



TUGAS AKHIR (WE40050)

ANALISIS LAJU PROSES *COOL-DOWN* TERHADAP RESPON TERMOMEKANIK *INNER TANK* LNG PADA TEKANAN 5 BAR MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

WIRANGGA JAKAL NURDIYANSYAH
NRP. 0722040096

DOSEN PEMBIMBING :
MUHAMAD ARI, S.T., M.T.
ADRISTI NISAZARIFA, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026

halaman ini sengaja dikosongkan

TUGAS AKHIR (WE40050)

**ANALISIS LAJU PROSES COOL-DOWN TERHADAP
RESPON TERMOMEKANIK INNER TANK LNG PADA
TEKANAN 5 BAR MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

**WIRANGGA JAKAL NURDIYANSYAH
NRP. 0722040096**

**DOSEN PEMBIMBING :
MUHAMAD ARI, S.T., M.T.
ADRISTI NISAZARIFA, S.T., M.T.**

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026**

halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS LAJU PROSES COOL-DOWN TERHADAP RESPON
TERMOMEKANIK INNER TANK LNG PADA TEKANAN 5 BAR
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Disusun Oleh:
Wirangga Jakal Nurdyansyah
0722040096

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Pengelasan
Jurusan Teknik Bangunan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA**

**Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 28 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026**

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Muhamad Ari, S.T., M.T.
2. Rocky Andiana, S.ST., M.T.
3. Moh. Miftachul Munir, S.T., M.T.
4. Mudzakkir Dioktyanto, S.T., M.T.

NIDN/NUPTK

(0028087405)

(0028129101)

(0030086807)

(4340774675130263)

Tanda Tangan

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

Dosen Pembimbing

1. Muhamad Ari, S.T., M.T.
2. Adristi Nisazarifa, S.T., M.T.

NIDN/NUPTK

(0028087405)

(2738777678230092)

Tanda Tangan

(.....)

(.....)

**Menyetujui,
Ketua Jurusan**


Ir. Prambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198103242014041001

**Mengetahui,
Koordinator Program Studi**


Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T.
NIP. 199101072019031016

halaman ini sengaja dikosongkan



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021

Date : 3 Nopember 2015

Rev. : 01

Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Wirangga Jakal Nurdiansyah

NRP. : 0722040096

Jurusan/Prodi : Teknik Bangunan Kapal/D4 Teknik Pengelasan

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

**ANALISIS LAJU PROSES *COOL-DOWN* TERHADAP RESPON
TERMOMEKANIK *INNER TANK* LNG PADA TEKANAN 5 BAR
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut,
maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 28 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



(Wirangga Jakal Nurdiansyah)

NRP. 0722040096

halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur atas kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan nikmat serta karunia sehingga dapat terselesaikan tugas akhir yang berjudul **“Analisis Laju Proses *Cool-Down* terhadap Respon Termomekanik *Inner Tank* LNG pada Tekanan 5 Bar Menggunakan Metode Elemen Hingga”** sebagai pemenuhan syarat untuk kelulusan dalam menyelesaikan pendidikan pada program studi D4 Teknik Pengelasan Jurusan Teknik Bangunan Kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Shalawat serta salam tidak lupa selalu tercurahkan kepada junjungan Nabi besar Muhammad SAW, yang telah menuntun ke jalan yang benar serta sebagai contoh teladan bagi umat manusia. Kekurangan dan keterbatasan dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini merupakan gambaran dari ketidaksempurnaan sebagai umat manusia. Tetapi, dengan kerendahan hati maka dipersembahkan karya tulis berupa Tugas Akhir ini sebagai hasil karya dan usaha serta kerja keras yang telah dilakukan dalam menempuh pendidikan.

Beragam tantangan dan rintangan dalam pembuatan Tugas Akhir ini sehingga menyebabkan munculnya sebuah hambatan. Akan tetapi, banyak orang dan pihak yang mendukung, membantu, mengarahkan serta bimbingan sehingga kesulitan atau hambatan dalam pembuatan Tugas Akhir bisa menemukan jalan keluar. Karena hal tersebut, diucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. Selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
2. Bapak Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. Selaku Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal.
3. Bapak Moh. Syaiful Amri, S.ST., M.T. Selaku Ketua Program Studi Teknik Pengelasan.
4. Ibu Adristi Nisazarifa, S.T., M.T. Selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi D4 Teknik Pengelasan. Serta selaku Dosen

Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, membantu, serta memberikan masukan yang sangat bermanfaat dan berguna selama proses pelaksanaan Tugas Akhir.

5. Bapak Muhamad Ari, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, membantu, serta memberikan masukan yang sangat bermanfaat dan berguna selama proses pelaksanaan Tugas Akhir sekaligus sebagai penguji karena telah memberikan kritik dan saran yang sangat membantu dalam penyempurnaan penulisan Tugas Akhir.
6. Kepada saudara penulis, Kakak Alfian Hamsyah, S.ST. Alumni Teknik Pengelasan Angkatan 2014, yang telah memberikan bimbingan, arahan, membantu, serta memberikan masukan yang sangat bermanfaat dan berguna selama proses pelaksanaan Tugas Akhir.
7. Rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Rocky Andiana, S.ST., M.T., Bapak Moh. Miftachul Munir, S.T., M.T., dan Bapak Mudzakkir Dioktyanto, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan arahan serta kritik dan saran dalam menyempurnakan penulisan Tugas Akhir.
8. Kepada para dosen dan staff program studi D4 Teknik Pengelasan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat.
9. Kepada para staff PT. Likuid Nusantara Gas yang telah memberikan kesempatan untuk bergabung dalam penelitian serta memberikan ilmu yang bermanfaat.
10. Kepada kedua orang tua, Bapak Budiono dan Ibu Yayaruka Salim yang selalu mendoakan, memberi semangat, serta dukungan baik secara moral maupun material dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini.
11. Kepada saudara kandung penulis, Kakak Handika Jakal Aryansyah, S.T. yang selalu memberikan dukungan serta sebagai tempat terbaik dalam keluh kesah pada pelaksanaan Tugas Akhir ini.

12. Kepada saudari Nabila Rizqy Agustina, yang selalu memberikan semangat dan dukungan serta sebagai tempat terbaik dalam keluhan kesah pada pelaksanaan Tugas Akhir ini.
13. Kepada seluruh warga D4 Teknik Pengelasan 2022 yang selalu mendukung dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
14. Kepada diri sendiri, terima kasih sudah mau dan mampu berusaha secara maksimal dan sebaik mungkin hingga titik ini yaitu menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, baik bagi perkembangan ilmu pengetahuan, dunia industri, maupun bagi para pembaca, serta dapat menjadi salah satu referensi bagi penelitian selanjutnya.

Akhir kata, apabila terdapat kekurangan maupun kesalahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan keberkahan kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian Tugas Akhir ini.

Surabaya, 28 Juli 2026

Wirangga Jakal N.

halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS LAJU PROSES *COOL-DOWN* TERHADAP RESPON TERMOMEKANIK *INNER TANK* LNG PADA TEKANAN 5 BAR MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Wirangga Jakal Nurdyansyah

ABSTRAK

Proses *cool-down* merupakan tahapan penting dalam pengoperasian tangki *Liquefied Natural Gas* (LNG) untuk menurunkan temperatur dinding tangki secara bertahap sebelum proses pengisian dilakukan. Durasi *cool-down* yang terlalu singkat dapat meningkatkan gradien temperatur sehingga memengaruhi respons termomekanik struktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi durasi *cool-down* terhadap distribusi temperatur, tegangan, deformasi, dan faktor keamanan (*safety factor*) *inner tank* LNG pada tekanan operasi 5 bar menggunakan metode elemen hingga. Pemodelan geometri dilakukan menggunakan Autodesk Fusion, sedangkan simulasi dilakukan pada ANSYS *Workbench* melalui analisis *transient thermal* dan *static structural*. Material yang digunakan adalah SA-240 Type 304 dengan variasi durasi *cool-down* selama 120, 90, dan 60 menit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi *cool-down* 120 menit menghasilkan respons termomekanik terbaik dengan tegangan maksimum sebesar 408,77 MPa, deformasi 0,119 mm, dan *safety factor* 0,743. Sebaliknya, variasi 60 menit menghasilkan tegangan maksimum tertinggi sebesar 783,13 MPa, deformasi 0,212 mm, dan *safety factor* 0,344. Konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada daerah sambungan *head-shell* untuk variasi 120 dan 90 menit, sedangkan pada variasi 60 menit berada pada bagian *shell*. Secara umum, peningkatan durasi *cool-down* menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata sehingga mampu menurunkan tegangan dan deformasi termal. Namun, seluruh variasi yang dianalisis masih belum memenuhi batas tegangan izin (*allowable stress*) material.

Kata kunci: *cool-down*, LNG, metode elemen hingga, respons termomekanik, tegangan termal.

halaman ini sengaja dikosongkan

ANALYSIS OF COOL-DOWN PROCESS RATE TOWARD THE THERMOMECHANICAL RESPONSE OF INNER LNG TANK AT 5 BAR PRESSURE USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Wirangga Jakal Nurdyansyah

ABSTRACT

The cool-down process is a critical stage in the operation of Liquefied Natural Gas (LNG) storage tanks, aiming to gradually reduce the tank wall temperature before LNG filling. An excessively short cool-down duration may increase the temperature gradient, thereby affecting the thermomechanical response of the tank structure. This study aims to investigate the effect of cool-down duration on temperature distribution, stress, deformation, and safety factor of an LNG inner tank operating at an internal pressure of 5 bar using the Finite Element Method (FEM). The geometry model was developed using Autodesk Fusion, while numerical simulations were performed in ANSYS Workbench through Transient Thermal and Static Structural analyses. The tank material was SA-240 Type 304 stainless steel with cool-down durations of 120, 90, and 60 minutes. The simulation results indicate that the 120-minute cool-down provides the best thermomechanical performance, producing a maximum stress of 408.77 MPa, a deformation of 0.119 mm, and a safety factor of 0.743. In contrast, the 60-minute cool-down produces the highest maximum stress of 783.13 MPa, a deformation of 0.212 mm, and a safety factor of 0.344. The highest stress concentration occurs at the head-shell junction for the 120- and 90-minute cases, whereas it is located on the shell for the 60-minute case. Overall, a longer cool-down duration promotes a more uniform temperature distribution, resulting in lower thermal stress and deformation. However, all simulated conditions remain above the allowable stress limit of the material.

