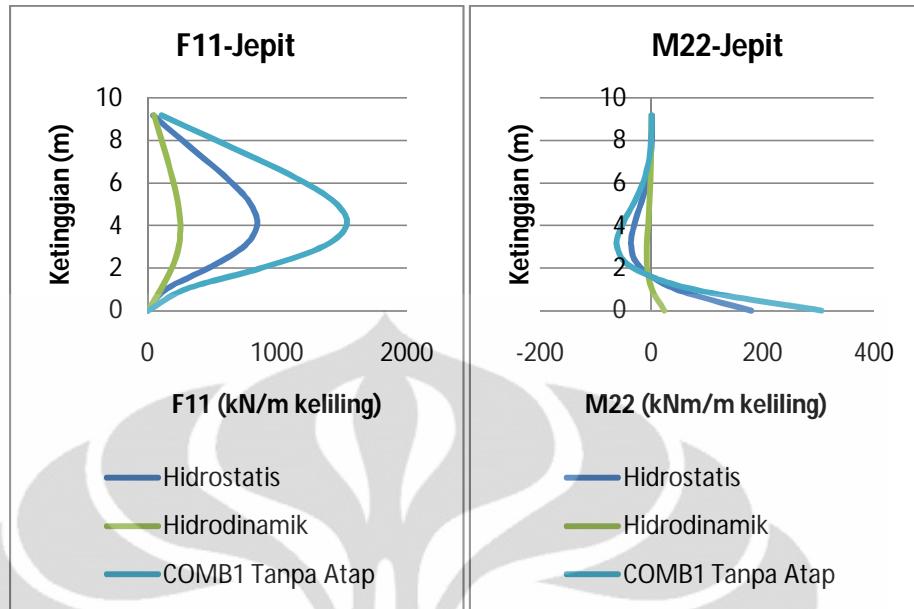
Grafik 4.17 Diameter 17.2 m Perletakan Jepit



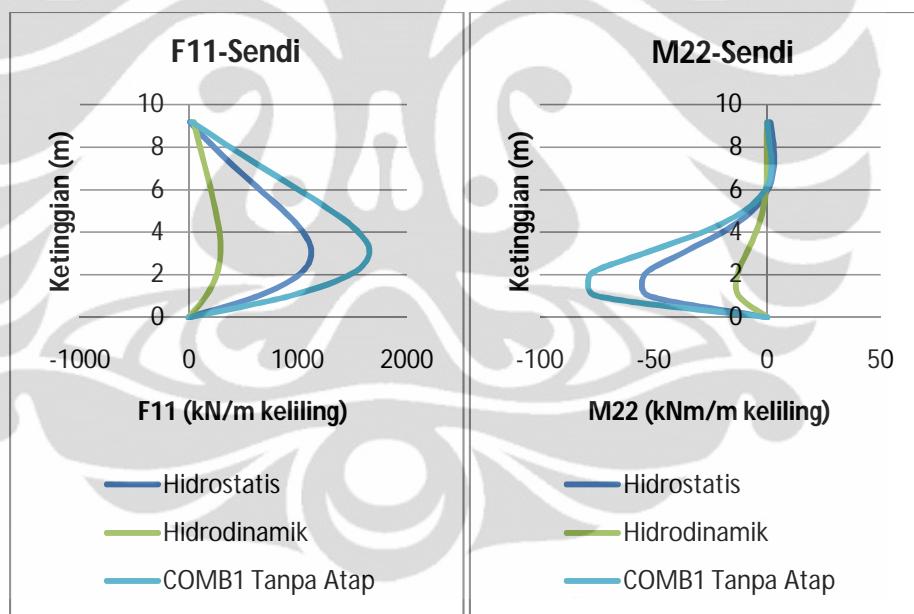
Grafik 4.18 Diameter 17.2 m Perletakan Sandbag



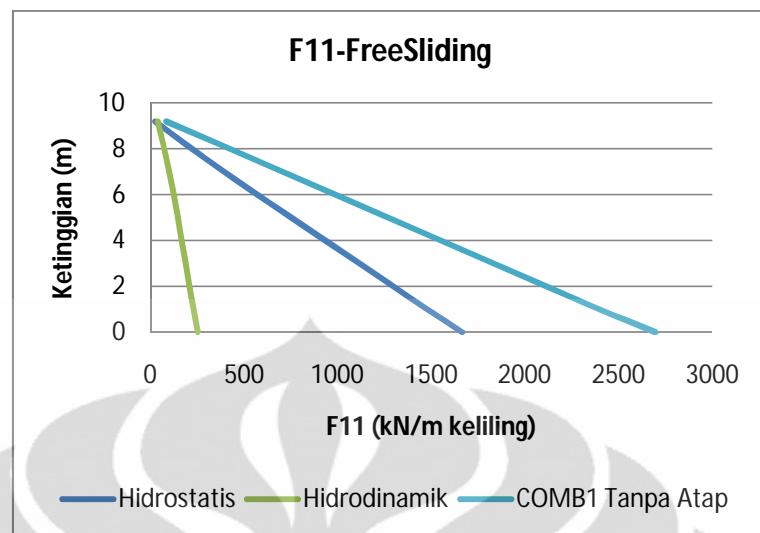
Grafik 4.19 Diameter 17.2 m Perletakan Freesliding



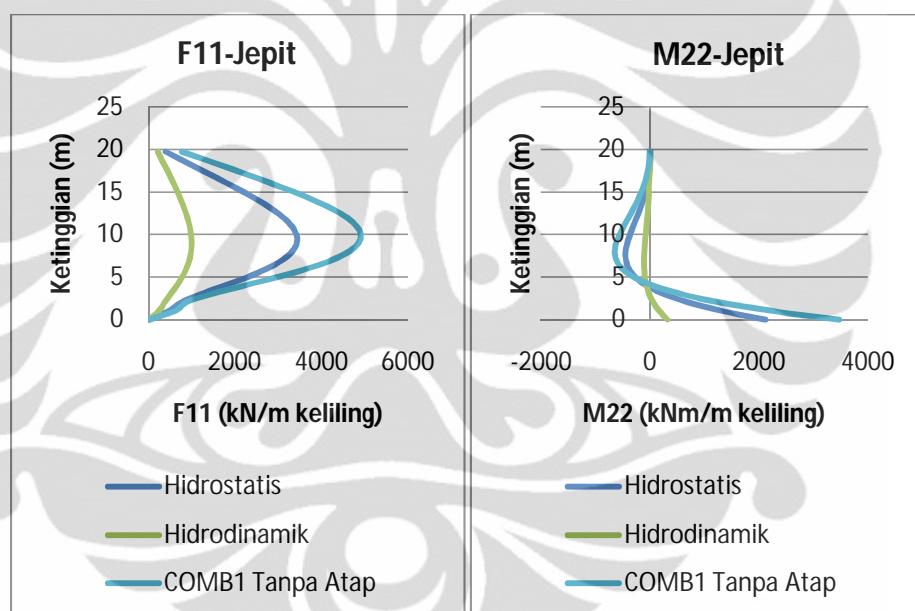
Grafik 4.20 Diameter 36.8 m Perletakan Jepit



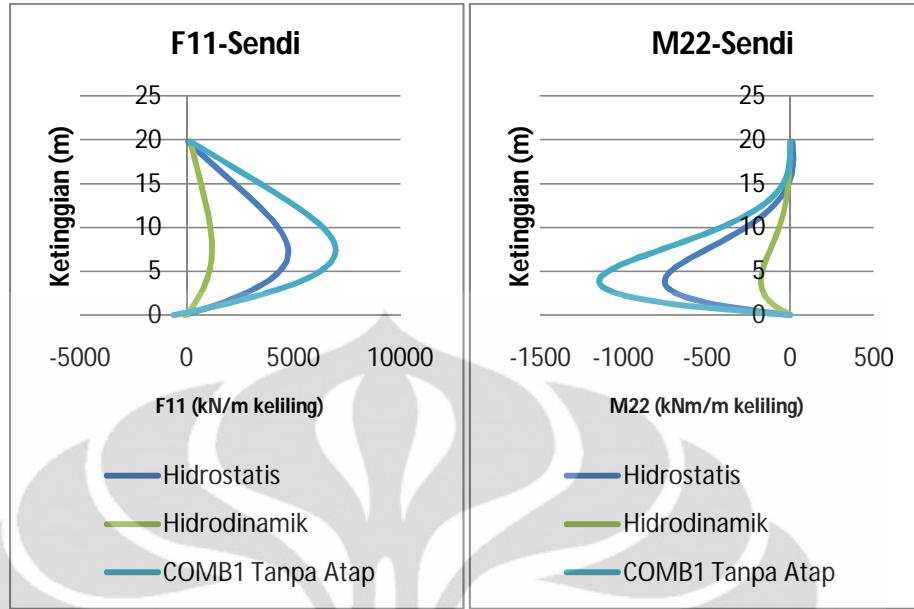
Grafik 4.21 Diameter 36.8 m Perletakan Sendi



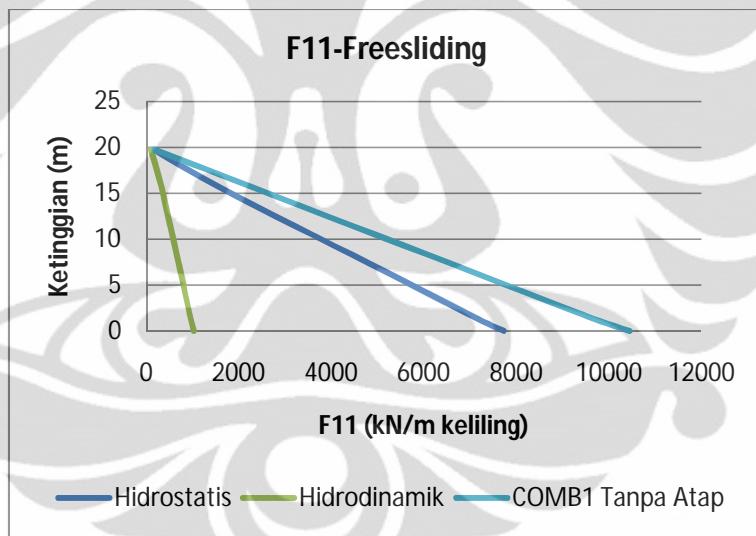
Grafik 4.22 Diameter 36.8 m Perletakan Freesliding



Grafik 4.23 Diameter 79.2 m Perletakan Jepit



Grafik 4.24 Diameter 79.2 m Perletakan Sendi



Grafik 4.25 Diameter 79.2 m Perletakan Freesliding

Secara umum dapat dilihat bahwa gaya dalam pada dinding tangki memiliki bentuk yang tipikal untuk masing-masing tipe perletakan. Gaya cincin pada ketiga tipe perletakan akibat beban hidrostatis pada elevasi  $z = H$  akan bernilai 0 sedangkan akibat beban hidrodinamik pada elevasi sama, nilai beban tidak bernilai 0 akibat adanya pengaruh *sloshing* tekanan konvektif.

Perletakan jepit mengekang seluruh derajat kebebasan di dasar dinding sehingga perletakan ini memiliki momen pada dasar dinding dan akan sedikit menahan peningkatan gaya cincin di dekat dasar dinding.

Perletakan sendi tidak menahan momen pada dasar dinding sehingga momen pada dasar sendi bernilai 0 dan bernilai maksimum pada elevasi sekitar 1/3 dari ketinggian dinding dihitung dari dasar tangki. Gaya cincin pada perletakan sendi cukup tipikal dengan perletakan jepit hanya saja peningkatan gaya cincin di dekat dasar dinding tidak dipengaruhi oleh pengekangan yang diberikan.

Hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa perletakan *free sliding* tidak memiliki nilai momen di sepanjang dindingnya akibat tidak adanya pengekangan pada dasar namun memiliki gaya cincin maksimum pada dasar dinding.

Pada perletakan jepit dan sendi ketinggian kritis akibat gaya cincin maksimum dan gaya momen maksimum tidak sama sehingga diperlukan perhatian khusus untuk desain dinding pada elevasi ketinggian kritis ini.

Penurunan nilai gaya dalam cincin dan momen adalah berdasarkan solusi persamaan differensial pada balok prismatis dengan kekakuan lentur yang ditumpu di atas pondasi elastis dan mengalami intensitas beban satuan yang dibahas pada sub bab 2.5.5. Beton memiliki kekakuan lentur yang sangat besar sehingga berakibat pada besarnya gaya dalam yang terjadi dan hal ini akan menjadi kasus yang berbeda apabila material dinding yang digunakan merupakan baja dimana gaya momen yang terjadi akan tereduksi secara signifikan pada elevasi dinding yang cukup rendah (Ofner & Greiner, 2003).

Tabel 4.6 Perbandingan Gaya dalam Maksimum Pada 3 Macam Perletakan

Gaya Dalam Maksimum		Dinding		
F11 max (kN/m)	Jepit-Dasar	Jepit	Sendi	Freesliding
17.2	17.9	257.2	325.5	501.9
36.8	207.17	1533.3	1651.9	2694.3
79.2	1126.31	4889.65	6945.92	10441.29
M22 max (kNm/m)	Jepit-Dasar	Jepit	Sendi	Freesliding
17.2	25.9	-7.2	-14.1	0.0
36.8	305.8	-62.2	-77.7	-0.1
79.2	3474.088	-635.6805	-1139.4598	-2.3525

Grafik perbandingan gaya dalam pada ketiga tipe perletakan ditampilkan pada bagian lampiran sedangkan ringkasan nilai gaya dalam maksimum untuk ketiga tipe perletakan untuk masing-masing diameter diberikan pada Tabel 4.6

Semakin lebar dan semakin tinggi dimensi tangki, gaya dalam akan semakin besar yang berakibat pada besarnya tegangan tarik dan tekan pada dinding dan dasar dinding (untuk perletakan jepit) yang nilainya berbanding lurus dengan momen vertikal dinding, sehingga diperlukan penebalan dinding untuk memperkecil tegangan (lihat Gambar 2.4) sesuai dengan persamaan

$$f_t = f_c = \frac{M_y}{S} = \frac{6M_y}{t^2}$$

per satu meter tinggi

Namun demikian, hal ini tidak berlaku pada perletakan *free sliding* karena momen pada dinding nilainya sangat kecil sehingga tidak menimbulkan tegangan atau dapat dikatakan nilai tegangan untuk perletakan *free sliding* adalah nol.

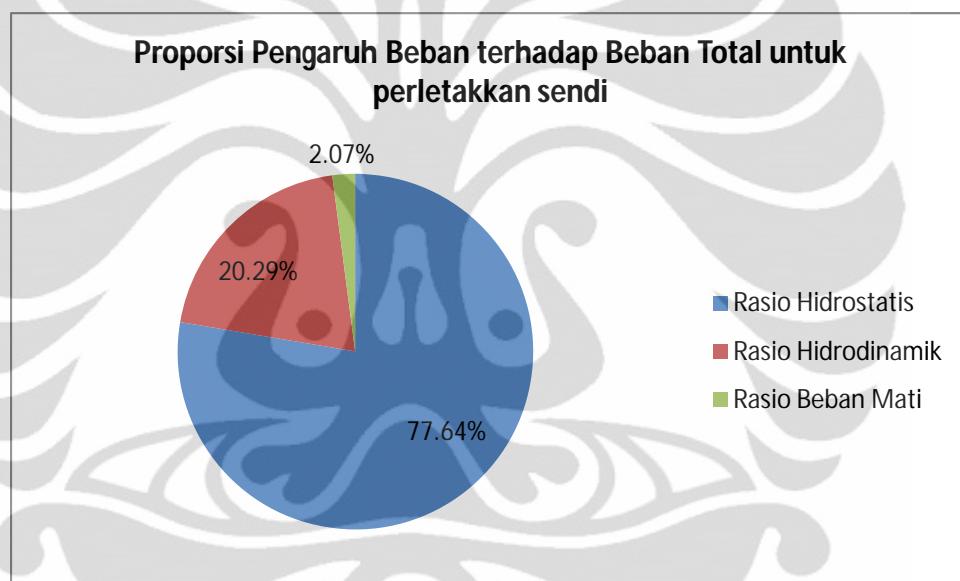
Secara umum dari grafik di atas dapat dilihat bahwa pengaruh beban terhadap beban total terkombinasi tanpa atap didominasi oleh tekanan hidrostatis. Pengaruh beban ditinjau pada gaya dalam yang ditimbulkan. Untuk mendapatkan proporsi nilai beban yang paling berpengaruh, dilakukan tabulasi terhadap gaya cincin dan momen maksimum akibat masing-masing *load case* dan dapat diperoleh kesimpulan bahwa baik gaya cincin maupun gaya momen untuk beban terkombinasi (*Dead* + Hidrostatis + Hidrodinamik) dikendalikan oleh beban hidrostatis dengan rata-rata sekitar 77%.

Tekanan Hidrostatis dengan demikian memiliki proporsi terbesar (Grafik 4.26) dalam seluruh beban kerja yang terjadi sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk desain awal (*preliminary design*) dinding tangki.

Tabel 4.7 Rasio Beban Hidrostatis, Beban Hidrodinamik dan Beban Mati terhadap Beban Total

Gaya Cincin Maksimum			
Diameter	Rasio Hidrostatis	Rasio Hidrodinamik	Rasio Beban Mati
17.2	74.19%	23.98%	1.83%
36.8	78.70%	20.38%	0.92%
79.2	79.08%	19.76%	1.16%

Gaya Cincin Maksimum			
Diameter	Rasio Hidrostatis	Rasio Hidrodinamik	Rasio Beban Mati
Rata-Rata	77.32%	21.37%	1.30%
Momen Maksimum			
Diameter	Rasio Hidrostatis	Rasio Hidrodinamik	Rasio Beban Mati
17.2	76.86%	20.38%	2.76%
36.8	80.32%	19.30%	0.38%
79.2	76.71%	17.95%	5.34%
Rata-Rata	77.96%	19.21%	2.83%
Rata-rata total	77.64%	20.29%	2.07%



Grafik 4.26 Proporsi Pengaruh Beban terhadap Beban Total Untuk Perletakan Sendi

#### 4.3.4 Deformasi Pada Dinding

Translasi pada dasar dinding atau perletakkan untuk arah radial dan vertikal maksimum yang tidak termasuk berat disajikan pada Tabel 4.8 sampai dengan Tabel 4.11. untuk masing-masing perletakan untuk ketiga macam diameter model. Sumbu lokal pada perletakan (*restraint*) diarahkan sebagai berikut u1 radial, u2 tangensial dan u3 vertikal. Arah u2 tidak diperkenankan terjadi translasi (*fixed*)

Tabel 4.8 Translasi pada dasar dinding D 17.2 m

<b>D 17.2 m</b>		Dead (mm)			hidrodinamik (mm)			hidrostatis (mm)			Prestressed (mm)		
<b>Perletakan</b>		<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>
Jepit	max	-0.0001	0	-1.059	0.054	0	0.057	0.019	0	-1.687	-0.043	0	-0.0002
	min	-0.0001	0	-1.059	-0.049	0	-0.057	0.019	0	-1.687	-0.043	0	-0.0002
Sendi	max	0	0	-3.231	0	0	0.001	0	0	-1.687	0	0	0.00001
	min	0	0	-3.231	0	0	-0.001	0	0	-1.687	0	0	0.00001
<i>Free sliding</i>	max	-0.002	0	-0.004	0.076	0	0.005	0.448	0	0.022	-0.924	0	-0.068
	min	-0.002	0	-0.004	-0.008	0	-0.001	0.448	0	0.022	-0.924	0	-0.068

Tabel 4.9 Translasi pada dasar dinding D 36.8 m

<b>D 36.8 m</b>		Dead (mm)			hidrodinamik (mm)			hidrostatis (mm)			Prestressed (mm)		
<b>Perletakan</b>		<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>
Jepit	max	0.0049	0	-0.052	0.03	0	0.031	0.132	0	-0.098	0.142	0	-0.143
	min	-0.0049	0	-0.052	-0.03	0	-0.012	-0.132	0	-0.098	-0.142	0	-0.143
Sendi	max	0	0	-0.03	0	0	0.032	0	0	0.081	0	0	-0.211
	min	0	0	-0.03	0	0	-0.002	0	0	0.081	0	0	-0.211
<i>Free sliding</i>	max	0.019	0	-0.023	0.473	0	0.027	3.14	0	0.157	-4.174	0	-0.258
	min	0.019	0	-0.023	0.004	0	-0.003	3.14	0	0.157	-4.174	0	-0.258

Tabel 4.10 Translasi pada dasar dinding D 79.2 m

D 79.2 m		Dead (mm)			hidrodinamik (mm)			hidrostatis (mm)			Prestressed (mm)		
Perletakan		U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3
Jepit	max	0.037	0	-0.718	0.034	0	0.043	0.434	0	-0.223	-0.444	0	-0.524
	min	0.037	0	-0.718	-0.424	0	-0.039	0.434	0	-0.223	-0.444	0	-0.524
Sendi	max	0	0	-161.2	0	0	-0.0011	0	0	-7.771	0	0	0.0021
	min	0	0	-161.2	0	0	-0.037	0	0	-7.771	0	0	0.0021
<i>Free sliding</i>	max	0.021	0	-0.302	0.811	0	0.061	10.956	0	0.823	-13.205	0	-1.145
	min	0.021	0	-0.302	0.08	0	-0.0039	10.956	0	0.823	-13.205	0	-1.145

Tabel 4.11 Perbandingan Translasi Pada Dasar Dinding Saat Tangki Kosong dan Tangki Penuh

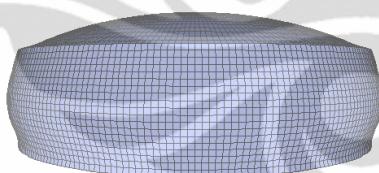
Free sliding		Deformasi						Tangki Kosong			Tangki Penuh		
		hidrodinamik (mm)			hidrostatis (mm)			Prestressed (mm)			P/S - (Hidrodinamik+Hidrostatis) (mm)		
Diameter		U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3
17.2 <i>m</i>	max	0.076	0	0.005	0.448	0	0.022	-0.924	0	-0.068	-0.400	0.000	-0.041
	min	-0.008	0	-0.001	0.448	0	0.022	-0.924	0	-0.068	-0.484	0.000	-0.047
36.8 <i>m</i>	max	0.473	0	0.027	3.14	0	0.157	-4.174	0	-0.258	-0.561	0.000	-0.074
	min	0.004	0	-0.003	3.14	0	0.157	-4.174	0	-0.258	-1.030	0.000	-0.104
79.2 <i>m</i>	max	0.811	0	0.061	10.956	0	0.823	-13.21	0	-1.145	-1.438	0.000	-0.261
	min	0.08	0	-0.0039	10.956	0	0.823	-13.21	0	-1.145	-2.169	0.000	-0.326

Secara umum hanya deformasi akibat tekanan hidrodinamik yang menyebabkan deformasi yang tidak seragam pada dasar dinding dimana terdapat dasar dinding yang terangkat dan terdorong.

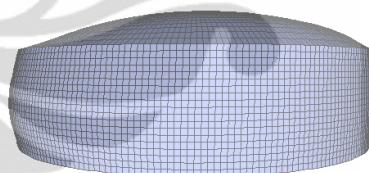
Pada Tabel 4.10 terdapat deformasi yang cukup signifikan yaitu pada perletakan sendi akibat beban mati. Nilai deformasi ini terjadi karena perletakan diizinkan untuk mengalami penurunan dan beban mati yang ditahan pada perletakan ini sangat besar. Pada kasus ini, tanah lunak yang dimodelkan tidak dapat menahan tangki diameter ini sehingga diperlukan perkuatan tanah atau pondasi khusus dengan tiang.

Perletakan *free sliding* dengan beban hidrostatis akan mengalami deformasi yang cukup besar ke arah radial (11 mm untuk diameter 79.2 m) dikarenakan tidak adanya kekangan pada dasar, sehingga *prestressing* diperlukan untuk memperkecil deformasi saat tangki penuh sekalipun *prestressing* sendiri akan menyebabkan deformasi radial ke arah dalam yang lebih besar saat tangki kosong (13 mm untuk diameter 79.2 m). Namun *prestressing* tetap diperlukan untuk mencegah keretakan pada dinding tangki

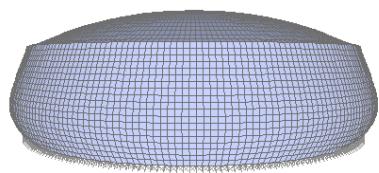
Pada Gambar 4.2 sampai 4.7 ditampilkan deformasi tangki 3 dimensi untuk diameter 79.2 m. Bentuk deformasi dinding tangki untuk masing-masing perletakan akan serupa dengan grafik gaya cincin pada dinding.



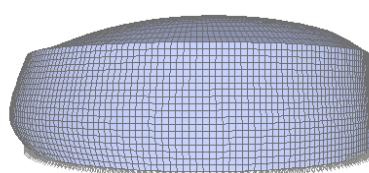
Gambar 4.2 Deformasi Akibat Tekanan Hidrostatis Perletakan Jepit



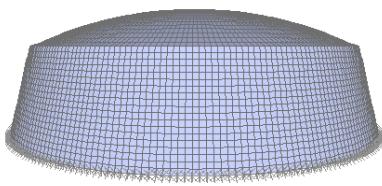
Gambar 4.3 Deformasi Akibat Tekanan Hidrodinamik Perletakan Jepit



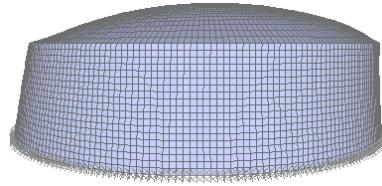
Gambar 4.4 Deformasi Akibat Tekanan Hidrostatis Perletakan Sendi



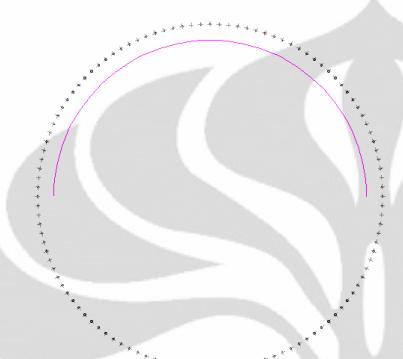
Gambar 4.5 Deformasi Akibat Tekanan Hidrodinamik Perletakan Sendi



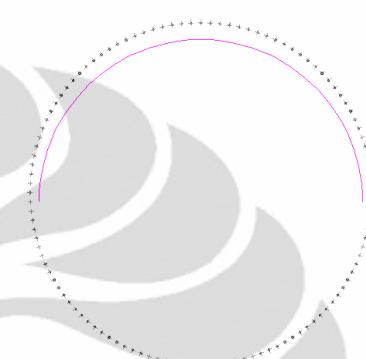
Gambar 4.6 Deformasi Akibat Tekanan Hidrostatis Perletakan *Free sliding*



Gambar 4.7 Deformasi Akibat Tekanan Hidrodinamik Perletakan *Free Sliding*



Gambar 4.8 Peralihan Dasar Dinding Perletakan *Free Sliding* Akibat Tekanan Hidrostatis



Gambar 4.9 Peralihan Dasar Dinding Perletakan *Free Sliding* Akibat Tekanan Hidrodinamik

#### 4.4 Perbandingan perilaku tangki dengan penggunaan beton prategang

Prategang dalam desain tangki mengakibatkan terjadinya tekanan residual radial ke dalam seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.10 sampai Gambar 4.12 untuk tangki berdiameter 79.8 m

##### 4.4.1 Gaya Dalam

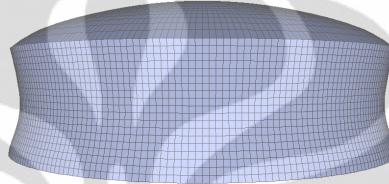
Pada lampiran A2 ditampilkan gaya dalam yang terjadi akibat beban prategang. Garis putus-putus menunjukkan gaya dalam akibat prategang dan gaya dalam akibat prategang yang sudah terfaktor. Garis gaya dalam akibat prategang diperoleh dari penambahan tekanan hidrostatis dengan tekanan ekivalen akibat beban prategang. Garis gaya dalam akibat prategang terfaktor bertujuan untuk menunjukkan bahwa gaya yang diberikan oleh gaya prategang tetap lebih besar daripada beban terfaktor.

Prategang menghasilkan gaya dalam yang lebih besar dari beban dengan arah berlawanan. Hal ini mengakibatkan adanya pengaruh yang baik saat tangki dalam keadaan penuh yaitu tegangan dinding mengecil, namun dapat menjadi masalah yang baru yang perlu ketika tangki dalam keadaan kosong. Namun

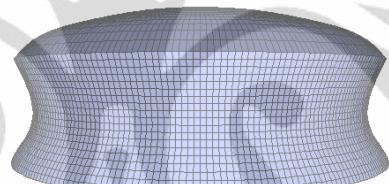
demikian, penggunaan prategang vertikal dapat mencegah keretakan dinding dalam saat tangki kosong akibat tekanan residual.

#### 4.4.2 Deformasi

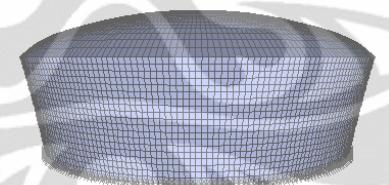
Nilai deformasi pada dasar dinding akibat *prestressing* ditampilkan pada Tabel 4.8 sampai Tabel 4.11. Deformasi tangki saat tangki kosong akibat *prestressing* ditampilkan pada Gambar 4.10 sampai Gambar 4.12



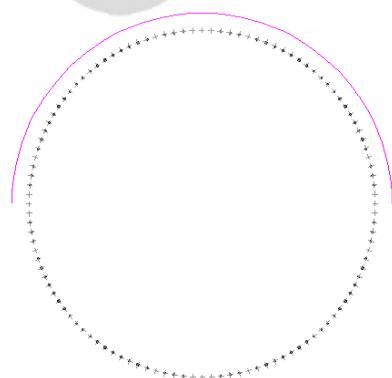
Gambar 4.10 Deformasi Akibat *Prestressing* Perletakan Jepit-Tangki Kosong



Gambar 4.11 Deformasi Akibat *Prestressing* Perletakan Sendi-Tangki Kosong

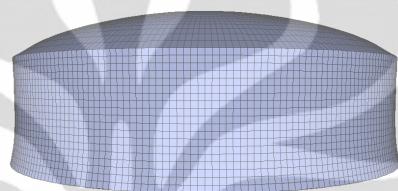


Gambar 4.12 Deformasi Akibat *Prestressing* Perletakan Free Sliding-Tangki Kosong

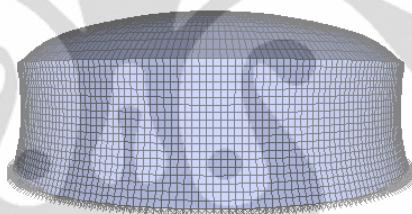


Gambar 4.13 Deformasi Pada Dasar Dinding akibat *Prestressing* Perletakan Free Sliding-Tangki Kosong

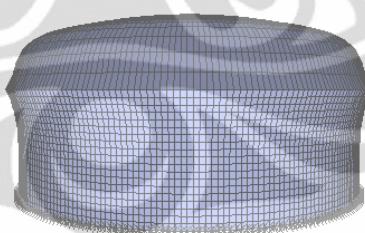
Gambar 4.13 menunjukkan bahwa dasar dinding *free sliding* teralihkan ke arah radial dalam akibat tangki kosong. Nilai peralihan dasar pada perletakan ini jauh lebih besar daripada peralihan dasar akibat tekanan hidrostatis (lihat Tabel 4.11 Perbedaan Translasi Pada Dasar Dinding Saat Tangki Kosong dan Tangki Penuh). Dengan demikian pada saat tangki penuh akibat *Prestressing*, maka tangki akan seolah kembali ke bentuk semula seperti yang tampilan pada Gambar 4.14 sampai 4.17



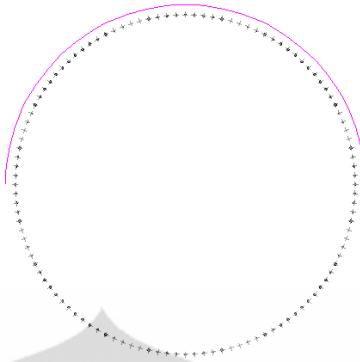
Gambar 4.14 Deformasi Akibat *Prestressing* Perletakan Jepit-Tangki Penuh



Gambar 4.15 Deformasi Akibat *Prestressing* Perletakan Sandi-Tangki Penuh



Gambar 4.16 Deformasi Akibat *Prestressing* Perletakan Free Sliding-Tangki Penuh



Gambar 4.17 Deformasi Pada Dasar Dinding akibat *Prestressing* Perletakan Free Sliding-Tangki Penuh

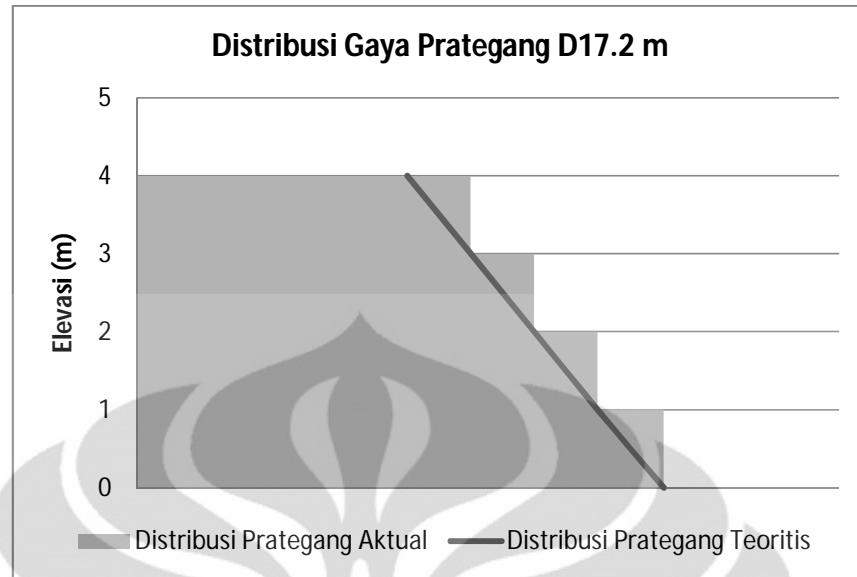
#### 4.4.3 Pemberian Prategang (*Prestressing*)

Pemberian prategang dilakukan pada arah horizontal dan vertikal untuk mencegah keretakan pada dinding baik pada saat tangki penuh maupun pada saat tangki kosong di sebelah luar dan dalam dinding. *Prestressing* yang dimodelkan pada SAP2000 hanya *prestressing* horizontal yang mengikuti pola tekanan hidrostatis sedangkan untuk *prestressing* vertikal dilakukan analisis secara manual. Perhitungan secara manual dilampirkan pada bagian lampiran. Pemberian prategang secara teoritis tidak dapat dilakukan karena pelaksanaan di lapangan akan menjadi lebih rumit sehingga pemberian prategang dilakukan per 1 m tinggi (prategang aktual).

