

**TUGAS AKHIR - TM184835**

**ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN BENTUK  
PROFIL KAKI PENYANGGA JENIS *LEG* TERHADAP  
KEKUATAN DAN KEKAKUAN AKIBAT BEBAN  
ANGIN DAN GEMPA PADA BEJANA TEKAN JENIS  
*LP CONDENSATE FLASH DRUM***

**MUHAMMAD SYARIF HIDAYATULLAH**

**NRP 02111840000057**

Dosen Pembimbing

**Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**NIP 19650810 199102 1 001**

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

Surabaya

2022



**TUGAS AKHIR - TM184835**

**ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN BENTUK  
PROFIL KAKI PENYANGGA JENIS *LEG* TERHADAP  
KEKUATAN DAN KEKAKUAN AKIBAT BEBAN  
ANGIN DAN GEMPA PADA BEJANA TEKAN JENIS  
*LP CONDENSATE FLASH DRUM***

**MUHAMMAD SYARIF HIDAYATULLAH**

**NRP 0211184000057**

Dosen Pembimbing

**Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**NIP 19650810 199102 1 001**

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

Surabaya

2022



**FINAL PROJECT - TM184835**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER  
AND SHAPE OF THE PROFILE OF THE FOOT  
SUPPORT ON THE STRENGTH AND STIFFNESS  
DUE TO WIND AND EARTHQUAKE LOADING ON  
THE LP CONDENSATE FLASH DRUM**

**MUHAMMAD SYARIF HIDAYATULLAH**

**NRP 02111840000057**

Advisor

**Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**NIP 19650810 199102 1 001**

**Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering**

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Surabaya

2022

## HALAMAN PENGESAHAN

### ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN BENTUK PROFIL KAKI PENYANGGA JENIS LEG TERHADAP KEKUATAN DAN KEKAKUAN AKIBAT BEBAN ANGIN DAN GEMPA PADA BEJANA TEKAN JENIS LP CONDENSATE FLASH DRUM

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Program Studi S-1 Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **MUHAMMAD SYARIF HIDAYATULLAH**

NRP. 0211184000057

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA
2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.
4. Ir. Julendra Bambang Ariadteja, MT.

Pembimbing

Penguji 1

Penguji 2

Penguji 3



**SURABAYA**  
**Juli, 2022**

## APPROVAL SHEET

### ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER AND SHAPE OF THE PROFILE OF THE FOOT SUPPORT ON THE STRENGTH AND STIFFNESS DUE TO WIND AND EARTHQUAKE LOADING ON THE LP CONDENSATE FLASH DRUM

#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a Bachelor of Engineering at  
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **MUHAMMAD SYARIF HIDAYATULLAH**  
NRP. 0211184000057

Approved by Final Project Examiner Team

1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA
2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.
4. Ir. Julendra Bambang Ariadteja, MT.

Adviser

Examiner 1

Examiner 2

Examiner 3



**SURABAYA**  
**July, 2022**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Syarif Hidayatullah / 0211184000057

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA / 196508101991021001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN BENTUK PROFIL KAKI PENYANGGA JENIS *LEG* TERHADAP KEKUATAN DAN KEKAKUAN AKIBAT BEBAN ANGIN DAN GEMPA PADA BEJANA TEKAN JENIS LP *CONDENSATE FLASH DRUM*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

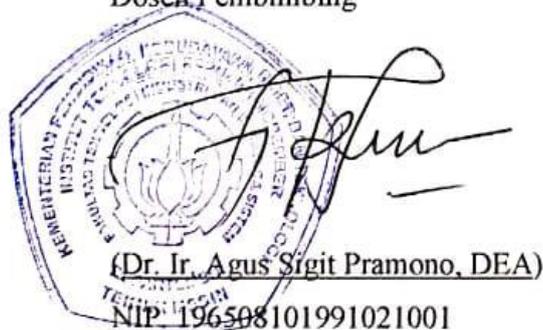
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui,

Dosen Pembimbing

Mahasiswa,



(Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA)  
NIP. 196508101991021001



(Muhammad Syarif Hidayatullah)  
NRP. 0211184000057

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Muhammad Syarif Hidayatullah / 0211184000057  
Department : Mechanical Engineering  
Advisor / NIP : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA / 196508101991021001

Hereby declare that the Final Project with the title of "ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER AND SHAPE OF THE PROFILE OF THE FOOT SUPPORT ON THE STRENGTH AND STIFFNESS DUE TO WIND AND EARTHQUAKE LOADING ON THE LP CONDENSATE FLASH DRUM" the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged,

Advisor



(Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA)  
NIP. 196508101991021001

Student,



(Muhammad Syarif Hidayatullah)  
NRP. 0211184000057

# ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN BENTUK PROFIL KAKI PENYANGGA JENIS *LEG* TERHADAP KEKUATAN DAN KEKAKUAN AKIBAT BEBAN ANGIN DAN GEMPA PADA BEJANA TEKAN JENIS LP *CONDENSATE FLASH DRUM*

Nama Mahasiswa / NRP : Muhammad Syarif Hidayatullah / 0211184000057

Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS

Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

## Abstrak

Bejana tekan merupakan wadah untuk menahan tekanan, baik yang terjadi di internal maupun eksternal. tekanan ini dapat diperoleh dari sumber eksternal, dan penerapan panas dari sumber langsung atau tidak langsung, atau kombinasinya. Bejana tekan merupakan salah satu peralatan yang berperan penting dalam suatu proses di industri. Industri yang telah menggunakan di antaranya oil dan gas, kimia hingga industri makanan. Bejana tekan digunakan untuk menyimpan dan mengirimkan cairan, uap, dan gas di bawah tekanan. Salah satu bejana tekan yang digunakan di dalam industri adalah LP *Condensate Flash Drum*. Bejana tekan tersebut merupakan peralatan opsional yang digunakan untuk memisahkan gas dari pompa bertenaga dan *condensate*. Dalam perancangan bejana tekan perlu memperhatikan faktor lingkungan yang terjadi agar tidak terjadi kegagalan saat beroperasi. Seperti halnya beban angin yang terjadi setiap waktu dan beban gempa yang dapat terjadi sewaktu-waktu.

Dalam penelitian ini dirancang sebuah bejana tekan vertikal dengan penyangga jenis *leg support*. Di mana bejana tekan dan kaki penyangga disimulasikan menggunakan material *structural steel*. Diameter dalam bejana tekan yang digunakan adalah 1200 mm dengan tebal 12 mm sedangkan untuk profil kaki penyangga menggunakan profil H dan L serta *bracing* dengan panjang 1900 mm. Dengan variasi jumlah kaki penyangga yakni 3 dan 4. Pembebanan yang digunakan yakni gempa dan kecepatan angin yang terjadi di daerah Balikpapan, Indonesia. Setiap konfigurasi penyangga dibuat pada volume dan massa jenis yang sama.

Hasil simulasi yang dilakukan memberikan informasi setiap konfigurasi penyangga memiliki nilai *safety factor* yang berbeda. Pada penyangga 3 kaki ISMB 100 memiliki nilai sebesar 2,3. Kemudian 3 kaki L 90x90x12 memiliki nilai sebesar 1,6. Pada penyangga 3 kaki L 100x100x12 memiliki nilai sebesar 2,4. Kemudian 3 kaki L100x100x10 memiliki nilai sebesar 2,8. Pada penyangga 3 kaki L 120x120x10 memiliki nilai sebesar 4,1. Kemudian 3 kaki L 120x120x8 memiliki nilai sebesar 2,0. Pada penyangga 4 kaki L 80x80x10 memiliki nilai sebesar 2,2. Kemudian 4 kaki L 90x90x10 memiliki nilai sebesar 1,3. Pada penyangga 4 kaki L 100x100x8 memiliki nilai sebesar 1,6. Kemudian 3 kaki dengan *cross bracing* memiliki nilai sebesar 8,0. Pada penyangga 3 kaki dengan *sway bracing* memiliki nilai sebesar 1,6.

**Kata kunci:** Bejana Tekan, Angin, Gempa

# **ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER AND SHAPE OF THE PROFILE OF THE FOOT SUPPORT ON THE STRENGTH AND STIFFNESS DUE TO WIND AND EARTHQUAKE LOADING ON THE LP CONDENSATE FLASH DRUM**

**Student Name / NRP** : Muhammad Syarif Hidayatullah / 0211184000057  
**Department** : Teknik Mesin FTIRS - ITS  
**Advisor** : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

## **Abstract**

Pressure vessels are containers to withstand pressure, both internal and external. This pressure can be obtained from an external source, and the application of heat from a direct or indirect source, or a combination thereof. The pressure vessel is one of the pieces of equipment that plays an important role in a process in the industry. Industries that have used them include oil and gas, chemicals to the food industry. Pressure vessels are used to store and deliver liquids, vapors, and gases under pressure. One of the pressure vessels used in the industry is the LP Condensate Flash Drum. The pressure vessel is optional equipment used to separate gas from powered pumps and condensate. In the design of pressure vessels, it is necessary to pay attention to environmental factors that occur to avoid failure during operation. Like the wind load that occurs at any time and the earthquake load that can occur at any time.

In this research, a vertical pressure vessel with leg support is designed. Where pressure vessels and support legs are simulated using structural steel materials. The inside diameter of the pressure vessel used is 1200 mm with a thickness of 12 mm, while for the support leg profiles using H and L profiles and branching with a length of 1900 mm. With variations in the number of support legs, namely 3 and 4. The loads used are earthquakes and wind speeds that occur in Balikpapan, Indonesia. Each support configuration is made at the same volume and density.

The simulation results provide information that each buffer configuration has a different safety factor value. On a 3-foot support, ISMB 100 has a value of 2,3. Then 3 feet L 90x90x12 has a value of 1,6. On a 3 feet support, L 100x100x12 has a value of 2,4. Then 3 feet L 100x100x10 has a value of 2,8. On a 3 feet support, L 120x120x10 has a value of 4,1. Then 3 feet L 120x120x8 has a value of 2,0. On a 4 feet support, L 80x80x10 has a value of 2,2. Then 4 feet L 90x90x10 has a value of 1,3. On a 4 feet support, L 100x100x8 has a value of 1,6. Then 3 legs with cross bracing have a value of 8,0. On 3 legs with cross bracing has a value of 1,6.

**Key words:** *Pressure vessel, wind load and seismic load*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan Kesehatan, kemudahan dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini sehingga mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul : **“ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN BENTUK PROFIL KAKI PENYANGGA JENIS *LEG* TERHADAP KEKUATAN DAN KEKAKUAN AKIBAT BEBAN ANGIN DAN GEMPA PADA BEJANA TEKAN JENIS LP *CONDENSATE FLASH DRUM*”**

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam program studi S-1 Teknik Mesin FTIRS-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan hidayah-Nya dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis, Sahlan dan Masrida yang tiada henti memberikan doa dan dukungan baik materiil maupun spiritual untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Kakak penulis beserta keluarga besar penulis yang memberikan semangat dan doa.
4. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberi pengetahuan baik selama bimbingan, pelajaran dikelas, maupun kegiatan lainnya diluar kelas. Semua bimbingan tersebut sangat membantu penulis untuk menjadi pribadi yang lebih baik dan juga telah meluangkan banyak waktu dan banyak memberi perhatian dan saran serta pengetahuan tentang perkuliahan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
5. Bapak Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., selaku dosen wali yang telah membimbing, memberikan ilmu dan banyak hal lainnya dalam menjalani perkuliahan, serta menolong dan memberikan semangat agar dapat menjalani kuliah dengan baik.
6. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E., Yohanes, ST., M. Sc. dan Ir. Julendra Bambang Ariadteja, MT., selaku dosen penguji tugas akhir penulis. Terima kasih atas saran-saran dan kritik serta meluangkan waktu untuk penulis sehingga tugas akhir ini menjadi lebih baik lagi.
7. Seluruh Dosen beserta staff karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS – ITS yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan ilmu kehidupan serta sarana dan prasarana selama kuliah.
8. Seluruh rekan penulis di ITS khususnya rekan Departemen Teknik Mesin terutama angkatan M61 yang telah membantu penulis melewati masa perkuliahan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iv
<b>APPROVAL SHEET</b> .....	v
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	vi
<b>STATEMENT OF ORIGINALITY</b> .....	vii
<b>Abstrak</b> .....	viii
<b>Abstract</b> .....	ix
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	x
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xx
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Bejana Tekan ( <i>Pressure Vessel</i> ).....	5
2.2 Jenis-jenis Bejana Tekan ( <i>Pressure Vessel</i> ) .....	5
2.2.1 <i>Separator vessel</i> .....	5
2.2.2 <i>Drum vessel</i> .....	8
2.2.3 <i>Tower vessel</i> .....	9
2.3 Bagian-bagian Bejana Tekan .....	11
2.3.1 <i>Shell</i> .....	11
2.3.2 <i>Head</i> .....	13
2.3.3 <i>Nozzle / opening</i> .....	16
2.3.4 <i>Support</i> .....	17
2.3.5 Pengelasan bejana tekan .....	22
2.4 Elastisitas .....	24
2.5 Getaran.....	24
2.5.1 <i>Single degree of freedom (SDOF)</i> .....	25
2.5.2 <i>Two degree of freedom</i> .....	26
2.5.3 <i>Multi degree of freedom</i> .....	27

2.6	<i>Stress dan Strain</i> .....	27
2.6.1	Pembebanan batang secara aksial .....	27
2.6.2	Tegangan ( <i>stress</i> ) .....	28
2.6.3	Regangan ( <i>strain</i> ) .....	29
2.6.4	Kurva <i>stress-strain</i> .....	30
2.7	<i>Buckling</i> .....	31
2.8	<i>Structural Beams</i> .....	32
2.8.1	<i>H beam</i> .....	32
2.8.2	<i>L beam</i> .....	32
2.9	CODE .....	32
2.9.1	ASME .....	32
2.9.2	ASCE .....	33
2.9.2.1	Desain angin .....	34
2.9.2.2	Desain gempa .....	41
2.9.3	SNI .....	47
2.9.3.1	SNI 1727 .....	48
2.9.3.2	SNI 1726 .....	50
2.10	Pembebanan .....	50
2.10.1	Beban angin .....	51
2.10.2	Beban gempa .....	52
2.11	Metode Elemen Hingga .....	53
2.11.1	<i>Meshing</i> .....	54
2.11.2	<i>Static structural</i> .....	55
2.11.3	<i>Modal analysis</i> .....	56
2.11.4	<i>Response spectrum analysis</i> .....	57
2.11.5	<i>Fluent</i> .....	57
2.11.6	Uji konvergensi .....	60
2.12	Penelitian Terdahulu .....	60
<b>BAB III METODOLOGI</b> .....		65
3.1	Diagram Alir Penelitian .....	65
3.2	Penjelasan Tahapan Penelitian .....	65
3.2.1	Observasi lapangan .....	65
3.2.2	Perumusan masalah .....	66
3.2.3	Studi literatur .....	66
3.2.4	Penentuan data .....	66
3.2.5	Pemodelan <i>pressure vessel</i> .....	67

3.2.5.1	Pemodelan bejana tekan.....	67
3.2.5.2	Pemodelan Leg Support.....	68
3.2.6	Simulasi beban angin.....	68
3.2.6.1	Meshing .....	69
3.2.6.2	Pemodelan.....	69
3.2.6.3	Fluid-structure interaction.....	71
3.2.7	Simulasi beban gempa .....	71
3.2.7.1	Engineering data .....	72
3.2.7.2	Import geometri .....	72
3.2.7.3	Pemodelan.....	72
3.2.7.4	Structural-Vibration theory.....	74
3.2.8	Verifikasi .....	75
3.2.9	Analisis hasil.....	76
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>77</b>
4.1	Perhitungan Batas Keamanan .....	77
4.1.1	Batas deformasi maksimum.....	77
4.1.2	Spektral gempa di lokasi.....	77
4.1.3	Konvergensi.....	78
4.2	Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan .....	82
4.2.1	Hasil simulasi dan pembahasan nilai frekuensi natural .....	82
4.2.1.1	Penyangga jenis ISMB 100.....	82
4.2.1.2	Penyangga jenis L 90x90x12 .....	84
4.2.1.3	Penyangga jenis L 100x100x12 .....	86
4.2.1.4	Penyangga jenis L 100x100x10 .....	87
4.2.1.5	Penyangga jenis L 120x120x10 .....	89
4.2.1.6	Penyangga jenis L 120x120x8 .....	91
4.2.1.7	Penyangga jenis L 80x80x10 .....	93
4.2.1.8	Penyangga jenis L 90x90x10 .....	94
4.2.1.9	Penyangga jenis L 100x100x8 .....	96
4.2.1.10	Penyangga jenis cross bracing 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L 50x 50x 10 .....	98
4.2.1.11	Penyangga jenis sway bracing 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L 50x 50x 10 .....	100
4.2.2	Hasil simulasi dan pembahasan <i>respons spectrum</i> .....	101
4.2.2.1	Penyangga jenis ISMB 100.....	102
4.2.2.2	Penyangga jenis L 90x90x12 .....	103
4.2.2.3	Penyangga jenis L 100x100x12 .....	104

4.2.2.4	Penyangga jenis L 100x100x10 .....	105
4.2.2.5	Penyangga jenis L 120x120x10 .....	106
4.2.2.6	Penyangga jenis L 120x120x8 .....	107
4.2.2.7	Penyangga jenis L 80x80x10 .....	108
4.2.2.8	Penyangga jenis L 90x90x10 .....	109
4.2.2.9	Penyangga jenis L 100x100x8 .....	110
4.2.2.10	Penyangga jenis cross bracing 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10 .....	111
4.2.2.11	Penyangga jenis sway bracing 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10 .....	112
4.2.3	Hasil simulasi <i>fluid flow</i> .....	113
4.2.4	Hasil simulasi dan pembahasan <i>static structural</i> .....	114
4.2.4.1	Penyangga jenis ISMB 100.....	114
4.2.4.2	Penyangga jenis L 90x90x12 .....	115
4.2.4.3	Penyangga jenis L 100x100x12 .....	116
4.2.4.4	Penyangga jenis L 100x100x10 .....	117
4.2.4.5	Penyangga jenis L 120x120x10 .....	118
4.2.4.6	Penyangga jenis L 120x120x8 .....	119
4.2.4.7	Penyangga jenis L 80x80x10 .....	120
4.2.4.8	Penyangga jenis L 90x90x10 .....	121
4.2.4.9	Penyangga jenis L 100x100x8 .....	122
4.2.4.10	Penyangga jenis cross bracing 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10 .....	123
4.2.4.11	Penyangga jenis sway bracing 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10 .....	124
4.2.5	Perbandingan frekuensi natural setiap variasi penyangga dengan beban gempa yang terjadi.....	125
4.2.6	Perbandingan total deformasi pada setiap penyangga akibat beban Angin.....	127
4.2.7	Perbandingan nilai <i>safety factor</i> pada setiap penyangga .....	128
4.2.8	Analisa <i>Buckling</i> pada setiap penyangga.....	128
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....		130
5.1	Kesimpulan .....	130
5.2	Saran .....	130
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		131
<b>LAMPIRAN</b> .....		133
<b>BIODATA PENULIS</b> .....		142

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Proses Separator Vessel Horizontal .....	6
<b>Gambar 2.2</b> Skema Separator Vessel Vertikal.....	6
<b>Gambar 2.3</b> Proses Separator Vessel Vertikal .....	7
<b>Gambar 2.4</b> Detail Separator Vessel.....	7
<b>Gambar 2.5</b> Drum Vessel Vertikal.....	8
<b>Gambar 2.6</b> Proses Knockout Drum Vertikal .....	9
<b>Gambar 2.7</b> Proses Separator Column .....	10
<b>Gambar 2.8</b> Proses Column .....	11
<b>Gambar 2.9</b> Proses Distilasi bertingkat.....	11
<b>Gambar 2.10</b> 2:1 Ellipsoidal Head.....	13
<b>Gambar 2.11</b> Hemispherical head.....	14
<b>Gambar 2.12</b> Conical head.....	14
<b>Gambar 2.13</b> Torispherical head.....	15
<b>Gambar 2.14</b> Flange head .....	16
<b>Gambar 2.15</b> Opening tanpa reinforcements. ....	16
<b>Gambar 2.16</b> Reinforcements Opening.....	16
<b>Gambar 2.17</b> Saddle Support .....	17
<b>Gambar 2.18</b> Leg Support.....	19
<b>Gambar 2.19</b> Lug Support.....	20
<b>Gambar 2.20</b> Skirt Support .....	21
<b>Gambar 2.21</b> Kategori Sambungan Las pada Bejana Tekan. ....	23
<b>Gambar 2.22</b> Tipe-tipe Sambungan Las. ....	24
<b>Gambar 2.23</b> Skema Getaran .....	24
<b>Gambar 2.24</b> Model Linier SDOF .....	26
<b>Gambar 2.25</b> Model Linier Two Degree of Freedom .....	26
<b>Gambar 2.26</b> Pembebanan Batang .....	28
<b>Gambar 2.27</b> Komponen tegangan dalam 3D.....	28
<b>Gambar 2.28</b> Kurva Tegangan-Regangan.....	30
<b>Gambar 2.29</b> The four Euler Buckling Modes.....	31
<b>Gambar 2.30</b> Kecepatan Angin Dasar untuk Kategori Resiko III Bangunan dan Struktur Lain .....	36
<b>Gambar 2.31</b> Bejana Tekan Vertikal.....	37
<b>Gambar 2.32</b> Diagram gaya pada bejana tekan vertikal .....	39
<b>Gambar 2.33</b> Jumlah tipikal kaki penyangga bejana tekan.....	41
<b>Gambar 2.34</b> Variasi konfigurasi kaki penyangga.....	41
<b>Gambar 2.35</b> Variasi konfigurasi kaki penyangga.....	42
<b>Gambar 2.36</b> <i>Load diagrams for horizontal load distribution</i> .....	43
<b>Gambar 2.37</b> <i>Load diagrams for vertical load distribution</i> .....	45
<b>Gambar 2.38</b> <i>Typical dimensional data, forces, and loadings on a nonuniform vessel supported on a skirt</i> .....	46
<b>Gambar 2.39</b> Parameter gerak tanah $S_s$ , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2 detik (redaman kritis 5%) .....	48
<b>Gambar 2.40</b> Parameter gerak tanah $S_1$ , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2 detik (redaman kritis 5%) .....	49

<b>Gambar 2.41</b> PGA Gempa maksimum yang dipertimbangkan rata-rata geometrik ( $MCE_G$ ) wilayah Indonesia.....	49
<b>Gambar 2.42</b> $C_{RS}$ koefisien risiko terpetakan, periode spektrum respons 0,2 detik .....	49
<b>Gambar 2.43</b> $C_{R1}$ koefisien risiko terpetakan, periode <i>respons spectral</i> 1 detik .....	50
<b>Gambar 2.44</b> Peta transisi periode Panjang, $T_L$ , wilayah Indonesia .....	50
<b>Gambar 2.45</b> Batas Deformasi .....	51
<b>Gambar 2.46</b> Distribusi Beban Angin terhadap Ketinggian .....	52
<b>Gambar 2.47</b> (a) <i>Seismic load diagram</i> (b) <i>Seismic shear diagram</i> .....	53
<b>Gambar 2.48</b> (a) Domain batas melengkung acak dimodelkan menggunakan elemen persegi. Area bergaris tidak termasuk dalam model. Dengan total 41 elemen. (b) <i>Mesh</i> elemen hingga yang diperhalus yang menunjukkan pengurangan area yang tidak termasuk dalam model.....	54
<b>Gambar 2.49</b> (a) Silinder melingkar tirus yang dikenai beban tarik: $r(x)=r_0 (x/L)(r_0-r_L)$ . (b) Silinder tirus sebagai elemen aksial (batang) tunggal menggunakan luas rata-rata. Silinder tirus yang sebenarnya ditampilkan sebagai garis putus-putus. (c) Silinder tirus dimodelkan sebagai dua elemen hingga dengan panjang yang sama. Luas setiap elemen rata-rata di atas panjang silinder runcing masing-masing. (d) Silinder melingkar tirus yang dimodelkan sebagai empat elemen hingga dengan panjang yang sama. Area rata-rata di atas panjang masing-masing silinder (panjang elemen= $L/4$ ).....	55
<b>Gambar 2.50</b> <i>Modal Analysis</i> .....	56
<b>Gambar 2.51</b> Batasan daerah <i>viscous sub-layer, buffer layer, dan log-law region</i> .....	58
<b>Gambar 2.52</b> Uji Konvergensi .....	60
<b>Gambar 2.53</b> Bejana tekan yang digunakan .....	60
<b>Gambar 2.54</b> Tegangan maksimum pada shell akibat dari $D+L+P+T \pm (E_x+0,3E_y+0,3E_z)/4$ .....	61
<b>Gambar 2.55</b> Kontur tegangan tanah di bawah pengaruh kombinasi beban kritis .....	61
<b>Gambar 2.56</b> Tegangan maksimum pada <i>shell</i> akibat dari $D+L+P+T \pm (E_x+0,3E_y+0,3E_z)/3,5$ .....	61
<b>Gambar 2.57</b> Kontur tegangan tanah di bawah pengaruh kombinasi beban kritis .....	61
<b>Gambar 2.58</b> Model geometri bejana tekan vertikal.....	62
<b>Gambar 2.59</b> <i>Meshing</i> bejana tekan vertikal.....	63
<b>Gambar 2.60</b> Hasil Analisa FEM (a) Kurva <i>angle</i> terhadap deformasi, (b) Kurva <i>angle</i> terhadap tegangan.....	63
<b>Gambar 2.61</b> Hasil Simulasi <i>Static Structural</i> pada software Ansys v12.0.....	63
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....	65
<b>Gambar 3.2</b> Bejana Tekan.....	67
<b>Gambar 3.3</b> (a) 4 Leg Support (b) 3 Leg Support.....	68
<b>Gambar 3.4</b> Gambar Teknik Penyangga Bejana Tekan.....	68
<b>Gambar 3.5</b> Diagram Alir Simulasi Beban Angin .....	69
<b>Gambar 3.6</b> Meshing Domain Fluida.....	69
<b>Gambar 3.7</b> Distribusi <i>pressure</i> .....	70
<b>Gambar 3.8</b> Link fluid flow to static structural.....	70
<b>Gambar 3.9</b> Diagram Alir Simulasi Beban Gempa .....	72
<b>Gambar 3.10</b> <i>Meshing</i> pada bejana tekan .....	73
<b>Gambar 3.11</b> Transfer data simulasi antar modul .....	73
<b>Gambar 3.12</b> Respons Spektra Gempa .....	74
<b>Gambar 3.13</b> <i>Mesh Metric</i> .....	76
<b>Gambar 3.14</b> <i>Skewness and Orthogonal Quality Mesh Metric Spectrum</i> .....	76
<b>Gambar 4.1</b> Batas Deformasi .....	77

<b>Gambar 4.2</b> Spektral percepatan gempa untuk periode kecepatan .....	78
<b>Gambar 4.3</b> Spektral percepatan gempa untuk frekuensi .....	78
<b>Gambar 4.4</b> Grafik uji konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 90x90x1279	
<b>Gambar 4.5</b> Grafik uji konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x12	80
<b>Gambar 4.6</b> Grafik uji konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x10	81
<b>Gambar 4.7</b> Grafik <i>Scaled Residuals</i> dengan Jumlah Iterasi 700 .....	81
<b>Gambar 4.8</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	83
<b>Gambar 4.9</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	83
<b>Gambar 4.10</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	83
<b>Gambar 4.11</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	83
<b>Gambar 4.12</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	84
<b>Gambar 4.13</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	85
<b>Gambar 4.14</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	85
<b>Gambar 4.15</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	85
<b>Gambar 4.16</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	86
<b>Gambar 4.17</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	86
<b>Gambar 4.18</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	87
<b>Gambar 4.19</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	87
<b>Gambar 4.20</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	88
<b>Gambar 4.21</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	88
<b>Gambar 4.22</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	88
<b>Gambar 4.23</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	89
<b>Gambar 4.24</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	90
<b>Gambar 4.25</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	90
<b>Gambar 4.26</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	90
<b>Gambar 4.27</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	90
<b>Gambar 4.28</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	91
<b>Gambar 4.29</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	92
<b>Gambar 4.30</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	92
<b>Gambar 4.31</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	92
<b>Gambar 4.32</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	93
<b>Gambar 4.33</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	93
<b>Gambar 4.34</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	94
<b>Gambar 4.35</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	94
<b>Gambar 4.36</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	95
<b>Gambar 4.37</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	95
<b>Gambar 4.38</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	95
<b>Gambar 4.39</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	96
<b>Gambar 4.40</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	97
<b>Gambar 4.41</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	97
<b>Gambar 4.42</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	97
<b>Gambar 4.43</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	97
<b>Gambar 4.44</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	98
<b>Gambar 4.45</b> <i>Mode Shapes</i> 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	99
<b>Gambar 4.46</b> <i>Mode Shapes</i> 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	99
<b>Gambar 4.47</b> <i>Mode Shapes</i> 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	99
<b>Gambar 4.48</b> <i>Mode Shapes</i> 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	100

<b>Gambar 4.49</b> <i>Mode Shapes 2</i> (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	100
<b>Gambar 4.50</b> <i>Mode Shapes 3</i> (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	101
<b>Gambar 4.51</b> <i>Mode Shapes 4</i> (a) Keadaan awal (b) Total deformasi .....	101
<b>Gambar 4.52</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	102
<b>Gambar 4.53</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	103
<b>Gambar 4.54</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	103
<b>Gambar 4.55</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	104
<b>Gambar 4.56</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	104
<b>Gambar 4.57</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	105
<b>Gambar 4.58</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	105
<b>Gambar 4.59</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	106
<b>Gambar 4.60</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	106
<b>Gambar 4.61</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	107
<b>Gambar 4.62</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	107
<b>Gambar 4.63</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	108
<b>Gambar 4.64</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	108
<b>Gambar 4.65</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	109
<b>Gambar 4.66</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	109
<b>Gambar 4.67</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	110
<b>Gambar 4.68</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	110
<b>Gambar 4.69</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	111
<b>Gambar 4.70</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	111
<b>Gambar 4.71</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	112
<b>Gambar 4.70</b> Total Deformasi pada <i>Response Spectrum</i> .....	112
<b>Gambar 4.71</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban gempa .....	113
<b>Gambar 4.72</b> Distribusi <i>pressure</i> akibat beban angin .....	114
<b>Gambar 4.73</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	115
<b>Gambar 4.74</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	115
<b>Gambar 4.75</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	116
<b>Gambar 4.76</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	116
<b>Gambar 4.77</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	117
<b>Gambar 4.78</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	117
<b>Gambar 4.79</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	118
<b>Gambar 4.80</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	118
<b>Gambar 4.81</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	119
<b>Gambar 4.82</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	119
<b>Gambar 4.83</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	120
<b>Gambar 4.84</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	120
<b>Gambar 4.85</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	121
<b>Gambar 4.86</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	121
<b>Gambar 4.87</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	122
<b>Gambar 4.88</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	122
<b>Gambar 4.89</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	123
<b>Gambar 4.90</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	123
<b>Gambar 4.91</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	124
<b>Gambar 4.92</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	124
<b>Gambar 4.91</b> Total Deformasi pada <i>Static Structural</i> .....	125
<b>Gambar 4.92</b> <i>Equivalent Stress (von-misses)</i> pada bejana tekan akibat beban angin.....	125
<b>Gambar 4.93</b> Grafik nilai frekuensi natural dengan variasi penyangga bejana tekan.....	126

<b>Gambar 4.94</b> Nilai hasil deformasi dengan variasi penyangga bejana tekan akibat beban angin.....	127
<b>Gambar 4.95</b> Nilai <i>safety factor</i> pada setiap variasi penyangga.....	128
<b>Gambar 4.96</b> Nilai <i>safety</i> pada setiap variasi penyangga .....	129
<b>Gambar 4.97</b> Nilai <i>buckling stress</i> pada setiap variasi penyangga.....	129

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Pemisahan Senyawa.....	10
<b>Tabel 2.2</b> Tabel Nilai Faktor M .....	15
<b>Tabel 2.3</b> Kategori Resiko Bangunan dan Struktur lainnya untuk Beban Banjir, Angin, Salju, Gempa dan Es .....	35
<b>Tabel 2.4</b> <i>Miscellaneous coefficients</i> .....	38
<b>Tabel 2.5</b> <i>Vertical load</i> untuk setiap variasi jumlah kaki .....	43
<b>Tabel 2.6</b> Formula untuk setiap kasus .....	45
<b>Tabel 2.7</b> <i>Period of Vibration (POV)</i> .....	46
<b>Tabel 2.8</b> <i>Shear &amp; Momen</i> .....	47
<b>Tabel 2.9</b> Tegangan Longitudinal .....	47
<b>Tabel 2.10</b> Properti Bejana tekan.....	62
<b>Tabel 2.11</b> Perbandingan Penelitian .....	64
<b>Tabel 3.1</b> Beban Angin .....	66
<b>Tabel 3.2</b> Beban Gempa.....	66
<b>Tabel 3.3</b> Variasi Penelitian.....	67
<b>Tabel 3.4</b> <i>Properties SA516</i> .....	67
<b>Tabel 4.1</b> Uji Konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 90x90x12 .....	79
<b>Tabel 4.2</b> Uji Konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x12 .....	80
<b>Tabel 4.3</b> Uji Konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x10 .....	80
<b>Tabel 4.4</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 kaki jenis ISMB 100.....	82
<b>Tabel 4.5</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 kaki jenis L 90x90x12 .....	84
<b>Tabel 4.6</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 kaki jenis L 100x100x12 .....	86
<b>Tabel 4.7</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 kaki jenis L 100x100x10 .....	87
<b>Tabel 4.8</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 kakijenis L 120x120x10 .....	89
<b>Tabel 4.9</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 kaki jenis L 120x120x8 .....	91
<b>Tabel 4.10</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 4 kaki jenis L 80x80x10 .....	93
<b>Tabel 4.11</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 4 kaki jenis L 90x90x10 .....	94
<b>Tabel 4.12</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 4 kaki jenis L 100x100x8 .....	96
<b>Tabel 4.13</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 Kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10 .....	98
<b>Tabel 4.14</b> Data Hasil Modal Analysis pada penyangga 3 Kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10 .....	100

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Bejana tekan merupakan wadah untuk menahan tekanan, baik yang terjadi di internal maupun eksternal. tekanan ini dapat diperoleh dari sumber eksternal, dan penerapan panas dari sumber langsung atau tidak langsung, atau kombinasinya (M. Stewart & Lewis, 2013). Bejana tekan merupakan salah satu peralatan yang berperan penting dalam suatu proses di industri. Industri yang telah menggunakan di antaranya *oil* dan gas, kimia hingga industri makanan. Bejana tekan digunakan untuk menyimpan dan mengirimkan cairan, uap, dan gas di bawah tekanan (Chavan et al., 2013).

Salah satu bejana tekan yang digunakan di dalam industri adalah LP *Condensate Flash Drum*. Bejana tekan tersebut merupakan peralatan opsional yang digunakan untuk memisahkan gas dari pompa bertenaga dan *condensate*. Unsur yang lebih berat akan jatuh ke bawah dengan bantuan gravitasi sedangkan gas akan mengarah ke katup atas bejana tekan. Gas yang diperoleh kembali dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk *reboiler* dan penguapan gas. Setiap kelebihan gas dibuang melalui katup tekanan balik (M. I. Stewart, 2014). Tekanan yang terjadi dalam bejana tekan di jaga agar tetap stabil pada 3,5 kg/cm<sup>2</sup>g yang diharapkan pada tekanan tersebut terjadi pemisahan yang baik antara *steam* dan *condensate* yang terkandung di dalamnya. Pada *Condensate Flash Drum* tentunya juga terdapat sistem yang mengalirkan fluida masuk ke dalam tangki yaitu sistem pipa, *valve* dan lain – lain. *Condensate Flash Drum* dan sistem pengaliran lainnya sangat penting perannya pada industri, maka dari itu kondisi yang terjadi pada *Condensate Flash Drum* harus dipantau dan dijaga untuk menghindari hal yang tidak diinginkan seperti halnya kebocoran pada tangki, meledak dan lain sebagainya

Pada Bejana tekan desain beban yang terjadi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu beban utama dan beban tambahan. Beban utama merupakan beban yang ditimbulkan akibat desain tekanan, seperti berat maksimum bejana tekan beserta isinya dalam kondisi operasi, berat maksimum bejana tekan beserta isinya dalam kondisi uji hidraulik, angin, gempa bumi, dan beban yang ditimbulkan oleh bagian pendukung dalam bejana tekan. Beban tambahan disebabkan oleh tegangan lokal yang disebabkan oleh tumpuan, struktur internal dan pipa penghubung, beban kejut yang disebabkan eksentrisitas pusat dari tekanan relatif terhadap sumbu netral bejana tekan, tegangan karena suhu dan koefisien muai. perbedaan bahan dan beban yang disebabkan oleh fluktuasi suhu dan tekanan.(Prapti & Abdillah, 2015)

Beban angin dan gempa merupakan faktor yang sangat mempengaruhi terjadinya tekanan eksternal pada bejana tekan.(Prapti & Abdillah, 2015) beban angin dan gempa ini terjadi secara alami oleh alam, Dimana ditentukan berdasarkan letak geografis posisi penempatan bejana tekan. Beban angin dapat terjadi di seluruh tempat di permukaan bumi sedangkan beban gempa terjadi pada daerah yang memiliki gunung berapi aktif. Perhitungan Beban Angin didasarkan pada American Society of Civil Engineering (ASCE) 7-95 (Chavan et al., 2013) dan SNI 1727 (Badan Standardisasi Nasional, 2013). Peristiwa seismik atau gempa menyebabkan bejana tekan bergoyang secara siklik sebagai akibat dari gerakan tanah. Banyak beban yang dialami oleh bejana tekan tergantung pada beberapa hal yakni jenis pondasi dan penyangga, ukuran dan proporsi bejana tekan, lokasi geografis pemasangan bejana tekan, dan jenis tanah. Bejana tekan vertikal dengan bentuk silinder yang tinggi, tipis, dan ramping yang dipasang pada kemiringan, relatif fleksibel sehingga memiliki periode yang panjang dan frekuensi yang rendah. Begitu pun sebaliknya bejana tekan horizontal pendek akan memiliki periode pendek dan frekuensi

yang lebih tinggi. Bejana tekan yang dipasang di dalam atau di atas struktur akan dipengaruhi oleh kekakuan relatif dari struktur tersebut.(Moss & Basic, 2013)

Standar seismik didasarkan pada data geografis dan statistik daerah tertentu. Dalam standar ini memakai banyak sekali kriteria untuk memperkirakan beban dalam bejana tekan atau struktur dan kemungkinan terjadinya beberapa wilayah mempunyai probabilitas tinggi untuk terjadi gempa bumi yang sangat kuat. Daerah lain hampir bisa diabaikan pada hal peristiwa seismik. Kode dan baku seismik telah terdapat dari tahun 1920-an. Masyarakat industri terkini mempunyai anggaran bangunan yang ketat dalam memperhitungkan gempa bumi. Kode bangunan tidak mendefinisikan seluruh jenis mekanisme namun memungkinkan untuk banyak sekali mekanisme desain.(Moss & Basic, 2013)

Di Indonesia memiliki standar sendiri yang disebut Standar Nasional Indonesia (SNI) dimana mengatur banyak hal, standarisasi ini dikeluarkan oleh Badan Standar Nasional. Salah satu keluarannya adalah SNI 1727 yang memuat tentang ketentuan beban minimum untuk merancang bangunan Gedung dan struktur lain. Beban dan kombinasi pembebanan yang sesuai, telah dikembangkan dan harus digunakan bersama, baik untuk perancangan dengan metode kekuatan ataupun perancangan dengan metode tegangan izin. Untuk kuat rancang dan batas tegangan izin, spesifikasi perancangan bahan bangunan konvensional yang digunakan pada bangunan Gedung dan modifikasinya yang dimuat dalam standar ini(Badan Standardisasi Nasional, 2013) Dan SNI 1726 yang memuat tentang persyaratan minimum mengenai beban, tingkat bahaya, kriteria yang terkait, dan sasaran kinerja yang diperkirakan untuk bangunan gedung, struktur lain, dan komponen nonstrukturalnya yang memenuhi persyaratan peraturan bangunan. Beban, kombinasi pembebanan, dan kriteria terkait yang diberikan dalam standar ini harus digunakan untuk perancangan dengan metode kekuatan atau perancangan dengan metode tegangan izin yang terdapat dalam spesifikasi desain untuk material struktural konvensional. Kombinasi pembebanan dan kekuatan desain dianggap mampu memberikan tingkat kinerja yang diharapkan dalam ketentuan standar ini. Prosedur penerapan dengan cara alternatif untuk menunjukkan kinerja yang dapat diterima juga dijelaskan dalam standar ini.(Badan Standardisasi Nasional, 2019)

PT. Boma Bisma Indra adalah salah satu perusahaan yang bergerak di bidang konstruksi, fabrikasi dan manufaktur dengan produk utama yang dihasilkan adalah bejana tekan (*pressure vessel*), *heat exchanger*, *steam boiler* dan *condensor*. salah satu produk yang dikerjakan adalah bejana tekan jenis LP *Condensate flash drum* yang merupakan proyek RDMP V Balikpapan milik PT. Pertamina. perancangan bejana tekan dilakukan berdasarkan data *general arrangement drawing* dari *customer*. Bejana tekan memiliki kapasitas 3958 dm<sup>3</sup> dengan *design pressure* 3,5 kg/cm<sup>2</sup>g. dalam proses pengerjaan produk, tidak dilakukan proses analisa lanjutan pada penyangga akibat beban angin dan gempa oleh perusahaan melainkan langsung dikerjakan berdasarkan kesepakatan dengan *customer*. padahal analisa kekuatan dan kekauan penyangga ini perlu dipertimbangkan terutama dalam proses pemilihan material, bentuk profil dan jumlah. agar nantinya dapat menahan beban yang terjadi di lapangan.

Oleh karena itu pada tugas akhir ini penulis bertujuan untuk menganalisa bentuk profil dan jumlah kaki yang optimal pada penyangga jenis *leg* dalam menopang bejana tekan jenis LP *condensate flash drum* supaya didapatkan perencanaan yang matang, meminimalisir biaya maupun untuk menjaga tingkat keamanan *drum* nantinya saat beroperasi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam tugas akhir ini permasalahan yang menjadi pokok bahasan adalah sebagai berikut:

1. Berapa tegangan yang terjadi pada penyangga (*pressure vessel*) akibat gaya oleh beban angin dan *seismic* desain dengan menggunakan *software* elemen hingga?
2. Berapa deformasi yang terjadi pada penyangga (*pressure vessel*) akibat gaya oleh beban angin dan *seismic* desain dengan menggunakan *software* elemen hingga?
3. Bagaimana bentuk dan jumlah kaki yang paling efisien dalam desain terhadap tegangan yang dihasilkan saat kondisi desain?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak terlalu luas, maka perlu adanya batasan masalah pada tugas akhir ini, yaitu sebagai berikut :

1. Material yang digunakan adalah ASME SA 516 Gr. 70.
2. *Internal design pressure* yang digunakan sebesar : 3,5 kg/cm<sup>2</sup>.
3. *Internal design temperature* yang digunakan sebesar : 135 °C.
4. Bejana tekan (*pressure vessel*) yang dirancang adalah bejana tekan vertikal.
5. Fluida yang di pakai adalah steam.
6. Jenis kepala (*head*) yang dipakai adalah: *ellipsoidal head*.
7. Dimensi yang digunakan bejana tekan tersebut adalah sebagai berikut: Panjang TL to TL = 3100 mm.
8. Diameter dalam = 1200 mm.
9. Radiografi tes yang dipakai adalah spot.
10. Analisa tegangan dengan metode elemen hingga menggunakan bantuan *software* Ansys 21.2.
11. Jenis *support vessel* yang diteliti adalah *leg support* dengan bentuk profil H *Beam* dan L *Beam* serta variasi jumlah kaki sebanyak 3, 4, 6 kaki dan *bracing*..
12. Kode yang digunakan dalam penelitian adalah ASCE 7-16, SNI 1727 dan SNI 1726.
13. Proses sambungan las dianggap memenuhi standar
14. Perancangan bejana tekan (*pressure vessel*) berdasarkan kode ASME Sect. VIII div. 1.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui keamanan bejana tekan dengan meninjau tegangan yang terjadi pada bejana tekan akibat gaya oleh beban angin dan *seismic* desain dengan menggunakan *software* elemen hingga.
2. Mengetahui keamanan bejana tekan dengan meninjau deformasi yang terjadi pada bejana tekan akibat gaya oleh beban angin dan *seismic* desain dengan menggunakan *software* elemen hingga.
3. Mengetahui bentuk profil dan jumlah kaki yang paling efisien dalam desain terhadap tegangan yang dihasilkan saat kondisi desain.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah

1. Sebagai bahan pertimbangan dalam mengembangkan atau merancang sebuah *support* bejana tekan (*pressure vessel*) yang lebih efisien.
2. Mengetahui bentuk profil dan jumlah kaki yang paling efisien dan kuat yang bisa dipakai.
3. Memperluas hasanah ilmu pengetahuan yang bermanfaat bagi perkembangan teknologi dan industri di Indonesia.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Bejana Tekan (*Pressure Vessel*).**

*Pressure vessel* merupakan tangki yang digunakan untuk penyimpanan fluida. Biasanya fluida yang disimpan dalam *pressure vessel* merupakan fluida yang memiliki karakteristik maupun perlakuan khusus, misalnya fluida bertekanan, fluida dalam temperatur rendah dll (Santoso & Soeweify, 2018). Bejana tekan merupakan salah satu alat suatu industri yang penting, khususnya untuk industri kimia, perminyakan dan pembangkit listrik seperti pada pembangkit tenaga nuklir.

Perancangan *pressure vessel* perlu memerhatikan beberapa hal penting, di antaranya:

1. Tegangan yang terjadi pada dinding *pressure vessel* akibat dari adanya perbedaan tekanan antara luar dan dalam *pressure vessel*.
2. Berat jenis material yang digunakan.
3. Tekanan eksternal yang diterima, seperti beban angin dan gempa
4. Suhu kerja yang diterima oleh *pressure vessel* saat beroperasi, baik dari dalam maupun luar *pressure vessel*.
5. Dimensi *pressure vessel* baik diameter terluar dan panjang, dikarenakan mempengaruhi letak penempatan *pressure vessel* dengan area yang tersedia.
6. Sifat-sifat bahan membantu untuk mengetahui kandungan didalam material dan mengetahui sifat-sifat bahan, seperti: tegangan maksimum yang diizinkan, titik leleh, dll.

#### **2.2 Jenis-jenis Bejana Tekan (*Pressure Vessel*)**

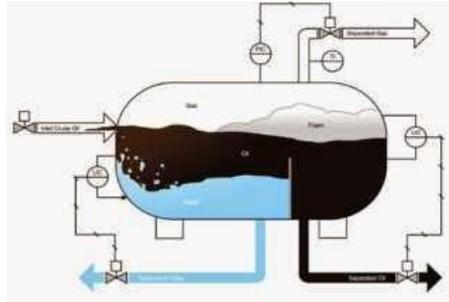
Bejana Tekan (*Pressure Vessel*) dapat dikategorikan dengan melihat proses yang terjadi di dalamnya. Tidak ada aturan baku yang mengatur tentang penamaan dan pengklasifikasian bejana tekan. Bejana tekan adalah wadah yang memuat fluida bertekanan. Sedangkan untuk memuat fluida tidak bertekanan dinamakan dengan *drum*, sehingga di masukan dalam kategori *tank*.

Adapun jenis-jenis bejana tekan (*pressure vessel*) yang dapat di golongan berdasarkan proses yang ada di dalamnya adalah sebagai berikut :

##### **2.2.1 Separator vessel**

*Separator* merupakan jenis bejana tekan yang dipakai untuk memisahkan. Sesuai dengan namanya, *separate* yang memiliki arti memisahkan. Biasanya dipakai untuk memisahkan air, minyak & gas berdasarkan *crude oil* yang masuk ke dalam bejana tekan ini.

*Separator* terdiri dari 2 tipe, yaitu *test separator* & *production separator*. *Test separator* dipakai untuk mengukur kadar produksi dari sebuah sumur, dari sini dapat diketahui laju produksi. Sedangkan pada *production separator*, bertugas untuk memproduksi. Artinya minyak yang sudah dipisahkan dari air dan gas lainnya, hasil dari pemisahan yang telah dilakukan ini nantinya akan dipakai oleh unit produksi (Drieant, 2014).



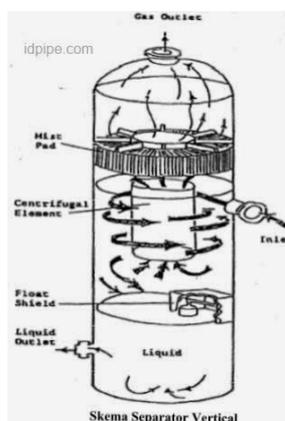
**Gambar 2.1** Proses *Separator Vessel Horizontal*  
 Sumber : (Drieant, 2014)

Berikut ini merupakan proses kerja dari *separator*, terlihat pada gambar di atas. *Crude oil* yang masuk pada saluran *inlet*, masih mengandung unsur air dan gas. Unsur tadi lalu dipisahkan pada separator.

Air (berwarna biru) yang memiliki masa jenis lebih tinggi, maka akan selalu berada di bawah dan akan tertahan oleh bevel. Sedangkan oil (berwarna hitam) akan diteruskan, karena mempunyai massa jenis yang lebih rendah sehingga berada di atas air. Sedangkan kandungan gas, akan permanen berada di atas bejana tekan yang kemudian dikeluarkan melalui jalur gas sendiri. ketiga fase tersebut tidak akan bercampur dan dikeluarkan melalui outlet masing-masing.

Dari hasil yang sudah dipisahkan, umumnya masih belum sempurna. Oleh karena itu pada suatu skema pembangkit umumnya terdiri tidak hanya satu separator, umumnya sesudah pemisahan pertama akan terdapat pemisahan taraf ke 2 atau disebut two stage separator atau jika perlu hingga tiga taraf pemisahan untuk menjamin kualitas fluida yang dipisahkan relatif baik.

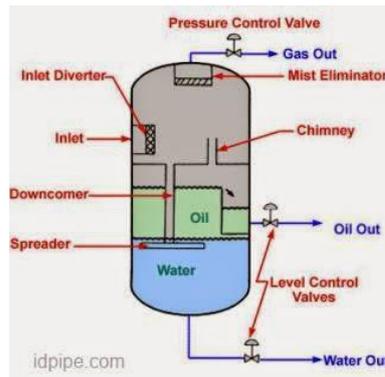
Berdasarkan orientasi separator, terdiri dari 2 tipe yakni separator horizontal dan separator vertikal. Separator vertikal mempunyai kelebihan bisa mengolah padatan yang dihasilkan, misalnya pasir atau lumpur. Separator jenis ini bisa dipakai pada ruang terbatas, untuk GOR yang rendah dan level kontrol yang mudah. Keuntungan lainnya pada separator vessel vertikal ialah mempunyai drainase (saluran pembuangan) yang bagus berada di bawah, liquid-level kontrol yang tidak terlalu kritis, bisa di tempatkan dalam posisi yang sempit. Penempatan yang kecil ini juga memiliki tantangan yang cukup rumit, lantaran sifatnya yang tinggi, maka untuk penempatan dan pengoperasian instrumen yang tinggi memerlukan *platform* dan *ladder*(Drieant, 2014).



**Gambar 2.2** Skema *Separator Vessel Vertikal*  
 Sumber : (Drieant, 2014)

*Separator* vertikal terkadang menggunakan prinsip sentrifugal pada pemisahannya, gaya sentrifugal inilah yang nantinya mendorong fluida ke dinding (shell), sebagai akibatnya fluida kerja nantinya tertumbuk dan jatuh ke bawah sementara gas akan terlewatkan ke bagian outlet-nya, sehingga terpisah antara udara dan gas.

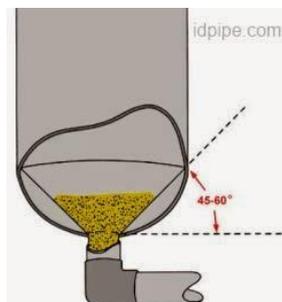
Melalui Mist Extractor, maka gas yang keluar dari separator ini lebih terjamin bebas liquid. Lantaran fungsi dari Mist Extractor merupakan alat untuk menyaring liquid. Ada kalanya separator tidak menggunakan prinsip sentrifugal, tetapi seperti cara kerjanya menggunakan horizontal vessel hanya letaknya saja sebagai vertikal. Di sinilah peran dari internal vessel, di samping pengaruh dari *Mist Extractor*, yang akan menjamin gas terpisah dari *liquid*.



**Gambar 2.3** Proses *Separator Vessel* Vertikal  
Sumber : (Drieant, 2014)

Prinsip kerja separator vertikal mirip seperti menggunakan horizontal *separator vessel*, aliran dari *inlet* akan menabrak *diverter* yang memisahkan sebagian besar gas dari fluida. Fluida ini nantinya akan mengalir melalui *downcomer*, dan ia nanti akan keluar melalui bagian paling bawah yaitu pada *spreader*, sebagai akibatnya instrumen pembaca *oil* nantinya tidak terpengaruh terhadap aliran ini. *chemnery* akan berfungsi menjadi penyeimbang tekanan gas antara pengumpul liquid bagian bawah, dengan bagian atasnya (Drieant, 2014).

*Spreader* berlokasi pada bagian paling bawah berfungsi untuk mengalirkan fluida menuju outlet. Minyak dan air yang keluar dari saluran ini akan terpisah, Ketika *oil* mengalir dari saluran ini, ia akan naik ke atas karena perbedaan massa jenis dimana massa jenisnya lebih rendah daripada air dimana tempat *spreader* ini keluar.