Keywords: *cool-down, finite element method, LNG, thermomechanical response, thermal stress.*

halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
ABSTRAK	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 <i>Pressure Vessel</i>	7
2.1.1 <i>Head</i>	10
2.1.2 <i>Shell</i>	12
2.1.3 <i>Support</i>	13
2.1.4 <i>Nozzle</i>	16
2.1.5 Perhitungan <i>pressure vessel</i>	16
2.2 <i>Cryogenic Tank</i>	17
2.3 <i>Liquefied Natural Gas (LNG)</i>	18
2.4 Proses <i>Cool-down</i> pada Tangki LNG.....	18
2.4.1 Istilah <i>cool-down</i> dan <i>pre-cooling</i> pada tangki LNG.....	19
2.5 <i>Thermal Shock</i> pada Tangki LNG dan Tangki Kriogenik.....	20
2.6 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII	21

2.6.1 ASME BPVC <i>section VIII division 1</i>	22
2.6.2 ASME BPVC <i>section VIII division 2</i>	22
2.6.3 ASME BPVC <i>section VIII division 3</i>	22
2.7 Material <i>Austenitic Stainless Steel</i>	23
2.7.1 Material SA 240 304	23
2.8 Faktor Keamanan (<i>Safety Factor</i>)	24
2.9 Distribusi Temperatur pada <i>Inner Tank</i> LNG	25
2.10 Tegangan Termal dan Tegangan Sisa	25
2.11 Distribusi Deformasi Struktur	26
2.12 Metode Elemen Hingga	27
2.12.1 Analisis <i>transient thermal</i>	27
2.12.2 Analisis <i>static structural</i>	28
2.12.3 Keterkaitan analisis termal dan struktural	29
2.13 Analisis Data	29
2.14 Penelitian Terdahulu	30
2.14.1 <i>Research gap</i>	31
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2 Studi Literatur	34
3.3 Perumusan Masalah	34
3.4 Pengumpulan Data	34
3.5 Penetapan Variasi Durasi Waktu dan Laju <i>Cool-down</i>	35
3.6 Penentuan Ketebalan Plat	36
3.7 Pemodelan Geometri Menggunakan Autodesk Fusion 360	36
3.8 <i>Input Geometry</i> pada ANSYS <i>Workbench</i>	37
3.8.1 <i>Pre-processing</i> di ANSYS <i>Workbench</i>	37
3.8.2 <i>Transient thermal analysis</i>	37
3.8.3 Analisis <i>static structural</i>	37
3.8.4 Evaluasi faktor keamanan pada simulasi FEM	37
3.9 Analisis Data	38
3.10 Pembahasan dan Kesimpulan serta Data Pembeding	39

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Perhitungan Ketebalan	41
4.2 Pemodelan Geometri Tangki LNG.....	42
4.3 Konvergensi <i>Mesh</i>	43
4.4 Proses Simulasi	44
4.5 Hasil Analisis Model.....	46
4.5.1 Distribusi temperatur.....	46
4.5.2 Tegangan <i>von mises</i>	48
4.5.3 Deformasi.....	50
4.5.4 <i>Safety factor</i>	52
4.5.5 Data pembanding	53
4.5.5.1 Distribusi temperatur.....	53
4.5.5.2 Tegangan <i>von mises</i>	54
4.5.5.3 Deformasi.....	54
4.5.5.4 <i>Safety factor</i>	55
4.5.5.5 Perbandingan data pembanding	55
4.6 Pembahasan.....	57
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN.....	67
BIODATA PENULIS.....	81

halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia SA 240 304.....	24
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu.....	30
Tabel 3.1 Properti Material SA 240 <i>Type</i> 304 untuk Simulasi FEM.....	35
Tabel 3.2 Parameter Simulasi.....	39
Tabel 4.1 Hasil Konvergensi SA 240	43
Tabel 4.2 <i>Film Coefficient Convection</i>	45
Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Penelitian	56
Tabel 4.4 Hasil Dari Variasi <i>Cool-down</i> Terhadap Nilai Distribusi Temperatur....	58
Tabel 4.5 Hasil Variasi <i>Cool-down</i> Terhadap Nilai Tegangan dan Deformasi.....	59
Tabel 4.6 Hasil <i>Safety Factor</i>	60

halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Pressure Vessel</i>	8
Gambar 2.2 <i>Vertical Pressure Vessel</i>	8
Gambar 2.3 <i>Horizontal Pressure Vessel</i>	9
Gambar 2.4 <i>Spherical Pressure Vessel</i>	9
Gambar 2.5 <i>Sphere and Hemispherical Head</i>	10
Gambar 2.6 <i>Ellipsoidal Head</i>	11
Gambar 2.7 <i>Conical Head</i>	11
Gambar 2.8 <i>Torispherical Head</i>	12
Gambar 2.9 <i>Cylindrical Vessel</i>	12
Gambar 2.10 <i>Spherical Shell</i>	13
Gambar 2.11 <i>Conical Shell</i>	13
Gambar 2. 12 <i>Saddle Support</i>	14
Gambar 2.13 <i>Leg Support</i>	14
Gambar 2.14 <i>Skirt Support</i>	15
Gambar 2.15 <i>Lug Support</i>	15
Gambar 2.16 <i>Nozzle</i>	16
Gambar 3.1 <i>Diagram Alir</i>	33
Gambar 4.1 <i>Pemodelan Geometri</i>	42
Gambar 4.2 <i>Detail Geometry Section Plane</i>	43
Gambar 4.3 <i>Grafik Konvergensi Mesh</i>	44
Gambar 4.4 <i>Outline Tree Transient Thermal</i>	45
Gambar 4.5 <i>Outline Tree Static Structural</i>	46
Gambar 4.6 <i>Apply Pressure 5 Bar Pada Surface Dalam Tangki</i>	46
Gambar 4.7 <i>Hasil Distribusi Temperatur Variasi Cool-down 120 Menit</i>	47
Gambar 4.8 <i>Hasil Distribusi Temperatur Variasi Cool-down 90 Menit</i>	47
Gambar 4.9 <i>Hasil Distribusi Temperatur Variasi Cool-down 60 Menit</i>	48
Gambar 4.10 <i>Hasil Dari Tegangan Von Mises Waktu 120 Menit</i>	49
Gambar 4.11 <i>Hasil Tegangan Von Mises Waktu 90 Menit</i>	49
Gambar 4.12 <i>Hasil Dari Tegangan Von Mises Waktu 60 Menit</i>	50
Gambar 4.13 <i>Deformasi Variasi 120 Menit</i>	50
Gambar 4.14 <i>Deformasi Variasi 90 Menit</i>	51
Gambar 4.15 <i>Deformasi Variasi 60 Menit</i>	51
Gambar 4.16 <i>Safety Factor Tangki 120 Menit</i>	52
Gambar 4.17 <i>Safety Factor Tangki 90 Menit</i>	52
Gambar 4.18 <i>Safety Factor Tangki 60 Menit</i>	53
Gambar 4.19 <i>Hasil Distribusi Temperatur Variasi Cool-down 240 Menit</i>	53

Gambar 4.20 Hasil Dari Tegangan <i>Von Mises</i> Waktu 240 Menit.....	54
Gambar 4.21 Deformasi Variasi 240 Menit	54
Gambar 4.22 <i>Safety Factor</i> Tangki 240 Menit	55
Gambar 4.23 Grafik Distribusi Temperatur	58
Gambar 4.24 Hasil Tegangan Variasi <i>Cool-down</i>	59
Gambar 4.25 Hasil Deformasi Variasi <i>Cool-down</i>	60
Gambar 4.26 Hasil <i>Safety Factor</i> Variasi <i>Cool-down</i>	61

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Data Tangki	67
Lampiran B Langkah-Langkah Pengerjaan Elemen Hingga	71

halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan sumber energi yang lebih bersih dan ramah lingkungan mendorong peningkatan pemanfaatan *Liquefied Natural Gas* (LNG) pada berbagai sektor, seperti industri, pembangkit listrik, dan transportasi laut. Seiring meningkatnya kebutuhan tersebut, penggunaan ISO *tank* sebagai sarana distribusi LNG juga semakin berkembang, khususnya di wilayah yang belum memiliki fasilitas penyimpanan berskala besar. Namun demikian, karakteristik LNG yang berada pada temperatur kriogenik menuntut penerapan prosedur operasional yang ketat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perubahan temperatur yang cepat dapat memengaruhi distribusi temperatur dan respon termal struktur tangki LNG secara signifikan, sehingga berpotensi menimbulkan masalah struktural apabila tidak dikendalikan dengan baik (Dong & Xu, 2018; Zhang & Cai, 2012).

Salah satu tahapan krusial dalam pengoperasian tangki LNG adalah proses *cool-down*, yaitu penurunan temperatur dinding tangki secara bertahap sebelum pengisian LNG dilakukan. Tahapan ini bertujuan untuk menekan terjadinya perbedaan temperatur yang terlalu besar antara fluida kriogenik dan dinding tangki, sehingga potensi *thermal shock* dan tegangan termal dapat dikurangi. Berbagai penelitian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa laju *cool-down* berpengaruh langsung terhadap besarnya gradien temperatur serta respon tegangan termal yang berkembang pada dinding tangki LNG. Meskipun demikian, kajian-kajian tersebut umumnya membahas karakteristik pendinginan secara umum dan belum secara khusus mengevaluasi skenario percepatan durasi *cool-down* yang sering dipertanyakan dalam praktik operasional ISO *tank* LNG (Kang et al., 2018; Sun et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis perbandingan variasi durasi *cool-down* 120 menit sebagai kondisi standar, serta 90 menit dan 60 menit sebagai skenario percepatan, untuk menilai respon termomekanik *inner tank* LNG pada tekanan operasi 5 bar, alasan pemilihan tekanan 5 bar sendiri untuk mendapat efek ekstrem karena pada operasionalnya

tekanan yang digunakan sebesar 3 bar dan tangki dapat menahan tekanan hingga tekanan 9 bar pada *design pressure* nya, sehingga diperoleh gambaran teknis mengenai implikasi percepatan *cool-down* terhadap keselamatan struktur.