##### 4.4.3.1 *Prestressing* Melingkar (Horizontal)

- *Prestressing* diameter 17.2 m

Dipakai tendon berisi 10-7 strands K-250 diameter 0.5" dan diasumsikan terjadi kehilangan prategang 26% untuk semua efek jangka panjang. Luas area per strands adalah  $0.144 \text{ in}^2$ .



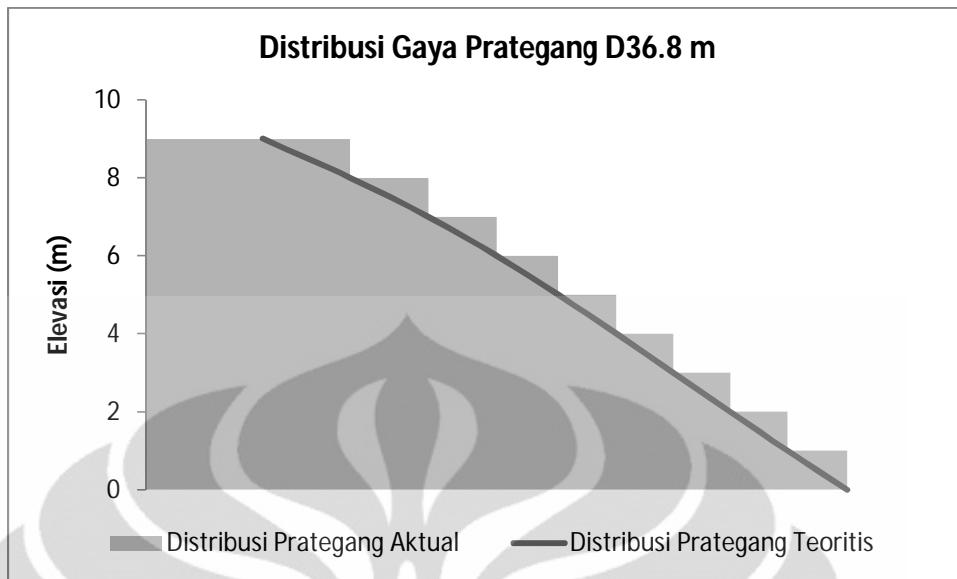
Grafik 4.27 Distribusi Gaya Prategang D17.2 m

Tabel 4.12 Distribusi Jumlah *Prestressing* yang Dipakai per 1 m Tinggi

Elevasi Strip per 1 m tinggi	Gaya Prategang	Luas tendon (mm <sup>2</sup> /m)	Jumlah tendon perlu	Kawat <i>Prestressing</i> yang dipakai
0	750.21	840.07	9.04	10
1	656.03	734.61	7.91	8
2	565.54	633.28	6.82	7
3	475.05	531.95	5.73	6
4	384.64	430.71	4.64	5

- *Prestressing* diameter 36.8 m

Dipakai tendon berisi 10-7 strands K-250 diameter 0.25" dan diasumsikan terjadi kehilangan prategang 26% untuk semua efek jangka panjang. Luas area 1 strands adalah 0.036 in<sup>2</sup>, sehingga luas totalnya adalah 0.36 in<sup>2</sup>.



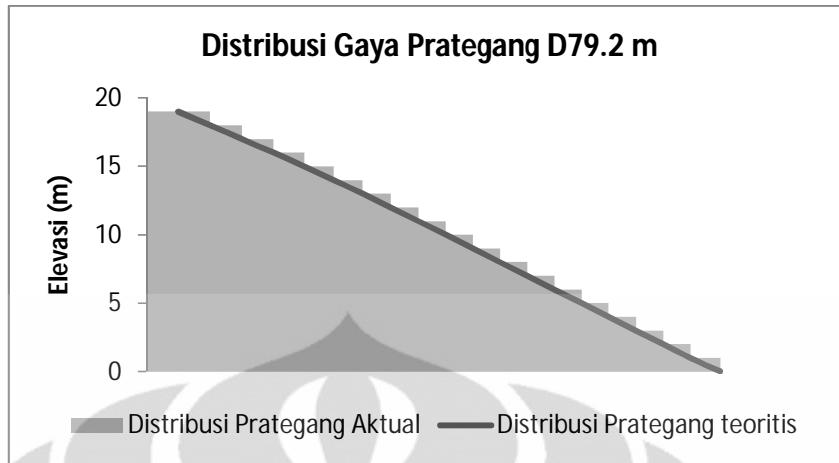
Grafik 4.28 Distribusi Gaya Prategang D36.8 m

Tabel 4.13 Distribusi Tendon per 1 meter tinggi

Elevasi Strip per 1 m tinggi	Gaya Prategang	Luas tendon (mm <sup>2</sup> /m)	Jumlah tendon perlu	Tendon yang dipakai
0	2211.38	2476.71	10.66	11
1	2023.14	2265.88	9.76	10
2	1842.85	2063.96	8.89	9
3	1663.29	1862.86	8.02	9
4	1483.55	1661.55	7.15	8
5	1300.16	1456.16	6.27	7
6	1105.97	1238.67	5.33	6
7	890.59	997.45	4.29	5
8	644.31	721.62	3.11	4
9	368.46	412.67	1.78	2

- Prestressing diameter 79.2 m

Dipakai tendon berisi 10-7 strands K-270 diameter 0.5" dan diasumsikan terjadi kehilangan prategang 26% untuk semua efek jangka panjang. Luas area 1 strands adalah 0.153 in<sup>2</sup>, sehingga luas totalnya adalah 1.53 in<sup>2</sup>.



Grafik 4.29 Distribusi Gaya Prategang D79.2 m

Tabel 4.14 Distribusi Tendon per 1 m Tinggi

Elevasi Strip per 1 m tinggi	Gaya Prategang	Luas tendon (mm <sup>2</sup> /m)	Jumlah tendon perlu	Tendon yang dipakai
0	8499.55	8814.21	8.93	9
1	8055.9	8354.13	8.46	9
2	7652.21	7935.50	8.04	9
3	7248.67	7517.02	7.62	8
4	6845.4	7098.82	7.19	8
5	6442.56	6681.07	6.77	7
6	6040.23	6263.84	6.35	7
7	5638.38	5847.12	5.92	6
8	5236.79	5430.66	5.50	6
9	4834.93	5013.92	5.08	6
10	4431.89	4595.96	4.66	5
11	4026.27	4175.32	4.23	5
12	3616.15	3750.02	3.80	4
13	3199.15	3317.58	3.36	4
14	2772.59	2875.23	2.91	3
15	2333.96	2420.36	2.45	3
16	1881.66	1951.32	1.98	2
17	1416.09	1468.51	1.49	2
18	941.25	976.10	0.99	1
19	465.89	483.14	0.49	1

#### 4.4.3.2 Prestressing Vertikal

*Prestressing* vertikal diberikan untuk mencegah keretakan saat tangki beton kosong akibat tekan residual dari *Prestressing* melingkar. Penggunaan *Prestressing* vertikal secara ringkas disajikan pada Tabel 4.15

Tabel 4.15 *Prestressing* Vertikal

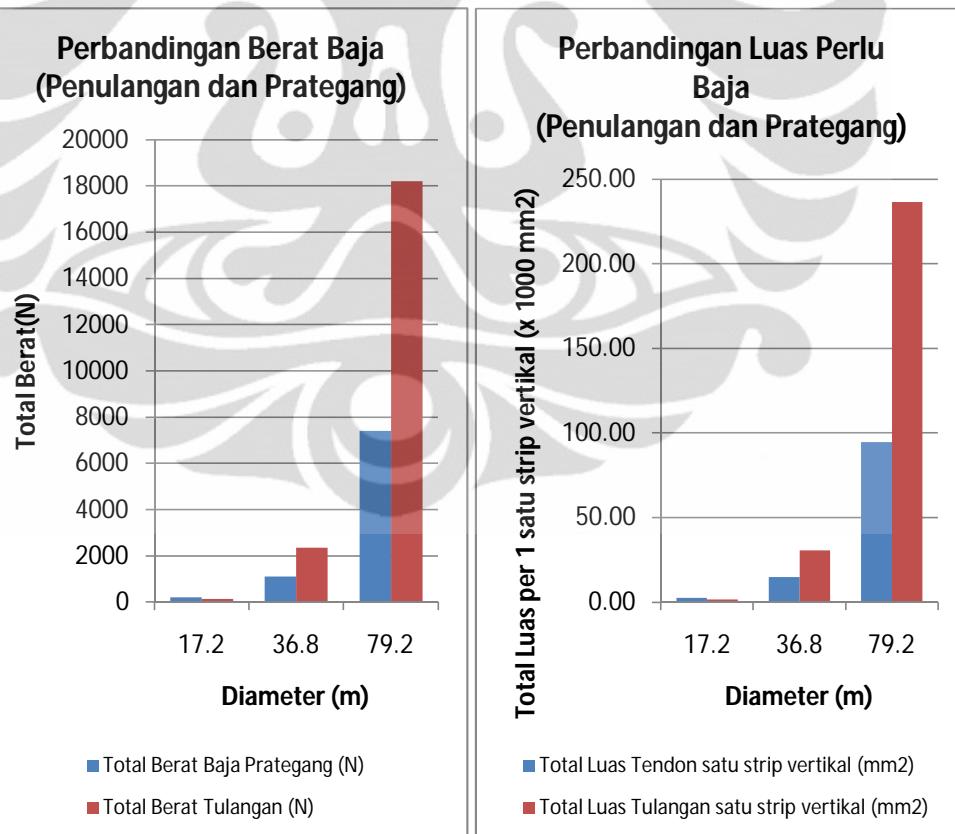
Jepit	$P_v$ (kN/m)	Eksentrisitas	Tendon/kawat	Jumlah tendon per meter lebar
Diameter(m)				
17.2	500	0.03 m	7-strands-K250	7
36.8	1500	0.04 m	Tendon-10 strand-1/4"-K250	8
79.8	1750	0.1 m	Tendon-10 strand-1/2"-K270	2
Sendi	$P_v$ (kN/m)	Eksentrisitas	Tendon/kawat	Jumlah tendon per meter lebar
Diameter(m)				
17.2	500	0	7-strands-1/2"-K250	7
36.8	750	0.03 m	Tendon-10 strand-1/4"-K250	4
79.8	1750	0	Tendon-10 strand-1/2"-K270	2

#### 4.4.4 Perbandingan penulangan dengan baja lunak dengan baja prategang untuk 1 meter lebar dalam 1 strip vertikal

Pada Tabel 4.16 Perbandingan penulangan dengan baja lunak dengan baja prategang menunjukkan perbandingan luas, volume dan berat tulangan antara penggunaan baja lunak dan baja prategang arah melingkar untuk satu strip vertikal selebar 1 meter pada perletakan sendi. Dapat dilihat bahwa semakin besar tangki maka penggunaan penulangan baja lunak akan bertambah dengan sangat besar. Dengan demikian, tangki beton dengan menggunakan baja prategang lebih ekonomis daripada menggunakan baja lunak biasa untuk ukuran tangki yang besar.

Tabel 4.16 Perbandingan penulangan dengan baja lunak dengan baja prategang arah melingkar

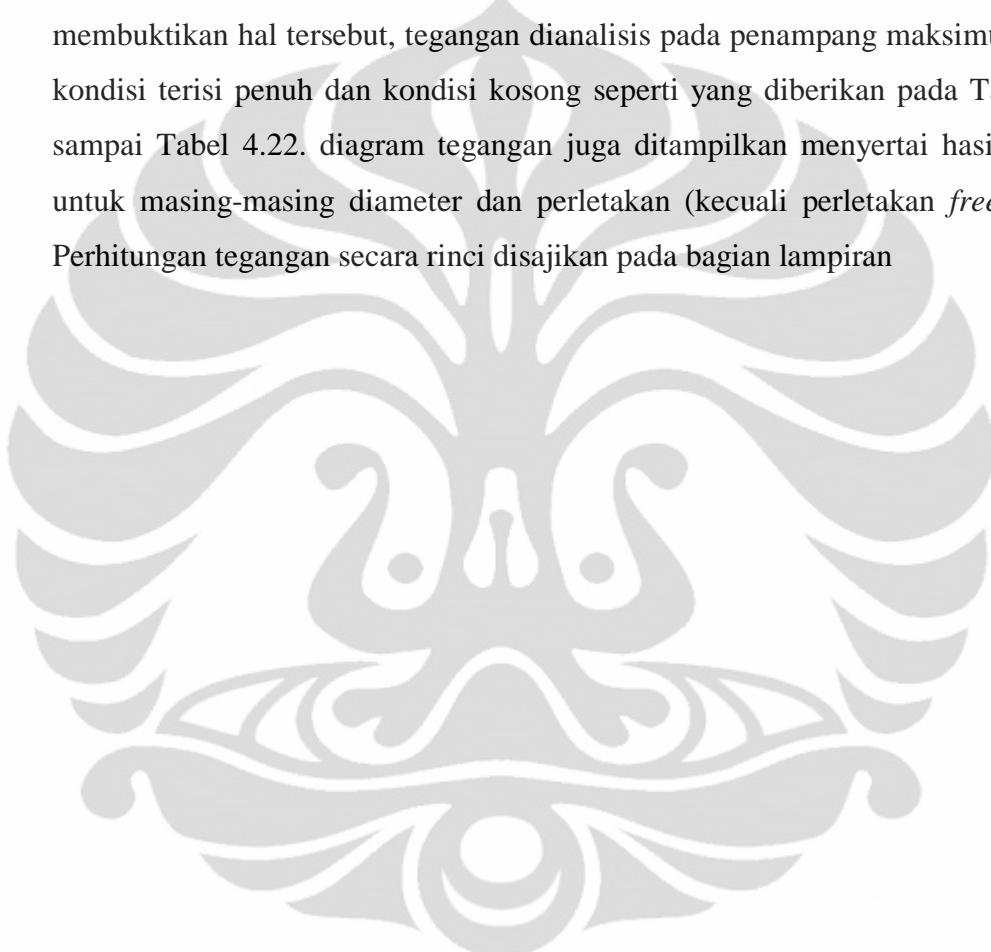
Diameter (m)	Total Luas Tulangan satu strip vertikal (mm <sup>2</sup> )	Total Volume Tulangan (mm <sup>3</sup> )	Berat Jenis (N/mm <sup>3</sup> )	Total Berat tulangan (N)
17.2	1642.76	1642760	0.00007697	126.4432372
36.8	30454.8	30454800	0.00007697	2344.105956
79.2	236476	236476000	0.00007697	18201.55772
Diameter (m)	Total Luas Tendon untuk satu strip vertikal (mm <sup>2</sup> )	Total Volume Tendon (mm <sup>3</sup> )	Berat Jenis (N/mm <sup>3</sup> )	Total Berat Tendon (N)
17.2	2638.67	2638673.642	0.00007697	203.1059838
36.8	14744.84	14744839.96	0.00007529	1110.078888
79.2	94486.71	94486711.1	0.00007836	7404.13448



Grafik 4.30 Perbandingan Berat dan Luas Baja Prategang dan Penulangan Baja Lunak arah melingkar

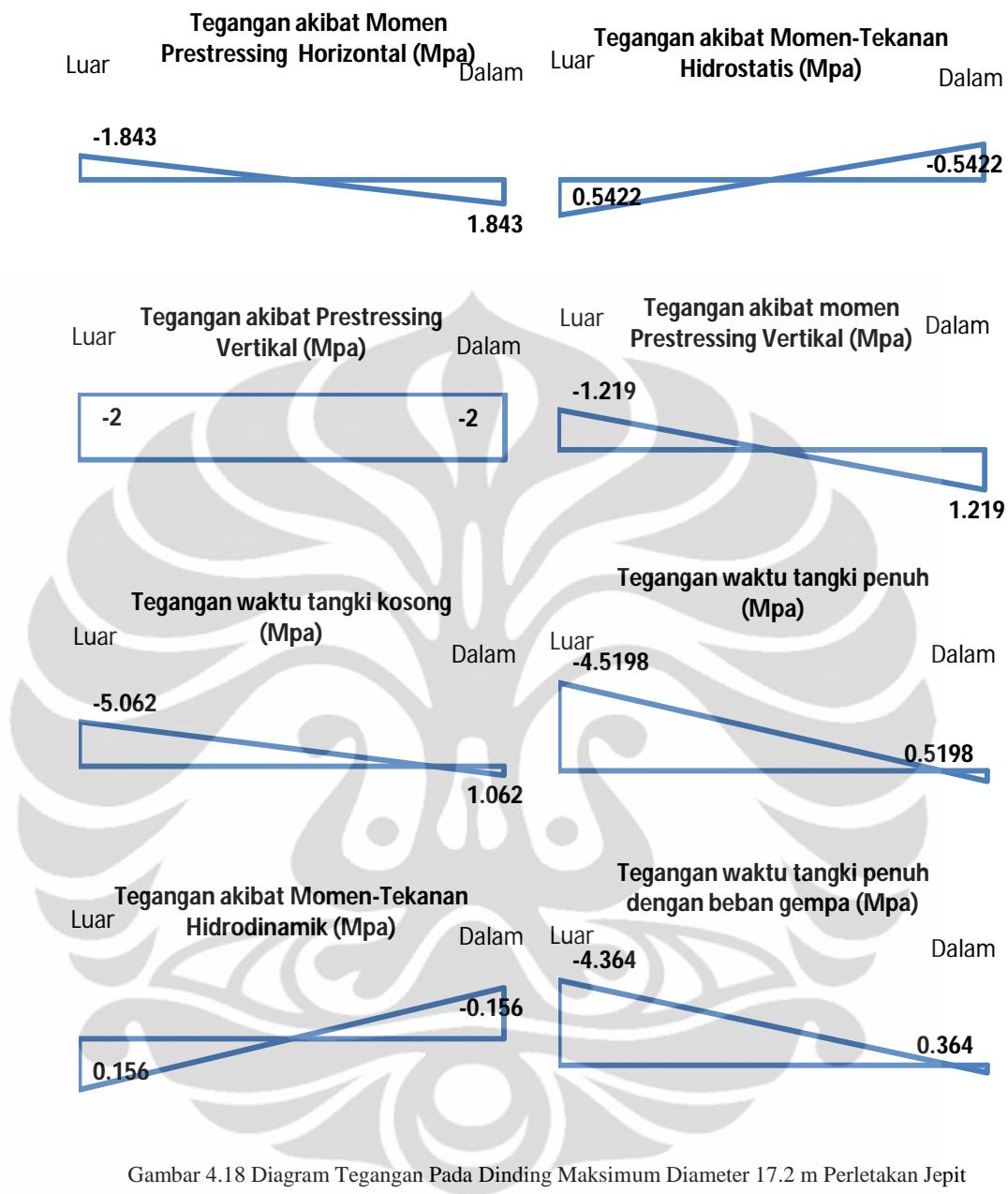
#### 4.4.5 Pengaruh Pemberian Prategang Terhadap Tegangan Dinding dan Dasar Dinding

Pemberian prategang memberikan tekanan residual ke arah radial dalam untuk mengurangi kemungkinan terjadinya retak akibat tekanan air. Namun demikian tekanan residual ini juga dapat mengakibatkan retak pada bagian dalam dinding tangki sehingga diperlukan prategang vertikal (Nawy, 2001). Untuk membuktikan hal tersebut, tegangan dianalisis pada penampang maksimum untuk kondisi terisi penuh dan kondisi kosong seperti yang diberikan pada Tabel 4.17 sampai Tabel 4.22. diagram tegangan juga ditampilkan menyertai hasil analisis untuk masing-masing diameter dan perletakan (kecuali perletakan *free sliding*) Perhitungan tegangan secara rinci disajikan pada bagian lampiran

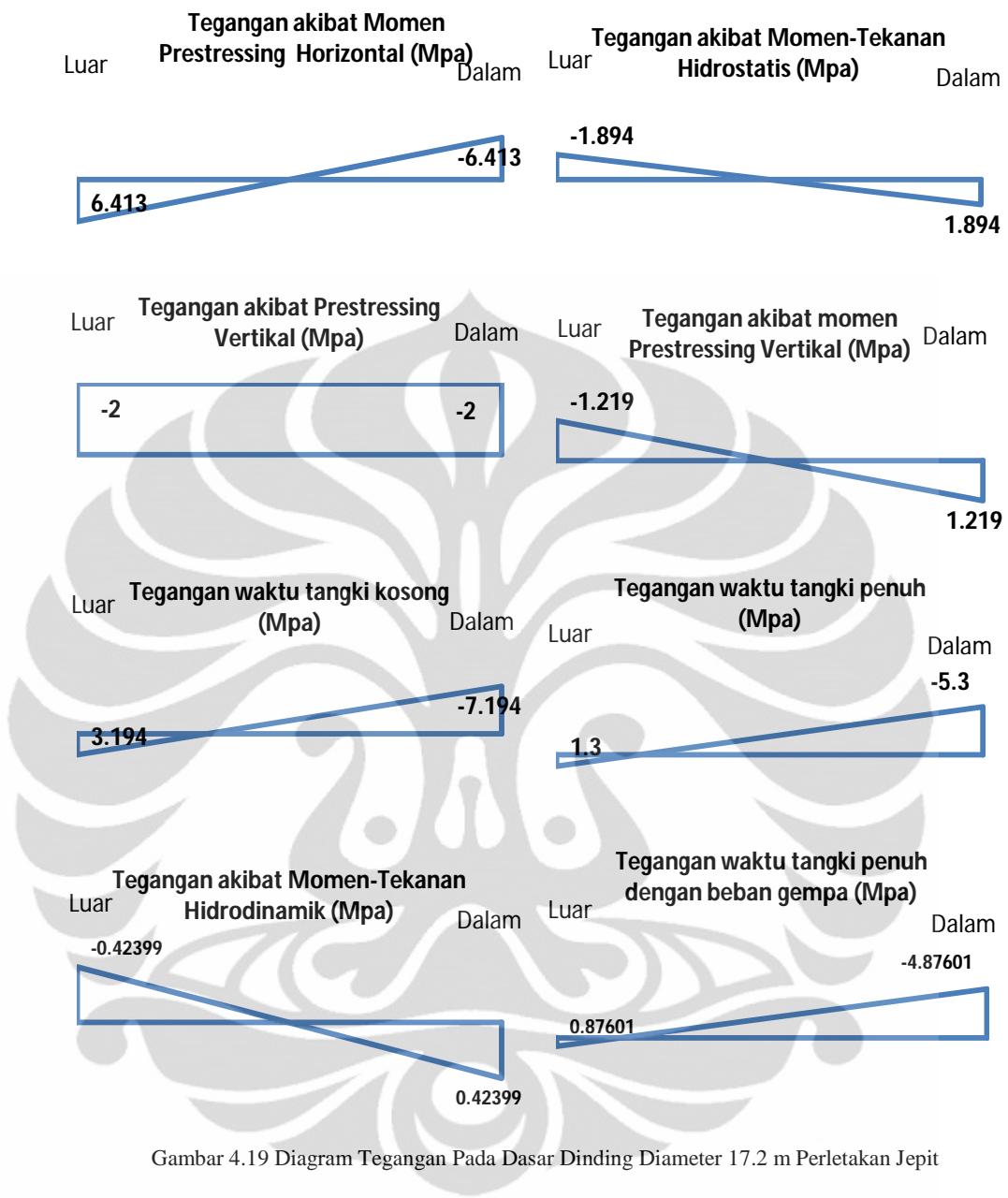


Tabel 4.17 Tegangan Pada Tangki Diameter 17.2 m Perletakan Jepit

<b>Diameter 17.2 m Jepit</b>	<b>Dinding (Maksimum)</b>		<b>Dasar Dinding</b>		
	<b>Tegangan</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>
Tegangan akibat Momen <i>Prestressing</i> (Mpa)	-1.843	1.843		6.413	-6.413
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrostatis (Mpa)	0.5422	-0.5422		-1.894	1.894
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrodinamik (Mpa)	0.15578	-0.15578		-0.42399	0.42399
Tegangan akibat <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-2	-2		-2	-2
Tegangan akibat momen <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-1.219	1.219		-1.219	1.219
Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)	-5.062	1.062		3.194	-7.194
Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)	-4.5198	0.5198		1.3	-5.3
Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)	-4.364	0.364		0.876	-4.876
Limit	fc	-15.75 MPa			
	ft	4.14 MPa			
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>		
Dinding Luar	-5.062	OK	3.194	OK	
Dinding Dalam	1.062	OK	-7.194	OK	
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>		
Dinding Luar	-4.5198	OK	1.3	OK	
Dinding Dalam	0.5198	OK	-5.3	OK	
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>		
Dinding Luar	-4.36402	OK	0.87601	OK	
Dinding Dalam	0.36402	OK	-4.87601	OK	



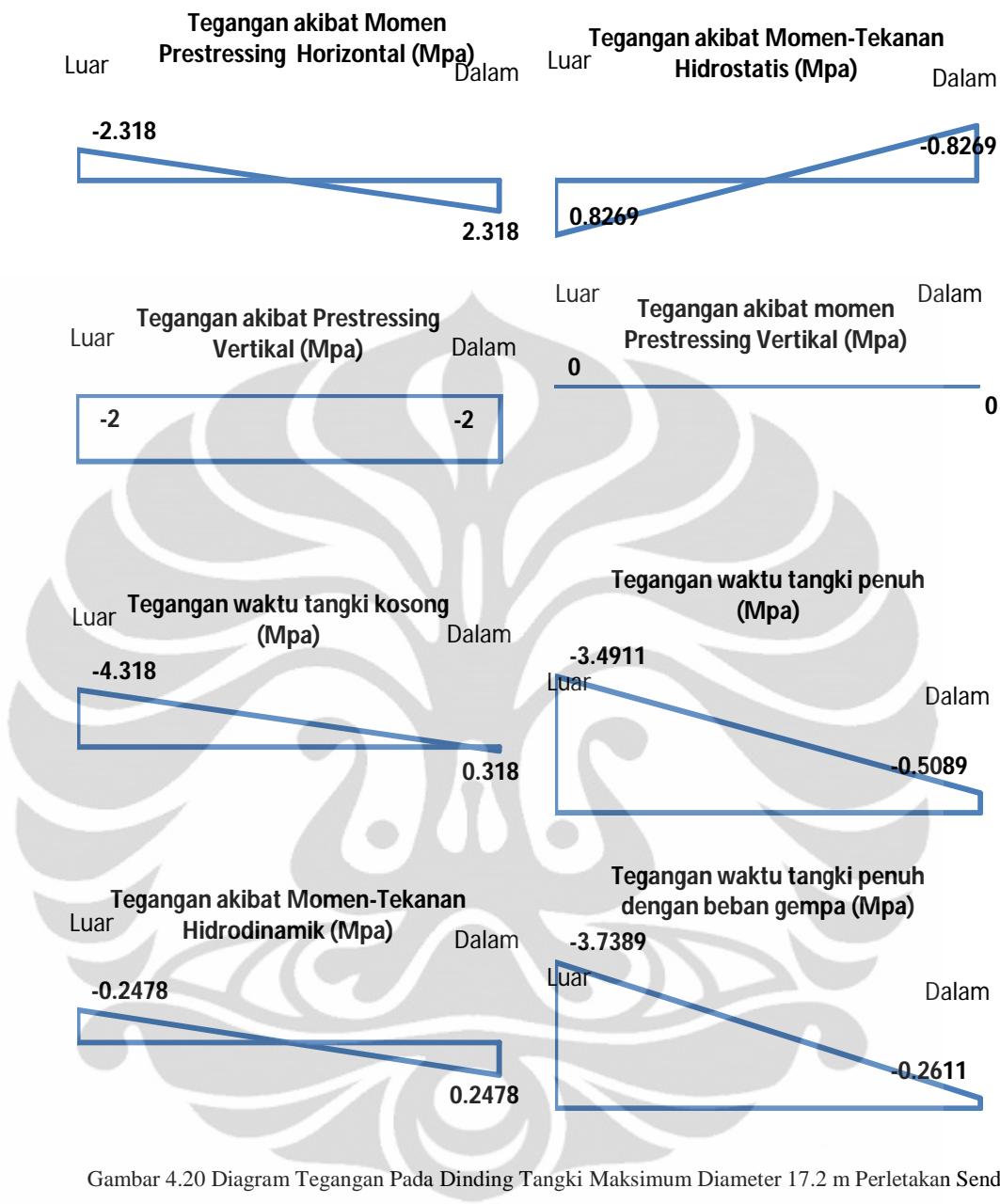
Gambar 4.18 Diagram Tegangan Pada Dinding Maksimum Diameter 17.2 m Perletakan Jepit



Gambar 4.19 Diagram Tegangan Pada Dasar Dinding Diameter 17.2 m Perletakan Jepit

Tabel 4.18 Tegangan Pada Tangki Diameter 17.2 m Perletakan Sendi

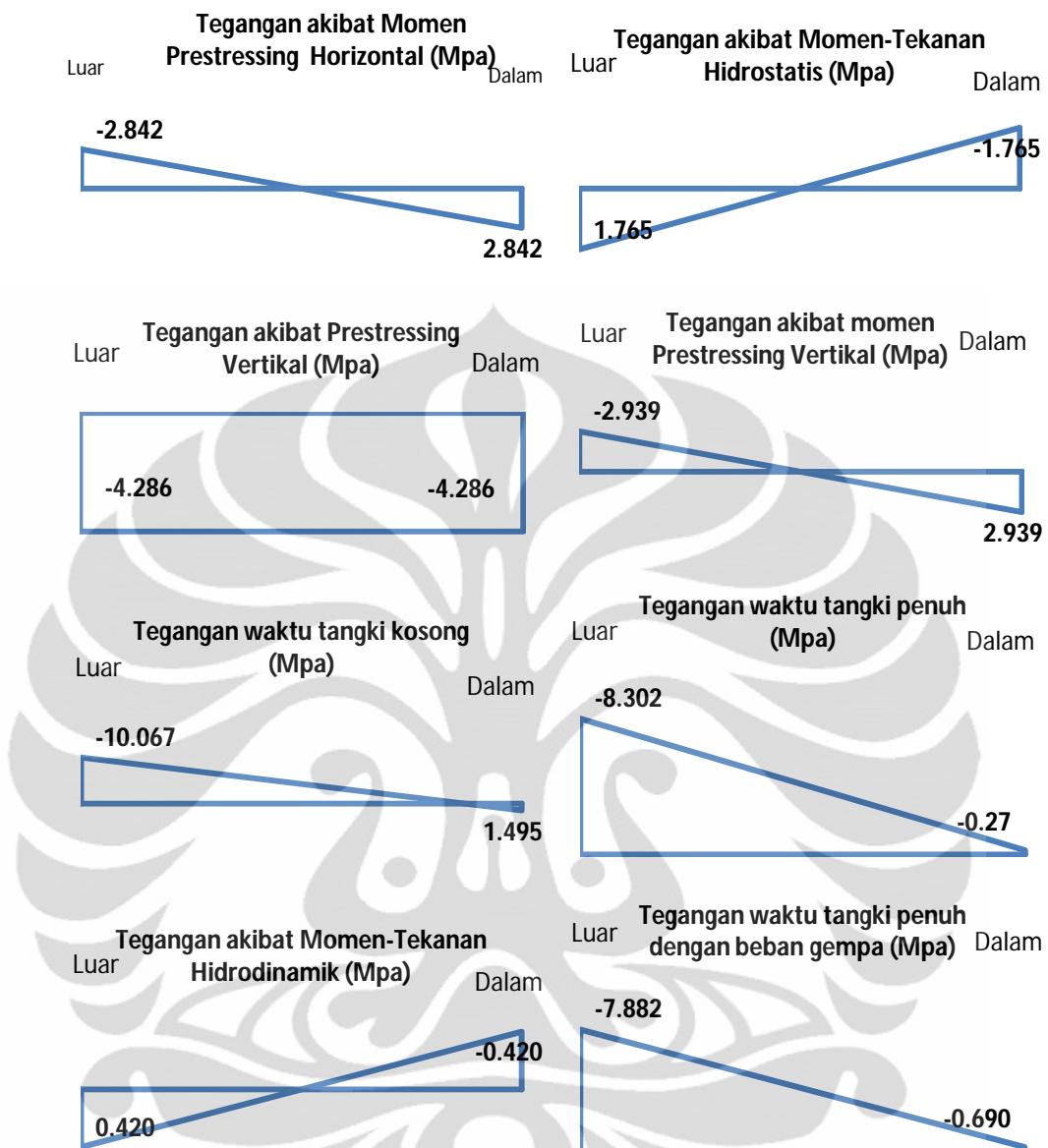
<b>Diameter 17.2 m Sendi</b>	<b>Dinding (Maksimum)</b>	
<b>Tegangan</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>
Tegangan akibat Momen <i>Prestressing</i> (Mpa)	-2.318	2.318
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrostatis (Mpa)	0.8269	-0.8269
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrodinamik (Mpa)	-0.2478	0.2478
Tegangan akibat <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-2	-2
Tegangan akibat momen <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	0	0
Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)	-4.318	0.318
Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)	-3.4911	-0.5089
Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)	-3.7389	-0.2611
Limit	fc	-15.75 MPa
	ft	4.14 MPa
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-4.318	OK
Dinding Dalam	0.318	OK
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-3.4911	OK
Dinding Dalam	-0.5089	OK
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-3.7389	OK
Dinding Dalam	-0.2611	OK