**Gambar 2.4** Detail *Separator Vessel*  
Sumber : (Drieant, 2014)

Terkadang, Ketika fluida hasil dari sumur pasir. *Separator* vertikal dilengkapi *cone* pada posisi bagian bawahnya, sehingga pasir bisa terkumpul. *cone* dibentuk menggunakan

sudut 45-60 derajat, lantaran pada sudut 45 derajat pasir akan cenderung terkumpul dalam dinding dan tidak mau turun.

a. Nama lain *Separator Vessel*

*Separator vessel* tidak hanya memiliki satu nama, beberapa perusahaan terkadang memberikan nama yang berbeda tetapi memiliki fungsi yang sama dengan *separator*. *Separator* ini, memiliki nama lain sebagai berikut :

- *Oil/gas separator*
- *Gas/liquid separator, Degasser*
- *Deliquifier, Scrubber, Trap*

b. Bagian-bagian dalam *Separator Vessel*

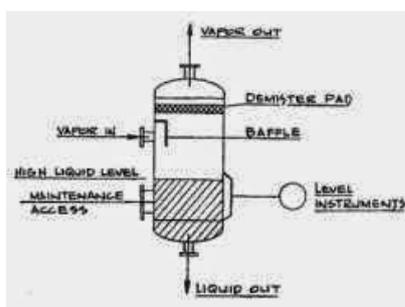
Dalam *separator vessel* baik itu vertikal *separator* atau horizontal *separator*, pada umumnya akan menemukan beberapa istilah berikut ini. Yang merupakan bagian-bagian yang ada di dalam *Separator Vessel* Di antara lain.

- *Inlet, Baffles*
- *Diverter / Deflector*
- *Separation enhancement device*
- *Mist extraction, Various weirs to, Vortex breaker*
- *Liquid level/interface detection and control, etc.;*
- *Gas, oil, water outlet;*
- *Pressure relief devices*

Beberapa istilah di atas lebih di persempit dari istilah *vessel* karena ada beberapa terminologi untuk internal *vessel*, yang nantinya bekerja untuk memaksimalkan pemisah (*separator*) ini.

### 2.2.2 Drum vessel

*Drum vessel* merupakan jenis bejana tekan (*pressure vessel*) yang dipakai untuk menampung fluida, tugas utamanya ialah menampung fluida baik berdasarkan *destilator* atau *condenser*. Fluida tersebut lalu dipompakan ke proses yang lain, baik ke pembuangan atau bahkan ke unit produksi. Yang termasuk pada kategori drum merupakan tipe yang dipakai untuk *refluxing* (mengalirkan balik), *surge*, *suction* dan jenis pengumpul cairan lainnya. Jika dibagi secara umum, drum seperti halnya bejana tekan bisa dibedakan sebagai *drum* horizontal dan vertikal (Drieant, 2014).



**Gambar 2.5** *Drum Vessel* Vertikal  
Sumber : (Drieant, 2014)

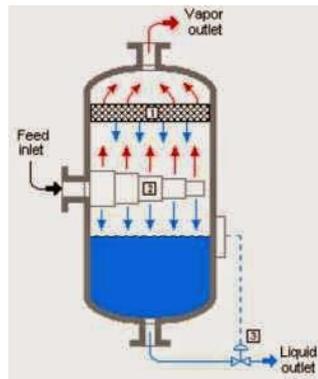
Bejana tekan jenis drum ini, ada yang dapat berdiri sendiri dan terdapat juga yang berhubungan dengan bagian lain. Seperti *reflux drum*, karena berfungsi mengalirkan kembali fluida, maka letaknya umumnya berdekatan dengan pompa sebagai alat untuk mengalirkan fluida. *Drum* ini dapat di bagi menjadi beberapa jenis, di antaranya adalah :

a. *Reflux Accumulator Drum*

Umumnya *reflux accumulator* merupakan jenis *horizontal vessel* tanpa bagian internal yang bertugas untuk mengumpulkan fluida dan kemudian mengalirkannya sebagian kembali ke *fractionation top tray*.

b. *Knockout Drum*

*Drum* jenis ini bertugas mengumpulkan fluida dari pipa yang masih mempunyai kandungan gas. Fluida dipisahkan menggunakan *demister*, suatu pengumpul fluida seperti saringan, setelah fluida terkumpul maka ia akan jatuh ke bawah dipengaruhi oleh gaya gravitasi.



**Gambar 2.6** Proses *Knockout Drum* Vertikal  
Sumber : (Drieant, 2014)

c. *Flash Drum*

Adalah tipe bejana tekan (*pressure vessel*) yang dipakai untuk semua atau sebagian dari cairan (*liquid*) yang bertekanan tinggi dengan menempatkannya dalam bejana tekan (*pressure vessel*) yang bertekanan rendah

d. *Blowdown Drum*

Adalah tipe dari bejana tekan (*pressure vessel*) yang digunakan untuk mengumpulkan dan mengeluarkan gas sisa yang ditimbulkan dari sebuah sistem ke udara bebas secara aman.

e. *Reactor*

*Reactor* adalah salah satu jenis bejana tekan (*pressure vessel*) yang digunakan untuk reaksi kimia. *Vessel* ini memuat katalis (suatu zat seperti tepung yang berfungsi sebagai perantara zat lainnya) kemudian katalis tersebut dikembalikan (*regenerates*) ke dalam *reactor* untuk digunakan kembali.

### 2.2.3 *Tower vessel*

*Tower* atau istilahnya *column*, merupakan peralatan yang paling utama dalam sebuah fasilitas proses. *Column* umumnya berbentuk bejana tekan vertikal, pada sebuah sistem di industri yang paling menonjol lantaran bentuk bejana tekannya paling tinggi sendiri dibanding bejana tekan yang lain. *Tower* ini dipakai untuk menyaring dan memisahkan bahan mentah (*crude oil*) yang masih terdiri beraneka macam fase, disebut juga dengan *fractionation column* (Drieant, 2014). Minyak mentah atau *crude oil* merupakan campuran dari hidrokarbon yang mempunyai titik didih beragam. Antara 38°C hingga 760°C. Pemisahan di *tower* ini memanfaatkan titik didih yang beraneka ragam.



**Gambar 2.7** Proses *Separator Column*  
 Sumber : (Drieant, 2014)

Seperti halnya dengan *separator vessel* pada *column* juga dilakukan proses pemisahan. Bedanya proses pemisahan minyak mentah di dalam kolom menggunakan proses destilasi. Pada separator proses pemisahan fluida dilakukan pada suhu kamar. Sedangkan pada destilasi, memanfaatkan panas untuk memisahkan senyawa yang terdapat di dalamnya

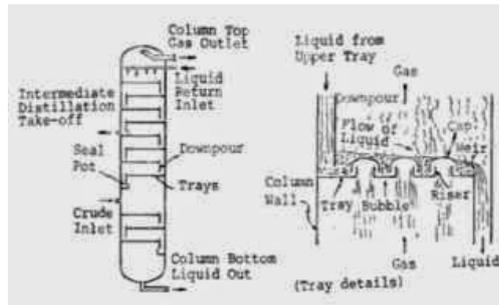
a. Proses Pemisahan pada *Column*

Pada dasarnya proses destilasi ini memanfaatkan titik didih dari *crude oil* yang berbeda-beda. Seperti yang diketahui, jika minyak bumi merupakan senyawa yang terdiri dari sekitar 50% - 98% hidrokarbon dengan titik didih yang bervariasi, mulai dari -160°C (metan) hingga 500°C (bitumen). Dua *range* titik didih yang bervariasi ini, masih terdapat aneka macam campuran senyawa lain, yakni : *Fuel gases* (LPG dan CMG) kebagian bawah terdapat *Naphtha*, *Gasoline*, *Diesel*, *Jet Fuels*, *Kerosene*, *Gas Oils*, dan juga jenis-jenis pelumas misalnya : *Greases*, *Heavy Fuels*, *Waxe* (Drieant, 2014). *Crude oil* memiliki banyak campuran senyawa yang bisa di pisahkan sebagai berikut :

**Tabel 2.1** Pemisahan Senyawa

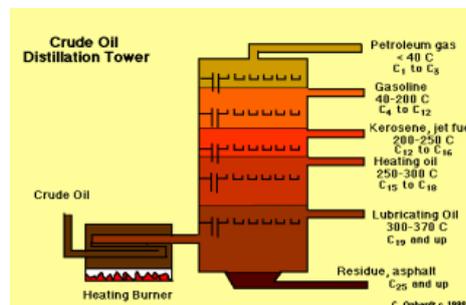
No	Rentang Pendidihan (°C)		Rentang Kasar Atom C n-parafin	Nama Fraksi/Produk
	ASTM	TBP		
1	< 30	< 30	C <sub>1</sub> – C <sub>6</sub>	Gas Kilang
2	30 – 100	30 – 90	C <sub>6</sub> – C <sub>7</sub>	Nafta Ringan ( <i>Straight Run Gasoline</i> )
3	80 – 200	85 – 190	C <sub>7</sub> – C <sub>11</sub>	Nafta
4	165 – 280	190 – 270	C <sub>10</sub> – C <sub>16</sub>	Kerosin
5	215 – 340	270 – 320	C <sub>12</sub> – C <sub>19</sub>	Minyak Gas Ringan ( <i>Light Gas Oil</i> )
6	290 - 440	320 – 430	C <sub>16</sub> – C <sub>26</sub>	Minyak Gas Atmosferik ( <i>Heavy Gas Oil</i> )
7	> 400	> 430	> C <sub>25</sub>	Residu ( <i>Topped Crude</i> )

b. Proses Pemisahan Senyawa dalam *Column*



**Gambar 2.8** Proses *Column*  
Sumber : (Drieant, 2014)

Di dalam sebuah *column*, terdapat *tray* bertingkat. *Tray* ini nanti akan melewati gas, namun tidak membiarkan gas tersebut kembali. Ketika minyak yang telah di panaskan masuk ke dalam *column*, sebagian minyak yang titik didihnya rendah akan berubah menjadi gas. Gas ini akan naik ke atas, melewati setiap *tray*, ketika melewati *tray* maka sebagian dari gas akan turun suhunya karena bersentuhan dengan liquid yang suhunya lebih rendah. Senyawa yang suhunya turun ini akan mengendap dan terpisah. Kemudian sebagian gas yang suhunya masih tinggi, akan naik ke *tray* berikutnya, dan ada pula yang terpisah. Begitu seterusnya sampai dengan yang paling tinggi ia akan memiliki suhu tinggi, dan berangsur ke bawah suhunya semakin rendah sampai dengan yang paling bawah (Drieant, 2014).



**Gambar 2.9** Proses Distilasi bertingkat  
Sumber : (Drieant, 2014)

Perbedaan temperatur setiap *tray* inilah yang nantinya memisahkan senyawa tersebut, ia akan dialirkan dalam pipa yang berbeda. Yang pada akhirnya di kelompokkan menjadi beberapa jenis, dari sini proses akan masih terus berlanjut untuk memurnikan senyawa *crude oil* yang telah di pisahkan oleh *column*.

### 2.3 Bagian-bagian Bejana Tekan

Pada bejana tekan terdapat beberapa bagian yang pasti ada pada setiap bejana tekan. Bagian-bagian tersebut sebagai berikut; *shell*, *head*, *nozzle*, *support*, dan *platform*.

#### 2.3.1 *Shell*

*Shell* adalah komponen utama yang berisi fluida yang bertekanan. Umumnya terdapat dua tipe *shell* yang ada yaitu *shell* silindris dan *spherical shell*. Biasanya yang sering digunakan dalam desain bejana tekan adalah *shell* tipe silindris. *Shell* sendiri merupakan plat lembaran yang di bentuk dengan cara di *roll* sampai menjadi silindris.

Ketebalan *shell* dipengaruhi oleh tekanan desain. Terdapat 2 tekanan desain yaitu tekanan desain internal dan tekanan desain eksternal. Untuk menentukan ketebalan *shell* harus memperhatikan beban yang terjadi pada *shell*. Arah penyambungan *shell* juga akan mempengaruhi perhitungan ketebalan *shell*.

A. Ketebalan *shell* berdasarkan *internal pressure design*

Berdasarkan standar ASME (*American Society of Mechanical Engineering*), ketebalan *shell* dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

1. Sambungan memanjang (*longitudinal joint*).

Untuk sambungan jenis ini ketebalan *shell* harus bisa menahan tegangan yang terjadi. Tegangan yang dominan pada sambungan memanjang adalah tegangan arah melingkar atau *circumferential stress* (ASME, 2019). Besarnya ketebalan *shell* ditentukan dengan persamaan berikut :

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (2.1)$$

dimana :

t = ketebalan minimum *shell* yang diperlukan (mm)

P = tekanan desain internal (kg/cm<sup>2</sup>)

R = jari-jari dalam *shell* (mm)

S = tegangan maksimum material (Kg/cm<sup>2</sup>)

E = efisiensi sambungan las

2. Sambungan melingkar (*circumferential joint*)

Sambungan melingkar harus bisa menahan tegangan arah *longitudinal* atau *longitudinal stress* (ASME, 2019). Untuk memenuhi kriteria tersebut maka ketebalan *shell* dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$t = \frac{PR}{2SE - 0,4P} \quad (2.2)$$

dimana :

t = ketebalan minimum *shell* yang diperlukan (mm)

P = tekanan desain internal (kg/cm<sup>2</sup>)

R = jari-jari dalam *shell* (mm)

S = tegangan maksimum material (Kg/cm<sup>2</sup>)

E = efisiensi sambungan las

B. Ketebalan *shell* berdasarkan tekanan luar (*external pressure design*)

Ketebalan *shell* untuk beberapa tipe sambungan berdasarkan *external pressure* dapat ditentukan dari persamaan di bawah ini.

1. Silinder dengan  $D_o/t \geq 10$  (ASME, 2019)

$$P = \frac{4B}{3(D_o / t)} \quad (2.3)$$

Atau dengan persamaan

$$P = \frac{2AE}{3(D_o/t)} \quad (2.4)$$

dimana :

$D_o$  = Diameter luar (mm)

$t$  = ketebalan minimum *shell* yang diperlukan (mm)

$E$  = efisiensi sambungan las

## 2. Silinder dengan $D_o/t < 10$

Harga faktor A dan B dilihat dari grafik UGO-28.0 dan UCS-28.2. Jika  $D_o/t < 4$  maka faktor A dapat ditentukan dengan persamaan berikut (ASME, 2019) :

$$A = \frac{1,1}{(D_o/t)} \quad (2.5)$$

Untuk harga A lebih besar dari 0,1 maka harga A yang dipakai adalah 0,1. Kemudian untuk menentukan harga tekanan eksternal ijin maksimum  $P_a$  dengan melihat nilai B dari grafik maka bisa ditentukan dengan persamaan berikut (ASME, 2019):

$$P_{a1} = \left[ \frac{2,167}{(D_o/t)} - 0,0833 \right] B \quad (2.6)$$

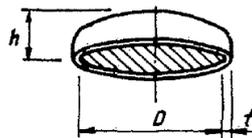
$$P_{a2} = \frac{2S}{D_o/t} \left[ 1 - \frac{1}{(D_o/t)} \right] \quad (2.7)$$

Dan di antara harga  $P_{a1}$  dan  $P_{a2}$  dicari harga yang paling kecil kemudian dijadikan sebagai tekanan kerja ijin maksimum eksternal  $P_a$ , kemudian bandingkan dengan  $P$  (tekanan desain eksternal). Apabila  $P_a$  lebih kecil dari  $P$  maka ketebalannya harus diperbesar dari harga semula (ASME, 2019).

### 2.3.2 Head

*Head* merupakan komponen utama dalam sebuah bejana tekan. Seluruh bejana tekan pasti ditutup dengan *head*. *Head* lebih dominan berbentuk kurva dari pada plat datar. Bentuk kurva memiliki keuntungan lebih di antaranya kuat sehingga ketebalan *head* bisa lebih tipis, lebih ringan namun lebih mahal dari biasanya. Berikut jenis *head* beserta persamaan untuk menentukan ketebalannya.

#### a. 2:1 Ellipsoidal Head



$$h = D/4$$

**Gambar 2.10** 2:1 Ellipsoidal Head

Sumber : (Megyesy, 2008)

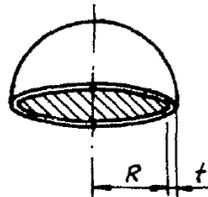
*Ellipsoidal head* adalah tipe yang paling umum, *head* jenis ini dibentuk oleh ruang

elips. Umumnya yang dibentuk adalah tipe 2:1 *ellipsoidal*, dengan perbandingan diameter vertikal dan horizontal sekitar 2 banding 1. Ketebalan *head* ini dapat di cari dengan persamaan sebagai berikut :

$$t = \frac{PD}{2SE + 1,8P} \quad (2.8)$$

$$P = \frac{2SEt}{D - 1,8t} \quad (2.9)$$

b. *Hemispherical head*



**Gambar 2.11** *Hemispherical head*

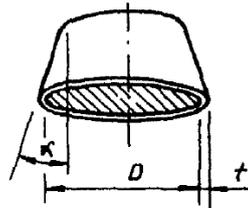
Sumber : (Megyesy, 2008)

*Hemispherical* dikenal juga dengan sebutan *sphare*, yaitu *head* yang dibuat dengan diameter sempurna R. Jenis *head* ini menyerupai setengah bola. Ketebalan *head* ini dapat di cari dengan persamaan sebagai berikut :

$$t = \frac{PR}{2SE + 0,8P} \quad (2.10)$$

$$P = \frac{2SEt}{D - 0,8t} \quad (2.11)$$

c. *Conical head*.



**Gambar 2.12** *Conical head*

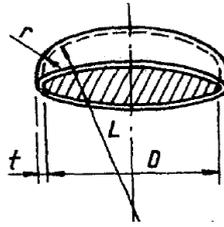
Sumber : (Megyesy, 2008)

*Cone* ini salah satu jenis *head* yang selanjutnya, meski jarang di temui di beberapa proyek, namun pernah di gunakan dalam *column vessel* atau *heat exchanger*. Ketebalan *head* ini dapat di cari dengan persamaan sebagai berikut :

$$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (2SE + 0,4P)} \quad (2.12)$$

$$P = \frac{2SEt \cos \alpha}{D - 0,8t \cos \alpha} \quad (2.13)$$

d. *Torispherical head*



**Gambar 2.13** *Torispherical head*  
Sumber : (Megyesy, 2008)

*Torispherical* ini termasuk jenis selanjutnya, jenis *torispherical* adalah yang paling umum. Perbedaan tipe *torispherical* dengan *2:1 elipsoidal*. Untuk tipe *torispherical* ini ia memiliki *crown radius* “R” dan juga terdapat *knuckle* disini, yaitu bagian samping dari sisi *head*. Di bagian *knucle* tidak boleh ada *nozzle* seperti yang diungkapkan oleh ASME, karena pada bagian ini adalah yang paling tipis, bagian yang mengalami penyusutan ketebalan paling besar ketika *head* dibentuk melalui proses *forging*. Ketebalan *head* ini dapat di cari dengan persamaan sebagai berikut :

1. Saat  $L/r = 16 \frac{2}{3}$

$$t = \frac{0,885PL}{SE + 0,8P} \quad (2.14)$$

$$P = \frac{SEt}{0,885L - 0,8t} \quad (2.15)$$

2. Saat  $L/r < 16 \frac{2}{3}$

$$t = \frac{PLM}{2SE + P(M - 0,2)} \quad (2.16)$$

$$P = \frac{2SEt}{ML - t(M - 0,2)} \quad (2.17)$$

**Tabel 2.2** Tabel Nilai Faktor M

Nilai Faktor M												
L/r	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	4,00
M	1,00	1,03	1,06	1,08	1,10	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20	1,22	1,25
L/r	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00
M	1,28	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,46	1,48	1,50	1,52	1,54
L/r	10,50	11,00	11,50	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	162/3			
M	1,56	1,58	1,60	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,77			

e. *Flat head*

*Head* jenis ini memiliki bentuk flat atau datar sesuai dengan namanya. Biasanya digunakan untuk *pressure vessel* tipe vertikal.

f. *Flange head*



**Gambar 2.14** *Flange head*

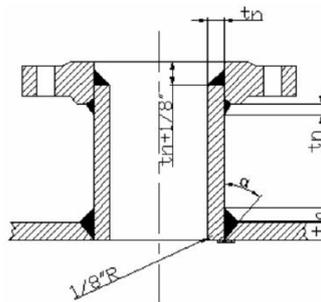
Sumber : (Drieant, 2014)

*Flange* juga bisa di jadikan sebagai *head*, biasanya di gunakan untuk bejana tekan tipe vertikal dengan diameter yang tidak terlalu besar. Ada pula yang memang menggunakan *head* tipe *flange*, salah satunya pada *shell and tube heat exchanger* (STHE), biasanya *head* yang digunakan menggunakan tipe *flange* dengan tujuan mempermudah untuk instalasi *tube*.

**2.3.3 Nozzle / opening**

*Nozzle* adalah bagian silinder yang berupa lubang menembus *shell* atau *head* dari bejana tekan. bagian ini memiliki beberapa fungsi di antaranya :

- Mempermudah orang masuk ke dalam bejana tekan untuk *maintenance*.
- Tempat untuk sambungan instrumen, seperti *pressure gauges* dan *level gauges*
- Akses langsung ke peralatan, seperti pada *heat exchanger*
- Merekatkan pipa yang berfungsi untuk mengalirkan fluida dari atau ke bejana tekan.

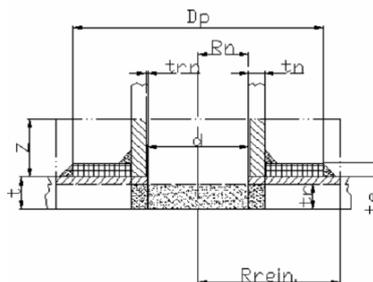


**Gambar 2.15** *Opening tanpa reinforcements.*

Sumber : (Cahyono, 2004)

Keterangan :

- $t_n$  = tebal dinding leher *nozzle* tanpa korosi ijin, in
- $t$  = tebal *shell* tanpa korosi ijin, in
- $a$  = ukuran pengelasan minimal, in
- = harga terkecil dari  $t$  atau  $t_n$  atau 0,375 in



**Gambar 2.16** *Reinforcements Opening*

Sumber : (Cahyono, 2004)

Keterangan :

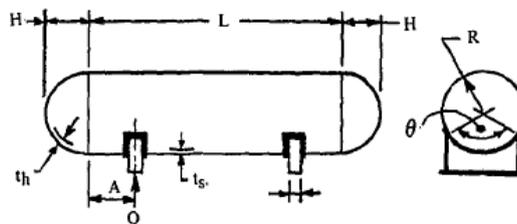
- $D_p$  = diameter luar elemen *reinforcements*, in
- $d$  = diameter akhir *opening*, in
- $R_n$  = jari-jari dalam *nozzle*, in
- $t$  = tebal dinding *shell*, in
- $t_e$  = tebal plat *reinforcements*, in
- $t_r$  = tebal dinding *shell* yang diperlukan, in
- $t_n$  = tebal dinding *nozzle*, in
- $t_{rn}$  = tebal dinding *nozzle* yang diperlukan, in

### 2.3.4 Support

Bagian ini merupakan penyangga dari sebuah bejana tekan yang berfungsi untuk menahan agar tidak bergerak dan tetap di posisinya. Penyangga ini harus mampu menahan beban dari bejana tekan dan beban dari luar, baik angin dan gempa bumi. Perancangan bagian ini tidak seperti pada perancangan bejana tekan dikarenakan tidak memiliki tekanan. Terdapat beberapa jenis *support* yang dapat digunakan pada bejana tekan, di antaranya:

a. *Saddle Support*

Bejana tekan tipe horizontal biasanya menggunakan penyangga ini yang diposisikan pada dua tempat. Struktur seperti ini akan menyebarkan berat bejana sehingga akan menghindari terjadinya tegangan lokal pada *shell*. Penggunaan lebih dari dua penyangga juga dapat menciptakan struktur tak tentu, baik secara teoritis maupun praktis. Ukuran dimensi penyangga tergantung pada ukuran dan kondisi desain dari bejana tekan yang dikerjakan.



**Gambar 2.17** *Saddle Support*

Sumber : (Megyesy, 2008)

Keterangan

- $Q$  = Beban pada satu penyangga, lbs
- $R$  = Radius *Shell*
- $S$  = *Stress*, psi
- $t_s$  = Ketebalan *Shell*
- $t_h$  = Ketebalan *Head* (Tanpa *Corrosion Allowance*)
- $K$  = Konstanta
- $\theta$  = Sudut kontak

Tegangan yang terjadi pada setiap penyangga bejana tekan horizontal ini dapat diperhitungkan menggunakan formulasi sebagai berikut:

### 1. Longitudinal Bending

Kondisi	Max. Stress	Formula
Shell dengan stiffener di head atau ring atau shell tanpa stiffener	At the saddles	$S_1 = \pm \frac{QA \left( 1 - \frac{1 - \frac{A}{L} + \frac{R^2 - H^2}{2AL}}{1 + \frac{4H}{3L}} \right)}{KR^2 t_s} \quad (2.18)$
	At midspan	$S_1 = \pm \frac{\frac{QL}{4} \left( \frac{1 + 2 \frac{R^2 - H^2}{L^2}}{1 + \frac{4H}{3L}} - \frac{4A}{L} \right)}{\pi R^2 t_s} \quad (2.19)$

### 2. Tangential Shear

Kondisi	Max. Stress	Formula
Penyangga saddle jauh dari head bejana tekan $A > R/2$	in shell	$S_2 = \frac{K_2 Q}{R t_s} \left( \frac{L - 2A}{L + \frac{4}{3}H} \right) \quad (2.20)$
	In shell	$S_2 = \frac{K_3 Q}{R t_s} \left( \frac{L - 2A}{L + \frac{4}{3}H} \right) \quad (2.21)$
Penyangga saddle dekat dari head bejana tekan $A < R/2$	in shell	$S_2 = \frac{K_4 Q}{R t_s} \quad (2.22)$
	in head	$S_2 = \frac{K_4 Q}{R t_h} \quad (2.23)$
	Additional stress in	$S_3 = \frac{K_5 Q}{R t_h} \quad (2.24)$

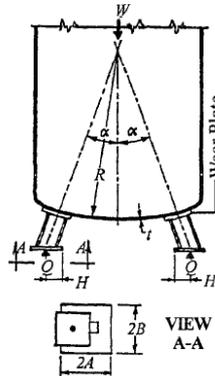
### 3. Circumferential

Kondisi	Max. Stress	Formula
$L > 8R$	Unstiffened At horn of saddle	$S_4 = - \frac{Q}{4t_s(b + 1.56\sqrt{Rt_s})} - \frac{3K_6 Q}{2t_s^2} \quad (2.25)$
$L < 8R$		$S_4 = - \frac{Q}{4t_s(b + 1.56\sqrt{Rt_s})} - \frac{12K_6 QR}{Lt_s^2} \quad (2.26)$
Stiffened or unstiffened	At bottom of shell	$S_5 = - \frac{K_7 Q}{t_s(b + 1.56\sqrt{Rt_s})} \quad (2.27)$

#### b. Leg Support

Bejana tekan vertikal dapat menggunakan *support* jenis *leg* ini. Desainnya dapat bervariasi dari bejana tekan kecil yang didukung dengan 3 atau 4 kaki, hingga bejana tekan yang sangat besar dan bola dengan diameter hingga 80 feet, didukung dengan 16 atau 20 kaki. Hampir semua kaki dapat digunakan, variasi yang paling umum adalah 3, 4, 6, 8, 12, 16, atau 20. Jarak kaki harus sama di sekeliling bejana tekan (Moss & Basic, 2013).

Perbandingan antara panjang *leg* dengan diameter bejana tekan biasanya 2:1. Banyaknya kaki yang dibutuhkan tergantung pada ukuran bejana tekan dan besarnya beban yang diterima.



**Gambar 2.18** *Leg Support*  
Sumber : (Megyesy, 2008)

**Keterangan**

- W = Massa bejana tekan, lb
- n = Jumlah kaki
- Q = W/n, Beban pada 1 kaki, lb
- R = Radius *head*, in
- H = *Lever arm of load*, in
- 2A, 2B = Dimensi *base plate*
- S = *Stress*, psi
- t = Ketebalan *head*, in
- K = Faktor
- C = *Radius of circular wear plate*, in

Tegangan yang terjadi pada setiap penyangga bejana tekan vertikal ini dapat diperhitungkan menggunakan formulasi sebagai berikut :

1. *Longitudinal Stress* :

$$S_1 = \frac{Q}{t^2} \left[ \cos \alpha (K_1 + 6K_2) + \frac{H}{R} \sqrt{\frac{R}{t}} (K_3 + 6K_4) \right] \quad (2.28)$$

2. *Circumferential Stress* :

$$S_2 = \frac{Q}{t^2} \left[ \cos \alpha (K_5 + 6K_6) + \frac{H}{R} \sqrt{\frac{R}{t}} (K_7 + 6K_8) \right] \quad (2.29)$$

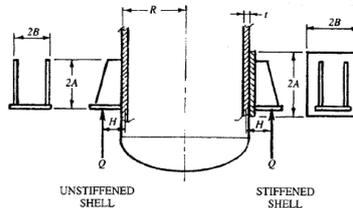
Catatan (Megyesy, 2008):

1. Nilai positif menunjukkan tegangan tarik dan nilai negatif menunjukkan kompresi.
2. Menghitung tegangan tarik maksimum, dalam rumus untuk S1, S2 dan K1, K3, K5 dan K7 menunjukkan faktor negatif dan K2, K4, K6 dan K8 menunjukkan faktor positif.

3. Menghitung tegangan kompresi maksimum dalam rumus untuk S1, S2 dan K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7 dan K8 menunjukkan faktor negatif.
4. Tegangan tarik maksimum S1, dan S2, masing-masing, ditambah tegangan tarik karena tekanan internal tidak boleh melebihi nilai tegangan tarik yang diizinkan dari material *head*.
5. Tegangan tekan maksimum S1, dan S2, masing-masing, ditambah tegangan tarik akibat tekanan internal tidak boleh melebihi nilai tegangan tekan yang diizinkan dari material *head*.

c. *Lug Support*

*Lug support* adalah penyangga yang penyambungannya langsung dilas di *shell*. Jenis penyangga seperti ini bisa juga digunakan pada bejana tekan vertikal. *Lug support* bisa digunakan pada bejana tekan dari ukuran kecil sampai medium (diameter 1 sampai 10 ft) dan bejana tekan dengan perbandingan tinggi dan diameter antara 2:1 sampai 5:1.



**Gambar 2.19** *Lug Support*  
Sumber : (Megyesy, 2008)

Keterangan

- W = Massa bejana tekan, lb
- n = Jumlah kaki
- Q = W/n, Beban pada 1 kaki, lb
- R = Radius *shell*, in
- H = *Lever arm of load*, in
- 2A, 2B = Dimensi *base plate*
- S = *Stress*, psi
- t = Ketebalan *shell*, in
- K = Faktor
- C = *shape faktor*

$$D = \frac{A}{R} \sqrt{\frac{B}{A}}$$

Tegangan yang terjadi pada setiap penyangga bejana tekan vertikal ini dapat diperhitungkan menggunakan formulasi sebagai berikut :

1. *Longitudinal Stress* :

$$S_1 = \pm \frac{QH}{DR^2t} \left[ C_1 K_1 + 6 \frac{K_2 R}{C_2 t} + \frac{D}{2 \left( 1.17 + \frac{B}{A} \right)} \times \frac{R^2}{HA} \right] \quad (2.30)$$

Catatan (Megyesy, 2008):

Dalam tegangan tarik S1 ditambah tegangan akibat tekanan internal PR/2t tidak boleh melebihi nilai tegangan material *shell* dikalikan efisiensi pengelasan melingkar.

2. *Circumferential Stress* :

$$S_2 = \pm \frac{QH}{DR^2t} \left[ C_3K_3 + 6 \frac{K_4R}{C_4t} \right] \quad (2.31)$$

Catatan (Megyesy, 2008):

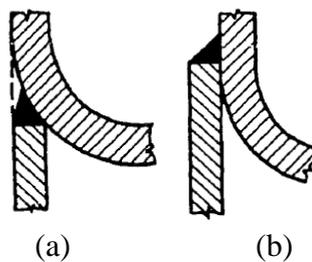
Dalam tegangan tarik  $S_2$  ditambah tegangan akibat tekanan internal  $PR/t$  tidak boleh melebihi nilai tegangan material *shell* dikalikan 1,5.

d. *Skirt Support*

Metode paling umum untuk menyangga bejana tekan silindris vertikal menggunakan penyangga tipe *skirt*. Penyangga *skirt* adalah perpanjangan *shell* yang dilas lebih rendah dari *shell* pada bejana tekan vertikal silindris. Sedangkan *skirt* untuk bejana tekan tipe *spherical* dilas di dekat garis tengah bejana. Metode tumpuan ini menarik dari sudut pandang perancang karena meminimalkan tegangan lokal pada titik penyambungan, dan beban langsung terdistribusi secara merata di seluruh keliling.

Garis kritis dalam penyangga *skirt* adalah las yang menempelkan bejana tekan ke *skirt*. Pengelasan ini, selain meneruskan berat keseluruhan dan momen puntir, juga harus menahan tegangan termal dan *bending* akibat penurunan suhu pada *skirt*. Semakin tipis *skirt*, semakin baik ia dapat menyesuaikan diri dengan variasi suhu. Sebuah desain "kotak panas" digunakan untuk suhu tinggi untuk meminimalkan tegangan diskontinuitas pada persimpangan dengan mempertahankan suhu yang seragam di wilayah tersebut. Selain itu, *skirt* untuk desain suhu tinggi biasanya akan diisolasi di dalam dan di luar beberapa milimeter di bawah titik pemasangan (Moss & Basic, 2013).

Gambar A dan B menunjukkan jenis pemasangan *skirt* ke bejana tekan yang paling umum. Dalam perhitungan ukuran las yang diperlukan, nilai efisiensi sambungan yang diberikan oleh Kode (UW12) dapat digunakan (Megyesy, 2008).



**Gambar 2.20 Skirt Support**

Sumber : (Megyesy, 2008)

Dalam menentukan ketebalan *skirt* yang dibutuhkan terdapat beberapa faktor yang menjadi pertimbangan. Kondisi pengaturan yang paling umum adalah sebagai berikut:

1. Berat + momen puntir.
2. Beban yang dikenakan dari kursi jangkar
3. Pergerakan bejana tekan.

Rumus Ketebalan minimum :

$$t = \frac{12M_T}{R^2\pi SE} + \frac{W}{D\pi SE} \quad (2.32)$$

Keterangan

D = Diameter luar *skirt*, in

E = Efficiency of skirt to head joint (0.6 for butt weld, 0.45 for lap weld)

M<sub>T</sub> = Moment at the skirt to head joint, ft.lb

R = Outside Radius of skirt, in

S = Stress value of the head joint, ft.lb

t = Ketebalan skirt, in

W = Weight of the tower above the skirt to the head joint, in operating condition

Catatan (Megyesy, 2008):

Menggunakan *skirt* yang sangat tinggi, tekanan di bawah *skirt* dapat mempengaruhi. Untuk menghitung tebal *skirt* yang dibutuhkan, dalam hal ini dapat digunakan rumus di atas, dengan mempertimbangkan momen dan berat pada alas; E = 1

e. *Anchor bolts* dan *base ring*

*Anchor bolts* berfungsi untuk mengunci bejana tekan agar tetap pada pondasinya. Beban yang bekerja pada *anchor bolts* adalah beban momen akibat angin maupun gempa bumi. Ukuran *anchor bolts* ditentukan dengan menggunakan luas total yang dibutuhkan untuk melawan momen yang bekerja pada dasar bejana. Di bawah ini merupakan formula yang dapat digunakan untuk menentukan ukuran *anchor bolts* yang dapat digunakan.

1. *Maximum Tension* :

$$T = \frac{12M}{A_B} - \frac{W}{C_B} \quad (2.33)$$

2. *Required Area of One Bolt* :

$$B_A = \frac{TC_B}{S_B N} \quad (2.34)$$

3. *Stress in Anchor Bolt* :

$$S_B = \frac{TC_B}{B_A N} \quad (2.35)$$

Keterangan

A<sub>B</sub> = Area within the bolt circle, sq.in

C<sub>B</sub> = Circumference of bolt circle, in

M = Moment at the base due to wind or earthquake, ft.lb

N = Jumlah *anchor bolts*

S<sub>B</sub> = Maximum allowable stress value of bolt material, psi

W = Weight of the vessel during erection, lb

### 2.3.5 Pengelasan bejana tekan

Untuk menyambungkan setiap bagian hingga menjadi bejana tekan utuh dilakukan pengelasan satu sama lain. Sambungan las pada bejana tekan dikategorikan menjadi beberapa bagian menurut standar ASME Part UW (ASME, 2019), sebagai berikut :

1) Kategori A

Sambungan las longitudinal dan spiral pada *shell*, transisi diameter atau *nozzle*, sambungan melingkar antara *shell* dengan *head* tipe *hemispherical*, sambungan antar bagian penyusun *head*, semua sambungan pada bejana tekan berbentuk bola atau *spherical*.

2) Kategori B

Sambungan las melingkar yang menghubungkan antara *shell* baik pada ujung besar maupun ujung kecil, *nozzle* atau transisi diameter. Sambungan las melingkar yang

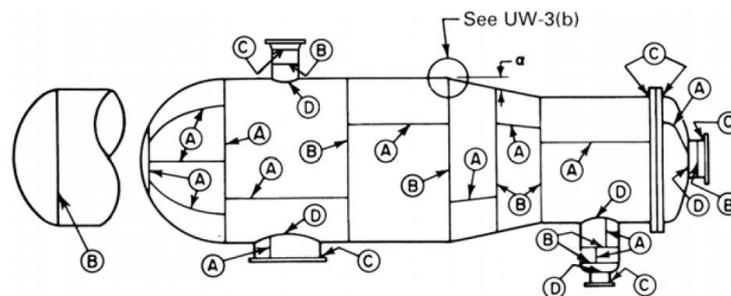
menghubungkan *formed head* selain *hemispherical* ke *shell*. Sambungan las melingkar adalah sambungan butt jika sudut setengah puncak,  $\alpha$ , sama dengan atau kurang dari 30 derajat dan sambungan sudut ketika  $\alpha$  lebih besar dari 30 derajat.

3) Kategori C

Sambungan las yang menghubungkan *flensa*, *Van Stone Lap*, *dudukan tube*, atau *flat cover* ke badan utama, ke *formed head*, ke transisi diameter, ke nozel atau ke ruang hubung; tiap sambungan las yang menghubungkan satu pelat sisi ke palat sisi lainnya dari bejana bersisi-datar.

4) Kategori D

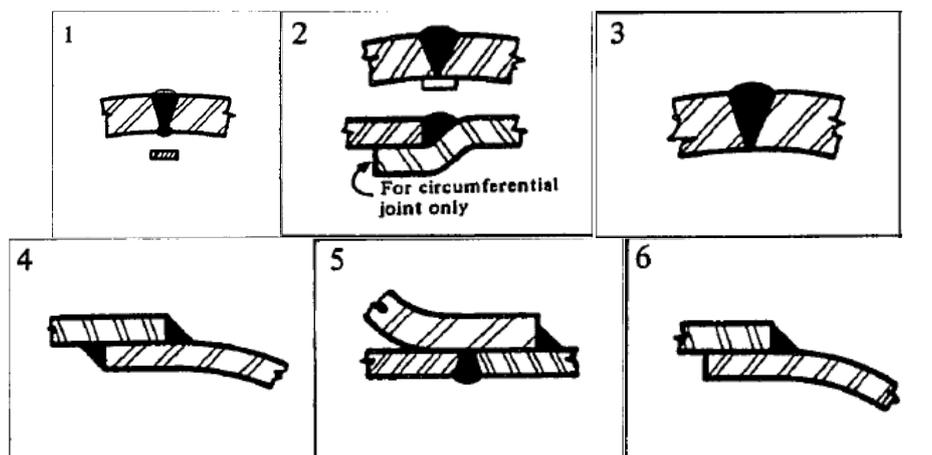
Sambungan las yang menghubungkan ruang hubung atau *nozzle* ke badan utama, ke bejana berbentuk bola, ke transisi diameter, ke *head* atau bejana bersisi datar, dan sambungan yang menghubungkan *nozzle* ke ruang hubung (untuk *nozzle* pada ujung kecil dari transisi diameter, lihat kategori B).

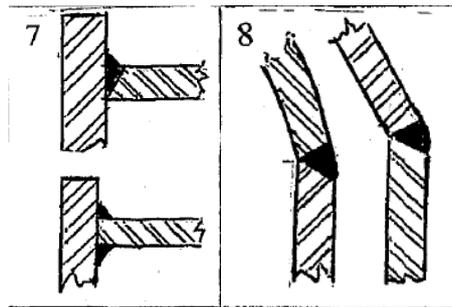


**Gambar 2.21** Kategori Sambungan Las pada Bejana Tekan.  
Sumber : (Megyesy, 2008)

Beberapa tipe sambungan las bejana tekan menurut kode UW-12 sebagai berikut :

1. *Double-welded butt joint*
2. *Single-welded butt joint*
3. *Single-welded butt joint with backing strip*
4. *Double-full fillet lap joint*
5. *Single-full fillet lap joint with plug welds*
6. *Single-full fillet lap joint without plug welds*
7. *Corner joint*
8. *Angle joint*





**Gambar 2.22** Tipe-tipe Sambungan Las.  
Sumber : (Megyesy, 2008)

## 2.4 Elastisitas

Elastisitas adalah kemampuan benda untuk kembali pada keadaan semula setelah gaya yang mempengaruhinya dihilangkan. Benda elastis adalah benda yang memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk semula setelah gaya yang mempengaruhinya ditiadakan.

Sifat yang lain adalah sifat plastik atau sifat tidak elastik dan cenderung tidak kembali ke bentuk semula, misalnya lilin. Perbedaan antara sifat elastik dan plastik adalah pada tingkatan besar atau kecilnya deformasi yang terjadi. Dalam pembahasan sifat elastik pada benda perlu diasumsikan bahwa benda-benda tersebut mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

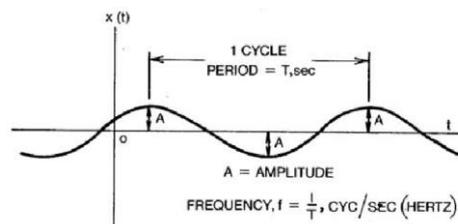
- Homogen (setiap bagian benda mempunyai kerapatan yang sama).
- Isotropik (pada setiap titik pada benda mempunyai sifat fisis yang sama ke segala arah).

## 2.5 Getaran

Getaran adalah suatu gerakan bolak – balik yang mempunyai amplitudo yang beragam (Rao, 2011). Setiap gerakan yang berulang setelah selang waktu tertentu disebut getaran atau osilasi. Ayunan bandul dan gerakan senar yang dipetik adalah contoh khas dari getaran. Teori getaran berkaitan dengan studi tentang gerakan osilasi benda dan gaya yang terkait dengannya.

Sistem getaran secara umum mencakup sarana untuk menyimpan energi potensial (pegas atau elastisitas), sarana untuk menyimpan energi kinetik (massa atau inersia), dan sarana untuk kehilangan energi secara bertahap (peredam).

Getaran suatu sistem melibatkan transfer energi potensial menjadi energi kinetik dan energi kinetik menjadi energi potensial, secara bergantian. Jika sistem teredam, sebagian energi dihamburkan dalam setiap siklus getaran dan harus diganti dengan sumber eksternal jika kondisi getaran stabil ingin dipertahankan.



**Gambar 2.23** Skema Getaran  
Sumber : (Rao, 2011)

Istilah-istilah dalam getaran:

1. Amplitudo adalah perpindahan maksimum dari titik kesetimbangan, atau deviasi maksimum getaran. Dua gelombang dapat memiliki panjang gelombang yang sama, tetapi puncak satu gelombang dapat menonjol di atas garis kesetimbangan di atas puncak gelombang lainnya. Amplitudo gelombang menunjukkan jumlah relatif indikator yang ditransmisikan oleh gelombang. Jika rangkaian gelombang memiliki indikator dan panjang gelombang yang sama, maka disebut rangkaian gelombang.
2. Frekuensi adalah banyaknya getaran yang terjadi per satuan waktu. Ketika serangkaian gelombang melewati suatu titik dalam medium, ada beberapa gelombang di medium pada satuan waktu tertentu. Misalnya, jika gabus naik dan turun dalam gelombang air sekali per detik, gelombang akan bergetar sepenuhnya ke atas dan ke bawah sekali setiap detik. Jumlah puncak dan lembah dalam serangkaian gelombang, atau siklus, dalam satuan waktu disebut frekuensi gelombang dan diukur dalam hertz (Hz). Jika lima gelombang melewati medium per detik, frekuensi urutan gelombang adalah 5 siklus per detik, disingkat cps (konvolusi per detik). Adapun rumus umum frekuensi sebagai berikut:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.36)$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz)

T = Periode (s)

3. Periode yaitu waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu getaran penuh dengan satuan second (s). Adapun rumus umum periode sebagai berikut:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.37)$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz)

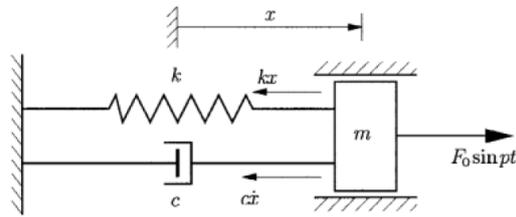
T = Periode (s)

4. *Natural frequency* atau frekuensi alaminya adalah frekuensi osilasi suatu sistem tanpa dipengaruhi oleh gaya eksternal. Hal ini dapat terjadi Ketika suatu sistem diberikan gangguan awal kemudian bergetar sendiri. Seperti yang akan dilihat nanti, sistem getaran yang memiliki n derajat kebebasan akan memiliki, secara umum, n frekuensi alami getaran yang berbeda. Frekuensi pribadi dipengaruhi oleh massa dan kekakuan. Kekakuan adalah sifat dari material. Pegas memiliki konstanta pegas (k), sedangkan material memiliki modulus elastisitas yang merupakan perbandingan tegangan regangan (Tang et al., 2017)

### 2.5.1 Single degree of freedom (SDOF)

Dalam dinamika struktur, jumlah koordinat bebas (*independent coordinates*) diperlukan untuk menetapkan susunan atau posisi sistem setiap saat, yang berhubungan dengan jumlah derajat kebebasan (*degree of freedom*). Pada umumnya, struktur berkesinambungan (*continuous structure*) mempunyai jumlah derajat kebebasan (*number of degrees of freedom*) tak terhingga. Namun dengan proses idealisasi atau seleksi, sebuah model matematis yang tepat dapat mereduksi jumlah derajat kebebasan menjadi suatu jumlah diskrit dan untuk beberapa keadaan dapat menjadi berderajat tunggal. Apabila sistem dibatasi hanya dapat bergerak dalam satu koordinat bebas untuk menunjukkan keadaan massa geometri sistem dalam ruang secara lengkap, maka sistem tersebut disebut satu derajat kebebasan. Pada sistem massa pegas ini, apabila massa(m) dibatasi bergerak secara tegak maka hanya ada satu koordinat saja yang dibutuhkan untuk mendefinisikan

kedudukan massa pada waktu sekarang dari kedudukan kesetimbangan statis. Berarti sistem ini memiliki satu derajat kebebasan. Berikut adalah contoh model linier sistem satu derajat kebebasan



**Gambar 2.24** Model Linier SDOF  
Sumber : (Rao, 2011)

Persamaan geraknya sebagai berikut:

$$m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} + F_0 \sin pt$$

or

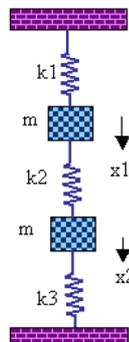
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin pt \tag{2.38}$$

Dimana:

- Elemen massa (m), menyatakan massa sifat inersia dari struktur.
- Elemen pegas (k), menyatakan gaya balik elastik (*elastic restoring force*).
- Elemen redaman (c), menyatakan sifat geseran dan kehilangan energi dari struktur.
- Gaya pengaruh (F(t)), menyatakan gaya luar yang bekerja pada sistem struktur.

### 2.5.2 Two degree of freedom

Apabila suatu sistem membutuhkan dua koordinat untuk menggambarkan gerakannya, maka sistem dikatakan mempunyai dua derajat kebebasan. Sistem semacam ini merupakan pengantar sederhana ke sifat sistem dengan beberapa derajat kebebasan. Sistem dengan dua derajat kebebasan akan mempunyai dua frekuensi natural. Bila getaran bebas terjadi pada salah satu frekuensi natural ini, maka hubungan yang pasti terjadi antara amplitudo-amplitudo kedua koordinatnya dinyatakan sebagai ragam normal (*normal mode*). Sistem dengan dua derajat kebebasan ini akan mempunyai dua getaran ragam normal sesuai dengan kedua frekuensi naturalnya.



**Gambar 2.25** Model Linier *Two Degree of Freedom*  
Sumber : (Rao, 2011)

Getaran bebas yang dimulai karena kondisi apa pun pada umumnya akan merupakan superposisi dua getaran ragam normal. Namun getaran harmonik paksa akan terjadi pada

frekuensi eksitasi dan amplitudo kedua koordinat akan menuju ke suatu maksimum pada kedua frekuensi natural. Sistem dua derajat kebebasan dibagi atas tiga sistem yaitu:

- Dalam sistem massa pegas, bila  $m_1$  dan  $m_2$  secara vertikal dibatasi maka paling sedikit dibutuhkan satu koordinat  $x(t)$  untuk menentukan kedudukan massa pada berbagai waktu. Berarti sistem ini membutuhkan dua buah koordinat bersama-sama untuk menentukan kedudukan massa pegas, sistem ini adalah sistem dua derajat kebebasan.
- Bila massa  $m$  ditumpu dengan dua buah pegas dengan gerakan dibatasi secara vertikal maka dibutuhkan dua buah koordinat untuk menentukan konfigurasi sistem. Salah satu konfigurasi ini merupakan perpindahan lurus, seperti perpindahan massa. Koordinat yang lain yaitu perpindahan sudut yang mengukur rotasi massa. Kedua koordinat ini satu sama lain bebas oleh karena itu sistem ini adalah sistem dua derajat kebebasan.
- Untuk pendulum ganda, jelas bahwa untuk menentukan posisi  $m_1$  dan  $m_2$  pada berbagai waktu dibutuhkan dua koordinat dan sistem adalah dua derajat kebebasan. Tetapi  $x_1$  dan  $x_2$  atau  $y_1$  dan  $y_2$ , atau  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  merupakan kelompok koordinat sistem ini.

### 2.5.3 Multi degree of freedom

Sistem banyak derajat kebebasan adalah sistem yang mempunyai koordinat bebas untuk mengetahui kedudukan massa lebih dari dua buah. Dalam menganalisa sistem banyak derajat kebebasan, pada dasarnya adalah sama dengan sistem satu atau dua derajat kebebasan. Tetapi karena banyaknya langkah yang harus dilewati untuk mencari frekuensi melalui perhitungan matematis, maka sistem digolongkan menjadi banyak derajat kebebasan.

## 2.6 Stress dan Strain

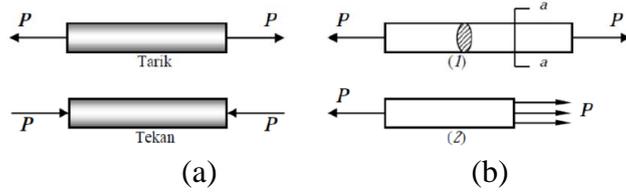
Benda sendiri tidak selamanya dapat dianggap sebagai kaku (*rigid*) mutlak seperti yang diasumsikan dalam statika. Perhitungan perubahan bentuk (deformasi) berbagai benda di bawah berbagai pengaruh pembebanan.

### 2.6.1 Pembebanan batang secara aksial

Kasus paling sederhana di mana batang logam dengan penampang konstan dibebani pada kedua ujungnya oleh sepasang gaya lurus yang berlawanan arah yang bertepatan dengan sumbu longitudinal batang dan bekerja melalui pusat penampang masing-masing. Untuk keseimbangan statis, besarnya gaya harus sama. Jika gaya-gaya diarahkan menjauhi batang maka dikatakan ditarik, jika gaya-gaya diarahkan ke batang dikatakan tertekan. Kedua kondisi ini ditunjukkan pada Gambar (a).

Di bawah aksi pasangan gaya ini, resistansi internal terbentuk di dalam material dan sifat-sifatnya dapat dipelajari dari bidang geser sepanjang batang. Bidang ini diwakili oleh a-a pada gambar (b) 1. Jika, untuk tujuan analisis, bagian dari bar di sebelah kanan pesawat dipindahkan, seperti yang ditunjukkan pada gambar (b) 2, bar ini harus diganti dengan sesuatu untuk menghidupkan sisi kiri. Dengan menyadari bidang geser ini, gaya internal asli sekarang berada di luar batang lainnya. Untuk menyeimbangkan di sisi kiri, ini harus menjadi gaya horizontal besarnya  $P$ . Namun, gaya  $P$  yang bekerja tegak lurus (biasanya) pada bagian a-a pada dasarnya adalah hasil dari distribusi gaya yang diterapkan.

Di sini penting untuk membuat beberapa asumsi tentang variasi dalam distribusi gaya, dan karena gaya  $P$  bekerja pada penampang, umumnya diasumsikan bahwa gaya-gaya ini seragam di seluruh permukaan potong.