Pengalaman industri memperlihatkan bahwa ketidakterkendalian kondisi temperatur pada sistem LNG dapat menimbulkan konsekuensi yang serius. Salah satu insiden besar adalah ledakan fasilitas LNG di skikda, aljazair pada tahun 2004, yang disebabkan oleh kondisi termal yang tidak stabil sehingga memicu *rapid vaporization* dan tekanan berlebih pada sistem kriogenik (U.S. Congressional Research Service, 2004). Insiden lain terjadi di fasilitas LNG *cove point*, maryland pada tahun 1979, di mana akumulasi uap LNG dan penyimpangan prosedur operasi menyebabkan kegagalan struktural yang signifikan (United States Coast Guard & U.S. Department of Transportation, 2005). Meskipun kedua kejadian tersebut terjadi pada skala fasilitas besar, mekanisme kegagalannya relevan dengan sistem ISO tank, khususnya terkait pengaruh gradien temperatur ekstrem terhadap integritas struktur.

Fenomena yang mendasari penelitian ini juga terjadi pada kegiatan operasional di perusahaan X, di mana diterapkan prosedur *cool-down* standar dengan durasi sekitar 120 menit sebelum pengisian LNG untuk menurunkan temperatur dinding ISO tank secara bertahap hingga mencapai kondisi operasi aman pada temperatur $-141\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 5 bar. Namun, durasi *cool-down* yang relatif lama tersebut sering dipertanyakan oleh pelanggan karena berdampak pada waktu tunggu dan biaya operasional, sehingga muncul permintaan proses *cool-down* dapat dipercepat, misalnya menjadi 90 menit atau 60 menit. Secara teknis, percepatan durasi *cool-down* akan meningkatkan laju penurunan temperatur yang berpotensi memperbesar gradien temperatur pada dinding tangki dan memicu peningkatan respon tegangan termal pada struktur *inner tank*. Kajian numerik oleh Lu et al. (2018), yang menganalisis komponen sistem LNG seperti pipa dan *flange* berbahan baja struktural karbon, menunjukkan bahwa kombinasi perubahan temperatur dan tekanan internal dapat menghasilkan konsentrasi tegangan yang signifikan. Sementara itu, penelitian eksperimental dan numerik oleh Sun et al. (2024) pada proses *pre-cooling* tangki LNG tipe independen berbahan baja kriogenik untuk tangki tipe B menunjukkan bahwa variasi laju pendinginan secara langsung

memengaruhi distribusi temperatur dan tingkat tegangan termal pada struktur. Meskipun material yang digunakan pada kedua penelitian tersebut berbeda dengan material penelitian ini, yaitu *stainless steel* austenitik SA 240 Type 304, mekanisme fisik yang dikaji hubungan antara laju pendinginan, gradien temperatur, dan respon tegangan termal tetap relevan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji secara khusus pengaruh variasi durasi *cool-down* 120, 90, dan 60 menit terhadap respon termomekanik *inner tank* LNG berbahan SA 240 Type 304, sehingga hasilnya dapat menjadi acuan teknis yang lebih spesifik dan aplikatif dalam menjawab pertanyaan pelanggan terkait percepatan proses *cool-down* tanpa mengabaikan aspek keselamatan struktur.

Untuk menjawab permasalahan tersebut secara teknis, diperlukan suatu kajian yang mampu menggambarkan pengaruh laju *cool-down* terhadap distribusi temperatur, tegangan, dan deformasi struktur *inner tank* LNG. Metode *Finite Element Method* (FEM) melalui perangkat lunak ANSYS telah banyak digunakan dan terbukti efektif dalam memodelkan respon termomekanik tangki LNG pada berbagai kondisi operasi (Dong & Xu, 2018). Selain itu, material *inner tank* seperti SA 240 Type 304 memiliki karakteristik khusus pada temperatur kriogenik yang telah dijelaskan dalam standar dan basis data material internasional (American Society of Mechanical Engineers, 2023; National Institute of Standards and Technology, 2022; Outokumpu, 2022).

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis yang kuat bagi perusahaan dalam menjawab pertanyaan pelanggan terkait percepatan proses *cool-down*, sekaligus memastikan bahwa aspek keselamatan struktur tetap terjaga. Selain itu, kajian ini juga diharapkan dapat memperkaya referensi akademik mengenai analisis termomekanik tangki LNG pada kondisi kriogenik dengan pendekatan numerik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan operasional yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi temperatur *inner tank* LNG pada tekanan operasi 5 bar selama proses *cool-down* dengan durasi 120 menit, 90 menit, dan 60 menit?

2. Bagaimana pengaruh variasi laju proses *cool-down* terhadap respon tegangan dan deformasi *inner tank* LNG pada tekanan 5 bar?
3. Bagian struktur mana yang mengalami konsentrasi tegangan tertinggi akibat kombinasi beban termal dan tekanan internal?
4. Apakah respon tegangan yang terjadi masih berada dalam batas aman material SA 240 Type 304 pada variasi laju *cool-down* yang dianalisis?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis distribusi temperatur pada *inner tank* LNG selama proses *cool-down* dengan variasi durasi 120 menit, 90 menit, dan 60 menit pada tekanan 5 bar.
2. Mengevaluasi pengaruh variasi laju *cool-down* terhadap respon termomekanik, meliputi tegangan dan deformasi struktur *inner tank* LNG.
3. Mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan akibat kombinasi beban termal dan tekanan internal.
4. Menilai tingkat keamanan struktur *inner tank* LNG berdasarkan kriteria material SA 240 Type 304 pada variasi laju *cool-down* yang dianalisis.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Perusahaan, menjadi acuan teknis dalam menjelaskan kepada pelanggan mengenai pengaruh laju *cool-down* terhadap keselamatan struktur tangki.
2. Bagi Mahasiswa, menambah referensi mengenai analisis termomekanik pada tangki LNG menggunakan metode FEM.
3. Bagi Institusi Pendidikan, menjadi bahan referensi akademik dan studi kasus terapan yang dapat mendukung pengembangan pembelajaran serta penelitian di bidang rekayasa pengelasan, bejana tekan, dan sistem kriogenik.

1.5 Batasan Masalah

Agar pembahasan tetap terarah, penelitian ini memiliki batasan sebagai berikut:

1. Geometri yang dianalisis hanya terdiri dari *vessel head*, *shell*, dan *support* sederhana dan tidak dilakukan perhitungan secara detail pada *support* karena hanya sebagai pembantu saat proses simulasi (tanpa *inner piping* dan *outer tank*).
2. Material yang digunakan adalah SA 240M 304 sesuai standar *inner tank* kriogenik.
3. Temperatur LNG yang dianalisis adalah -141°C (temperatur jenuh pada operasi sekitar 5 bar).
4. Tekanan internal yang dianalisis dibatasi pada 5 bar.
5. Variasi proses *cool-down* dibatasi pada durasi 120 menit, 90 menit, dan 60 menit.
6. Analisis dilakukan menggunakan metode *Finite Element Method* pada *software* ANSYS.
7. Jenis analisis yang digunakan meliputi *Transient Thermal* dan *Static Structural*.
8. Fokus analisis hanya pada distribusi temperatur, tegangan termal, deformasi dan *safety factor*.
9. Tidak membahas fenomena aliran LNG, perpipaan, instrumentasi, atau operasi *valve* secara rinci.
10. Penelitian tidak mencakup analisis *fatigue*, siklus penuh pengisian, maupun perilaku jangka panjang.

halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Pressure Vessel*

Pressure vessel adalah bejana yang dirancang untuk menyimpan fluida dalam bentuk cair, padat, maupun gas pada kondisi tekanan internal atau eksternal tertentu, serta mampu menahan berbagai jenis beban yang bekerja selama operasi. Beban yang diterima oleh *pressure vessel* dapat bervariasi baik dari segi jenis maupun besarnya, tergantung pada kondisi operasi yang dialami. Jenis, kategori, dan tingkat tegangan yang terjadi pada bejana tekan sangat dipengaruhi oleh karakteristik beban, serta bentuk geometri dan konstruksi *pressure vessel* itu sendiri (Megyesy, 2008).

Perancangan *pressure vessel* memerlukan pertimbangan yang matang karena kesalahan desain dapat berakibat pada kegagalan struktur yang berpotensi menimbulkan kerugian besar, baik dari sisi keselamatan manusia maupun kerusakan material. Oleh karena itu, beberapa aspek utama yang harus diperhatikan dalam perancangan *pressure vessel* meliputi tekanan kerja, temperatur fluida yang disimpan, pemilihan material, serta jenis dan kombinasi beban yang bekerja selama masa operasi.

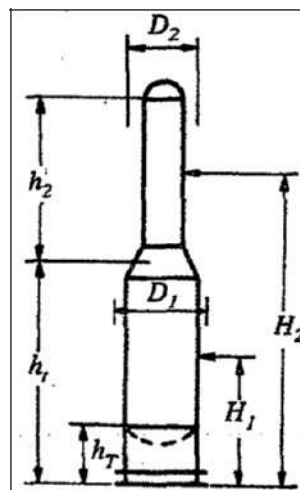
Pressure vessel memiliki variasi bentuk dan ukuran yang luas, mulai dari bejana silinder berukuran kecil hingga tangki berkapasitas besar, yang disesuaikan dengan fungsi dan kapasitas muatan. Material yang digunakan harus memiliki kekuatan dan ketahanan yang memadai untuk menahan tekanan dan temperatur selama operasi berlangsung. Umumnya, *pressure vessel* dibuat dari material logam seperti baja karbon atau baja tahan karat. Selain itu, tekanan kerja yang dialami juga menjadi faktor penting dalam penentuan ketebalan dinding bejana tekan. Contoh konfigurasi *pressure vessel* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Pressure Vessel*
(Lee et al., 2023)

Pressure vessel dapat dikelompokkan berdasarkan bentuk atau konfigurasi geometrinya. Ditinjau dari bentuknya, *pressure vessel* dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu *cylindrical Pressure vessel* dan *spherical pressure vessel*. Selanjutnya, *cylindrical pressure vessel* masih dapat diklasifikasikan lagi berdasarkan orientasinya menjadi *vertical pressure vessel* dan *horizontal pressure vessel*.