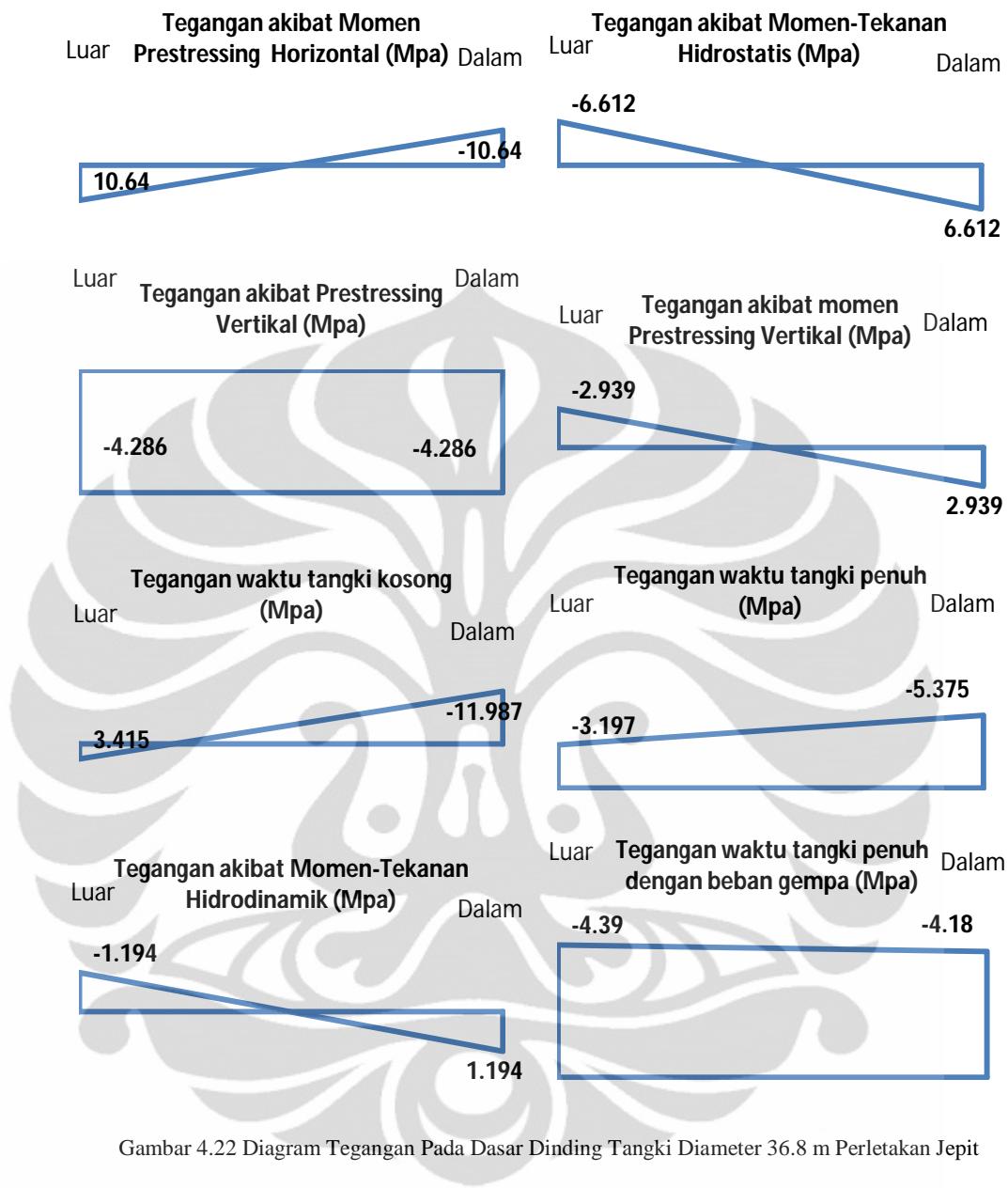
Gambar 4.20 Diagram Tegangan Pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 17.2 m Perletakan Sendi

Tabel 4.19 Tegangan Pada Tangki Diameter 36.8 m Perletakan Jepit

<b>Diameter 36 m Jepit</b>		<b>Dinding (Maksimum)</b>		<b>Dasar Dinding</b>	
<b>Tegangan</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>	
Tegangan akibat Momen <i>Prestressing</i> (Mpa)	-2.842	2.842	10.64	-10.64	
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrostatis (Mpa)	1.765	-1.765	-6.612	6.612	
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrodinamik (Mpa)	0.420	-0.420	-1.194	1.194	
Tegangan akibat <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-4.286	-4.286	-4.286	-4.286	
Tegangan akibat momen <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-2.939	2.939	-2.939	2.939	
Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)	-10.067	1.495	3.415	-11.987	
Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)	-8.302	-0.27	-3.197	-5.375	
Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)	-7.882	-0.690	-4.391	-4.181	
Limit	fc	-15.75 MPa			
	ft	4.14 MPa			
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>		
Dinding Luar	-10.067	OK	3.415	OK	
Dinding Dalam	1.495	OK	-11.987	OK	
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>		
Dinding Luar	-8.302	OK	-3.197	OK	
Dinding Dalam	-0.27	OK	-5.375	OK	
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>		
Dinding Luar	-7.882	OK	-4.391	OK	
Dinding Dalam	-0.690	OK	-4.181	OK	



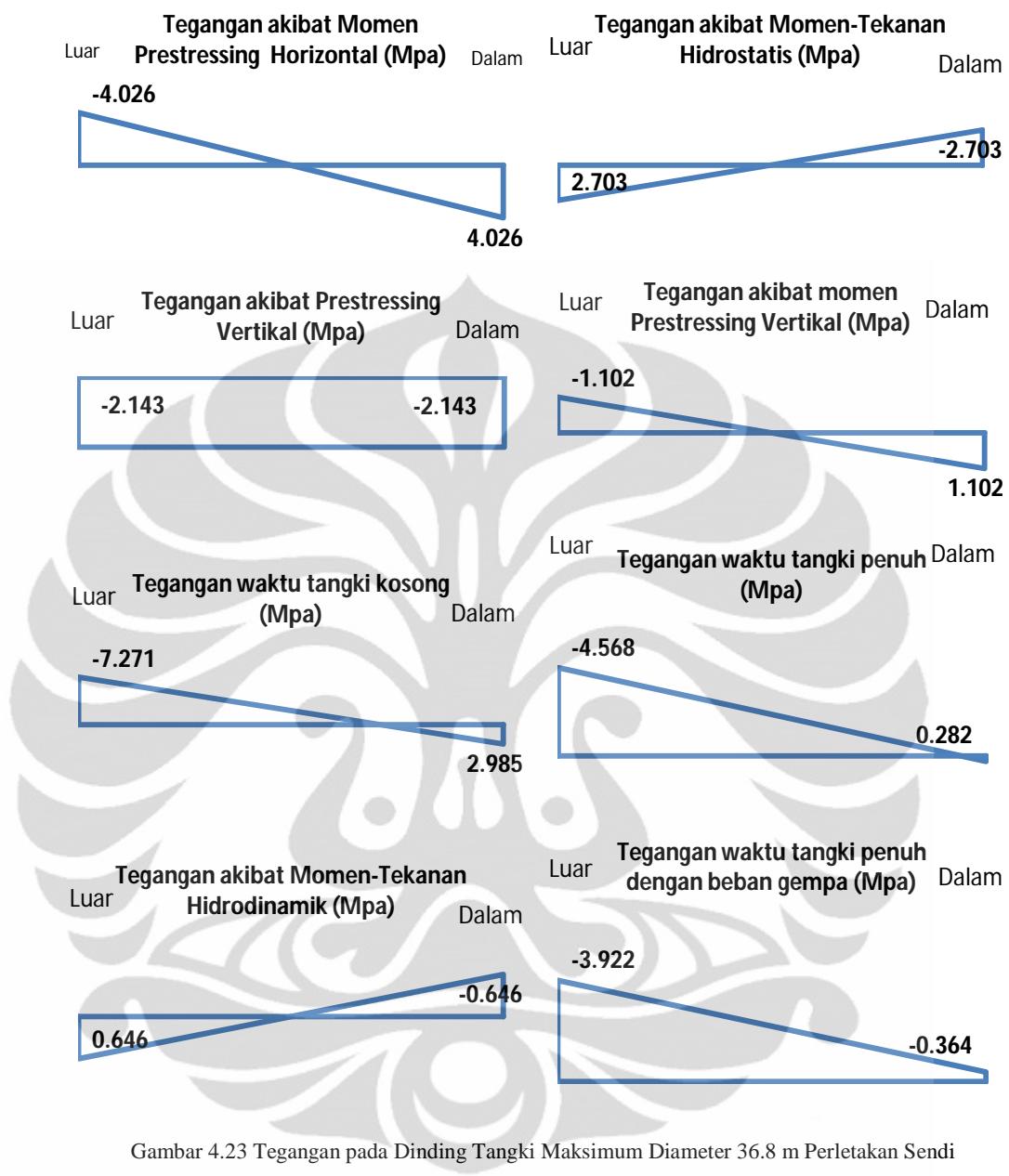
Gambar 4.21 Diagram Tegangan Pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 36.8 m Perletakan Jepit



Gambar 4.22 Diagram Tegangan Pada Dasar Dinding Tangki Diameter 36.8 m Perletakan Jepit

Tabel 4.20 Tegangan pada Tangki Diameter 36.8 m Perletakan Sendi

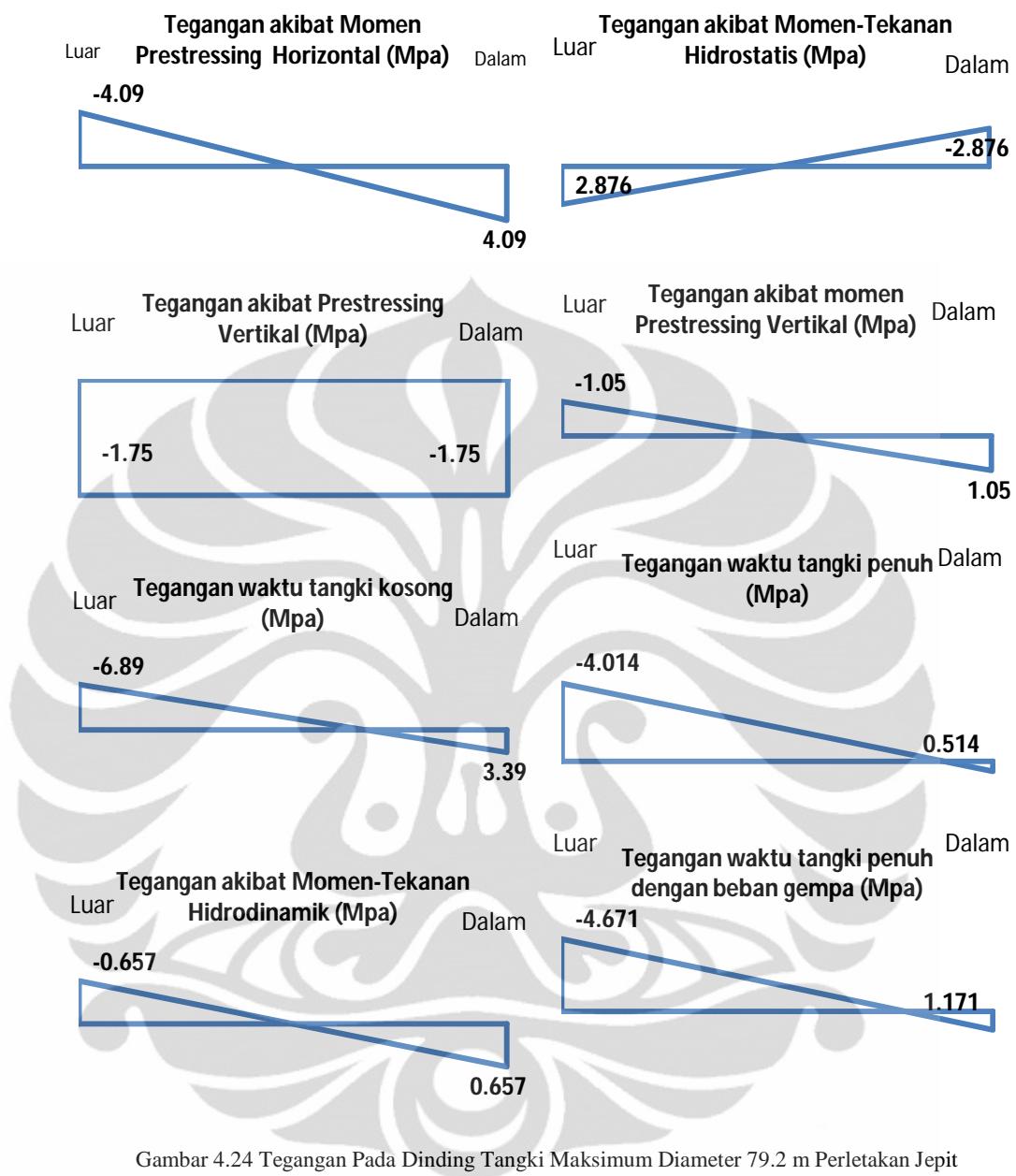
<b>Diameter 36 m Sendi</b>	<b>Dinding (Maksimum)</b>		<b>Dasar Dinding</b>	
<b>Tegangan</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>
Tegangan akibat Momen <i>Prestressing</i> (Mpa)	-4.026	4.026	0	0
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrostatis (Mpa)	2.703	-2.703	0	0
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrodinamik (Mpa)	0.646	-0.646	0.000	0.000
Tegangan akibat <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-2.143	-2.143	-2.143	-2.143
Tegangan akibat momen <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-1.102	1.102	-1.102	1.102
Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)	-7.271	2.985	-3.245	-1.041
Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)	-4.568	0.282	-3.245	-1.041
Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)	-3.922	-0.364	-3.245	-1.041
Limit	fc	-15.75 MPa		
	ft	4.14 MPa		
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-7.271	OK	-3.245	OK
Dinding Dalam	2.985	OK	-1.041	OK
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-4.568	OK	-3.245	OK
Dinding Dalam	0.282	OK	-1.041	OK
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-3.922	OK	-3.245	OK
Dinding Dalam	-0.364	OK	-1.041	OK



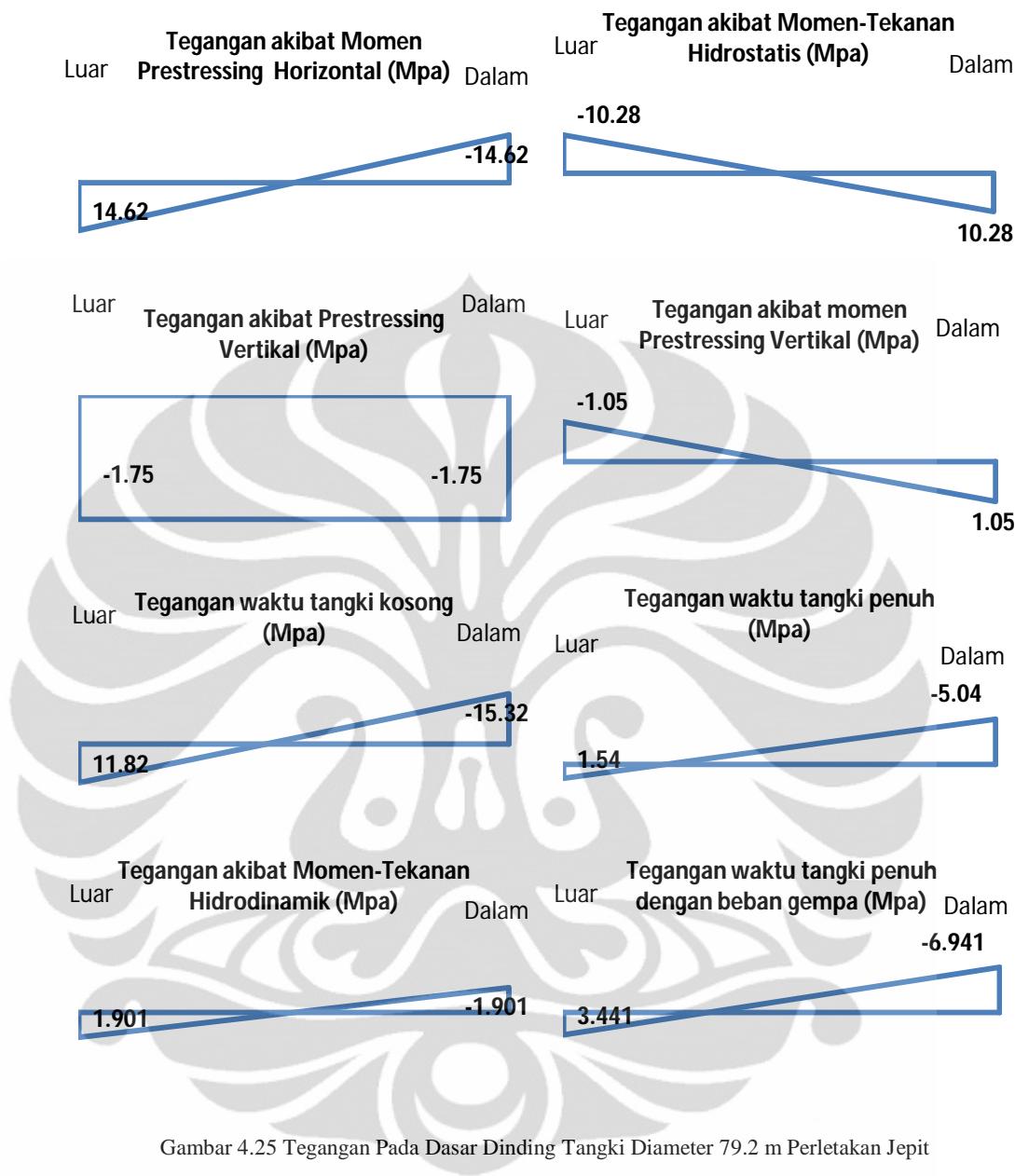
Gambar 4.23 Tegangan pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 36.8 m Perletakan Sendi

Tabel 4.21 Tegangan Pada Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Jepit

<b>Diameter 79.2 m Jepit</b>	<b>Dinding (Maksimum)</b>		<b>Dasar Dinding</b>	
<b>Tegangan</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>
Tegangan akibat Momen <i>Prestressing</i> (Mpa)	-4.09	4.09	14.62	-14.62
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrostatis (Mpa)	2.876	-2.876	-10.28	10.28
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrodinamik (Mpa)	-0.657	0.657	1.901	-1.901
Tegangan akibat <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-1.75	-1.75	-1.75	-1.75
Tegangan akibat momen <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-1.05	1.05	-1.05	1.05
Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)	-6.89	3.39	11.82	-15.32
Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)	-4.014	0.514	1.54	-5.04
Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)	-4.671	1.171	3.441	-6.941
Limit	fc	-15.75 MPa		
	ft	4.14 MPa		
Pengecekan	<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>	
	Dinding Luar	-6.89	OK	11.82
Pengecekan	Dinding Dalam	3.39	OK	-15.32
	<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>	
Pengecekan	Dinding Luar	-4.014	OK	1.54
	Dinding Dalam	0.514	OK	-5.04
Pengecekan	<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>		<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>	
	Dinding Luar	-4.671	OK	3.441
	Dinding Dalam	1.171	OK	-6.941



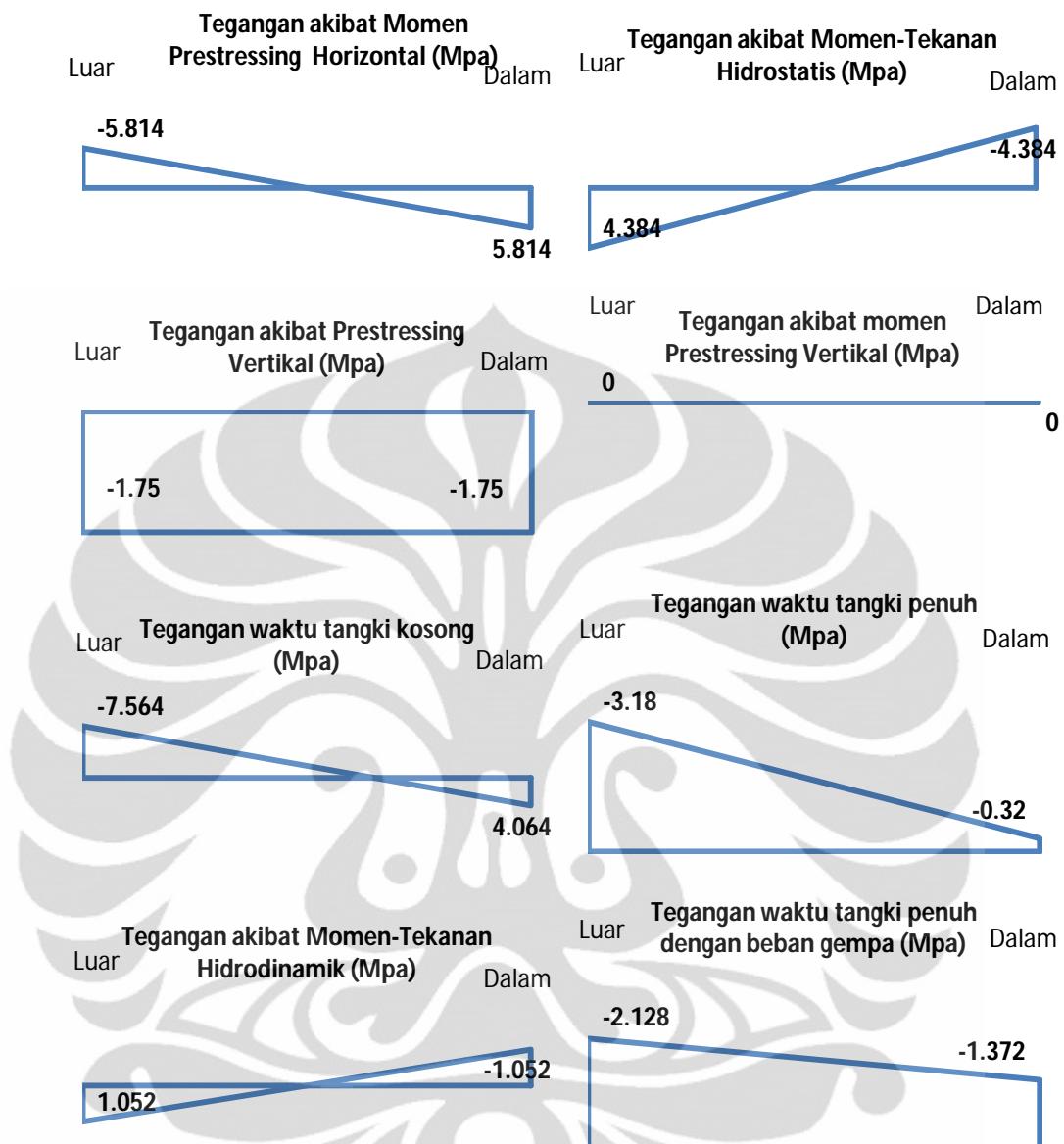
Gambar 4.24 Tegangan Pada Dinding Tangki Maksimum Diameter 79.2 m Perletakan Jepit



Gambar 4.25 Tegangan Pada Dasar Dinding Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Jepit

Tabel 4.22 Tegangan Pada Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Sendi

<b>Diameter 79.2 m Sendi</b>	<b>Dinding (Maksimum)</b>	
<b>Tegangan</b>	<b>Luar</b>	<b>Dalam</b>
Tegangan akibat Momen <i>Prestressing</i> (Mpa)	-5.814	5.814
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrostatis (Mpa)	4.384	-4.384
Tegangan akibat Momen-Tekanan Hidrodinamik (Mpa)	1.052	-1.052
Tegangan akibat <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	-1.75	-1.75
Tegangan akibat momen <i>Prestressing</i> Vertikal (Mpa)	0	0
Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)	-7.564	4.064
Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)	-3.18	-0.32
Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)	-2.128	-1.372
Limit	fc	-15.75 MPa
	ft	4.14 MPa
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki kosong (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-7.564	OK
Dinding Dalam	4.064	OK
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-3.18	OK
Dinding Dalam	-0.32	OK
<b>Pengecekan</b>	<b>Tegangan waktu tangki penuh dengan beban gempa (Mpa)</b>	
Dinding Luar	-2.128	OK
Dinding Dalam	-1.372	OK



Gambar 4.26 Tegangan Pada Dinding Tangki Diameter 79.2 m Perletakan Sendi

Dari hasil analisis tegangan yang dilakukan untuk masing-masing perletakan dan diameter, dapat dilihat bahwa perletakan jepit mengakibatkan timbulnya tegangan tarik pada dasar dan dinding. Perletakan sendi mengakibatkan timbulnya tegangan tarik pada dinding. Perletakan *freesliding* tidak ditampilkan pada bagian ini karena mengakibatkan pengaruh yang sangat kecil bahkan nol terhadap tegangan dinding karena tidak ada kekangan.

Nilai tegangan berbanding terbalik dengan ketebalan dinding dan sebanding dengan momen vertikal dinding. Dapat dilihat pada tabel dan diagram

bahwa penggunaan prategang horizontal akan mencegah keretakan dinding luar akibat besarnya momen lentur vertikal dan gaya cincin di dinding akibat beban tangki penuh (tekanan hidrostatis ke arah radial luar) untuk tangki yang berdiameter besar dan penggunaan prategang vertikal akan mencegah keretakan dinding dalam akibat gaya prategang (tekanan gaya prategang ke arah radial dalam) saat tangki kosong.

Model yang dianalisis telah direvisi dengan analisis tegangan beberapa kali dengan memperhatikan ketebalan dinding dan *prestressing* yang diberikan baik melingkar maupun vertikal untuk seluruh model terutama untuk model berdiameter 79.2 m dengan perletakan jepit.

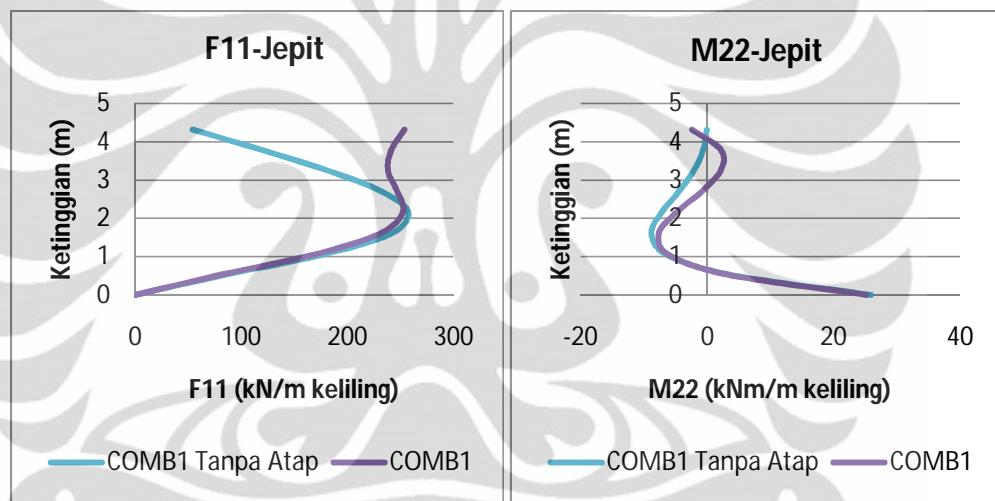
Pada model ini ketebalan dinding telah ditingkatkan dari sebelumnya 50 cm menjadi 100 cm, akan tetapi sangat sulit untuk mencegah retak yang terjadi akibat terlampaunya limit tegangan tarik maupun tekan pada dasar dinding. Untuk tangki dengan dasar terjepit dengan diameter yang besar akan dihadapkan pada permasalahan dimana apabila dinding tidak mengalami retak, maka dasar dinding yang akan mengalami keretakan, demikian pula sebaliknya. Meskipun hal ini bisa diatasi dengan meningkatkan kekuatan material, hal ini justru membuat biaya konstruksi tangki semakin besar.

Pemilihan perletakan *free sliding* dapat menjadi opsi yang terbaik untuk tangki berdimensi besar dikarenakan dinding hampir dikatakan tidak mengalami tegangan karena momen vertikal dindingnya mendekati 0. Dengan demikian, maka ketebalan dinding untuk perletakan *free sliding* tidak terlalu signifikan berpengaruh pada tegangan dinding sehingga ketebalan dinding dapat direduksi sampai pada batas dimana diperlukan ketebalan dinding beton yang optimal untuk membungkus tendon yang jumlahnya cukup banyak pada dasar dinding. Hal ini dapat menyimpulkan bahwa dasar dinding yang dapat bergerak bebas (*free sliding*) merupakan perletakan yang lebih optimal dibandingkan perletakan lainnya untuk tangki dengan diameter yang besar, namun demikian perletakan ini memerlukan sejenis *water stop* atau *seal* untuk mencegah kebocoran tangki pada dasar dinding.

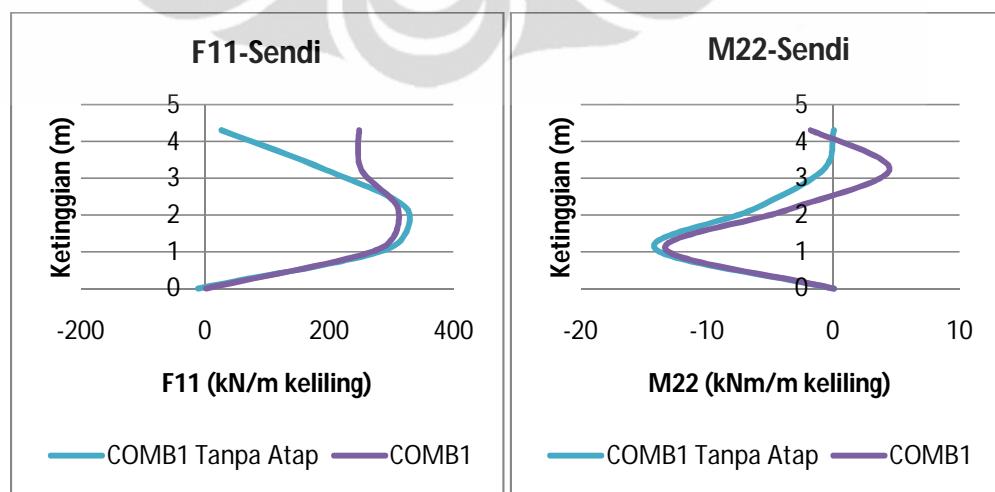
## 4.5 Pengaruh kubah atap terhadap dinding tangki

### 4.5.1 Perbandingan gaya dalam dengan dan tanpa kubah atap

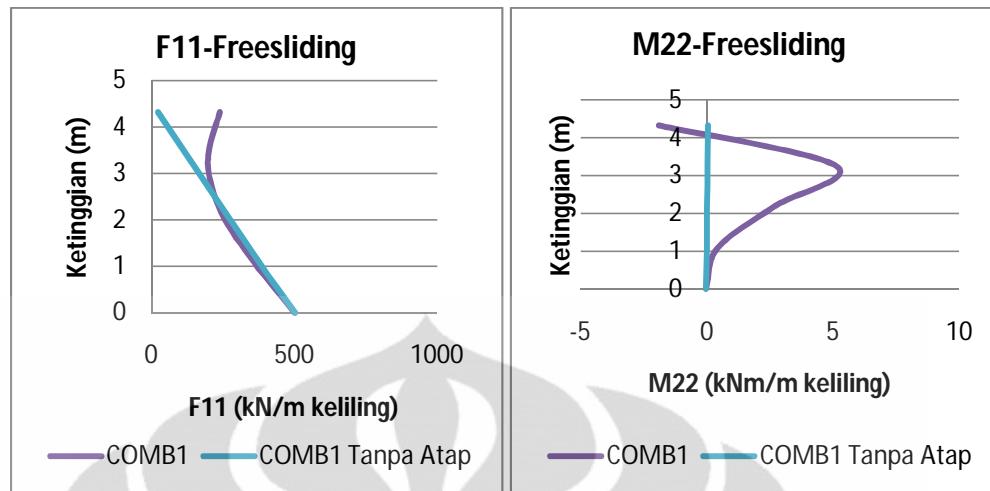
Dalam permodelan yang dilakukan, kubah atap dimodelkan dengan dinding dan dihubungkan dengan *one joint link* yang derajat kebebasannya diatur dalam bagian metodologi (bab 3) sedemikian hingga kubah atap diasumsikan hanya bertumpu pada dinding dan diijinkan untuk mengalami deformasi ke arah radial dan vertikal. Namun demikian dalam hasil analisis yang telah dilakukan, terdapat pengaruh yang cukup signifikan terhadap gaya dalam cincin dan momen dinding terutama pada daerah dinding mendekati sambungan dinding-atap. Grafik berikut ini menunjukkan perbandingan pengaruh ada tidaknya kubah atap dalam permodelan tangki silinder ini.