**Gambar 2.26** Pembebanan Batang  
 Sumber : (Zubaidi, 2012)

Ketika beban aksial meningkat secara bertahap, peningkatan panjang di atas panjang referensi diukur dengan setiap peningkatan beban dan ini berlanjut sampai terjadi kesalahan pada sampel. Mengetahui luas penampang asli dari benda uji, tegangan normal, yang dinyatakan dalam  $\sigma$

### 2.6.2 Tegangan (*stress*)

Tegangan atau *stress* adalah gaya reaksi atau gaya untuk mengembalikan ke bentuk semula. Gaya ini mengembalikan objek ke bentuk yang semula yang didistribusikan secara merata di atas permukaan. *Stress* dapat dikelompokkan menjadi tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal dibedakan lagi menjadi tegangan normal tekan atau kompresi dan tegangan normal tarik. Sedangkan tegangan geser adalah gaya yang bekerja pada benda sejajar permukaan benda.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.39)$$

Keterangan

$\sigma$  = Tegangan normal, Pa

P = Beban Aksial, N

A = Luas Penampang, m<sup>2</sup>

#### 1. Tegangan normal

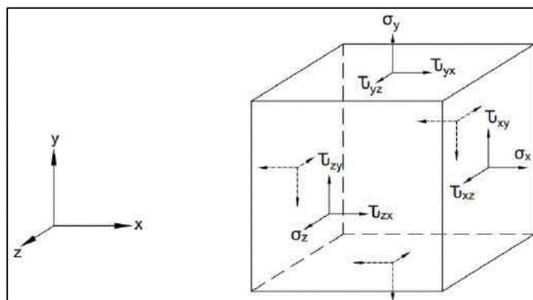
$$S_n = \frac{dF_n}{dA} \quad (2.40)$$

#### 2. Tegangan geser

$$S_t = \frac{dF_t}{dA} \quad (2.41)$$

#### 3. Tegangan von mises (*equivalent stress*)

Tegangan Von Mises atau tegangan uniaksial (*uniaxial stress*) adalah tegangan yang mengombinasikan tegangan-tegangan utama (normal dan geser) pada suatu elemen dan tidak memiliki arah (Shigley, 2015)



**Gambar 2.27** Komponen tegangan dalam 3D  
 Sumber : (Shigley, 2015)

Tegangan Von Mises adalah pengembangan dari teori energi distorsi di mana energi distorsi merupakan energi yang dibutuhkan oleh suatu material untuk mengalami deformasi bentuk. Jika suatu material terjadi distorsi akibat beban luar maka bentuk materialnya akan berubah tanpa mengubah volumenya. Tegangan Von Mises mengalkulasikan energi distorsi per satuan volume yang diperlukan kemudian digunakan hasilnya untuk mengalkulasikan tegangan ekuivalen yang mengakibatkan deformasi bentuk yang terjadi. Jika suatu struktur memiliki tegangan atau energi distorsi Von Mises lebih besar dari tegangan atau energi distorsi yang diizinkan atau dibutuhkan untuk mencapai kondisi leleh (*yield point*) maka struktur tersebut mengalami kegagalan. Tegangan Von Mises dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini dengan hasil satuannya berupa Pa atau N/m<sup>2</sup>.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.42)$$

Keterangan :

$\sigma_{eq}$  = Tegangan Ekuivalen Von Mises (Pa)

$\sigma_x$  = Tegangan Normal Sumbu X (Pa)

$\sigma_y$  = Tegangan Normal Sumbu Y (Pa)

$\sigma_z$  = Tegangan Normal Sumbu Z (Pa)

$\tau_{xy}$  = Tegangan Geser Bidang XY (Pa)

$\tau_{xz}$  = Tegangan Geser Bidang XZ (Pa)

$\tau_{yz}$  = Tegangan Geser Bidang YZ (Pa)

### 2.6.3 Regangan (*strain*)

Regangan atau *strain* adalah perubahan pada ukuran benda karena gaya dalam kesetimbangan dibandingkan dengan ukuran semula. Regangan juga dapat dikatakan sebagai tingkat deformasi. Regangan terdapat beberapa bentuk antara lain sebagai berikut:

1. Regangan linier adalah perubahan panjang per-panjang semula
2. Regangan volume adalah perubahan volume per-volume semula

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.43)$$

Menggunakan hukum *Hooke* persamaan (1) dan (2) dapat digabungkan menjadi:

$$F = \left(\frac{AE}{L}\right) \times \Delta L \quad (2.44)$$

Keterangan :

$F$  = gaya atau beban (lb)

$A$  = luas penampang (inch<sup>2</sup>)

$E$  = modulus elastisitas (psi)

$\Delta L$  = pertambahan panjang (inch)

Dari rumus dasar di atas menunjukkan hubungan antara beban, sifat bahan, geometri dan pergeseran yang ditimbulkan dapat disusun bentuk umum persamaan matrik. Untuk masalah perhitungan deformasi akibat pembebanan dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan matrik serta memberikan syarat batas dan pembebanan pada persamaan sebagai berikut :

$$[K]\{u\} = F \quad (2.45)$$

Keterangan:

$[K]$  = matrik kekakuan

$\{u\}$  = matrik pergeseran atau deformasi

$\{F\}$  = matrik beban

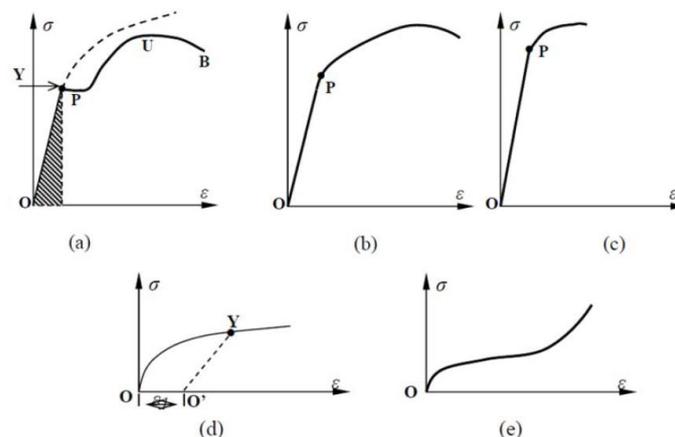
Pada metode elemen hingga setiap persamaan disusun dan di urutkan menjadi sebuah matrik, dimana besar matrik yang dihasilkan (khusus untuk matrik kekakuan / *stiffness*) adalah jumlah nodal yang dimiliki struktur dikali dengan jumlah derajat kebebasan. Berikut ini adalah contoh persamaan yang disusun menjadi sebuah matrik dari suatu struktur yang memiliki 3 nodal, dimana tiap nodal memiliki 2 derajat kebebasan.

$$\begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ F_{3x} \\ F_{3y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Berdasarkan bentuk persamaan matrik untuk tiap elemen dapat disusun bentuk persamaan matrik gabungan seperti di atas yang kemudian memberikan hasil deformasi pada setiap titik dan elemen. Penyelesaian metode elemen hingga dapat diselesaikan dengan perhitungan menggunakan bantuan program *ANSYS* untuk memperoleh hasil akhir berupa nilai deformasi pada seluruh titik elemen pada komponen dengan mengikuti langkah perhitungan yang diatur dalam program.

#### 2.6.4 Kurva *stress-strain*

Dengan mencocokkan nilai tegangan normal  $\sigma$  dan regangan normal  $\epsilon$ , data eksperimen dapat dideskripsikan dengan menjadikan besaran ini sebagai absis dan ordinat. Gambar yang dihasilkan berupa grafik atau kurva tegangan-regangan. Kurva tegangan-regangan memiliki bentuk yang berbeda tergantung pada bahannya



**Gambar 2.28** Kurva Tegangan-Regangan  
Sumber : (Purwantana, 2012)

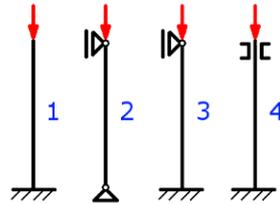
Seperti di tunjukan pada gambar 2.28 merupakan kurva tegangan regangan pada beberapa material, di antaranya (a) Kurva tegangan-regangan pada karbon-medium, (b)

Kurva tegangan-regangan pada baja campuran, (c) Kurva tegangan-regangan pada baja karbon-tinggi dengan campuran bahan *nonferrous*, (d) Kurva tegangan-regangan pada besi kasar dengan campuran *nonferrous*, dan (e) Kurva tegangan-regangan pada karet.

## 2.7 Buckling

*Buckling* adalah proses di mana struktur gagal mempertahankan bentuk aslinya, sehingga mengubah bentuknya untuk menemukan keseimbangan baru. Kerusakan ketidakstabilan struktural dapat terjadi pada banyak bahan yang berbeda. Bahan akan melengkung karena kelebihan beban. Suatu tumpuan juga mempengaruhi proses *buckling*. Fenomena *buckling* berkaitan dengan kekakuan elemen struktural. Elemen dengan kekakuan rendah akan lebih lunak daripada elemen dengan kekakuan tinggi. Semakin panjang suatu elemen struktur, semakin rendah kekakuannya (Wiratama, 2020).

Untuk mengetahui kekakuan pada setiap struktur yang dimiliki bisa menggunakan berbagai cara, salah satunya adalah analisis *buckling* ini. Pembebanan yang diberikan pada suatu struktur bermacam-macam. Sebagaimana yang dijelaskan oleh (Strommer, 2019) pembebanan yang terjadi sebagai berikut:



**Gambar 2.29** *The four Euler Buckling Modes*  
Sumber : (Strommer, 2019)

Dari gambar tersebut dijelaskan bahwa:

1. Mode 1 struktur fix di bagian bawah dan bergerak bebas di bagian atas  $\beta = 2$
2. Mode 2 struktur bagian atas dan bawah dapat bergerak rotasi dengan bebas  $\beta = 1$
3. Mode 3 struktur fix di bagian bawah dan bergerak rotasi bebas di bagian atas  $\beta = 0,699$
4. Mode 4 struktur fix di bagian bawah dan mengalami beban kearah longitudinal di bagian atas  $\beta = 0,5$

Untuk mengetahui panjang buckling yang terjadi pada struktur dapat menggunakan persamaan berikut ini:

$$l_k = \beta * l \quad (2.47)$$

Dimana  $l$  adalah panjang struktur, pada penelitian ini panjang struktur untuk setiap penyangga memiliki harga yang sama sehingga tidak mempengaruhi terhadap hasil. Nilai slenderness dapat dicari melalui

$$\lambda = \sqrt{\frac{A}{I_{min}}} \beta l \quad (2.48)$$

Perubahan bentuk yang terjadi pada struktur ini dapat terjadi pada *region elastic* dan *non elastic* material. Besar nilai *buckling stress* dan *force* yang terjadi dapat diketahui melalui persamaan berikut:

*Euler (elastic section)*

$$\text{Buckling Stress} \quad (2.49)$$

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 E I_{min}}{(\beta l)^2 A}$$

*Buckling Force*

$$F_K = \frac{\pi^2 E I_{min}}{(\beta l)^2} \quad (2.50)$$

*Tetmajer (inelastic section)*

*Buckling Stress*

$$\sigma_K = a + b\lambda + c\lambda^2 \quad (2.51)$$

*Buckling Force*

$$F_K = (a + b\lambda + c\lambda^2)A \quad (2.52)$$

Nilai kemanannya juga dapat diketahui dari persamaan:

$$S = \frac{F_K}{F} \quad (2.53)$$

## 2.8 Structural Beams

Penyangga bejana tekan menggunakan beberapa jenis *beam* yang tersedia. Berbagai jenis *beam* yang ada di antaranya adalah *C shape*, *L shape*, *WF shape*, dll. Beberapa di antaranya sebagai berikut:

### 2.8.1 H beam

H beam atau Balok-H berbentuk seperti huruf H. Balok-H adalah balok struktural yang terbuat dari baja canai. Ini sangat kuat. Itu mendapatkan namanya karena terlihat seperti huruf besar H di atas penampangnya (Steel, 2021). Tabel dimensi bentuk profil *beam* terlampir.

### 2.8.2 L beam

*L beam* atau *angle beam* merupakan salah satu produk *beam* yang tersedia di pasaran. *L beam* sendiri memiliki memiliki kaki dengan ketebalan yang sama dan ukuran kaki yang sama atau tidak sama. *Angle beam* dinotasikan oleh tanda L, ukuran kaki (in) dan ketebalan (in) (AISC, 2017), seperti contoh L 4x4x1. Tabel dimensi bentuk profil *beam* terlampir.

## 2.9 CODE

Dalam perancangan bejana tekan terdapat beberapa aturan yang harus dipenuhi untuk keamanan saat digunakan. CODE ini telah dibuat sejak lama dan terus diperbaharui hingga sekarang dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang memiliki potensi membahayakan terhadap bejana tekan. Berikut kode yang digunakan dalam bejana tekan.

### 2.9.1 ASME

ASME (*American Society of Mechanical Engineering*) merupakan sebuah Lembaga dimana berkumpul para *engineer* dari berbagai daerah yang berpusat di USA. Lembaga ini telah mengeluarkan beberapa aturan mengenai standar keamanan yang harus dipenuhi dalam perancangan peralatan industri. Aturan-aturan yang telah dikeluarkan banyak digunakan oleh pelaku industri di seluruh dunia, salah satunya di Indonesia. Terdapat beberapa perusahaan produksi penyedia kebutuhan industri menggunakan *code* ini dalam mendesain suatu alat, seperti perusahaan penyedia perancangan bejana tekan (*pressure vessel*), penukar panas (*heat exchanger*), dll

ASME telah merilis beberapa kode yang mengatur beberapa kebutuhan penting di industri yakni BPVC (*Boiler and Pressure Vessel Code*), B31 (*Process Piping*), A17

(*Safety Code for Elevators and Escalators*) dan Y14 (*Product Development Lifecycle*). Code ASME BPVC sendiri telah dirilis dalam beberapa waktu yakni 2017, 2019 dan 2021. Didalam kode ASME BPVC ini memuat beberapa hal diantaranya :

1. *Section I: Power Boilers*
2. *Section II: Material Specification:*
  - i. *Ferrous Material Specifications – Part A*
  - ii. *Non-ferrous Material Specifications – Part B*
  - iii. *Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filter Metals – Part C*
  - iv. *Properties – Part D (Metric and US Customary)*
3. *Section III Rules for Constuction of Nuclear Facility Components*
  - i. *Subsection NCA: General Requirements for Division 1 and Division 2*
  - ii. *Appendice*
  - iii. *Division 1:*
    - a. *Subsection NB: Class 1 Components*
    - b. *Subsection NC: Class 2 Components*
    - c. *Subsection ND: Class 3 Components*
    - d. *Subsection NE: Class MC Components*
    - e. *Subsection NF: Component Supports*
    - f. *Subsection NG: Core Support Structures*
    - g. *Appendices: Code Case N-47 Class 1: Components in Elevated Temperature Service*
  - iv. *Division 2: Codes for Concrete Containment*
  - v. *Division 3: Containment System for Transportation and Storage of Spent Nuclear Fuel and Radioactive Material*
  - vi. *Division 5: High Temperature Reactors*
4. *Section IV: Rules for Construction of Heating Boilers*
5. *Section V: Nondestructive Examinations*
6. *Section VI: Recommended Rules for the Care and Operation of Heating Boilers*
7. *Section VII: Recommended Guidelines for Care of Power Boilers*
8. *Section VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels*
  - i. *Division 1: Pressure Vessels – Rules for Construction*
  - ii. *Division 2: Pressure Vessels – Alternative Rules*
9. *Section IX: Welding and Brazing Qualifications*
10. *Section X: Fiberglass-Reinforced Plastic Pressure Vessel*
11. *Section XI: Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components*
  - i. *Division 1 – Rules for inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants*
  - ii. *Division 2 – Requirements for Reliability and Integrity Management (RM) Programs for Nuclear Power Plants*
12. *Section XII: Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks*

### **2.9.2 ASCE**

ASCE (*American Society of Civil Engineers*) merupakan sebuah lembaga yang berdiri di garis depan profesi yang merencanakan, merancang, membangun, dan mengoperasikan mesin ekonomi dan sosial masyarakat, lingkungan binaan, sambil melindungi dan memulihkan lingkungan alam. Melalui keahlian keanggotaan aktifnya, ASCE adalah penyedia terkemuka konferensi teknis dan profesional dan pendidikan berkelanjutan, penerbit konten teknik sipil terbesar di dunia, dan sumber resmi untuk *code* dan standar yang melindungi publik.

Lembaga ini memiliki visi "insinyur sipil adalah pemimpin global, membangun kualitas hidup yang lebih baik" dan misi "Memberikan nilai kepada anggota kami, memajukan teknik sipil, dan melindungi kesehatan, keselamatan, dan kesejahteraan masyarakat"

ASCE sendiri telah berdiri sejak lama dan memiliki sejarah Panjang yang telah dilaluinya. Awal mula lembaga ini ada yakni pada 5 November 1852, se lusin insinyur sipil terkemuka berkumpul di Croton Aqueduct di New York City, di kantor Chief Engineer Alfred W. Craven, untuk mendiskusikan hingga mendirikan *American Society of Civil Engineers and Architects*. Pada tahun 1868, beberapa tahun setelah arsitek membentuk masyarakat profesional mereka sendiri, ASCE mengadopsi namanya saat ini. Selama 144 tahun pertama keberadaannya, ASCE mempertahankan kantor pusatnya di New York City, berpindah enam kali ke fasilitas yang semakin besar. Pada tahun 1996, ASCE memindahkan kantor pusat globalnya ke Reston, Virginia, tepat di luar Washington, DC.

ASCE mengatur hal-hal yang mengenai konstruksi bangunan, struktur dan fasilitas lain. Setiap hal yang berkaitan dengan Teknik sipil termuat dalam standar yang dikeluarkan oleh lembaga ini. Salah satunya adalah mengenai perancangan desain penyangga pada bejana tekan. Dalam perancangan penyangga perlu memperhatikan beberapa hal yang sangat mempengaruhi kekokohan bangunan ini, seperti faktor angin dan gempa. Hal ini menjadi penting untuk dimasukkan dalam perancangan dikarenakan merupakan faktor alam yang tidak dapat diprediksi kapan akan terjadinya dan bagaimana terjadinya. Sehingga perlu dilakukan antisipasi untuk mentolerir apabila terjadi hal demikian.

### 2.9.2.1 Desain angin

Desain angin digunakan untuk menentukan gaya dan momen pada setiap elevasi untuk memeriksa apakah ketebalan penyangga yang dihitung memadai. Momen *bending* di dasar digunakan untuk menentukan semua perincian penjangkaran dan tumpuan. Rincian tersebut meliputi jumlah dan ukuran baut angkur, ketebalan *skirt*, ukuran kaki, dan ketebalan pelat dasar (Moss & Basic, 2013). Adapun prosedur dalam perancangan penyangga bejana tekan sebagai berikut:

1. Menentukan detail bejana tekan seperti format berikut:

<b>Design Procedure</b>	
Kategori Resiko	= _____
Kecepatan Angin Dasar, $V$	= _____
<i>Exposure category</i>	= _____
<i>Effective diameter, <math>D_e</math></i>	= _____
Tinggi Bejana Tekan, $h$	= _____
<i>Shape factor, <math>C_f</math></i>	= _____
Frekuensi Natural, $f_{nt}$	= _____
<i>Dampig ratio structural, <math>\beta</math></i>	= _____
<i>Empty weight</i>	= _____

Keterangan :

- Kategori resiko dapat dilihat pada tabel berikut :

**Tabel 2.3** Kategori Resiko Bangunan dan Struktur lainnya untuk Beban Banjir, Angin, Salju, Gempa dan Es

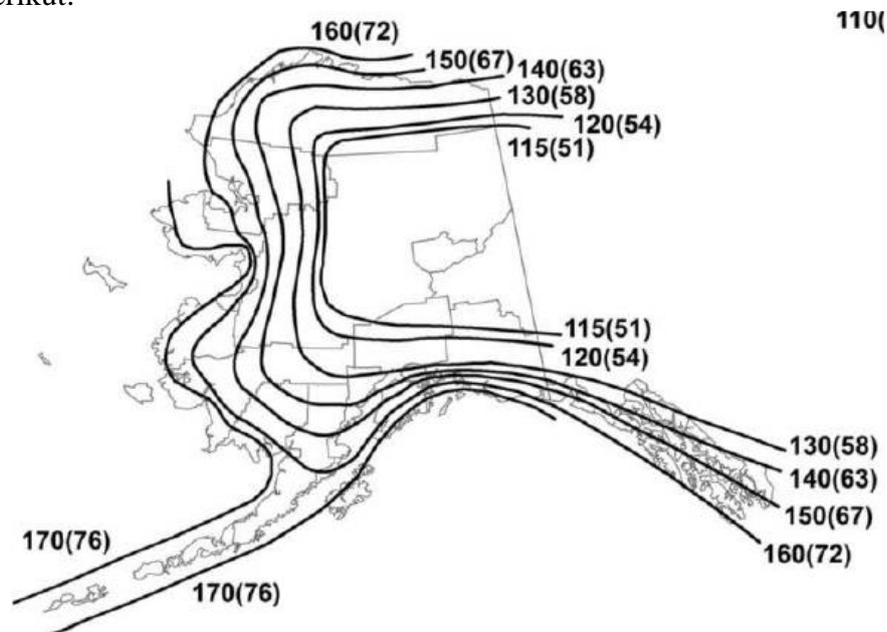
Penggunaan atau Pemanfaatan Fungsi Bangunan Gedung dan Struktur	Kategori Resiko
Bangunan Gedung dan struktur lain yang merupakan resiko rendah untuk kehidupan manusia dalam kejadian kegagalan	I
Semua bangunan Gedung dan struktur lain kecuali mereka terdaftar dalam kategori resiko I, III, dan IV	II
Bangunan Gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan resiko besar bagi kehidupan manusia	III
Bangunan Gedung dan struktur lain, tidak termasuk dalam kategori resiko IV, dengan potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi substantial dan/atau gangguan massa dari hari ke hari kehidupan sipil pada saat terjadi kegagalan	
Bangunan Gedung dan struktur lain tidak termasuk dalam kategori resiko IV (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang manufaktur, proses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuang zat-zat seperti bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan peledak) yang mengandung zat beracun atau mudah meledak di mana kuantitas material melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup untuk menimbulkan suatu ancaman kepada publik jika dirilis.	
Bangunan Gedung dan struktur lain yang dianggap sebagai fasilitas penting	IV
Bangunan Gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan bahaya besar bagi masyarakat.	
Bangunan Gedung dan struktur lain (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang memproduksi, memproses, menangani, menyimpan, menggunakan atau	

membuang zat-zat berbahaya seperti bahan bakar, bahan kimia berbahaya, atau limbah berbahaya) yang berisi jumlah yang cukup dari zat yang sangat beracun dimana kuantitas melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang cukup menimbulkan ancaman bagi masyarakat jika dirilis

Bangunan Gedung dan struktur lain yang diperlukan untuk mempertahankan fungsi dari kategori resiko IV struktur lainnya

---

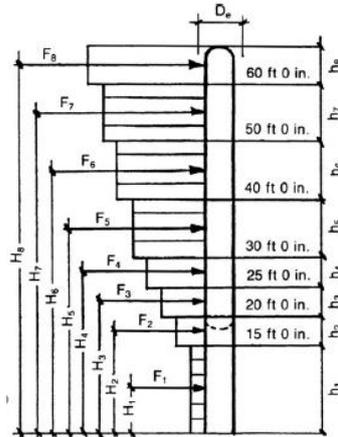
- Kecepatan angin rata-rata pada sebuah daerah dapat ditentukan berdasarkan data berikut:



**Gambar 2.30** Kecepatan Angin Dasar untuk Kategori Resiko III Bangunan dan Struktur Lain  
Sumber : (Moss & Basic, 2013)

- Kategori Eksposur dapat ditentukan berdasarkan tabel berikut:
  - i. Eksposur B: Untuk bangunan Gedung dengan tinggi rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9.1 m). Daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah ber hutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat yang banyak memiliki ukuran dari tempat tinggal keluarga tunggal atau lebih besar.
  - ii. Eksposur C: Untuk semua kasus dimana eksposur B dan eksposur D tidak berlaku. Daerah terbuka dengan penghalang tersebar yang memiliki tinggi umumnya kurang dari 30 ft (9.1 m). Kategori ini mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.
  - iii. Eksposur D: Area datar, area tidak terhalang dan permukaan air. Kategori ini berisi lumpur halus, padang garam, dan es tak terputus.

- Diameter efektif dan ketinggian bejana tekan dapat mengikuti panduan berikut:



**Gambar 2.31** Bejana Tekan Vertikal  
Sumber : (Moss & Basic, 2013)

- *Shape factor* dapat ditentukan berdasarkan formulasi berikut:  
 $C_f$  = force coefficient, shape factor 0.7, 0.8, and 0.9 for  $h/D_e$  of 1, 7, and 25, respectively (linear interpolation is permitted)
- *Damping ratio* dapat dicari dengan formula berikut :  
 $\beta$  = damping ratio (structural), percent of critical bedrock, endbearing piles, or other rigid bases 0,2% friction piles or mat foundations on soil 0,4%
- *Empty weight* merupakan berat kosong bejana tekan sebelum diberi fluida kerja dan beroperasi.

2. Menentukan bejana tekan merupakan benda *rigid* atau fleksibel

- a. Jika  $n > 1$  hz, bejana tekan *rigid*, maka :

$$F = q_z G_f C_f A_f \quad (2.54)$$

- b. Jika  $n < 1$  hz, bejana tekan fleksibel, maka :

$$F = q_z G_f C_f A_f \quad (2.55)$$

Mencari nilai faktor *gust* ( $G_f$ )

- a. Jika  $n > 1$  hz, maka :

Nilai faktor *gust* ( $G_f$ ) dapat langsung menggunakan 0,85 atau dilakukan kalkulasi sebagai berikut :

Diberikan data :

$D_e$  = \_\_\_\_\_ (Diameter efektif)

$h$  = \_\_\_\_\_ (Tinggi)

$g_Q$  = \_\_\_\_\_ (peak factor for background response, use 3.4)

$g_v$  = \_\_\_\_\_ (peak factor for wind response, use 3.4)

Diambil nilai dari tabel 2.4 sesuai data berikut :

$\bar{a}$  = \_\_\_\_\_  $l$  = \_\_\_\_\_

$\bar{b}$  = \_\_\_\_\_  $\bar{e}$  = \_\_\_\_\_

$c$  = \_\_\_\_\_  $Z_{min}$  = \_\_\_\_\_

**Tabel 2.4** *Miscellaneous coefficients*

Expos.	$\alpha$	$z_g$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	$\bar{c}$	l(ft/m)	$\bar{\epsilon}$	$z_{min}$ (ft/m)
B	7,0	1200/365.76	1/4,0	0,45	0,30	320/97.54	1/3,0	30/9.14
C	9,5	900/274.32	1/6,5	0,65	0,20	500/152.4	1/5,0	15/4.57
D	11,5	700/213.36	1/9,0	0,80	0,15	650/198.12	1/8,0	7/2.13

$$\bar{Z} = \max(0,6h, Z_{min}) \quad (2.56)$$

$$I_z = c \left( \frac{22}{\bar{Z}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad \text{or} \quad I_z = c \left( \frac{10}{\bar{Z}} \right)^{\frac{1}{6}} ; SI \quad (2.57)$$

$$L_{\bar{Z}} = l \left( \frac{\bar{Z}}{33} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad \text{or} \quad L_{\bar{Z}} = l \left( \frac{\bar{Z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} ; SI \quad (2.58)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0,63 \left( \frac{D_e + h}{L_{\bar{Z}}} \right)^{0,63}}} \quad (2.59)$$

$$G = 0,925 \left( \frac{1 + 1,7g_Q I_{\bar{Z}} Q}{1 + 1,7g_V I_{\bar{Z}}} \right) \quad (2.60)$$

b. Jika  $n < 1$  hz, bejana tekan fleksibel, maka :

Diberikan data :

$n_1$  = \_\_\_\_\_ (*fundamental natural frequency*)

$V$  = \_\_\_\_\_ (*basic wind speed*)

$\beta$  = \_\_\_\_\_ (*damping ratio structural*)

Diambil nilai dari tabel 2.4 sesuai data berikut :

$\bar{\alpha}$  = \_\_\_\_\_                       $l$  = \_\_\_\_\_

$\bar{b}$  = \_\_\_\_\_                       $\bar{\epsilon}$  = \_\_\_\_\_

$c$  = \_\_\_\_\_                       $Z_{min}$  = \_\_\_\_\_

$$\bar{Z} = \max(0,6h, Z_{min}) \quad (2.61)$$

$$I_z = c \left( \frac{22}{\bar{Z}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad \text{or} \quad I_z = c \left( \frac{10}{\bar{Z}} \right)^{\frac{1}{6}} ; SI \quad (2.62)$$

$$L_{\bar{Z}} = l \left( \frac{\bar{Z}}{33} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad \text{or} \quad L_{\bar{Z}} = l \left( \frac{\bar{Z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} ; SI \quad (2.63)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0,63 \left( \frac{D_e + h}{L_{\bar{Z}}} \right)^{0,63}}} \quad (2.64)$$

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600 n_1)} + \frac{1}{\sqrt{2 \ln(3600 n_1)}} \quad (2.65)$$

$$\bar{V}_{\bar{Z}} = \bar{b} \left( \frac{\bar{Z}}{33} \right)^{\bar{\alpha}} \left( \frac{88}{60} \right) V \quad \text{or} \quad \bar{V}_{\bar{Z}} = \bar{b} \left( \frac{\bar{Z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V ; SI \quad (2.66)$$

$$N_1 = \frac{n_1 L_{\bar{Z}}}{\bar{V}_{\bar{Z}}} \quad (2.67)$$

$$\eta_h = \frac{4,6n_1h}{\bar{V}_z} \quad (2.68)$$

$$\eta_B = \frac{4,6n_1D_e}{\bar{V}_z} \quad (2.69)$$

$$\eta_L = \frac{15,4n_1D_e}{\bar{V}_z} \quad (2.70)$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2}(1 - e^{-2\eta_h}) \quad ; \text{for } \eta > 0 \quad (2.71)$$

$$R_h = 1 \quad ; \text{for } \eta = 0$$

$$R_B = \frac{1}{\eta_B} - \frac{1}{2\eta_B^2}(1 - e^{-2\eta_B}) \quad ; \text{for } \eta > 0 \quad (2.72)$$

$$R_B = 1 \quad ; \text{for } \eta = 0$$

$$R_L = \frac{1}{\eta_L} - \frac{1}{2\eta_L^2}(1 - e^{-2\eta_L}) \quad ; \text{for } \eta > 0 \quad (2.73)$$

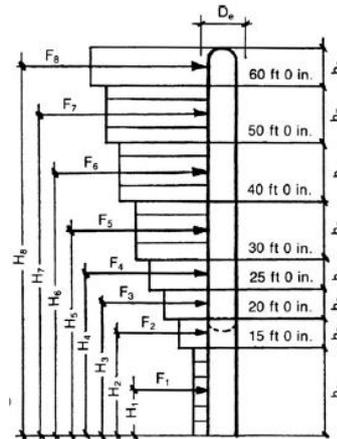
$$R_L = 1 \quad ; \text{for } \eta = 0$$

$$R_n = \frac{7,47N_1}{(1 + 10,3N_1)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.74)$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_B R_L (0,53 + 0,47R_L)} \quad (2.75)$$

$$G = 0,923 \left( \frac{1 + 1,7I_{\bar{z}} \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1,7g_V I_{\bar{z}}} \right) \quad (2.76)$$

3. Mencari *shear* dan momen pada setiap elevasi dengan mengalikan gaya dan ketinggian



**Gambar 2.32** Diagram gaya pada bejana tekan vertikal  
Sumber : (Moss & Basic, 2013)

$$A_f = h_n D_e \quad (2.77)$$

$$F_i = q_z G C_r A_f \quad (2.78)$$

$$M_i = F_i \left( \frac{h_i}{2} \right) + V_{i+1}(h_i) + M_{i+1} \quad (2.79)$$

$$M = \sum F_i H_i \quad (2.80)$$

4. Menjumlahkan setiap gaya dan momen pada setiap elevasi.

$$K_z = 2,01 \left( \frac{z}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad \text{for } 15 \text{ ft} \leq z \leq z_g \quad (2.81)$$

$$K_z = 2,01 \left( \frac{15}{z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad \text{for } z < 15 \text{ ft} \quad (2.82)$$

Keterangan :

$A_f$  = projected area, ft<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>)

$\bar{v}$  = mean hourly wind speed factor

$C_f$  = force coefficient, shape factor 0.7, 0.8, and 0.9 for  $h/D_e$  of 1, 7, and 25, respectively (linear interpolation is permitted). See ASCE/SEI 7-10.

$c$  = turbulence intensity factor

$D_e$  = vessel effective diameter

$F$  = design wind force (  $F = q_z G C_f A_f$  (lb)(N) )

$F_i$  = design wind force of section under consideration,  $i = 1$  to  $n$ , lb (N)

$g_Q$  = peak factor for background response, use 3.4

$g_R$  = peak factor for resonant response

$g_v$  = peak factor for wind response, use 3.4

$G$  = gust effect factor

$G_f$  = gust response factor for flexible vessels

$H_i$  = height from base of vessel to center of section under consideration,  $i = 1$  to  $n$ , ft (m)

$h$  = height of vessel, ft (m)

$h_i$  = length of section under consideration,  $i = 1$  to  $n$ , ft (m)

$I_z$  = the intensity of turbulence at height  $z$

$K_d$  = wind directionality factor, use 0.95 for vessels when using ASCE/SEI 7-10 load combinations

$K_z$  = velocity pressure exposure coefficient from Table 4-3a

$K_{zt}$  = topographic factor, use 1.0 unless vessel is located near or on isolated hills. See ASCE/SEI 7-10 for specific requirements

$L_z$  = integral length scale of turbulence, ft (m)

$l$  = integral length scale factor, ft (m)

$M$  = overturning moment at base, ft-lb (N-m)

$M_i$  = moment at base of section under consideration,  $i = 1$  to  $n$ , ft-lb (N-m)

$N_1$  = reduced frequency

$n_1$  = fundamental natural frequency, Hz

$Q$  = background response factor

$q_z$  = velocity pressure at height  $z$  above the ground

$$0,00256 K_z K_{zt} K_d V^2 (\text{lb}/\text{ft}^2) \quad \text{or}$$

$$0,613 K_z K_{zt} K_d V^2 (\text{N}/\text{m}^2)$$

$R$  = resonant response factor

$RB, Rh, RL, Rn$  = calculation factors

$T$  = period of vibration, sec

$V$  = basic wind speed from map, Figures 4-1a, 4-1b, and 4-1c, mph (m/s)

$V_i$  = shear force at base of section under consideration,  $i = 1$  to  $n$ , lb (N)

$\bar{V}_z$  = mean hourly wind speed at height  $z$ , ft/sec (m/s)

$W$  = weight of vessel, lb (N)

$z$  = height above ground level, ft (m)

- $\bar{z}$  = equivalent height of vessel, ft (m)
- $Z_{min}$  = minimum design height, ft (m), dari Tabel 4-3
- $\bar{\alpha}$  = mean hourly wind-speed power law exponent
- $\beta$  = damping ratio (structural), percent of critical from Table 4-3 bedrock, endbearing piles, or other rigid bases 0.2% friction piles or mat foundations on soil 0.4%
- $\bar{\epsilon}$  = integral length scale power law exponent
- $\eta_B, \eta_h, \eta_L$  = calculation factors

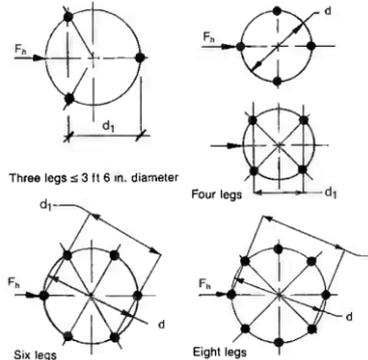
### 2.9.2.2 Desain gempa

Peristiwa seismik menyebabkan bejana tekan bergoyang sebagai akibat dari gerakan tanah. Berapa banyak beban yang dialami bejana tekan tergantung pada jenis pondasi dan penyangga, ukuran dan proporsi bejana tekan, lokasi geografis bejana tekan, dan jenis tanah. Bejana tekan silinder yang tinggi, tipis, dan ramping yang dipasang pada kemiringan, relatif fleksibel dan oleh karena itu akan memiliki periode yang panjang dan frekuensi yang rendah. Sebaliknya bejana tekan pendek akan memiliki periode pendek dan frekuensi yang lebih tinggi. Kapal yang dipasang di dalam atau di atas struktur akan dipengaruhi oleh kekakuan relatif dari struktur tersebut (Moss & Basic, 2013).

Dalam bab ini akan dibahas 2 metode yang dapat digunakan untuk mendesain penyangga bejana tekan yang dipengaruhi oleh peristiwa seismik atau gempa yakni *unbraced leg* dan *skirt*.

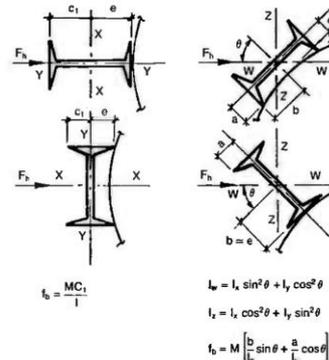
#### 1. Unbraced leg

Penyangga bejana tekan yang menggunakan kaki atau *leg* memiliki beberapa konfigurasi yang dapat dipilih untuk digunakan. Seperti gambar di bawah ini.



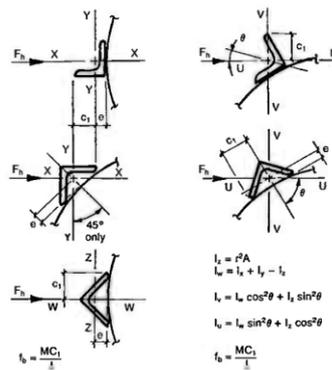
**Gambar 2.33** Jumlah tipikal kaki penyangga bejana tekan

Sumber : (Moss & Basic, 2013)



**Gambar 2.34** Variasi konfigurasi kaki penyangga

Sumber : (Moss & Basic, 2013)



**Gambar 2.35** Variasi konfigurasi kaki penyangga  
 Sumber : (Moss & Basic, 2013)

a) Menentukan detail bejana tekan seperti format berikut :

<b>Calculation</b>	
No	= _____
Size	= _____
A	= _____
r	= _____
Iz	= _____
Iy	= _____
Ix	= _____
Iw	= _____
Iu	= _____
Iv	= _____
$\sum I_1$	= _____
$\sum I_2$	= _____
$K_1/r$	= _____
Fa	= _____

Defleksi (y, in) yang terjadi pada bejana tekan dapat diketahui melalui formula berikut ini:

$$y = \frac{2Wl^3}{3nE \sum I_2} \quad (2.83)$$

Catatan: Batas defleksi yang terjadi yakni 6 in. per 100 ft atau dengan proporsi yang seimbang.

Formula lain yang digunakan dalam merancang penyangga bejana tekan sebagaimana berikut:

- *Period of vibration* (T, sec)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{y}{g}} \quad (2.84)$$

- *Horizontal force at c.g. of vessel*, Fv, lb

$$F_h = C_h W \quad (2.85)$$

- *Vertical force at c.g. of vessel*, Fv, lb

*Downward:*

$$(-)F_v = W \quad \text{or} \quad (1 + C_v)W \quad (2.86)$$

*Upward:*

$$(+)F_v = (C_v - 1)W \quad (2.87)$$

Jika getaran vertikal lebih dari 1.0

- *Overtuning moment at base, in-lb*  

$$M_b = LF_h \quad (2.88)$$

Catatan: Termasuk momen pada pipa jika diaplikasikan

- *Overtuning moment at bottom tangent line, in-lb*  

$$M_t = (L - l)F_h \quad (2.89)$$

- *Maximum eccentric load, lb*  

$$f_1 = \frac{-F_V}{n} - \frac{4M_t}{nD} \quad (2.90)$$

Catatan:  $f_1$  tidak dapat digunakan pada tegangan *bending* jika penyangga bejana tekan bukan beban terpusat

- *Horizontal load distribution,  $V_n$*  (Lihat Gambar 2.35).  
 Beban horizontal pada salah satu kaki tertentu,  $V_n$ , sebanding dengan kekakuan satu kaki yang tegak lurus terhadap gaya yang diterapkan relatif terhadap kekakuan kaki lainnya. Beban yang lebih besar akan menuju ke kaki yang lebih kaku. Jadi, persamaan umumnya:

$$V_n = \frac{VI}{\sum I_1} \quad \text{and} \quad \sum V_n = V \quad (2.91)$$

**Gambar 2.36** Load diagrams for horizontal load distribution  
 Sumber : (Moss & Basic, 2013)

- *Vertical load distribution,  $F_n$*  (Lihat Gambar 2.32).  
 Distribusi beban vertikal pada kaki yang di *bracing* dan tidak di *bracing* adalah identik. Gaya pada salah satu kaki sama dengan beban mati ditambah besar gempa atau angin dan sudut kaki tersebut terhadap arah gaya,  $V$ .

**Tabel 2.5** Vertical load untuk setiap variasi jumlah kaki

Quantity of Legs	Leg No.	Case 1	Case 2
6	1	$F_0 + 1.000 FL$	$F_0 + 0.866 FL$
	2	$F_0 + 0.500 FL$	$F_0$
	3	$F_0 - 0.500 FL$	$F_0 - 0.866 FL$
	4	$F_0 - 1.000 FL$	$F_0 - 0.866 FL$
	5	$F_0 - 0.500 FL$	$F_0$
	6	$F_0 + 0.500 FL$	$F_0 + 0.866 FL$
8	1	$F_0 + 1.000 FL$	$F_0 + 0.923 FL$
	2	$F_0 + 0.707 FL$	$F_0 + 0.382 FL$
	3	$F_0$	$F_0 - 0.382$
	4	$F_0 - 0.707 FL$	$F_0 - 0.923 FL$
	5	$F_0 - 1.000 FL$	$F_0 - 0.923 FL$

	6	$F_0 - 0.707 \text{ FL}$	$F_0 - 0.382 \text{ FL}$
	7	$F_0$	$F_0 + 0.382$
	8	$F_0 + 0.707 \text{ FL}$	$F_0 + 0.923 \text{ FL}$
10		$F_0 + 1.000 \text{ FL}$	$F_0 + 0.951 \text{ FL}$
	2	$F_0 + 0.809 \text{ FL}$	$F_0 + 0.587 \text{ FL}$
	3	$F_0 + 0.309 \text{ FL}$	$F_0$
	4	$F_0 - 0.309 \text{ FL}$	$F_0 - 0.809 \text{ FL}$
	5	$F_0 - 0.809 \text{ FL}$	$F_0 - 0.951 \text{ FL}$
	6	$F_0 - 1.000 \text{ FL}$	$F_0 - 0.951 \text{ FL}$
	7	$F_0 - 0.809 \text{ FL}$	$F_0 - 0.587 \text{ FL}$
	8	$F_0 - 0.309 \text{ FL}$	$F_0$
	9	$F_0 + 0.309 \text{ FL}$	$F_0 + 0.587 \text{ FL}$
	10	$F_0 + 0.809 \text{ FL}$	$F_0 + 0.951 \text{ FL}$
12	1	$F_0 + 1.000 \text{ FL}$	$F_0 + 0.965 \text{ FL}$
	2	$F_0 + 0.866 \text{ FL}$	$F_0 + 0.707 \text{ FL}$
	3	$F_0 + 0.500 \text{ FL}$	$F_0 + 0.258 \text{ FL}$
	4	$F_0$	$F_0 - 0.258 \text{ FL}$
	5	$F_0 - 0.500 \text{ FL}$	$F_0 - 0.707 \text{ FL}$
	6	$F_0 - 0.866 \text{ FL}$	$F_0 - 0.965 \text{ FL}$
	7	$F_0 - 1.000 \text{ FL}$	$F_0 - 0.965 \text{ FL}$
	8	$F_0 - 0.866 \text{ FL}$	$F_0 - 0.707 \text{ FL}$
	9	$F_0 - 0.500 \text{ FL}$	$F_0 - 0.258 \text{ FL}$
	10	$F_0$	$F_0 + 0.258 \text{ FL}$
	11	$F_0 + 0.500 \text{ FL}$	$F_0 + 0.707 \text{ FL}$
	12	$F_0 + 0.866 \text{ FL}$	$F_0 + 0.965 \text{ FL}$
16	1	$F_0 + 1.000 \text{ FL}$	$F_0 + 0.980 \text{ FL}$
	2	$F_0 + 0.923 \text{ FL}$	$F_0 + 0.831 \text{ FL}$
	3	$F_0 + 0.707 \text{ FL}$	$F_0 + 0.555 \text{ FL}$
	4	$F_0 + 0.382 \text{ FL}$	$F_0 + 0.195 \text{ FL}$
	5	$F_0$	$F_0 - 0.195 \text{ FL}$
	6	$F_0 - 0.382 \text{ FL}$	$F_0 - 0.555 \text{ FL}$
	7	$F_0 - 0.707 \text{ FL}$	$F_0 - 0.831 \text{ FL}$
	8	$F_0 - 0.923 \text{ FL}$	$F_0 - 0.980 \text{ FL}$
	9	$F_0 - 1.000 \text{ FL}$	$F_0 - 0.980 \text{ FL}$
	10	$F_0 - 0.923 \text{ FL}$	$F_0 - 0.831 \text{ FL}$
	11	$F_0 - 0.707 \text{ FL}$	$F_0 - 0.555 \text{ FL}$
	12	$F_0 - 0.382 \text{ FL}$	$F_0 - 0.195 \text{ FL}$
	13	$F_0$	$F_0 + 0.195 \text{ FL}$
	14	$F_0 + 0.382 \text{ FL}$	$F_0 + 0.555 \text{ FL}$
	15	$F_0 + 0.707 \text{ FL}$	$F_0 + 0.831 \text{ FL}$
	16	$F_0 + 0.923 \text{ FL}$	$F_0 + 0.980 \text{ FL}$

---

- Bending moment in leg, M, in.-lb.

$$M = f_1 e \pm V_n l \quad (2.92)$$

- Axial stress in leg,  $f_a$ , psi.

$$f_n = \frac{F_n}{A} \quad (2.93)$$

- Bending stress in leg,  $f_b$ , psi.

$$f_b =$$

**Tabel 2.6** Formula untuk setiap kasus

For Case 1	For Case 2
$F_D = \frac{F_v}{n}$	$F_D = \frac{F_v}{n}$
$F_L = \frac{4M}{nd}$	$F_L = \frac{4Md_1}{nd^2}$
$F_n = F_D \pm F_L \cos \phi_n$	
$F_n = F_D \pm F_L \cos \phi_n$	

- Combined stress

$$f_n = \frac{F_n}{A} \text{ if } \frac{f_a}{F_a} \leq 0,15 \text{ , maka } \frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} < 1$$

$$\text{if } \frac{f_a}{F_a} > 0,15 \text{ , maka } \frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m f_b}{\left[1 + \frac{f_a}{F'_e}\right] F_b} < 1 \quad (2.94)$$

dimana  $c_m = 0,85$

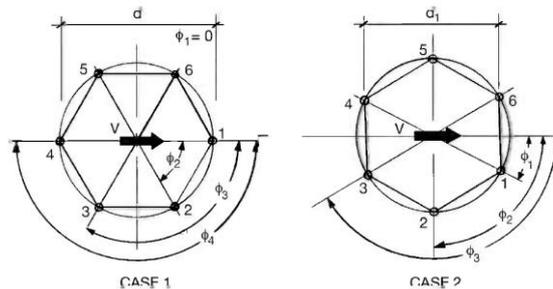
$$F'_e = \frac{12\pi^2 E}{23 \left(\frac{k_1 l}{r}\right)^2} \quad (2.95)$$

- Maximum compressive stress in shell,  $f_c$ , psi (Lihat Gambar 2.36).

$$L_1 = W + 2\sqrt{(Rt)} \quad (2.96)$$

Di bawah penyangga

$$f_c = \frac{f_1}{L_1 t} \quad (2.97)$$



**Gambar 2.37** Load diagrams for vertical load distribution

Sumber : (Moss & Basic, 2013)

## 2. Skirt

Dalam perancangan penyangga bejana tekan jenis *skirt* ini terdapat 2 kasus yang dapat terjadi yakni sebagai berikut:

- Kasus 1: Bejana tekan Uniform

Untuk bejana tekan uniform di setiap bagian (seperti *boiler*, tempat fluida dll)

maka massa bejana tekan diasumsikan uniform di setiap bagian.

$$\begin{aligned} W_o &= \\ H &= \\ D &= \\ t &= \end{aligned}$$

$$T = 0,0000265 \left(\frac{H}{D}\right)^2 \sqrt{\frac{W_o D}{Ht}} \quad (2.98)$$

$$V = C_h W_o \quad (2.99)$$

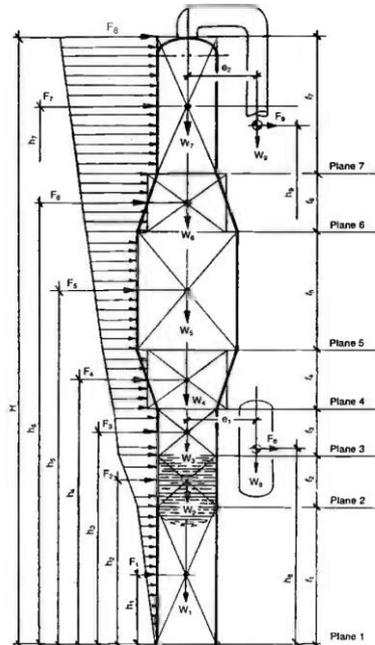
$$F = V \quad (2.100)$$

$$M_b = \frac{2}{3} (FH) \quad (2.101)$$

Momen pada setiap ketinggian  $h_j$

$$M_a = F \left(\frac{2H}{3} - h_i\right) \quad (2.102)$$

b. Kasus 2: Bejana tekan tidak uniform



**Gambar 2.38** Typical dimensional data, forces, and loadings on a nonuniform vessel supported on a skirt

Sumber : (Moss & Basic, 2013)

- Langkah 1: Mencari periode getaran  
Dengan cara membagi bejana tekan menjadi beberapa bagian *section* yang memiliki gaya uniform di setiap permukaan pada *section* tersebut.

**Tabel 2.7** Period of Vibration (POV)

	Part	$\omega$ atau $W$ k/ft	$hx/H$	$\alpha$	$\Delta\alpha$ atau $\beta$	$\omega\Delta\alpha$ atau $W\beta/H$	$\Upsilon$	$\Delta\Upsilon$	$E(D/10)3t\Delta\Upsilon$ Note 3
$T = \left(\frac{H}{100}\right)^2 \sqrt{\frac{\sum \omega\Delta\alpha + \sum \frac{W\beta}{H}}{\sum E \left(\frac{D}{10}\right)^3 t\Delta\Upsilon}} \quad (2.103)$									

- Langkah 2: Mencari gaya, tegangan geser dan momen.  
Pada setiap bagian *section* yang telah dibagi maka dicari gaya, tegangan geser dan momen yang diperlukan.

**Tabel 2.8 Shear & Momen**

$h_i$ (ft)	<i>Part</i>	$W_x$ (kips)	$h_x$ (ft)	$W_x h_x$ (ft-kips)	$F_x$ (kips)	$V_i$ @ btm (kips)	$M_i$ (kips)
$F_x = \frac{V}{\sum W_x h_x^k} (W_x h_x^k) \quad (2.104)$							
$M_i = F_x (h_x - h_i) + V_{i+1} (h_{i+1} - h_i) + M_{i+1} \quad (2.105)$							
k=1 untuk struktur dengan periode < 0,5 s k=2 untuk struktur dengan periode > 2,5 s k dapat diprediksi menggunakan interpolasi linier pada periode antara 0,5 s – 2,5 s							

- Longitudinal stresses*  
Dalam persamaan berikut, D dalam inci. Istilah "48M<sub>x</sub>" digunakan untuk ft-lb atau ft-kips. Jika in.-lb atau in.-kips digunakan, maka istilah "4M<sub>x</sub>" harus diganti di mana "48M<sub>x</sub>" digunakan. Tegangan ijin S<sub>1</sub>E<sub>1</sub> atau B dapat disubstitusikan dalam persamaan untuk t untuk menentukan atau memverifikasi ketebalan pada setiap elevasi. Bandingkan tegangan atau ketebalan yang dibutuhkan pada setiap elevasi dengan ketebalan yang diperlukan untuk tegangan keliling akibat tekanan internal untuk menentukan mana yang akan menentukan. Jika tidak ada kondisi tekanan eksternal, asumsikan kompresi maksimum akan terjadi ketika bejana tidak diberi tekanan dan istilah P<sub>e</sub>D/4t akan putus.

$$\sigma_{xt} = \text{tension side} = \frac{P_i D}{4t} + \frac{48M_x}{\pi D^2 t} - \frac{W_h}{\pi D t} \quad (2.107)$$

$$\sigma_{xc} = \text{compression side} = (-) \frac{P_e D}{4t} - \frac{48M_x}{\pi D^2 t} - \frac{W_h}{\pi D t} \quad (2.108)$$

- Tegangan longitudinal ijin  
Tension: S<sub>1</sub>E<sub>1</sub> =

**Tabel 2.9 Tegangan Longitudinal**

<i>Elevation</i>	M <sub>x</sub>	W <sub>n</sub>	D	t	<i>Tension</i>		<i>Compression</i>	
					S <sub>1</sub> E <sub>1</sub>	σ <sub>xt</sub>	B	σ <sub>xc</sub>

Kompresi:

$$A = \frac{0,125t}{R_o} \quad (2.108)$$

B = Diperoleh dari grafik material ASME Code, *Section II, Part D, Subpart 3*

Catatan: *Joint efficiency* untuk pengelasan longitudinal adalah 1,0

### 2.9.3 SNI

SNI (Standar Nasional Indonesia) merupakan sekumpulan aturan-aturan yang dikeluarkan oleh Badan Standarisasi Nasional yang harus dipenuhi sebagai tolak ukur kelayakan terhadap suatu proses dan/atau produk yang berada dan digunakan di Indonesia. Suatu produk yang tidak memenuhi standar SNI ini dikategorikan sebagai produk yang tidak layak edar di Indonesia.