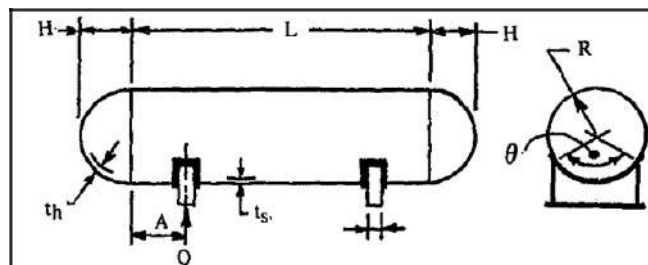
Vertical pressure vessel merupakan bejana tekan berbentuk silinder yang dirancang dengan orientasi tegak, di mana sumbu memanjang dari *shell* berada tegak lurus terhadap permukaan pondasi tempat bejana tersebut dipasang. Pada jenis ini, komponen *head* atau penutup terletak pada bagian atas dan bawah *shell*. Sistem penyangga yang umum digunakan pada *vertical pressure vessel* adalah *skirt support* atau *leg support*. Contoh penerapan *vertical pressure vessel* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Vertical Pressure Vessel*
(Megyesy, 2008)

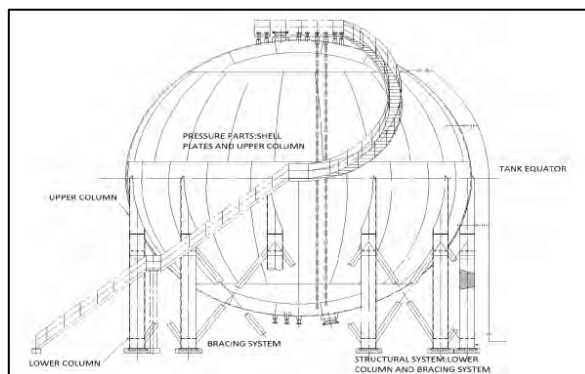
Horizontal pressure vessel merupakan bejana tekan berbentuk silinder yang dirancang dengan posisi mendatar, di mana sumbu memanjang dari *shell* sejajar

dengan permukaan pondasi tempat bejana tersebut dipasang. Pada konfigurasi ini, komponen *head* atau penutup terletak di kedua sisi ujung *shell*, yaitu pada sisi kanan dan kiri. Sistem penyangga yang umum digunakan pada *horizontal pressure vessel* adalah *saddle support*, yang berfungsi menahan beban bejana selama kondisi operasi. Contoh penerapan *horizontal pressure vessel* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Horizontal Pressure Vessel*
(Megyesy, 2008)

Spherical pressure vessel merupakan bejana tekan yang memiliki bentuk tangki menyerupai bola. Meskipun demikian, *spherical pressure vessel* memiliki keunggulan utama berupa distribusi tegangan yang lebih merata di seluruh permukaan *shell*, sehingga tingkat tegangan yang terjadi lebih rendah. Karakteristik tersebut menjadikan bentuk ini sangat sesuai untuk aplikasi yang beroperasi pada tekanan sangat tinggi. Sistem penyangga yang umumnya digunakan pada *spherical pressure vessel* adalah *leg support*. Contoh penerapan *spherical pressure vessel* ditunjukkan pada Gambar 2.4.

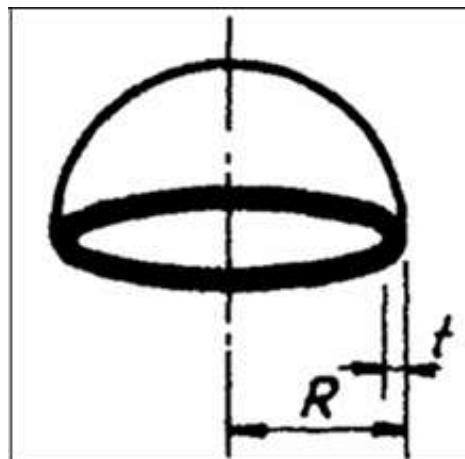


Gambar 2.4 *Spherical Pressure Vessel*
(Nyawa et al., 2023)

2.1.1 Head

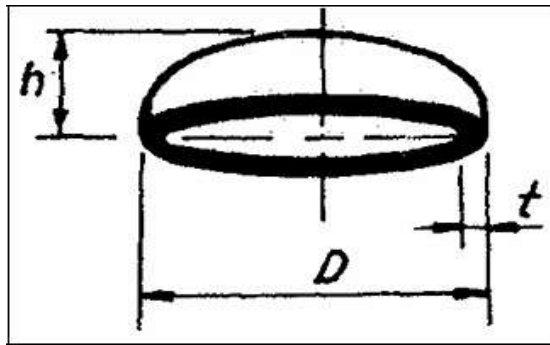
Head atau kepala merupakan salah satu komponen utama pada *pressure vessel* yang berfungsi sebagai penutup ujung bejana. Pada *pressure vessel* dengan orientasi horizontal, *head* terletak di sisi kanan dan kiri *shell*, sedangkan pada *pressure vessel* vertikal, *head* dipasang pada bagian atas dan bawah *shell*. Terdapat beberapa tipe *head* yang umum digunakan pada *pressure vessel*, antara lain *sphere and hemispherical head*, *ellipsoidal head*, *conical head*, serta *flanged and dished head (torispherical head)*, (Megyesy, 2008).

Sphere and hemispherical head memiliki bentuk menyerupai setengah bola. Jenis *head* ini banyak digunakan pada *pressure vessel* yang beroperasi pada tekanan tinggi karena mampu mendistribusikan tekanan secara lebih merata. Namun, proses fabrikasi *sphere and hemispherical head* relatif lebih rumit sehingga biaya pembuatannya lebih tinggi dibandingkan jenis *head* lainnya. Contoh penerapan *sphere and hemispherical head* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



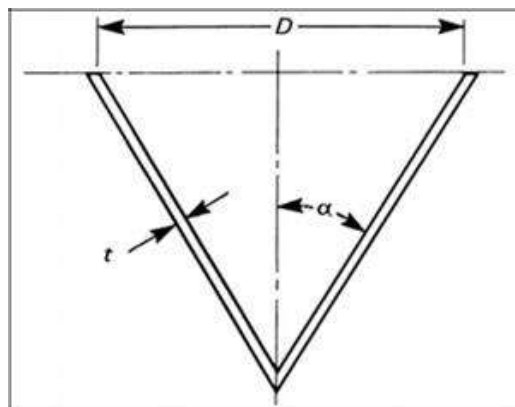
Gambar 2.5 *Sphere and Hemispherical Head*
(Megyesy, 2008)

Ellipsoidal head merupakan jenis *head* yang memiliki bentuk cembung dengan permukaan melengkung. Tipe ini banyak digunakan pada *pressure vessel* karena memiliki kekuatan struktur yang baik serta proses fabrikasi yang relatif lebih sederhana dibandingkan jenis *head* lainnya. Selain itu, kemampuan *ellipsoidal head* dalam mendistribusikan tekanan secara cukup merata menjadi salah satu keunggulan utamanya. Contoh penerapan *ellipsoidal head* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



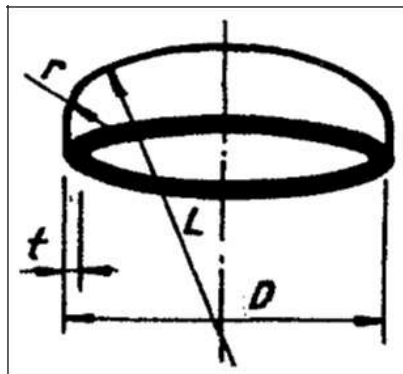
Gambar 2.6 *Ellipsoidal Head*
(Megyesy, 2008)

Conical head memiliki bentuk ujung yang menonjol menyerupai kerucut. Desain jenis head ini tergolong sederhana sehingga proses pembuatannya relatif lebih mudah dan biaya fabrikasinya lebih terjangkau. Namun, karena karakteristik geometrinya, *conical head* umumnya digunakan pada *pressure vessel* yang beroperasi pada tekanan rendah. Contoh penerapan *conical head* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 *Conical Head*
(ASME VIII Div.1, 2019)

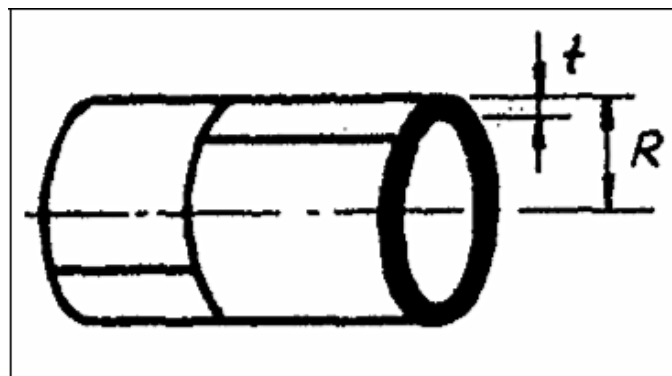
Flanged and dished head atau yang dikenal sebagai *torispherical head* memiliki bentuk menyerupai kubah. Geometri permukaannya merupakan kombinasi antara bagian berbentuk bola dan bagian berbentuk torus atau cincin. Bagian berbentuk bola disebut sebagai *crown*, sedangkan bagian torus dikenal sebagai *knuckle radius*. Contoh penerapan *torispherical head* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Torispherical Head*
(Megyesy,2008)

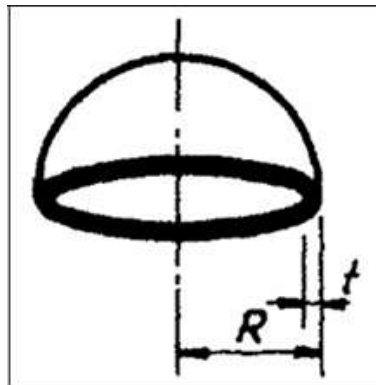
2.1.2 *Shell*

Cylindrical shell merupakan bentuk yang paling banyak digunakan dalam konstruksi *pressure vessel*. Bentuk ini menyerupai tabung yang disusun dari beberapa pelat yang disambung, serta lebih disukai karena proses fabrikasinya relatif sederhana dan efisien. Contoh penerapan *cylindrical vessel* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



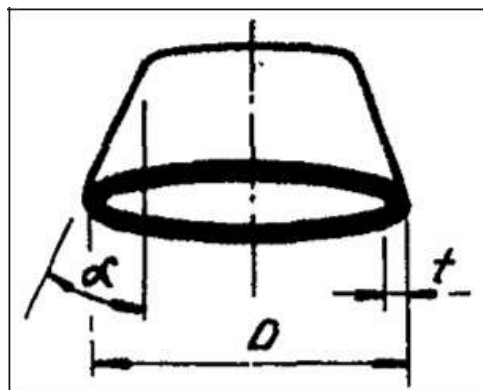
Gambar 2.9 *Cylindrical Vessel*
(Megyesy,2008)

Spherical shell memiliki bentuk seperti bola sama halnya dengan bentuk *spherical head*. Bentuk ini digunakan untuk *pressure vessel* berjenis *spherical vessel* dimana bentuk tangki tersebut seperti bola sehingga *shell* dan *head* menjadi satu sambungan. Kelebihan dari model ini yaitu memiliki *stress* yang relatif rendah karena dapat mendistribusikan tegangan secara merata. Contoh *spherical shell* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 *Spherical Shell*
(Megyesy, 2008)

Conical shell memiliki bentuk mengerucut seperti *reducer*. Bentuk ini memiliki dua sisi dimana satu sisi memiliki diameter yang lebih besar daripada sisi lainnya. Biasanya bentuk ini digunakan pada *pressure vessel* dengan desain khusus untuk menghubungkan bagian yang berbeda ukuran diameter. Contoh *conical shell* dapat dilihat pada Gambar 2.11.