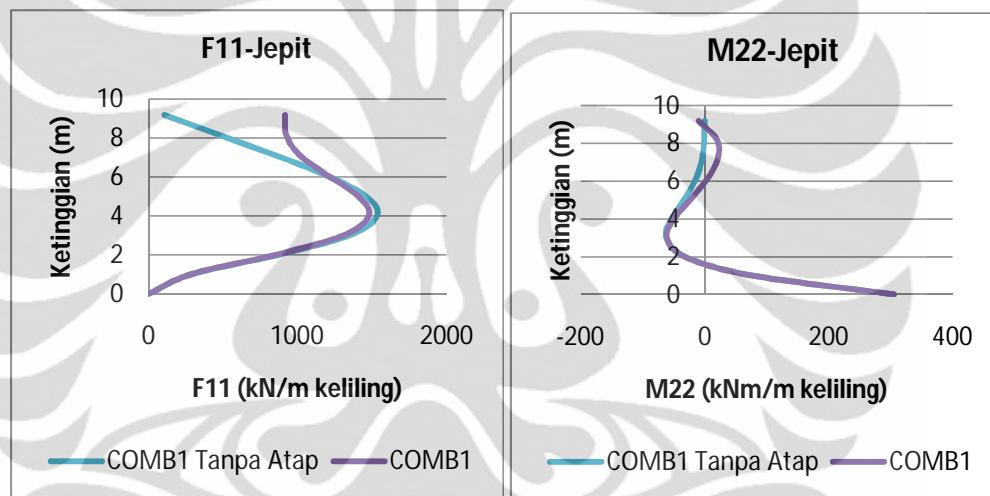
Grafik 4.31 Diameter 17.2 m Perletakan Jepit



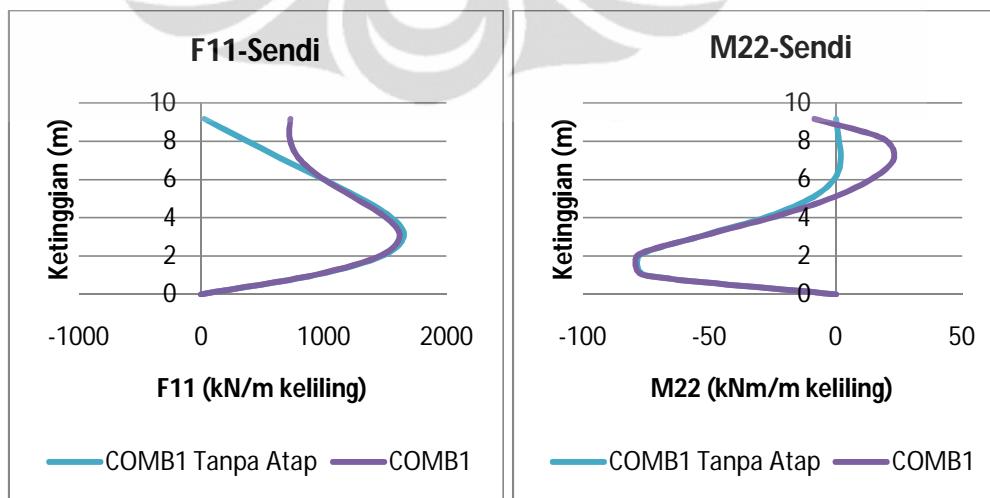
Grafik 4.32 Diameter 17.2 m Perletakan Sendi



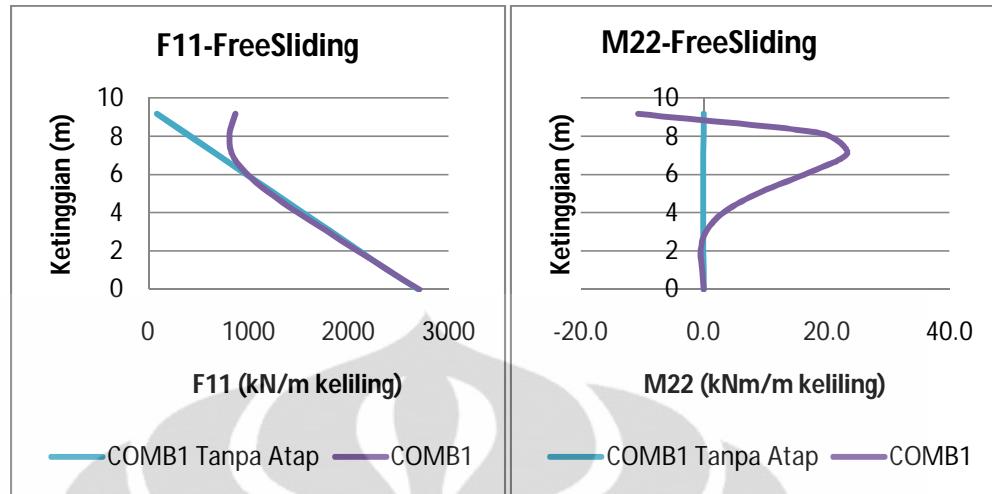
Grafik 4.33 Diameter 17.2 m Perletakan Freesliding



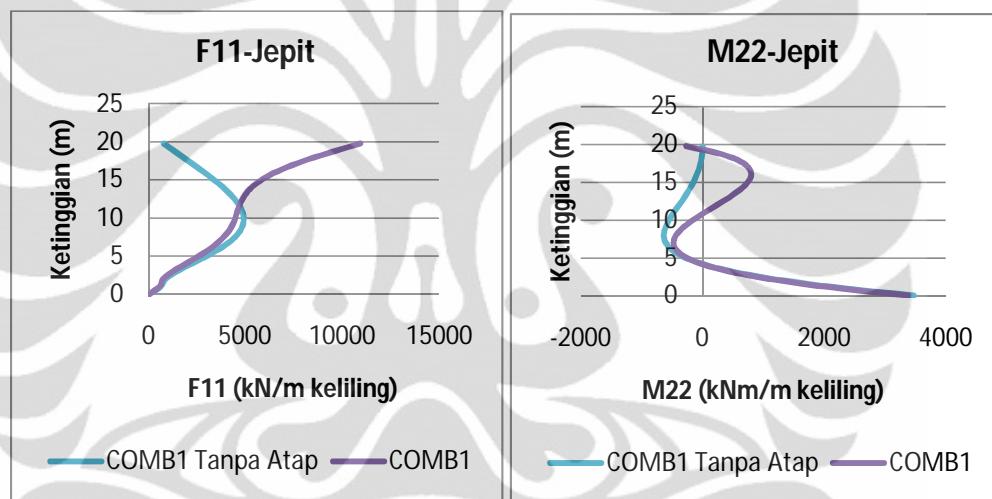
Grafik 4.34 Diameter 36.8 m Perletakan Jepit



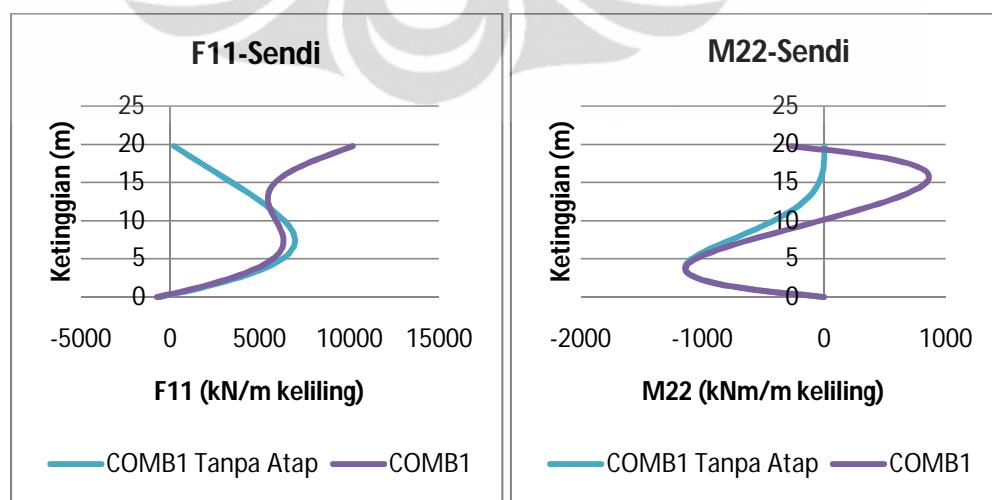
Grafik 4.35 Diameter 36.8 m Perletakan Sendi



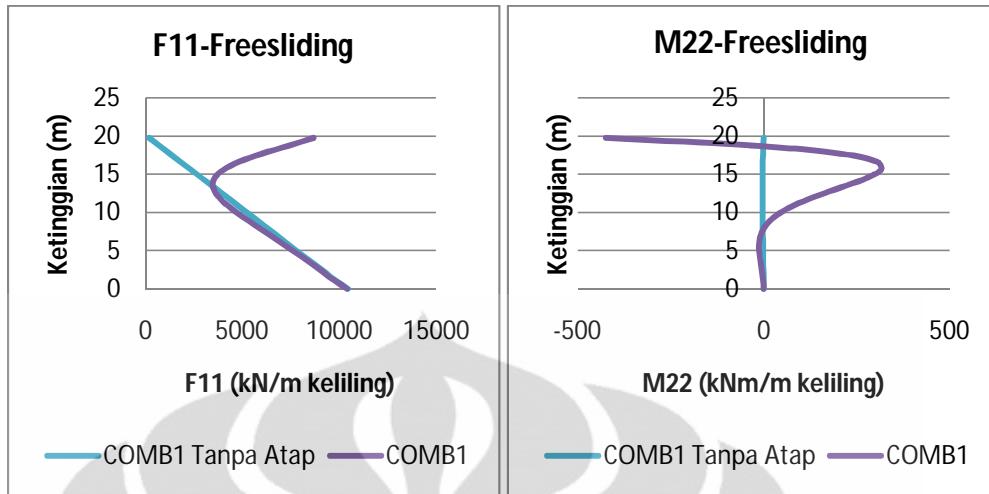
Grafik 4.36 Diameter 36.8 m Perletakan Freesliding



Grafik 4.37 Diameter 79.2 m Perletakan Jepit



Grafik 4.38 Diameter 79.2 m Perletakan Sendi



Grafik 4.39 Diameter 79.2 m Perletakan Freesliding

Kubah atap memberikan kontribusi tambahan beban mati pada struktur namun beban mati ini ditransfer dengan membentuk sudut tertentu terhadap dinding karena atap merupakan cangkang bola dengan sudut cangkang tertentu, sehingga timbul gaya *thrust* cincin yang sangat besar terhadap dinding tangki.

Pengaruh adanya kubah atap memberikan pengaruh yang sangat besar pada dinding terutama pada perletakan *free sliding*. Kubah atap seolah memberikan adanya efek kekangan pada bagian atas dinding sehingga terdapat pengaruh momen pada perletakan *free sliding*. Dengan demikian adanya kubah atap yang bertumpu penuh pada dinding pada perletakan *free sliding* dapat mengakibatkan terjadinya tegangan dinding.

#### 4.5.2 Pemberian Balok cincin tepi

Atap memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap gaya dalam cincin dan momen pada dinding tangki sehingga diperlukan elemen struktur khusus untuk dapat menahan gaya ini. Balok cincin tepi prategang merupakan solusi untuk memperkecil gaya *thrust* atap terhadap dinding. Balok cincin tepi ini didesain terpisah dari dinding tangki, dan bertumpu pada dinding tangki dengan menggunakan neoprene sebagai *bearing pad*.

Dengan menggunakan metode perhitungan secara analitis yang terlampir, maka didapat tabulasi gaya-gaya sebagai berikut

Tabel 4.23 Properti Balok Cincin Tepi Prategang

Diameter	Gaya tangensial (kN/m keliling)	Gaya meridional (kN/m keliling)	Gaya Prategang (kN)	Dimensi balok cincin tepi	Jumlah Prestressing
17.2	5.898	42.3	370	35 x 35	4
36.8	18.732	89.482	1705	40 x 80	8
79.2	78.331	352.28	14530	135 x 200	12

#### 4.6 Sloshing

Akibat percepatan gempa horizontal, maka air akan mengalami *sloshing* dengan adanya pertambahan tinggi dan penurunan tinggi dari elevasi air eksisting yang berosilasi selama periode waktu tertentu. Gerakan sloshing ini akan terjadi berulang-ulang selama masih terdapat gaya gempa yang menyebabkan gerakan ini terjadi.

Secara matematis berdasarkan ACI 350.3-01, maka *sloshing* untuk mode yang utama dapat diperkirakan berdasarkan persamaan berikut ini

$$d_{\max} = \left( \frac{D}{2} \right) (ZSI \times C_c)$$

Tinggi *sloshing* sebanding dengan nilai diameter dan nilai faktor respons inelastis spektrum. Tinggi *sloshing* untuk permodelan ini disajikan dalam tabel berikut ini

Tabel 4.24 Tinggi *Sloshing*

Model	Rasio H/D	Diameter (m)	Periode Konvektif (s)	Tinggi <i>sloshing</i> (m)
1	1 : 3	15.6	4.503	0.649
2	1 : 5	18.5	5.683	0.483
3	1 : 4	17.2	5.091	0.56
4	1 : 4	36.8	7.447	0.56
5	1 : 4	79.2	10.925	0.56

Dapat diperhatikan bahwa tinggi *sloshing* untuk rasio yang sama memiliki nilai yang sama. Secara matematis untuk periode konvektif di atas 2.4 s dapat

ditunjukkan bahwa untuk rasio tinggi dan diameter yang sama akan menghasilkan nilai yang sama melalui ekspresi-ekspresi berikut ini.

$$d_{\max} = \left( \frac{D}{2} \right) (ZSI \times C_c)$$

dimana

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

sehingga

$$C_c = \frac{6.0}{T_c^2} = \frac{6}{\left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 D}$$

akibatnya

$$d_{\max} = \left( \frac{D}{2} \right) (ZSI \times C_c) = \frac{1}{2} ZSI \frac{6\lambda^2}{(2\pi)^2}$$

dan mengakibatkan tinggi sloshing tidak dipengaruhi oleh diameter melainkan oleh nilai  $\lambda$  yang dinyatakan dalam persamaan berikut

$$\lambda = \sqrt{3.68 g \tanh \left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right]}$$

Nilai  $\lambda$  hanya dipengaruhi oleh variabel rasio tinggi cairan dan diameter tangki. Dengan demikian maka tinggi sloshing maksimum nilainya hanya dipengaruhi oleh rasio tinggi cairan dan diameter tangki untuk periode konvektif diatas 2.4 s.

Ketinggian *freeboard* dapat diambil berdasarkan tinggi *sloshing* maksimum ini dan ketinggian dinding atau ketinggian cairan maksimum yang dijinkan dapat menyesuaikan dengan nilai ini.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Semakin besar rasio tinggi dan diameter akan memperbesar periode impulsif dan gaya geser dasar yang terjadi serta memperkecil periode konvektif.
- b. Periode Impulsif dan konvektif akan semakin besar sebanding dengan akar kuadrat diameter tangki dan dipengaruhi ketebalan dinding tangki.
- c. Rasio tinggi banding diameter tangki 1 : 4 merupakan rasio yang optimum ditinjau dari rasio volume air dan volume beton yang digunakan, rasio penulangan dan rasio tekanan hidrodinamik terhadap tekanan hidrostatis.
- d. Tekanan hidrodinamik pada perletakan *free sliding* lebih kecil daripada perletakan lainnya. Untuk zona gempa wilayah 3 jakarta pada ketiga tipe perletakan, besarnya tekanan hidrodinamik tidak signifikan dalam mempengaruhi desain tangki karena besarnya tidak mencapai 33% dari tekanan hidrostatis
- e. Tekanan Hidrostatis memiliki proporsi terbesar dalam seluruh beban kerja yang terjadi sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk desain awal (*preliminary design*) dinding tangki.
- f. Semakin lebar dan semakin tinggi dimensi tangki, gaya dalam akan semakin besar yang berakibat pada besarnya tegangan pada dinding dan dasar dinding (untuk perletakan jepit), sehingga diperlukan penebalan dinding untuk memperkecil tegangan namun hal ini tidak berlaku pada perletakan *free sliding*.
- g. Perletakan jepit mengakibatkan timbulnya tegangan tarik pada dasar dan dinding. Perletakan sendi mengakibatkan timbulnya tegangan tarik pada dinding. Perletakan *free sliding* mengakibatkan pengaruh yang sangat kecil terhadap tegangan dinding karena tidak ada kekangan.

- h. Penggunaan prategang horizontal akan mencegah keretakan dinding luar akibat besarnya momen lentur vertikal dan gaya cincin di dinding pada saat tangki penuh dan penggunaan prategang vertikal akan mencegah keretakan dinding dalam akibat gaya prategang saat tangki kosong.
- i. Penggunaan beton prategang akan lebih ekonomis daripada penggunaan beton dengan penulangan baja lunak biasa untuk diameter tangki yang besar.
- j. Penggunaan beton prategang akan sangat baik dikombinasikan dengan perletakan *freesliding* karena tidak terjadi tegangan akibat pengekangan dinding di dasar untuk tangki dengan diameter yang besar.
- k. Kubah atap yang semakin lebar dan meninggi akan memberikan gaya tekan yang sangat besar pada dinding sehingga diperlukan adanya balok cincin tepi untuk memperkecil tekanan yang terjadi pada dinding.
- l. Tinggi sloshing pada periode konvektif diatas 2.4 detik tidak akan mengalami perubahan apabila rasio diameter dan tinggi tangki konstan

## 5.2 Saran

Untuk semakin mempertajam objek penelitian terhadap tangki beton pratekan ini

- a. Permodelan tangki air silinder disarankan untuk menggunakan software berbasis *finite element* ANSYS. Penggunaan SAP2000 untuk memodelkan tangki silinder dengan beban gempa dirasakan kurang tepat karena tidak dapat memodelkan perilaku fluida dengan menggunakan *finite element* sehingga analisis struktur secara dinamis tidak dapat dilakukan
- b. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan memperhatikan interaksi antara struktur tangki dengan tanah atau secara khusus memperhatikan pengaruh kubah atap akibat gaya gempa terhadap struktur tangki silinder beton

- c. Salah satu parameter yang perlu dipertimbangkan untuk digunakan dalam penelitian terhadap dinding tangki beton berikutnya adalah rasio ketebalan dinding tangki dengan diameter tangki.
- d. Baja prategang dapat juga dimodelkan sebagai elemen untuk mempelajari dan mengoptimasi penggunaan baja prategang pada tangki beton silinder.



## DAFTAR REFERENSI

- ACI Committee 350. (2001). *ACI 350.3-01 Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 373. (1997). *ACI 373-97 Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- American Society of Civil Engineers. (2006). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Arbintarso, E. S. (2007). *Open Course*. Retrieved June 17, 2011, from elearning ista: <http://202.91.15.14/index.php?act=coursebaru>
- Baltas, C. (2005). Non-Linear Seismic Response of Circular Prestressed Reservoirs.
- Billington, D. P. (1982). *Thin Shell Concrete Structures*. USA: The Kingsport Press.
- Canadian Prestressed Concrete Institute. (1996). Precast and Prestressed Concrete, design manual, 3rd Edition. 2-18.
- Computer and Structures, Inc. (2004). *SAP2000 Software Verification Problem 2-010 Shell-Cylinder with Internal Pressure*. Berkeley: Computer and Structures, Inc.
- Computers and Structures, Inc. (2009). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, and SAFE*. Berkeley.
- Housner, G., & Haroun, M. (1980). *Dynamic Analysis of Liquid Storage Tanks*. Pasadena, California: Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology.
- Indian Institute Technology of Kanpur (IITK). (2007). *Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks*. Kanpur: National Information Center of Earthquake Engineering.

- Jaiswal, O., & Jain, S. K. (2005). Modified Proposed Provisions for Aseismic Design of Liquid Storage Tanks : Part II - Commentary and Examples. *Journal of Structural Engineering*, 32 (4), 297-310.
- Larkin, T. (2008). Seismic Response of Liquid Storage Tanks Incorporating Soil Structure Interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1804-1814.
- Mezzaini, N. e. (2006). Effects of Soil-Structure Interaction on The Analysis of Cylindrical Tanks. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 50-57.
- Munshi, J., & Legatos, N. (2003). Seismic Design of Liquid-Containning Concrete Structures per ACI 350.3. *Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper 007* (p. Paper 007). New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE).
- Nawy, E. G. (2001). *Beton Prategang : Suatu pendekatan mendasar*. Jakarta: Erlangga.
- Nessie. (2002). *Hubungan dinding dengan lantai pada tangki silinder beton pratekan*. Depok: FTUI.
- Ofner, R., & Greiner, R. (2003). *Large Cylindrical Shell Flat-Bottom Storage Tanks - Design Calculations for Seismic Effects*. Graz University of Technology.
- Preload Engineering Company, Inc. *Design of Preload Tanks*. New York: Bulletin T-19.
- Raju, N. K. (1993). *Beton Prategang*. Jakarta: Erlangga.
- S. P. Timoshenko dan S. Woinowsky-Krieger. (1959). *Theory of Plates and Shell, 2d ed.* New York: McGraw-Hill Book company.
- SNI-1726-2002. (2002). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*. Jakarta: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- Veletsos, A. (1984). Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks. *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, 225-370.

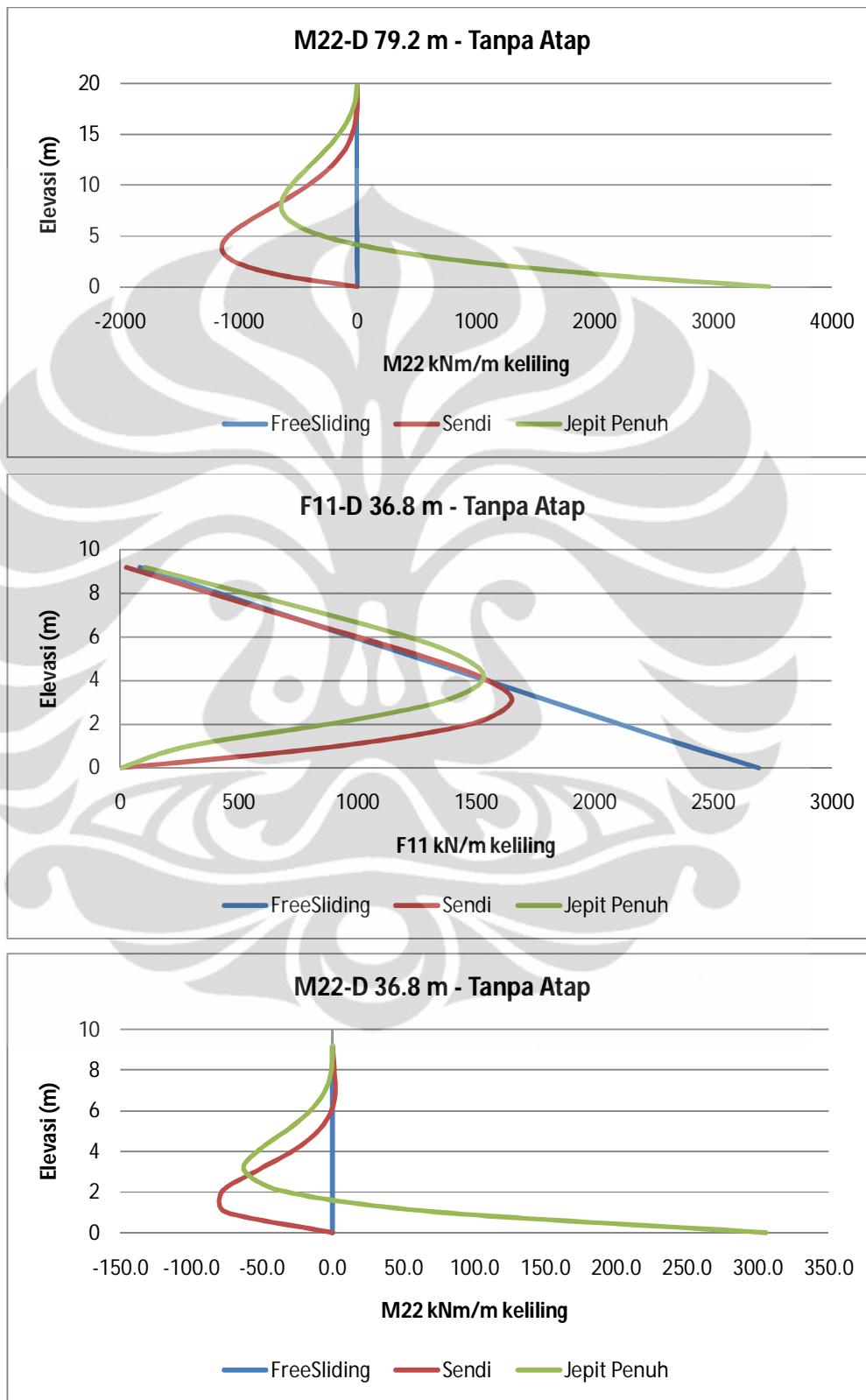
Whittaker, D., & D Jury, R. (2000). Seismic Design Loads For Storage Tanks .

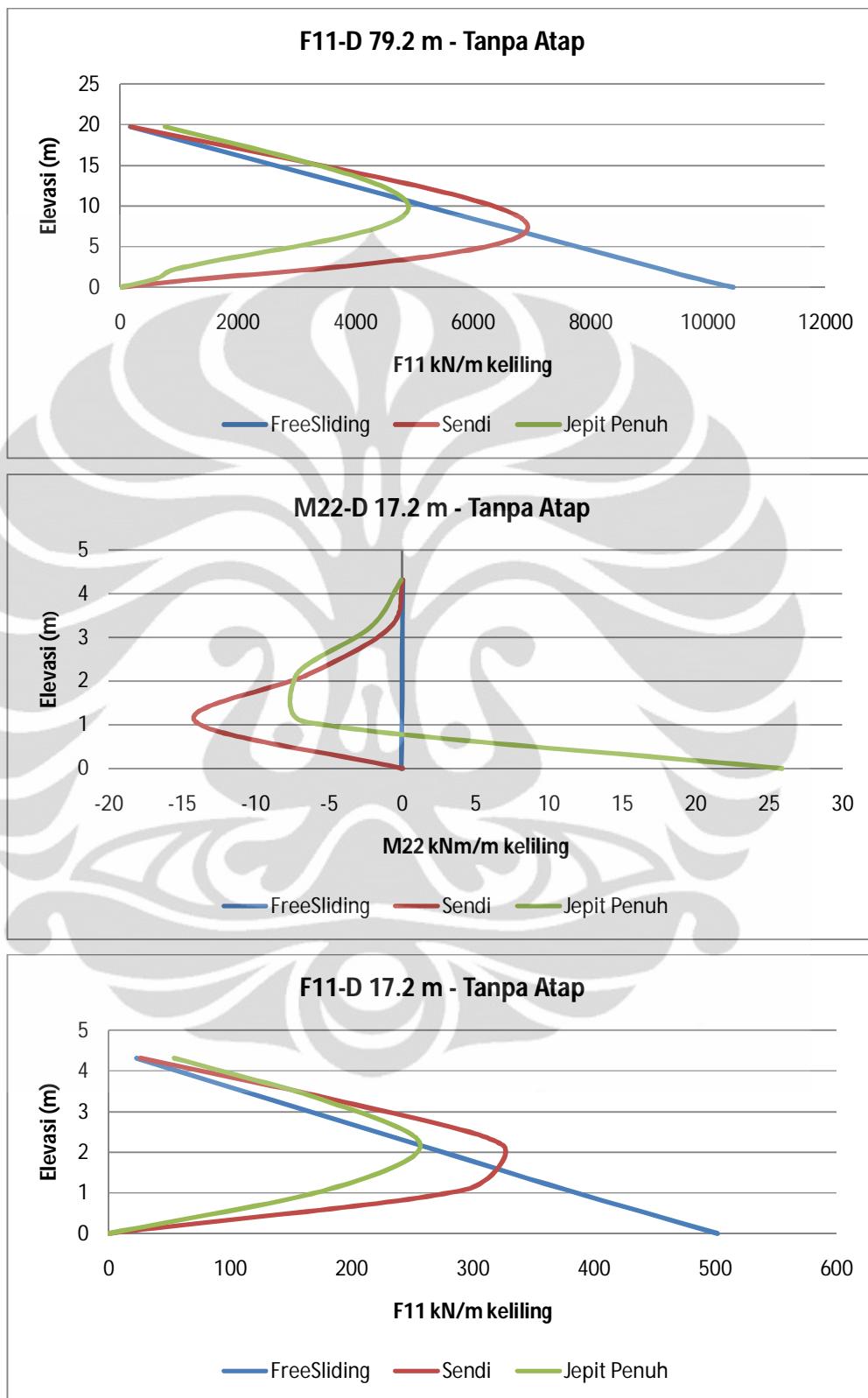
*NZSEE* .

Wood, J., & Priestley, M. (2003). Improvements to Seismic Design of Circular Prestressed Concrete Storage Tanks. *Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper 120*. New Zealand: New Zealand Society of Earthquake Engineering.

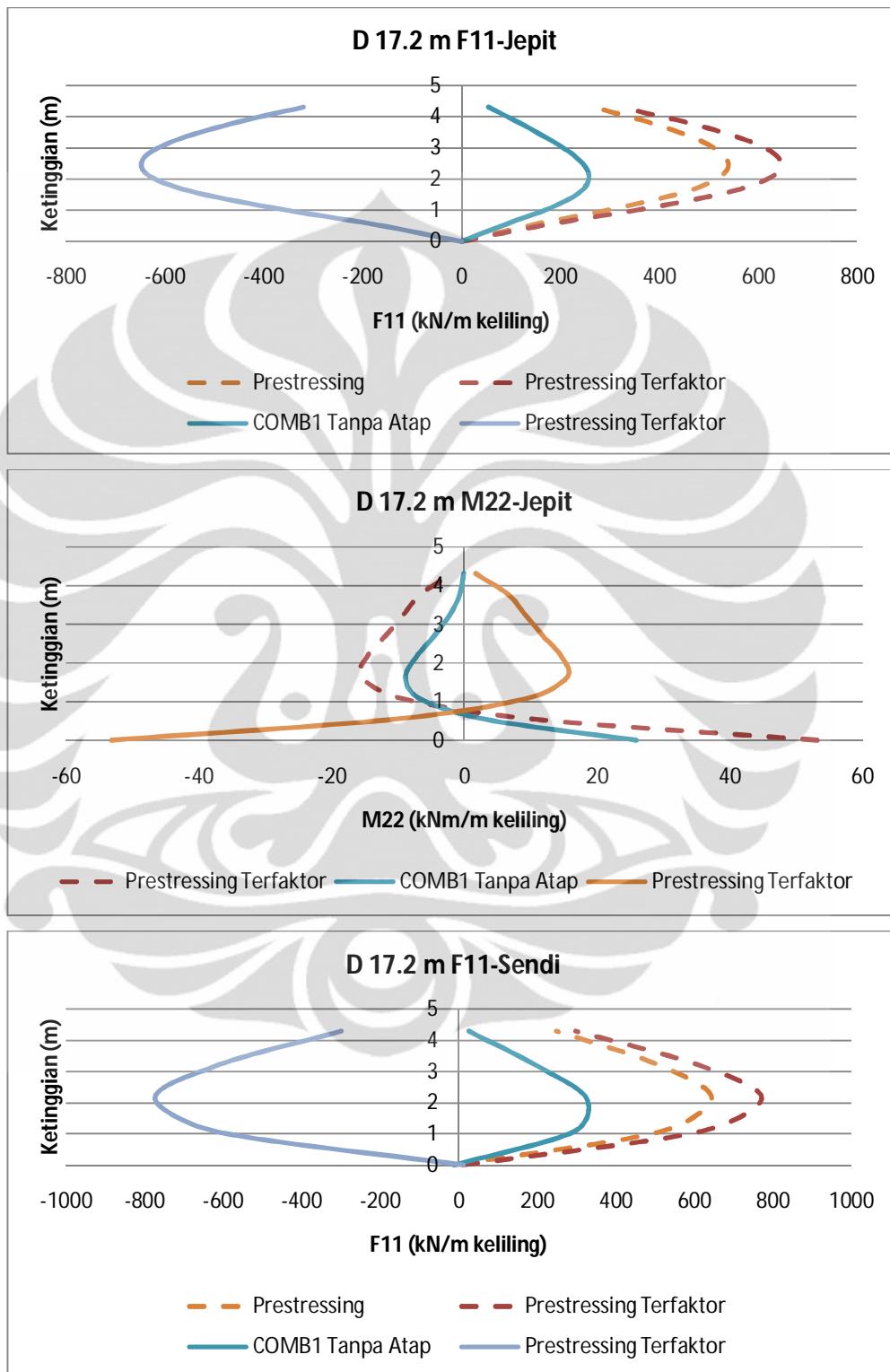


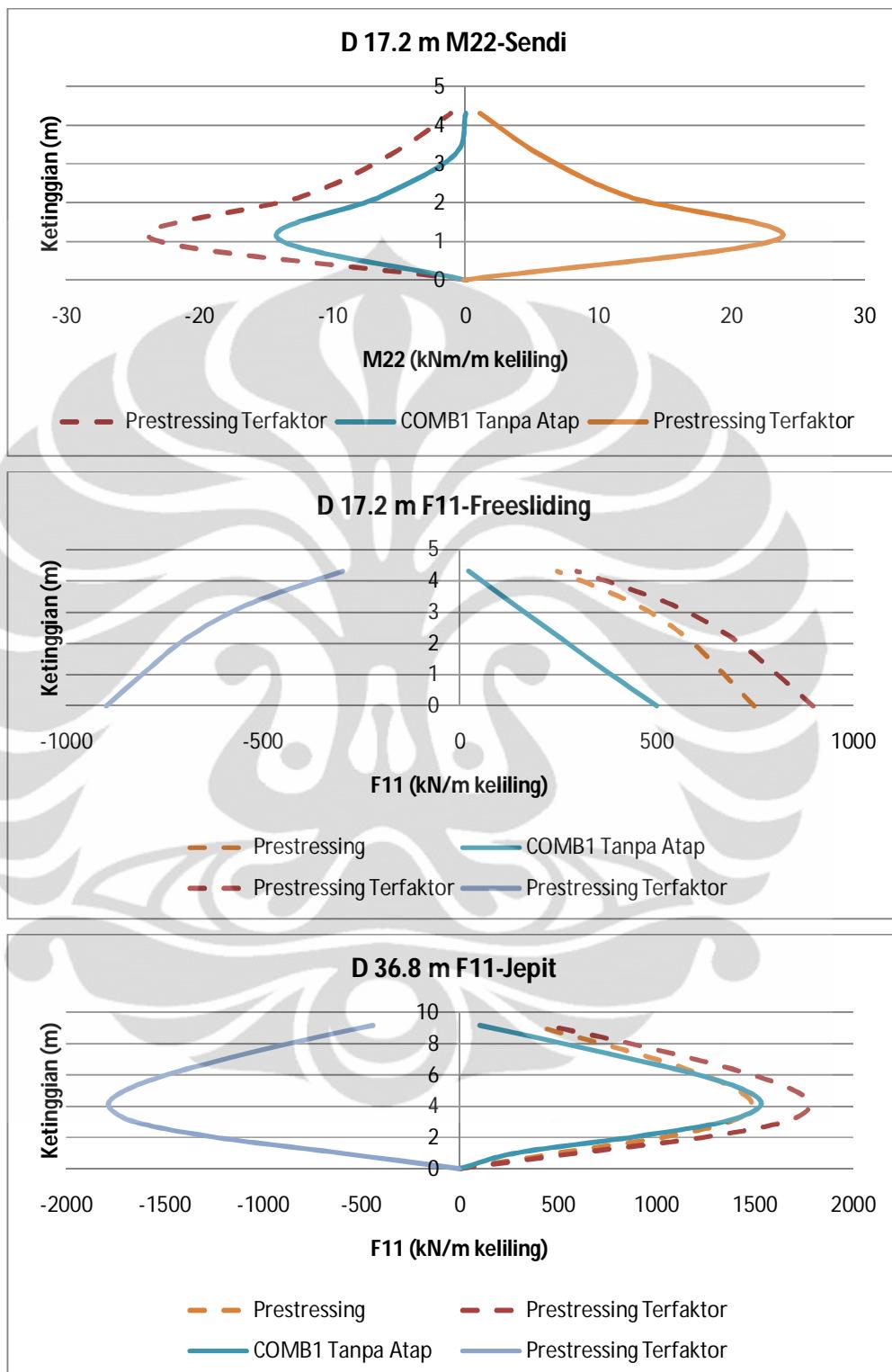
## Lampiran A1 – Perbandingan Gaya Dalam Tanpa Kubah Atap