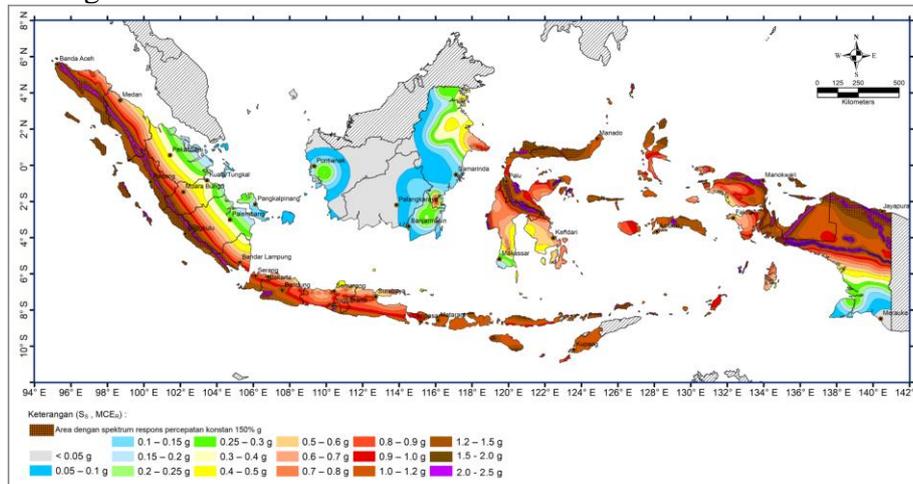
SNI telah mengatur banyak hal hingga kini, beberapa di antaranya adalah SNI 1726 yang mengatur tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung dan SNI 1727 yang mengatur tentang beban minimum untuk perencanaan bangunan gedung dan struktur lain.

### 2.9.3.1 SNI 1727

Standar ini memuat persyaratan minimum mengenai beban, tingkat bahaya, kriteria yang terkait, dan sasaran kinerja yang diperkirakan untuk bangunan gedung, struktur lain, dan komponen non strukturalnya yang memenuhi persyaratan peraturan bangunan. Beban, kombinasi pembebanan, dan kriteria terkait yang diberikan dalam standar ini harus digunakan untuk perancangan dengan metode kekuatan atau perancangan dengan metode tegangan izin yang terdapat dalam spesifikasi desain untuk material struktural konvensional. Kombinasi pembebanan dan kekuatan desain dianggap mampu memberikan tingkat kinerja yang diharapkan dalam ketentuan standar ini. Prosedur penerapan dengan cara alternatif untuk menunjukkan kinerja yang dapat diterima juga dijelaskan dalam standar ini (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

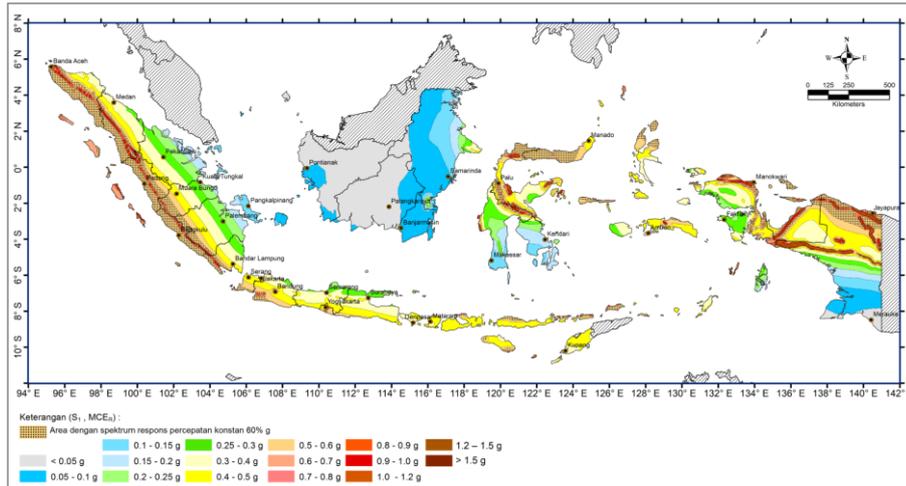
Syarat-syarat perencanaan struktur bangunan gedung dan non gedung tahan gempa yang ditetapkan dalam standar ini tidak berlaku untuk bangunan sebagai berikut:

- a) Struktur bangunan dengan sistem struktur yang tidak umum atau yang masih memerlukan pembuktian tentang kelayakannya;
- b) Struktur jembatan kendaraan lalu lintas (jalan raya dan kereta api), struktur reaktor energi, struktur bangunan keairan dan bendungan, struktur menara transmisi listrik, serta struktur anjungan pelabuhan, anjungan lepas pantai, dan struktur penahan gelombang.



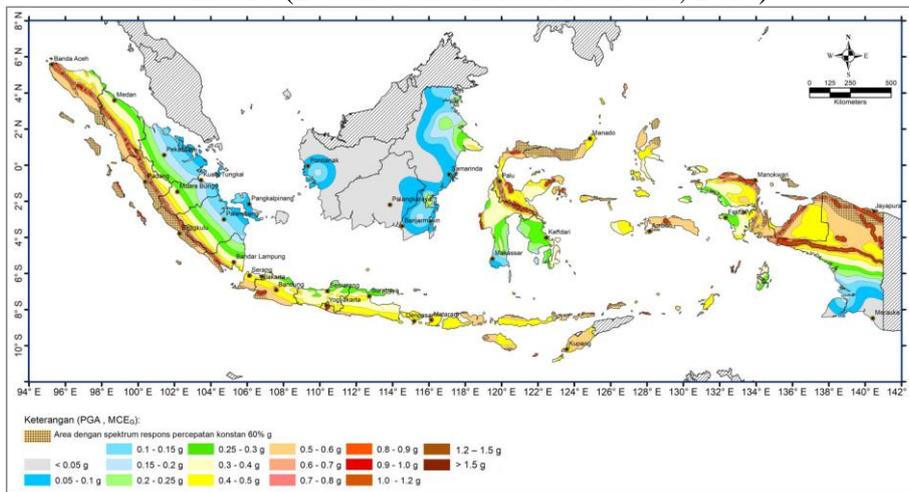
**Gambar 2.39** Parameter gerak tanah  $S_s$ , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2 detik (redaman kritis 5%)

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2013)



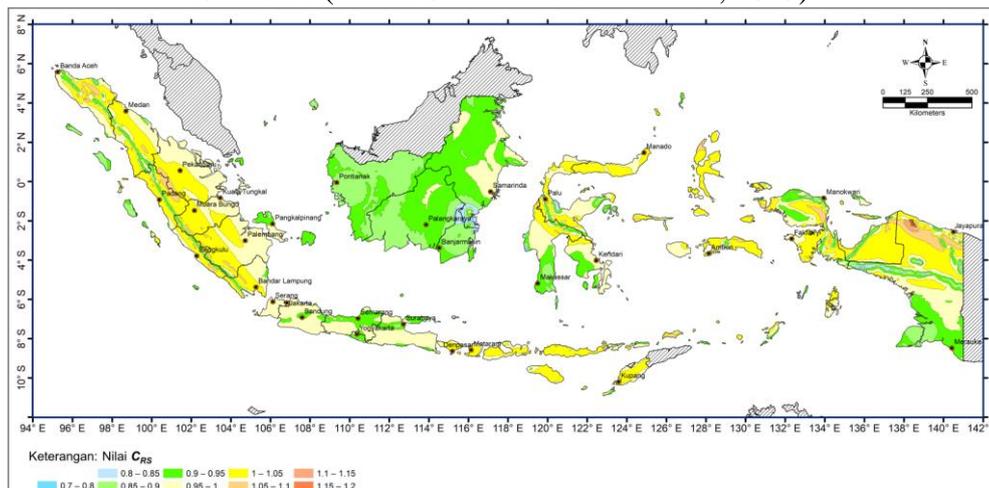
**Gambar 2.40** Parameter gerak tanah  $S_1$ , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE<sub>R</sub>) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2 detik (redaman kritis 5%)

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2013)



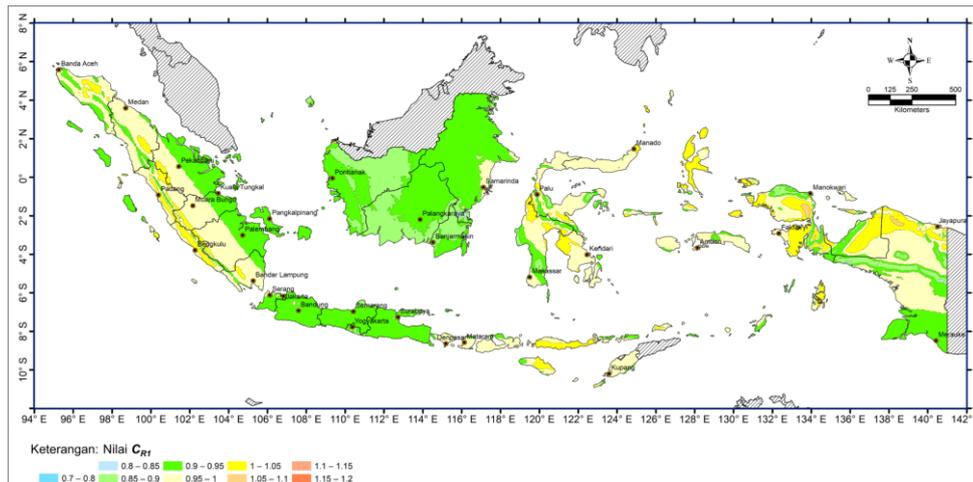
**Gambar 2.41** PGA Gempa maksimum yang dipertimbangkan rata-rata geometrik (MCE<sub>G</sub>) wilayah Indonesia.

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2013)

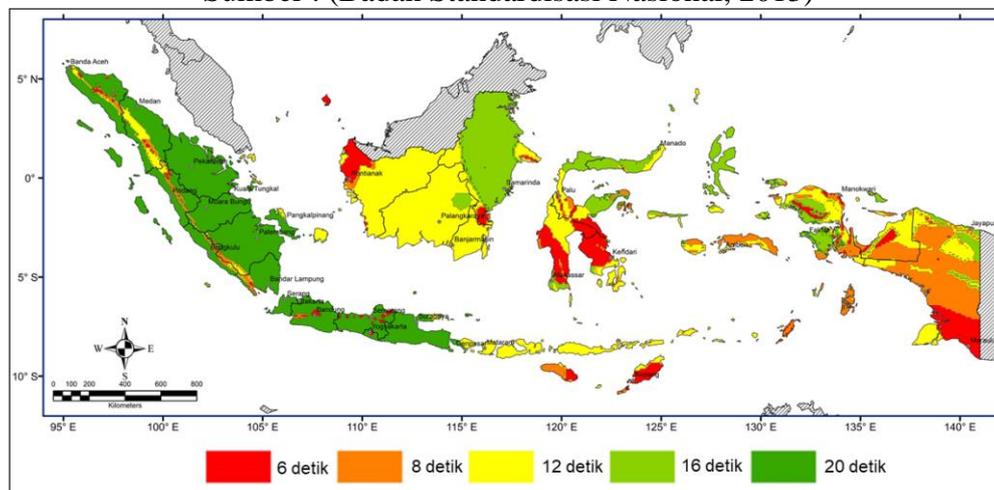


**Gambar 2.42** C<sub>RS</sub> koefisien risiko terpetakan, periode spektrum respons 0,2 detik

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2013)



**Gambar 2.43**  $C_{R1}$  koefisien risiko terpetakan, periode *respons spectral* 1 detik  
 Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2013)



**Gambar 2.44** Peta transisi periode Panjang,  $T_L$ , wilayah Indonesia  
 Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2013)

### 2.9.3.2 SNI 1726

Standar ini memuat ketentuan beban minimum untuk merancang bangunan Gedung dan struktur lain. Beban dan kombinasi pembebanan yang sesuai, telah dikembangkan dan harus digunakan bersama, baik untuk perancangan dengan metode kekuatan ataupun perancangan dengan metode tegangan izin. Untuk kuat rancang dan batas tegangan izin, spesifikasi perancangan bahan bangunan konvensional yang digunakan pada bangunan Gedung dan modifikasinya yang dimuat dalam standar ini harus diikuti (Badan Standardisasi Nasional, 2013).

Kecepatan angin dasar, yang digunakan dalam menentukan beban angin desain di bangunan Gedung dan struktur lain harus ditentukan dari instansi yang berwenang, sesuai dengan kategori risiko bangunan Gedung dan struktur. Perkiraan kecepatan angin dasar dari data iklim daerah (Badan Standardisasi Nasional, 2013).

## 2.10 Pembebanan

Ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam pembuatan bejana tekan di antaranya adalah pembebanan yang mungkin terjadi pada tangki seperti :

### 2.10.1 Beban angin

Setiap pembebanan yang dikenai pada bejana tekan mengakibatkan perubahan bentuk atau deformasi. Setiap deformasi yang terjadi tidak diperbolehkan melebihi batas nilai agar dapat dikatakan aman. Berdasarkan ASME batas nilai yang diperbolehkan terjadi yakni 6 in untuk setiap 100 ft ketinggian bejana tekan atau dapat diperoleh menggunakan rumus berikut;

$$\Delta_M = \frac{P_w D_1 H (12H)^3}{8EI} \quad (2.109)$$

Keterangan:

$\Delta_M$  = Deformasi maksimum, in

$D_1$  = Width of the tower with insulation, ft

$E$  = Modulus of Elasticity, psi

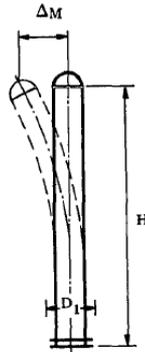
$H$  = Length of vessel, included skirt, ft.

$I$  =  $R^3 \pi t$ , moment of inertia for thin cylindrical shell (when  $R > 10t$ )

$R$  = Mean radius of the tower, in.

$t$  = Thickness of skirt, in.

$P_w$  = Wind pressure, psf



**Gambar 2.45** Batas Deformasi

Sumber : (Megyesy, 2008)

Selain deformasi yang terjadi, bejana tekan juga akan mengalami getaran yang diakibatkan oleh beban angin, nilai ambang batas getaran yang diperbolehkan berdasarkan ASME dapat di cari melalui rumus sebagai berikut:

*Period of Vibration:*

$$T = 0,0000265 \left(\frac{H}{D}\right)^2 \sqrt{\frac{wD}{t}} \quad (2.110)$$

*Maximum Allowable Period of Vibration:*

$$T_a = 0,80 \sqrt{\frac{WH}{V_g}} \quad (2.111)$$

Keterangan:

$D$  = Outside diameter of vessel, ft.

$H$  = Length of vessel including skirt, ft.

$g$  = 32.2 ft. per sec. squared, acceleration

$t$  = Thickness of skirt at the base, in.

$V$  = Total shear, lb. CW,

$W$  = Weight of tower, lb.

$w$  = Weight of tower per foot of height, lb.

Beban angin yang terjadi pada bejana tekan, dapat dikatakan uniform untuk aliran kecepatan anginnya pada ketinggian < 15 ft, hal ini mengacu pada distribusi pembebanan angin yang diberikan oleh ASME (Moss & Basic, 2013), sebagaimana gambar berikut :

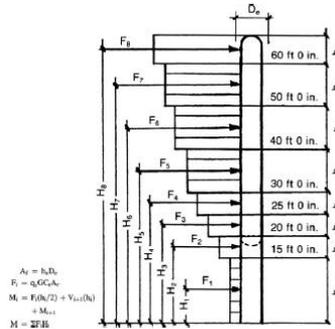


Figure 4-2. Vertical vessels.

**Gambar 2.46** Distribusi Beban Angin terhadap Ketinggian (Moss & Basic, 2013)

### 2.10.2 Beban gempa

Beban gempa adalah beban yang bekerja pada suatu struktur akibat dari pergerakan tanah yang diperlukan karena adanya gempa bumi (baik itu gempa tektonik atau vulkanik) yang mempengaruhi struktur tersebut. Gempa mengakibatkan beban pada struktur karena interaksi tanah dengan struktur dan karakteristik respon struktur. Sebagai akibat dari adanya gaya oleh pergerakan tanah maka bejana tekan mengalami *overturning moment*. Dimana batas momen yang boleh terjadi pada bejana tekan dapat dicari menggunakan rumus sebagai berikut:

$$M = \left[ F_t \times H + (V - F_t) \times \left( \frac{2H}{3} \right) \right] \quad (2.112)$$

$$M_x = [F_t \times X] \text{ for } X \leq \frac{H}{3} \quad (2.113)$$

$$M_x = \left[ F_t \times H + (V - F_t) \times \left( X - \frac{H}{3} \right) \right] \text{ for } X > \frac{H}{3} \quad (2.114)$$

$$V = \frac{ZIC}{R_w} W \quad (2.115)$$

Keterangan:

$D$  = Outside diameter of vessel, ft.

$C$  = Numerical Coefficient =  $\frac{2,35S}{T^3}$  (need not exceed 2.75)

= Numerical Coefficient = 0.035

$D$  = Outside diameter of vessel, ft.

$E$  = Efficiency of welded joints

$F_t$  = Total horizontal seismic force at top of the vessel, lb.

Determined from the following formula:

$F_t = 0.07 TV$  ( $F_t$  need not exceed 0.25 V)

= 0, for  $T \leq 0.7$

$H$  = Length of vessel including skirt, ft.

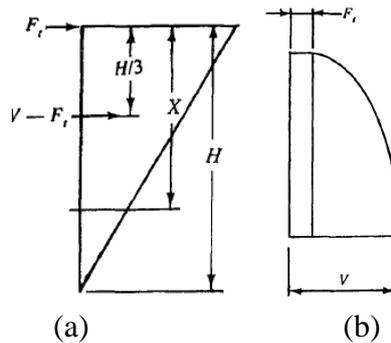
$I$  = Occupancy importance coefficient (use 1.0 for vessels)

$M$  = Maximum moment (at the base), ft-lb.

- $M_x$  = Moment at distance  $X$ , ft-lb.  
 $R$  = Mean radius of vessel, in.  
 $R_w$  = Numerical coefficient (use 2.9 for vessels)  
 $S$  = Site coefficient for soil characteristics  
 $St$  = Allowable tensile stress of vessel plate material, psi.  
 $T$  = Fundamental period of vibration, seconds =  $C_t \times H^{\frac{3}{4}}$   
 $t$  = Required corroded vessel thickness, in.

$$\frac{12M}{\pi R^2 S_t E} \quad \text{or} \quad \frac{12M_x}{\pi R^2 S_t E} \quad (2.116)$$

- $V$  = Total seismic shear at base, lb.  
 $W$  = Total weight of tower, lb.  
 $X$  = Distance from top tangent line to the level under consideration, ft.  
 $Z$  = Seismic zone factor,  
 0.075 for zone 1  
 0.15 for zone 2A  
 0.2 for zone 2B  
 0.3 for zone 3  
 0.4 for zone 4



**Gambar 2.47** (a) Seismic load diagram (b) Seismic shear diagram  
 Sumber : (Megyesy, 2008)

## 2.11 Metode Elemen Hingga

Konsep dasar dalam metode elemen hingga adalah mendiskretisasi atau membagi suatu struktur menjadi bagian yang lebih kecil yang jumlahnya berhingga. Kemudian dilakukan analisis terhadap setiap bagian kecil tersebut dan dilakukan penggabungan elemen-elemen kecil untuk mendapatkan nilai pendekatan numerik. Karena metode ini merupakan metode numerik, maka metode ini memiliki kemampuan untuk menyelesaikan permasalahan kompleks yang dapat digambarkan dalam bentuk persamaan diferensial.

FEM dapat diterapkan dalam memecahkan model matematika dari banyak masalah teknik, dari analisis tegangan rangka dan struktur rangka atau mesin yang rumit, hingga respons dinamis mobil, kereta api, atau pesawat terbang di bawah beban mekanis, termal, atau elektromagnetik yang berbeda. Ada banyak aplikasi elemen hingga di industri, mulai dari otomotif, dirgantara, pertahanan, produk konsumen, dan peralatan industri hingga energi, transportasi dan konstruksi (Chen & Liu, 2014)

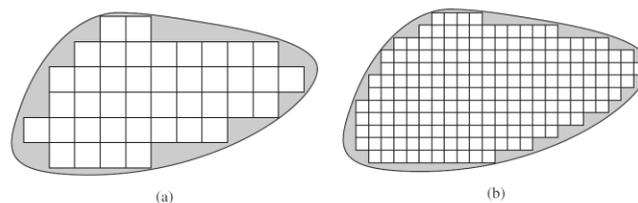
Dalam pengertian lain menjelaskan metode elemen hingga (FEM), kadang-kadang disebut sebagai analisis elemen hingga (FEA), adalah teknik komputasi yang digunakan untuk mendapatkan solusi perkiraan masalah nilai batas dalam rekayasa. Secara sederhana, masalah nilai batas adalah masalah matematika di mana satu atau lebih variabel dependen

harus memenuhi persamaan diferensial di mana-mana dalam domain variabel independen yang diketahui dan memenuhi kondisi spesifik pada batas domain. Masalah nilai batas juga kadang-kadang disebut masalah lapangan. Medan adalah domain minat dan paling sering mewakili struktur fisik. Variabel medan adalah variabel dependen minat yang diatur oleh persamaan diferensial. Kondisi batas adalah nilai tertentu dari variabel lapangan (atau variabel terkait seperti turunan) pada batas lapangan. Tergantung pada jenis masalah fisik yang dianalisis, variabel medan mungkin termasuk perpindahan fisik, suhu, fluks panas, dan kecepatan fluida untuk menyebutkan beberapa saja (Hutton, 2004).

Banyak program komersial tersedia untuk melakukan analisis elemen hingga (FEA). Di antara semua jenis solusi simulasi elemen hingga yang ditawarkan oleh perusahaan CAE besar, ANSYS Workbench adalah ANSYS, Inc. Platform yang mudah digunakan yang dirancang untuk berintegrasi mulus dengan rangkaian teknologi simulasi rekayasa canggih kami. Menyediakan konektivitas dua arah ke sistem CAD utama. Lingkungan kerja Workbench dikembangkan untuk meningkatkan produktivitas tim dan menyederhanakan pekerjaan. Perangkat lunak ini dapat digunakan dalam berbagai disiplin ilmu teknik, menjadikannya alat penting untuk pengembangan produk di banyak perusahaan (Chen & Liu, 2014).

### 2.11.1 Meshing

Proses merepresentasikan domain fisik dengan elemen hingga disebut *mesh*, dan kumpulan elemen yang dihasilkan disebut *mesh* elemen hingga. Geometri elemen yang paling umum digunakan memiliki tepi lurus, jadi jika domain berisi batas melengkung, umumnya tidak mungkin untuk menyesuaikan seluruh domain fisik ke *mesh* elemen. Situasi ini ditunjukkan pada Gambar 2.44a. Di sini, pinggiran kurva digabungkan dengan (kira-kira) elemen persegi. Jaring halus dari domain yang sama ditunjukkan pada Gambar 2.44b. Ini menggunakan elemen yang lebih kecil dan lebih banyak dari jenis yang sama. Perhatikan bahwa *mesh* yang lebih halus mencakup lebih banyak domain fisik dengan representasi elemen hingga, dan batas-batas melengkung lebih mendekati. (Elemen segitiga dapat memperkirakan tepi dengan lebih baik.)

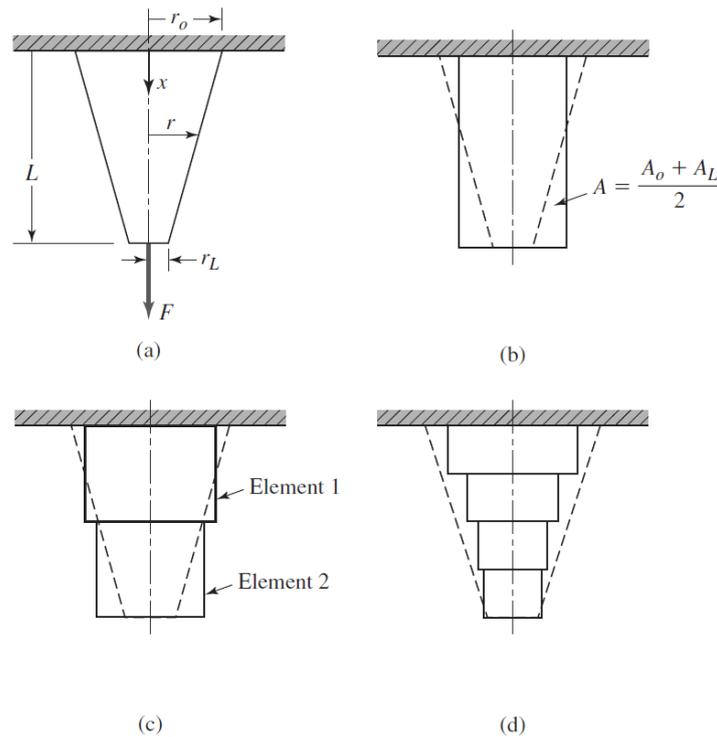


**Gambar 2.48** (a) Domain batas melengkung acak dimodelkan menggunakan elemen persegi. Area bergaris tidak termasuk dalam model. Dengan total 41 elemen. (b) *Mesh* elemen hingga yang diperhalus yang menunjukkan pengurangan area yang tidak termasuk dalam model.

Sumber : (Chen & Liu, 2014)

Jika fungsi interpolasi memenuhi persyaratan matematika tertentu, solusi elemen hingga dari masalah tertentu konvergen ke solusi eksak dari masalah tersebut. Artinya, solusi elemen hingga secara bertahap berubah seiring dengan bertambahnya jumlah elemen dan dimensi fisik elemen berkurang. Perubahan inkremental menurun dengan proses subdivisi *mesh* dan asimtotik mendekati solusi yang tepat. Untuk menjelaskan konvergensi, pertimbangkan masalah yang relatif sederhana dengan solusi yang diketahui. Gambar 2.47a menunjukkan silinder padat meruncing dengan satu ujung ditopang dan

ujung lainnya di bawah beban tarik. Dengan asumsi perpindahan pada saat beban tarik diterapkan, pendekatan pertama diperoleh dengan mengasumsikan bahwa silinder seragam dan luas penampang sama dengan luas rata-rata silinder (Gambar 2.47b). Karena anggota seragam adalah sambungan elemen hingga atau batang, pendekatan pertama adalah model elemen hingga dengan elemen tunggal. Solusinya berasal dari teori kekuatan material. Kemudian modelkan silinder kerucut sebagai dua batang seragam berturut-turut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.47c. Dalam model dua elemen, panjang setiap elemen adalah setengah dari panjang total silinder, dan luas penampang adalah luas rata-rata setengah dari panjang silinder yang sesuai. Gambar 2.47D, dll.



**Gambar 2.49** (a) Silinder melingkar tirus yang dikenai beban tarik:  $r(x)=r_0 (x/L)(r_0-r_L)$ . (b) Silinder tirus sebagai elemen aksial (batang) tunggal menggunakan luas rata-rata. Silinder tirus yang sebenarnya ditampilkan sebagai garis putus-putus. (c) Silinder tirus dimodelkan sebagai dua elemen hingga dengan panjang yang sama. Luas setiap elemen rata-rata di atas panjang silinder runcing masing-masing. (d) Silinder melingkar tirus yang dimodelkan sebagai empat elemen hingga dengan panjang yang sama. Area rata-rata di atas panjang masing-masing silinder (panjang elemen= $L/4$ ).

Sumber : (Chen & Liu, 2014)

### 2.11.2 Static structural

Analisis *static structural* adalah analisis yang menggunakan material linier atau non linier di bawah beban untuk menentukan perilaku struktural dan batas kapasitas. Analisis ini memberikan perpindahan, tegangan, regangan, dan gaya struktur. Analisis ini sangat bergantung pada efek inersia dan redaman. Agar analisis memenuhi validasi struktural yang diinginkan, harus dapat menentukan dukungan, kontak, dan kekuatan model yang dianalisis. Dukungan diberikan dengan membatasi atau melepaskan derajat kebebasan yang tersedia dalam model dalam bentuk kendala. Selanjutnya, jenis kontak untuk setiap permukaan kontak ditentukan. Kontak dapat dilem atau digeser. *Bonding* dapat digunakan pada kontak yang telah menjadi satu kesatuan. Sedangkan *sliding* dapat digunakan pada

permukaan yang mungkin bersentuhan dan bergerak karena gesekan. Gaya-gaya yang bekerja pada benda tersebut harus ditentukan. Besaran dan jenis gaya yang dapat ditentukan seperti Gaya titik (*point force*), gaya permukaan (*surface force*), tekanan (*pressure*), momen, tekanan linier, dan lain-lain.

### 2.11.3 Modal analysis

*Modal Analysis* adalah studi tentang sifat dinamis struktur linier, berdasarkan pengujian struktural atau simulasi berbasis analisis elemen hingga. Sifat dinamis ini termasuk frekuensi resonansi (juga disebut "frekuensi natural" atau "frekuensi eigen") dan mode struktural (atau "mode eigen"). Sifat dinamis tergantung pada massa, kekakuan dan distribusi redaman pada struktur, dan menentukan perilaku getaran struktural ketika terkena beban operasional. Setiap deformasi sistem struktur linier dapat dinyatakan sebagai kombinasi linier dari mode struktural, yang membentuk basis vektor ortonormal (Siemens, 2020).

Pengujian modal menggabungkan akuisisi data dengan analisis lebih lanjut. Dalam aplikasi industri, proses lengkap sering disebut sebagai pengujian dan analisis modal, atau analisis modal eksperimental (EMA).

Hasil pengujian dan analisis modal digunakan dalam berbagai aplikasi simulasi dan pengujian, termasuk perhitungan respons getaran, analisis akar penyebab masalah getaran dan deteksi kerusakan, tetapi juga untuk menambahkan fleksibilitas pada analisis multibody dan mempercepat ketahanan dan simulasi akustik-vibro. Perhitungan berbasis modal sangat efektif dan memungkinkan evaluasi yang efisien atas perubahan struktural terhadap respons dalam bentuk apa pun.

Berikut adalah cara bagaimana frekuensi natural dan mode *shapes* dapat dikalkulasi. Persamaan gerak linear untuk *free undamped vibration* adalah :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2.117)$$

Dimana  $[M]$  adalah matriks massa,  $\{\ddot{u}\}$  adalah percepatan,  $[K]$  adalah matriks kekakuan, dan  $\{u\}$  adalah perpindahan. Dengan mengasumsikan gerak harmonic, vektor percepatan dan perpindahan dapat diwakili dengan dua persamaan berikut ini :

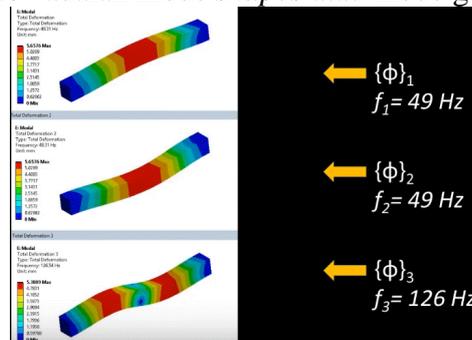
$$\begin{aligned} \{u\} &= \{\phi\}_i \sin(\omega_i t + \vartheta_i) \\ \{\ddot{u}\} &= -\omega_i^2 \{\phi\}_i \sin(\omega_i t + \vartheta_i) \end{aligned} \quad (2.118)$$

Setelah itu substitusikan persamaan percepatan dan perpindahan ke persamaan gerak linear, sehingga didapat *eigenvalue problems* sebagai berikut,

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\phi_i\} = \{0\} \quad (2.119)$$

Selesaikan bagian pertama ( $[K] - \omega_i^2 [M]$ ), akan didapatkan frekuensi natural. Kemudian selesaikan bagian kedua, akan didapatkan mode shapes  $\{\phi_i\}$ . Eigenvalue adalah hasil kuadrat dari frekuensi natural ( $\omega_i^2$ ).

Sedangkan *eigenvector* adalah mode *shapes* atau mode getar dari struktur.



**Gambar 2.50** Modal Analysis

Sumber : (B. O. F. Engineering, 2008)

Frekuensi natural ( $f_i$ ) dihitung menggunakan rumus

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.120)$$

*Eigenvector* merepresentasikan mode *shape* yang diperoleh ketika struktur bergetar karena frekuensi yang diaplikasikan tersebut (B. O. F. Engineering, 2008)

#### 2.11.4 Response spectrum analysis

*Response Spectrum Analysis* adalah metode untuk memperkirakan respons struktural terhadap peristiwa dinamis pendek, non deterministik, dan *transien*. Contoh peristiwa tersebut adalah gempa bumi dan guncangan. Karena riwayat waktu yang tepat dari beban tidak diketahui, sulit untuk melakukan analisis yang bergantung pada waktu. Karena durasinya yang pendek, proses ini tidak dapat dianggap sebagai proses yang *ergodik* ("stasioner"), sehingga pendekatan respons acak juga tidak dapat diterapkan (Comsol, 2019).

Metode spektrum respons didasarkan pada superposisi mode tipe khusus. Idanya adalah untuk memberikan masukan yang memberikan batasan seberapa banyak mode *eigen* yang memiliki frekuensi alami tertentu dan redaman dapat dieksitasi oleh peristiwa jenis ini.

Spektrum respons adalah fungsi frekuensi atau periode, yang menunjukkan respons puncak dari osilator harmonik sederhana yang dikenai peristiwa *transien*. Spektrum respons adalah fungsi dari frekuensi alami osilator dan redamannya. Jadi, ini bukan representasi langsung dari konten frekuensi eksitasi (seperti dalam transformasi Fourier), melainkan efek yang dimiliki sinyal pada sistem yang didalilkan dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF).

#### 2.11.5 Fluent

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah metode komputasi yang digunakan untuk menentukan solusi numerik dari persamaan yang mengatur aliran fluida. Prinsip yang digunakan dalam metode ini adalah suatu ruang berisi fluida yang akan dilakukan perhitungan dibagi menjadi beberapa bagian. Bagian-bagian ini disebut dengan cell dan prosesnya bernama *meshing*. *Cell* merupakan sebuah kontrol perhitungan yang akan dilakukan oleh komputer. Dalam setiap *cell* akan dilakukan perhitungan dengan batasan domain dan *boundary condition* yang telah ditentukan. CFD memungkinkan untuk menganalisis fluid mechanic secara mendalam. Sebagian besar hasil dari metode CFD ini memberikan peningkatan kinerja dan keandalan yang lebih baik. Secara umum, proses perhitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama, yaitu sebagai berikut (Xia & Sun, 2002)

##### 1. Pre-Processing

Sebelum melakukan simulasi untuk pemecahan sebuah model numerik, perlu dilakukan pengaturan pada *boundary condition* untuk memerikan Batasan apa saja dalam *solving problem* nantinya. Hal -hal yang dilakukan diantaranya penentuan geometri, *meshing* dan mendefinisikan kondisi batas.

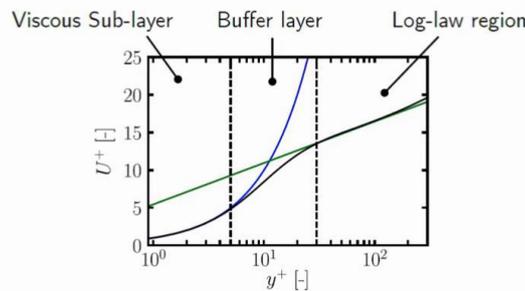
##### a. Model turbulensi SST k- $\omega$

Pada tahun 1994, Menter mengajukan sebuah metode untuk menggunakan keunggulan model turbulen k-Epsilon pada daerah *free stream*, dan model turbulen k-Omega pada daerah dinding dengan memperkenalkan *Blending Function*, F. Karena bentuk persamaan *transport* model k-Omega dan k-Epsilon memiliki kemiripan, kecuali pada bagian-bagian tertentu dan koefisien empirisnya, maka *blending function* digunakan untuk mengubah persamaan tersebut dengan menginput nilai F = 0 untuk daerah *free*

*stream* (sehingga persamaan menjadi k-Epsilon), dan nilai  $F = 1$  untuk daerah dekat dinding (sehingga persamaan menjadi k-Omega) tanpa harus mengubah model tersebut. Model k- $\omega$  SST sering digunakan dalam komputasi CFD karena memiliki perilaku yang baik dalam menangkap *adverse pressure gradient* dan aliran separasi (Wiratama, 2021).

*b. Wall function*

Di dalam proses komputasi CFD, aliran turbulen merupakan fenomena yang selalu terjadi dan secara signifikan dipengaruhi oleh keberadaan dinding, dimana wilayah yang terkena viskositas memiliki gradien besar dalam variabel solusi. Hal ini menyebabkan pentingnya pemodelan turbulen untuk menentukan ukuran sel yang tepat di dekat domain dinding. Setiap model turbulensi memiliki batasan nilai  $y^+$  pada dinding. Pada model turbulensi k- $\omega$  SST mengharuskan nilai  $y^+$  pada dinding di antara 30 dan 300. Aliran dengan kecepatan yang tinggi memiliki *boundary layer* yang tipis sehingga menghasilkan nilai  $y^+$  yang sangat kecil, oleh sebab itu ukuran elemen yang dekat dengan dinding harus dikurangi.



**Gambar 2.51** Batasan daerah *viscous sub-layer*, *buffer layer*, dan *log-law region*  
 Sumber : (Q. Engineering, 2022)

Persamaan *standard wall functions* adalah sebagai berikut.

$$U^+ = y^+ \text{ untuk } y^+ < 5$$

$$U^+ = \frac{1}{k} \log(Ey^+) \text{ untuk } 30 < y^+ < 200 \tag{2.121}$$

Terdapat 2 cara yang dapat digunakan agar model turbulensi valid untuk membentuk turbulensi di area dekat dengan dinding. Cara yang pertama adalah dengan menggunakan model turbulensi Reynold rendah untuk menyelesaikan daerah di dekat dinding sehingga nilai *centroid cell* pertama harus ditempatkan di daerah *viscous-sub layer* yang berarti nilai  $y^+ = 1$ . Akan tetapi dengan menempatkan di daerah *viscous-sub layer*, menyebabkan jumlah *cell* yang terlalu banyak dan akan memakan waktu yang lama dalam proses *solving*. Cara yang kedua adalah dengan menggunakan *wall functions*. Perumusan  $y^+$  (*wall distance*) adalah sebagai berikut (Q. Engineering, 2022).

$$y^+ = \frac{\rho y^* u_\tau}{\mu} \tag{2.122}$$

Keterangan :

- $y^+$  = Jarak dinding normal non-dimensional
- $y^*$  = Tinggi dinding
- $u_\tau$  = Kecepatan gesekan
- $\nu$  = Kecepatan fluida

Kecepatan gesekan merupakan referensi berdasarkan tegangan geser dinding yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.123)$$

Keterangan :

$\tau_w$  = Tegangan geser pada dinding

$\rho$  = Massa jenis fluida

Tegangan geser pada dinding juga dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.124)$$

Keterangan :

$C_f$  = Koefisien gesek pada dinding

$U$  = Kecepatan *freestream*

Perkiraan gesekan pada dinding dapat dirumuskan menggunakan *skin friction correlation Schlichting* :

$$C_f = [2 \log_{10}(Re) - 0,65]^{-2,3} \text{ untuk } Re < 10^9 \quad (2.125)$$

### c. *Grid independence study*

Dalam proses *solving*, hasil yang didapatkan tentunya tidak langsung berupa hasil yang akurat. Hal ini dikarenakan proses *meshing* tidak bisa sepenuhnya diperhitungkan secara analitis, seperti ukuran *mesh*, jenis *mesh*, dan lain sebagainya. Tentunya ini dapat terjadi dikarenakan sifat dari geometri bilah turbin memiliki bentuk yang kompleks. Oleh karena itu, dibutuhkannya suatu metode untuk membuktikan bahwa hasil simulasi telah mendekati keakuratan terhadap pengaruh resolusi *mesh*. Metode yang akan digunakan untuk menjawab objektif di atas adalah dengan menggunakan metode *Grid Independence Test*. *Grid independence test* bertujuan untuk membuktikan bahwa hasil simulasi yang telah konvergen adalah hasil dari *boundary condition* dan hukum fisika yang telah diterapkan serta bukan karena ukuran *mesh*. *Grid independence test* merupakan suatu proses yang penting untuk desain optimal dari model CFD. Namun, proses *Grid independence test* tidak memiliki standarisasi ataupun acuan untuk kondisi *grid* optimalnya. Oleh karena itu, setiap peneliti yang menggunakan metode ini, biasanya memiliki acuan yang berbeda-beda. Acuan yang sering digunakan pada metode ini adalah dengan membandingkan laju aliran, temperatur, dan indikator lainnya. Pada penelitian ini, acuan yang digunakan adalah distribusi *pressure* pada bejana tekan

### 2. *Processing*

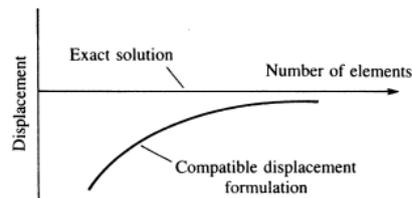
*Processing* merupakan proses pengolahan dan perhitungan dari kondisi yang telah ditetapkan pada saat *pre-processing*. Pada tahapan ini dilakukan proses komputasi numerik dengan menggunakan metode numerik berupa pendekatan variabel yang diketahui menjadi fungsi yang lebih sederhana. Pada proses ini akan dilakukan iterasi hingga semua data yang dimasukkan dapat terkalkulasi dan mencapai kondisi konvergen.

### 3. *Post-Processing*

*Post-processing* adalah tahap akhir dalam analisis CFD. Di dalam tahap ini, hasil dari komputasi numerik yang telah dilakukan akan divisualisasikan baik dalam bentuk gambar, kurva, dan animasi.

### 2.11.6 Uji konvergensi

Pada analisis menggunakan FEM tentunya dibutuhkan suatu metode untuk mendapatkan hasil yang akurat pada jumlah elemen tertentu, metode itu adalah Uji Konvergensi. Uji Konvergensi ini dilakukan dengan memodelkan jumlah elemen yang berbeda-beda. Semakin banyak jumlah elemen yang digunakan, maka hasil yang didapatkan akan mendekati keakuratan, namun tentunya hal ini akan memerlukan waktu yang lama dalam menyelesaikan analisis. Maka dari itu, uji konvergensi ini akan digunakan untuk memilih jumlah elemen paling sedikit dan hasilnya tetap akurat. Pada analisis struktur, jumlah elemen yang sedikit dapat digunakan untuk menganalisis kasus-kasus sederhana dengan akurat. Namun pada kasus analisis struktur dengan geometri dan pembebanan yang kompleks diperlukan jumlah elemen yang banyak untuk mendapatkan pemodelan yang akurat (Logan, 2007).



**Gambar 2.52** Uji Konvergensi  
Sumber : (Logan, 2007)

### 2.12 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian ini, diambil beberapa penelitian yang telah dilakukan dahulu yang memiliki topik yang masih berkaitan dengan penelitian penulis sendiri sehingga dapat dijadikan referensi penelitian

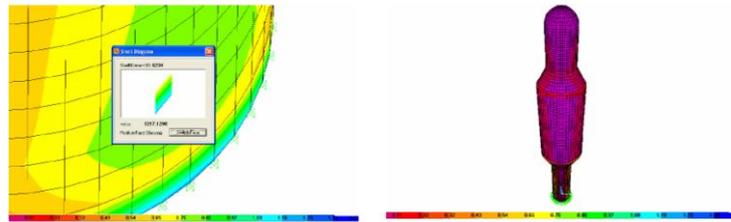
Penelitian dengan judul “Seismic Evaluation and Strengthening of Vertical and Horizontal Pressure Vessels in a Refining Complex” oleh (Kazem & Minavand, 2008). Pada penelitian ini evaluasi dilakukan pada bejana tekan horizontal dan vertikal (Lihat gambar 2.53). Beban yang terjadi pada bejana tekan meliputi beban mati struktur, beban operasi, *thermal load*, tegangan internal dan beban gempa. Spektrum yang digunakan merupakan spektrum spesial untuk struktur dengan 5% damping. Tegangan geser dikalkulasikan berdasarkan Iranian code 2800. *Software* yang digunakan adalah *software* SAP2000 dengan menerapkan tegangan statik dan tegangan lateral.



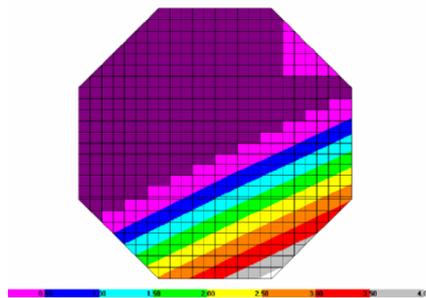
**Gambar 2.53** Bejana tekan yang digunakan  
Sumber : (Kazem & Minavand, 2008)

Pada bejana tekan vertikal tegangan maksimum akibat tegangan kritikal kombinasi yang terjadi sebesar  $1217 \text{ kg/cm}^2$ . Sehingga tegangan maksimum ini berada di bawah tegangan ijin yang di perbolehkan terjadi yakni sebesar  $(1,6 \times 1,66F_y = 2534 \text{ Kg/cm}^2)$ . Bejana tekan di sambungkan ke pondasi menggunakan 44 baut dengan diameter lingkaran

baut sebesar 515 cm dan diameter baut sebesar 8 cm. tegangan maksimum di bawah pondasi adalah sekitar 4 Kg/cm<sup>2</sup> dan sama dengan nilai yang diizinkan.

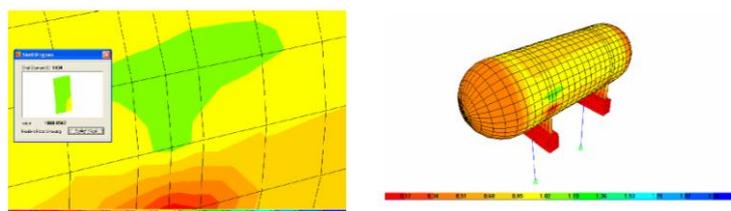


**Gambar 2.54** Tegangan maksimum pada shell akibat dari  $D+L+P+T \pm (Ex+0,3Ey+0,3Ez)/4$   
 Sumber : (Kazem & Minavand, 2008)

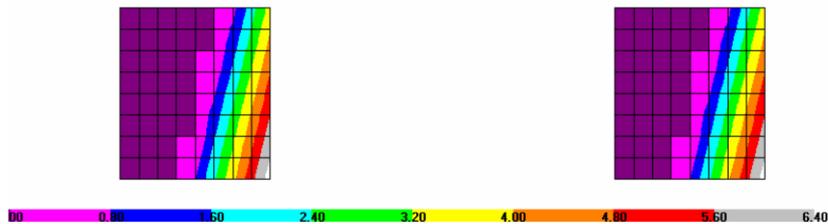


**Gambar 2.55** Kontur tegangan tanah di bawah pengaruh kombinasi beban kritis  
 Sumber : (Kazem & Minavand, 2008)

Pada bejana tekan horizontal tegangan maksimum akibat tegangan kritikal kombinasi yang terjadi sebesar 1060 kg/cm<sup>2</sup>. Bejana tekan di sambungkan ke pondasi menggunakan 4 baut dengan diameter baut sebesar 3,2 cm. tegangan maksimum di bawah pondasi adalah sekitar 6,4 Kg/cm<sup>2</sup> dan lebih besar dari nilai yang diizinkan (4 Kg/cm<sup>2</sup>), sehingga perlu dilakukan peninjauan ulang untuk penyangga bejana tekan horizontal ini.



**Gambar 2.56** Tegangan maksimum pada *shell* akibat dari  $D+L+P+T \pm (Ex+0,3Ey+0,3Ez)/3,5$   
 Sumber : (Kazem & Minavand, 2008)



**Gambar 2.57** Kontur tegangan tanah di bawah pengaruh kombinasi beban kritis  
 Sumber : (Kazem & Minavand, 2008)

Dengan penyelidikan hasil yang diperoleh dari evaluasi dan analisis seismik bejana tekan, ditemukan bahwa cangkang bejana tekan tekanan horizontal dan vertikal akibat gaya gempa tidak rentan, dan desain statis bejana tekan sesuai dengan beban termal, dan tekanan internal memadai. Ada titik untuk bejana tekan horizontal bahwa dalam banyak kasus tegangan di tempat sambungan tumpuan berbentuk pelana bejana tekan akibat kombinasi beban seismik tinggi, untuk itu harus dikontrol. Juga di bejana tekan horizontal kapasitas sambungan bejana tekan ke pondasi beton harus diperiksa. Penyambungan ini dilakukan dengan bantuan baut yang harus dikontrol. Dalam kebanyakan kasus, tegangan dalam tanah di bawah pondasi harus diperiksa dan dibandingkan dengan nilai yang diizinkan.

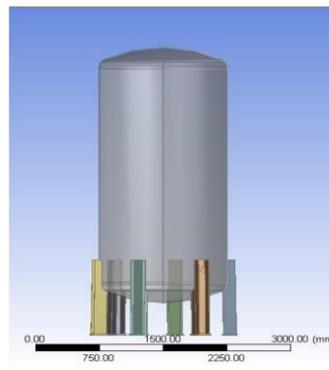
Untuk bejana tekan vertikal masalah utama adalah terbaliknya bejana. Selain itu pengaruh tegangan akibat guling pada *shell* pada sambungan ke tumpuan harus diselidiki dan hasilnya harus dibandingkan dengan nilai yang diizinkan.

Penelitian kedua merupakan penelitian oleh (Chavan et al., 2013) dengan judul “Effect of Wind Load on Pressure Vessel Design by Using Non- Linear Finite Element Analysis (FEA)”. Pada penelitian ini evaluasi dilakukan pada bejana tekan vertikal (Lihat gambar 2.48). bejana tekan ini termasuk jenis struktur kategori III dengan *exposure* kategori D, sebagaimana rincian di bawah ini :

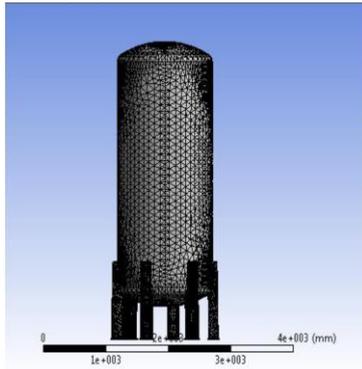
**Tabel 2.10** Properti Bejana tekan

Deskripsi	Simbol	Nilai	Satuan
<i>Structure Category</i>	-	III	
<i>Exposure Category</i>	-	D	
<i>Basic Wind Velocity</i>	V	90	mph
<i>Effective Diameter</i>	D	5	feet
<i>Importance Factor</i>	I	1,15	
<i>Force Coefficient</i>	$C_f$	0,7-0,9	
<i>Velocity Pressure Exposure</i>	$K_z$	1,03	
<i>Topographic Factor</i>	$K_{zr}$	1	
<i>Height of Vessel</i>	H	13,6	feet

Setelah dilakukan perhitungan beban angin menggunakan rumus  $F = q_z G C_f A_f$ , maka didapatkan nilai beban angin sebesar 11500 N. pemodelan geometri dilakukan pada *software* Ansys v12 dan proses *meshing* dilakukan menggunakan *node tetrahedron* (lihat gambar 2.58).

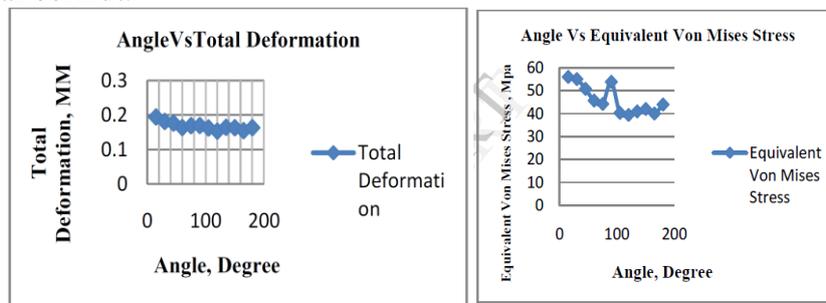


**Gambar 2.58** Model geometri bejana tekan vertikal  
Sumber : (Chavan et al., 2013)



**Gambar 2.59** Meshing bejana tekan vertikal  
 Sumber : (Chavan et al., 2013)

Setelah dilakukan simulasi metode elemen hingga pada *software* Ansys didapatkan hasil deformasi atau defleksi pada bejana tekan dan tegangan maksimum yang terjadi sesuai gambar berikut.

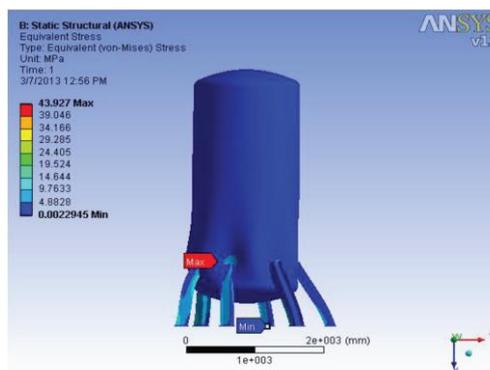


(a)

(b)

**Gambar 2.60** Hasil Analisa FEM (a) Kurva *angle* terhadap deformasi, (b) Kurva *angle* terhadap tegangan

Sumber : (Chavan et al., 2013)



**Gambar 2.61** Hasil Simulasi *Static Structural* pada software Ansys v12.0

Sumber : (Chavan et al., 2013)

Bejana tekan sedang dirancang untuk menerapkan Proses *Cumene*. Proses ini sangat sensitif terhadap tekanan dan kondisi suhu dan membutuhkan banyak sistem kontrol untuk memantaunya. Dalam makalah ini pengerahan tenaga diamati bahwa tegangan Von-mises ekuivalen maksimum yang diamati adalah sekitar 55MPa sekitar 6 penyangga kaki dengan kemiringan vertikal pada satu sisi bukaan 80 derajat. Dengan menggunakan analisis elemen hingga disimpulkan bahwa karena struktur beban angin akan menopang beban

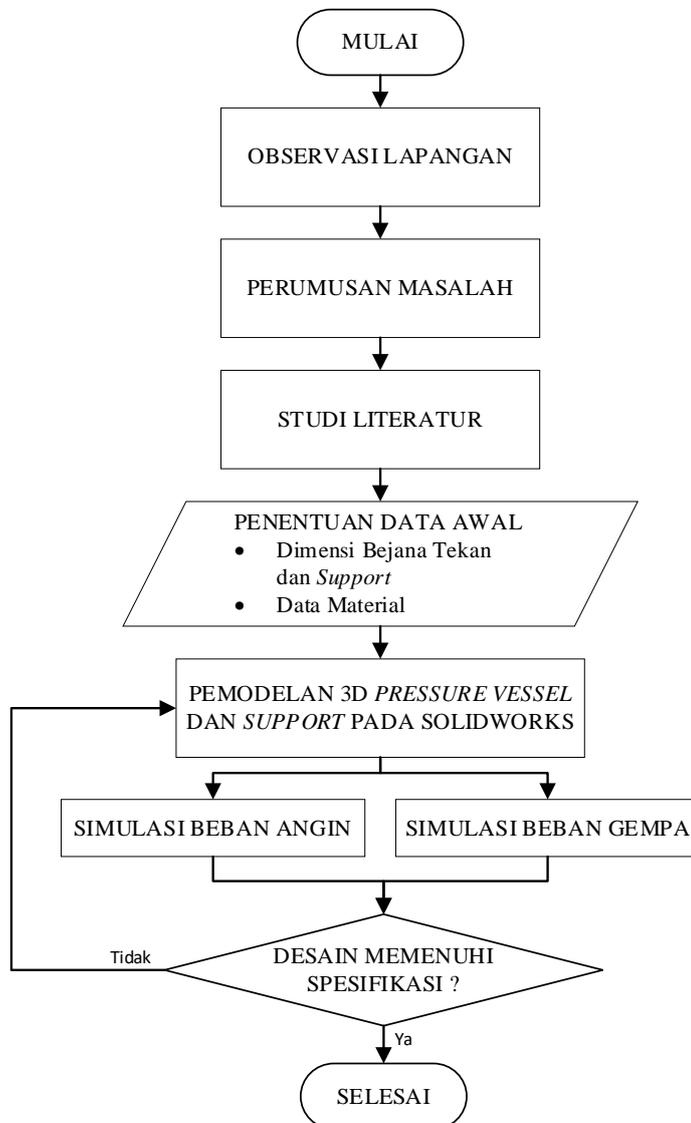
angin dan deformasi harus dalam batas. Menyimulasikan struktur untuk 15 hingga 180 derajat memberikan tegangan minimum dan lebih kecil dari tegangan yang diizinkan dari baja struktural. Jadi struktur aman.