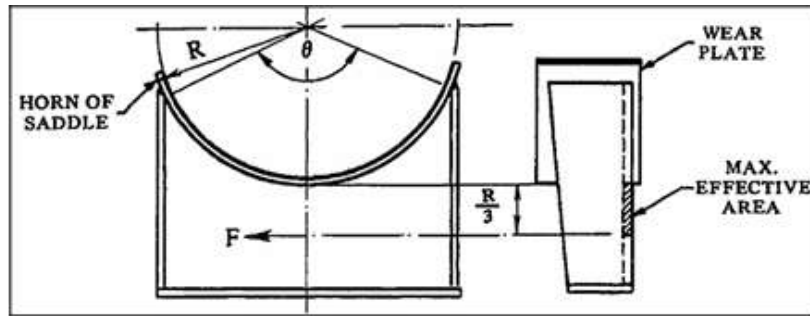


Gambar 2.11 *Conical Shell*
(Megyesy, 2008)

2.1.3 *Support*

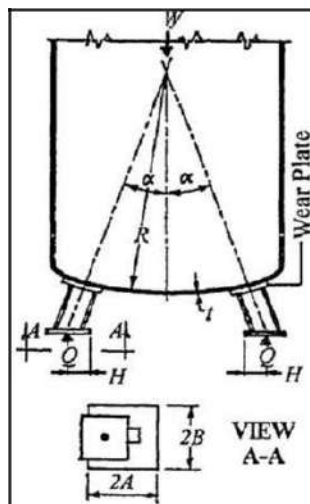
Support atau penyangga merupakan bagian yang digunakan sebagai penopang sebuah *vessel* agar dapat berdiri. Menurut cara berdirinya *pressure vessel* terbagi dalam dua jenis yaitu *vertical* dan *horizontal*. Pada *pressure vessel* yang *vertical* jenis *support* yang digunakan berupa *skirt*, *leg*, atau bisa juga menggunakan *lug*. Sedangkan pada *pressure vessel* yang *horizontal* umumnya digunakan *support* berjenis *saddle*.

Horizontal vessel biasanya ditopang dengan menggunakan *saddle support*. *Saddle support* mendistribusikan beban berat ke area *shell* yang luas untuk mencegah tekanan local yang berlebihan pada titik-titik *support*. Lebar *saddle* ditentukan berdasarkan ukuran spesifik dan kondisi desain dari *pressure vessel*. Contoh *saddle support* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



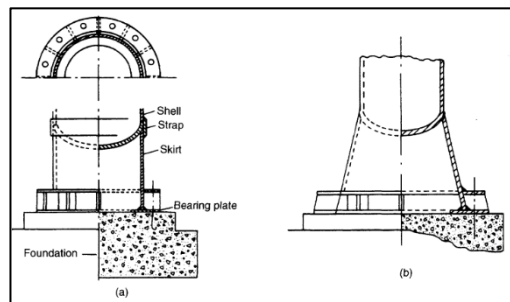
Gambar 2. 12 Saddle Support
(Megyesy, 2008)

Small vertical vessel umumnya ditopang oleh *leg support* yang dilas pada bagian bawah *shell* dengan rasio panjang *leg* terhadap diameter bejana maksimal 2:1. Jumlah *leg* bergantung pada ukuran dan beban bejana. *Leg support* dapat dibuat dari kolom baja structural atau pipa tergantung dari efisiensi desain. Untuk menahan beban angin dan gempa biasanya ditambahkan *stiffener* yang disilang (*cross bracing*) antar *leg*. Contoh *leg support* dapat dilihat pada Gambar 2.13.



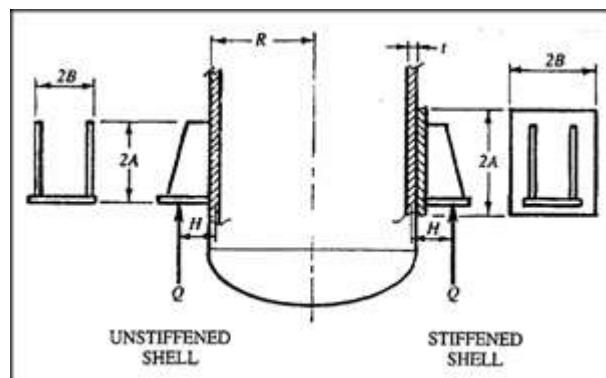
Gambar 2.13 Leg Support
(Megyesy, 2008)

Cylindrical vessel vertical yang tinggi seperti menara dan reaktor biasanya ditopan oleh *skirt support* yang dilas pada bagian bawah *shell* atau *head* bawah. Untuk bejana berbentuk bola *skirt* dilas pada area dekat bidang tengah *shell*. Panjang *skirt* dirancang cukup fleksibel agar ekspansi termal radial tidak menimbulkan tegangan termal yang berlebih pada sambungannya. Contoh *skirt support* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Skirt Support*
(Chem.Eng.Dep., 2024)

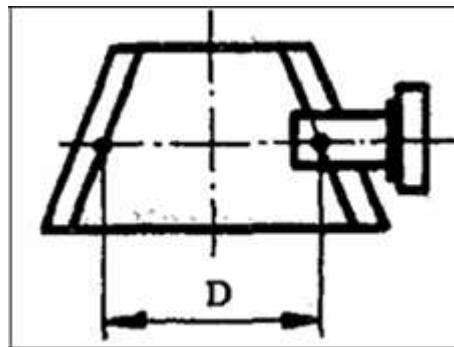
Lug merupakan *support* yang dilas pada *shell* bejana tekan vertikal umumnya digunakan untuk bejana dengan diameter kecil hingga sedang (1 sampai 10 ft) dengan rasio tinggi terhadap diameter 2:1 hingga 5:1. *Lug* biasanya digunakan pada bejana yang dipasang di atas permukaan tanah dalam struktur baja dan dibuat ke elemen *horizontal* untuk mencegah bejana terjungkit. Lubang baut sering dibuat memanjang agar bejana dapat mengembang secara radial akibat perubahan suhu. Contoh *lug support* dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 *Lug Support*
(Megyesy, 2008)

2.1.4 Nozzle

Nozzle adalah komponen pada *pressure vessel* yang berfungsi sebagai titik sambungan antara *vessel* dan sistem perpipaan. Melalui *nozzle* inilah fluida atau gas masuk dan keluar dari *vessel* selama proses operasi berlangsung. Sambungan antara pipa dan *nozzle* umumnya dilakukan menggunakan *flange* agar pemasangan, pelepasan, dan perawatan dapat dilakukan dengan lebih mudah dan aman. Ilustrasi bentuk *nozzle* pada *pressure vessel* ditunjukkan pada Gambar 2.16..



Gambar 2.16 *Nozzle*
(Megyesy, 2008)

2.1.5 Perhitungan *pressure vessel*

Untuk menjamin tingkat keselamatan pada *pressure vessel*, diperlukan perhitungan desain yang tepat. Perhitungan ini mencakup penentuan ketebalan material serta tekanan operasi yang bekerja pada *vessel*. Dari hasil perhitungan tersebut diperoleh nilai ketebalan minimum yang mampu menahan tekanan operasi secara aman. Berikut ini disajikan perhitungan-perhitungan *pressure vessel* berdasarkan metode yang dijelaskan oleh Megyesy (2008) dengan menggunakan pendekatan dimensi luar (*outside dimension*).

- **Notation**

P = Desain *pressure* atau *maximum allowable working pressure* (KPa)

S = *Stress value of material* (KPa)

E = *Joint efficiency*

R = *Outside radius* (m)

D = *Outside diameter* (m)

t = *Wall thickness* (m)

C = *Corrosion Allowance*

- ***Cylindrical Shell***

$$t = \frac{PR}{SE+0.4P} \quad (2.1)$$

$$P = \frac{SEt}{R-0.4t} \quad (2.2)$$

- ***Sphere and Hemispherical Head***

$$t = \frac{PR}{2SE+0.8P} \quad (2.3)$$

$$P = \frac{2SEt}{R-0.8t} \quad (2.4)$$

- ***Ellipsoidal Head***

$$t = \frac{PD}{2SE+1.8P} \quad (2.5)$$

$$P = \frac{2SEt}{D-1.8t} \quad (2.6)$$

- ***Cone and Conical Section***

$$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (SE+0.4P)} \quad (2.7)$$

$$P = \frac{2SEt \cos \alpha}{D-0.8t \cos \alpha} \quad (2.8)$$

- ***Torispherical Head***

$$t = \frac{0.885PL}{SE+0.8P} \quad (2.9)$$

$$P = \frac{SEt}{ML-t(M-0.2P)} \quad (2.10)$$

2.2 ***Cryogenic Tank***

Cryogenic tank merupakan tangki yang digunakan untuk menyimpan fluida pada temperatur sangat rendah, umumnya di bawah -100°C . Pada sistem LNG, *cryogenic tank* dirancang untuk menahan fluida pada temperatur sekitar -141°C hingga -162°C , tergantung tekanan operasi. Tangki kriogenik umumnya terdiri dari *inner tank* yang bersentuhan langsung dengan LNG dan *outer tank* yang berfungsi sebagai pelindung serta tempat sistem insulasi.

Perbedaan temperatur yang besar antara fluida LNG dan lingkungan sekitar dapat menimbulkan tegangan termal pada dinding tangki. Tegangan ini menjadi semakin signifikan ketika terjadi perubahan temperatur secara cepat, seperti saat proses pengisian atau pendinginan awal. Studi numerik menunjukkan bahwa distribusi temperatur yang tidak seragam dapat memicu konsentrasi tegangan pada

bagian-bagian struktural tertentu, khususnya pada sambungan antara *shell* dan *head* (Zhang & Cai, 2011).