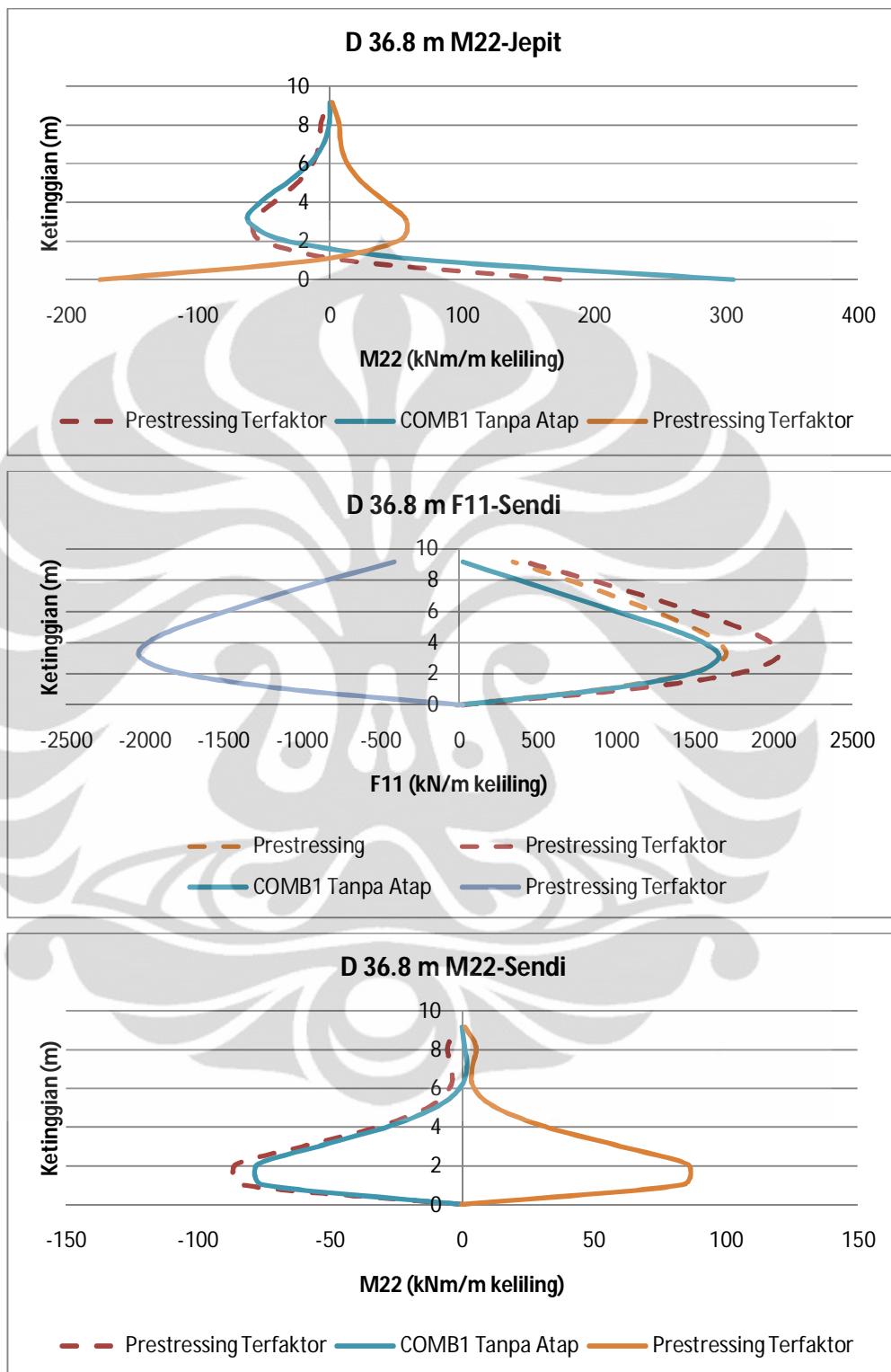


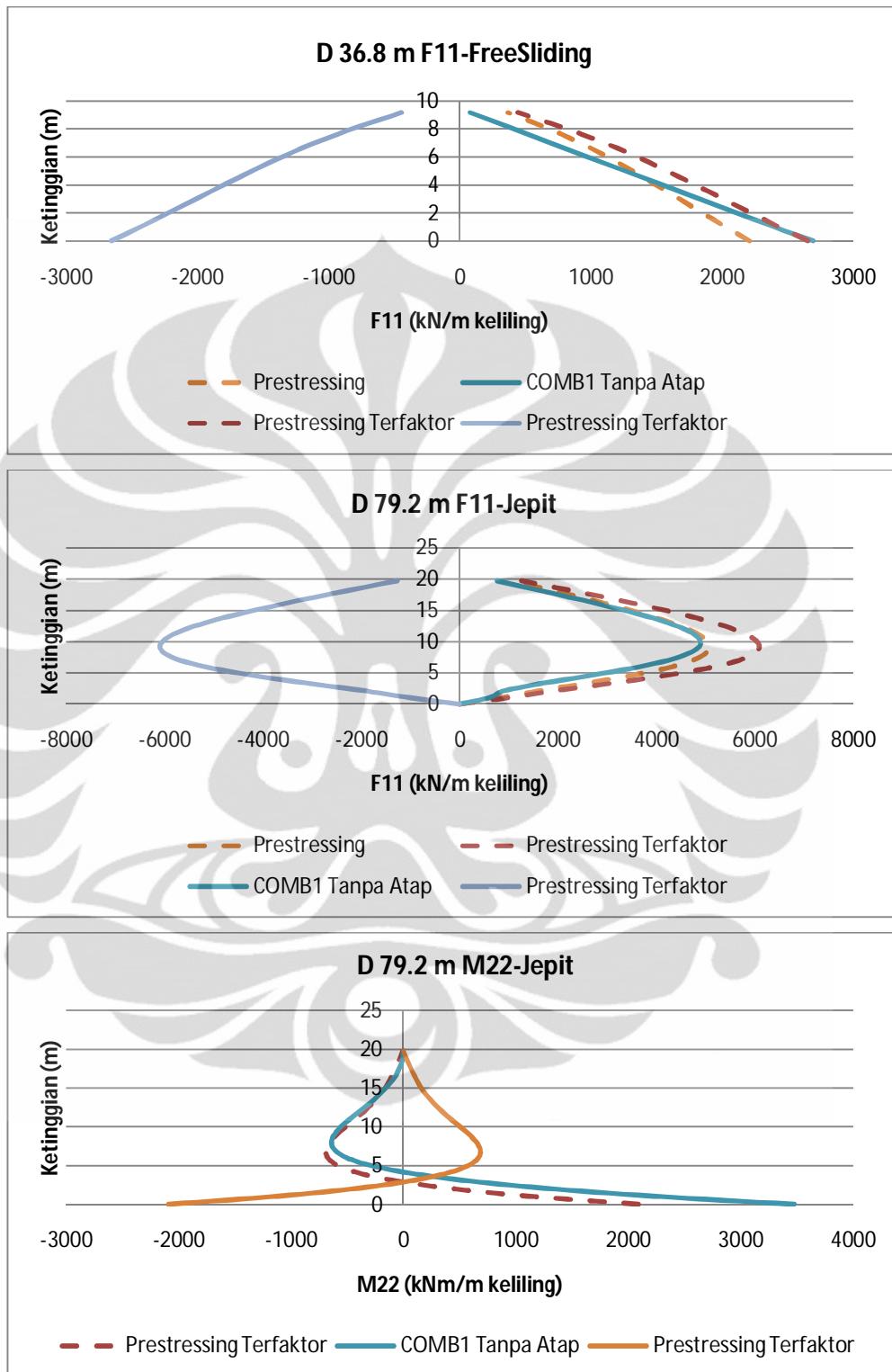


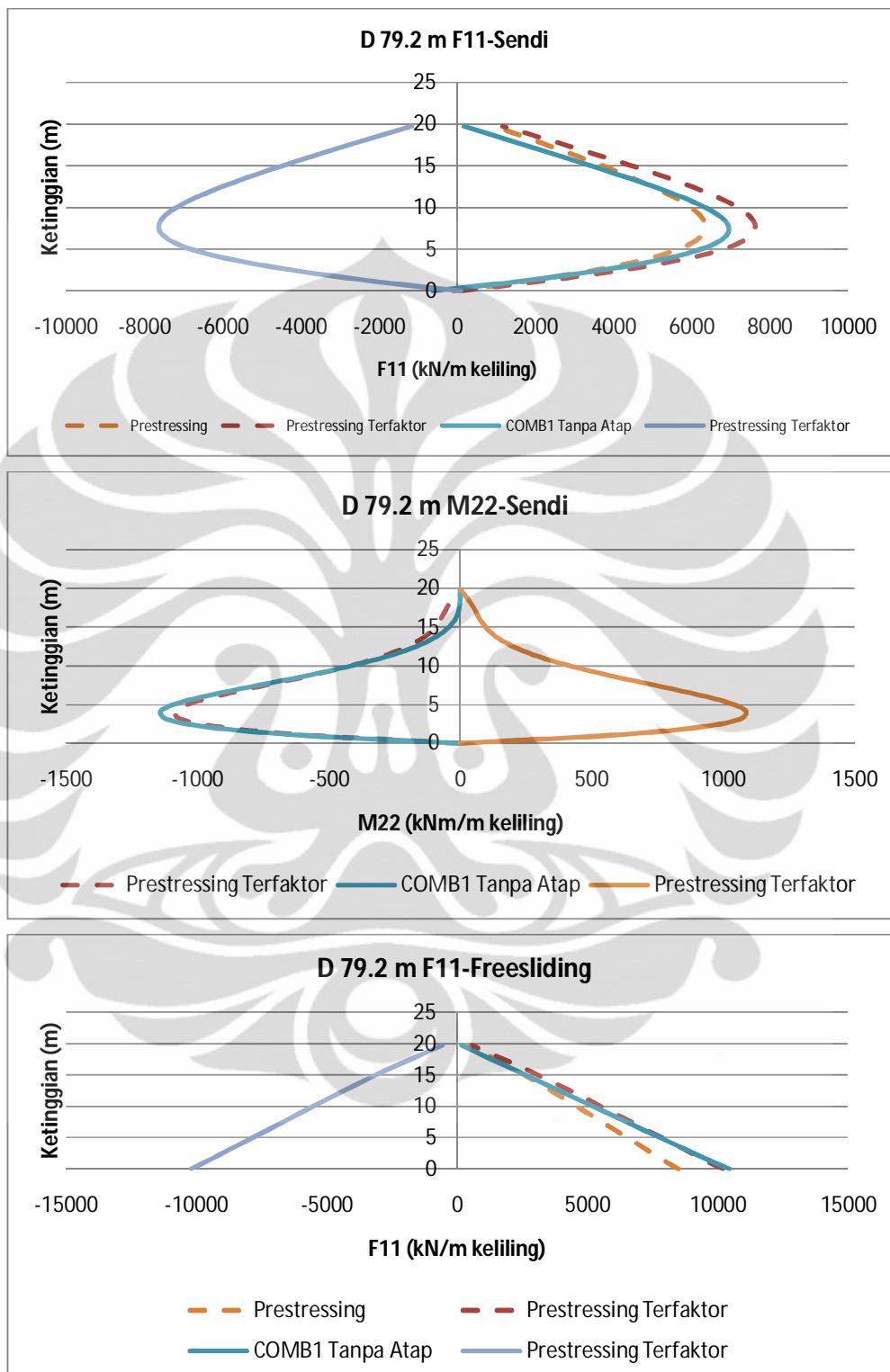
## Lampiran A2 – Gaya Dalam akibat Beban Prategang











Lampiran B – Contoh Input Data Beban-SAP2000 D 36.8 m – *free sliding*

Arah (derajat)	<b>Pada Elevasi (m) -Tekanan Hidrodinamik (kPa) - applied at bottom</b>								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,353	0,331	0,308	0,286	0,263	0,241	0,218	0,195	0,173
3,1034	0,706	0,661	0,616	0,57	0,525	0,48	0,435	0,39	0,345
6,2069	1,056	0,988	0,921	0,854	0,786	0,719	0,651	0,584	0,517
9,3103	1,403	1,313	1,224	1,134	1,045	0,955	0,866	0,776	0,686
12,4138	1,746	1,635	1,523	1,412	1,3	1,189	1,077	0,966	0,854
15,5172	2,084	1,951	1,818	1,685	1,552	1,419	1,286	1,153	1,02
18,6207	2,416	2,261	2,107	1,953	1,799	1,645	1,49	1,336	1,182
21,7241	2,74	2,565	2,39	2,216	2,041	1,866	1,691	1,516	1,341
24,8276	3,057	2,862	2,667	2,472	2,276	2,081	1,886	1,691	1,496
27,9310	3,365	3,15	2,935	2,72	2,505	2,291	2,076	1,861	1,646
31,0345	3,663	3,429	3,195	2,961	2,727	2,493	2,26	2,026	1,792
34,1379	3,95	3,697	3,445	3,193	2,941	2,689	2,437	2,185	1,932
37,2414	4,225	3,955	3,686	3,416	3,146	2,876	2,607	2,337	2,067
40,3448	4,488	4,202	3,915	3,629	3,342	3,056	2,769	2,482	2,196
43,4483	4,738	4,436	4,133	3,831	3,528	3,226	2,923	2,621	2,318
46,5517	4,974	4,657	4,339	4,021	3,704	3,386	3,069	2,751	2,434
49,6552	5,196	4,864	4,532	4,201	3,869	3,537	3,205	2,874	2,542
52,7586	5,402	5,057	4,712	4,367	4,022	3,678	3,333	2,988	2,643
55,8621	5,592	5,235	4,878	4,521	4,164	3,807	3,45	3,093	2,736
58,9655	5,766	5,398	5,03	4,662	4,294	3,926	3,557	3,189	2,821
62,0690	5,923	5,545	5,167	4,789	4,411	4,032	3,654	3,276	2,898
65,1724	6,063	5,676	5,289	4,902	4,515	4,128	3,74	3,353	2,966
68,2759	6,185	5,79	5,395	5	4,605	4,211	3,816	3,421	3,026
71,3793	6,288	5,887	5,486	5,084	4,683	4,281	3,88	3,478	3,077
74,4828	6,374	5,967	5,56	5,153	4,746	4,339	3,932	3,525	3,118
77,5862	6,44	6,029	5,618	5,207	4,796	4,385	3,973	3,562	3,151
80,6897	6,488	6,074	5,66	5,245	4,831	4,417	4,003	3,589	3,174
83,7931	6,517	6,101	5,685	5,269	4,853	4,437	4,021	3,605	3,188
86,8966	6,526	6,11	5,693	5,276	4,86	4,443	4,026	3,61	3,193
90,0000	6,526	6,11	5,693	5,276	4,86	4,443	4,026	3,61	3,193
93,1034	6,517	6,101	5,685	5,269	4,853	4,437	4,021	3,605	3,188
96,2069	6,488	6,074	5,66	5,245	4,831	4,417	4,003	3,589	3,174
99,3103	6,44	6,029	5,618	5,207	4,796	4,385	3,973	3,562	3,151
102,4138	6,374	5,967	5,56	5,153	4,746	4,339	3,932	3,525	3,118
105,5172	6,288	5,887	5,486	5,084	4,683	4,281	3,88	3,478	3,077
108,6207	6,185	5,79	5,395	5	4,605	4,211	3,816	3,421	3,026
111,7241	6,063	5,676	5,289	4,902	4,515	4,128	3,74	3,353	2,966
114,8276	5,923	5,545	5,167	4,789	4,411	4,032	3,654	3,276	2,898
117,9310	5,766	5,398	5,03	4,662	4,294	3,926	3,557	3,189	2,821

Universitas Indonesia

Arah (derajat)	Pada Elevasi (m) -Tekanan Hidrodinamik (kPa) - applied at bottom								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
121,0345	5,592	5,235	4,878	4,521	4,164	3,807	3,45	3,093	2,736
124,1379	5,402	5,057	4,712	4,367	4,022	3,678	3,333	2,988	2,643
127,2414	5,196	4,864	4,532	4,201	3,869	3,537	3,205	2,874	2,542
130,3448	4,974	4,657	4,339	4,021	3,704	3,386	3,069	2,751	2,434
133,4483	4,738	4,436	4,133	3,831	3,528	3,226	2,923	2,621	2,318
136,5517	4,488	4,202	3,915	3,629	3,342	3,056	2,769	2,482	2,196
139,6552	4,225	3,955	3,686	3,416	3,146	2,876	2,607	2,337	2,067
142,7586	3,95	3,697	3,445	3,193	2,941	2,689	2,437	2,185	1,932
145,8621	3,663	3,429	3,195	2,961	2,727	2,493	2,26	2,026	1,792
148,9655	3,365	3,15	2,935	2,72	2,505	2,291	2,076	1,861	1,646
152,0690	3,057	2,862	2,667	2,472	2,276	2,081	1,886	1,691	1,496
155,1724	2,74	2,565	2,39	2,216	2,041	1,866	1,691	1,516	1,341
158,2759	2,416	2,261	2,107	1,953	1,799	1,645	1,49	1,336	1,182
161,3793	2,084	1,951	1,818	1,685	1,552	1,419	1,286	1,153	1,02
164,4828	1,746	1,635	1,523	1,412	1,3	1,189	1,077	0,966	0,854
167,5862	1,403	1,313	1,224	1,134	1,045	0,955	0,866	0,776	0,686
170,6897	1,056	0,988	0,921	0,854	0,786	0,719	0,651	0,584	0,517
173,7931	0,706	0,661	0,616	0,57	0,525	0,48	0,435	0,39	0,345
176,8966	0,353	0,331	0,308	0,286	0,263	0,241	0,218	0,195	0,173
180,0000	-0,353	-0,331	-0,308	-0,286	-0,263	-0,241	-0,218	-0,195	-0,173
183,1034	-0,706	-0,661	-0,616	-0,57	-0,525	-0,48	-0,435	-0,39	-0,345
186,2069	-1,056	-0,988	-0,921	-0,854	-0,786	-0,719	-0,651	-0,584	-0,517
189,3103	-1,403	-1,313	-1,224	-1,134	-1,045	-0,955	-0,866	-0,776	-0,686
192,4138	-1,746	-1,635	-1,523	-1,412	-1,3	-1,189	-1,077	-0,966	-0,854
195,5172	-2,084	-1,951	-1,818	-1,685	-1,552	-1,419	-1,286	-1,153	-1,02
198,6207	-2,416	-2,261	-2,107	-1,953	-1,799	-1,645	-1,49	-1,336	-1,182
201,7241	-2,74	-2,565	-2,39	-2,216	-2,041	-1,866	-1,691	-1,516	-1,341
204,8276	-3,057	-2,862	-2,667	-2,472	-2,276	-2,081	-1,886	-1,691	-1,496
207,9310	-3,365	-3,15	-2,935	-2,72	-2,505	-2,291	-2,076	-1,861	-1,646
211,0345	-3,663	-3,429	-3,195	-2,961	-2,727	-2,493	-2,26	-2,026	-1,792
214,1379	-3,95	-3,697	-3,445	-3,193	-2,941	-2,689	-2,437	-2,185	-1,932
217,2414	-4,225	-3,955	-3,686	-3,416	-3,146	-2,876	-2,607	-2,337	-2,067
220,3448	-4,488	-4,202	-3,915	-3,629	-3,342	-3,056	-2,769	-2,482	-2,196
223,4483	-4,738	-4,436	-4,133	-3,831	-3,528	-3,226	-2,923	-2,621	-2,318
226,5517	-4,974	-4,657	-4,339	-4,021	-3,704	-3,386	-3,069	-2,751	-2,434
229,6552	-5,196	-4,864	-4,532	-4,201	-3,869	-3,537	-3,205	-2,874	-2,542
232,7586	-5,402	-5,057	-4,712	-4,367	-4,022	-3,678	-3,333	-2,988	-2,643
235,8621	-5,592	-5,235	-4,878	-4,521	-4,164	-3,807	-3,45	-3,093	-2,736
238,9655	-5,766	-5,398	-5,03	-4,662	-4,294	-3,926	-3,557	-3,189	-2,821
242,0690	-5,923	-5,545	-5,167	-4,789	-4,411	-4,032	-3,654	-3,276	-2,898
245,1724	-6,063	-5,676	-5,289	-4,902	-4,515	-4,128	-3,74	-3,353	-2,966

Universitas Indonesia

Arah (derajat)	Pada Elevasi (m) -Tekanan Hidrodinamik (kPa) - applied at bottom								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
248,2759	-6,185	-5,79	-5,395	-5	-4,605	-4,211	-3,816	-3,421	-3,026
251,3793	-6,288	-5,887	-5,486	-5,084	-4,683	-4,281	-3,88	-3,478	-3,077
254,4828	-6,374	-5,967	-5,56	-5,153	-4,746	-4,339	-3,932	-3,525	-3,118
257,5862	-6,44	-6,029	-5,618	-5,207	-4,796	-4,385	-3,973	-3,562	-3,151
260,6897	-6,488	-6,074	-5,66	-5,245	-4,831	-4,417	-4,003	-3,589	-3,174
263,7931	-6,517	-6,101	-5,685	-5,269	-4,853	-4,437	-4,021	-3,605	-3,188
266,8966	-6,526	-6,11	-5,693	-5,276	-4,86	-4,443	-4,026	-3,61	-3,193
270,0000	-6,526	-6,11	-5,693	-5,276	-4,86	-4,443	-4,026	-3,61	-3,193
273,1034	-6,517	-6,101	-5,685	-5,269	-4,853	-4,437	-4,021	-3,605	-3,188
276,2069	-6,488	-6,074	-5,66	-5,245	-4,831	-4,417	-4,003	-3,589	-3,174
279,3103	-6,44	-6,029	-5,618	-5,207	-4,796	-4,385	-3,973	-3,562	-3,151
282,4138	-6,374	-5,967	-5,56	-5,153	-4,746	-4,339	-3,932	-3,525	-3,118
285,5172	-6,288	-5,887	-5,486	-5,084	-4,683	-4,281	-3,88	-3,478	-3,077
288,6207	-6,185	-5,79	-5,395	-5	-4,605	-4,211	-3,816	-3,421	-3,026
291,7241	-6,063	-5,676	-5,289	-4,902	-4,515	-4,128	-3,74	-3,353	-2,966
294,8276	-5,923	-5,545	-5,167	-4,789	-4,411	-4,032	-3,654	-3,276	-2,898
297,9310	-5,766	-5,398	-5,03	-4,662	-4,294	-3,926	-3,557	-3,189	-2,821
301,0345	-5,592	-5,235	-4,878	-4,521	-4,164	-3,807	-3,45	-3,093	-2,736
304,1379	-5,402	-5,057	-4,712	-4,367	-4,022	-3,678	-3,333	-2,988	-2,643
307,2414	-5,196	-4,864	-4,532	-4,201	-3,869	-3,537	-3,205	-2,874	-2,542
310,3448	-4,974	-4,657	-4,339	-4,021	-3,704	-3,386	-3,069	-2,751	-2,434
313,4483	-4,738	-4,436	-4,133	-3,831	-3,528	-3,226	-2,923	-2,621	-2,318
316,5517	-4,488	-4,202	-3,915	-3,629	-3,342	-3,056	-2,769	-2,482	-2,196
319,6552	-4,225	-3,955	-3,686	-3,416	-3,146	-2,876	-2,607	-2,337	-2,067
322,7586	-3,95	-3,697	-3,445	-3,193	-2,941	-2,689	-2,437	-2,185	-1,932
325,8621	-3,663	-3,429	-3,195	-2,961	-2,727	-2,493	-2,26	-2,026	-1,792
328,9655	-3,365	-3,15	-2,935	-2,72	-2,505	-2,291	-2,076	-1,861	-1,646
332,0690	-3,057	-2,862	-2,667	-2,472	-2,276	-2,081	-1,886	-1,691	-1,496
335,1724	-2,74	-2,565	-2,39	-2,216	-2,041	-1,866	-1,691	-1,516	-1,341
338,2759	-2,416	-2,261	-2,107	-1,953	-1,799	-1,645	-1,49	-1,336	-1,182
341,3793	-2,084	-1,951	-1,818	-1,685	-1,552	-1,419	-1,286	-1,153	-1,02
344,4828	-1,746	-1,635	-1,523	-1,412	-1,3	-1,189	-1,077	-0,966	-0,854
347,5862	-1,403	-1,313	-1,224	-1,134	-1,045	-0,955	-0,866	-0,776	-0,686
350,6897	-1,056	-0,988	-0,921	-0,854	-0,786	-0,719	-0,651	-0,584	-0,517
353,7931	-0,706	-0,661	-0,616	-0,57	-0,525	-0,48	-0,435	-0,39	-0,345
356,8966	-0,353	-0,331	-0,308	-0,286	-0,263	-0,241	-0,218	-0,195	-0,173

## Contoh Perhitungan beban gempa untuk diameter D36 m

Lampiran C

## Parameter Gempa

Percepatan gempa horizontal zona 2A  
(setara wilayah III Jakarta) Z : =0.15

Perletakan : =1 1 = Jepit, Sendi ;2 = Flexible Base

Faktor reduksi gempa impulsif  $R_{wi}$  :

$$R_{wi} = \begin{cases} 2.75 & \text{if Perletakan = 1} \\ 4.5 & \text{if Perletakan = 2} \end{cases}$$

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

Faktor keutamaan I : =1.25

## Profile tanah lunak kategori C

## Parameter Tangki Beton

**Rasio tinggi : diameter**

**ketinggian tangki**

diameter

jari - jari

$$\text{keliling} : \equiv \pi \cdot D \equiv 115.611 \text{ m}$$

berat jenis air

### **Ketinggian cairan**

Volume tangki

Berat cairan

### **tebal dinding**

**mutu beton**

berat jenis beton

Laser diodes

berat atap dari SAP2000

#### modulus elastisitas beton

teknan hidrostatis p

$$h_w : \frac{H_w}{\dots} = 4.6 \text{ m}$$

## Perhitungan

$$h_w := \frac{H_w}{2} = 4.6 \text{ m}$$

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

$$h_i := \begin{cases} 0.375 \cdot H_L & \text{if } \frac{D}{H_L} \geq 1.333 \\ \left[ \left( 0.5 - 0.09375 \frac{D}{H_L} \right) \cdot H_L \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad h_i = 3.45 \text{ m}$$

$$h_c := \left( 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right) - 1}{3.68 \frac{H_L}{D} \sinh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)} \right) H_L \quad h_c = 4.899 \text{ m}$$

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

$$h'_i := \begin{cases} \left[ \frac{0.866 \left( \frac{D}{H_L} \right)}{2 \cdot \tanh\left[ 0.866 \cdot \left( \frac{D}{H_L} \right) \right]} - \frac{1}{8} \right] \cdot H_L & \text{if } \frac{D}{H_L} \geq 0.75 \\ 0.45 \cdot H_L & \text{otherwise} \end{cases} \quad h'_i = 14.816 \text{ m}$$

$$h'_c := \left( 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right) - 2.01}{3.68 \frac{H_L}{D} \sinh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)} \right) H_L \quad h'_c = 14.469 \text{ m}$$

**Equivalent masses of accelerating liquid**

$$W_i := \frac{\tanh\left[ 0.866 \left( \frac{D}{H_L} \right) \right]}{0.866 \frac{D}{H_L}} \cdot W_L \quad W_i = 2.766 \times 10^7 \text{ N}$$

$$W_c := 0.23 \frac{D}{H_L} \tanh\left[ 3.68 \left( \frac{H_L}{D} \right) \right] \cdot W_L \quad W_c = 6.411 \times 10^7 \text{ N}$$

**Properti dinamik**

**Koefisien massa efektif**

$$\varepsilon := 0.0151 \cdot \left( \frac{D}{H_L} \right)^2 - 0.1908 \left( \frac{D}{H_L} \right) + 1.021 = 0.499$$

**Perhitungan  $C_w$**

$$C_w := 9.375 \times 10^{-2} + 0.2039 \cdot \frac{H_L}{D} - 0.1034 \cdot \left( \frac{H_L}{D} \right)^2 - 0.1253 \left( \frac{H_L}{D} \right)^3 + 0.1267 \left( \frac{H_L}{D} \right)^4 - 3.186 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{H_L}{D} \right)^5$$

$$C_w = 0.137$$

$$C_I := C_w \cdot \sqrt{\frac{t_w}{10R}} = 5.965 \times 10^{-3}$$

**Perhitungan Periode Impulsif  $T_i$  untuk dinding yang rigid (perletakan jepit/sendi)**

$$\omega_i := C_I \cdot \frac{1}{H_L} \sqrt{10^3 \cdot \frac{E_c}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{m}}{s}} = 22.069 \frac{1}{s}$$

$$T_i := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_i} = 0.285 \text{ s}$$

### Perhitungan Periode Impulsif $T_i$ untuk dinding yang fleksibel

properti bearing pad dan seismic cable

$$w_p := 120 \cdot \text{mm} \quad \alpha := 30 \cdot \text{deg}$$

$$S_p := 1 \text{ m} \quad L_s := 600 \cdot \text{mm}$$

$$t_p := 30 \cdot \text{mm} \quad E_s := 2 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$L_p := 1 \text{ m} \quad S_s := 1500 \cdot \text{mm}$$

$$G_p := 1500 \text{kPa} \quad A_s := 98.7 \cdot \text{mm}^2$$

$$k_a := \left[ \frac{\left( A_s \cdot E_s \cdot \cos(\alpha) \right)^2}{L_s \cdot S_s} + \frac{2G_p \cdot w_p \cdot L_p}{t_p \cdot S_p} \right] = 28450 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$T_{i\_flexible} := \sqrt{\frac{8\pi(W_w + W_r + W_i)}{g \cdot D \cdot k_a}} = 0.307 \text{ s}$$

$$\frac{T_{i\_flexible}}{T_i} = 1.08$$

### Perhitungan periode Konvektif $T_c$

$$\lambda := \sqrt{3.68 \cdot g \cdot \tanh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)} = 5.118 \frac{\text{m}^{0.5}}{\text{s}}$$

$$\omega_c := \frac{\lambda}{\sqrt{D}} = 0.844 \frac{1}{\text{s}}$$

$$T_c := 2 \frac{\pi}{\omega_c} = 7.447 \text{ s}$$

### Sesuai ACI 350.3

#### Kondisi tanah lunak profil tanah C

$$C_i := \begin{cases} \frac{2.75}{s} & \text{if } T_i \leq 0.31 \cdot s \\ \frac{1.25}{\left(\frac{T_i}{1 \cdot s}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C_i = 1.833$$

$$C_c := \begin{cases} \frac{6}{\left(\frac{T_c}{1 \cdot s}\right)^2} & \text{if } T_c \geq 2.4 \cdot s \\ \frac{1.875}{\left(\frac{T_c}{1 \cdot s}\right)^2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C_c = 0.108$$

### Percepatan gempa vertikal

$$T_v := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma_L \cdot D \cdot H_L}{2 \cdot g \cdot t_w \cdot E_c}} = 0.079 \text{ s}$$

$$C_v := \min \left[ \frac{1.25}{\left(\frac{T_v}{1 \cdot s}\right)^2}, \frac{2.75}{s} \right] = 1.833$$

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

$$u_v := Z \cdot S \cdot C_v \cdot I \cdot \frac{b}{R_{wi}} = 0.125$$

### Gaya lateral dinamik

$$P_i := Z \cdot S \cdot C_i \cdot I \cdot \frac{W_i}{R_{wi}} = 5.186 \times 10^6 \text{ N}$$

$$P_c := Z \cdot S \cdot C_c \cdot I \cdot \frac{W_c}{R_{wc}} = 1.951 \times 10^6 \text{ N}$$

$$P_w := Z \cdot S \cdot C_i \cdot I \cdot \frac{\varepsilon \cdot W_w}{R_{wi}} = 8.446 \times 10^5 \text{ N}$$

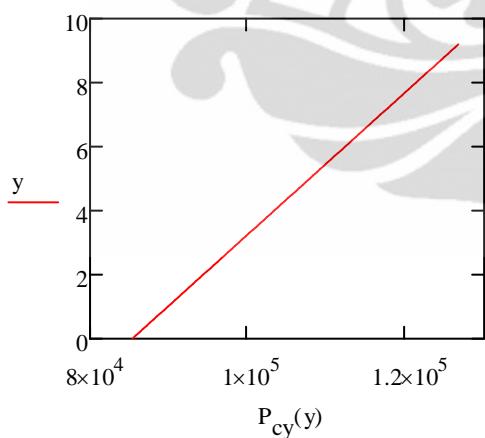
$$P_r := Z \cdot S \cdot C_i \cdot I \cdot \frac{W_r}{R_{wi}} = 3.611 \times 10^5 \text{ N}$$