**Tabel 2.11** Perbandingan Penelitian

No	Parameter Analisis	Kazem & Minavand	Chavan, dkk	Penulis
1	Jenis Bejana Tekan	Horizontal & Vertikal	Vertikal	Vertikal
2	Jenis Penyangga	<i>Saddle &amp; Leg</i>	<i>Leg</i>	<i>Leg</i>
3	Menganalisa Beban Angin	-	√	√
4	Menganalisa Beban Gempa	√	-	√
5	Memvariasikan Bentuk Penyangga	-	-	√
6	Memvariasikan Jumlah Penyangga	-	-	√
7	Verifikasi	-	-	Hasil Akhir
8	Material Penyangga	<i>Structural steel</i>	<i>Structural steel</i>	<i>Structural steel</i>
9	Metode Simulasi	FEA	FEA	FEA

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Penjelasan Tahapan Penelitian

Metodologi penelitian akan mengikuti seluruh tahapan pada gambar 3.1. berikut ini penjelasan mengenai tahapan-tahapan pada diagram alir.

#### 3.2.1 Observasi lapangan

Observasi lapangan adalah langkah pertama dalam penelitian ini. Tujuan dari langkah ini adalah untuk menentukan masalah yang akan digunakan sebagai penelitian. Pada penelitian ini, observasi dilakukan pada lingkup penyangga bejana tekan, jenis penyangga, tegangan yang terjadi dan deformasi yang terjadi sebagai pengaruh beban angin dan beban gempa.

### 3.2.2 Perumusan masalah

Perumusan Masalah adalah Langkah kedua dalam penelitian ini. Dari observasi lapangan yang telah dilakukan penentuan rumusan masalah dilakukan. Pada kasus ini bejana tekan jenis *LP Ccondensate Flash Drum* yang telah dirancang sesuai code ASME belum memiliki penyangga. Fungsi penyangga ini sangat penting *yaitu* sebagai penopang utama bejana tekan. Hal ini lantas memengaruhi terhadap kinerja bejana tekan tersebut saat beroperasi. Bejana tekan ini mengalami banyak pembebanan saat dioperasikan, selain untuk menopang fluida kerja dan beban massa bejana tekan terdapat beban eksternal yang terjadi yakni beban angin dan beban gempa. Kedua beban ini memiliki pengaruh terhadap umur dan deformasi yang terjadi pada bejana tekan. Hasil dari penelitian ini akan dibandingkan dengan penelitian yang sudah ada. Melalui penelitian ini diharapkan jenis penyangga yang digunakan nantinya merupakan penyangga yang memiliki dampak yang sedikit dan memiliki umur Panjang.

### 3.2.3 Studi literatur

Pada tahap ini studi literatur dilakukan untuk meningkatkan pemahaman, pengetahuan dan tingkat materi yang akan dibahas dalam penelitian ini. Sumber daya yang digunakan dapat berasal dari berbagai karya ilmiah, seperti jurnal ilmiah, buku serta tugas akhir terdahulu. Dimana topik yang dipelajari adalah dalam lingkup efek beban angin dan beban gempa pada bejana tekan terhadap deformasi yang terjadi pada penyangga dan dinding bejana tekan.

### 3.2.4 Penentuan data

Setelah studi literatur dilakukan, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah mengumpulkan data dari bejana tekan, beban angin dan beban gempa yang sudah ada. Di mana data yang didapatkan merupakan salah satunya penyangga bejana tekan, dimana jenis penyangga bejana tekan yang umumnya digunakan pada industri adalah *leg support*. Selain itu dimensi dan sifat material yang akan digunakan pada penyangga bejana tekan juga didapatkan. Data yang telah didapatkan adalah sebagai berikut

**Tabel 3.1** *Beban Angin*

Deskripsi	Simbol	Nilai	Satuan
<i>Structure Category</i>	-	IV	
<i>Exposure Category</i>	-	C	
<i>Basic Wind Velocity</i>	V	35	mph
<i>Effective Diameter</i>	D	12,1	feet
<i>Importance Factor</i>	I	1,15	
<i>Force Coefficient</i>	$C_f$	0,85	
<i>Velocity Pressure Exposure</i>	$K_z$	0,67	
<i>Topographic Factor</i>	$K_{zr}$	0,47	
<i>Height of Vessel</i>	H	15	feet

**Tabel 3.2** *Beban Gempa*

<i>Site</i>	Balikpapan, Indonesia	
<i>Zone</i>	III	
Z	<i>Zone Factor</i>	0,15
I	<i>Importance Factor</i>	1
R	<i>Response Reduction Factor</i>	1,25
Sa/g	<i>Average Response Acceleration Coefficient</i>	2,5

**Tabel 3.3** Variasi Penelitian

Jenis Penyangga	Beban Angin	Beban Gempa
3 Kaki ISMB 100		
3 Kaki L 90x90x12		
3 Kaki L 100x100x12		
3 Kaki L 100x100x10		
3 Kaki L 120x120x10		
3 Kaki L 120x120x8		
4 Kaki L 80x80x10		
4 Kaki L 90x90x10		
4 Kaki L 100x100x8		
3 Kaki <i>Cross Bracing</i>		
3 Kaki <i>Sway Bracing</i>		

**Tabel 3.4** *Properties SA516*

<i>Properties</i>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
<i>Density</i>	7,85	g / cm <sup>3</sup>
<i>Young's Modulus</i>	200000	MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,29	-
<i>Tensile Yield Strength</i>	260	MPa
<i>Tensile Ultimate Strength</i>	620	MPa
<i>Maximum Allowable Stress</i>	137,9	MPa

### 3.2.5 Pemodelan *pressure vessel*

Setelah data dan parameter telah ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah pemodelan 3D bejana tekan dan *support* dengan menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) yaitu Solidworks 2021 yang digunakan dalam penelitian ini. Beberapa komponen dibuat untuk disimulasikan dengan ANSYS nantinya, di mana komponen yang dibuat adalah bejana tekan dan penyangga. Dimensi sesuai dengan data yang telah ditentukan.

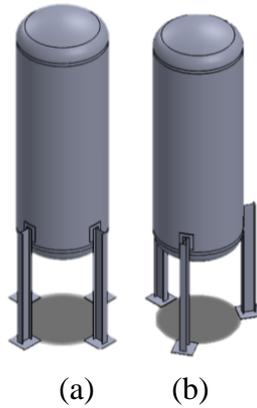
#### 3.2.5.1 Pemodelan bejana tekan

Dimensi bejana tekan dibuat berdasarkan dari desain bejana tekan yang sesuai kode ASME BPVC *Section VIII Division I* 2019 seperti data yang telah ditentukan yaitu tekanan internal desain sebesar 3,5 kg/cm<sup>2</sup>g dan I.D. 1200 x 3100 T.L. TO T.L.

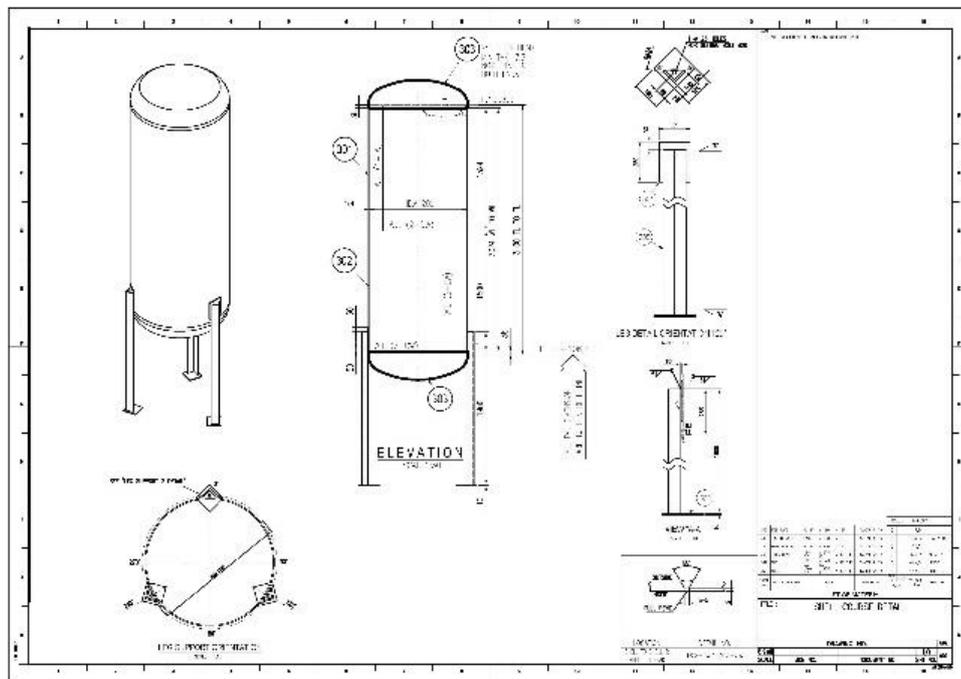
**Gambar 3.2** Bejana Tekan

### 3.2.5.2 Pemodelan *Leg Support*

Dimensi penyangga bejana tekan tipe *leg* ini dibuat mengikuti kode ASCE seperti data yang telah ditentukan yaitu ISMB 175 dan profil L dengan panjang 1900 mm



Gambar 3.3 (a) 4 Leg Support (b) 3 Leg Support

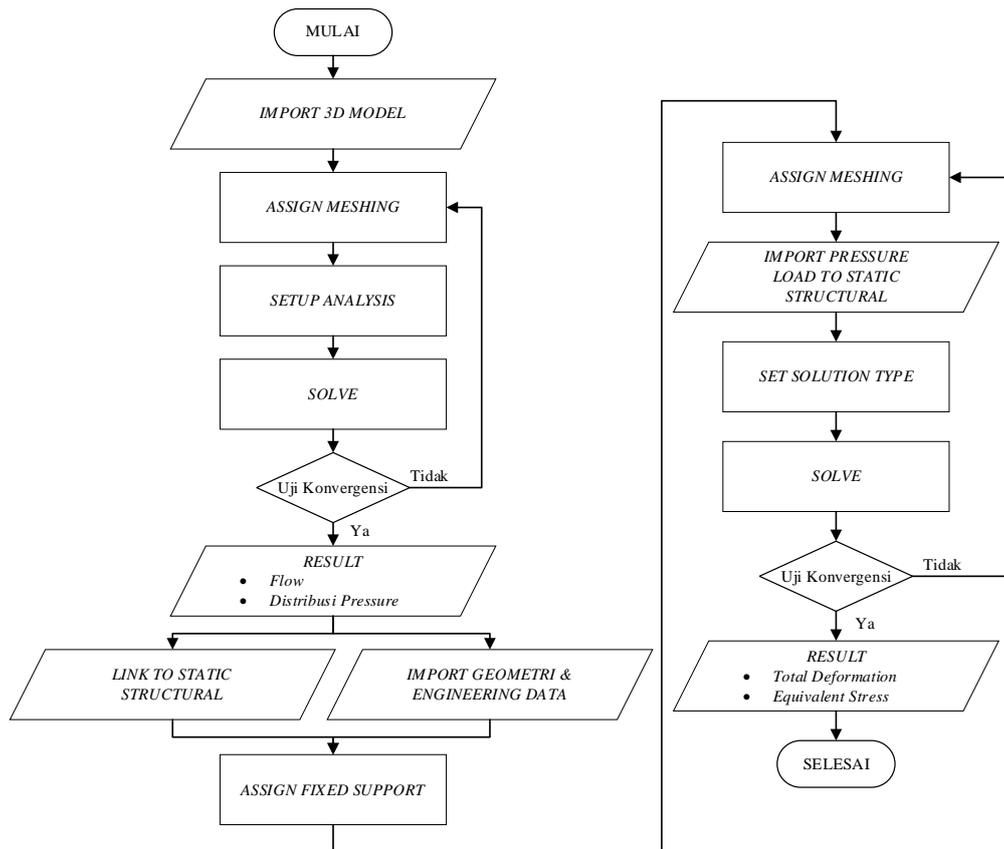


Gambar 3.4 Gambar Teknik Penyangga Bejana Tekan

Proses *assembly* penyangga bejana tekan ini dilakukan dengan di las pada setiap bagiannya dengan ketebala las sebesar 6 mm sesuai dengan yang tertera pada gambar teknik. Pengelasan yang dilakukan di sekeliling bagian yang saling bersentuhan.

### 3.2.6 Simulasi beban angin

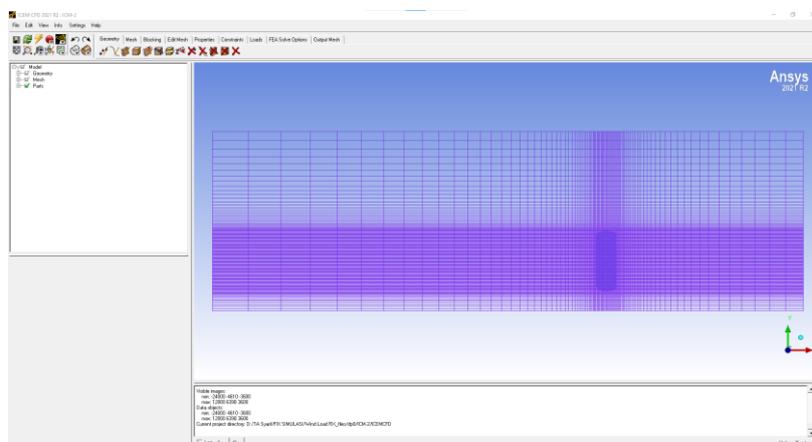
Simulasi yang dilakukan pada penelitian akibat beban angin ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Engineering* yaitu ANSYS Workbench 2021 R2 dengan menggunakan modul *Static Structural* dan *Fluid Flow*. Terdapat beberapa tahapan yang dilakukan ketika simulasi dilakukan.



**Gambar 3.5** Diagram Alir Simulasi Beban Angin

### 3.2.6.1 Meshing

Proses *meshing* pada domain fluida yang telah dibuat pada *software* solidwork sebelumnya akan dilakukan dengan menggunakan Ansys ICEM CFD. Dimana pada *meshing* dibuat menggunakan bentuk elemen *hexagonal*. Elemen yang dibuat mengalami inflasi dari yang terdekat dengan bejana tekan hingga bagian terluarnya. Dengan pertumbuhan sebesar 1,2 antar elemen menyebabkan elemen terluar menjadi cukup besar. Hal ini sebagaimana yang terlihat pada gambar berikut:



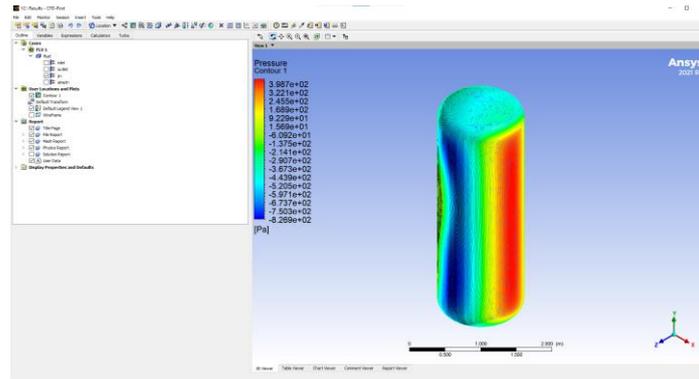
**Gambar 3.6** Meshing Domain Fluida

### 3.2.6.2 Pemodelan

Dalam simulasi CFD Ansys Fluent, model turbulensi yang digunakan adalah model SST K- $\omega$ . Model turbulensi ini memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menangkap

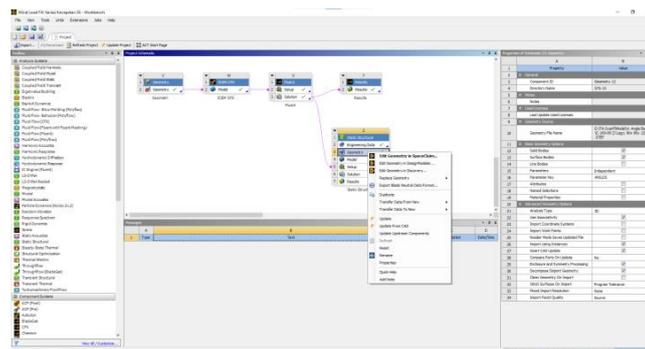
aliran separasi dan *adverse pressure gradient*. Disisi lain, model turbulensi ini memiliki performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan model turbulensi *realizable K-ε*. Model turbulensi SST K- $\omega$  juga memiliki kemampuan dalam menangkap aliran separasi dalam kecepatan yang tinggi. Kemudian dilakukan *setting* kecepatan udara pada nilai 15 m/s mengikuti kecepatan angin dasar yang terjadi di lokasi penempatan bejana tekan.

Ketika kecepatan angin telah didefinisikan, maka akan dilakukan *running* untuk mengetahui distribusi *pressure* yang terjadi pada bejana tekan. Pada penelitian ini digunakan iterasi sebanyak 700 kali untuk mendapat nilai yang mendekati dengan sebenarnya. Berikut merupakan hasil distribusi *pressure* yang terjadi pada bejana tekan:



**Gambar 3.7** Distribusi *pressure*

Setelah nilai distribusi didapatkan maka dilanjutkan dengan modul *static structural*. Pada modul ini di harapkan dapat melihat respon yang terjadi dari bejana tekan terhadap beban angin yang terjadi. Pertama dilakukan transfer data antara *result* pada *fluid flow* dengan modul *static structural*. Kemudian dilakukan import geometri pada Ansys dan juga pendefinisian *engineering data* sesuai dengan material yang digunakan pada bejana tekan sebagaimana telah di tetapkan sebelumnya. Setelah itu dilanjutkan dengan proses *meshing* pada setiap *body* bejana tekan. Dimana ukuran *meshing* pada setiap *body* berbeda-beda



**Gambar 3.8** Link *fluid flow* to *static structural*

Setelah *mesh* telah dibuat pada geometri, *boundary condition* ditentukan pada geometri di mana pada penelitian ini bagian bawah dari penyangga bejana tekan di tetapkan sebagai *fixed support*.

Ketika semua material, *mesh*, dan *fixed support* yang bekerja telah didefinisikan, maka dilakukan *solve* untuk mengetahui besar deformasi dan tegangan ekuivalen yang terjadi pada bejana tekan.

### 3.2.6.3 Fluid-structure interaction

Proses interaksi pada model fluid dan struktur dilakukan untuk mensimulasikan distribusi pressure oleh angin, deformasi dan tegangan yang terjadi pada bejana tekan. *Input* yang ditentukan selama tahap pra-pemrosesan adalah bagian boundary aliran fluida yang terjadi. Pada tahap pemrosesan persamaan yang mengatur sistem di diskritisasi menjadi persamaan untuk setiap elemen dan kemudian persamaan tersebut dirangkai menjadi persamaan global. Solusi dari persamaan dapat digunakan untuk tahap pasca-pemrosesan yakni memvisualisasikan distribusi *pressure* yang terjadi pada *shell* bejana tekan. Untuk memperkirakan tegangan dan deformasi yang terjadi, analisa mekanis dilakukan. Distribusi *pressure* yang telah didapat kemudian diterapkan sebagai *load*.

Persamaan yang digunakan dalam menentukan distribusi pressure yakni persamaan navier-stokes (Takashi, 1994) sebagai berikut:

$$[M]\{a\} + [N]\{v - \hat{v}\} - [G]\{p\} = \{f\} \quad (3.1)$$

Dimana  $[M]$  merupakan matriks massa,  $[N]\{v - \hat{v}\}$  merupakan matriks yang mengandung viskositas,  $[G]$  merupakan matriks gradien,  $a$  merupakan vektor percepatan,  $v$  merupakan vektor kecepatan,  $\hat{v}$  merupakan vektor kecepatan mesh,  $p$  merupakan vektor tekanan. Dan  $f$  merupakan vektor gaya. Matriks  $[M]$ ,  $[N]$  dan  $[G]$  berubah terhadap waktu. Pada penelitian ini bejana tekan yang digunakan memiliki ukuran yang sama pada setiap konfigurasi penyangga, sehingga nilai  $[M]$  sama untuk semua konfigurasi. kemudian deformasi diperoleh sesuai dengan persamaan

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (3.2)$$

Dimana:

$[K] = \sum_{m=1}^N [K_e]$  =total matriks kekakuan

$\{u\}$  =vektor perpindahan

$N$  = Banyaknya elemen

$[K_e]$  =elemen matriks kekakuan

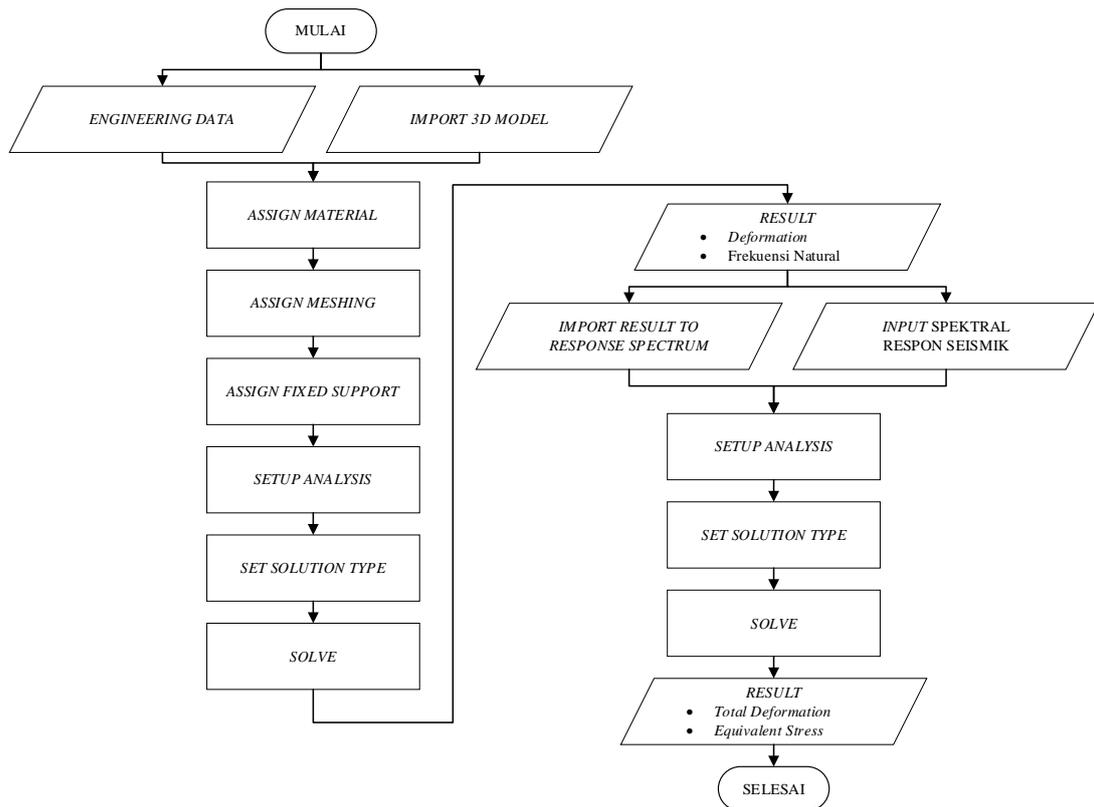
$\{F^r\}$  =gaya reaksi

$\{F^a\}$  =total gaya yang bekerja

Material yang digunakan dalam penilaian ini sama untuk semua konfigurasi penyangga, sehingga yang mempengaruhi perbedaan nilai akhir yakni bentuk luas area setiap profil penyangga yang digunakan dan juga inersia yang dimiliki masing-masing profil. Penambahan bentuk bracing pada penyangga juga menaikkan kekakuan sehingga memberikan efek deformasi yang sedikit pada konfigurasi ini.

### 3.2.7 Simulasi beban gempa

Simulasi yang dilakukan pada penelitian akibat beban gempa ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Engineering* yaitu ANSYS Workbench 2021 R2 dengan menggunakan modul *Modal Analysis* dan *Response Spectrum*. Terdapat beberapa tahapan yang dilakukan ketika simulasi dilakukan.



**Gambar 3.9** Diagram Alir Simulasi Beban Gempa

### 3.2.7.1 Engineering data

Pada langkah awal ketika menggunakan ANSYS *Workbench* terlebih dahulu Engineering Data harus didefinisikan sesuai dengan data yang telah didapatkan sebelumnya, material yang digunakan untuk bejana tekan dan *leg support* menggunakan SA 516 atau *structural steel* sebagaimana yang telah ditentukan sebelumnya.

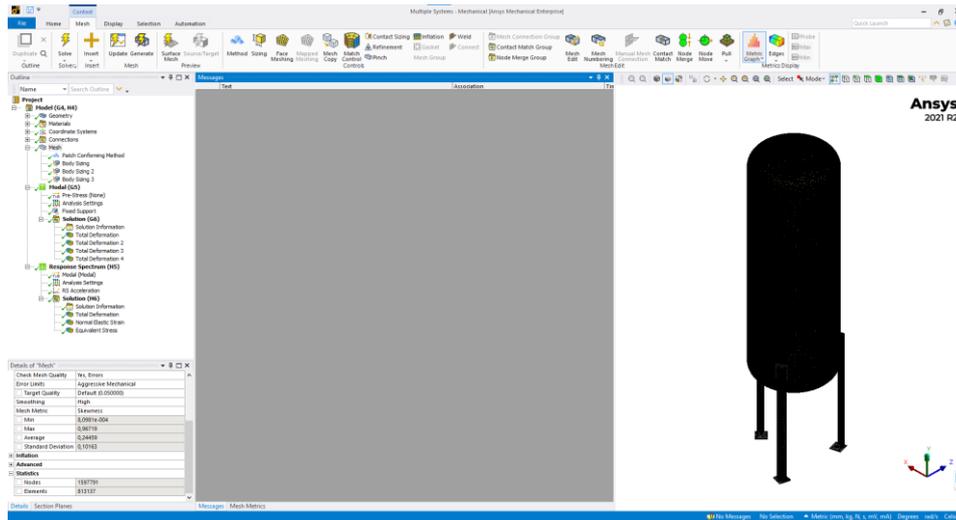
### 3.2.7.2 Import geometri

Setelah memasukkan semua material yang akan digunakan ke dalam *engineering data*, hal selanjutnya yang perlu dilakukan yaitu mengimpor geometri yang telah dibuat melalui Solidworks 2021 ke dalam ANSYS *Workbench*.

### 3.2.7.3 Pemodelan

Ketika pemodelan pada ANSYS *Workbench* langkah pertama yang dilakukan adalah mendefinisikan material dari tiap geometri yang telah diimpor sebelumnya. Dimana pada penelitian ini material bejana tekan, *leg support* didefinisikan sebagai *Structural Steel*. Bejana tekan, dan *leg support* didefinisikan dengan sifat kaku.

Setelah material telah didefinisikan pada setiap geometri maka proses *meshing* dilakukan untuk membagi geometri menjadi model diskrit. Semakin banyak (semakin kecil) elemen yang dibuat maka hasilnya akan semakin baik dan detail mendekati kondisi sebenarnya. Namun, dengan semakin banyak elemen maka waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan simulasi juga akan semakin lama. Pada penelitian ini, ukuran elemen *mesh* yang digunakan adalah 12 mm dengan metode tetrahedron. Jumlah *nodal* pada simulasi ini adalah 1597791 dan jumlah elemen sebanyak 813137 elemen.

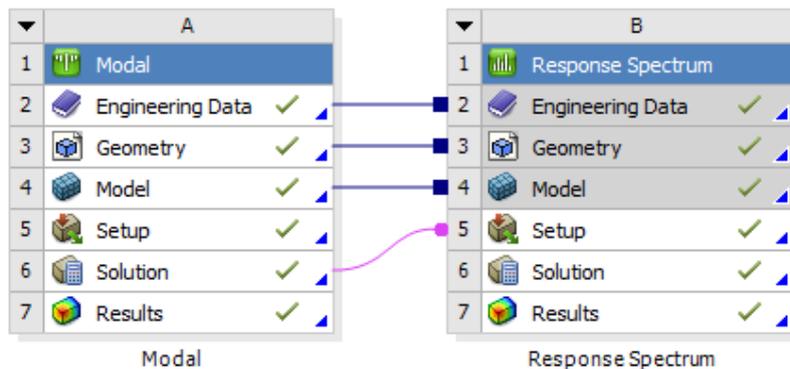


**Gambar 3.10** Meshing pada bejana tekan

Setelah mesh telah dibuat pada geometri, boundary condition ditentukan pada geometri di mana pada penelitian ini bagian bawah dari penyangga bejana tekan di tetapkan sebagai fixed support.

Ketika semua material, mesh, dan fixed support yang bekerja telah didefinisikan, maka dilakukan solve untuk mengetahui besar frekuensi natural yang terjadi pada bejana tekan.

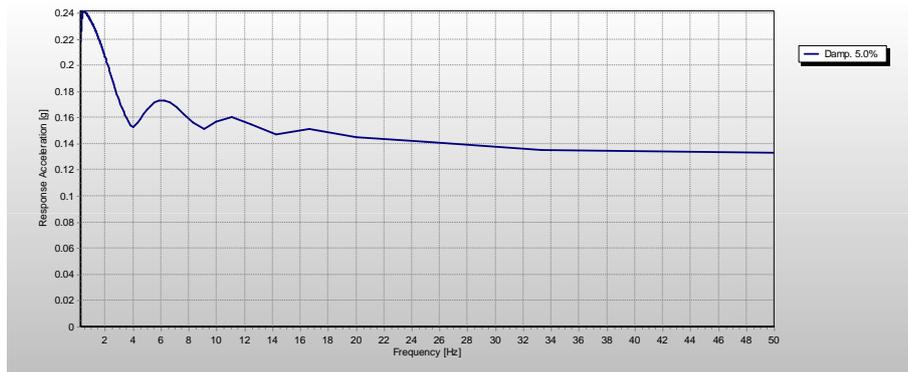
Setelah nilai frekuensi natural dihasilkan, kemudian dilakukan penggambaran efek yang terjadi pada bejana tekan, dimana dalam hal ini digunakan tool total deformasi untuk mengetahui besar deformasi yang terjadi pada frekuensi natural di setiap mode getar yang terjadi. Selanjutnya hasil simulasi menunjukkan adanya deformasi pada bejana tekan sebagai respons terhadap frekuensi natural.



**Gambar 3.11** Transfer data simulasi antar modul

Dilanjutkan dengan modul *response spectrum* untuk mengetahui respon terhadap getaran seismik. Mengambil data hasil simulasi yang dihasilkan pada *modal analysis* untuk di terapkan pada *response spectrum*.

Dipilih modul Analisa yang sesuai dengan benda yang sedang di Analisa. Dapat menggunakan SRSS, CQC dan ROSE yang tersedia dalam *software Ansys*.



**Gambar 3.12** Respons Spektra Gempa

Kondisi gempa yang terjadi didefinisikan dalam sebuah spektra respons sebagai fungsi frekuensi terhadap percepatan gerak.

Ketika semua Analisa settings dan spektra respons yang bekerja telah didefinisikan, maka dipilih solusi apa saja yang akan dikerjakan. Di mana pada penelitian ini solusi yang akan disimulasikan adalah *Total Deformation* dan *Equivalent Stress* untuk respons yang terjadi pada bejana tekan. Lalu proses *solve* dilakukan untuk mengetahui besar nilai dari tipe solusi yang telah ditentukan.

#### 3.2.7.4 Structural-Vibration theory

Proses interaksi pada model modal dan *response spectrum* dilakukan untuk mensimulasikan frekuensi natural, deformasi dan tegangan yang terjadi pada bejana tekan. *Input* yang ditentukan selama tahap pra-pemrosesan adalah geometri, mesh, awal dan kondisi batas. Pada tahap pemrosesan persamaan yang mengatur sistem di diskritisasi menjadi persamaan untuk setiap elemen dan kemudian persamaan tersebut dirangkai menjadi persamaan global. Untuk memperkirakan tegangan dan deformasi yang terjadi, analisa mekanis dilakukan. Persamaan MDOF yang digunakan:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = f(t) \quad (3.3)$$

Dimana:

$u$  = vektor perpindahan

$M$  = matrik massa

$C$  = matrik damping

$K$  = matrik stiffness

$f$  = vektor gaya

Dengan mengabaikan gaya dan tidak ada damping yang terjadi pada struktur, maka persamaan menjadi:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (3.4)$$

Perpindahan yang terjadi pada struktur diasumsikan bergerak secara harmonik terhadap waktu maka didapat persamaan:

$$\begin{aligned} u(t) &= \bar{u} \sin(\omega t) \\ \dot{u}(t) &= \omega \bar{u} \cos(\omega t) \\ \ddot{u}(t) &= -\omega^2 \bar{u} \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Dimana  $\bar{u}$  adalah vektor perpindahan, kemudian dilakukan substitusi pada persamaan 3.4 menjadi:

$$\begin{aligned} [K - \omega^2 M]\bar{u} &= 0 \\ [K - \omega_i^2 M]\bar{u}_i &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$u_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) adalah normal mode (atau natural modes, mode *shapes*).

Setelah didapatkan frekuensi natural untuk setiap mode shape yang diinginkan

dilanjutkan dengan mensimulasikan *response spectrum*. Dimana dalam simulasi ini metode yang digunakan adalah SRSS. Perlu diketahui juga bahwa pada saat gempa terjadi, menimbulkan gerakan eksternal yang mempengaruhi bejana tekan yakni gerakan tanah, sehingga perpindahan relatifnya menjadi  $u_r = u - u_g$ , dan persamaannya menjadi

$$M(\ddot{u}_r + \ddot{u}_g) + C\dot{u}_r + Ku_r = f(t) \quad (3.7)$$

Gerakan benda tegar tidak menimbulkan gaya elastik atau viskos dalam sistem ( $C\dot{u}_g = Ku_g = 0$ )

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (3.8)$$

N-normal mode merupakan ruang dimensi-N dengan koordinat N-independen. mereka dapat digunakan, dengan cara yang sama seperti pada koordinat 3-D, untuk mendefinisikan vektor apa pun. persamaan MDOF ini dapat dipisahkan dari persamaan N SDOF dengan vektor perpindahan  $u$  sebagai kombinasi dari  $\phi$  dan  $q$ . oleh karena itu vektor perpindahan  $u$ , dapat didefinisikan sebagai vektor normal N.

$$u = q_1\phi_1 + q_2\phi_2 + \dots + q_n\phi_n = \sum q_i\phi_i = [\phi]\{q\} \quad (3.9)$$

Dimana  $[\phi]$  merupakan matriks yang terdiri dari  $[\phi_i]$ , dan  $[q]$  merupakan matriks yang terdiri dari  $[q_i]$ . Dengan mensubstitusikan persamaan 3.12 ke persamaan 3.11 maka

$$[M][\phi]\{\ddot{q}\} + [C][\phi]\{\dot{q}\} + [K][\phi]\{q\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (3.10)$$

Dengan mengalikan dengan  $[\phi]^T$ , maka didapatkan

$$[\phi]^T[M][\phi]\{\ddot{q}\} + [\phi]^T[C][\phi]\{\dot{q}\} + [\phi]^T[K][\phi]\{q\} = -[\phi]^T[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (3.11)$$

Karena ortogonalitas modal, matriks M, C dan K akan menjadi matriks diagonal. Superposisi modal mengubah N persamaan diferensial simultan dari sistem MDOF menjadi N sistem SDOF independen dengan memisahkan persamaan ini. N sistem SDOF independen ini diselesaikan satu per satu menggunakan teknik SDOF.

Dengan iterasi lebih lanjut pada persamaan 3.14 dan substitusi  $\omega = \sqrt{\frac{K}{M}}$ ,  $\xi = \frac{c}{c_{cr}}$ ,  $c_{cr} = 2\sqrt{KM}$ , persamaan N SDOF akan menjadi

$$\ddot{q}_i + 2\xi\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q = -P_i\ddot{u}_{gi} \quad i = 1,2,3, \dots, N \quad (3.12)$$

Dimana  $\ddot{u}_{gi}$  adalah gerakan tanah dan  $P_i$  adalah faktor mass participation untuk merepresentasikan mode shape. Perpindahan maksimum penting untuk menghitung gaya elastis internal, momen, dan tekanan dari sistem. Perpindahan maksimum ini dapat dihitung sebagai maksimum  $q$  as

$$|q_i(t)|_{max} = P_i S_D(\omega_i, \xi) \quad (3.13)$$

Nilai perpindahan maksimum untuk frekuensi alami atau periode alami tertentu dapat dihitung dari spektrum respons. Perpindahan maksimum dalam respons riwayat waktu dapat dihitung dengan mengalikan perpindahan maksimum yang dihitung dari spektrum respons dengan faktor partisipasi untuk masing-masing bentuk mode. Setiap bentuk mode berkontribusi hingga beberapa perluasan ke respons total struktur dan itu tergantung pada faktor partisipasi. Dengan demikian, respons maksimum dihitung untuk semua mode masing-masing. Dimana besar nilai deformasi yang terjadi pada 1 mode shape dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$|u_{ij}(t)|_{max} = P_i\phi_i^j S_D(\omega_i, \xi) \quad (3.14)$$

Dimana  $i$  menunjukkan mode dan  $j$  menunjukkan gerakan tanah

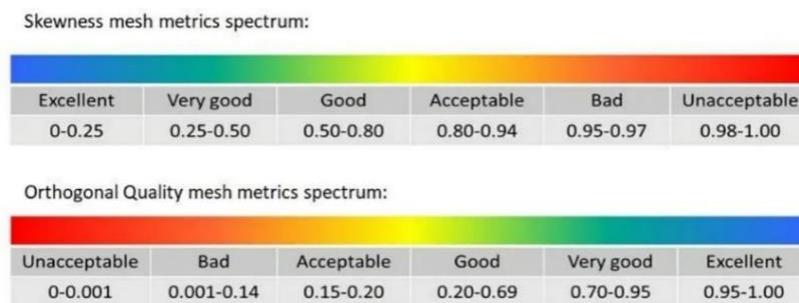
### 3.2.8 Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa simulasi *finite element method* yang dilakukan mampu mewakili keadaan sesungguhnya. Pada penelitian ini dilakukan

verifikasi hasil dari simulasi ANSYS dibandingkan dengan batas nilai yang diperoleh dari perhitungan secara teoritikal. Apabila nilai yang didapat berada di bawah dari nilai batas teoritikal maka penelitian menunjukkan kesesuaian sehingga penelitian akan dilanjutkan dengan analisis data hasil simulasi. Selain itu nilai *skewness* memiliki ukuran rata-rata yang masuk dalam kategori *very good*.

Sizing	
Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
Min	9,4077e-004
Max	0,99889
Average	0,21946
Standard Deviati...	0,13682
Inflation	
Advanced	
Statistics	

**Gambar 3.13** Mesh Metric



**Gambar 3.14** Skewness and Orthogonal Quality Mesh Metric Spectrum

### 3.2.9 Analisis hasil

Setelah semua data dan model telah di komputasi oleh ANSYS, hasil dari analisa tersebut dapat didefinisikan. Pada pemodelan ANSYS Workbench, hasil yang diinginkan adalah mencari tegangan total dan besar defleksi dari penyangga bejana tekan. Untuk mendapatkan tegangan total, pada modul solusi dipilih modul *Equivalent Stress*, untuk total defleksi dipilih modul *Total Deformation* pada bagian *solution*.

Setelah semua solusi telah dipilih maka hasil dari data yang diinginkan akan keluar dari modul solusi mulai dari tegangan total, di mana dapat dilihat dimana tegangan maksimal dan minimal terjadi. Dengan total defleksi juga dapat dilihat perubahan bentuk yang dialami bejana tekan ketika pembebanan dari beban angin dan beban gempa bekerja.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Bab ini terdapat pembahasan dan hasil analisa penelitian tentang kekuatan dan kekakuan dari penyangga bejana tekan dengan variasi bentuk profil dan jumlah kaki. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *finite element method* perangkat lunak ANSYS 21.2

### 4.1 Perhitungan Batas Keamanan

Pada perancangan bejana tekan memiliki beberapa ketentuan batas maksimum agar bejana tekan dapat bekerja dengan baik. Sebagaimana yang telah diatur oleh ASME mengenai Batasan yang harus diikuti. Berikut adalah beberapa aturan yang dimuat dalam ASME, sebagai berikut:

#### 4.1.1 Batas deformasi maksimum

Bejana tekan yang dirancang memiliki spesifikasi deformasi yang diizinkan. Hal ini sebagaimana yang telah diatur oleh ASME bahwasanya deformasi maksimum yang boleh terjadi pada bejana tekan yakni 6inch untuk setiap 100 feet ketinggian. Dari sini dapat kita cari batas deformasi yang boleh terjadi pada bejana tekan yang sesuai dengan spesifikasi sebagai berikut:



**Gambar 4.1** Batas Deformasi

Data :

$$H = 180 \text{ inch} = 15 \text{ feet}$$

Maka

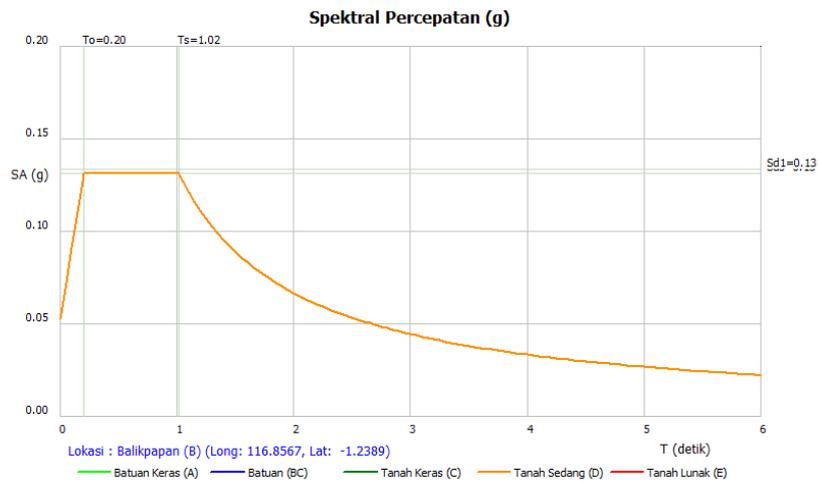
$$\begin{aligned} \Delta_M &= \frac{15 \text{ feet}}{100 \text{ feet}} \times 6 \text{ inch} \\ &= 0,9 \text{ inch} \\ &= 22,87 \text{ mm} \end{aligned}$$

Batas deformasi yang diizinkan untuk bejana tekan di desain adalah sebesar 22,87 mm. apabila deformasi *actual* yang terjadi di bawah deformasi maksimum maka bejana tekan dapat dikatakan aman.

#### 4.1.2 Spektral gempa di lokasi

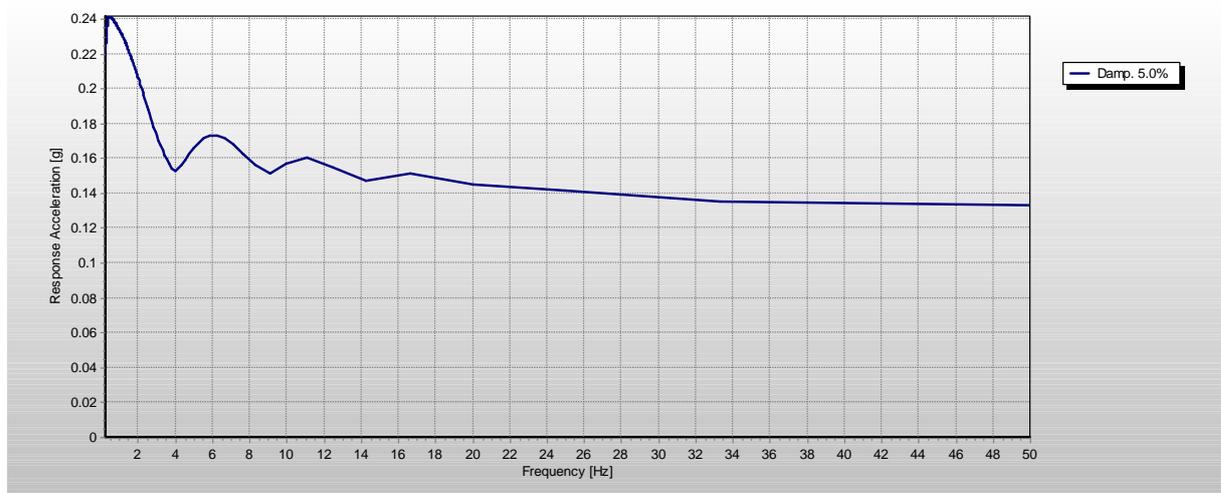
Setiap daerah memiliki karakteristik pergerakan tanahnya masing-masing.

Sebagaimana daerah yang akan ditempati bejana tekan yang dirancang yakni di daerah Balikpapan, Kalimantan Timur. Berikut adalah spektral gempa yang terjadi di daerah tersebut :



**Gambar 4.2** Spektral percepatan gempa untuk periode kecepatan

Data spektral gempa yang didapat dalam bentuk *time domain* kemudian dilakukan tranformasi menggunakan Fast-Fourier Transform menjadi frekuensi *domain* sebagai berikut:



**Gambar 4.3** Spektral percepatan gempa untuk frekuensi

Berdasarkan gambar 4.2 di atas dapat diketahui bahwasanya percepatan Gerakan tanah memiliki *trend* yang naik, mendatar dan kemudian menurun. Pergerakan tanah mengalami peningkatan pada saat periode 0 hingga 0,2 dimana nilai percepatannya naik dari 0 hingga 0,12g. kemudian mengalami percepatan konstan dari periode 0,2 hingga 1 s dengan nilai percepatan sebesar 0,12g. dan mengalami trend menurun secara parabolic pada saat periode 1s hingga 6 s dengan nilai percepatan sebesar 0,12g hingga 0,04g

#### 4.1.3 Konvergensi

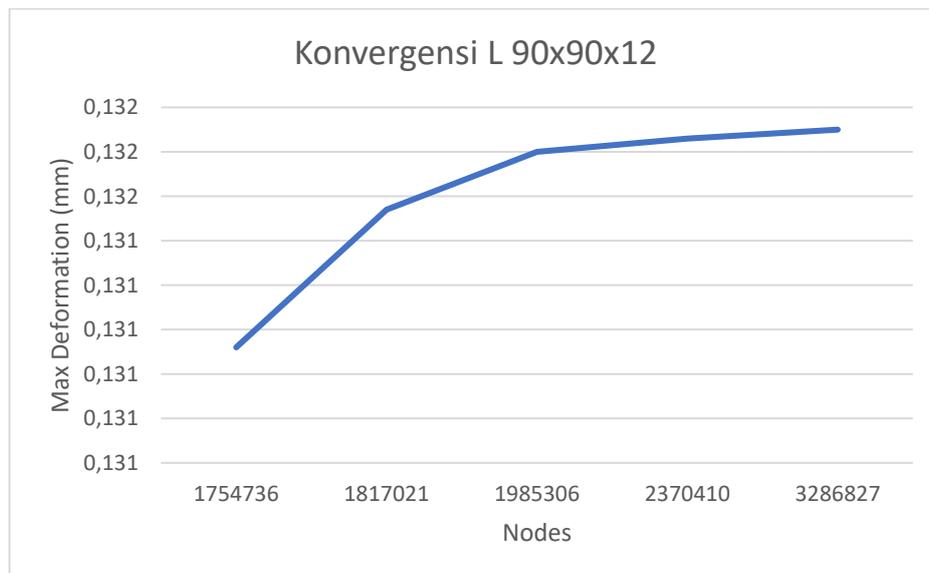
Dalam proses *solving*, hasil yang didapatkan tentunya tidak langsung berupa hasil yang akurat. Hal ini dikarenakan proses *meshing* tidak bisa sepenuhnya diperhitungkan

secara analitis, seperti ukuran *mesh*, jenis *mesh*, dan lain sebagainya. Tentunya ini dapat terjadi dikarenakan sifat dari geometri bejana tekan dan penyangga memiliki bentuk yang kompleks. Oleh karena itu, dibutuhkannya suatu metode untuk membuktikan bahwa hasil simulasi telah mendekati keakuratan terhadap pengaruh resolusi *mesh*. Metode yang akan digunakan untuk menjawab objektif di atas adalah dengan menggunakan metode *Grid Independence Test*. Proses ini dilakukan secara *iterative* dengan memperbanyak nodes pada geometri hingga hasil simulasi mendekati keakuratan. Beberapa variabel bebas yang digunakan pada pengujian ini adalah jumlah *nodes*. Kemudian, variabel tetap pada pengujian ini adalah *setting* pada simulasi Perhitungan *error* dilakukan dengan mengacu kepada hasil nilai deformasi yang merupakan efek dari pembebanan yang diberikan

Berikut adalah hasil uji *grid independency test* pada bejana tekan dengan konfigurasi penyangga sebanyak 3 kaki dan bentuk profil L ukuran 90x90x12 :

**Tabel 4.1** Uji Konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 90x90x12

<i>Nodes</i>	<i>Element</i>	<i>Max Deformation (mm)</i>	<i>Relative Error (%)</i>
1754736	910962	0,131	
1817021	950546	0,131	0,24
1985306	1065052	0,132	0,10
2370410	1334271	0,132	0,02
3286827	1975701	0,132	0,02

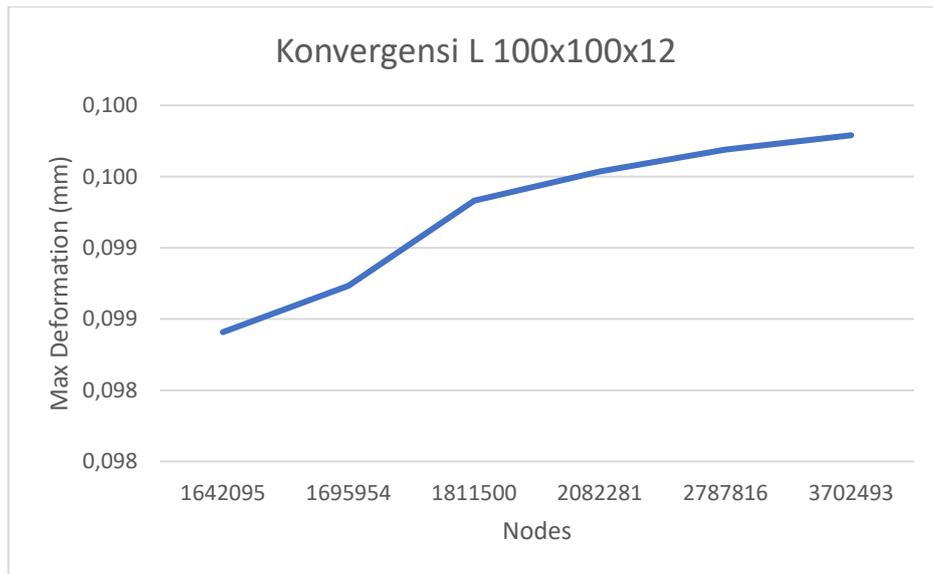


**Gambar 4.4** Grafik uji konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 90x90x12

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan bahwa simulasi telah konvergen pada iterasi ke-5. Hal itu dibuktikan dengan nilai *relative error* yang sudah kecil. Maka dari itu, simulasi yang akan digunakan pada Ansys ini adalah pada iterasi ke-5. Berikut adalah hasil uji *grid independency test* pada bejana tekan dengan konfigurasi penyangga sebanyak 3 kaki dan bentuk profil L ukuran 100x100x12 :

**Tabel 4.2** Uji Konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x12

<i>Nodes</i>	<i>Element</i>	<i>Max Defomation (mm)</i>	<i>Relative Error (%)</i>
1642095	838380	0,098	
1695954	842267	0,099	0,33
1811500	950648	0,099	0,60
2082281	1139365	0,100	0,21
2787816	1630141	0,100	0,15
3702493	2280223	0,100	0,10

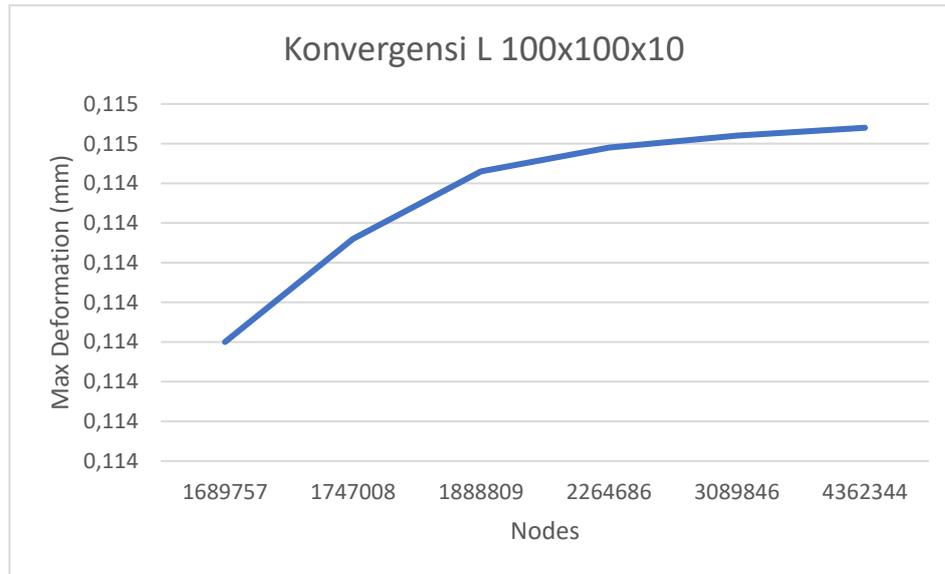


**Gambar 4.5** Grafik uji konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x12

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan bahwa simulasi telah konvergen pada iterasi ke-6. Hal itu dibuktikan dengan nilai *relative error* yang sudah kecil. Maka dari itu, simulasi yang akan digunakan pada Ansys ini adalah pada iterasi ke-6. Berikut adalah hasil uji *grid independency test* pada bejana tekan dengan konfigurasi penyangga sebanyak 3 kaki dan bentuk profil L ukuran 100x100x10 :

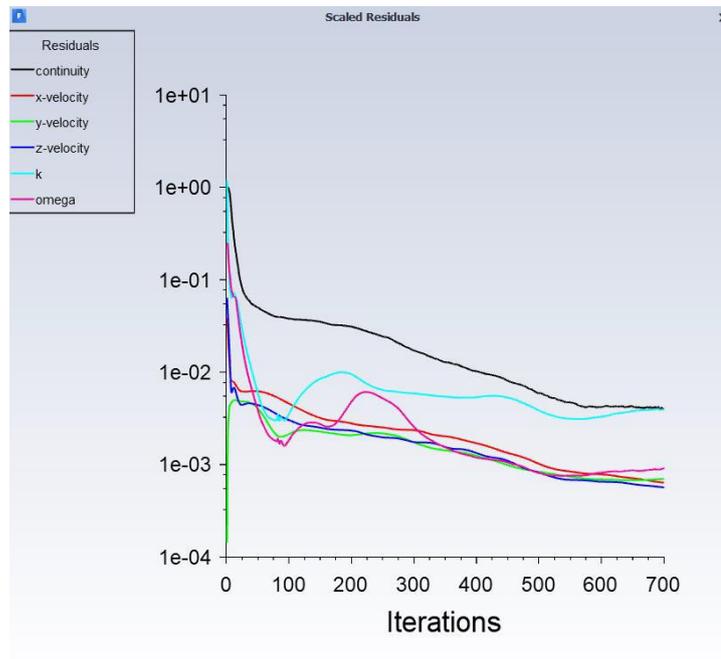
**Tabel 4.3** Uji Konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x10

<i>Nodes</i>	<i>Element</i>	<i>Max Defomation (mm)</i>	<i>Relative Error (%)</i>
1689757	862931	0,114	
1747008	898847	0,114	0,23
1888809	994289	0,114	0,15
2264686	1258188	0,114	0,05
3089846	1832887	0,115	0,03
4362344	2724696	0,115	0,02



**Gambar 4.6** Grafik uji konvergensi pada bejana tekan dengan penyangga jenis L 100x100x10

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan bahwa simulasi telah konvergen pada iterasi ke-6. Hal itu dibuktikan dengan nilai *relative error* yang sudah kecil. Maka dari itu, simulasi yang akan digunakan pada Ansys ini adalah pada iterasi ke-6.