2.3 *Liquefied Natural Gas (LNG)*

LNG merupakan gas alam yang dicairkan pada temperatur titik didih – 162°C pada tekanan atmosfer. Pada tekanan operasi 5 bar, temperatur jenuhnya meningkat hingga sekitar –141°C. Sifat termal LNG yang sensitif terhadap panas menyebabkan terjadinya *Boil-Off Gas* (BOG), yang kemudian sering dimanfaatkan sebagai media pendingin bertahap saat *cool-down*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa distribusi panas yang tidak seragam dapat memicu tegangan tinggi pada struktur *inner tank* (Dong & Xu, 2018; Li et al., 2020). Dengan demikian, pengaturan laju pendinginan menjadi faktor keselamatan penting.

2.4 *Proses Cool-down pada Tangki LNG*

Proses *Cool-down* dilakukan untuk menurunkan temperatur dinding tangki dari suhu lingkungan ke suhu LNG secara bertahap, sehingga menghindari deformasi mendadak dan *thermal shock*. NFPA 59A memberikan batasan bahwa pendinginan harus dilakukan secara terkontrol untuk menjaga keseragaman temperatur dinding tangki (National Fire Protection Association, 2022). Pada praktiknya, pendinginan dilakukan menggunakan BOG atau sedikit LNG cair yang dialirkan perlahan untuk menyerap panas dari permukaan dinding.

Penelitian eksperimental oleh Kang et al. (2018) menunjukkan bahwa dinding tangki kriogenik yang mengalami pendinginan cepat memiliki risiko tegangan termal lebih tinggi dibanding tangki yang didinginkan secara bertahap. Penelitian oleh Sun et al. (2024) juga menegaskan bahwa variasi metode pendinginan pada tangki LNG dapat menghasilkan perbedaan distribusi temperatur yang berpengaruh langsung terhadap tingkat tegangan termal.

Pada ISO *tank* yang sering mengalami siklus pengisian dan pengosongan, laju pemanasan kembali pada dinding tangki cukup cepat sehingga proses *cool-down* ulang menjadi wajib jika sisa LNG kurang dari 5%. Hal ini bertujuan mencegah gradien temperatur ekstrem saat pengisian berikutnya. Simulasi FEM

membuktikan bahwa pengisian tanpa pendinginan bertahap dapat menciptakan tegangan sangat tinggi pada daerah *head-shell*, sehingga menurunkan ketahanan struktur dalam jangka panjang.

2.4.1 Istilah *cool-down* dan *pre-cooling* pada tangki LNG

Dalam praktik industri dan literatur teknis LNG, istilah *cool-down* dan *pre-cooling* sering digunakan untuk menggambarkan proses penurunan temperatur tangki sebelum pengisian LNG penuh, namun keduanya memiliki perbedaan yang cukup signifikan dari sisi media pendingin dan tahap penerapannya. Oleh karena itu, diperlukan penjelasan yang jelas agar tidak terjadi kesalahpahaman dalam interpretasi penelitian ini.

Istilah *cool-down* umumnya digunakan dalam konteks operasional ISO tank dan fasilitas LNG untuk menggambarkan proses penurunan temperatur dinding tangki dari kondisi lingkungan menuju temperatur operasi LNG secara bertahap. Proses ini biasanya dilakukan dengan mengalirkan *Boil-Off Gas* (BOG) atau LNG cair dalam jumlah terbatas secara terkendali ke dalam tangki. *Cool-down* diterapkan sebelum dan menjelang pengisian LNG operasional, serta menjadi bagian dari prosedur keselamatan wajib untuk memastikan dinding tangki telah mencapai kondisi termal yang stabil. Tujuan utama proses ini adalah membatasi gradien temperatur yang tajam antara fluida kriogenik dan material tangki sehingga risiko *thermal shock* dan peningkatan tegangan termal dapat diminimalkan.

Sebaliknya, istilah *pre-cooling* lebih banyak digunakan dalam kajian akademik dan penelitian eksperimental untuk menggambarkan tahap pendinginan awal yang dilakukan sebelum LNG dimasukkan sebagai muatan utama. Pada proses *pre-cooling*, media pendingin yang digunakan tidak selalu LNG, melainkan dapat berupa refrigeran lain atau fluida kriogenik alternatif, tergantung pada sistem yang diteliti. Penelitian oleh (Sun et al., 2024), misalnya, menggunakan istilah *pre-cooling* untuk menganalisis proses pendinginan awal pada tangki LNG tipe independen dengan membandingkan berbagai media refrigeran, dengan fokus pada karakteristik perpindahan panas dan keseragaman distribusi temperatur pada tahap awal pendinginan. Dengan demikian, *pre-cooling* lebih menekankan aspek

optimasi metode pendinginan awal, bukan pada prosedur operasional pengisian LNG secara langsung.

Meskipun terdapat perbedaan dari sisi media pendingin dan konteks penerapan, kedua proses tersebut memiliki kesamaan mekanisme termal, yaitu sama-sama bertujuan menurunkan temperatur dinding tangki secara terkendali untuk mengurangi gradien temperatur dan mencegah terbentuknya tegangan termal berlebih. Dalam penelitian ini, istilah *cool-down* digunakan sebagai istilah utama karena sesuai dengan terminologi operasional ISO *tank* LNG di perusahaan X, di mana pendinginan dilakukan menggunakan LNG dan/atau BOG. Namun, temuan dari penelitian yang menggunakan istilah *pre-cooling*, seperti Sun et al. (2024), tetap dijadikan acuan karena prinsip fisik yang dikaji pengaruh laju penurunan temperatur terhadap distribusi temperatur dan respon tegangan termal bersifat sepadan dengan proses *cool-down* yang dianalisis dalam penelitian ini.

2.5 Thermal Shock pada Tangki LNG dan Tangki Kriogenik

Thermal shock merupakan fenomena yang terjadi ketika suatu material mengalami perubahan temperatur yang sangat cepat dalam waktu singkat, sehingga menimbulkan gradien temperatur yang besar di dalam struktur. Pada kondisi tersebut, bagian material yang bersentuhan langsung dengan fluida dingin akan mengalami kontraksi lebih cepat dibandingkan bagian lain yang masih berada pada temperatur lebih tinggi. Perbedaan laju kontraksi ini menyebabkan timbulnya regangan termal yang tidak seragam, yang kemudian berkembang menjadi tegangan termal signifikan pada struktur tangki.

Pada sistem LNG, risiko *thermal shock* menjadi perhatian utama karena temperatur operasi LNG yang sangat rendah, yaitu sekitar $-141\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada tekanan 5 bar. Apabila LNG dimasukkan ke dalam tangki yang masih berada pada temperatur lingkungan tanpa proses pendinginan bertahap, dinding bagian dalam akan mengalami penurunan temperatur secara tiba-tiba. Kondisi ini dapat menghasilkan gradien temperatur yang ekstrem antara permukaan dalam dan luar dinding tangki, sehingga meningkatkan potensi terjadinya tegangan termal yang melebihi kemampuan deformasi elastis material.

Beberapa penelitian numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa *thermal shock* pada tangki kriogenik dapat memicu konsentrasi tegangan tinggi, terutama pada area dengan perubahan geometri seperti sambungan *head-shell*, *nozzle*, dan daerah penopang. Dong dan Xu (2018) menjelaskan bahwa gradien temperatur yang besar selama proses pendinginan atau pengisian LNG berkontribusi langsung terhadap peningkatan tegangan termal pada struktur tangki. Hasil serupa juga ditunjukkan oleh Kang et al. (2018), yang menyatakan bahwa laju pendinginan yang lebih cepat menghasilkan respons tegangan termal yang lebih tinggi pada dinding tangki kriogenik.

Meskipun material *stainless steel* austenitik seperti SA 240 Type 304 memiliki ketangguhan yang baik pada temperatur rendah dan tidak mudah mengalami *brittle fracture*, material tersebut tetap rentan terhadap tegangan termal apabila mengalami perubahan temperatur secara mendadak. Tegangan termal yang berulang akibat siklus pendinginan cepat berpotensi menurunkan umur struktur dan meningkatkan risiko retak mikro dalam jangka panjang. Oleh karena itu, standar keselamatan seperti NFPA 59A menekankan pentingnya proses *cool-down* yang terkontrol untuk meminimalkan risiko *thermal shock* pada peralatan kriogenik.

Dalam konteks penelitian ini, *thermal shock* menjadi fenomena kunci yang dievaluasi melalui analisis termomekanik. Variasi durasi *cool-down* 120, 90, dan 60 menit merepresentasikan perbedaan laju penurunan temperatur yang berpotensi menghasilkan tingkat *thermal shock* yang berbeda. Dengan menggunakan analisis transient thermal dan static structural berbasis metode elemen hingga, pengaruh *thermal shock* terhadap distribusi temperatur, tegangan, dan deformasi pada *inner tank* LNG dapat dianalisis secara kuantitatif dan dikaitkan dengan tingkat keselamatan struktur.

2.6 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII

ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC) Section VIII merupakan standar yang diterbitkan oleh American Society of Mechanical Engineers (ASME) sebagai acuan dalam perancangan, fabrikasi, inspeksi, pengujian, dan sertifikasi *pressure vessel*. Standar ini banyak digunakan pada industri proses, petrokimia, pembangkit listrik, serta penyimpanan fluida bertekanan, termasuk tangki LNG.

Berdasarkan tingkat kompleksitas analisis dan tekanan operasi, ASME BPVC Section VIII dibagi menjadi tiga divisi, yaitu *Division 1*, *Division 2*, dan *Division 3* (ASME, 2023).

2.6.1 ASME BPVC section VIII division 1

ASME BPVC *Section VIII Division 1* merupakan standar yang paling luas digunakan dalam perancangan *pressure vessel*. Perhitungan desain pada divisi ini menggunakan pendekatan *design by rule*, yaitu dimensi komponen ditentukan berdasarkan persamaan empiris yang telah ditetapkan dalam kode. Pendekatan ini memberikan prosedur yang relatif sederhana sehingga banyak diterapkan pada industri manufaktur dan peralatan proses. Selain itu, *Division 1* menggunakan nilai *allowable stress* material yang mengacu pada ASME BPVC Section II Part D sehingga desain tetap memenuhi persyaratan keselamatan yang telah ditetapkan (ASME, 2023).

Pada penelitian ini, ASME BPVC Section VIII Division 1 dipilih sebagai dasar evaluasi desain karena tekanan operasi *inner tank* sebesar 5 bar masih berada dalam rentang aplikasi *Division 1* serta sesuai dengan praktik perancangan *pressure vessel* pada industri LNG.