### Distribusi Gaya Vertikal (Pendekatan Linear)

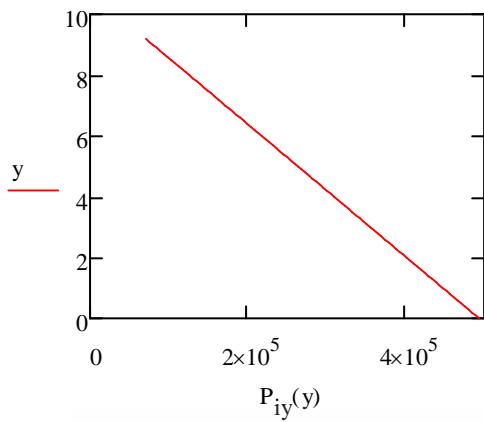
$$P_{wy} := \frac{P_w}{2H_w} = 4.59 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

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

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



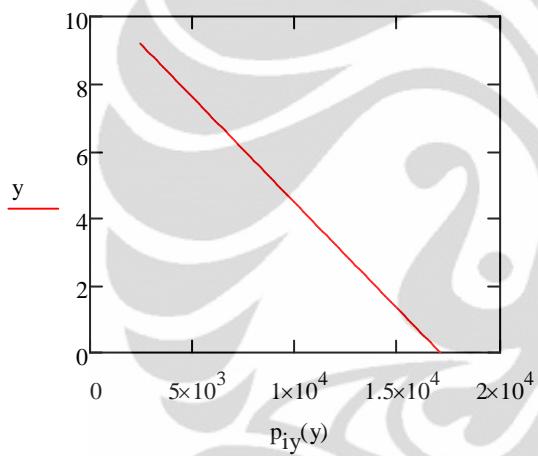
$$P_{iy}(y) := \left( \frac{P_i}{2} \right) \frac{\left[ 4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i) \frac{y}{H_L} \right]}{H_L^2}$$



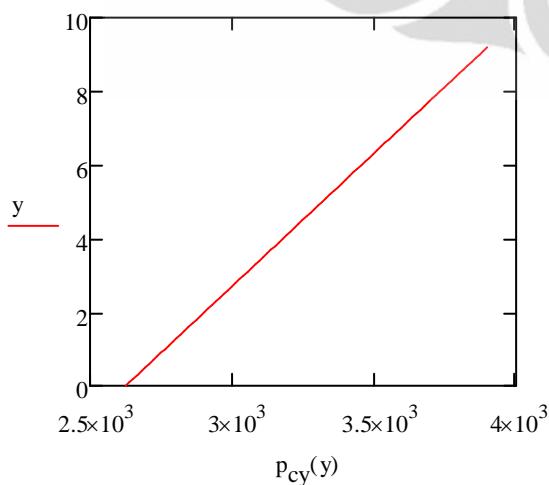
#### Horizontal distribution of the dynamic pressure across the tank diameter D

$$p_{wy} := \frac{P_{wy}}{\pi R} = 794.036 \text{ Pa}$$

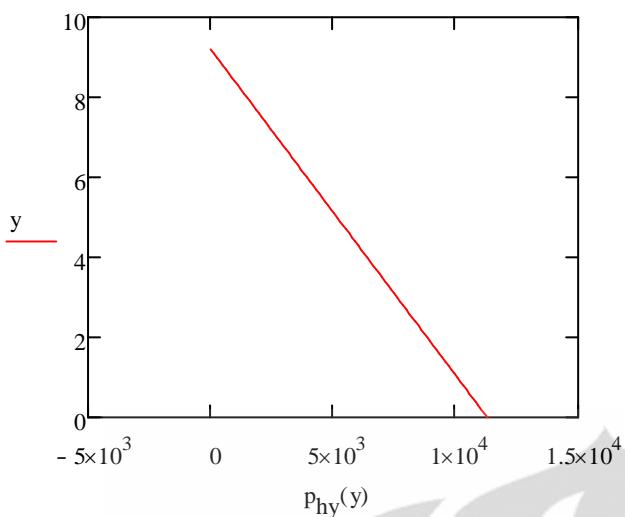
$$p_{iy}(y) := \frac{2 P_{iy}(y)}{\pi R}$$



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

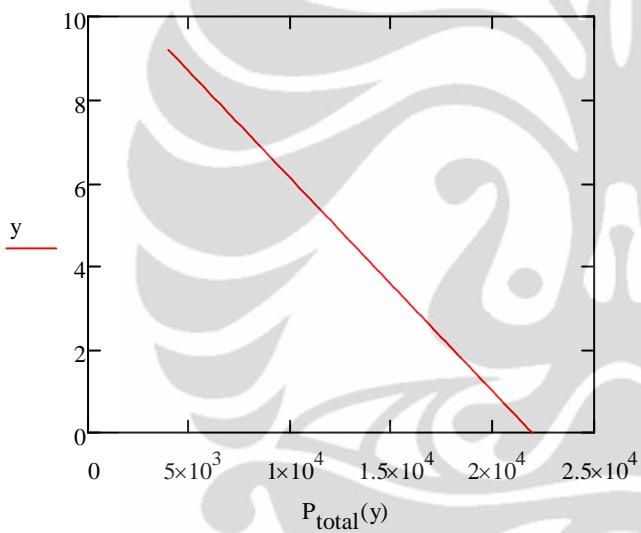


$$p_{hy}(y) := u_v \cdot q_{hy}(y)$$



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

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



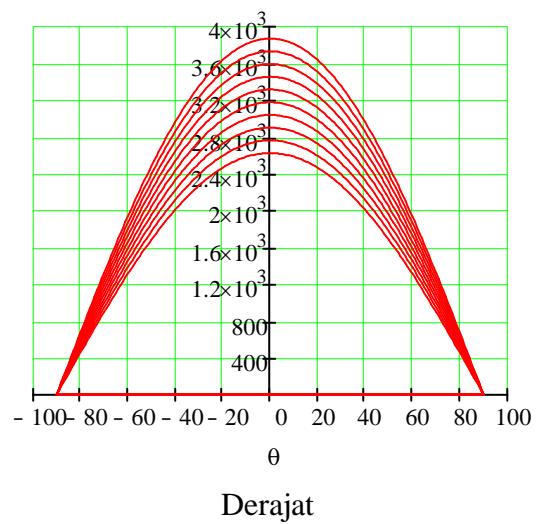
**Pressure berdasarkan fungsi ketinggian dan arah tekanan**

$$\theta := -90, 90$$

$$y := 0 \cdot m, 1 \cdot m, H_L$$

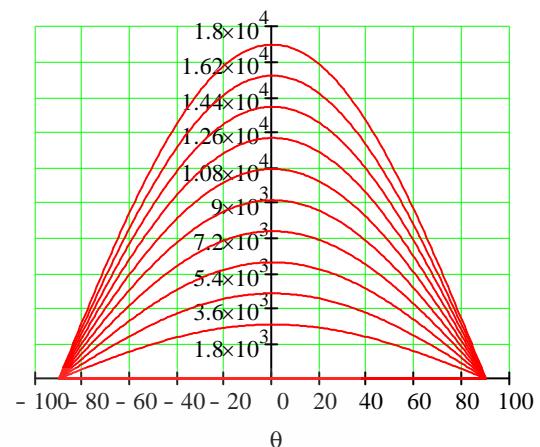
$$p_{cy}(y, \theta) := p_{cy}(y) \cos(\theta \cdot \text{deg})$$

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



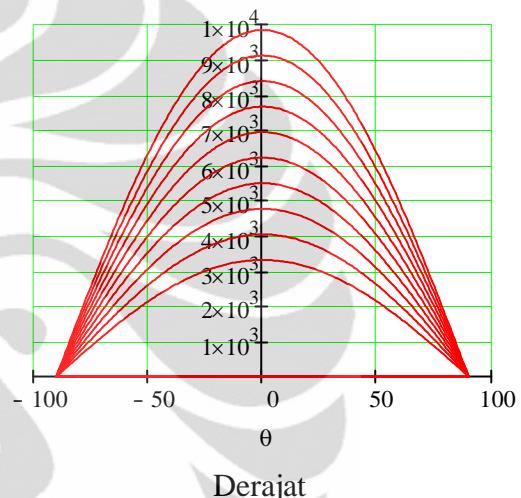
$$p_{iy}(y, \theta) := p_{iy}(y) \cos(\theta \cdot \text{deg})$$

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  $p_{halfwall}(y, \theta)$



### Input Beban pada SAP

#### Distribusi gaya hidrodinamik per elemen

sudut arah gaya hidrodinamik per elemen

$\alpha := 0$ , sudut. 90

$$\text{sudut} := \frac{90 \cdot 4}{\text{Ceil}\left(\frac{\text{keliling}}{\text{m}}, 2\right)} = 3.10345$$

$p_{halfwall}(0m, \alpha)$ · kPa	$p_{halfwall}(1m, \alpha)$ · kPa	$p_{halfwall}(2m, \alpha)$ · kPa	$p_{halfwall}(3m, \alpha)$ · kPa	$p_{halfwall}(4m, \alpha)$ · kPa	$p_{halfwall}(5m, \alpha)$ · kPa	$p_{halfwall}(6m, \alpha)$ · kPa
9.844	9.119	8.393	7.667	6.941	6.216	5.49
9.83	9.105	8.381	7.656	6.931	6.206	5.482
9.787	9.065	8.344	7.622	6.901	6.179	5.458
9.715	8.999	8.282	7.566	6.85	6.134	5.417
9.614	8.905	8.197	7.488	6.779	6.07	5.361
9.486	8.786	8.087	7.388	6.688	5.989	5.29
9.329	8.641	7.954	7.266	6.578	5.89	5.202
9.145	8.471	7.797	7.123	6.448	5.774	5.1
8.935	8.276	7.617	6.958	6.3	5.641	4.982
8.698	8.056	7.415	6.774	6.133	5.491	4.85
8.435	7.813	7.192	6.57	5.948	5.326	4.704
8.148	7.547	6.947	6.346	5.745	5.145	4.544
7.837	7.259	6.682	6.104	5.526	4.948	4.37
7.503	6.95	6.397	5.844	5.29	4.737	4.184
7.147	6.62	6.093	5.566	5.039	4.512	3.986
...	...	...	...	...	...	...

$p_{halfwall}(7m, \alpha) = p_{halfwall}(8m, \alpha)$	$\cdot kPa$	$p_{halfwall}(9m, \alpha) =$	$\cdot kPa$
4.764		4.038	
4.757		4.032	
4.736		4.014	
4.701		3.985	
4.653		3.944	
4.59		3.891	
4.515		3.827	
4.426		3.751	
4.324		3.665	
4.209		3.568	
4.082		3.46	
3.943		3.342	
3.793		3.215	
3.631		3.078	
3.459		2.932	
...		...	

### Distribusi Gaya Inersia Dinding Uniform sepanjang keliling dinding

$$p_{wy} = 794.036 \text{ Pa}$$

### Faktor Pengali gaya hidrostatik akibat percepatan gempa vertikal

$$u_v = 0.125$$

### Total Base Shear

$$V := \sqrt{(P_i + P_w + P_r)^2 + P_c^2} = 6.682 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\text{Ratio\_V/SeismicMass} := \frac{V}{W_w + W_L + W_r} = 6.249\%$$

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

$$p(0) = 2.129 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$q_{hy}(0) = 9.025 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\text{ratio\_hidrodinamik\_hidrostatik} := \frac{p(0)}{q_{hy}(0)} = 23.585\%$$

### Moment at base

#### EBP(Exclude Base Pressure)

$$M_w := P_w \cdot h_w = 3.885 \times 10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_i := P_i \cdot h_i = 1.789 \times 10^7 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_c := P_c \cdot h_c = 9.557 \times 10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

titik tangkap gaya lateral atap berada di  $h_r := H_w$

$$M_r := P_r \cdot h_r = 3.322 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_b := \sqrt{(M_i + M_w + M_r)^2 + M_c^2} = 2.686 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

### IBP(Include Base Pressure)

$$M'_i := P_i \cdot h'_i = 7.683 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M'_c := P_c \cdot h'_c = 2.822 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_o := \sqrt{(M'_i + M_w + M_r)^2 + M'_c^2} = 8.865 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$$

### Tegangan pada $\theta = 0$

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

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

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

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

$$N_{wy} := p_{wy} \cdot R = 1.461 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

### Hydrodynamic membrane (hoop forces)

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

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

Tegangan  $\sigma(y) =$

1.119	· MPa
1.016	
0.913	
0.812	
0.711	
0.612	
0.517	
0.425	
0.343	
0.276	

### Ketinggian sloshing maksimum

$$d_{max} := \frac{D}{2} (Z \cdot S \cdot I \cdot C_c) = 0.56 \text{ m}$$

### Summary Perhitungan

Parameter dari model pegas

### Partisipasi Massa

$$\frac{W_i}{W_L} = 28.812\% \quad \frac{h_i}{H_L} = 0.375$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 66.783\% \quad \frac{h_c}{H_L} = 0.533$$

$$\frac{h'_i}{H_L} = 1.61$$

$$\frac{h'_c}{H_L} = 1.573$$

$$\frac{W_i}{W_L} + \frac{W_c}{W_L} = 95.594\%$$

$$\varepsilon = 49.94\%$$

$$W_i = 2.766 \times 10^7 \text{ N} \quad h_i = 3.45 \text{ m} \quad h'_i = 14.816 \text{ m}$$

$$W_c = 6.411 \times 10^7 \text{ N} \quad h_c = 4.899 \text{ m} \quad h'_c = 14.469 \text{ m}$$

$$\varepsilon \cdot W_w = 4.504 \times 10^6 \text{ N}$$

### Properti Dinamik

$$T_i = 0.285 \text{ s} \quad C_i = 1.833$$

$$T_c = 7.447 \text{ s} \quad C_c = 0.108$$

$$T_v = 0.079 \text{ s} \quad C_v = 1.833$$

### Momen pada dasar dinding dan dasar pelat

$$M_b = 2.686 \times 10^4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_o = 8.865 \times 10^4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

### Gaya geser dasar total

$$V = 6.682 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Rasio}_V/\text{SeismicMass} = 6.249\%$$

$$\text{rasio}_\text{hidrodinamik}_\text{hidrostatis} = 23.585\%$$

### Ketinggian sloshing maksimum

$$d_{\max} = 0.56 \text{ m}$$

**properti tangki**

rasio h:d

$$\text{ratio} := \frac{1}{4}$$

ketinggian

$$h := 4.3 \cdot m$$

diameter

$$D := \frac{h}{\text{ratio}} = 17.2 \text{ m}$$

volume

$$V := \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot h = 999.114 \cdot m^3$$

tebal dinding

$$t := 25 \text{ cm}$$

**properti beton**

Mutu beton

$$f_{c'} := 35 \cdot MPa$$

Tegangan sementara

$$f_{cl'} := 25.9 \cdot MPa$$

Tarik lentur maksimum

$$f_t := 0.7 \sqrt{f_{c'} \cdot MPa} = 4.141 \cdot MPa$$

Tekan aksial

$$f_c := -0.45 \cdot f_{c'} = -15.75 \cdot MPa$$

Tarik residual minimum

$$f_{cv} := 1.55 \cdot MPa = 224.808 \cdot psi$$

**Properti baja prategang**

kuat tarik tendon

$$f_{pu} := 1724 \cdot MPa = 250.045 \cdot ksi$$

Tendon pasca tarik

$$f_{pi} := 0.7 \cdot f_{pu} = 175.032 \cdot ksi$$

Tegangan baja pada kuat nominal

$$f_{ps} := 1517 \cdot MPa = 220.022 \cdot ksi$$

asumsikan terjadi kehilangan prategang 26 persen untuk semua efek jangka panjang

**solusi secara analitis:**

Berat dinding dan efek kubah atap tidak signifikan terhadap tegangan dibandingkan dengan efek dari gaya-gaya prategang vertikal sehingga dapat diabaikan

distribusi tekanan air pada dinding tangki

$$\gamma := 9810 \frac{N}{m^3}$$

$$r := \frac{D}{2} = 8.6 \text{ m}$$

$$P := \gamma \cdot h \cdot r = 3.628 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

**Analisis Gaya Dalam dan Tegangan**

poisson ratio,  $\mu := 0.2$

$$\beta := \frac{\left[ 3 \left( 1 - \mu^2 \right) \right]^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{r \cdot t}} \cdot (1 \text{ m}) = 0.888$$

$$\Phi(x) := e^{-x} \cdot (\cos(x) + \sin(x))$$

$$\Psi(x) := e^{-x} (\cos(x) - \sin(x))$$

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

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

**Momen dan Gaya Cincin pada dasar dengan perletakan jepit penuh**

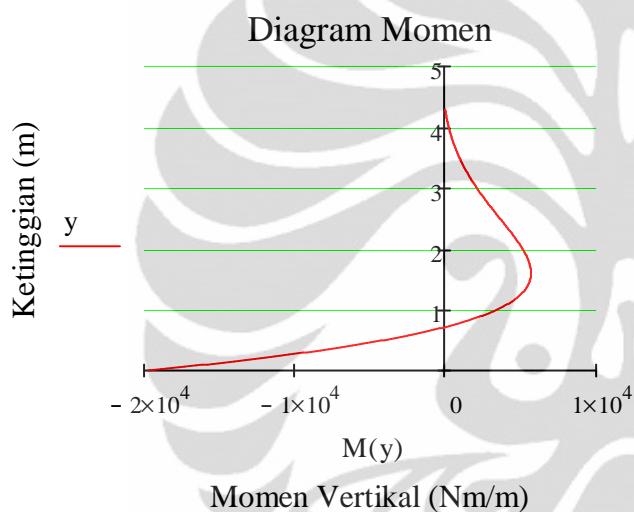
$$M_O := -\left(1 - \frac{1m}{\beta \cdot h}\right) \cdot \frac{\gamma \cdot h \cdot r \cdot t}{\sqrt{12(1 - \mu^2)}} = -1.973 \times 10^4 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$Q_O := \left(2 \cdot \frac{\beta}{1m} \cdot h - 1\right) \cdot \frac{(\gamma \cdot r \cdot t)}{\sqrt{12 \cdot (1 - \mu^2)}} \cdot (1m) = 4.127 \times 10^4 N$$

**Perhitungan gaya momen**

$$y := \left(0, 0.01 \cdot \frac{h}{1m}\right)$$

$$M(y) := \frac{\left[\frac{1}{\beta} \cdot (\beta \cdot M_O \cdot \Phi(\beta \cdot y) + Q_O \cdot \zeta(\beta \cdot y))\right]}{1 \cdot N}$$



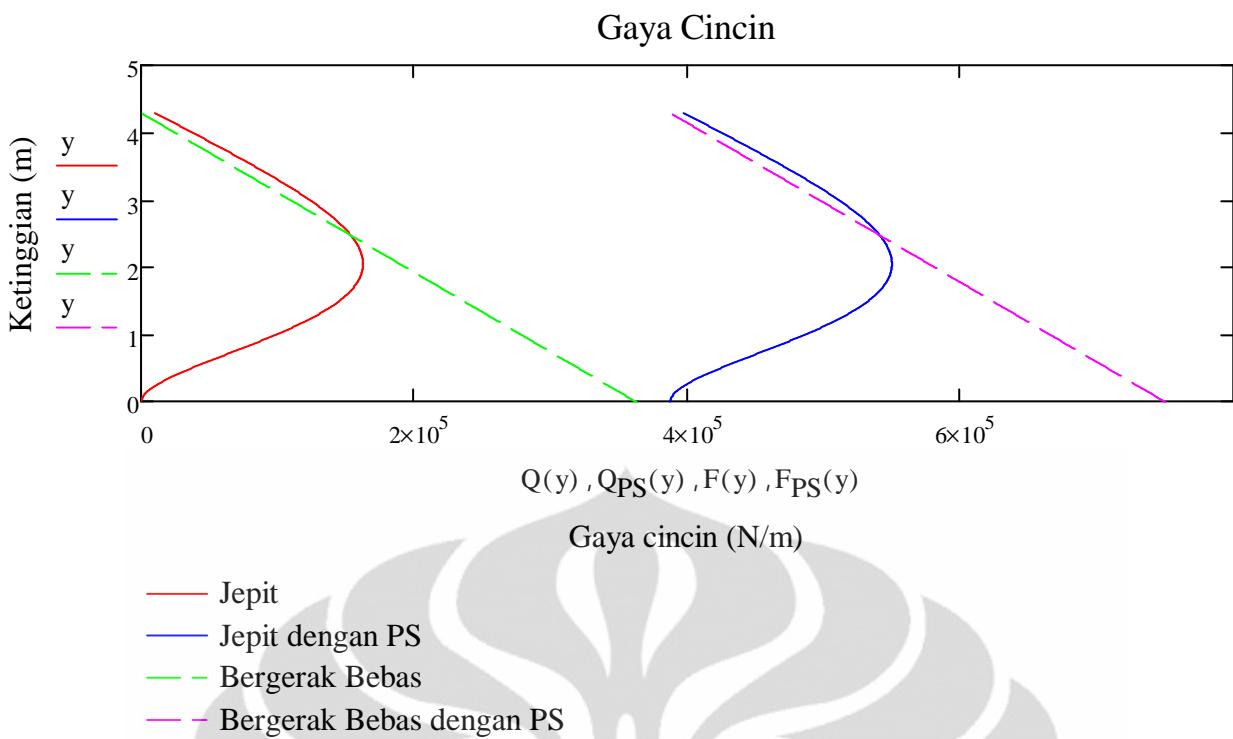
**Perhitungan gaya cincin**

$$F(y) := \gamma \cdot \left(\frac{h}{1m} - y\right) \cdot r \quad F_{PS}(y) := F(y) + f_{cv} \cdot \frac{t}{1m}$$

$$\Delta Q(y) := 6 \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{\beta^3 \cdot (r \cdot t)^2} \cdot (\beta \cdot M_O \cdot \Psi(\beta \cdot y) + Q_O \cdot \theta(\beta \cdot y))$$

$$Q(y) := \frac{(F(y) - \Delta Q(y) \cdot 1m)}{1 \cdot Pa}$$

$$Q_{PS}(y) := \frac{(F_{PS}(y) - \Delta Q(y) \cdot 1m)}{1 \cdot Pa}$$



$$F_{\max} := \text{MaxOffFunc}\left(Q, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot \frac{N}{m} = 1.624 \times 10^5 \frac{N}{m}$$

$$M_y := \text{MaxOffFunc}\left(M, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot N = 5.669 \times 10^3 \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_o = -1.973 \times 10^4 \frac{N \cdot m}{m}$$

**Efek prategang menggunakan tekanan residual 225 psi**

#### Gaya cincin

$$Q_{\max} := F_{\max} + f_{cv} \cdot t = 5.499 \times 10^5 \frac{N}{m}$$

$$Q_{\max} = 5.499 \times 10^5 \frac{N}{m}$$

#### Momen

$$M_{1y} := M_y \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 1.92 \times 10^4 \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_{1o} := M_o \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = -6.68 \times 10^4 \frac{N \cdot m}{m}$$

#### Pengecekan tegangan maksimum di dinding pada momen maksimum

$$S := \frac{1}{6} \cdot (1m) \cdot t^2 = 0.01 \cdot m^3$$

dengan menggunakan prategang vertikal eksentris

$$P_v := 500 \frac{kN}{m} \quad e := 1 \cdot in$$

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{pshorizontal} := \frac{M_{1y} \cdot (1m)}{S} = 1.843 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{cairan} := \frac{M_y}{S} \cdot (1m) = 5.442 \times 10^5 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{psvertikal} := \frac{P_v}{t} = 2 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenpsvertikal} := \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1m) = 1.219 \times 10^6 \text{ Pa}$$

**tegangan tekan waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tekan} := -f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -5.062 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tekan} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tarik} := f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} + f_{momenpsvertikal} = 1.062 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tarik} < f_t, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{penuh} := -f_{pshorizontal} + f_{cairan} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -4.518 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{penuh} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**Pengecekan tegangan maksimum di dasar dinding pada dasar jepit penuh**

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{pshorizontal} := \frac{M_{1O} \cdot (1m)}{S} = -6.413 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{cairan} := \frac{M_O}{S} \cdot (1m) = -1.894 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{psvertikal} := \frac{P_v}{t} = 2 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenpsvertikal} := \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1m) = 1.219 \times 10^6 \text{ Pa}$$

### tegangan tekan waktu tangki kosong

$$f_{\text{kosong\_tekan}} := f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = -7.193 \cdot \text{MPa}$$

if  $(f_{\text{kosong\_tekan}} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$

### tegangan tarik waktu tangki kosong

$$f_{\text{kosong\_tarik}} := -f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = 3.193 \cdot \text{MPa}$$

if  $(f_{\text{kosong\_tarik}} < f_t, "OK", "Tidak OK") = "OK"$

### tegangan waktu tangki penuh

$$f_{\text{penuh}} := f_{\text{pshorizontal}} + f_{\text{cairan}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = -9.087 \cdot \text{MPa}$$

if  $(f_{\text{penuh}} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$

### Momen dan Gaya Cincin pada dasar dengan perletakan sendi

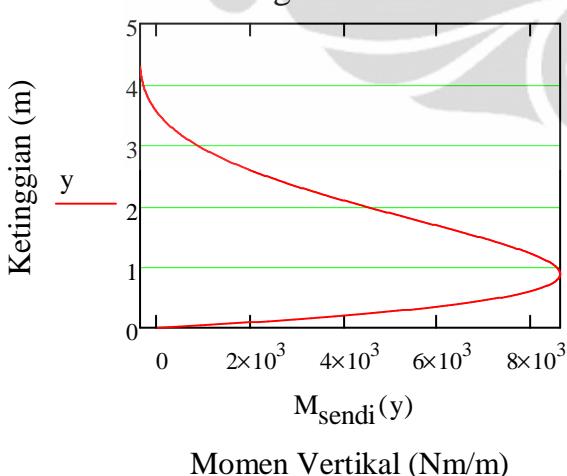
$$M_{\text{osendi}} := 0 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$Q_{\text{osendi}} := \frac{(\gamma \cdot h) \cdot (1m)}{\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{r \cdot t}{2} \right)^2} \cdot \left[ \frac{1}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \right]^4 = 2.374 \times 10^4 \cdot N$$

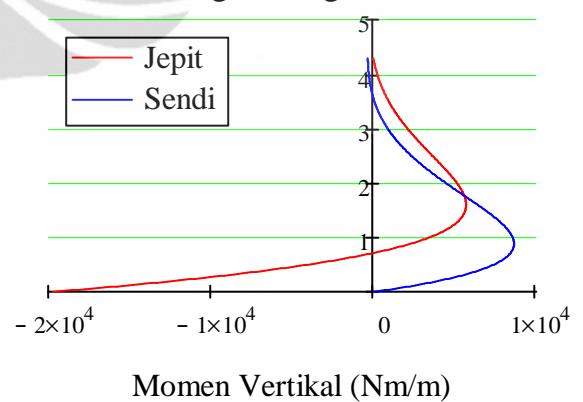
### Perhitungan gaya momen

$$M_{\text{sendi}}(y) := \frac{\left[ \frac{1}{\beta} \cdot (\beta \cdot M_{\text{osendi}} \cdot \Phi(\beta \cdot y) + Q_{\text{osendi}} \cdot \zeta(\beta \cdot y)) \right]}{1 \cdot N}$$

Diagram Momen



Perbandingan Diagram Momen

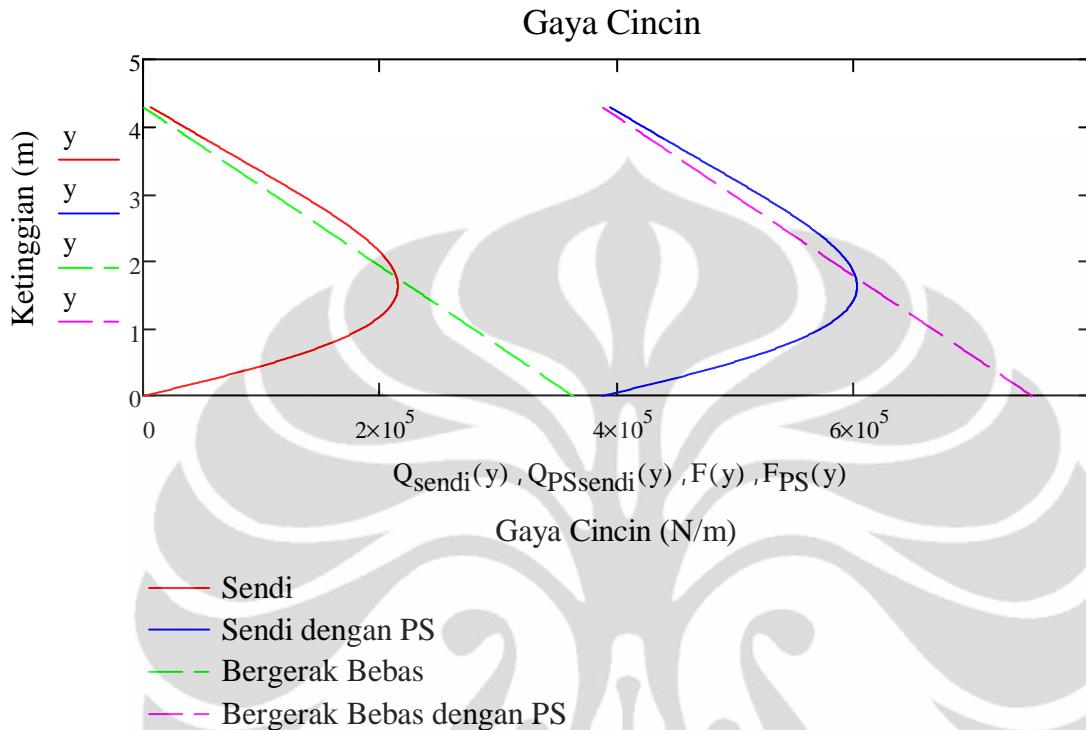


### Perhitungan gaya cincin

$$\Delta Q_{\text{sendi}}(y) := 6 \cdot \frac{\left( 1 - \mu^2 \right)}{\beta^3 \cdot (r \cdot t)^2} \cdot \left( \beta \cdot M_{\text{osendi}} \cdot \Psi(\beta \cdot y) + Q_{\text{osendi}} \cdot \theta(\beta \cdot y) \right)$$

$$Q_{\text{sendi}}(y) := \frac{(F(y) - \Delta Q_{\text{sendi}}(y) \cdot 1 \cdot m)}{1 \text{Pa}}$$

$$Q_{\text{PSsendi}}(y) := \frac{(F_{\text{PS}}(y) - \Delta Q_{\text{sendi}}(y) \cdot 1 \cdot m)}{1 \text{Pa}}$$



$$F_{\max} := \text{MaxOfFunc}\left(Q_{\text{sendi}}, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot \frac{N}{m} = 2.148 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

$$M_y := \text{MaxOfFunc}\left(M_{\text{sendi}}, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot N = 8.613 \times 10^3 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$M_{osendi} = 0$$

**Efek prategang menggunakan tekanan residual 225 psi**

**Gaya cincin**

$$Q_{\max} := F_{\max} + f_{cv} \cdot t = 6.023 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

$$Q_{\max} = 6.023 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

**Momen**

$$M_{1y} := M_y \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 2.415 \times 10^4 \cdot \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_{1o} := M_{osendi} \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 0 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

## Pengecekan tegangan maksimum di dinding pada momen maksimum

$$S := \frac{1}{6} \cdot (1\text{m}) \cdot t^2 = 0.01 \cdot \text{m}^3$$

dengan menggunakan prategang vertikal eksentris

$$P_V = 500 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$e := 0$$

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{pshorizontal} := \frac{M_{1y} \cdot (1\text{m})}{S} = 2.318 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{cairan} := \frac{M_y}{S} \cdot (1\text{m}) = 8.269 \times 10^5 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{psvertikal} := \frac{P_V}{t} = 2 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenpsvertikal} := \frac{(P_V \cdot e)}{S} \cdot (1\text{m}) = 0$$

tegangan tekan waktu tangki kosong

$$f_{kosong\_tekan} := -f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -4.318 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tekan} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

tegangan tarik waktu tangki kosong

$$f_{kosong\_tarik} := f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} + f_{momenpsvertikal} = 0.318 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tarik} < f_t, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

tegangan waktu tangki penuh

$$f_{penuh} := -f_{pshorizontal} + f_{cairan} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -3.492 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{penuh} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

## Pengecekan tegangan di dasar dinding pada dasar sendi

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{pshorizontal} := \frac{M_{1o} \cdot (1\text{m})}{S} = 0$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{cairan} := \frac{M_{osendi}}{S} \cdot (1\text{m}) = 0$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{ps\text{vertikal}} : = \frac{P_v}{t} = 2 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenps\text{vertikal}} : = \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1\text{m}) = 0$$

**tegangan tekan waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tekan} : = -f_{p\text{horizontal}} - f_{ps\text{vertikal}} - f_{momenps\text{vertikal}} = -2 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tekan} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tarik} : = f_{p\text{horizontal}} - f_{ps\text{vertikal}} + f_{momenps\text{vertikal}} = -2 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tarik} < f_t, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{penuh} : = -f_{p\text{horizontal}} + f_{cairan} - f_{ps\text{vertikal}} - f_{momenps\text{vertikal}} = -2 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{penuh} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