**Gambar 4.7** Grafik *Scaled Residuals* dengan Jumlah Iterasi 700

Pada *set up analysis fluid flow*, diatur sedemikian hingga konvergensi aliran terjadi saat  $10^{-3}$ . Hal ini berdasarkan pada nilai residual yang sering digunakan pada simulasi *fluid flow* untuk bentuk 3D. kemudian dilakukan inisialisasi dengan metode *hybrid* agar memudahkan dalam komputasi, dan *solving* akan terus dilakukan hingga grafik residual dapat mencapai nilai konvergensi yang telah diatur.

## 4.2 Hasil Simulasi Penelitian dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan untuk menemukan penyangga yang optimal dalam perancangan bejana tekan. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi untuk tiap variasi kombinasi bentuk profil yaitu *beam* dengan profil H dan profil L kemudian variasi kombinasi jumlah kaki yaitu 3, 4 dan penambahan *bracing*. Dimana di bawah ini diberikan data hasil simulasi kombinasi bentuk profil dan jumlah kaki penyangga. Dilakukan simulasi untuk pencarian data hasil simulasi yaitu, total deformasi dan tegangan yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan, dan dilakukan Analisa pada hasil yang didapat ini, yang di mana dapat kita lihat di bawah ini.

### 4.2.1 Hasil simulasi dan pembahasan nilai frekuensi natural

Pada simulasi *modal analysis* ini akan dicari empat *mode shapes* awal dari bejana tekan beserta dengan frekuensi naturalnya. Frekuensi natural yang didapatkan dari simulasi *modal analysis* ini nantinya akan dibandingkan dengan frekuensi gempa yang terjadi di lokasi penempatan bejana tekan.

Apabila frekuensi operasinya sama atau mendekati frekuensi naturalnya, maka pada saat beroperasi bejana tekan bisa mengalami resonansi dan itu berdampak buruk pada bejana tekan itu sendiri. Maka dari itu, penting untuk mengetahui berapa frekuensi natural dari bejana tekan sehingga bisa menghindari kondisi bejana tekan berada pada frekuensi tersebut ketika dioperasikan untuk menghindari resonansi.

Pada simulasi modal analysis ini akan dicari 4 mode getar atau mode shapes. Empat mode getar ini dirasa sudah cukup untuk merepresentasikan keadaan pada saat operasi. Frekuensi maksimum gempa yang terjadi akan berada cukup jauh di bawah frekuensi natural hasil dari analisa modal ini. Simulasi modal analysis yang menggunakan software ANSYS ini diawali dengan mengatur set up simulasi dan mengatur boundary condition dalam simulasi ini yakni fixed support.

Selanjutnya simulasi modal analysis ini siap dijalankan. Setelah running simulasi modal analysis selesai nanti akan didapatkan empat *mode shapes* atau mode getar beserta dengan frekuensi naturalnya. Setelah itu akan di *generate* total deformasi dan *equivalent stress (von-misses)* pada masing-masing mode getarnya untuk di analisa.

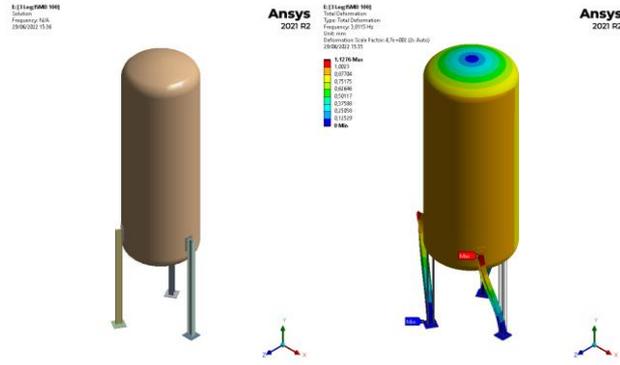
#### 4.2.1.1 Penyangga jenis ISMB 100

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.4** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 kaki jenis ISMB 100

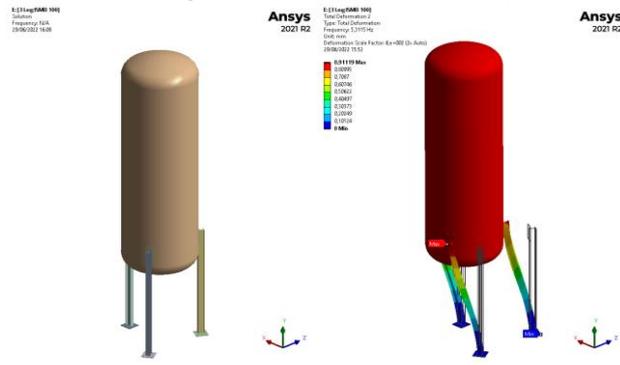
Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	3,812	1,128
2	5,312	0,911
3	5,393	0,886
4	30,304	1,313

Pada tabel hasil simulasi modal analysis untuk penyangga sejumlah 3 dengan menggunakan ISMB 100 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap mode shape. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 3,812 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 5,312 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 5,393 Hz. dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 30,304 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



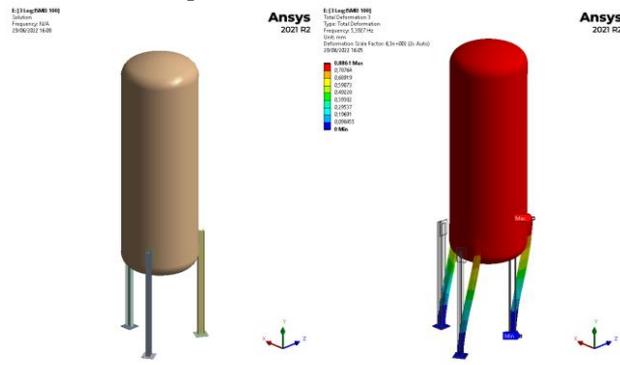
(a) (b)

**Gambar 4.8 Mode Shapes 1** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



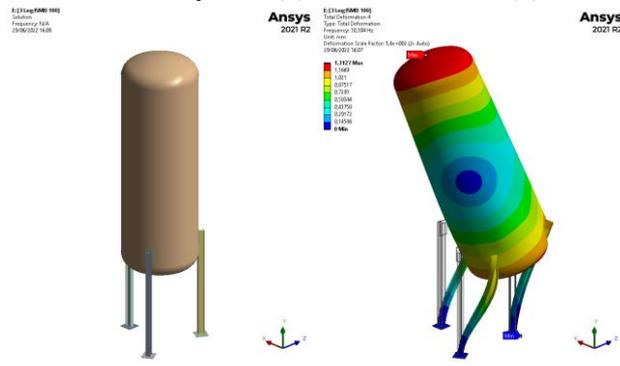
(a) (b)

**Gambar 4.9 Mode Shapes 2** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a) (b)

**Gambar 4.10 Mode Shapes 3** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a) (b)

**Gambar 4.11 Mode Shapes 4** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 1,128 mm, 0,911 mm dan 0,886 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,313 mm. *Mode shapes* 1 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 2 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu X dan *modes shapes* ketiga ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu Z. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang berpotensi terjadi resonansi yakni pada mode shape 1 sebesar 3,812 Hz dimana berdekatan dengan frekuensi gempa sebesar 3.84 Hz. Sedangkan pada mode shape lainnya tidak mendekati frekuensi gempa. Hal ini perlu diperhatikan dalam perancangan bejana tekan.

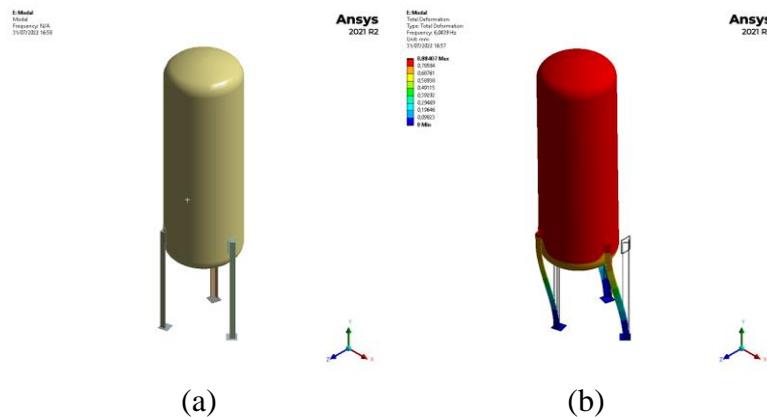
#### 4.2.1.2 Penyangga jenis L 90x90x12

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

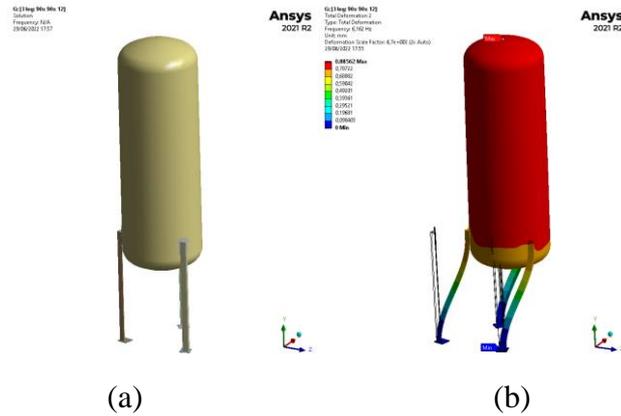
**Tabel 4.5** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 kaki jenis L 90x90x12

Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	6,161	0,886
2	6,162	0,886
3	9,795	0,964
4	38,014	1,285

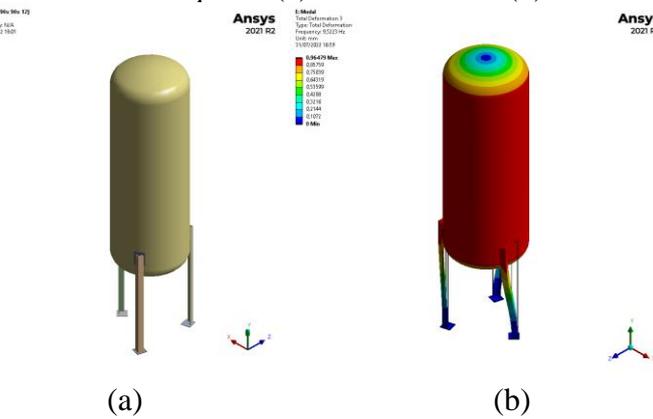
Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 3 dengan menggunakan L 90x90x12 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 6,161 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 6,162 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 9,795 Hz. Dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 38,014 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



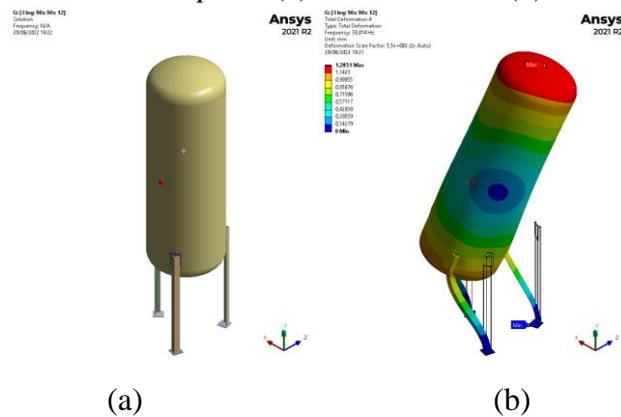
**Gambar 4.12** *Mode Shapes* 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.13 Mode Shapes 2** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.14 Mode Shapes 3** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.15 Mode Shapes 4** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 0,886 mm, 0,886 mm dan 0,964 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,285 mm. *Mode shapes 3* ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes 2* dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z dan *modes shapes 1* ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang

tidak ada potensi terjadi dikarenakan frekuensi natural yang dimiliki tidak mendekati frekuensi gempa.

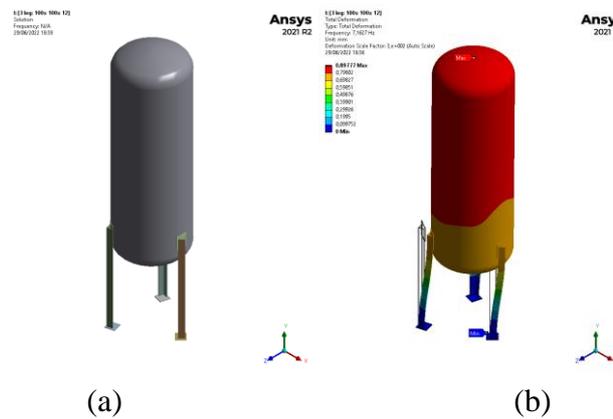
#### 4.2.1.3 Penyangga jenis L 100x100x12

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

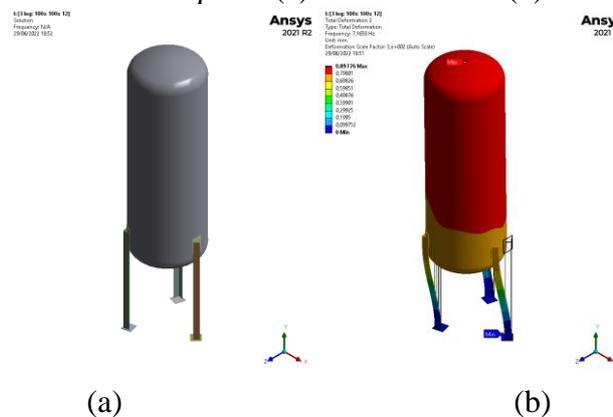
**Tabel 4.6** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 kaki jenis L 100x100x12

Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	7,163	0,898
2	7,166	0,898
3	11,743	0,967
4	39,909	1,276

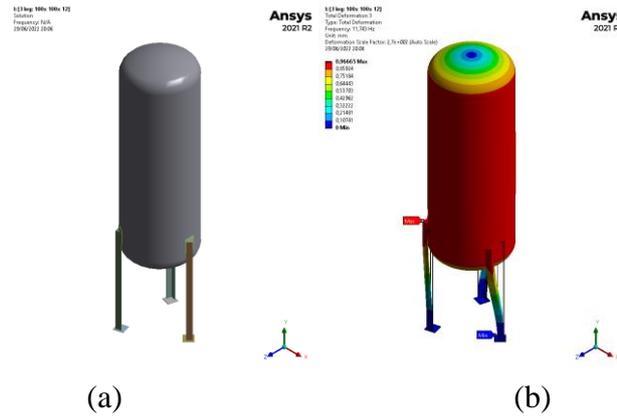
Pada tabel hasil simulasi modal analysis untuk penyangga sejumlah 3 dengan menggunakan L 100x100x12 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap mode shape. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 7,163 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 7,166 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 11,743 Hz. dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 39,909 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini:



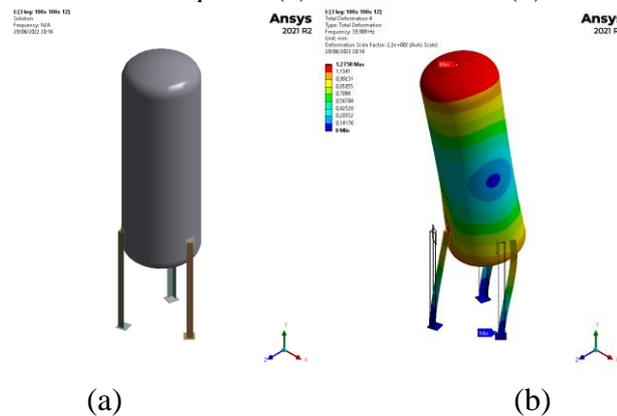
**Gambar 4.16** *Mode Shapes* 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.17** *Mode Shapes* 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.18** Mode Shapes 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.19** Mode Shapes 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 0,898 mm, 0,898 mm dan 0,967 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,276 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 2 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z dan *modes shapes* 1 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang berpotensi terjadi resonansi yakni pada mode shape 1 dan 2 sebesar 7,163 Hz dan 7,166 Hz dimana berdekatan dengan frekuensi gempa sebesar 7,142 Hz. Sedangkan pada mode shape lainnya tidak mendekati frekuensi gempa. Hal ini perlu diperhatikan dalam perancangan bejana tekan.

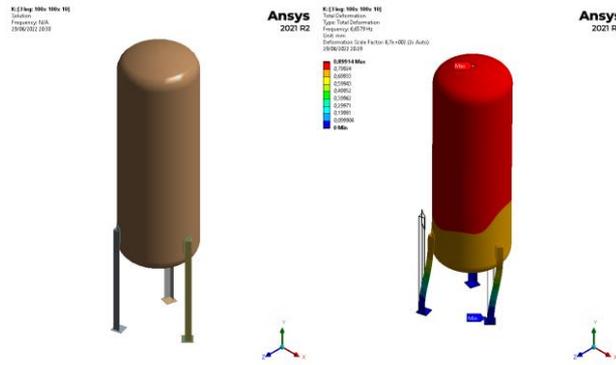
#### 4.2.1.4 Penyangga jenis L 100x100x10

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

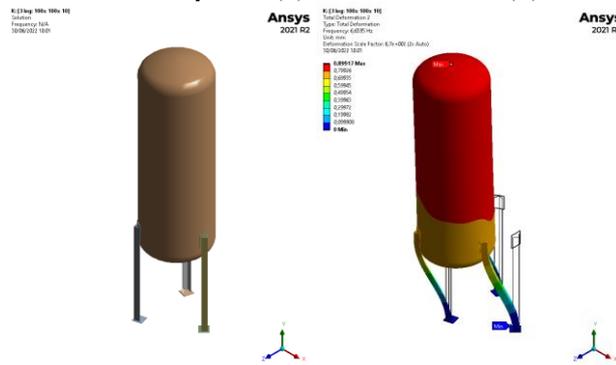
**Tabel 4.7** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 kaki jenis L 100x100x10

Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	6,658	0,889
2	6,660	0,899
3	11,128	0,968
4	37,545	1,276

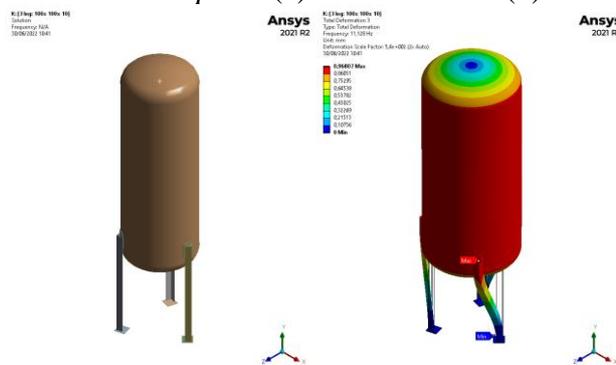
Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 3 dengan menggunakan L 100x100x10 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 6,658 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 6,660 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 11,128 Hz. Dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 37,545 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



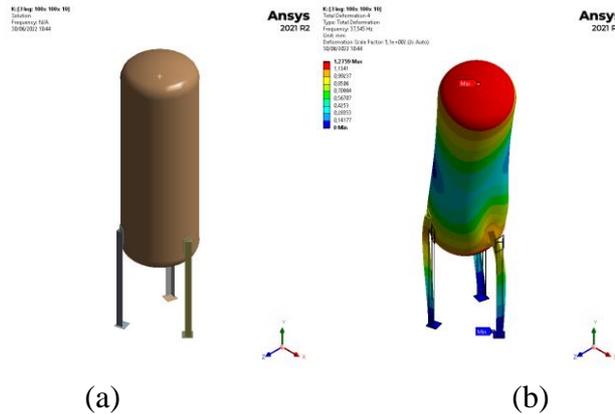
(a) (b)  
**Gambar 4.20** *Mode Shapes* 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a) (b)  
**Gambar 4.21** *Mode Shapes* 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a) (b)  
**Gambar 4.22** *Mode Shapes* 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.23** *Mode Shapes* 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 0,889 mm, 0,889 mm dan 0,968 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,276 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 1 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x dan *modes shapes* 2 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang berpotensi terjadi resonansi yakni pada *mode shape* 1,2 dan 3 sebesar 6,658 Hz, 6,660 Hz dan 11,128 Hz dimana berdekatan dengan frekuensi gempa sebesar 6,66 Hz dan 11,1 Hz. Sedangkan pada *mode shape* lainnya tidak mendekati frekuensi gempa. Hal ini perlu diperhatikan dalam perancangan bejana tekan.

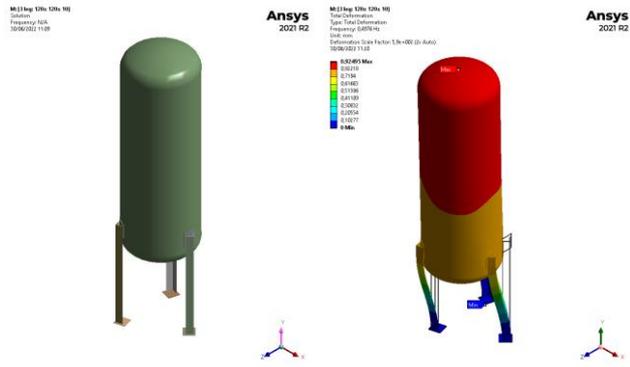
#### 4.2.1.5 Penyangga jenis L 120x120x10

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.8** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 kakijenis L 120x120x10

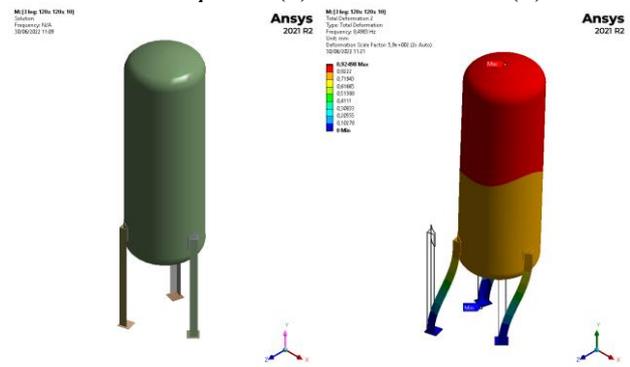
Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	8,498	0,925
2	8,498	0,925
3	14,200	0,978
4	40,853	1,260

Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 3 dengan menggunakan L 120x120x10 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 8,498 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 8,498 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 14,200 Hz. dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 40,853 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



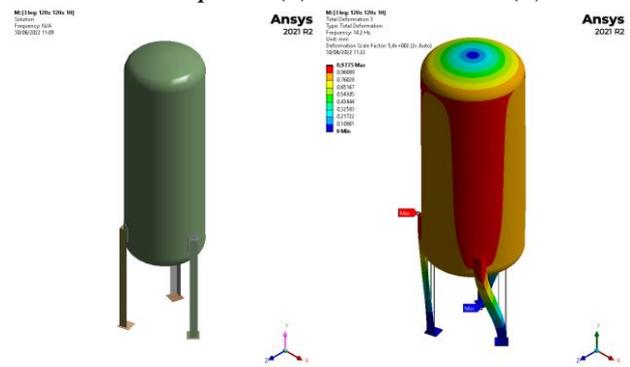
(a) (b)

**Gambar 4.24 Mode Shapes 1** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



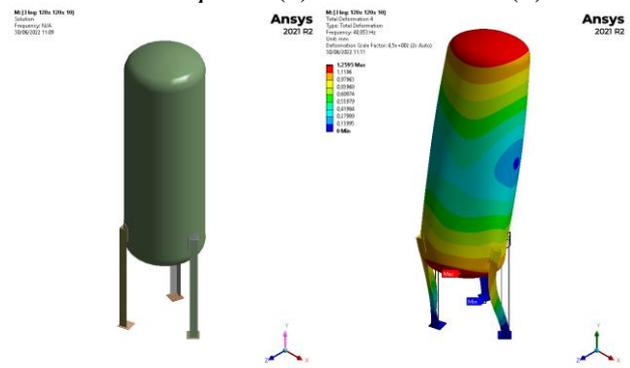
(a) (b)

**Gambar 4.25 Mode Shapes 2** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a) (b)

**Gambar 4.26 Mode Shapes 3** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a) (b)

**Gambar 4.27 Mode Shapes 4** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 0,925 mm, 0,925 mm dan 0,978 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,260 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 2 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z dan *modes shapes* 1 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang berpotensi terjadi resonansi yakni pada *mode shape* 3 sebesar 14,2 Hz dimana berdekatan dengan frekuensi gempa sebesar 14,285 Hz. Sedangkan pada *mode shape* lainnya tidak mendekati frekuensi gempa. Hal ini perlu diperhatikan dalam perancangan bejana tekan.

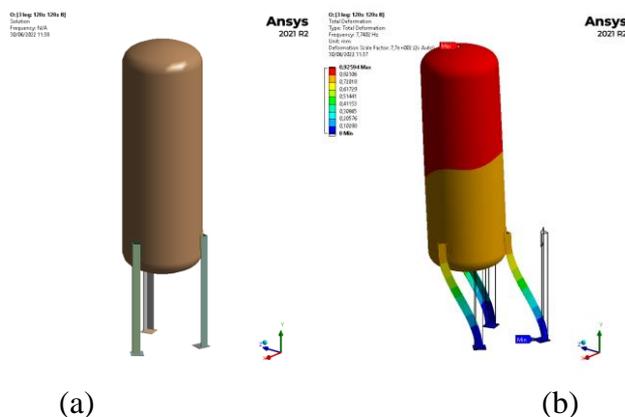
#### 4.2.1.6 Penyangga jenis L 120x120x8

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

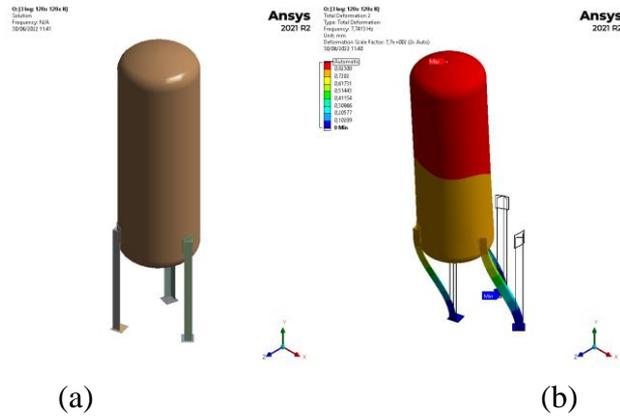
**Tabel 4.9** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 kaki jenis L 120x120x8

Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	7,740	0,926
2	7,741	0,926
3	13,027	0,983
4	37,821	1,275

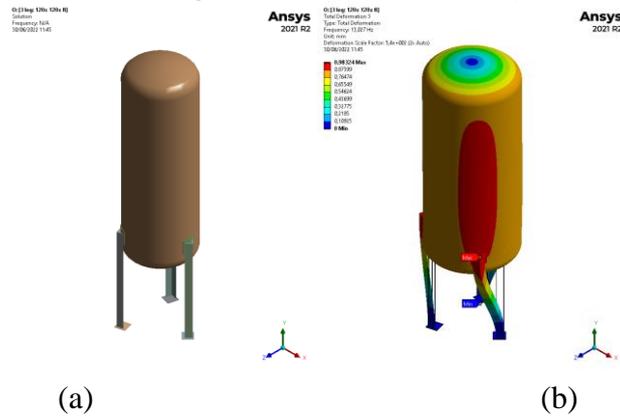
Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 3 dengan menggunakan L 120x120x8 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 7,740 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 7,741 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 13,027 Hz. dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 37,821 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



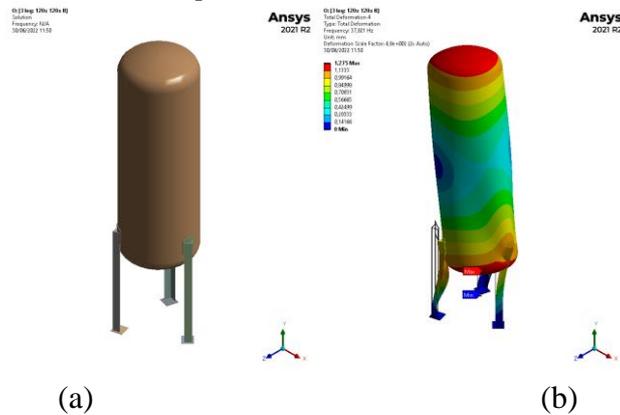
**Gambar 4.28** *Mode Shapes* 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.29 Mode Shapes 2** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.30 Mode Shapes 3** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.31 Mode Shapes 4** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2,3 dan 4 yakni sebesar 0,926 mm, 0,926 mm dan 0,983 mm dan 1,275 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 1 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x dan *modes shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang berpotensi terjadi resonansi yakni pada *mode shape* 1 dan 2 sebesar 7,74 Hz dimana

berdekatan dengan frekuensi gempa sebesar 7,69 Hz. Sedangkan pada *mode shape* lainnya tidak mendekati frekuensi gempa. Hal ini perlu diperhatikan dalam perancangan bejana tekan.

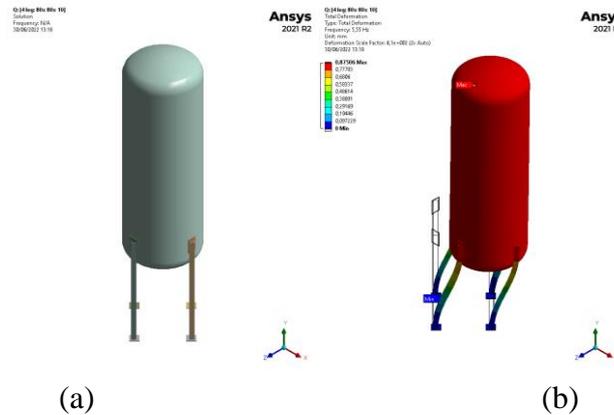
#### 4.2.1.7 Penyangga jenis L 80x80x10

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

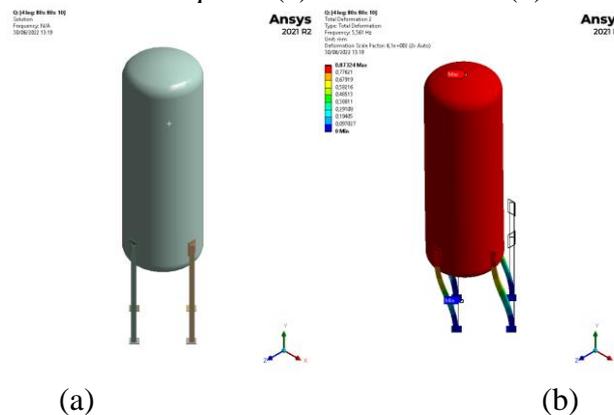
**Tabel 4.10** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 4 kaki jenis L 80x80x10

Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	5,550	0,875
2	5,561	0,873
3	9,004	0,960
4	38,734	1,295

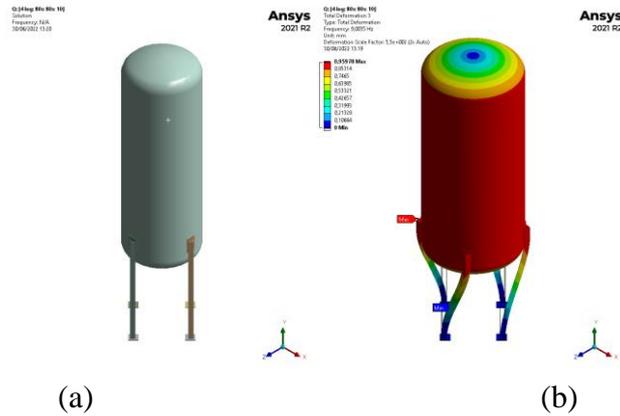
Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 4 dengan menggunakan L 80x80x10 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 5,55 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 5,561 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 9,0035 Hz. Dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 38,734 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



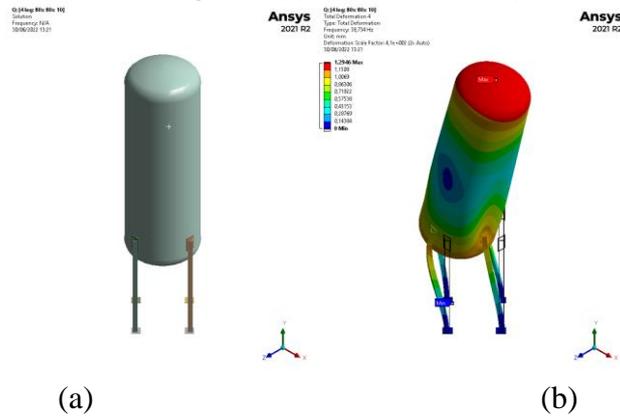
**Gambar 4.32** *Mode Shapes* 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.33** *Mode Shapes* 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.34 Mode Shapes 3** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.35 Mode Shapes 4** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 0,875 mm, 0,873 mm dan 0,960 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,295 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 1 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x dan *modes shapes* 2 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang berpotensi terjadi resonansi yakni pada *mode shape* 1,2 dan 3 sebesar 5,55 Hz, 5,56 Hz dan 9,04 Hz dimana berdekatan dengan frekuensi gempa sebesar 5,55 Hz dan 9,09 Hz. Sedangkan pada *mode shape* lainnya tidak mendekati frekuensi gempa. Hal ini perlu diperhatikan dalam perancangan bejana tekan.

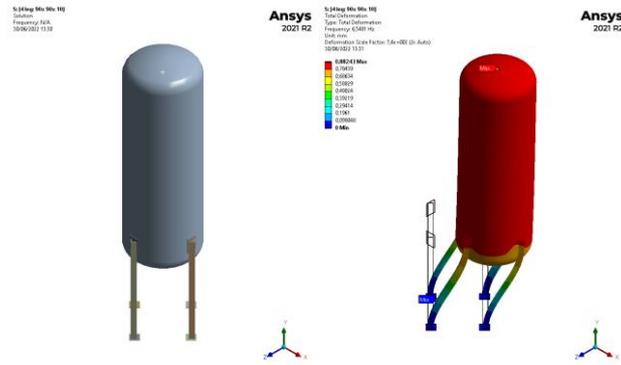
#### 4.2.1.8 Penyangga jenis L 90x90x10

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.11** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 4 kaki jenis L 90x90x10

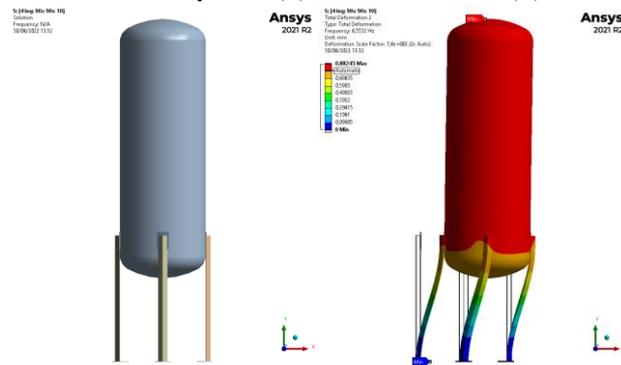
Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	6,548	0,882
2	6,553	0,882
3	11,217	0,959
4	40,868	1,287

Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 4 dengan menggunakan L 90x90x10 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 6,548 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 6,553 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 11,217 Hz. Dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 40,868 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikutini:



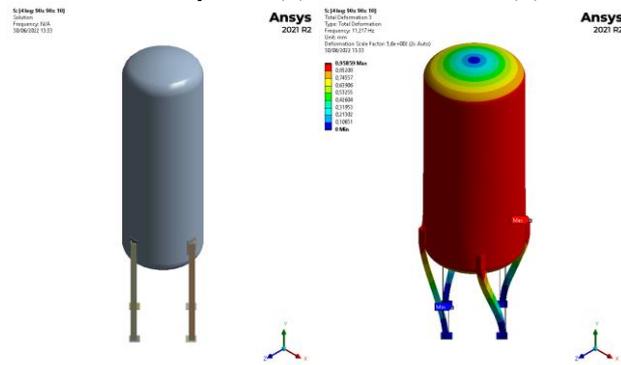
(a) (b)

**Gambar 4.36 Mode Shapes 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**



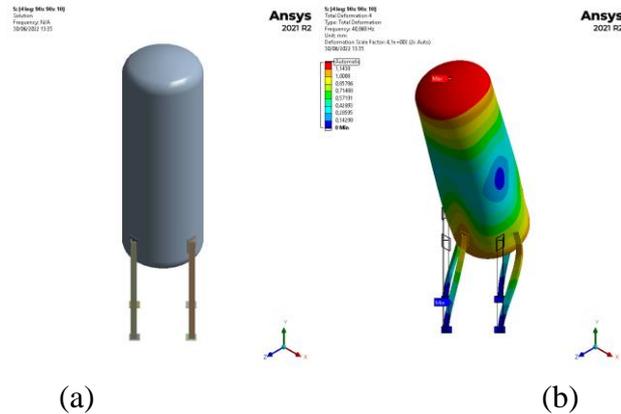
(a) (b)

**Gambar 4.37 Mode Shapes 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**



(a) (b)

**Gambar 4.38 Mode Shapes 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**



**Gambar 4.39** *Mode Shapes 4* (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 0,882 mm, 0,882 mm dan 0,959 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,287 mm. *Mode shapes 3* ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes 2* dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z dan *modes shapes 1* ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang tidak ada potensi terjadi dikarenakan frekuensi natural yang dimiliki tidak mendekati frekuensi gempa.

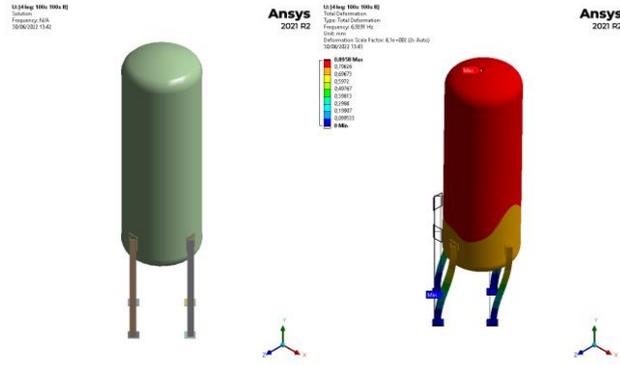
#### 4.2.1.9 Penyangga jenis L 100x100x8

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

**Tabel 4.12** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 4 kaki jenis L 100x100x8

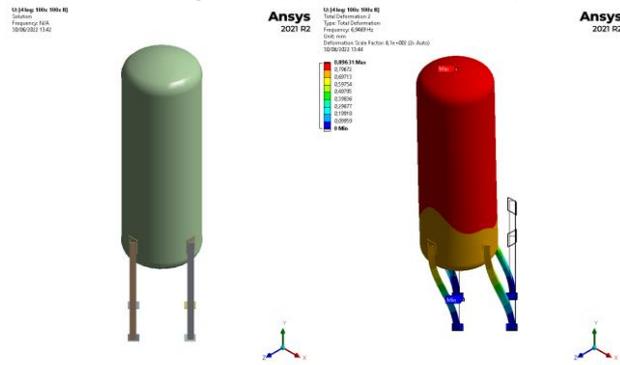
Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	6,929	0,896
2	6,947	0,896
3	11,594	0,969
4	39,631	1,278

Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 4 dengan menggunakan L 100x100x8 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes 1* bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 6,929 Hz. Kemudian pada *mode shapes 2* didapatkan frekuensi natural sebesar 6,947 Hz. Pada *mode shapes 3* didapatkan frekuensi natural sebesar 11,594 Hz. dan yang terakhir *mode shape 4* didapatkan frekuensi natural sebesar 39,631 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



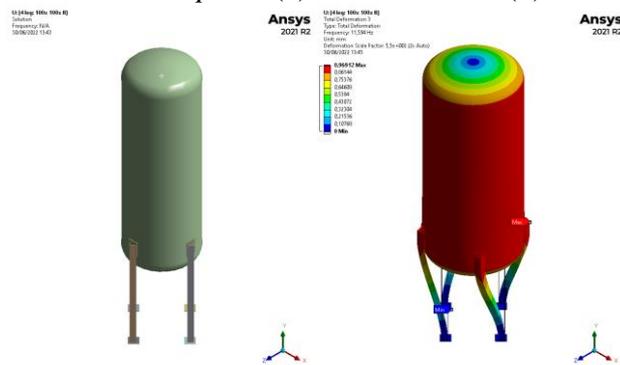
(a) (b)

**Gambar 4.40 Mode Shapes 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**



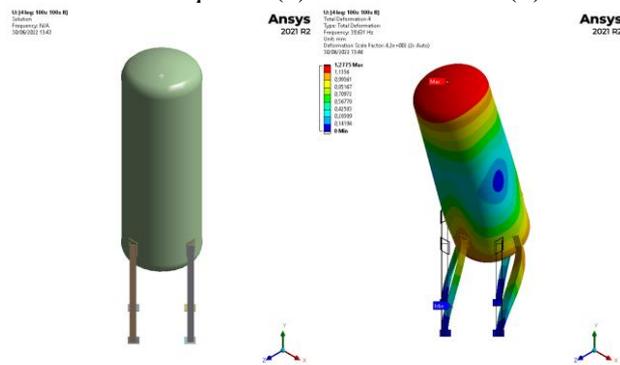
(a) (b)

**Gambar 4.41 Mode Shapes 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**



(a) (b)

**Gambar 4.42 Mode Shapes 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**



(a) (b)

**Gambar 4.43 Mode Shapes 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 1,2 dan 3 yakni sebesar 0,896 mm, 0,896 mm dan 0,969 mm. sedangkan pada mode shape 4 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,278 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 2 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z dan *modes shapes* 1 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang tidak ada potensi terjadi dikarenakan frekuensi natural yang dimiliki tidak mendekati frekuensi gempa.

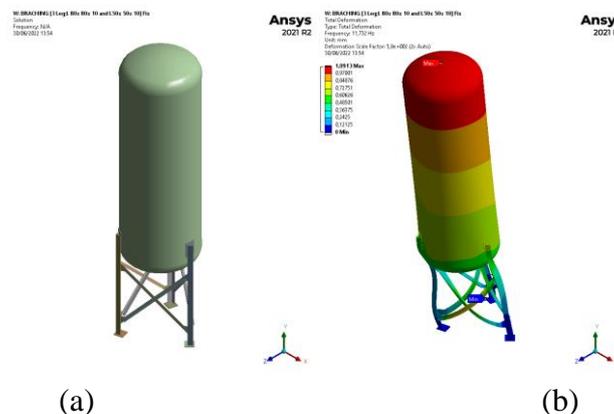
#### 4.2.1.10 Penyangga jenis *cross bracing* 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L 50x 50x 10

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

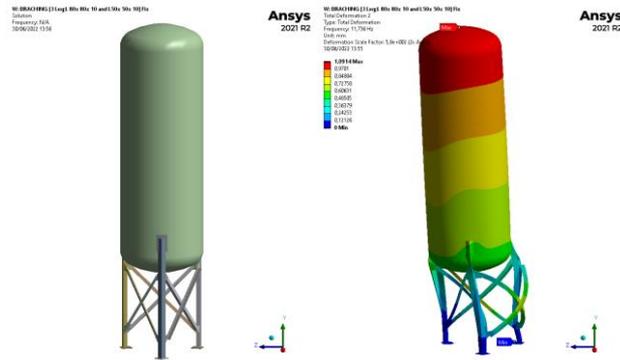
**Tabel 4.13** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 Kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10

Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	11,732	1,091
2	11,736	1,091
3	17,675	1,595
4	39,170	3,862

Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 3 dengan *cross bracing* menggunakan L 80x80x10 dan L 50x50x10 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 11,732 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 11,736 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 11,675 Hz. Dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 39,17 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



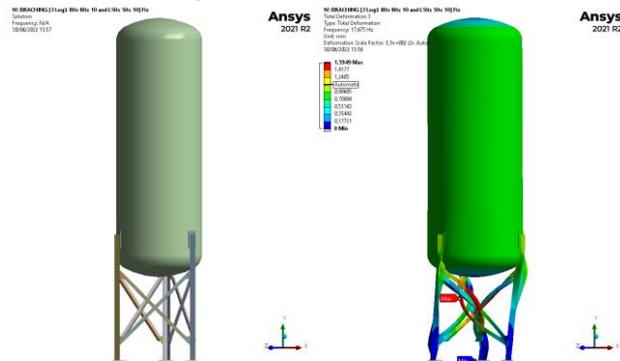
**Gambar 4.44** *Mode Shapes* 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a)

(b)

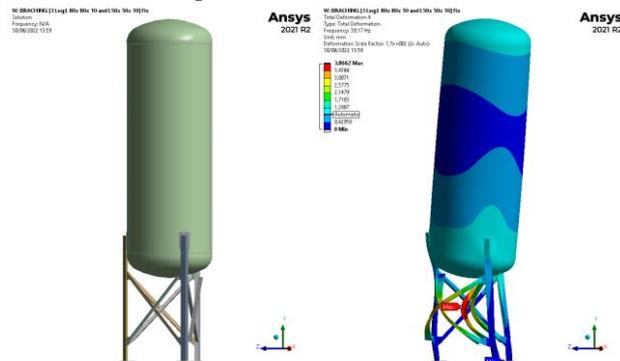
**Gambar 4.45 Mode Shapes 2** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a)

(b)

**Gambar 4.46 Mode Shapes 3** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a)

(b)

**Gambar 4.47 Mode Shapes 4** (a) Keadaan awal (b) Total deformasi

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 3 dan 4 yakni sebesar 1,595 mm dan 3,862 mm. sedangkan pada mode shape 1 dan 2 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 1,091 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 2 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x dan *modes shapes* 1 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang

tidak ada potensi terjadi dikarenakan frekuensi natural yang dimiliki tidak mendekati frekuensi gempa.

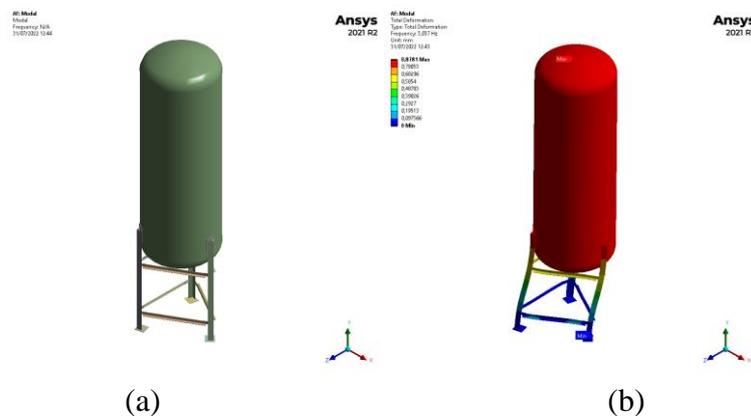
#### 4.2.1.11 Penyangga jenis *sway bracing* 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L 50x 50x 10

Simulasi *modal analysis* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut:

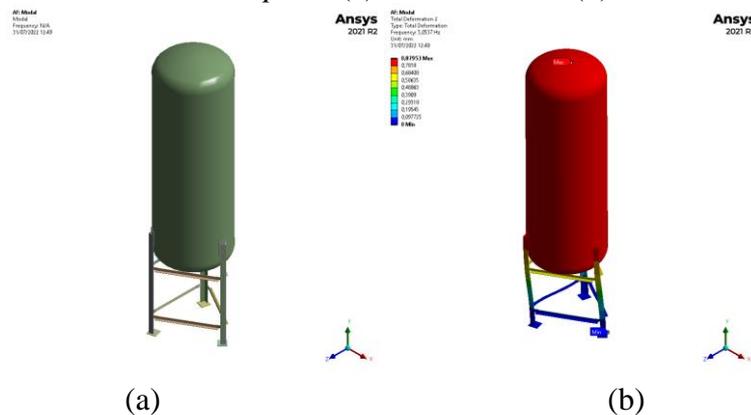
**Tabel 4.14** Data Hasil *Modal Analysis* pada penyangga 3 Kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10

Mode	Frekuensi (Hz)	Total Deformasi (mm)
1	5,037	1,091
2	5,053	1,091
3	8,855	1,595
4	33,338	3,862

Pada tabel hasil simulasi *modal analysis* untuk penyangga sejumlah 3 dengan *sway bracing* menggunakan L 80x80x10 dan L 50x50x10 di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan baik dari hasil frekuensi natural dan total deformasi untuk setiap *mode shape*. Pada *mode shapes* 1 bejana tekan didapatkan frekuensi natural sebesar 5,037 Hz. Kemudian pada *mode shapes* 2 didapatkan frekuensi natural sebesar 5,053 Hz. Pada *mode shapes* 3 didapatkan frekuensi natural sebesar 8,855 Hz. Dan yang terakhir *mode shape* 4 didapatkan frekuensi natural sebesar 33,338 Hz. Untuk distribusi nilai total deformasi yang menunjukkan karakter dari masing-masing mode getar akan ditampilkan dalam beberapa gambar berikut ini :



**Gambar 4.48** *Mode Shapes* 1 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



**Gambar 4.49** *Mode Shapes* 2 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi



(a) (b)  
**Gambar 4.50 Mode Shapes 3 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**



(a) (b)  
**Gambar 4.51 Mode Shapes 4 (a) Keadaan awal (b) Total deformasi**

Pada gambar dapat dilihat bahwa deformasi maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan untuk mode shape 3 dan 4 yakni sebesar 0,964 mm dan 1,286 mm. sedangkan pada mode shape 1 dan 2 deformasi maksimumnya terjadi pada *shell* bejana tekan yakni sebesar 0,880 mm. *Mode shapes* 3 ini menghasilkan modus getar berupa beban torsional yang menyebabkan bejana tekan bergerak berputar terhadap sumbu y serta mengalami defleksi pada bagian shell. *Mode shapes* 2 dan 4 menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu x dan *modes shapes* 1 ini menghasilkan modus getar berupa beban lateral yang searah sumbu z. besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai frekuensi natural pada setiap mode, dimana hubungan antara frekuensi natural dengan deformasi berbanding lurus.

Ditinjau dari frekuensi natural yang dimiliki pada setiap mode shape maka yang tidak ada potensi terjadi dikarenakan frekuensi natural yang dimiliki tidak mendekati frekuensi gempa.