2.6.2 ASME BPVC section VIII division 2

ASME BPVC *Section VIII Division 2* menggunakan pendekatan *design by analysis*, yaitu desain dievaluasi berdasarkan analisis tegangan yang lebih rinci dibandingkan *Division 1*. Analisis dapat dilakukan menggunakan metode numerik, seperti *Finite Element Method* (FEM), untuk mengevaluasi distribusi tegangan primer, tegangan sekunder, deformasi, maupun potensi kegagalan struktur. *Division 2* umumnya diterapkan pada *pressure vessel* dengan geometri yang lebih kompleks atau ketika diperlukan optimasi ketebalan material sehingga desain menjadi lebih efisien (ASME, 2023).

2.6.3 ASME BPVC section VIII division 3

ASME BPVC *Section VIII Division 3* diperuntukkan bagi *pressure vessel* bertekanan sangat tinggi (*high pressure vessel*). Divisi ini mengatur persyaratan desain, fabrikasi, inspeksi, dan pengujian untuk bejana tekan yang bekerja pada tekanan jauh lebih tinggi dibandingkan cakupan *Division 1* maupun *Division 2*. Karena tekanan operasi pada penelitian ini hanya sebesar 5 bar, maka ketentuan

Division 3 tidak digunakan sebagai dasar analisis, namun tetap dibahas untuk memberikan gambaran mengenai klasifikasi standar ASME BPVC *Section VIII* secara keseluruhan (ASME, 2023).

2.7 Material Austenitic Stainless Steel

Austenitic stainless steel merupakan material yang paling banyak digunakan pada sistem kriogenik karena memiliki ketangguhan yang baik pada temperatur rendah. Struktur kristal FCC (*Face-Centered Cubic*) pada baja jenis ini tetap stabil pada kondisi kriogenik sehingga tidak mengalami *brittle fracture* seperti baja karbon. Selain itu, sifat keuletan dan ketahanan terhadap korosi menjadikan material ini ideal untuk *inner tank* LNG.

2.7.1 Material SA 240 304

SA 240 *Type 304* adalah baja *stainless* austenitik yang banyak digunakan sebagai material untuk *inner tank*. Menurut ASME *section II Part A*, baja 304 memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) sekitar 205 MPa pada temperatur ruang dan menunjukkan perilaku lebih kaku tetapi tetap ulet pada temperatur kriogenik. Kelebihan material ini adalah:

- a) tahan terhadap temperatur rendah
- b) memiliki ekspansi termal yang stabil
- c) mudah difabrikasi
- d) ketahanan korosi tinggi

Namun demikian, jika material mengalami perubahan temperatur secara tiba-tiba, potensi munculnya tegangan termal tetap ada, terutama pada bagian sambungan seperti area *head-shell*. Hal ini konsisten dengan temuan (Zhang & Cai, 2011) yang menyatakan bahwa perubahan temperatur yang cepat pada struktur tangki LNG dapat menghasilkan konsentrasi tegangan tinggi pada sambungan geometris. Berikut adalah komposisi kimia dari material SA 240 *Type 304* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia SA 240 304

No	Unsur Kimia	Kandungan (% berat)
1	Carbon (C)	Maks. 0,08
2	Manganese (Mn)	Maks. 2,00
3	Silicon (Si)	Maks. 1,00
4	Chromium (Cr)	18,00 – 20,00
5	Nickel (Ni)	8,00 – 10,50
6	Phosphorus (P)	Maks. 0,045
7	Sulfur (S)	Maks. 0,030
8	Iron (Fe)	Sisa (Balance)

Sumber : ASME BPVC *Section II* 2023

2.8 Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan (*Safety Factor*) merupakan parameter desain yang digunakan untuk memastikan bahwa struktur mampu beroperasi dengan aman meskipun terdapat ketidakpastian dalam beban, sifat material, maupun kondisi operasi. Pada *pressure vessel*, faktor keamanan diterapkan dengan membatasi tegangan kerja agar tidak melebihi nilai tegangan ijin (*allowable stress*) material.

Menurut ASME *Boiler and pressure vessel Code (BPVC) Section II* dan *Section VIII Division 1*, tegangan ijin material ditetapkan sebagai fraksi dari kekuatan luluh (*yield strength*) atau kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), bergantung pada temperatur operasi dan jenis material. Pendekatan ini secara implisit telah memasukkan faktor keamanan dalam desain *pressure vessel*.

Untuk material baja tahan karat austenitik seperti SA 240 *Type 304*, ASME menetapkan *allowable stress* yang lebih rendah dari kekuatan luluh aktual guna mengakomodasi pengaruh temperatur, variasi manufaktur, dan ketidakpastian beban. Dengan demikian, struktur yang dirancang dan dianalisis menggunakan tegangan izin ASME telah memenuhi persyaratan faktor keamanan yang berlaku secara internasional.

Dalam sistem kriogenik seperti tangki LNG, penerapan faktor keamanan menjadi semakin penting karena struktur mengalami kombinasi beban tekanan internal dan perubahan temperatur ekstrem. Gradien temperatur yang besar dapat menghasilkan tegangan termal tambahan yang tidak selalu terwakili dalam perhitungan tekanan statik. Oleh karena itu, evaluasi faktor keamanan terhadap tegangan hasil simulasi FEM menjadi bagian penting dalam analisis keselamatan struktur.

2.9 Distribusi Temperatur pada *Inner Tank* LNG

Distribusi temperatur pada *inner tank* LNG merupakan parameter utama dalam analisis termomekanik karena menentukan besarnya regangan termal yang akan berkembang pada struktur. Selama proses *cool-down*, penurunan temperatur tidak terjadi secara seragam di seluruh dinding tangki. Permukaan dalam yang bersentuhan langsung dengan LNG atau media pendingin akan mengalami penurunan temperatur lebih cepat dibandingkan bagian luar, sehingga terbentuk gradien temperatur melintang dinding (*through-thickness thermal gradient*).

Dong dan Xu (2018) menunjukkan bahwa analisis *transient thermal* mampu menangkap fenomena distribusi temperatur yang berubah terhadap waktu pada tangki LNG secara realistis. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa laju pendinginan yang lebih tinggi menyebabkan gradien temperatur yang lebih tajam, terutama pada daerah dengan ketebalan pelat dan perubahan geometri. Gradien temperatur ini menjadi sumber utama munculnya tegangan termal pada struktur.

Studi eksperimental oleh Kang et al. (2018) memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa pendinginan kriogenik yang dipercepat menghasilkan perbedaan temperatur yang signifikan antara lapisan dinding bagian dalam dan luar. Kondisi ini sangat relevan dengan penelitian ini, karena variasi laju *cool-down* 120 menit, 90 menit dan 60 menit secara langsung memengaruhi pola distribusi temperatur pada *inner tank* LNG.

Dalam penelitian ini, distribusi temperatur dianalisis sebagai fungsi waktu untuk mengevaluasi seberapa besar perbedaan gradien temperatur yang terbentuk akibat variasi laju *cool-down*, dengan temperatur akhir operasi LNG sebesar -141°C pada tekanan 5 bar.

2.10 Tegangan Termal dan Tegangan Sisa

Tegangan pada tangki LNG tidak hanya dipengaruhi oleh tekanan internal, tetapi juga oleh regangan termal yang timbul akibat perubahan temperatur. Ketika gradien temperatur terbentuk pada dinding tangki, setiap lapisan material mengalami tingkat penyusutan yang berbeda, sehingga menimbulkan tegangan

termal internal. Tegangan ini dapat tetap tersisa (*residual thermal stress*) selama struktur berada pada kondisi temperatur operasi.

Lu et al. (2018) menjelaskan bahwa pada sistem LNG, konsentrasi tegangan umumnya terjadi pada area dengan perubahan geometri dan kekakuan, seperti sambungan *head-shell* dan daerah yang mengalami pembatasan deformasi oleh *support*. Ketika beban tekanan internal dikombinasikan dengan regangan termal, distribusi tegangan menjadi lebih kompleks dan nilainya meningkat dibandingkan kondisi pembebanan tunggal.

Dong dan Xu (2018) juga menunjukkan bahwa tegangan termal akibat pendinginan berkontribusi signifikan terhadap total tegangan *von mises* pada dinding tangki LNG, bahkan pada tekanan operasi yang relatif rendah. Hal ini menegaskan bahwa laju *cool-down* memiliki peran penting dalam menentukan tingkat tegangan yang terjadi.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini distribusi tegangan dianalisis menggunakan kriteria tegangan *von mises* untuk membandingkan respon struktur *inner tank* LNG pada *cool-down* standar 120 menit dan *cool-down* dipercepat 90 menit dan 60 menit, serta dievaluasi terhadap batas aman material SA 240 *Type 304* sesuai standar ASME.

2.11 Distribusi Deformasi Struktur

Deformasi merupakan respon mekanik lanjutan dari distribusi tegangan yang terjadi selama proses pendinginan dan pembebanan tekanan. Pada tangki LNG, deformasi terutama disebabkan oleh penyusutan termal material dan pembatasan pergerakan struktur oleh sistem *support*. Meskipun deformasi yang terjadi umumnya bersifat elastis, besarnya deformasi tetap menjadi indikator penting dalam menilai integritas struktural.

Sun et al. (2024) menunjukkan bahwa variasi metode dan laju *pre-cooling* pada tangki LNG menghasilkan perbedaan pola distribusi temperatur yang berdampak langsung terhadap besarnya deformasi termal. Pendinginan yang lebih cepat cenderung menghasilkan deformasi yang lebih besar karena gradien temperatur yang lebih tinggi.

Hasil simulasi FEM yang dilakukan oleh Dong dan Xu (2018) juga memperlihatkan bahwa deformasi maksimum umumnya terjadi pada bagian *shell* dan area sambungan akibat akumulasi regangan termal. Kondisi ini menjadi perhatian khusus dalam penelitian ini, karena perbandingan laju *cool-down* diharapkan dapat menunjukkan perbedaan tingkat deformasi antara dua skenario pendinginan.

Dalam penelitian ini, deformasi total dianalisis sebagai parameter pendukung untuk mengevaluasi kelayakan percepatan *cool-down* dari sudut pandang keselamatan struktur *inner tank* LNG pada tekanan 5 bar.

2.12 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Element Method* / FEM) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku struktur kompleks dengan membagi geometri menjadi elemen-elemen kecil. Melalui pendekatan ini, respon struktur terhadap beban termal maupun mekanik dapat dianalisis secara detail dalam bentuk distribusi temperatur, tegangan, dan deformasi. Pada sistem kriogenik seperti tangki LNG, FEM sangat diperlukan karena struktur mengalami kombinasi beban tekanan internal dan perubahan temperatur ekstrem yang tidak dapat dianalisis secara sederhana dengan metode analitik.