## Desain baja penulangan prategang

### Prestressing horizontal

$$h = 4.3 \text{ m}$$

$$r = 8.6 \text{ m}$$

$$k := 1 \text{ m}$$

$$\gamma = 9.81 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$t = 0.25 \text{ m}$$

$$f_R := f_{cv}$$

$$p := f_R \cdot \frac{t}{r} = 45.058 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$Z := 0 \cdot \text{m}, k \cdot h$$

$$f_{pu} = 250.045 \cdot \text{ksi}$$

$$y := 0, \frac{k}{m} \cdot \frac{h}{m}$$

luas tendon yang digunakan

$$\text{tendon - 7 wire strand K250 } \phi_1 := \frac{1}{2} \cdot \text{in}$$

$$A_{\text{tendon}} := 1 \cdot 0.144 \cdot \text{in}^2 = 92.903 \cdot \text{mm}^2$$

$$\text{hilang} := 26\%$$

Perletakan dapat bergerak bebas

$$F_R(y) := F_{PS}(y) \cdot 1 \text{ m}$$

$$f_{pi} := 0.7 f_{pu} = 1.207 \times 10^9 \text{ Pa}$$

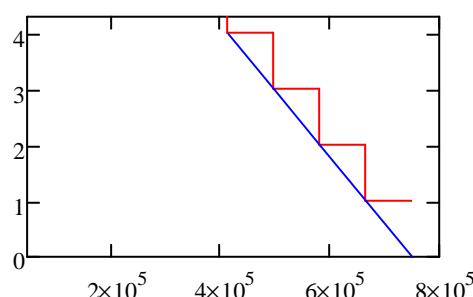
$$f_{pe} := (1 - \text{hilang}) \cdot f_{pi} = 893.032 \cdot \text{MPa}$$

$$A_{ps}(y) := \frac{F_R(y)}{f_{pe}} \quad \text{per meter tinggi}$$

$$A_{ps}(y) =$$

840.142	$\cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
745.671	
651.199	
556.728	
462.256	

Distribusi Gaya Prategang

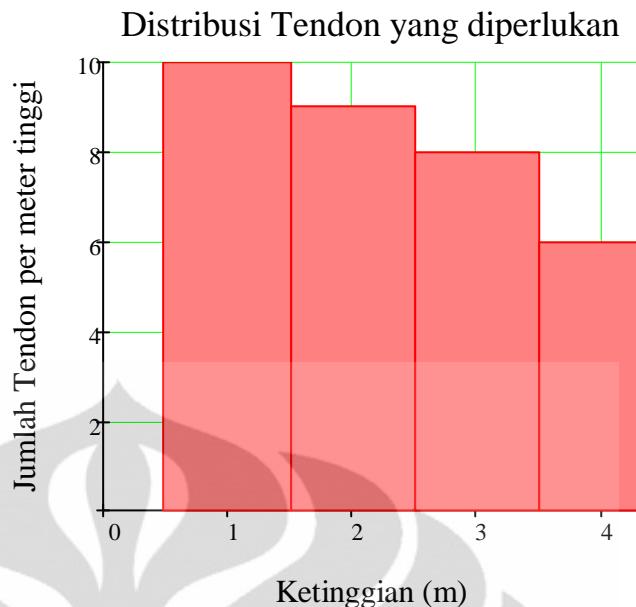


Jumlah tendon yang diperlukan per 1 meter tinggi

$$n(y) := \text{Ceil} \left[ \frac{(A_{ps}(y) \cdot 1 \text{ m})}{A_{\text{tendon}}} , 1 \right]$$

$$spasi(y) := \frac{k}{n(y)}$$

$y =$	$n(y) =$	$spasi(y) =$
0	10	100
1	9	111.111
2	8	125
3	6	166.667
4	5	200



**Prategang vertikal**  
Memakai strand 7 kawat

$$P_V = 5 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

eksentrисitas

$$e = 0$$

$$A_{tendon} = 0.144 \cdot in^2$$

$$f_{pu} = 1.724 \times 10^9 Pa$$

$$f_{pi} = 1.207 \times 10^9 Pa$$

$$f_{pe} := 0.74 \cdot f_{pi} = 893.032 \cdot MPa$$

banyaknya strands vertikal per 1 m keliling

$$luasstrand := \frac{P_V}{f_{pe}} = 559.89 \cdot \frac{mm^2}{m}$$

$$jumlahstrand := \frac{luasstrand}{A_{tendon}} \cdot (1 \cdot m) = 6.027$$

spasi strand vertikal

$$s_2 := \frac{1 \cdot m}{jumlahstrand} = 165.931 \cdot mm$$

asumsi spasi horizontal

$$s_1 := 100 \cdot mm$$

### Pengecekan kuat momen nominal terhadap dinding tangki

momen maksimum

$$M_y = 8.613 \times 10^3 N$$

faktor keamanan

$$SF := 1.3$$

Momen Ultimate

$$M_u := SF \cdot M_y = 1.12 \times 10^4 N$$

Momen nominal

$$M_n := \frac{M_u}{0.9} = 1.244 \times 10^4 N$$

$$d := \frac{t}{2} + e = 0.125 m$$

$$A_{ps} := \frac{A_{tendon}}{\left( \frac{1 \cdot m}{\text{jumlahstrand}} \right)} = 559.89 \cdot \frac{mm^2}{m}$$

$$a := \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0.85 \cdot f_c'} = 0.029 \text{ m}$$

momen tersedia  $M_n := A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = 9.404 \times 10^4 \text{ N}$

momen diperlukan  $M_n = 1.244 \times 10^4 \text{ N}$

**Pengecekan momen nominal** if  $(M_n > M_n, "OK", "Tidak OK") = "OK"$

#### Kontrol retak di dinding tangki beton

modulus elastisitas tendon  $E_{ps} := 28000000 \cdot \text{psi} = 1.931 \times 10^5 \cdot \text{MPa}$

tebal shortcrete  $t_b := 5 \cdot \text{cm}$

Parameter tegangan  $\alpha_t := \frac{f_{ps}}{f_{pi}} = 1.257$

Regangan tarik  $\varepsilon_{ct} := \frac{(\alpha_t \cdot f_{pi})}{E_{ps}} = 7.858 \times 10^{-3}$

Indeks grid  $I_x := \frac{8}{\pi} \frac{(s_2 \cdot s_1 \cdot t_b)}{\phi_1} = 0.166 \text{ m}^2$

lebar retak maksimum  $w_{maks} := 4.1 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_{ct} \cdot \frac{E_{ps}}{\text{MPa}} \cdot \sqrt{I_x} = 2.537 \cdot \text{mm}$

## Desain balok cincin tepi prategang untuk kubah atap

### input variabel

berat jenis beton

$$\gamma_{\text{beton}} := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

diameter

$$D = 17.2 \text{ m}$$

tinggi kubah

$$h' := \frac{1}{8} \cdot D = 2.15 \text{ m}$$

sudut cangkang (derajat)

$$\phi := 18^\circ$$

radius cangkang

$$r_{\text{atap}} := \frac{D}{2 \sin(\phi)} = 27.83 \text{ m}$$

mutu beton

$$f'_c = 35 \cdot \text{MPa}$$

modulus elastisitas beton

$$E_c := 4700 \cdot \sqrt{f'_c \cdot \text{MPa}} = 2.781 \times 10^4 \cdot \text{MPa}$$

tebal cangkang

$$t_{\text{atap}} := 7.5 \cdot \text{cm}$$

$$w_D := \gamma_{\text{beton}} \cdot t_{\text{atap}} = 1.8 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_L := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$P_u := 1.2 \cdot w_D + 1.6 \cdot w_L = 3.76 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\phi := 0.7$$

$$r_i := 1.4 \cdot r_{\text{atap}}$$

$$\beta_i := \left( \frac{r_{\text{atap}}}{r_i} \right)^2 \quad \beta_i = 0.51$$

$$\beta_c := \min \left[ \left( 0.44 + 0.003 \cdot \frac{w_L}{\text{kPa}} \right), 0.53 \right] \quad \beta_c = 0.443$$

$$h_{\text{minimal}} := r_{\text{atap}} \cdot \sqrt{\frac{1.5 \cdot P_u}{\phi \cdot \beta_i \cdot \beta_c \cdot E_c}} = 31.511 \cdot \text{mm}$$

### Pengecekan

$$\text{cek}_{\text{atap}} := \text{if} \left( h_{\text{minimal}} < t_{\text{atap}}, \text{"OK"}, \text{"TIDAK OK"} \right) = \text{"OK"}$$

### gaya tangensial per panjang satuan keliling

$$N_\theta := \frac{w_D \cdot D}{2 \sin(\phi)} \left( \frac{1}{1 + \cos(\phi)} - \cos(\phi) \right) - w_L \cdot \frac{D}{4 \cdot \sin(\phi)} \cdot \cos(2 \cdot \phi) = -5.898 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### gaya meridional per panjang satuan keliling

$$N_{\phi} := \left[ -r_{atap} \cdot \left( \frac{w_D}{1 + \cos(\phi)} + \frac{w_L}{2} \right) \right] = -42.3 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$P_{radial} := \left( \frac{b_{beam} \cdot h_{beam}}{t} \right) (N_{\theta} - \mu \cdot N_{\phi}) + \frac{D}{2} (N_{\phi} \cdot \cos(\phi))$$

karena suku pertama nilainya kurang dari 10%, maka dapat dilakukan iterasi untuk memperoleh nilai luas "bh"

$$p := \frac{D}{2} (N_{\phi} \cdot \cos(\phi)) = -2.782 \times 10^5 N$$

dengan mengasumsikan kehilangan prategang

$$\text{hilang} = 26\%$$

$$p_i := \frac{-p}{1 - \text{hilang}} = 3.76 \times 10^5 N$$

$$f_c := \min(0.2 \cdot f_c', 800 \text{ psi}) = 5.516 \cdot \text{MPa}$$

$$A_c := \frac{p_i}{f_c} = 681.658 \cdot \text{cm}^2$$

ambil dimensi balok

$$b_{beam} := 35 \text{ cm}$$

$$h_{beam} := 35 \text{ cm}$$

$$A_{beam} := b_{beam} \cdot h_{beam} = 1.225 \times 10^3 \cdot \text{cm}^2 \quad \text{if } (A_{beam} > A_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

$$P_{radial} := \left( \frac{b_{beam} \cdot h_{beam}}{t_{atap}} \right) (N_{\theta} - \mu \cdot N_{\phi}) + \frac{D}{2} (N_{\phi} \cdot \cos(\phi)) = -2.74 \times 10^5 N$$

Gunakan

$$P_i := \frac{-P_{radial}}{1 - \text{hilang}} = 370.334 \cdot \text{kN}$$

$$f_{pi} = 175.032 \cdot \text{ksi}$$

$$A_{ps\_atap} := \frac{P_i}{f_{pi}} = 306.873 \cdot \text{mm}^2$$

$$\text{banyakstrands} := \frac{A_{ps\_atap}}{A_{tendon}} = 3.303$$

Ambil jumlah strand sebanyak  $\text{ceil}(\text{banyakstrands}) = 4$

pengecekan tegangan penampang kritis

$$N_{\phi} = -4.23 \times 10^4 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$f := \frac{-N_{\phi}}{t_{atap}} = 0.564 \cdot \text{MPa}$$

Pengecekan if ( $f < f_c, "OK", "Tidak OK"$ ) = "OK"



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

**Momen dan Gaya Cincin pada dasar dengan perletakan jepit penuh**

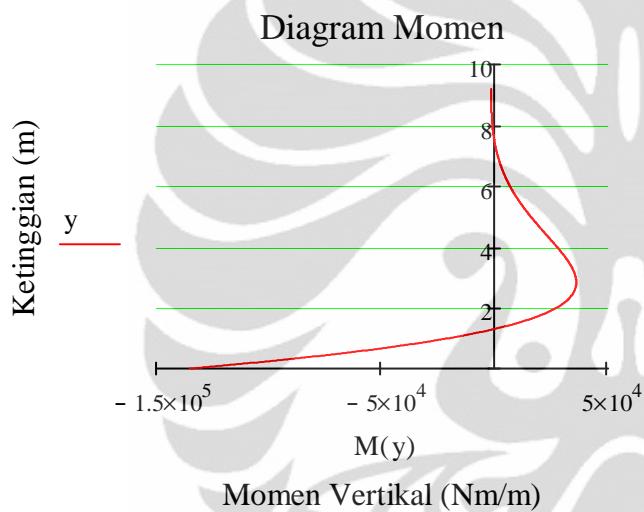
$$M_O := -\left(1 - \frac{1m}{\beta \cdot h}\right) \cdot \frac{\gamma \cdot h \cdot r \cdot t}{\sqrt{12(1 - \mu^2)}} = -1.35 \times 10^5 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$Q_O := \left(2 \cdot \frac{\beta}{1m} \cdot h - 1\right) \cdot \frac{(\gamma \cdot r \cdot t)}{\sqrt{12 \cdot (1 - \mu^2)}} \cdot (1m) = 1.572 \times 10^5 N$$

**Perhitungan gaya momen**

$$y := \left(0, 0.01 \cdot \frac{h}{1m}\right)$$

$$M(y) := \frac{\left[\frac{1}{\beta} \cdot (\beta \cdot M_O \cdot \Phi(\beta \cdot y) + Q_O \cdot \zeta(\beta \cdot y))\right]}{1 \cdot N}$$



**Perhitungan gaya cincin**

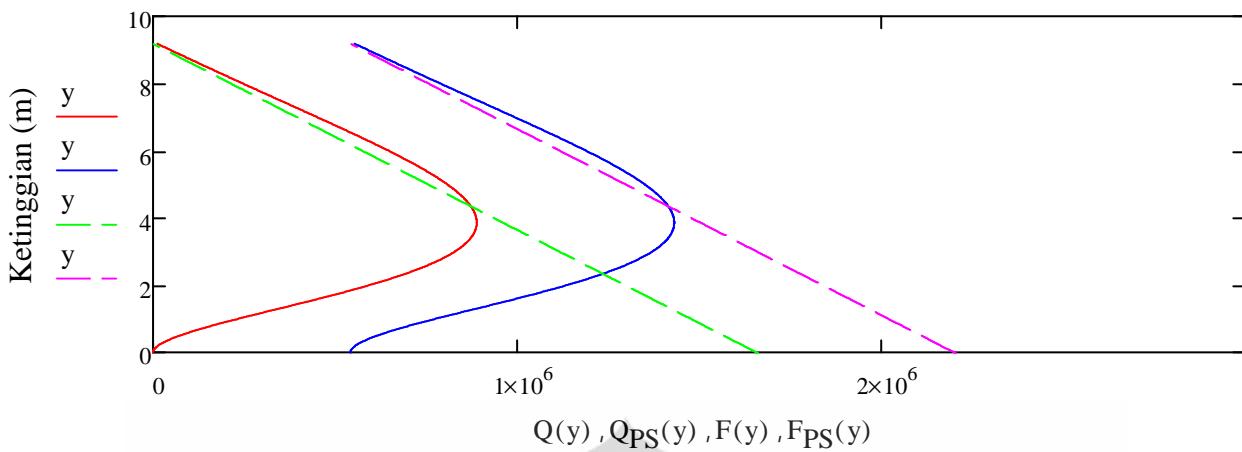
$$F(y) := \gamma \cdot \left(\frac{h}{1m} - y\right) \cdot r \quad F_{PS}(y) := F(y) + f_{cv} \cdot \frac{t}{1m}$$

$$\Delta Q(y) := 6 \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{\beta^3 \cdot (r \cdot t)^2} \cdot (\beta \cdot M_O \cdot \Psi(\beta \cdot y) + Q_O \cdot \theta(\beta \cdot y))$$

$$Q(y) := \frac{(F(y) - \Delta Q(y) \cdot 1m)}{1 \cdot Pa}$$

$$Q_{PS}(y) := \frac{(F_{PS}(y) - \Delta Q(y) \cdot 1m)}{1 \cdot Pa}$$

## Gaya Cincin



Gaya cincin (N/m)

- Jepit
- Jepit dengan PS
- - Bergerak Bebas
- - Bergerak Bebas dengan PS

$$F_{\max} := \text{MaxOffFunc}\left(Q, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot \frac{N}{m} = 8.898 \times 10^5 \frac{N}{m}$$

$$M_y := \text{MaxOffFunc}\left(M, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot N = 3.604 \times 10^4 \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_O = -1.35 \times 10^5 \frac{N \cdot m}{m}$$

Efek prategang menggunakan tekanan residual 225 psi

### Gaya cincin

$$Q_{\max} := F_{\max} + f_{cv} \cdot t = 1.432 \times 10^6 \frac{N}{m}$$

$$Q_{\max} = 1.432 \times 10^6 \frac{N}{m}$$

### Momen

$$M_{1y} := M_y \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 5.802 \times 10^4 \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_{1O} := M_O \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = -2.173 \times 10^5 \frac{N \cdot m}{m}$$

### Pengecekan tegangan maksimum di dinding pada momen maksimum

$$S := \frac{1}{6} \cdot (1m) \cdot t^2 = 0.02 \cdot m^3$$

dengan menggunakan prategang vertikal eksentris

$$P_V := 1500 \frac{kN}{m} \quad e := 4 \cdot cm$$

$$200000 \frac{lb}{ft} \cdot g = 2.919 \times 10^3 \frac{kN}{m}$$

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{\text{pshorizontal}} : = \frac{M_{1y} \cdot (1m)}{S} = 2.842 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{\text{cairan}} : = \frac{M_y}{S} \cdot (1m) = 1.765 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{\text{psvertikal}} : = \frac{P_v}{t} = 4.286 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{\text{momenpsvertikal}} : = \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1m) = 2.939 \times 10^6 \text{ Pa}$$

**tegangan tekan waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tekan}} : = -f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = -10.066 \text{ MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tekan}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tarik}} : = f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = 1.495 \text{ MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tarik}} < f_t, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{\text{penuh}} : = -f_{\text{pshorizontal}} + f_{\text{cairan}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = -8.301 \text{ MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{penuh}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**Pengecekan tegangan maksimum di dasar dinding pada dasar jepit penuh**

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{\text{pshorizontal}} : = \frac{M_{1O} \cdot (1m)}{S} = -1.064 \times 10^7 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{\text{cairan}} : = \frac{M_O}{S} \cdot (1m) = -6.612 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{\text{psvertikal}} : = \frac{P_v}{t} = 4.286 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{\text{momenpsvertikal}} : = \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1m) = 2.939 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$f_{\text{kosong\_tekan}} := f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = -11.989 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tekan}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tarik}} := -f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = 3.418 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tarik}} < f_t, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{\text{penuh}} := f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{cairan}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = -5.378 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{penuh}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

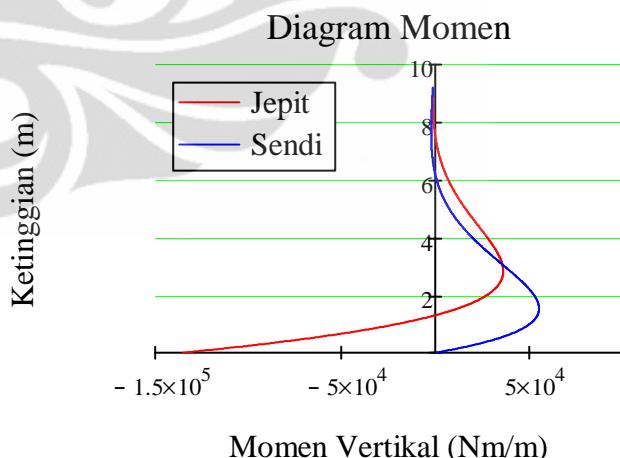
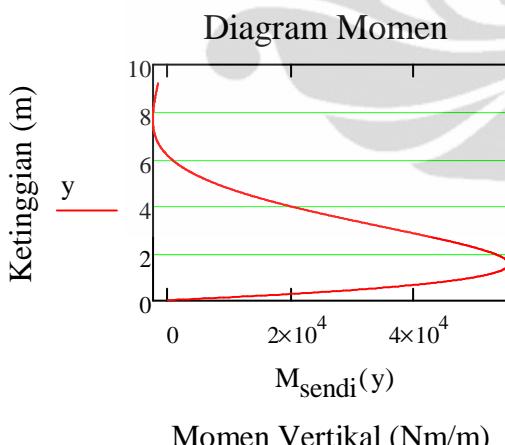
**Momen dan Gaya Cincin pada dasar dengan perletakan sendi**

$$M_{\text{osendi}} := 0 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$Q_{\text{osendi}} := \frac{(\gamma \cdot h) \cdot (1m)}{\left[ 12 \cdot (1 - \mu^2) \right]^4} \cdot \left( \frac{r \cdot t}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = 8.791 \times 10^4 \cdot N$$

**Perhitungan gaya momen**

$$M_{\text{sendi}}(y) := \frac{\left[ \frac{1}{\beta} \cdot (\beta \cdot M_{\text{osendi}} \cdot \Phi(\beta \cdot y) + Q_{\text{osendi}} \cdot \zeta(\beta \cdot y)) \right]}{1 \cdot N}$$

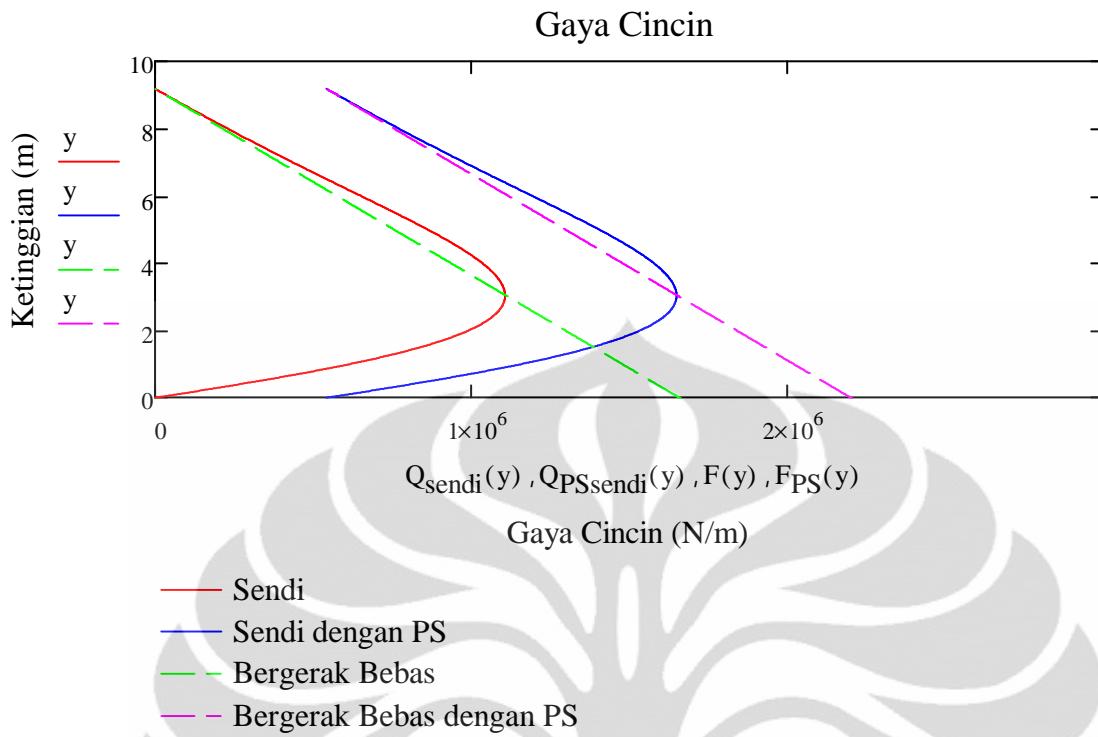


**Perhitungan gaya cincin**

$$\Delta Q_{\text{sendi}}(y) := 6 \cdot \frac{\left( 1 - \mu^2 \right)}{\beta^3 \cdot (r \cdot t)^2} \cdot \left( \beta \cdot M_{\text{osendi}} \cdot \Psi(\beta \cdot y) + Q_{\text{osendi}} \cdot \theta(\beta \cdot y) \right)$$

$$Q_{\text{sendi}}(y) := \frac{(F(y) - \Delta Q_{\text{sendi}}(y) \cdot 1 \cdot m)}{1 \text{Pa}}$$

$$Q_{PSsendi}(y) := \frac{(F_{PS}(y) - \Delta Q_{sendi}(y) \cdot 1 \cdot m)}{1 \text{ Pa}}$$



$$F_{\max} := \text{MaxOfFunc}\left(Q_{\text{sendi}}, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot \frac{N}{m} = 1.108 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

$$M_y := \text{MaxOfFunc}\left(M_{\text{sendi}}, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot N = 5.518 \times 10^4 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$M_{osendi} = 0$$

**Efek prategang menggunakan tekanan residual 225 psi**

**Gaya cincin**

$$Q_{\max} := F_{\max} + f_{cv} \cdot t = 1.651 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

$$Q_{\max} = 1.651 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

**Momen**

$$M_{1y} := M_y \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 8.219 \times 10^4 \cdot \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_{1o} := M_{osendi} \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 0 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

**Pengecekan tegangan maksimum di dinding pada momen maksimum**

$$S := \frac{1}{6} \cdot (1m) \cdot t^2 = 0.02 \cdot m^3$$

dengan menggunakan prategang vertikal eksentris

$$P_v := 750 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

e : = 3 · cm

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{\text{pshorizontal}} := \frac{M_{1y} \cdot (1\text{m})}{S} = 4.026 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{\text{cairan}} := \frac{M_y}{S} \cdot (1\text{m}) = 2.703 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{\text{psvertikal}} := \frac{P_v}{t} = 2.143 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{\text{momenpsvertikal}} := \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1\text{m}) = 1.102 \times 10^6 \text{ Pa}$$

**tegangan tekan waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tekan}} := -f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = -7.271 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tekan}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tarik}} := f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = 2.985 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tarik}} < f_t, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{\text{penuh}} := -f_{\text{pshorizontal}} + f_{\text{cairan}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = -4.568 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{penuh}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

### Pengecekan tegangan di dasar dinding pada dasar sendi

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{\text{pshorizontal}} := \frac{M_{1o} \cdot (1\text{m})}{S} = 0$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{\text{cairan}} := \frac{M_{osendi}}{S} \cdot (1\text{m}) = 0$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{\text{psvertikal}} := \frac{P_v}{t} = 2.143 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenpsvertikal} : = \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1\text{m}) = 1.102 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan tekan waktu tangki kosong

$$f_{kosong\_tekan} : = -f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -3.245 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tekan} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

tegangan tarik waktu tangki kosong

$$f_{kosong\_tarik} : = f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} + f_{momenpsvertikal} = -1.041 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tarik} < f_t, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

tegangan waktu tangki penuh

$$f_{penuh} : = -f_{pshorizontal} + f_{cairan} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -3.245 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{penuh} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

## Desain baja penulangan prategang

### Prestressing horizontal

$$h = 9.2 \text{ m}$$

$$r = 18.4 \text{ m}$$

$$k := 1 \text{ m}$$

$$\gamma = 9.81 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$t = 0.35 \text{ m}$$

$$f_R := f_{cv}$$

$$p := f_R \cdot \frac{t}{r} = 29.484 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$Z := 0 \cdot m, k \cdot h$$

$$f_{pu} := 250 \text{ ksi}$$

### luas tendon yang digunakan

pakai tendon 10 - 7 wire strand K250  $\phi_1 := 0.25 \text{ in}$

$$A_{\text{tendon}} := 10 \cdot 0.036 \cdot \text{in}^2 = 232.258 \cdot \text{mm}^2$$

$$\text{hilang} := 26\%$$

### Perletakan dapat bergerak bebas

$$F_R(y) := F_{PS}(y) \cdot 1 \text{ m}$$

$$f_{pi} := 0.7 f_{pu} = 1.207 \times 10^9 \text{ Pa}$$

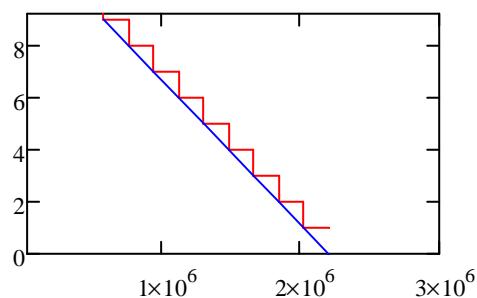
$$f_{pe} := (1 - \text{hilang}) \cdot f_{pi} = 892.871 \cdot \text{MPa}$$

$$A_{ps}(y) := \frac{F_R(y)}{f_{pe}} \quad \text{per meter tinggi}$$

$$A_{ps}(y) =$$

$2.467 \cdot 10^3$	$\cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
$2.265 \cdot 10^3$	
$2.063 \cdot 10^3$	
$1.861 \cdot 10^3$	
$1.659 \cdot 10^3$	
$1.457 \cdot 10^3$	
$1.255 \cdot 10^3$	
$1.052 \cdot 10^3$	
$850.184$	
$648.023$	

Distribusi Gaya Prategang



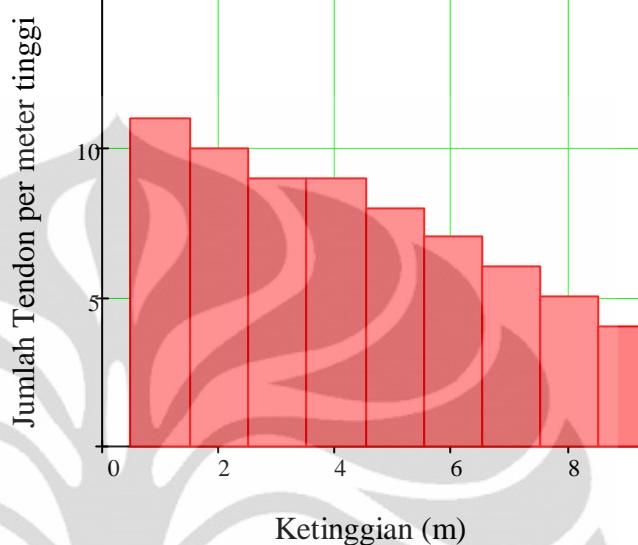
Jumlah tendon yang diperlukan per 1 meter tinggi

$$n(y) := \text{Ceil} \left[ \frac{(A_{ps}(y) \cdot 1m)}{A_{tendon}}, 1 \right]$$

$$\text{spasi}(y) := \frac{k}{n(y)}$$

y =	n(y) =	spasi(y) =
0	11	90.909
1	10	100
2	9	111.111
3	9	111.111
4	8	125
5	7	142.857
6	6	166.667
7	5	200
8	4	250
9	3	333.333

Distribusi Tendon yang diperlukan



### Prategang vertikal Memakai strand 7 kawat

$$P_v = 7.5 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

eksentrisitas

$$e = 0.03 \text{ m}$$

$$A_{tendon} = 0.36 \cdot \text{in}^2$$

$$f_{pu} = 1.724 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$f_{pi} = 1.207 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$f_{pe} := 0.74 \cdot f_{pi} = 892.871 \cdot \text{MPa}$$

banyaknya strands vertikal per 1 m keliling

$$\text{luasstrand} := \frac{P_v}{f_{pe}} = 839.987 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{jumlahstrand} := \frac{\text{luasstrand}}{A_{tendon}} \cdot (1 \cdot \text{m}) = 3.617$$

spasi strand vertikal

$$s_2 := \frac{1 \cdot \text{m}}{\text{jumlahstrand}} = 276.501 \cdot \text{mm}$$

asumsi spasi horizontal

$$s_1 := 90 \cdot \text{mm}$$

## Pengecekan kuat momen nominal terhadap dinding tangki

momen maksimum

$$M_y = 5.518 \times 10^4 \text{ N}$$

faktor keamanan

$$SF : = 1.3$$

Momen Ultimate

$$M_u : = SF \cdot M_y = 7.174 \times 10^4 \text{ N}$$

Momen nominal

$$M_n : = \frac{M_u}{0.9} = 7.971 \times 10^4 \text{ N}$$

$$d : = \frac{t}{2} + e = 0.205 \text{ m}$$

$$A_{ps} : = \frac{A_{tendon}}{\left( \frac{1 \cdot m}{\text{jumlahstrand}} \right)} = 839.987 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$a : = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0.85 \cdot f_c} = 0.043 \text{ m}$$

$$\text{momen tersedia} \quad M_n : = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = 2.339 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\text{momen diperlukan} \quad M_n = 7.971 \times 10^4 \text{ N}$$

**Pengecekan momen nominal** if  $(M_n > M_n, "OK", "Tidak OK") = "OK"$

## Kontrol retak di dinding tangki beton

modulus elastisitas tendon

$$E_{ps} : = 28000000 \cdot \text{psi} = 1.931 \times 10^5 \cdot \text{MPa}$$

tebal shortcrete

$$t_b : = 5 \cdot \text{cm}$$

Parameter tegangan

$$\alpha_t : = \frac{f_{ps}}{f_{pi}} = 1.257$$

Regangan tarik

$$\varepsilon_{ct} : = \frac{(\alpha_t \cdot f_{pi})}{E_{ps}} = 7.858 \times 10^{-3}$$

Indeks grid

$$I_x : = \frac{8}{\pi} \frac{(s_2 \cdot s_1 \cdot t_b)}{\phi_1} = 0.499 \text{ m}^2$$

lebar retak maksimum

$$w_{maks} : = 4.1 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_{ct} \cdot \frac{E_{ps}}{\text{MPa}} \cdot \sqrt{I_x} = 4.393 \cdot \text{mm}$$

lebar retak yang diizinkan : 0.004 in,

if  $(w_{maks} < 0.004 \cdot \text{in}, "OK", "Tidak OK") = "Tidak OK"$

## Desain balok cincin tepi prategang untuk kubah atap

### input variabel

berat jenis beton

$$\gamma_{\text{beton}} := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

diameter

$$D = 36.8 \text{ m}$$

tinggi kubah

$$h' := \frac{1}{8} \cdot D = 4.6 \text{ m}$$

sudut cangkang (derajat)

$$\phi := 26 \cdot \text{deg}$$

radius cangkang

$$r_{\text{atap}} := \frac{D}{2 \sin(\phi)} = 41.974 \text{ m}$$

mutu beton

$$f_c' = 35 \cdot \text{MPa}$$

modulus elastisitas beton

$$E_c := 4700 \cdot \sqrt{f_c' \cdot \text{MPa}} = 2.781 \times 10^4 \cdot \text{MPa}$$

tebal cangkang

$$t_{\text{atap}} := 12 \cdot \text{cm}$$

$$w_D := \gamma_{\text{beton}} \cdot t_{\text{atap}} = 2.88 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_L := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$P_u := 1.2 \cdot w_D + 1.6 w_L = 5.056 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\phi := 0.7$$

$$r_i := 1.4 \cdot r_{\text{atap}}$$

$$\beta_i := \left( \frac{r_{\text{atap}}}{r_i} \right)^2 = 0.51$$

$$\beta_c := \min \left[ \left( 0.44 + 0.003 \cdot \frac{w_L}{\text{kPa}} \right), 0.53 \right] = 0.443$$

$$h_{\text{minimal}} := r_{\text{atap}} \cdot \sqrt{\frac{1.5 \cdot P_u}{\phi \cdot \beta_i \cdot \beta_c \cdot E_c}} = 55.111 \cdot \text{mm}$$