#### 4.2.2 Hasil simulasi dan pembahasan *respons spectrum*

Kondisi geografis yang berada di antara 3 lempeng dunia mengakibatkan adanya gempa hampir di seluruh daerah. Pergerakan tanah atau gempa tidak dapat diperkirakan kapan terjadinya, namun hal ini dapat di antisipasi dengan melakukan perencanaan yang sesuai berdasarkan data gempa yang telah terjadi sebelumnya.

Untuk mengetahui apakah bejana tekan ini aman apabila terjadi gempa di lokasi tersebut, perlu dilakukan simulasi untuk mengetahui akibat atau respons dari bejana tekan Ketika dikenai beban gempa. Mengacu pada data gempa yang dimiliki oleh BMKG setempat. Dimana spektral gempa berubah secara terus menerus sebagaimana fungsi percepatan terhadap frekuensi. Maka simulasi yang dapat dilakukan adalah simulasi

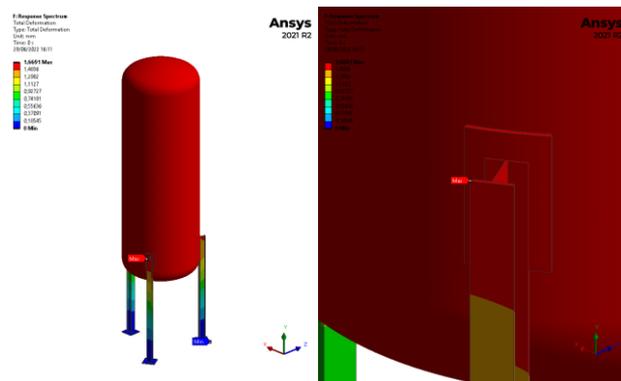
respons spectrum.

Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam simulasi respons spectrum ini adalah melakukan import geometri, model dan mesh dari modal ke respons spectrum, kemudian dilakukan input spectral gempa sesuai data yang ada, lalu menentukan arah gempa yang terjadi. Setelah itu dilakukan solve untuk mengetahui respons yang terjadi pada bejana tekan. Diaman respons yang dicari berupa total deformasi dan distribusi tegangan ekuivalennya.

Hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan akan dibandingkan dengan batas deformasi maksimum yang diizinkan. Apabila deformasi yang terjadi di bawah batas deformasi maksimum maka bejana tekan dapat dikatakan aman. Kemudian hasil tegangan ekuivalennya akan dibandingkan dengan tegangan luluh materialnya untuk mendapatkan nilai *safety* faktor yang bisa digunakan untuk menilai apakah bejana tekan ini aman menahan beban gempa tersebut.

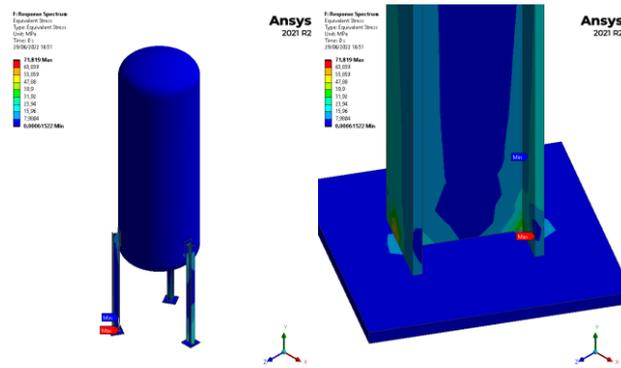
#### 4.2.2.1 Penyangga jenis ISMB 100

Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



Gambar 4.52 Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe ISMB 100 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 1,546 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass paticipation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

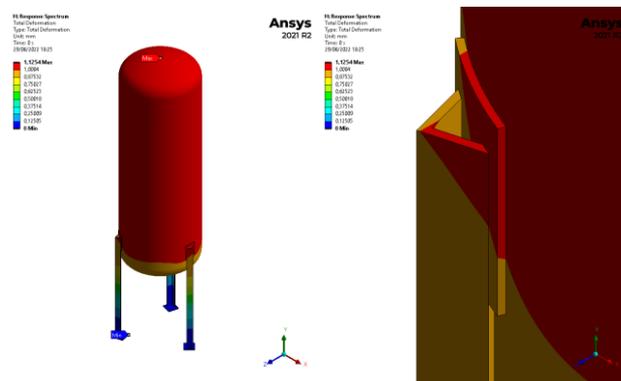


**Gambar 4.53** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 60,330 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 2,3. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

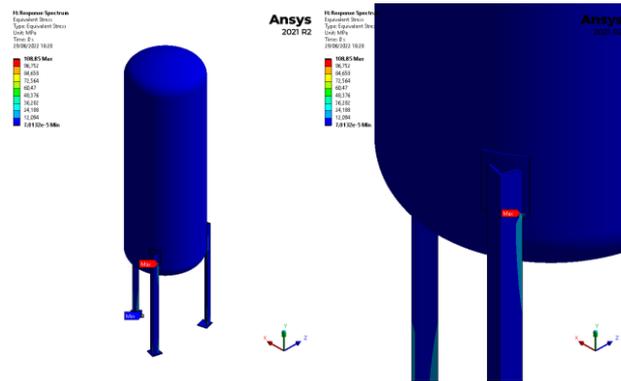
#### 4.2.2.2 Penyangga jenis L 90x90x12

Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.54** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 90x90x12 seperti di atas dapat dilihat bahwa *deformasinya* terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 2,442 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm. sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass paticipation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

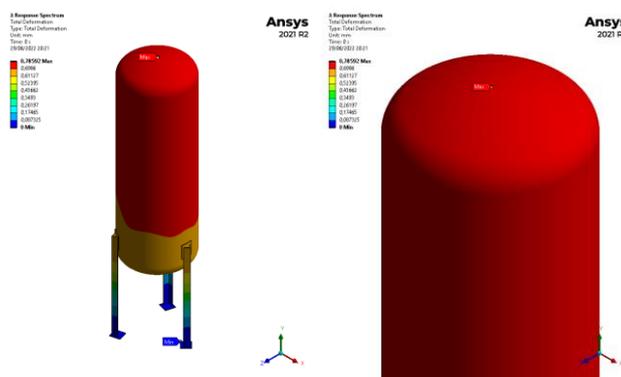


**Gambar 4.55** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 88,317 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 1,6. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.3 Penyangga jenis L 100x100x12

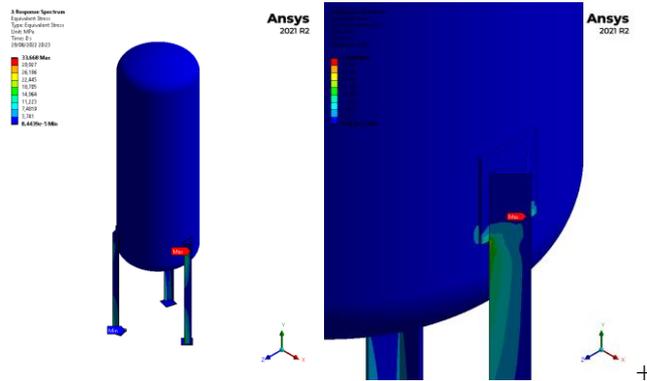
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.56** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 100x100x12 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 1,305 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berbanding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass participation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi

*equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

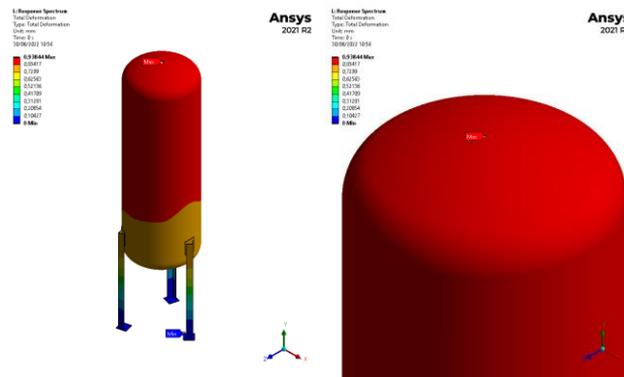


**Gambar 4.57** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 57,380 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 2,4. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.4 Penyangga jenis L 100x100x10

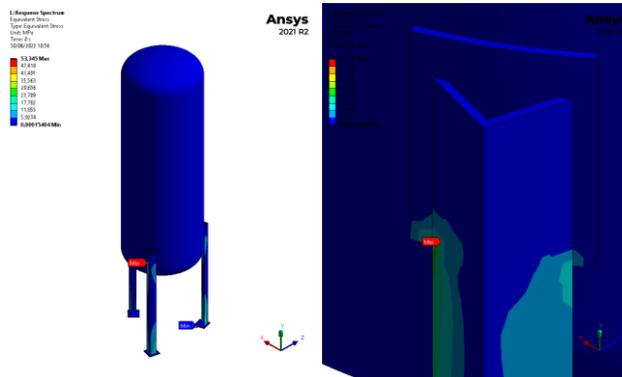
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.58** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 100x100x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung bejana tekan sebesar 1,094 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berbanding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass participation factor* yang dimiliki maka semakin besar

pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress* (*von-misses*) pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

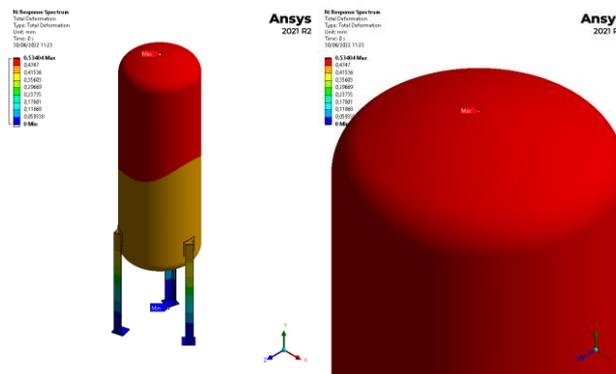


**Gambar 4.59** *Equivalent Stress* (*von-misses*) pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 50,115 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 2,8. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.5 Penyangga jenis L 120x120x10

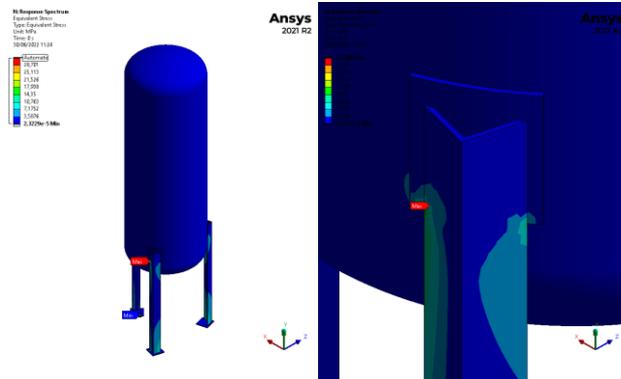
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.60** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 120x120x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,627 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki

hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass paticipation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

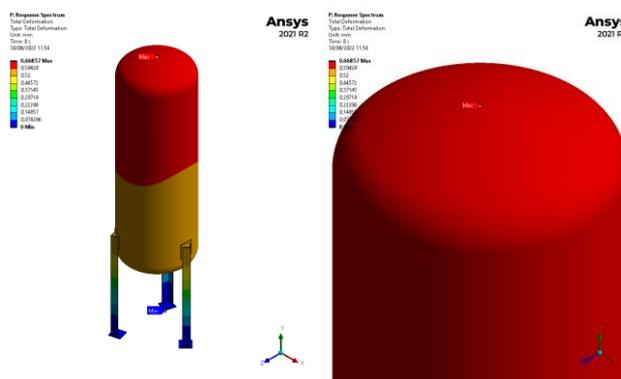


**Gambar 4.61** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 33,319 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 4,1. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut sudah sesuai dengan rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.6 Penyangga jenis L 120x120x8

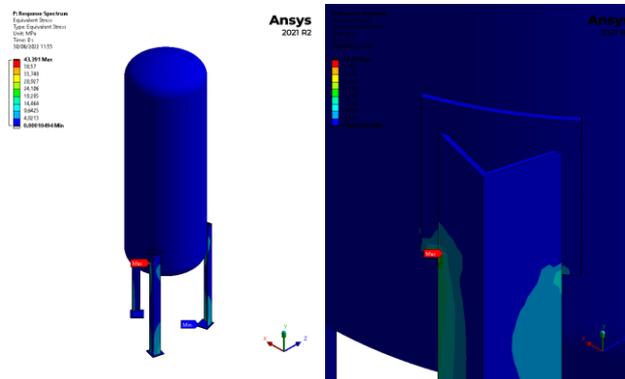
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.62** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 120x120x8 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung bejana tekan sebesar 1,114 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation*

*factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass participation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

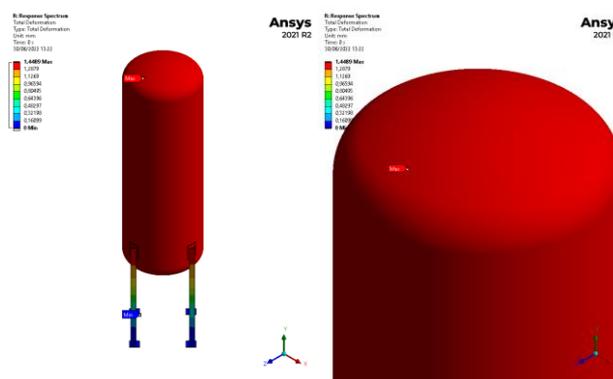


**Gambar 4.63** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 69,134 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 2,0. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.7 Penyangga jenis L 80x80x10

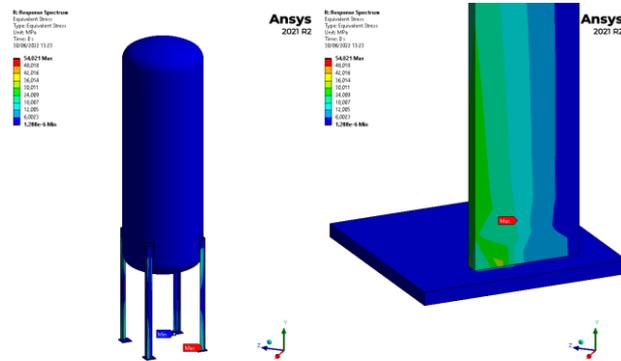
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.64** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 4 penyangga tipe L 80x80x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 2,138 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada

bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass participation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

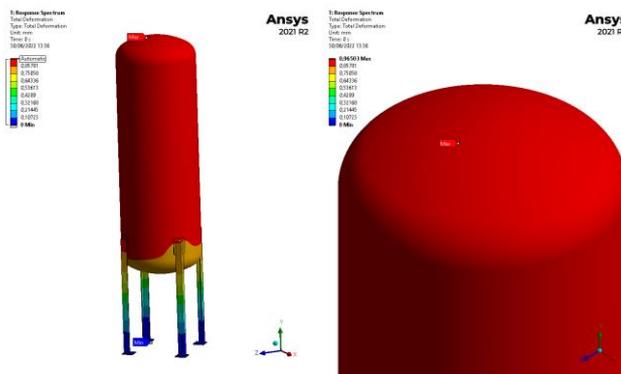


**Gambar 4.65** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 62,134 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 2,2. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.8 Penyangga jenis L 90x90x10

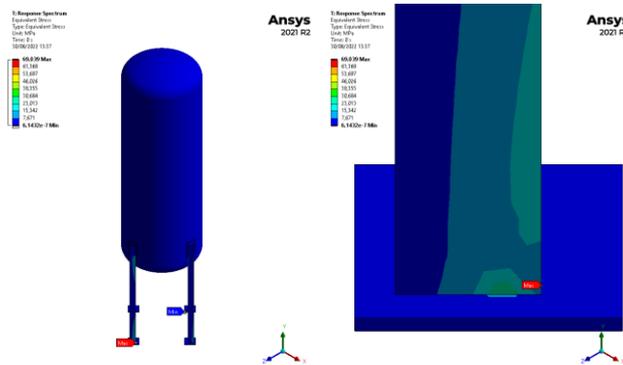
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.66** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 4 penyangga tipe L 90x90x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 1,572 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi

batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass participation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

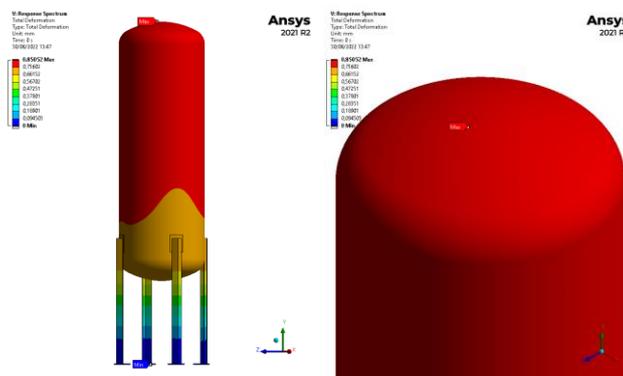


**Gambar 4.67** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 106,920 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 1,3. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.9 Penyangga jenis L 100x100x8

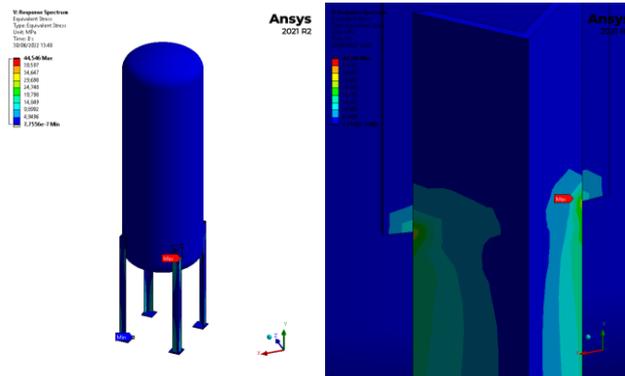
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.68** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 4 penyangga tipe L 100x100x8 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar

1,408 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass paticipation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

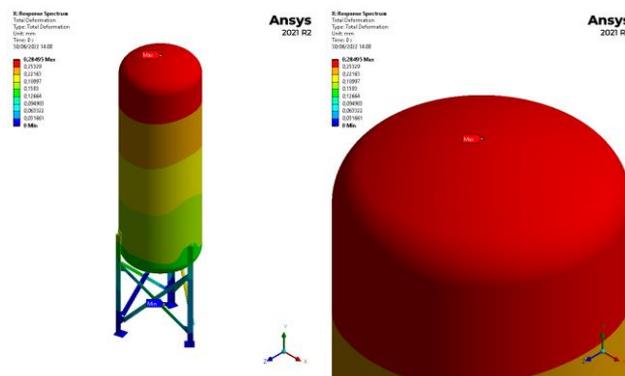


**Gambar 4.69** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 88,930 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 1,6. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.2.10 Penyangga jenis *cross bracing* 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10

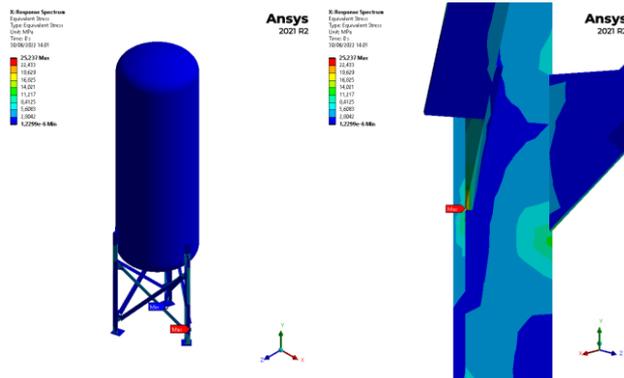
Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.70** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga dengan *cross bracing* menggunakan L 80x80x10 dan L50x 50x 10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada

penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung bejana tekan sebesar 0,372 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass participation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :

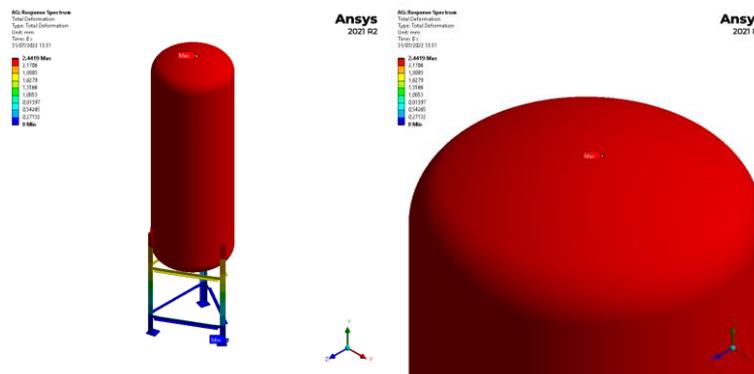


**Gambar 4.71** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 17,132 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 8. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut sudah sesuai dengan rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

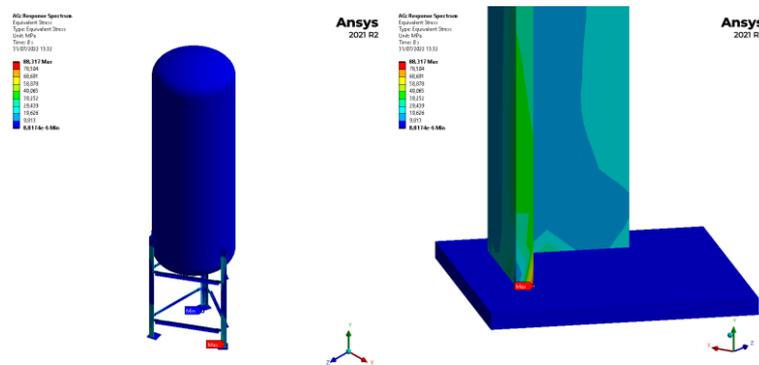
#### 4.2.2.11 Penyangga jenis *sway bracing* 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10

Setelah simulasi *response spectrum* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban gempa.



**Gambar 4.72** Total Deformasi pada *Response Spectrum*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga dengan *sway bracing* menggunakan L 80x80x10 dan L50x 50x 10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung bejana tekan sebesar 2,442 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Besar deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh nilai *mass participation factor* dan frekuensi natural bejana tekan, dimana memiliki hubungan berabnding lurus. Sehingga semakin besar nilai *mass paticipation factor* yang dimiliki maka semakin besar pula deformasi yang terjadi. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban gempa :



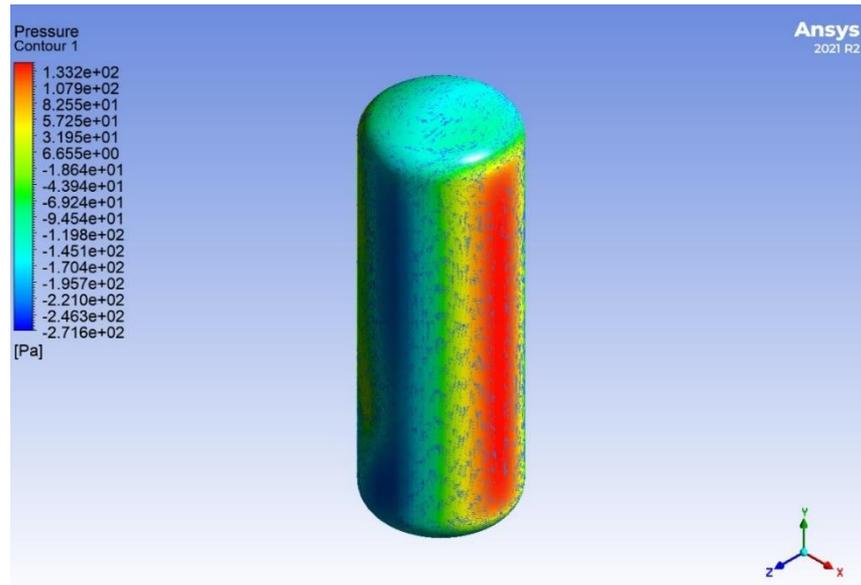
**Gambar 4.73** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban gempa

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 88,317 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga bejana tekan menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban gempa akibat adanya pergerakan tanah yang acak. Nilai keamanan yang dimiliki konfigurasi penyangga seperti ini sebesar 1,6. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi penyangga tersebut masih di bawah rekomendasi ASME dalam segi nilai keamanan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013).

#### 4.2.3 Hasil simulasi *fluid flow*

Kondisi geografis di Indonesia memiliki perbedaan arah angin pada setiap musimnya. Arah angin yang terjadi ini merupakan angin muson barat dan angin muson timur. Kecepatan angin di setiap daerah memiliki karakteristiknya masing-masing dan dapat berubah setiap waktunya. Hal ini memberitahukan bahwa perlu diadakan perencanaan yang tepat dalam melakukan perancangan bejana tekan.

Untuk mengetahui distribusi tekanan yang terjadi pada bejana tekan akibat pengaruh beban angin maka perlu dilakukan simulasi *fluid flow* ini. Mengacu pada data kecepatan angin dasar yang dimiliki oleh BMKG setempat dan data SNI 1726. Dimana kecepatan angin dasar berubah secara terus menerus. Namun dalam simulasi ini digunakan kecepatan angin tertinggi yang terjadi didaerah tersebut. Dimana hal ini menggambarkan bahwa bejana tekan mengalami beban maksimumnya saat beroperasi. Berikut adalah distribusi tekanan yang terjadi pada bejana tekan ketika dikenai beban angin:



**Gambar 4.74** Distribusi *pressure* akibat beban angin

Berdasarkan gambar di atas dapat diketahui distribusi *pressure* yang terjadi pada bejana tekan. *Pressure* maksimum yang terjadi yakni sebesar 132 Pa, sedangkan *pressure* minimum yang terjadi yakni sebesar -271 Pa. *pressure* maksimum terjadi tepat pada bagian bejana tekan yang paling awal mengenai aliran fluida. Dimana dalam gambar di atas berada pada bagian yang berwarna merah. Kemudian bagian paling minimum terjadi pada bagian samping bejana tekan. Hal ini menginformasikan bahwa *pressure* terbesar yang terjadi pada bejana tekan saat fluida mengenainya pertama kali dan akan terus berkurang ke bagian samping bejana tekan yang disebabkan oleh adanya gesekan antara permukaan bejana tekan dengan aliran fluida yang melewatinya. *Pressure* yang terjadi pada bejana tekan berbanding lurus dengan massa jenis dan kecepatan aliran fluida.

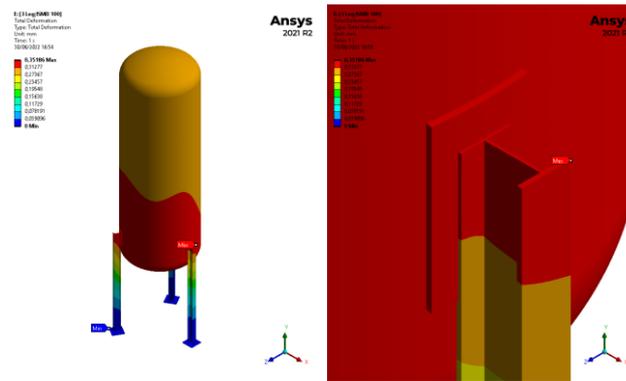
#### 4.2.4 Hasil simulasi dan pembahasan *static structural*

Untuk mengetahui apakah bejana tekan ini aman apabila terkena beban angin, perlu dilakukan simulasi untuk mengetahui akibat atau respons dari bejana tekan ketika dikenai beban angin. Maka simulasi yang dapat dilakukan adalah simulasi *static structural*.

Berikut akan dibahas hasil simulasi *static structural* untuk setiap konfigurasi penyangga yang di desain.

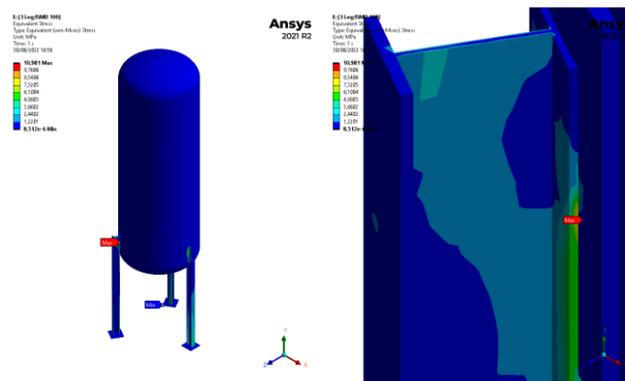
##### 4.2.4.1 Penyangga jenis ISMB 100

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.75** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe ISMB 100 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,277 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

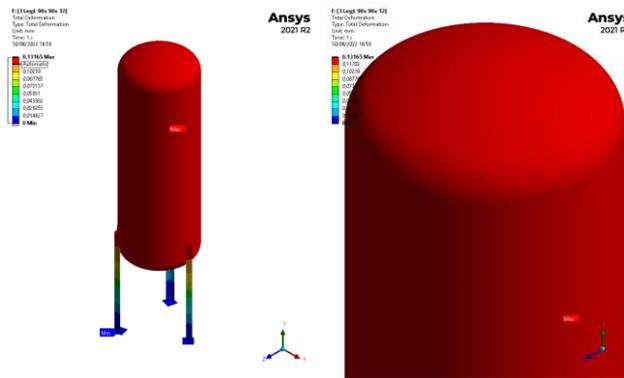


**Gambar 4.76** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,888 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

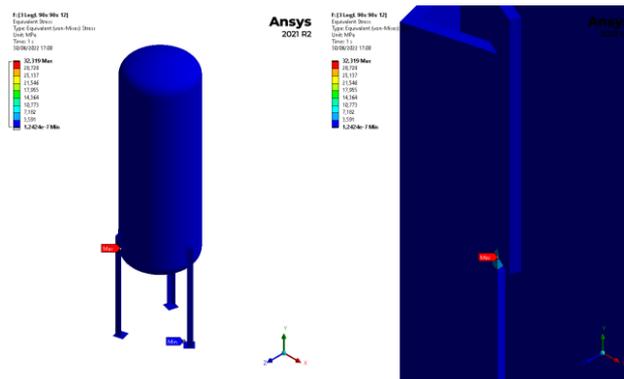
#### 4.2.4.2 Penyangga jenis L 90x90x12

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.77** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 90x90x12 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,244 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

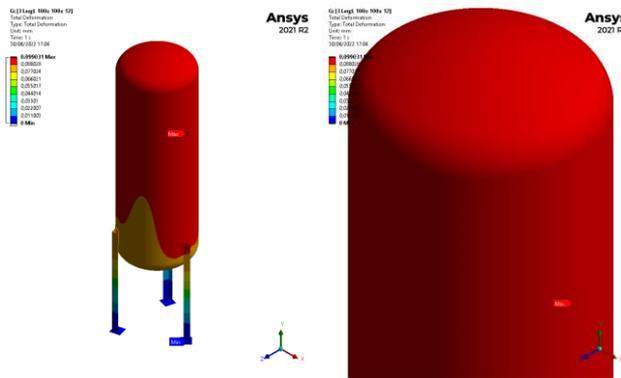


**Gambar 4.78** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,893 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

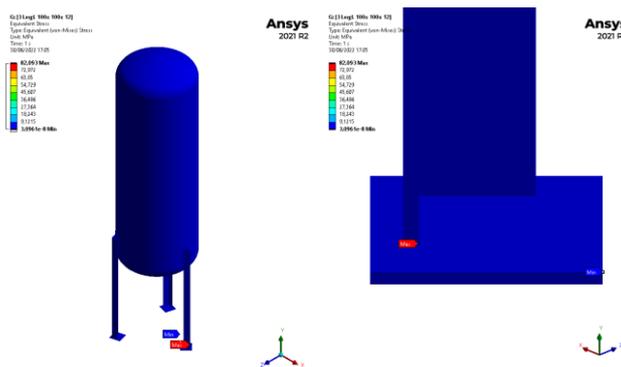
#### 4.2.4.3 Penyangga jenis L 100x100x12

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.79** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 100x100x12 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,230 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

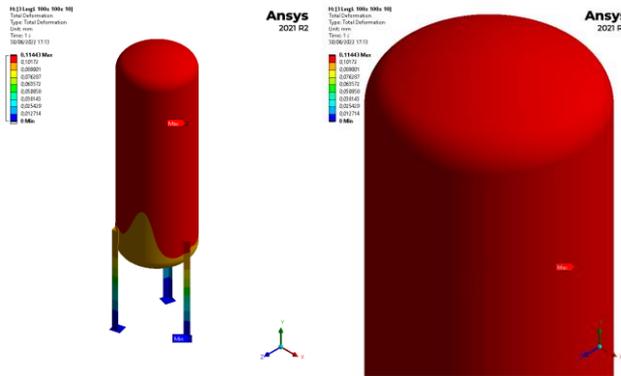


**Gambar 4.80** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,900 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

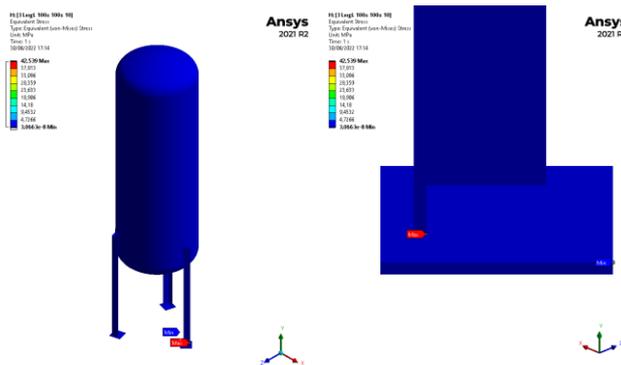
#### 4.2.4.4 Penyangga jenis L 100x100x10

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.81** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 100x100x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,236 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

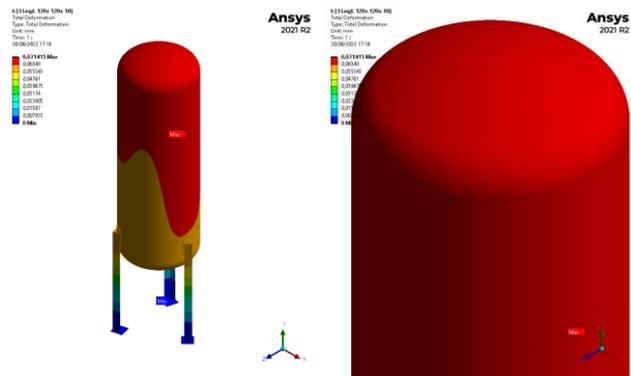


**Gambar 4.82** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,902 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

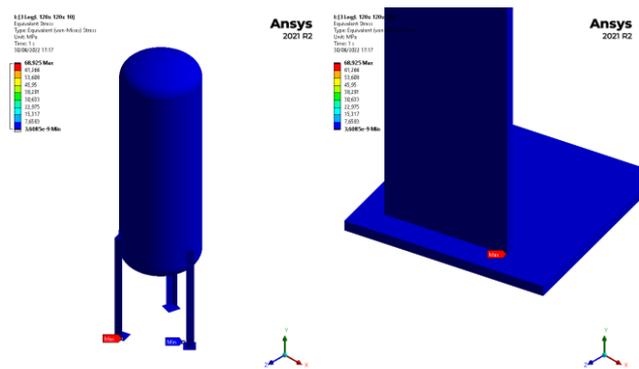
#### 4.2.4.5 Penyangga jenis L 120x120x10

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.83** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 120x120x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,219 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

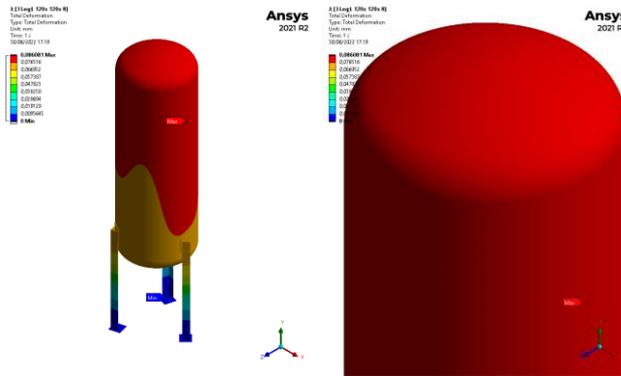


**Gambar 4.84** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,923 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

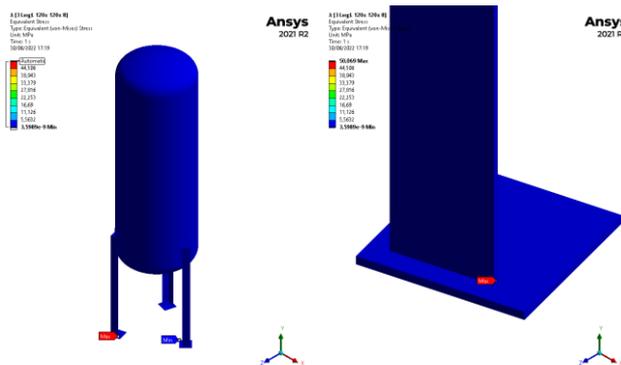
#### 4.2.4.6 Penyangga jenis L 120x120x8

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.85** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga tipe L 120x120x8 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung bejana tekan sebesar 0,227 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

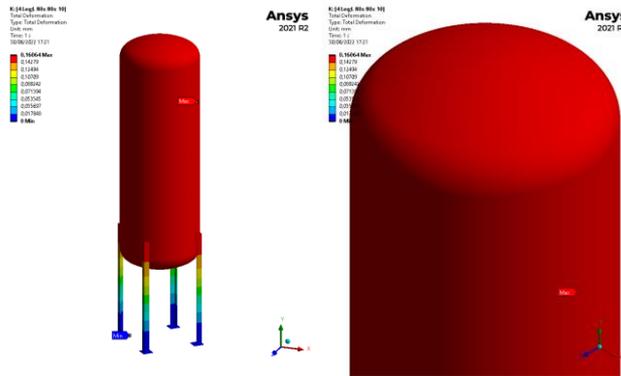


**Gambar 4.86** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,925 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

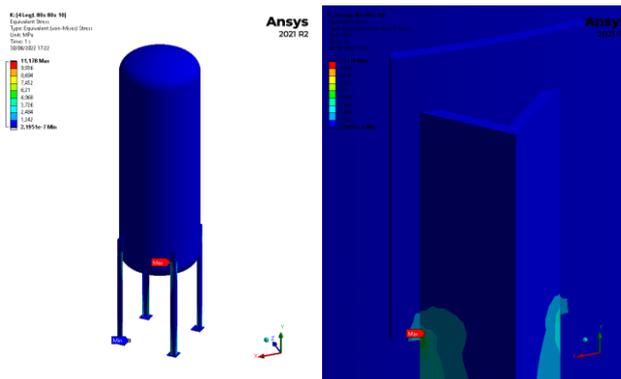
#### 4.2.4.7 Penyangga jenis L 80x80x10

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.87** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 4 penyangga tipe L 80x80x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,544 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

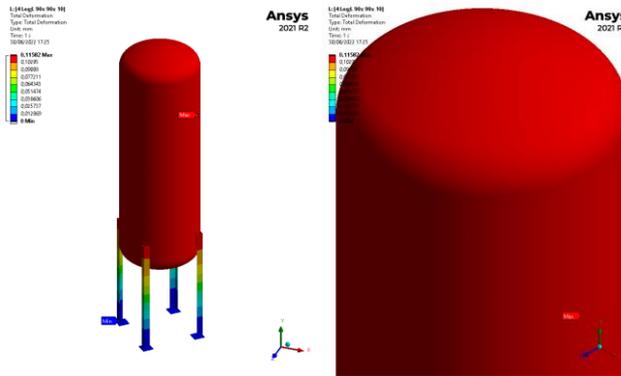


**Gambar 4.88** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,794 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

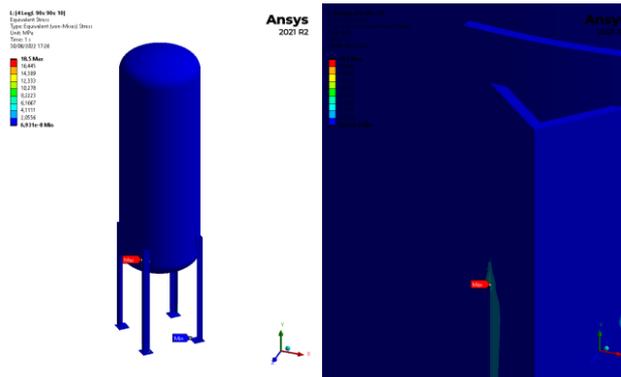
#### 4.2.4.8 Penyangga jenis L 90x90x10

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.89** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 4 penyangga tipe L 90x90x10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,446 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

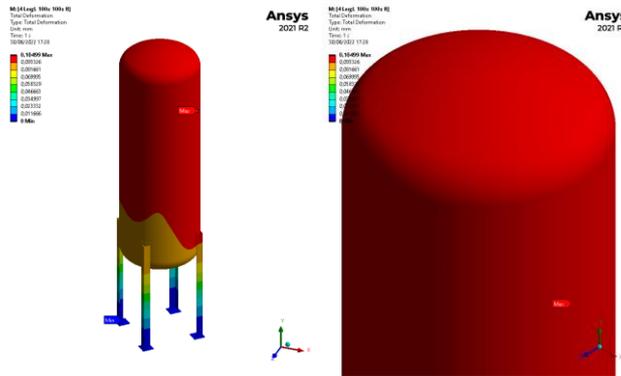


**Gambar 4.90** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,810 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

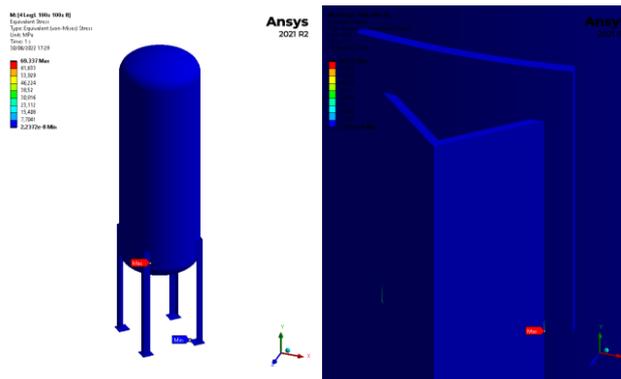
#### 4.2.4.9 Penyangga jenis L 100x100x8

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.91** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 4 penyangga tipe L 100x100x8 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,449 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

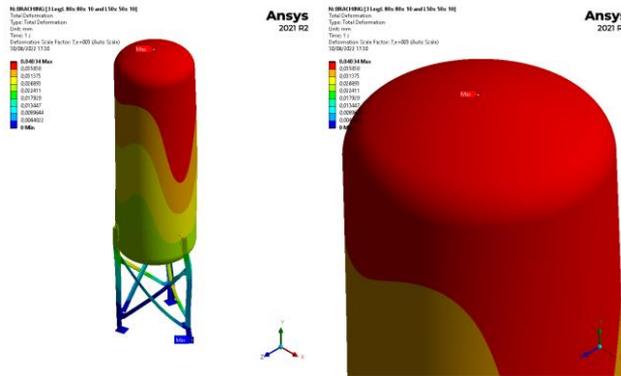


**Gambar 4.92** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,825 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

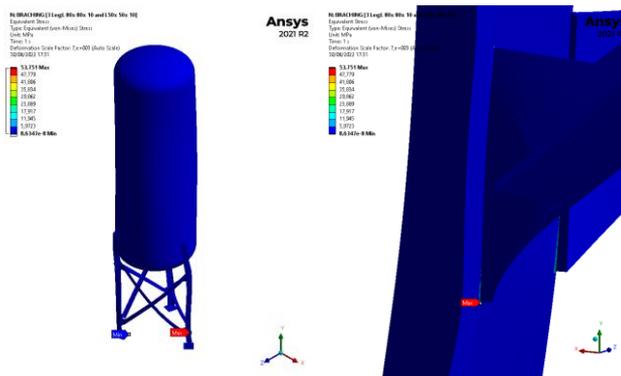
#### 4.2.4.10 Penyangga jenis *cross bracing* 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.93** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga dengan *cross bracing* menggunakan L 80x80x10 dan L50x 50x 10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,217 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

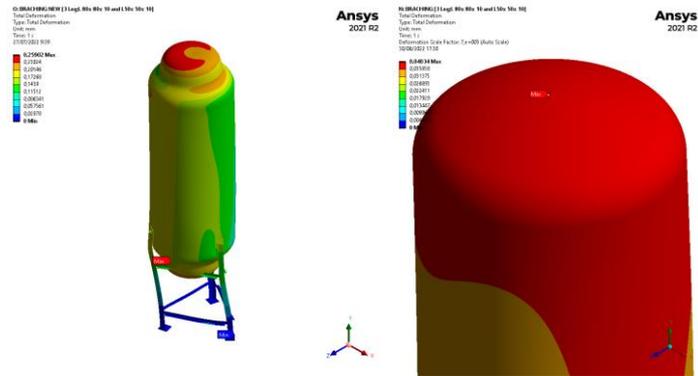


**Gambar 4.94** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 36,900 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

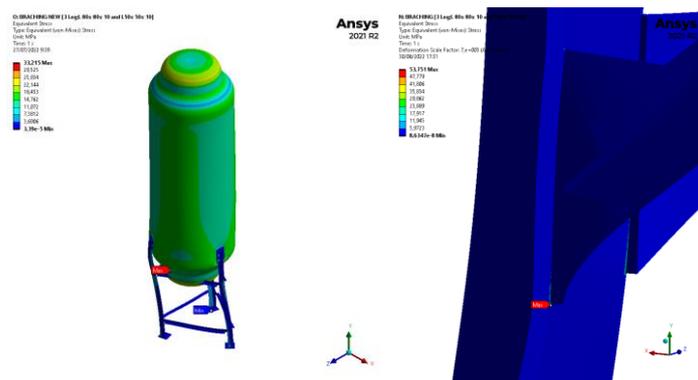
#### 4.2.4.11 Penyangga jenis *sway bracing* 3 kaki dengan profil L 80x80x10 dan L50x 50x 10

Setelah simulasi *static structural* telah dijalankan, berikut adalah hasil deformasi yang terjadi pada bejana tekan sebagai respon akibat adanya beban angin.



**Gambar 4.95** Total Deformasi pada *Static Structural*

Pada bejana tekan dengan 3 penyangga dengan *sway bracing* menggunakan L 80x80x10 dan L50x 50x 10 seperti di atas dapat dilihat bahwa deformasinya terjadi pada penyangga dan bejana tekan dengan deformasi maksimumnya berada di ujung penyangga yang menempel pada bejana tekan sebesar 0,259 mm. Besar deformasi yang terjadi pada penyangga dan bejana tekan tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan yakni sebesar 22 mm, sehingga kegagalan pada bejana tekan dan penyangga dapat dihindarkan. Berikut adalah gambar distribusi *equivalent stress (von-misses)* pada bejana tekan ketika dikenai beban angin :

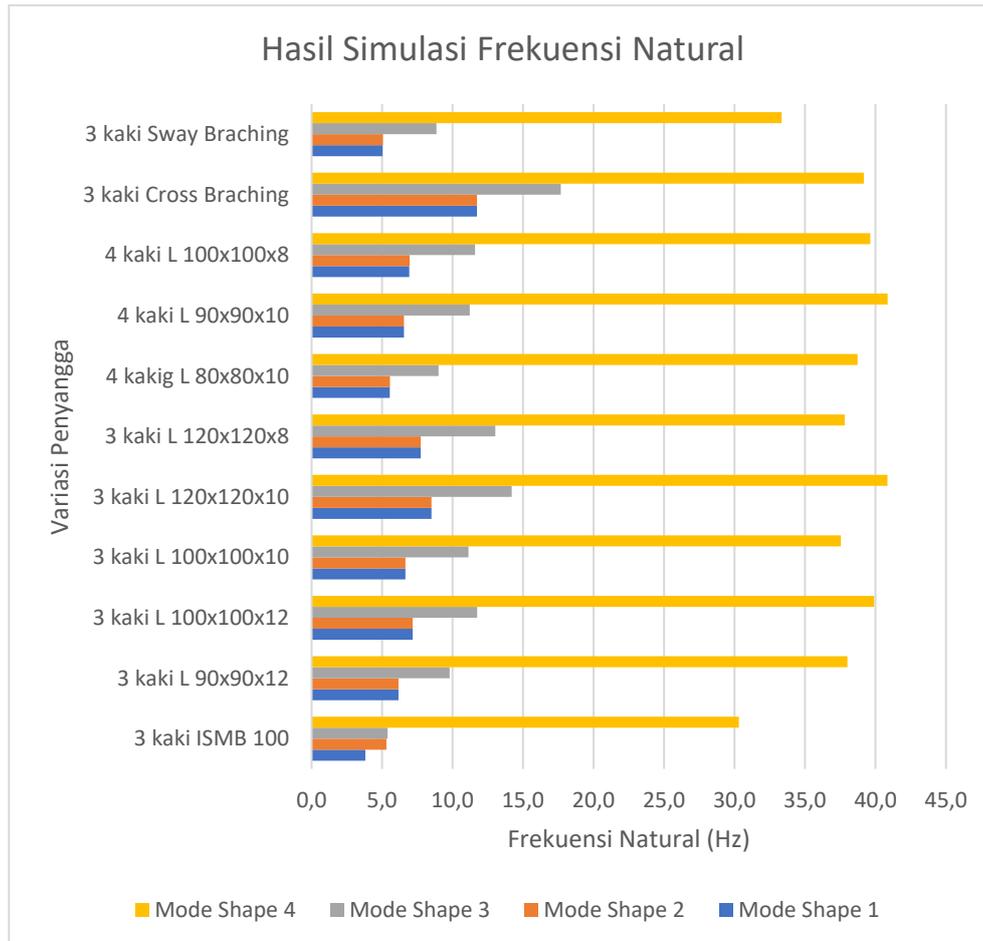


**Gambar 4.96** *Equivalent Stress (von-misses)* pada bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa tegangan ekuivalen maksimum terjadi pada penyangga bejana tekan sebesar 33,215 MPa. Besar tegangan ekuivalen yang terjadi pada penyangga bejana tekan tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diizinkan yakni sebesar 137,895 MPa. Sehingga penyangga bejana tekan ini dapat dikatakan aman saat beroperasi. Tegangan ekuivalen yang timbul dikarenakan penyangga tersebut menahan beban bejana tekan yang akan menjadi besar ketika dikenai beban angin. Dimana beban angin memberikan gaya tegak lurus dengan *shell* pada bejana tekan.

#### 4.2.5 Perbandingan frekuensi natural setiap variasi penyangga dengan beban gempa yang terjadi

Berikut adalah nilai frekuensi natural untuk setiap variasi penyangga bejana tekan:



**Gambar 4.97** Grafik nilai frekuensi natural dengan variasi penyangga bejana tekan

Dari gambar 4.99 dapat dilihat grafik nilai frekuensi natural tiap variasi bentuk penyangga. Pada gambar di atas dapat diketahui bahwa frekuensi natural minimum terjadi pada *mode shape* 1 dan di antara semua konfigurasi penyangga nilai terkecil terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki ISMB 100 yakni sebesar 3,812 Hz. Sedangkan frekuensi natural maksimum terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki dengan *cross bracing* yakni sebesar 11,732 Hz. Pada *mode shape* 2 frekuensi natural minimum terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki dengan *sway bracing* yakni sebesar 5,054 Hz. Sedangkan frekuensi natural maksimum terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki dengan *bracing* yakni sebesar 11,736 Hz. Pada *mode shape* 3 frekuensi natural minimum terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki ISMB 100 yakni sebesar 5,393 Hz. Sedangkan frekuensi natural maksimum terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki dengan *cross bracing* yakni sebesar 17,675 Hz. Pada *mode shape* 4 frekuensi natural minimum terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki ISMB 100 yakni sebesar 30,304 Hz. Sedangkan frekuensi natural maksimum terjadi pada konfigurasi penyangga 4 kaki L 90x90x10 yakni sebesar 40,868 Hz.

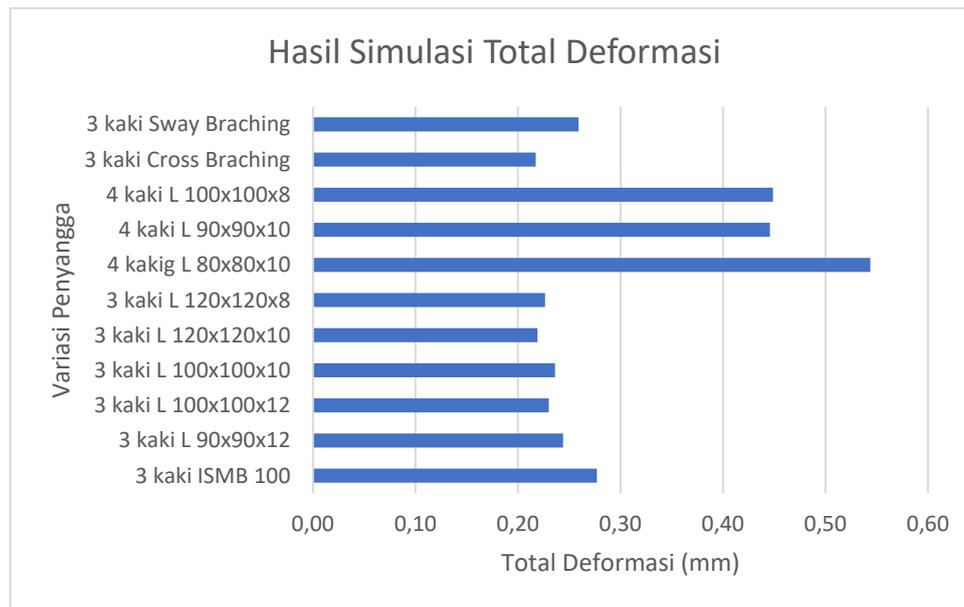
Berdasarkan hasil frekuensi natural yang diperoleh, terdapat beberapa konfigurasi penyangga yang mendekati frekuensi gempa. Sehingga dikhawatirkan akan terjadi resonansi sangat besar. Di antaranya adalah penyangga dengan konfigurasi 3 kaki ISMB 100, 3 kaki L 100x100x12, 3 kaki L 100x100x10, 3 kaki L 120x120x10, 3 kaki L 120x120x8 dan 4 kaki L 80x80x10. Oleh karena itu untuk konfigurasi penyangga tersebut disarankan untuk tidak digunakan agar tidak terjadi kegagalan pada saat beroperasi.