### Pengecekan

$$\text{cek}_{\text{atap}} := \text{if} \left( h_{\text{minimal}} < t_{\text{atap}}, \text{"OK"}, \text{"TIDAK OK"} \right) = \text{"OK"}$$

### gaya tangensial per panjang satuan keliling

$$N_\theta := \frac{w_D \cdot D}{2 \sin(\phi)} \left( \frac{1}{1 + \cos(\phi)} - \cos(\phi) \right) - w_L \cdot \frac{D}{4 \cdot \sin(\phi)} \cdot \cos(2 \cdot \phi) = -18.732 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### gaya meridional per panjang satuan keliling

$$N_\phi := -r_{\text{atap}} \cdot \left( \frac{w_D}{1 + \cos(\phi)} + \frac{w_L}{2} \right) = -89.482 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{radial}} := \left( \frac{b_{\text{beam}} \cdot h_{\text{beam}}}{t_{\text{atap}}} \right) \left( N_\theta - \mu \cdot N_\phi \right) + \frac{D}{2} \left( N_\phi \cdot \cos(\phi) \right)$$

karena suku pertama nilainya kurang dari 100%, maka dapat dilakukan iterasi untuk memperoleh nilai luas "bh"

$$p := \frac{D}{2} (N_{\phi} \cdot \cos(\phi)) = -1.259 \times 10^6 \text{ N}$$

dengan mengasumsikan kehilangan prategang  
hilang = 26%

$$p_i := \frac{-p}{1 - \text{hilang}} = 1.702 \times 10^6 \text{ N}$$

$$f_c := \min(0.2 \cdot f'_c, 800 \text{ psi}) = 5.516 \cdot \text{MPa}$$

$$A_c := \frac{p_i}{f_c} = 3.085 \times 10^3 \cdot \text{cm}^2$$

**diambil dimensi balok**

$$b_{beam} := 40 \text{ cm}$$

$$h_{beam} := 80 \text{ cm}$$

$$A_{beam} := b_{beam} \cdot h_{beam} = 3.2 \times 10^3 \cdot \text{cm}^2 \quad \text{if } (A_{beam} > A_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

$$P_{radial} := \left( \frac{b_{beam} \cdot h_{beam}}{t_{atap}} \right) (N_{\theta} - \mu \cdot N_{\phi}) + \frac{D}{2} (N_{\phi} \cdot \cos(\phi)) = -1.262 \times 10^6 \text{ N}$$

**Gunakan**

$$P_i := \frac{-P_{radial}}{1 - \text{hilang}} = 1.705 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$f_{pi} = 175 \cdot \text{ksi}$$

$$A_{ps\_atap} := \frac{P_i}{f_{pi}} = 1.413 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$\text{banyakstrands} := \frac{A_{ps\_atap}}{A_{tendon}} = 6.083$$

**Ambil jumlah strand sebanyak**  $\text{ceil}(\text{banyakstrands}) = 7$

pengecekan tegangan penampang kritis

$$N_{\phi} = -8.948 \times 10^4 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$f := \frac{-N_{\phi}}{t_{atap}} = 0.746 \cdot \text{MPa}$$

**Pengecekan if** ( $f < f_c, "OK", "Tidak OK"$ ) = "OK"

**properti tangki**

rasio h:d

$$\text{rasio} : = \frac{1}{4}$$

ketinggian

$$h : = 19.8 \text{ m}$$

diameter

$$D : = \frac{h}{\text{rasio}} = 79.2 \text{ m}$$

volume

$$V : = \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot h = 9.755 \times 10^4 \cdot \text{m}^3$$

tebal dinding

$$t : = 100 \text{ cm}$$

**properti beton**

Mutu beton

$$f_c' : = 35 \cdot \text{MPa}$$

Tegangan sementara

$$f_{cl}' : = 25.9 \cdot \text{MPa}$$

Tarik lentur maksimum

$$f_t : = 0.7 \cdot \sqrt{f_c' \cdot \text{MPa}} = 4.141 \cdot \text{MPa}$$

Tekan aksial

$$f_c : = -0.45 f_c' = -15.75 \cdot \text{MPa}$$

Tarik residual minimum

$$f_{cv} : = 225 \cdot \text{psi}$$

**Properti baja prategang**

kuat tarik tendon

$$f_{pu} : = 270 \cdot \text{ksi}$$

Tendon pasca tarik

$$f_{pi} : = 0.7 \cdot f_{pu} = 189 \cdot \text{ksi}$$

Tegangan baja pada kuat nominal

$$f_{ps} : = 1517 \cdot \text{MPa} = 220.022 \cdot \text{ksi}$$

asumsikan terjadi kehilangan prategang 26 persen untuk semua efek jangka panjang

**solusi secara analitis:**

Berat dinding dan efek kubah atap tidak signifikan terhadap tegangan dibandingkan dengan efek dari gaya-gaya prategang vertikal sehingga dapat diabaikan

distribusi tekanan air pada dinding tangki

$$\gamma : = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$r : = \frac{D}{2} = 39.6 \text{ m}$$

$$P : = \gamma \cdot h \cdot r = 7.692 \times 10^6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

**Analisis Gaya Dalam dan Tegangan**poisson ratio,  $\mu : = 0.2$ 

$$\beta : = \frac{\left[ 3 \left( 1 - \mu^2 \right) \right]^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{r \cdot t}} \cdot (1 \text{ m}) = 0.207$$

$$\Phi(x) : = e^{-x} \cdot (\cos(x) + \sin(x))$$

$$\Psi(x) : = e^{-x} (\cos(x) - \sin(x))$$

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

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

**Momen dan Gaya Cincin pada dasar dengan perletakan jepit penuh**

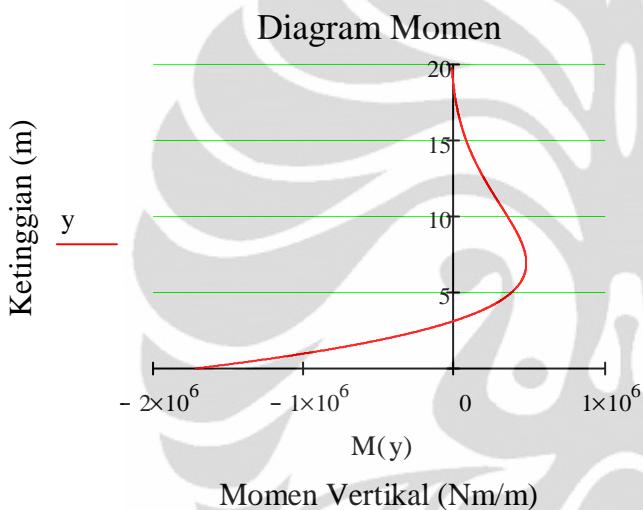
$$M_O := -\left(1 - \frac{1m}{\beta \cdot h}\right) \cdot \frac{\gamma \cdot h \cdot r \cdot t}{\sqrt{12(1 - \mu^2)}} = -1.713 \times 10^6 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$Q_O := \left(2 \cdot \frac{\beta}{1m} \cdot h - 1\right) \cdot \frac{(\gamma \cdot r \cdot t)}{\sqrt{12 \cdot (1 - \mu^2)}} \cdot (1m) = 8.238 \times 10^5 N$$

**Perhitungan gaya momen**

$$y := \begin{pmatrix} 0, 0.01, \dots, \frac{h}{1m} \end{pmatrix}$$

$$M(y) := \frac{\left[ \frac{1}{\beta} \cdot (\beta \cdot M_O \cdot \Phi(\beta \cdot y) + Q_O \cdot \zeta(\beta \cdot y)) \right]}{1 \cdot N}$$



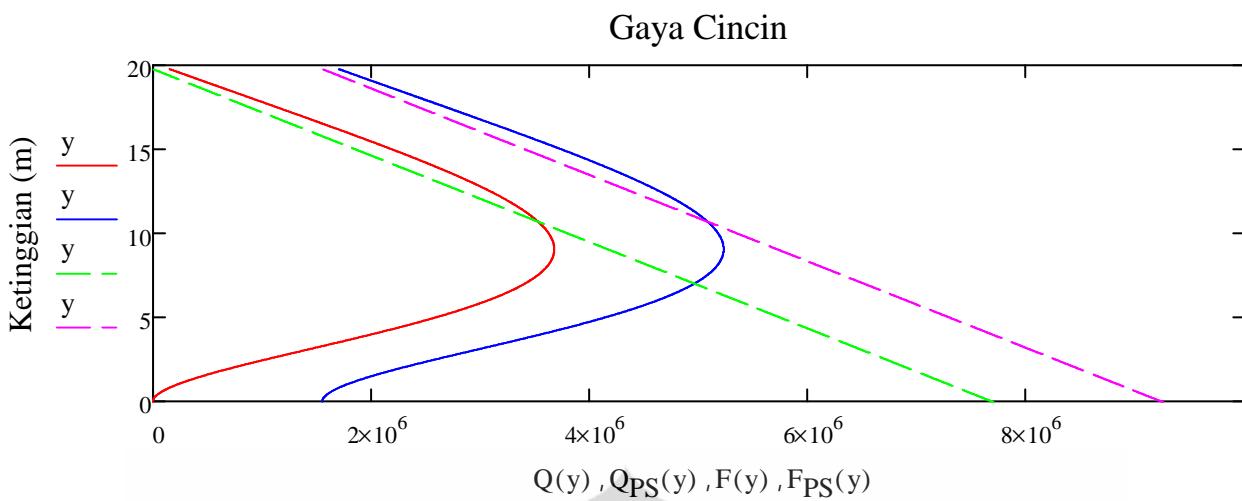
**Perhitungan gaya cincin**

$$F(y) := \gamma \cdot \left( \frac{h}{1m} - y \right) \cdot r \quad F_{PS}(y) := F(y) + f_{cv} \cdot \frac{t}{1m}$$

$$\Delta Q(y) := 6 \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{\beta^3 \cdot (r \cdot t^2)} \cdot (\beta \cdot M_O \cdot \Psi(\beta \cdot y) + Q_O \cdot \theta(\beta \cdot y))$$

$$Q(y) := \frac{(F(y) - \Delta Q(y) \cdot 1m)}{1 \cdot Pa}$$

$$Q_{PS}(y) := \frac{(F_{PS}(y) - \Delta Q(y) \cdot 1m)}{1 \cdot Pa}$$



$$F_{\max} := \text{MaxOffFunc}\left(Q, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot \frac{N}{m} = 3.675 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

$$M_y := \text{MaxOffFunc}\left(M, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot N = 4.793 \times 10^5 \cdot \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_o = -1.713 \times 10^6 \cdot \frac{N \cdot m}{m}$$

**Efek prategang menggunakan tekanan residual 225 psi**

#### Gaya cincin

$$Q_{\max} := F_{\max} + f_{cv} \cdot t = 5.227 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

$$Q_{\max} = 5.227 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

#### Momen

$$M_{1y} := M_y \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 6.816 \times 10^5 \cdot \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_{1o} := M_o \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = -2.437 \times 10^6 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

#### Pengecekan tegangan maksimum di dinding pada momen maksimum

$$S := \frac{1}{6} \cdot (1m) \cdot t^2 = 0.167 \cdot m^3$$

dengan menggunakan prategang vertikal eksentris

$$P_v := 1750 \cdot \frac{kN}{m} \quad e := 10cm$$

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{pshorizontal} := \frac{M_{1y} \cdot (1m)}{S} = 4.09 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{cairan} := \frac{M_y}{S} \cdot (1m) = 2.876 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{psvertikal} := \frac{P_v}{t} = 1.75 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenpsvertikal} := \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1m) = 1.05 \times 10^6 \text{ Pa}$$

**tegangan tekan waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tekan} := -f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -6.89 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tekan} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tarik} := f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} + f_{momenpsvertikal} = 3.39 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tarik} < f_t, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{penuh} := -f_{pshorizontal} + f_{cairan} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -4.014 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{penuh} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**Pengecekan tegangan maksimum di dasar dinding pada dasar jepit penuh**

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{pshorizontal} := \frac{M_{1o} \cdot (1m)}{S} = -1.462 \times 10^7 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{cairan} := \frac{M_o}{S} \cdot (1m) = -1.028 \times 10^7 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{psvertikal} := \frac{P_v}{t} = 1.75 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenpsvertikal} := \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1m) = 1.05 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$f_{\text{kosong\_tekan}} := f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = -15.319 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tekan}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tarik}} := -f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = 11.819 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tarik}} < f_t, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"Tidak OK"}$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{\text{penuh}} := f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{cairan}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = -5.039 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{penuh}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**Momen dan Gaya Cincin pada dasar dengan perletakan sendi**

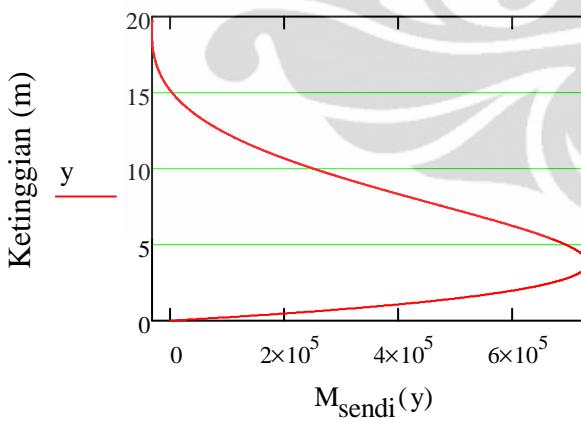
$$M_{\text{osendi}} := 0 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$Q_{\text{osendi}} := \frac{(\gamma \cdot h) \cdot (1m)}{\left[ 12 \cdot (1 - \mu^2) \right]^{\frac{1}{4}}} \cdot \left( \frac{r \cdot t}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = 4.691 \times 10^5 \cdot N$$

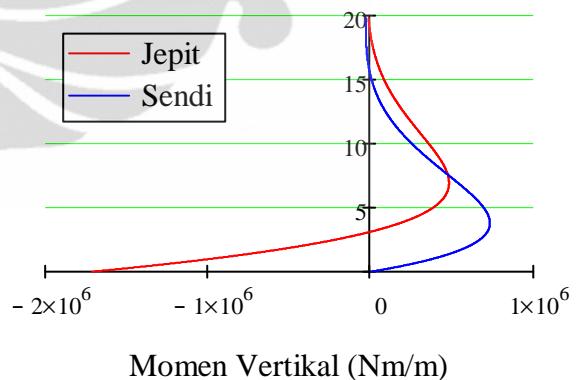
**Perhitungan gaya momen**

$$M_{\text{sendi}}(y) := \frac{\left[ \frac{1}{\beta} \cdot (\beta \cdot M_{\text{osendi}} \cdot \Phi(\beta \cdot y) + Q_{\text{osendi}} \cdot \zeta(\beta \cdot y)) \right]}{1 \cdot N}$$

Diagram Momen



Perbandingan Diagram Momen

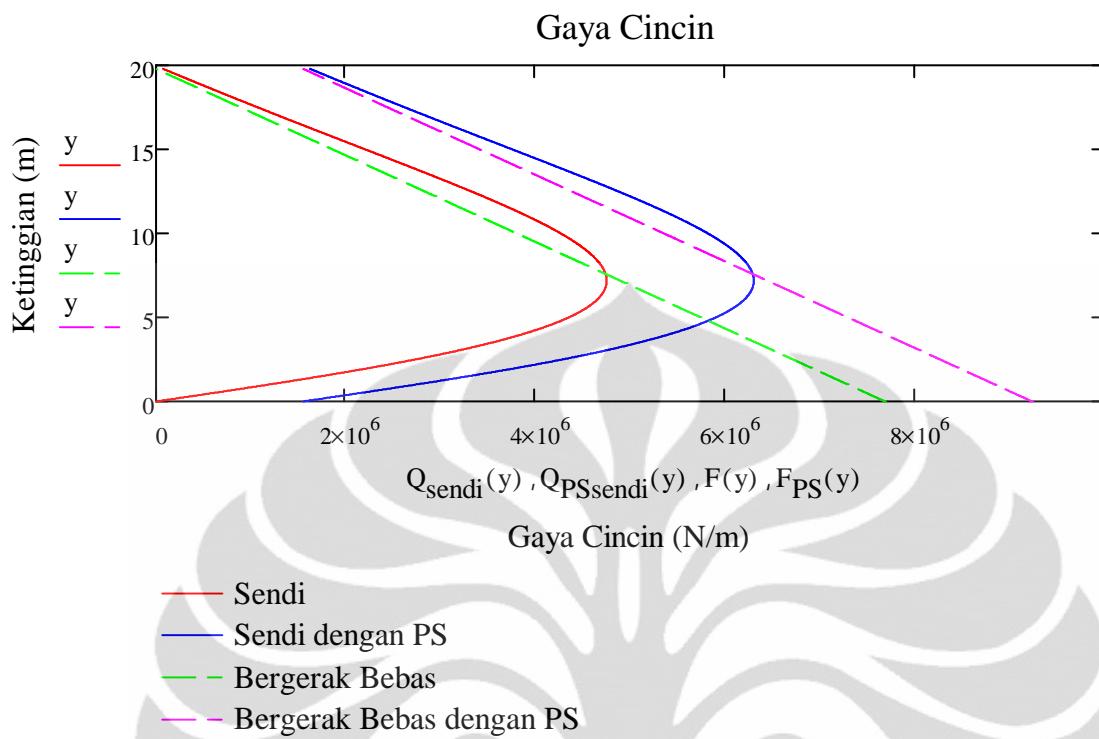


**Perhitungan gaya cincin**

$$\Delta Q_{\text{sendi}}(y) := 6 \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{\beta^3 \cdot (r \cdot t)^2} \cdot (\beta \cdot M_{\text{osendi}} \cdot \Psi(\beta \cdot y) + Q_{\text{osendi}} \cdot \theta(\beta \cdot y))$$

$$Q_{\text{sendi}}(y) := \frac{(F(y) - \Delta Q_{\text{sendi}}(y) \cdot 1 \cdot m)}{1 \text{Pa}}$$

$$Q_{PSsendi}(y) := \frac{(F_{PS}(y) - \Delta Q_{sendi}(y) \cdot 1 \cdot m)}{1 \text{ Pa}}$$



$$F_{\max} := \text{MaxOfFunc}\left(Q_{\text{sendi}}, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot \frac{N}{m} = 4.756 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

$$M_y := \text{MaxOfFunc}\left(M_{\text{sendi}}, 0, \frac{h}{1 \cdot m}\right) \cdot N = 7.306 \times 10^5 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

$$M_{osendi} = 0$$

**Efek prategang menggunakan tekanan residual 225 psi**

**Gaya cincin**

$$Q_{\max} := F_{\max} + f_{cv} \cdot t = 6.307 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

$$Q_{\max} = 6.307 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

**Momen**

$$M_{1y} := M_y \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 9.689 \times 10^5 \cdot \frac{N \cdot m}{m}$$

$$M_{1o} := M_{osendi} \cdot \frac{Q_{\max}}{F_{\max}} = 0 \cdot N \cdot \frac{m}{m}$$

**Pengecekan tegangan maksimum di dinding pada momen maksimum**

$$S := \frac{1}{6} \cdot (1m) \cdot t^2 = 0.167 \cdot m^3$$

dengan menggunakan prategang vertikal eksentris

$$P_v : = 1750 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$e : = 0 \cdot \text{cm}$$

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{\text{pshorizontal}} : = \frac{M_{1y} \cdot (1\text{m})}{S} = 5.814 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{\text{cairan}} : = \frac{M_y}{S} \cdot (1\text{m}) = 4.384 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{\text{psvertikal}} : = \frac{P_v}{t} = 1.75 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{\text{momenpsvertikal}} : = \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1\text{m}) = 0$$

**tegangan tekan waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tekan}} : = -f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = -7.564 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tekan}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{\text{kosong\_tarik}} : = f_{\text{pshorizontal}} - f_{\text{psvertikal}} + f_{\text{momenpsvertikal}} = 4.064 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{kosong\_tarik}} < f_t, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{\text{penuh}} : = -f_{\text{pshorizontal}} + f_{\text{cairan}} - f_{\text{psvertikal}} - f_{\text{momenpsvertikal}} = -3.18 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{\text{penuh}} > f_c, \text{"OK"}, \text{"Tidak OK"}) = \text{"OK"}$$

**Pengecekan tegangan di dasar dinding pada dasar sendi**

tegangan akibat momen P/S horizontal

$$f_{\text{pshorizontal}} : = \frac{M_{1o} \cdot (1\text{m})}{S} = 0$$

tegangan akibat momen cairan

$$f_{\text{cairan}} : = \frac{M_{osendi}}{S} \cdot (1\text{m}) = 0$$

tegangan akibat P/S vertikal

$$f_{psvertikal} : = \frac{P_v}{t} = 1.75 \times 10^6 \text{ Pa}$$

tegangan akibat momen P/S vertikal

$$f_{momenpsvertikal} : = \frac{(P_v \cdot e)}{S} \cdot (1\text{m}) = 0$$

**tegangan tekan waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tekan} : = -f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -1.75 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tekan} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan tarik waktu tangki kosong**

$$f_{kosong\_tarik} : = f_{pshorizontal} - f_{psvertikal} + f_{momenpsvertikal} = -1.75 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{kosong\_tarik} < f_t, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

**tegangan waktu tangki penuh**

$$f_{penuh} : = -f_{pshorizontal} + f_{cairan} - f_{psvertikal} - f_{momenpsvertikal} = -1.75 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{if } (f_{penuh} > f_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

## Desain baja penulangan prategang

### Prestressing horizontal

$$h = 19.8 \text{ m} \quad \gamma = 9.81 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$r = 39.6 \text{ m} \quad t = 1 \text{ m}$$

$$k := 1 \text{ m}$$

$$f_R := f_{cv}$$

$$p := f_R \cdot \frac{t}{r} = 39.175 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$Z := 0 \cdot m, k \cdot h$$

$$y := 0, \frac{k}{m} \cdot \frac{h}{m}$$

$$f_{pu} = 270 \cdot \text{ksi}$$

**luas tendon yang digunakan**

Tendon 10 - 7 wire strand K270  $\phi_1 := 0.5 \cdot \text{in}$

$$A_{\text{tendon}} := 10 \cdot 0.153 \cdot \text{in}^2 = 9.871 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

hilang := 26%

**Perletakan dapat bergerak bebas**

$$F_R(y) := F_{PS}(y) \cdot 1 \text{ m}$$

$$f_{pi} := 0.7 f_{pu} = 1.303 \times 10^9 \text{ Pa}$$

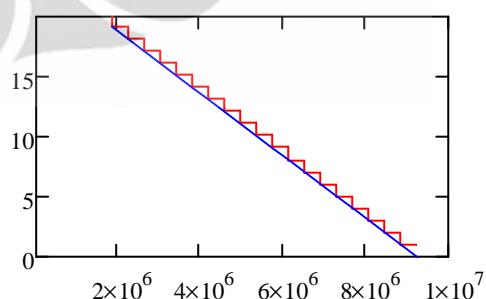
$$f_{pe} := (1 - \text{hilang}) \cdot f_{pi} = 964.301 \cdot \text{MPa}$$

$$A_{ps}(y) := \frac{F_R(y)}{f_{pe}} \quad \text{per meter tinggi}$$

$$A_{ps}(y) =$$

	$\frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
9.585 · 10 <sup>3</sup>	
9.182 · 10 <sup>3</sup>	
8.78 · 10 <sup>3</sup>	
8.377 · 10 <sup>3</sup>	
7.974 · 10 <sup>3</sup>	
7.571 · 10 <sup>3</sup>	
7.168 · 10 <sup>3</sup>	
6.765 · 10 <sup>3</sup>	
6.362 · 10 <sup>3</sup>	
5.96 · 10 <sup>3</sup>	
5.557 · 10 <sup>3</sup>	
5.154 · 10 <sup>3</sup>	
4.751 · 10 <sup>3</sup>	
4.348 · 10 <sup>3</sup>	
3.945 · 10 <sup>3</sup>	
...	

Distribusi Gaya Prategang

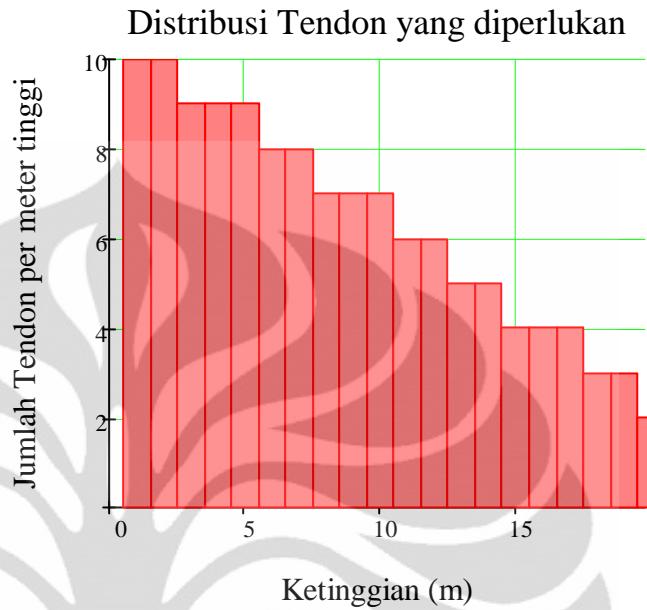


Jumlah tendon yang diperlukan per 1 meter tinggi

$$n(y) := \text{Ceil} \left[ \frac{(A_{ps}(y) \cdot 1m)}{A_{tendon}} , 1 \right]$$

$$\text{spasi}(y) := \frac{k}{n(y)}$$

y =	n(y) =	spasi(y) =
0	10	100
1	10	100
2	9	111.111
3	9	111.111
4	9	111.111
5	8	125
6	8	125
7	7	142.857
8	7	142.857
9	7	142.857
10	6	166.667
11	6	166.667
12	5	200
13	5	200
14	4	250
...	...	...



### Prategang vertikal

Memakai tendon 10 strand 7 kawat

$$P_V = 1.75 \times 10^6 \cdot \frac{N}{m}$$

eksentrисitas

$$e = 0$$

$$A_{tendon} = 1.53 \cdot \text{in}^2$$

$$f_{pu} = 1.862 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$f_{pi} = 1.303 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$f_{pe} := 0.74 \cdot f_{pi} = 964.301 \cdot \text{MPa}$$

banyaknya strands vertikal per 1 m keliling

$$\text{luasstrand} := \frac{P_V}{f_{pe}} = 1.815 \times 10^3 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{jumlahstrand} := \frac{\text{luasstrand}}{A_{tendon}} \cdot (1 \cdot \text{m}) = 1.839$$

spasi strand vertikal

$$s_2 := \frac{1 \cdot \text{m}}{\text{jumlahstrand}} = 543.918 \cdot \text{mm}$$

asumsi spasi horizontal

$$s_1 := 100 \cdot \text{mm}$$

## Pengecekan kuat momen nominal terhadap dinding tangki

momen maksimum

$$M_y = 7.306 \times 10^5 \text{ N}$$

faktor keamanan

$$SF : = 1.3$$

Momen Ultimate

$$M_u : = SF \cdot M_y = 9.498 \times 10^5 \text{ N}$$

Momen nominal

$$M_n : = \frac{M_u}{0.9} = 1.055 \times 10^6 \text{ N}$$

$$d : = \frac{t}{2} + e = 0.5 \text{ m}$$

$$A_{ps} : = \frac{A_{tendon}}{\left( \frac{1 \cdot m}{\text{jumlahstrand}} \right)} = 1.815 \times 10^3 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$a : = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0.85 \cdot f_c} = 0.093 \text{ m}$$

$$\text{momen tersedia} \quad M_n : = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = 1.249 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\text{momen diperlukan} \quad M_n = 1.055 \times 10^6 \text{ N}$$

**Pengecekan momen nominal** if  $(M_n > M_n, "OK", "Tidak OK") = "OK"$

## Kontrol retak di dinding tangki beton

modulus elastisitas tendon

$$E_{ps} : = 28000000 \cdot \text{psi} = 1.931 \times 10^5 \cdot \text{MPa}$$

tebal shortcrete

$$t_b : = 5 \cdot \text{cm}$$

Parameter tegangan

$$\alpha_t : = \frac{f_{ps}}{f_{pi}} = 1.164$$

Regangan tarik

$$\varepsilon_{ct} : = \frac{(\alpha_t \cdot f_{pi})}{E_{ps}} = 7.858 \times 10^{-3}$$

Indeks grid

$$I_x : = \frac{8}{\pi} \frac{(s_2 \cdot s_1 \cdot t_b)}{\phi_1} = 0.545 \text{ m}^2$$

lebar retak maksimum

$$w_{maks} : = 4.1 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_{ct} \cdot \frac{E_{ps}}{\text{MPa}} \cdot \sqrt{I_x} = 4.593 \cdot \text{mm}$$

lebar retak yang diizinkan : 0.004 in,

if  $(w_{maks} < 0.004 \cdot \text{in}, "OK", "Tidak OK") = "Tidak OK"$

## Desain balok cincin tepi prategang untuk kubah atap

### input variabel

berat jenis beton

$$\gamma_{\text{beton}} := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

diameter

$$D = 79.2 \text{ m}$$

tinggi kubah

$$h' := \frac{1}{8} \cdot D = 9.9 \text{ m}$$

sudut cangkang (derajat)

$$\phi := 26 \cdot \text{deg}$$

radius cangkang

$$r_{\text{atap}} := \frac{D}{2 \sin(\phi)} = 90.334 \text{ m}$$

mutu beton

$$f_c' = 35 \cdot \text{MPa}$$

modulus elastisitas beton

$$E_c := 4700 \cdot \sqrt{f_c' \cdot \text{MPa}} = 2.781 \times 10^4 \cdot \text{MPa}$$

tebal cangkang

$$t_{\text{atap}} := 25 \cdot \text{cm}$$

$$w_D := \gamma_{\text{beton}} \cdot t_{\text{atap}} = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_L := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$P_u := 1.2 \cdot w_D + 1.6 w_L = 8.8 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\phi := 0.7$$

$$r_i := 1.4 \cdot r_{\text{atap}}$$

$$\beta_i := \left( \frac{r_{\text{atap}}}{r_i} \right)^2 = 0.51$$

$$\beta_c := \min \left[ \left( 0.44 + 0.003 \cdot \frac{w_L}{\text{kPa}} \right), 0.53 \right] = 0.443$$

$$h_{\text{minimal}} := r_{\text{atap}} \cdot \sqrt{\frac{1.5 \cdot P_u}{\phi \cdot \beta_i \cdot \beta_c \cdot E_c}} = 156.477 \cdot \text{mm}$$

### Pengecekan

$$\text{cek}_{\text{atap}} := \text{if} \left( h_{\text{minimal}} < t_{\text{atap}}, \text{"OK"}, \text{"TIDAK OK"} \right) = \text{"OK"}$$

### gaya tangensial per panjang satuan keliling

$$N_\theta := \frac{w_D \cdot D}{2 \sin(\phi)} \left( \frac{1}{1 + \cos(\phi)} - \cos(\phi) \right) - w_L \cdot \frac{D}{4 \cdot \sin(\phi)} \cdot \cos(2 \cdot \phi) = -78.331 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### gaya meridional per panjang satuan keliling

$$N_\phi := -r_{\text{atap}} \cdot \left( \frac{w_D}{1 + \cos(\phi)} + \frac{w_L}{2} \right) = -352.28 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$P_{\text{radial}} := \left( \frac{b_{\text{beam}} \cdot h_{\text{beam}}}{t_{\text{atap}}} \right) (N_\theta - \mu \cdot N_\phi) + \frac{D}{2} (N_\phi \cdot \cos(\phi))$$

karena suku pertama nilainya kurang dari 10%, maka dapat dilakukan iterasi untuk memperoleh nilai luas "bh"

$$p := \frac{D}{2} (N_{\phi} \cdot \cos(\phi)) = -1.067 \times 10^4 \text{ kN}$$

dengan mengasumsikan kehilangan prategang

hilang = 26%

$$p_i := \frac{-p}{1 - \text{hilang}} = 1.442 \times 10^7 \text{ N}$$

$$f_c := \min(0.2 \cdot f'_c, 800 \text{ psi}) = 5.516 \text{ MPa}$$

$$A_c := \frac{p_i}{f_c} = 2.614 \times 10^4 \text{ cm}^2$$

diambil dimensi balok

$$b_{beam} := 135 \text{ cm}$$

$$h_{beam} := 200 \text{ cm}$$

$$A_{beam} := b_{beam} \cdot h_{beam} = 2.7 \times 10^4 \text{ cm}^2 \quad \text{if } (A_{beam} > A_c, "OK", "Tidak OK") = "OK"$$

$$P_{radial} := \left( \frac{b_{beam} \cdot h_{beam}}{t_{atap}} \right) (N_{\theta} - \mu \cdot N_{\phi}) + \frac{D}{2} (N_{\phi} \cdot \cos(\phi)) = -1.075 \times 10^7 \text{ N}$$

Gunakan

$$P_i := \frac{-P_{radial}}{1 - \text{hilang}} = 1.453 \times 10^4 \text{ kN}$$

$$f_{pi} = 189 \text{ ksi}$$

$$A_{ps\_atap} := \frac{P_i}{f_{pi}} = 1.115 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$\text{banyakstrands} := \frac{A_{ps\_atap}}{A_{tendon}} = 11.299$$

Ambil jumlah strand sebanyak  $\text{ceil}(\text{banyakstrands}) = 12$

pengecekan tegangan penampang kritis

$$N_{\phi} = -3.523 \times 10^5 \cdot \frac{N}{m}$$

$$f := \frac{-N_{\phi}}{t_{atap}} = 1.409 \text{ MPa}$$

Pengecekan if ( $f < f_c, "OK", "Tidak OK"$ ) = "OK"