Selain dari 2 konfigurasi penyangga yang telah disebutkan. Tidak memiliki frekuensi

natural yang mendekati ataupun sama dengan frekuensi gempa, sehingga konfigurasi lainnya dapat digunakan untuk penyangga bejana tekan. Besar nilai frekuensi natural dipengaruhi oleh kekauan dari setiap bentuk penyangga. Terlihat pada gambar, hubungan antara konfigurasi penyangga terhadap nilai frekuensi naturalnya. Semakin kompleks konfigurasi penyangga yang digunakan akan memiliki nilai frekuensi natural yang besar juga. pada konfigurasi 3 kaki *cross bracing*, memiliki nilai frekuensi natural yang tinggi disebabkan oleh adanya struktur tambahan yang menghubungkan antar kaki penyangga.

#### 4.2.6 Perbandingan total deformasi pada setiap penyangga akibat beban Angin

Berikut adalah hasil deformasi untuk setiap variasi penyangga bejana tekan:

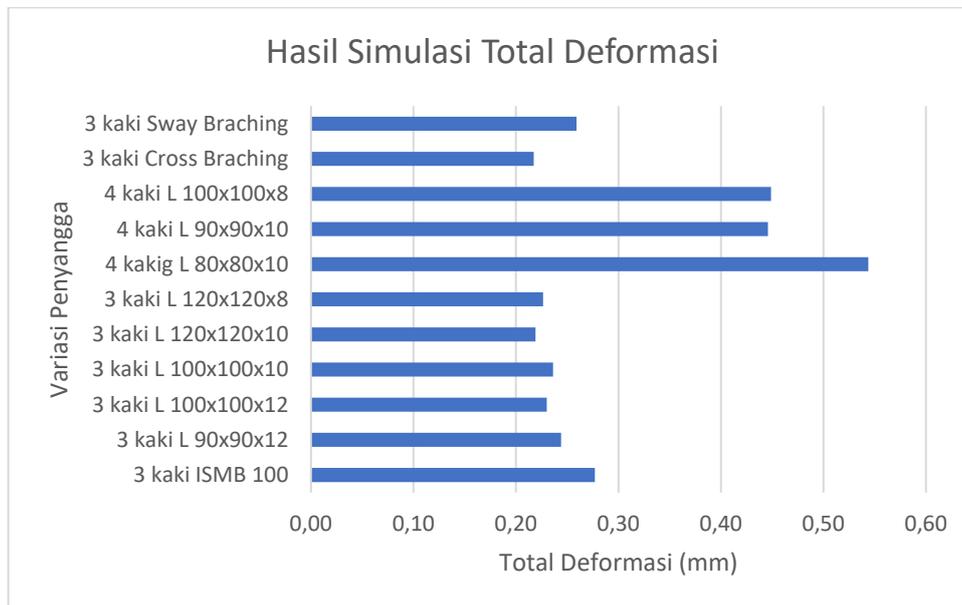


**Gambar 4.98** Nilai hasil deformasi dengan variasi penyangga bejana tekan akibat beban angin

Dari gambar 4.94 dapat dilihat nilai hasil simulasi untuk total deformasi yang terjadi pada bejana tekan dengan tiap variasi bentuk penyangga. Diketahui dari gambar bahwa nilai minimum untuk total deformasi bejana tekan terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki dengan *cross bracing* dengan nilai total deformasinya sebesar 0,217 mm, dan untuk total deformasi maksimum bejana tekan terjadi pada konfigurasi penyangga 4 kaki L 80x80x10 dengan nilai total deformasinya sebesar 0,544 mm. Nilai total deformasi dari penyangga bejana tekan dipengaruhi dari berat bejana tekan dan kekauan dari penyangga bejana tekan. hubungan antara berat bejana tekan dengan deformasi adalah berbanding lurus. Semakin kecil kekauan penyangga bejana tekan maka akan semakin kecil nilai deformasi. tetapi semakin besar kekauan penyangga bejana tekan maka akan semakin besar nilai deformasi. dalam kondisi penelitian ini, kekauan yang dimiliki pada konfigurasi penyangga bejana tekan 3 kaki dengan *cross bracing* memiliki nilai kekauan yang paling optimal dibandingkan dengan yang lain, sehingga nilai total deformasi yang terjadi pada kombinasi ini minimum.

#### 4.2.7 Perbandingan nilai *safety factor* pada setiap penyangga

Berikut adalah nilai *safety factor* untuk setiap variasi penyangga bejana tekan :



**Gambar 4.99** Nilai *safety factor* pada setiap variasi penyangga

Dari gambar 4.95 dapat dilihat nilai *safety factor* tiap variasi bentuk penyangga. Nilai minimum terjadi pada konfigurasi penyangga 4 kaki L 90x90x10 yakni sebesar 1,3. Sedangkan nilai maksimum terjadi pada konfigurasi penyangga 3 kaki dengan *cross braching* yakni sebesar 8. Nilai *safety factor* ini dipengaruhi oleh tegangan yang terjadi pada saat beroperasi, dimana memiliki hubungan berbanding terbalik. Semakin besar tegangan yang terjadi maka semakin kecil nilai *safety factor*. Melihat rekomendasi yang diberikan oleh ASME bahwasanya *safety factor* yang baik pada bejana tekan yakni sebesar 4 (Moss & Basic, 2013). Mengacu pada rekomendasi tersebut maka konfigurasi penyangga bejana tekan yang memenuhi kriteria yakni 3 kaki L 120x120x10 dan 3 kaki dengan *braching*.

#### 4.2.8 Analisa *Buckling* pada setiap penyangga

Berikut adalah nilai *safety & buckling stress* untuk setiap variasi penyangga bejana tekan :



**Gambar 4.100** Nilai *safety* pada setiap variasi penyangga



**Gambar 4.101** Nilai *buckling stress* pada setiap variasi penyangga

Dari gambar 4.102 & 4.103 dapat dilihat nilai *safety* dan nilai *buckling stress* tiap variasi bentuk penyangga. *Buckling Stress* yang terjadi pada setiap konfigurasi penyangga diatas 240 Mpa, dimana lebih dari tegangan *yield strength* material penyangga yang digunakan. Sehingga ketidakstabilan dalam penyangga dapat dihindari dan penyangga bejana tekan tersebut dapat dikatakan aman. Hal ini dipengaruhi oleh besar luas area yang dimiliki oleh setiap penyangga dimana berbanding lurus dengan *buckling stress* yang terjadi.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang didapat untuk penelitian ini, yaitu:

1. Hasil simulasi yang dilakukan memberikan informasi bahwa dengan volume yang sama pada setiap konfigurasi penyangga memiliki nilai *safety factor* yang berbeda. Pada penyangga 3 kaki ISMB 100 memiliki nilai sebesar 2,3. Kemudian 3 kaki L 90x90x12 memiliki nilai sebesar 1,6. Pada penyangga 3 kaki L 100x100x12 memiliki nilai sebesar 2,4. Kemudian 3 kaki L100x100x10 memiliki nilai sebesar 2,8. Pada penyangga 3 kaki L 120x120x10 memiliki nilai sebesar 4,1. Kemudian 3 kaki L 120x120x8 memiliki nilai sebesar 2,0. Pada penyangga 4 kaki L 80x80x10 memiliki nilai sebesar 2,2. Kemudian 4 kaki L 90x90x10 memiliki nilai sebesar 1,3. Pada penyangga 4 kaki L 100x100x8 memiliki nilai sebesar 1,6. Kemudian 3 kaki dengan *cross braching* memiliki nilai sebesar 8,0. Kemudian 3 kaki dengan *sway braching* memiliki nilai sebesar 1,6.
2. Hasil simulasi menginformasikan bahwa dengan volume yang sama pada semua konfigurasi penyangga bejana tekan yang dikenai beban angin dan beban gempa memiliki nilai deformasi yang tidak melebihi batas deformasi maksimum yang diizinkan oleh ASME. Hal ini dipengaruhi oleh bentuk geometri dari setiap penyangga yang berbeda-beda. Semakin besar bentuk geometri yang dimiliki maka semakin kuat. Namun juga perlu melihat konfigurasi jumlah dan model yang sesuai.
3. Dengan pembebanan dan volume penyangga bejana tekan yang sama. Didapati bahwa konfigurasi penyangga 3 kaki dengan *cross braching* memiliki nilai *safety factor* yang paling tinggi sebesar 8,0 dan telah memenuhi rekomendasi dari ASME. Hal ini dikarenakan konfigurasi *cross braching* yang menghubungkan setiap penyangga mampu meningkatkan inersia penyangga bejana tekan dan dapat menahan penyangga utama untuk tidak terdeformasi.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat dilakukan atau diberikan untuk penelitian selanjutnya, adalah:

1. Melakukan simulasi dengan konfigurasi *braching* yang baru.
2. Melakukan analisa untuk mencari ketebalan optimal yang dapat digunakan untuk menopang bejana tekan.
3. Melakukan eksperimen untuk membandingkan hasil eksperimen dengan hasil analisa dengan metode elemen hingga

## DAFTAR PUSTAKA

- AISC. (2017). *Steel Construction Manual 15th Edition* (15th ed.).
- ASME. (2019). *ASME Boilers and Pressure Vessel Code: Vol. VIII Div.1*. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). Sni 1727-2013. In *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Badan Standardisasi Nasional. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. In *Sni 1726:2019*. Badan Standardisasi Nasional.
- Cahyono, E. (2004). *Perancangan bejana tekan vertikal berisi udara untuk peralatan pneumatik kapasitas 8,25 m<sup>3</sup> Dengan tekanan kerja 5,7 kg/cm<sup>2</sup>*.
- Chavan, S. S., Kalaskar, S. H., & Patil, P. B. (2013). *Effect of Wind Load on Pressure Vessel Design by Using Non- Linear Finite Element Analysis (FEA)*. 2(12), 2566–2571.
- Chen, X., & Liu, Y. (2014). Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench. In *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b17284>
- Comsol. (2019). *Response Spectrum Analysis Definition*. Comsol.Com. <https://www.comsol.com/multiphysics/response-spectrum-analysis>
- Drieant. (2014). *Indonesian Piping Knowledge*. <http://www.idpipe.com/2014/08/pembagian-vessel-berdasarkan-prosesnya.html>
- Engineering, B. O. F. (2008). “ *Dynamic Analysis of a Two Wheeler*. June, 1–71.
- Engineering, Q. (2022). *y+ wall distance calculator*. Quadco Engineering. <https://www.quadco.engineering/en/know-how/cfd-calculate-wall-distance.htm>
- Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. In *McGraw-Hill* (1 st, Vol. 0, Issue 0). Elizabeth A. Jones.
- Kazem, H., & Minavand, M. (2008). Seismic Evaluation and Strengthening of Vertical and Horizontal Pressure Vessels. *The 14 World Conference on Earthquake Engineering*.
- Logan, D. L. (2007). A first course in the finite element method. In E. Veitch (Ed.), *Finite Elements in Analysis and Design* (4th ed., Vol. 3, Issue 2). Thomson Learning. [https://doi.org/10.1016/0168-874x\(87\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0168-874x(87)90008-4)
- Megyesy, E. F. (2008). *PRESSURE VESSEL HANDBOOK Fourteenth Edition* (Fourteenth). PV Publishing, Inc.
- Moss, D. R., & Basic, M. (2013). *Pressure Vessel Design Manual* (Fourth Edition). In *Pressure Vessel Design Manual* (Fourth Edi). Elsevier Inc.
- Prapti, C., & Abdillah, A. (2015). *Wind and Earthquake Loads On The Analysis of a Vertical Pressure Vessel For Oil Separator*.
- Purwantana, B. (2012). TARIKAN DAN TEKANAN. In *Kekuatan Bahan*. Universitas Gadjah Mada. <http://bambangpurwantana.staff.ugm.ac.id/KekuatanBahan/BAB1.doc>
- Rao, S. S. (2011). *Mechanical Vibrations*. In M. J. Horton, T. Quinn, C. McDonald, & S. Disanno (Eds.), *Prentice Hall* (5th ed.). Prentice Hall, 1 Lake Street, Upper Saddle River, NJ 07458.
- Santoso, T., & Soewefy, I. (2018). *DESAIN TANGKI DAN TINJAUAN KEKUATANNYA PADA KAPAL PENGANGKUT COMPRESSED NATURAL GAS (CNG)*.
- Shigley. (2015). *Mechanical Engineering Design* (8th ed.). McGraw–Hill Primis.
- Siemens. (2020). *What is Modal Analysis? | Siemens Software*. Siemens. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/modal-analysis/13172>

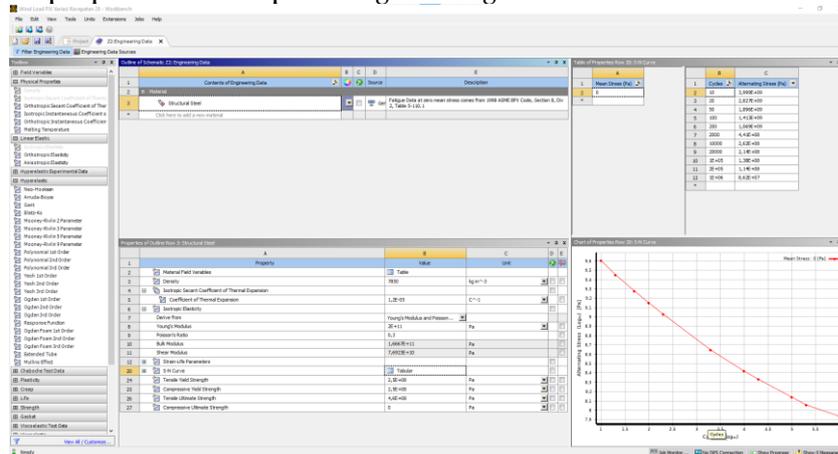
- Steel, T. (2021). *H-Beam vs I-Beam*. Tampa Steel. <https://tampasteel.com/difference-between-h-beam-i-beam/>
- Stewart, M. I. (2014). Glycol Maintenance, Care, and Troubleshooting. In *Surface Production Operations* (pp. 375–431). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-382207-9.00008-1>
- Stewart, M., & Lewis, O. T. (2013). History and Organization of Codes. *Pressure Vessels Field Manual*, 1–48. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397015-2.00001-9>
- Strommer, J. (2019). *Buckling of Columns (Euler and Tetmajer) – The four Euler Buckling Modes*. [www.Johannes-Strommer.Com](http://www.Johannes-Strommer.Com). <https://www.johannes-strommer.com/en/calculators/buckling-of-columns/>
- Takashi, N. (1994). ALE finite element computations of fluid-structure interaction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 112(1–4), 291–308. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(94\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0045-7825(94)90031-0)
- Tang, Y., Yu, Y., Shi, J., & Zhang, S. (2017). Modal and harmonic response analysis of key components of robotic arm based on ANSYS. *Vibroengineering Procedia*, 12, 109–114. <https://doi.org/10.21595/vp.2017.18703>
- Wiratama, C. (2020). *ANALISIS BUCKLING*. Aeroengineering.Co.Id. <https://www.aeroengineering.co.id/2021/01/analisis-buckling/>
- Wiratama, C. (2021). *PERBEDAAN MODEL TURBULEN K-EPSILON, K-OMEGA, DAN K-OMEGA SST*. Aeroengineering.Co.Id. <https://www.aeroengineering.co.id/2021/05/perbedaan-model-turbulen-k-epsilon-k-omega-dan-k-omega-sst/>
- Xia, B., & Sun, D. W. (2002). *Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the Food Industry. A Review*.
- Zubaidi, A. B. (2012). *Analisis Perancangan Bejana Tekan (Shell thickness , Nozzle neck) pada Shell and Tube Heat Exchanger Tipe BEM*.

# LAMPIRAN

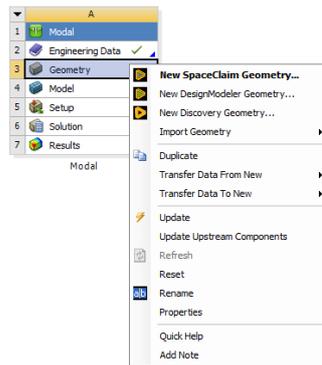
## Simulasi Beban Gempa

Berikut merupakan Langkah-langkah yang digunakan dalam simulasi:

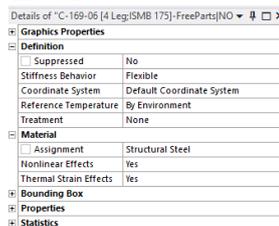
1. Menentukan properti material pada *Engineering Data*



2. Melakukan *import geometri*



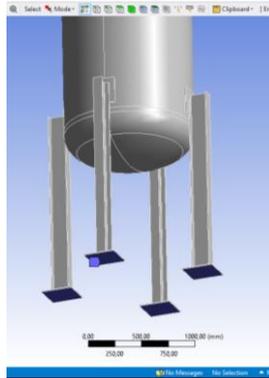
3. *Assign Material* pada setiap geometri



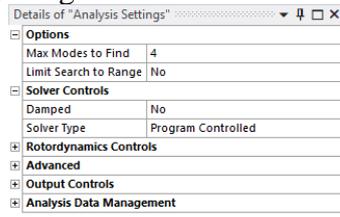
4. Proses *Meshing* dilakukan menyesuaikan ukuran geometri



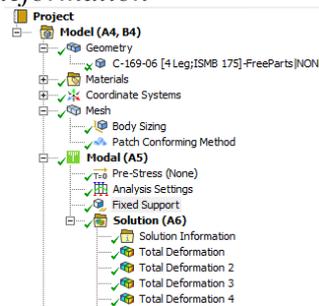
5. Assign fixed support pada bejana tekan



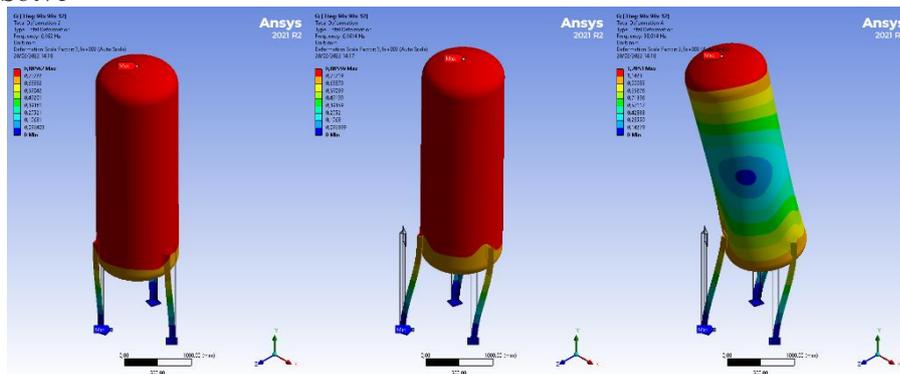
6. Setup analysis simulasi yang diinginkan



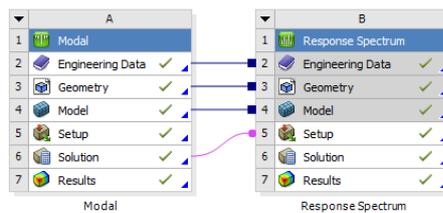
7. Set solution type, yakni total deformation



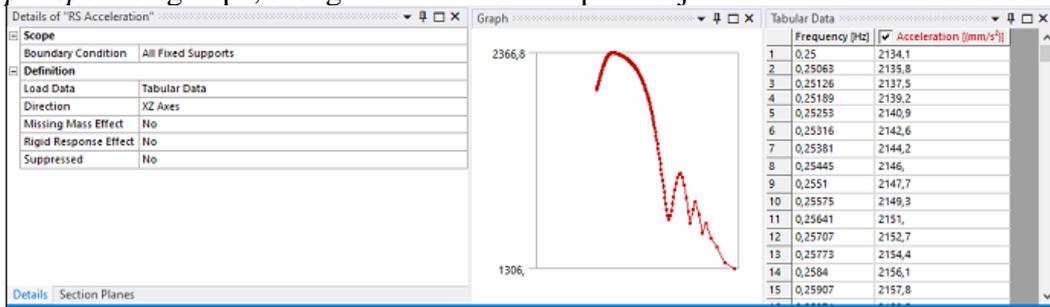
8. Proses Solve



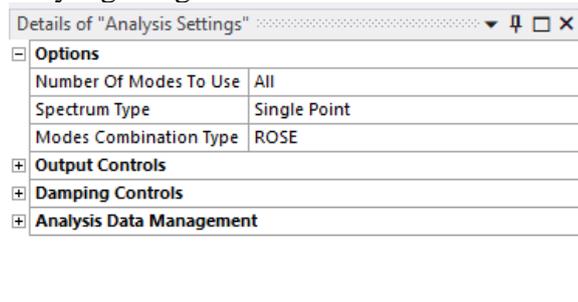
9. Import to response spectrum



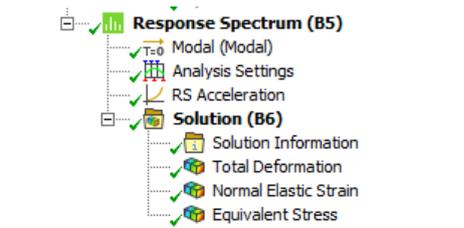
10. *Input spectral* gempa, sebagai beban masukan pada bejana tekan



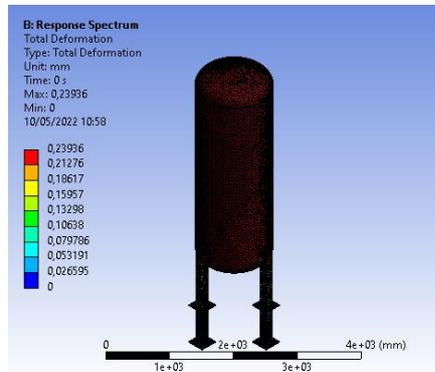
11. *Setup analysis* simulasi yang diinginkan



12. *Set solution type*



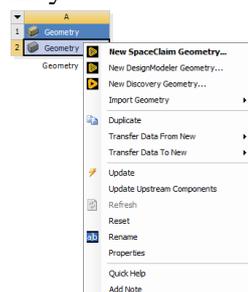
13. *Proses solve*



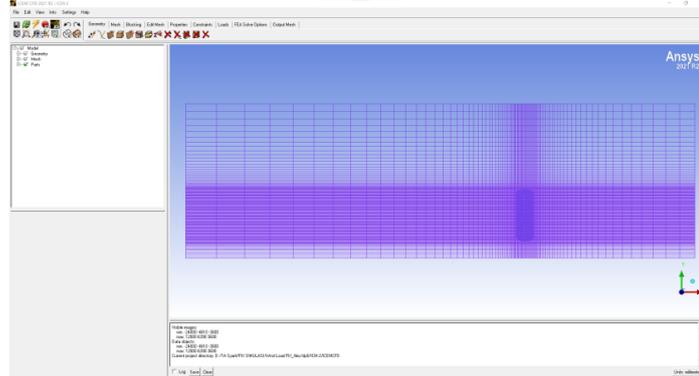
## Simulasi Beban Angin

Berikut merupakan Langkah-langkah yang digunakan dalam simulasi:

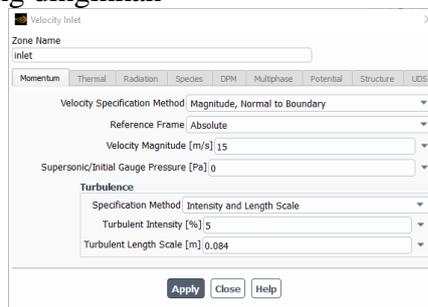
1. *Import Geometri* bejana tekan ke Ansys



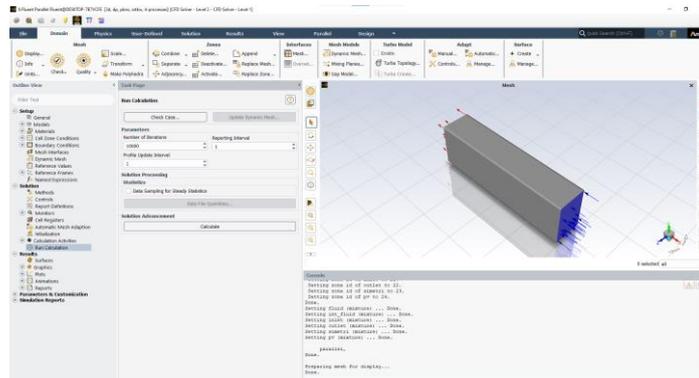
## 2. Meshing di ICEM CFD



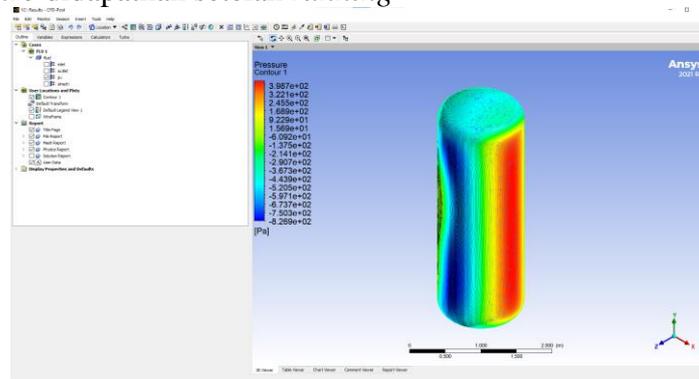
## 3. Setup analysis simulasi yang diinginkan



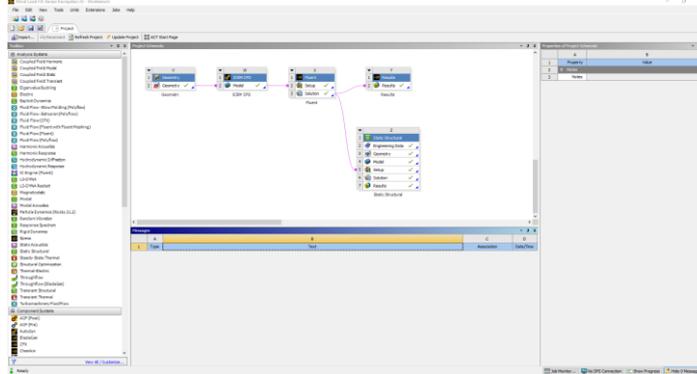
## 4. Proses solve



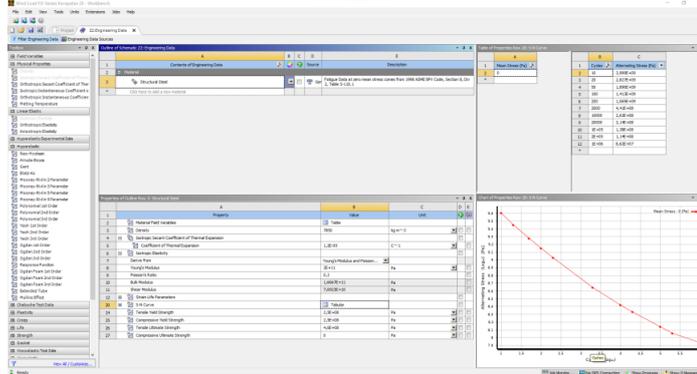
## 5. Distribusi pressure didapatkan setelah running



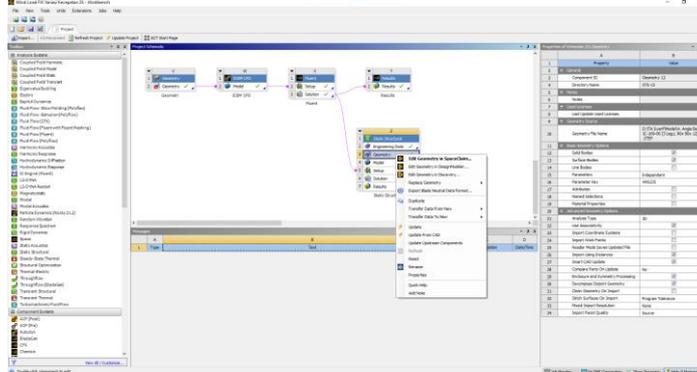
## 6. Impor to static structural



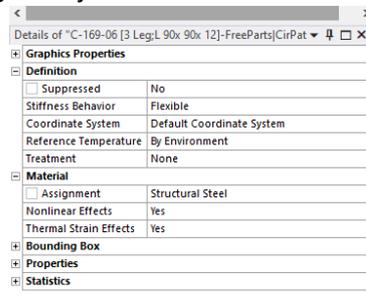
## 7. Masukkan Engineering data sesuai material bejana tekan



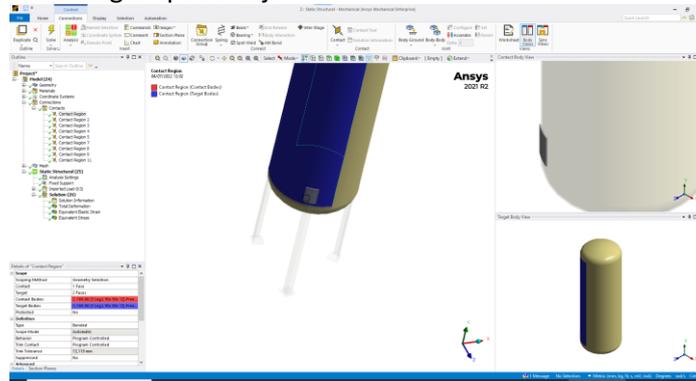
## 8. Import geometri bejana tekan ke Ansys



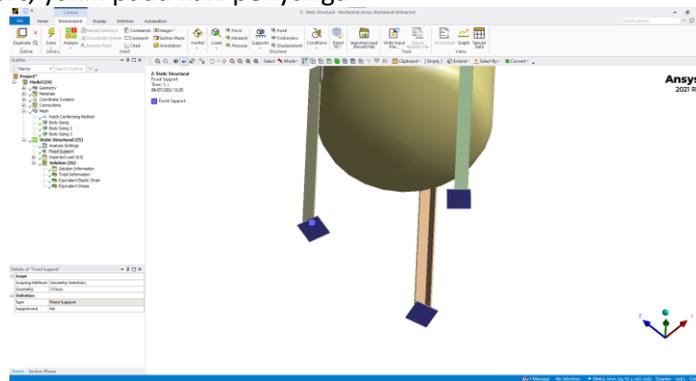
## 9. Assign material pada setiap bagian bejana tekan



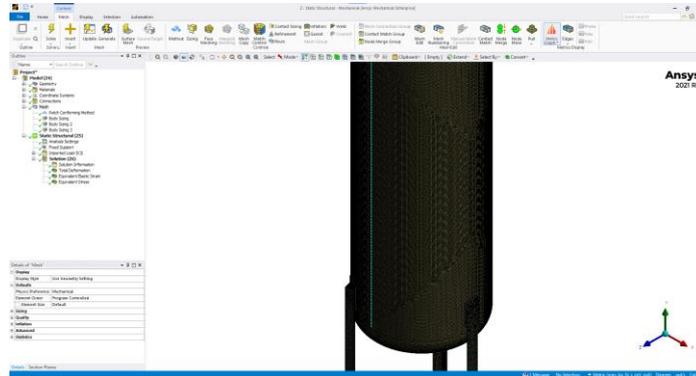
10. Assign connection antar bagian pada bejana tekan



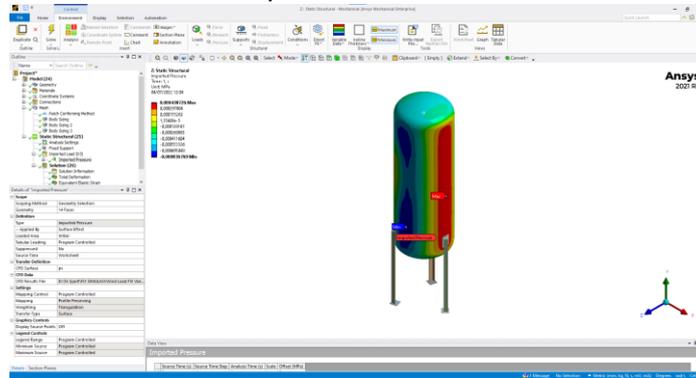
11. Assign fixed support, yakni pada kaki penyangga



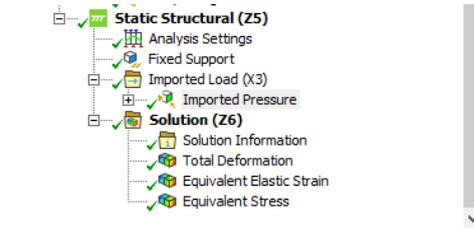
12. Meshing



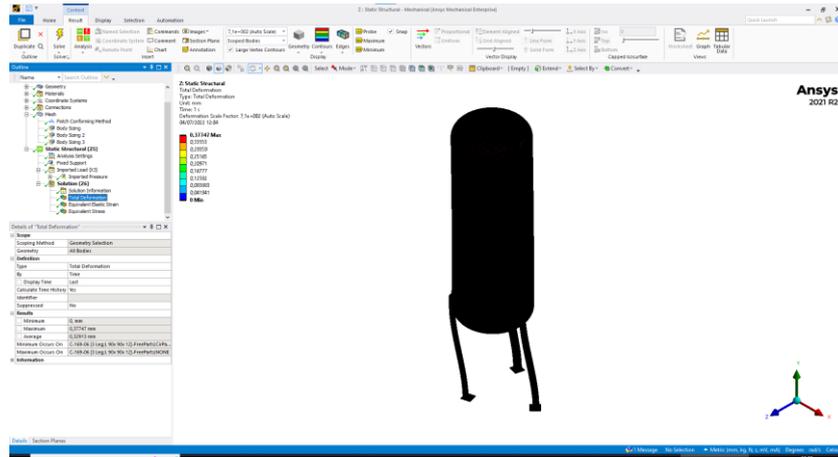
13. Import pressure dari simulasi sebelumnya untuk memecahkan beban masukan pada simulasi

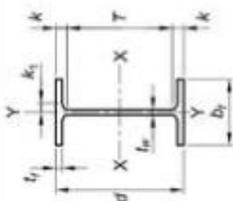


#### 14. Set up solution type



#### 15. Proceed solve





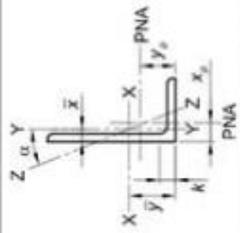
**Table 1-1**  
**W-Shapes**  
**Dimensions**

**Table 1-1 (continued)**  
**W-Shapes**  
**Properties**

W44-W40

Shape	Area, A in. <sup>2</sup>	Depth, d in.	Web		Flange		Distance				Compact Section Criteria		Axis X-X						Axis Y-Y						Torsional Properties	
			Thickness, tw in.	tw/2 in.	Width, bf in.	Thickness, tf in.	k in.	k1 in.	k2 in.	k3 in.	k4 in.	k5 in.	bf/2t in.	h/2t in.	l in. <sup>4</sup>	S in. <sup>3</sup>	r in.	Z in. <sup>3</sup>	I in. <sup>4</sup>	S in. <sup>3</sup>	r in.	Z in. <sup>3</sup>	fb in.	fb in.	J in. <sup>4</sup>	Cw in. <sup>6</sup>
W44x335 <sup>c</sup>	98.5	44.0	1.03	1/2	15.9	1.77	3	3/4	38	5 1/2	335	4.50	38.0	31100	1410	17.8	1620	1200	150	3.49	236	4.24	42.2	74.7	535000	
x290 <sup>c</sup>	85.4	43.6	0.865	7/16	15.8	1.58	2.36	2 3/16	1 5/8	290	5.02	45.0	27000	1240	17.8	1410	1040	132	3.49	205	4.20	42.0	50.9	461000		
x262 <sup>c</sup>	77.2	43.3	0.785	13/16	15.8	1.42	2.20	2 5/8	1 5/8	262	5.57	49.6	24100	1110	17.7	1270	923	117	3.47	182	4.17	41.9	37.3	405000		
x230 <sup>c-v</sup>	67.8	42.9	0.710	1 1/16	15.8	1.22	2.01	2 7/8	1 9/16	230	6.45	54.8	20800	971	17.5	1100	796	101	3.43	157	4.13	41.7	24.9	346000		
W40x65 <sup>h</sup>	193	43.6	1.97	1	16.9	1.67	3.54	3 9/16	2 3/16	34	6.55	2.39	17.3	56500	17.1	3080	2870	340	3.86	542	4.71	40.1	589	1150000		
x593 <sup>h</sup>	174	43.0	1.79	1 3/16	16.7	1.63	3.23	3 3/4	2 1/8	34	5.93	2.58	19.1	50400	17.0	2760	2520	302	3.80	481	4.63	39.8	445	997000		
x503 <sup>h</sup>	148	42.1	1.54	1 9/16	16.4	1.63	2.76	2 3/4	2	34	5.03	2.98	22.3	41600	16.8	2320	2040	249	3.72	394	4.50	39.3	277	789000		
x431 <sup>h</sup>	127	41.3	1.34	1 5/16	16.2	1.63	2.36	2 3/8	1 7/8	34	4.31	3.44	25.5	34800	16.6	1960	1690	208	3.65	328	4.41	38.9	177	638000		
x397 <sup>h</sup>	117	41.0	1.22	1 1/4	16.1	1.67	2.20	2 3/16	1 13/16	34	3.97	3.66	28.0	32000	16.6	1800	1540	191	3.64	300	4.38	38.8	142	579000		
x372 <sup>h</sup>	110	40.6	1.16	1 3/16	16.1	1.67	2.05	2 1/16	1 13/16	34	3.72	3.93	29.5	29600	16.5	1680	1420	177	3.60	277	4.33	38.5	116	528000		
x362 <sup>h</sup>	106	40.6	1.12	1 1/8	16.0	1.67	2.01	2	1 3/4	34	3.62	3.99	30.5	28900	16.5	1640	1380	173	3.60	270	4.33	38.5	109	513000		
x324 <sup>h</sup>	95.3	40.2	1.00	1	15.9	1.57	1.81	1 13/16	1 11/16	34	3.24	4.40	34.2	25600	16.4	1460	1220	153	3.58	239	4.27	38.4	79.4	448000		
x297 <sup>c</sup>	87.3	39.8	0.930	15/16	15.8	1.57	1.65	1 3/8	1 11/16	34	2.97	4.80	36.8	23200	16.3	1330	1090	138	3.54	215	4.22	38.2	61.2	399000		
x277 <sup>c</sup>	81.5	39.7	0.830	13/16	15.8	1.57	1.58	1 3/8	1 5/8	34	2.77	5.03	41.2	21900	16.4	1250	1040	132	3.58	204	4.25	38.1	51.5	379000		
x249 <sup>c</sup>	73.5	39.4	0.750	3/4	15.8	1.57	1.42	1 1/8	1 5/8	34	2.49	5.55	45.6	19600	16.3	1120	926	118	3.55	182	4.21	38.0	38.1	334000		
x215 <sup>c</sup>	63.5	39.0	0.650	5/8	15.8	1.57	1.22	1 1/4	1 3/8	34	2.15	6.45	52.6	16700	16.2	964	803	101	3.54	156	4.19	37.8	24.8	284000		
x199 <sup>c</sup>	58.8	38.7	0.650	5/8	15.8	1.57	1.07	1 1/8	1 3/8	34	1.99	7.39	52.6	14900	16.0	869	695	88.2	3.45	137	4.12	37.5	18.3	246000		
W40x392 <sup>h</sup>	116	41.6	1.42	1 1/16	12.4	1.23	2.52	2 1/2	1 15/16	34	3.92	2.45	24.1	29900	16.1	1710	1440	130	2.64	212	3.30	39.1	172	306000		
x331 <sup>h</sup>	97.7	40.8	1.22	1 1/4	12.2	1.23	2.13	2 1/8	1 13/16	34	3.31	2.86	28.0	24700	15.9	1430	1210	106	2.57	172	3.21	38.7	105	241000		
x327 <sup>h</sup>	95.9	40.8	1.18	1 3/16	12.1	1.23	2.13	2 1/8	1 13/16	34	3.27	2.85	29.0	24500	16.0	1410	1200	105	2.58	170	3.21	38.7	103	239000		
x294	86.2	40.4	1.06	1 1/16	12.0	1.23	1.93	1 13/16	1 3/4	34	2.94	3.11	32.2	21900	15.9	1270	1080	93.5	2.55	150	3.16	38.5	76.6	208000		
x278	82.3	40.2	1.03	1	12.0	1.23	1.81	1 13/16	1 3/4	34	2.78	3.31	33.3	20500	15.8	1190	1020	87.1	2.52	140	3.13	38.4	65.0	192000		
x264	77.4	40.0	0.960	15/16	11.9	1.17	1.73	1 3/4	1 11/16	34	2.64	3.45	35.6	19400	15.8	1130	971	82.6	2.52	132	3.12	38.3	56.1	181000		
x235 <sup>c</sup>	69.1	39.7	0.830	13/16	11.9	1.17	1.58	1 3/8	1 5/8	34	2.35	3.77	41.2	17400	15.9	1010	875	74.6	2.54	118	3.11	38.1	41.3	161000		
x211 <sup>c</sup>	62.1	39.4	0.750	3/4	11.8	1.13	1.42	1 1/8	1 5/8	34	2.11	4.17	45.6	15500	15.8	906	786	66.1	2.51	105	3.07	38.0	30.4	141000		
x183 <sup>c</sup>	53.3	39.0	0.650	5/8	11.8	1.13	1.20	1 1/8	1 5/8	34	1.83	4.92	52.6	13200	15.7	774	675	56.0	2.49	88.3	3.04	37.8	19.3	118000		
x167 <sup>c</sup>	49.3	38.6	0.650	5/8	11.8	1.13	1.03	1	1 5/8	34	1.67	5.76	52.6	11600	15.3	693	600	47.9	2.40	76.0	2.98	37.6	14.0	99700		
x149 <sup>c-v</sup>	43.8	38.2	0.630	5/8	11.8	1.13	0.830	13/16	1 1/2	34	1.49	7.11	54.3	9800	15.0	598	513	38.8	2.29	62.2	2.89	37.4	9.36	80000		

<sup>c</sup> Shape is slender for compression with Fy = 50 ksi.  
<sup>h</sup> Flange thickness greater than 2 in. Special requirements may apply per AISC Specification Section A3.1c.  
<sup>v</sup> Shape does not meet the M/Lw limit for shear in AISC Specification Section 62.1(a) with Fy = 50 ksi.



**Table 1-7 (continued)**  
**Angles**  
**Properties**

**Table 1-7 (continued)**  
**Angles**  
**Properties**

L3-L2

Shape	k	Wt. lb/ft	Area, A	Axis X-X						Flexural-Torsional Properties			Axis Y-Y						Axis Z-Z										
				I	S	r	$\bar{y}$	Z	$y_p$	J	$C_w$	$\bar{r}_e$	I	S	r	$\bar{x}$	Z	$x_p$	I	S	r	Tan $\alpha$							
	in.	in. <sup>2</sup>	in. <sup>2</sup>	in. <sup>4</sup>	in. <sup>3</sup>	in.	in.	in. <sup>3</sup>	in.	in. <sup>4</sup>	in. <sup>6</sup>	in.	in. <sup>4</sup>	in. <sup>3</sup>	in.	in. <sup>3</sup>	in.	in. <sup>4</sup>	in. <sup>3</sup>	in. <sup>3</sup>	in. <sup>4</sup>	in. <sup>3</sup>	in.	in.	in.	in.	in.	in.	
L3x3x1/2 x <sup>2</sup> /16 x <sup>3</sup> /8 x <sup>3</sup> /16	7/8	9.40	2.76	2.20	1.06	0.895	0.929	1.91	0.460	0.230	0.144	1.59	2.20	1.06	0.895	0.929	1.91	0.460	0.922	0.704	0.580	0.922	0.704	0.580	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	13/16	8.30	2.43	1.98	0.946	0.903	0.907	1.70	0.405	0.157	0.100	1.60	1.98	0.946	0.903	0.907	1.70	0.405	0.817	0.638	0.580	0.817	0.638	0.580	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	3/4	7.20	2.11	1.75	0.825	0.910	0.884	1.48	0.352	0.101	0.0652	1.62	1.75	0.825	0.910	0.884	1.48	0.352	0.716	0.573	0.581	0.716	0.573	0.581	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	11/16	6.10	1.78	1.50	0.699	0.918	0.860	1.26	0.297	0.0597	0.0390	1.64	1.50	0.699	0.918	0.860	1.26	0.297	0.606	0.497	0.583	0.606	0.497	0.583	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5/8	4.90	1.44	1.23	0.569	0.926	0.836	1.02	0.240	0.0313	0.0206	1.65	1.23	0.569	0.926	0.836	1.02	0.240	0.490	0.415	0.585	0.490	0.415	0.585	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	9/16	3.71	1.09	0.948	0.433	0.933	0.812	0.774	0.182	0.0136	0.00899	1.67	0.948	0.433	0.933	0.812	0.774	0.182	0.373	0.324	0.586	0.373	0.324	0.586	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
L3x2 1/2 x 1/2 x <sup>2</sup> /16 x <sup>3</sup> /8	7/8	8.50	2.50	2.07	1.03	0.910	0.995	1.86	0.500	0.213	0.112	1.46	2.07	1.03	0.910	0.995	1.86	0.500	0.665	0.588	0.516	0.665	0.588	0.516	0.666	1.00	1.00	1.00	1.00
	13/16	7.60	2.22	1.87	0.921	0.917	0.972	1.66	0.463	0.146	0.0777	1.48	1.87	0.921	0.917	0.972	1.66	0.463	0.594	0.521	0.516	0.594	0.521	0.516	0.671	1.00	1.00	1.00	1.00
	3/4	6.60	1.93	1.65	0.803	0.924	0.949	1.45	0.427	0.0943	0.0507	1.49	1.65	0.803	0.924	0.949	1.45	0.427	0.514	0.463	0.517	0.514	0.463	0.517	0.675	1.00	1.00	1.00	1.00
	11/16	5.60	1.63	1.41	0.681	0.932	0.925	1.23	0.392	0.0560	0.0304	1.51	1.41	0.681	0.932	0.925	1.23	0.392	0.435	0.403	0.518	0.435	0.403	0.518	0.679	1.00	1.00	1.00	1.00
	5/8	4.50	1.32	1.16	0.555	0.940	0.900	1.00	0.360	0.0296	0.0161	1.52	1.16	0.555	0.940	0.900	1.00	0.360	0.355	0.329	0.520	0.355	0.329	0.520	0.683	1.00	1.00	1.00	1.00
	9/16	3.39	1.00	0.899	0.423	0.947	0.874	0.761	0.333	0.0130	0.00705	1.54	0.899	0.423	0.947	0.874	0.761	0.333	0.271	0.246	0.521	0.271	0.246	0.521	0.687	1.00	1.00	1.00	1.00
L3x2x1/2 x <sup>2</sup> /16 x <sup>3</sup> /8	13/16	7.70	2.26	1.92	1.00	0.922	1.08	1.78	0.740	0.192	0.0908	1.39	1.92	1.00	0.922	1.08	1.78	0.740	0.409	0.411	0.425	0.409	0.411	0.425	0.413	1.00	1.00	1.00	1.00
	11/16	5.90	1.75	1.54	0.779	0.937	1.03	1.39	0.667	0.0855	0.0413	1.42	1.54	0.779	0.937	1.03	1.39	0.667	0.319	0.313	0.426	0.319	0.313	0.426	0.426	1.00	1.00	1.00	1.00
	5/8	5.00	1.48	1.32	0.662	0.945	1.01	1.19	0.632	0.0510	0.0248	1.43	1.32	0.662	0.945	1.01	1.19	0.632	0.271	0.263	0.428	0.271	0.263	0.428	0.432	1.00	1.00	1.00	1.00
	9/16	4.10	1.20	1.09	0.541	0.953	0.980	0.969	0.600	0.0270	0.0132	1.45	1.09	0.541	0.953	0.980	0.969	0.600	0.223	0.214	0.431	0.223	0.214	0.431	0.437	1.00	1.00	1.00	1.00
	7/16	3.07	0.917	0.847	0.414	0.961	0.952	0.743	0.555	0.0119	0.00576	1.46	0.917	0.414	0.961	0.952	0.743	0.555	0.173	0.163	0.435	0.173	0.163	0.435	0.442	1.00	1.00	1.00	1.00
	5/8	7.70	2.26	1.92	1.00	0.922	1.08	1.78	0.740	0.192	0.0908	1.39	1.92	1.00	0.922	1.08	1.78	0.740	0.452	0.451	0.481	0.452	0.451	0.481	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
L2 1/2 x 2 1/2 x 1/2 x <sup>2</sup> /16 x <sup>3</sup> /8	5/8	5.90	1.73	0.972	0.558	0.749	0.758	1.01	0.346	0.0833	0.0362	1.33	0.972	0.558	0.749	0.758	1.01	0.346	0.400	0.374	0.481	0.400	0.374	0.481	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	9/16	5.00	1.46	0.837	0.474	0.756	0.735	0.853	0.292	0.0495	0.0218	1.35	0.837	0.474	0.756	0.735	0.853	0.292	0.338	0.325	0.481	0.338	0.325	0.481	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1/2	4.10	1.19	0.692	0.387	0.764	0.711	0.695	0.238	0.0261	0.0116	1.36	0.692	0.387	0.764	0.711	0.695	0.238	0.276	0.273	0.482	0.276	0.273	0.482	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	7/16	3.07	0.901	0.535	0.295	0.771	0.687	0.529	0.180	0.0114	0.00510	1.38	0.535	0.295	0.771	0.687	0.529	0.180	0.209	0.215	0.482	0.209	0.215	0.482	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5/8	5.30	1.55	0.914	0.546	0.766	0.826	0.982	0.433	0.0746	0.0268	1.22	0.914	0.546	0.766	0.826	0.982	0.433	0.273	0.295	0.419	0.273	0.295	0.419	0.612	1.00	1.00	1.00	1.00
	9/16	4.50	1.32	0.790	0.465	0.774	0.803	0.839	0.388	0.0444	0.0162	1.23	0.790	0.465	0.774	0.803	0.839	0.388	0.233	0.261	0.420	0.233	0.261	0.420	0.618	1.00	1.00	1.00	1.00
L2 1/2 x 1 1/2 x 1/4 x <sup>2</sup> /16 x <sup>3</sup> /8	1/2	3.62	1.07	0.656	0.381	0.782	0.779	0.688	0.360	0.0235	0.00688	1.25	0.656	0.381	0.782	0.779	0.688	0.214	0.192	0.213	0.423	0.192	0.213	0.423	0.624	1.00	1.00	1.00	1.00
	7/16	2.75	0.818	0.511	0.293	0.790	0.754	0.529	0.319	0.0103	0.00382	1.26	0.511	0.293	0.790	0.754	0.529	0.164	0.148	0.162	0.426	0.148	0.162	0.426	0.628	1.00	1.00	1.00	1.00
	1/2	3.19	0.947	0.594	0.364	0.792	0.866	0.644	0.606	0.0209	0.00694	1.19	0.594	0.364	0.792	0.866	0.644	0.261	0.0977	0.120	0.321	0.0977	0.120	0.321	0.354	1.00	1.00	1.00	1.00
	7/16	2.44	0.724	0.464	0.280	0.801	0.839	0.497	0.569	0.00921	0.00306	1.20	0.464	0.280	0.801	0.839	0.497	0.198	0.0754	0.0906	0.324	0.0754	0.0906	0.324	0.360	1.00	1.00	1.00	1.00
	5/8	4.70	1.37	0.476	0.348	0.591	0.632	0.629	0.343	0.0658	0.0174	1.05	0.476	0.348	0.591	0.632	0.629	0.343	0.203	0.227	0.386	0.203	0.227	0.386	1.00	1.00	1.00	1.00	
	9/16	3.92	1.16	0.414	0.298	0.598	0.609	0.537	0.290	0.0393	0.0106	1.06	0.414	0.298	0.598	0.609	0.537	0.290	0.172	0.200	0.386	0.172	0.200	0.386	1.00	1.00	1.00	1.00	
L2x2x3/8 x <sup>2</sup> /16 x <sup>3</sup> /8	1/2	3.19	0.944	0.346	0.244	0.605	0.586	0.440	0.236	0.0209	0.00572	1.08	0.346	0.244	0.605	0.586	0.440	0.236	0.142	0.171	0.387	0.142	0.171	0.387	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	7/16	2.44	0.722	0.271	0.188	0.612	0.561	0.338	0.181	0.00921	0.00254	1.09	0.271	0.188	0.612	0.561	0.338	0.109	0.109	0.137	0.389	0.109	0.137	0.389	1.00	1.00	1.00	1.00	
	5/8	1.65	0.491	0.189	0.129	0.620	0.534	0.230	0.123	0.00293	0.000789	1.10	0.189	0.129	0.620	0.534	0.230	0.0756	0.100	0.100	0.391	0.0756	0.100	0.391	1.00	1.00	1.00	1.00	

Note: For workable gages, refer to Table 1-7A. For width-to-thickness criteria, refer to Table 1-7B.

Note: For workable gages, refer to Table 1-7A. For width-to-thickness criteria, refer to Table 1-7B.

## BIODATA PENULIS



Muhammad Syarif Hidayatullah merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Sumenep pada tanggal 5 Agustus 2000 merupakan anak terakhir dari 2 bersaudara dari pasangan Bapak Sahlan dan Ibu Masrida. Penulis menempuh pendidikan formal di MI Tarbiyatul Athfal, MTsN 2 Sumenep, dan MAN Sumenep. Setelah menyelesaikan studi tingkat menengah, penulis melanjutkan studi S1 dan diterima di Program S1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2018.

Selama menuntut ilmu S1, penulis aktif mengikuti kegiatan kemahasiswaan seperti menjadi bagian tim riset UAV Bayucaraka ITS divisi *Fixed Wing*. Selama menjalani perkuliahan, penulis sangat tertarik dengan mekanika-mekanika yang terjadi pada suatu benda padat. Oleh karena itu, penulis memutuskan tugas akhir pada bidang mekanika benda padat. Penulis juga telah mengikuti serangkaian kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) 2021 & 2022.

Untuk Informasi, kritik, saran serta keperluan lain mengenai tugas akhir ini, dapat dihubungi melalui e-mail berikut: [msyarifhidayatullah05@gmail.com](mailto:msyarifhidayatullah05@gmail.com).