Dalam penelitian ini, simulasi FEM dilakukan menggunakan ANSYS *Workbench* karena perangkat lunak ini mampu mengintegrasikan analisis termal dan struktural secara berurutan maupun terkopel. Jenis simulasi yang digunakan disesuaikan dengan tujuan penelitian, yaitu menganalisis pengaruh laju proses *cool-down* terhadap respon termomekanik *inner tank* LNG pada tekanan 5 bar.

2.12.1 Analisis *transient thermal*

Analisis *transient thermal* digunakan untuk memodelkan perubahan temperatur terhadap waktu selama proses *cool-down* pada *inner tank* LNG. Berbeda dengan analisis *steady-state* yang hanya merepresentasikan kondisi akhir, analisis transien mampu menangkap proses penurunan temperatur secara bertahap maupun lebih cepat, sehingga relevan untuk menggambarkan kondisi aktual selama pendinginan tangki LNG. Melalui pendekatan ini, perkembangan temperatur pada dinding tangki dapat diamati secara kontinu seiring berjalannya waktu pendinginan.

Pada analisis ini, parameter utama yang dievaluasi meliputi distribusi temperatur pada dinding *inner tank* sebagai fungsi waktu, gradien temperatur antara permukaan bagian dalam dan luar dinding tangki, serta laju penurunan temperatur yang dihasilkan akibat variasi durasi *cool-down*. Penelitian Dong dan Xu (2018) menunjukkan bahwa analisis *transient thermal* efektif dalam memprediksi distribusi dan gradien temperatur pada tangki LNG selama proses pendinginan dan pengisian. Temuan tersebut diperkuat oleh Kang et al. (2018), yang menyatakan bahwa laju pendinginan yang lebih tinggi akan menghasilkan gradien temperatur yang lebih besar, sehingga berpotensi meningkatkan respon tegangan termal pada struktur kriogenik.

Dalam penelitian ini, analisis *transient thermal* dilakukan untuk tiga skenario durasi *cool-down*, yaitu *cool-down* standar selama 120 menit serta dua skenario percepatan dengan durasi 90 menit dan 60 menit. Pada setiap skenario, temperatur fluida LNG diturunkan secara bertahap hingga mencapai temperatur operasi -141°C , sedangkan temperatur awal dinding tangki diasumsikan berada pada kondisi lingkungan. Hasil analisis ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi pengaruh variasi durasi *cool-down* terhadap respon termomekanik *inner tank* LNG pada tekanan operasi 5 bar.

2.12.2 Analisis static structural

Analisis *static structural* digunakan untuk mengevaluasi respon mekanik struktur akibat kombinasi beban tekanan internal dan regangan termal yang dihasilkan dari analisis *transient thermal*. Pada tahap ini, medan temperatur hasil analisis termal digunakan sebagai *thermal load* pada model struktural.

Parameter utama yang dianalisis pada *static structural* meliputi:

1. Tegangan *von mises*
2. Deformasi total struktur
3. Lokasi konsentrasi tegangan, khususnya pada daerah sambungan *head-shell*

Lu et al. (2018) menjelaskan bahwa pada tangki LNG, tekanan internal dan temperatur rendah secara bersamaan menghasilkan distribusi tegangan yang kompleks, sehingga analisis struktural sangat diperlukan untuk memastikan tegangan yang terjadi masih berada di bawah batas aman material. Marpaung et al.

(2022) juga membuktikan bahwa pendekatan FEM mampu menggambarkan respon tegangan dan deformasi ISO *tank* LNG secara representatif pada kondisi operasi tertentu.

Dalam penelitian ini, analisis *Static Structural* dilakukan dengan:

- Tekanan internal sebesar 5 bar
- Pembatasan deformasi pada *area support*
- Regangan termal hasil *transient thermal analysis*

2.12.3 Keterkaitan analisis termal dan struktural

Kombinasi analisis *transient thermal* dan *static structural* memungkinkan evaluasi respon termomekanik secara menyeluruh. Sun et al. (2024) menegaskan bahwa variasi metode dan laju pendinginan secara langsung memengaruhi distribusi temperatur, yang kemudian berdampak pada besarnya tegangan termal. Oleh karena itu, pendekatan berurutan antara analisis termal dan struktural menjadi metode yang tepat untuk menilai risiko struktural akibat percepatan proses *cool-down*.

Melalui pendekatan ini, penelitian dapat menunjukkan perbedaan respon struktur *inner tank* LNG antara kondisi *cool-down* standar dan *cool-down* dipercepat, serta menilai apakah percepatan laju pendinginan masih berada dalam batas aman material SA 240 *Type 304*.

2.13 Analisis Data

Analisis data pada penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil simulasi menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk mengevaluasi respons termomekanik *inner tank* LNG selama proses *cool-down*. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi temperatur, gradien temperatur, tegangan ekuivalen (*von Mises stress*), serta deformasi struktur yang dihasilkan akibat perubahan temperatur selama proses pendinginan. Seluruh parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan perilaku struktur ketika mengalami beban termal dan tekanan internal secara bersamaan.

Hasil simulasi kemudian dibandingkan pada tiga variasi laju *cool-down*, yaitu 120, 90, dan 60 menit dengan tekanan operasi yang dijaga konstan sebesar 5

bar. Perbandingan dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh perbedaan laju pendinginan terhadap distribusi temperatur serta respons mekanik yang terjadi pada *inner tank*. Melalui analisis tersebut dapat diketahui perubahan nilai tegangan dan deformasi yang diakibatkan oleh setiap variasi *cool-down*, sehingga dapat ditentukan kondisi pendinginan yang memberikan respons struktur paling baik.

Selanjutnya, hasil tegangan maksimum yang diperoleh dari simulasi dievaluasi dengan membandingkannya terhadap batas tegangan izin (*allowable stress*) material SA 240 Type 304 sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section II – Materials* dan filosofi perancangan ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1*. Tahap evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa kondisi operasi yang disimulasikan masih berada dalam batas aman material, sehingga integritas struktur *inner tank* tetap terjaga selama proses *cool-down* sebelum pengisian LNG dilakukan.

2.14 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Kesimpulan Utama
1	Dong, H., & Xu, Q. (2018)	<i>Finite Element Analysis on the Thermal Stress of LNG Carriers' Tanks</i>	Analisis FEM menunjukkan bahwa gradien temperatur selama proses pendinginan dan pengisian LNG berperan signifikan terhadap terbentuknya tegangan termal pada struktur tangki. Tegangan maksimum cenderung terjadi pada area transisi geometris ketika pendinginan berlangsung cepat.
2	Kang, Z., Li, Y., Ma, Y., Wang, L., & Xie, F. (2018)	<i>Experimental Study on Cool-down Characteristics and Thermal Stress of Cryogenic Tank during LN₂ Filling Process</i>	Hasil eksperimen dan simulasi menunjukkan bahwa laju pendinginan yang lebih cepat menghasilkan gradien temperatur lebih tinggi dan meningkatkan tegangan termal pada dinding tangki kriogenik. Pendinginan bertahap terbukti lebih aman secara struktural.
3	Sun, Q., Zhang, Y., Lv, Y., Peng, D., Zhang, S., Lu, Z., & Yan, J. (2024)	<i>Comparative Analysis of Heat Transfer in a Type B LNG Tank Pre-Cooling Process Using Various Refrigerants</i>	Studi ini menunjukkan bahwa variasi metode dan laju <i>pre-cooling</i> secara langsung memengaruhi distribusi temperatur dan tingkat ketidakseragaman termal pada tangki LNG, yang berimplikasi pada respon tegangan termal struktur.

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Kesimpulan Utama
4	Lu, H., Ma, G., Li, X., & Wu, S. (2018)	<i>Stress Analysis of LNG Storage Tank Outlet Pipes and Flanges</i>	Analisis struktural menunjukkan bahwa kombinasi beban temperatur dan tekanan internal menghasilkan respon tegangan yang lebih kompleks dibandingkan pembebanan tunggal, terutama pada komponen LNG yang mengalami perubahan temperatur cepat.
5	Marpaung, F., Wibowo, E. T., & Harmadi, R. (2022)	<i>Desain dan Analisis Tanki ISO LNG Kapasitas 40 Feet Menggunakan Teknik Finite Element Analysis</i>	Studi ini membuktikan bahwa FEM dapat digunakan secara efektif untuk menganalisis perilaku struktur ISO tank LNG, termasuk distribusi tegangan akibat tekanan internal, dan menjadi dasar validasi metode numerik pada penelitian tangki LNG skala ISO.

2.14.1 Research gap

Berbagai penelitian terdahulu telah membahas perilaku termal dan tegangan pada tangki LNG menggunakan pendekatan numerik maupun eksperimental. Dong dan Xu (2018) serta Zhang dan Cai (2011) menunjukkan bahwa perubahan temperatur pada struktur tangki LNG dapat menimbulkan gradien temperatur dan konsentrasi tegangan, terutama pada area sambungan geometris. Namun, kajian tersebut lebih berfokus pada tangki LNG skala besar atau konfigurasi struktur tertentu, tanpa mengaitkannya dengan variasi durasi proses *cool-down* yang bersifat operasional.

Penelitian eksperimental oleh Kang et al. (2018) mengkaji karakteristik pendinginan tangki kriogenik selama pengisian LN₂ dan menemukan bahwa laju pendinginan berpengaruh langsung terhadap tegangan termal. Meskipun demikian, penelitian tersebut menggunakan media pendingin dan material yang berbeda dari tangki LNG berbahan *stainless steel* austenitik, serta tidak mengevaluasi kondisi tekanan operasi yang relevan dengan ISO LNG *tank*. Studi terbaru oleh Sun et al. (2024) menganalisis proses *pre-cooling* pada tangki LNG tipe B dengan variasi media pendingin, namun fokus utamanya berada pada aspek perpindahan panas dan keseragaman temperatur, bukan pada evaluasi respon mekanik dan faktor keamanan struktur.

Di sisi lain, kajian numerik seperti yang dilakukan oleh Lu et al. (2018) dan Marpaung et al. (2022) telah membahas analisis tegangan pada komponen tangki LNG dan ISO LNG *tank* menggunakan metode elemen hingga. Namun, penelitian tersebut belum secara spesifik mengaitkan variasi durasi *cool-down* dengan respon

termomekanik *inner tank* pada kondisi operasi nyata, yaitu temperatur LNG -141°C dan tekanan internal 5 bar.

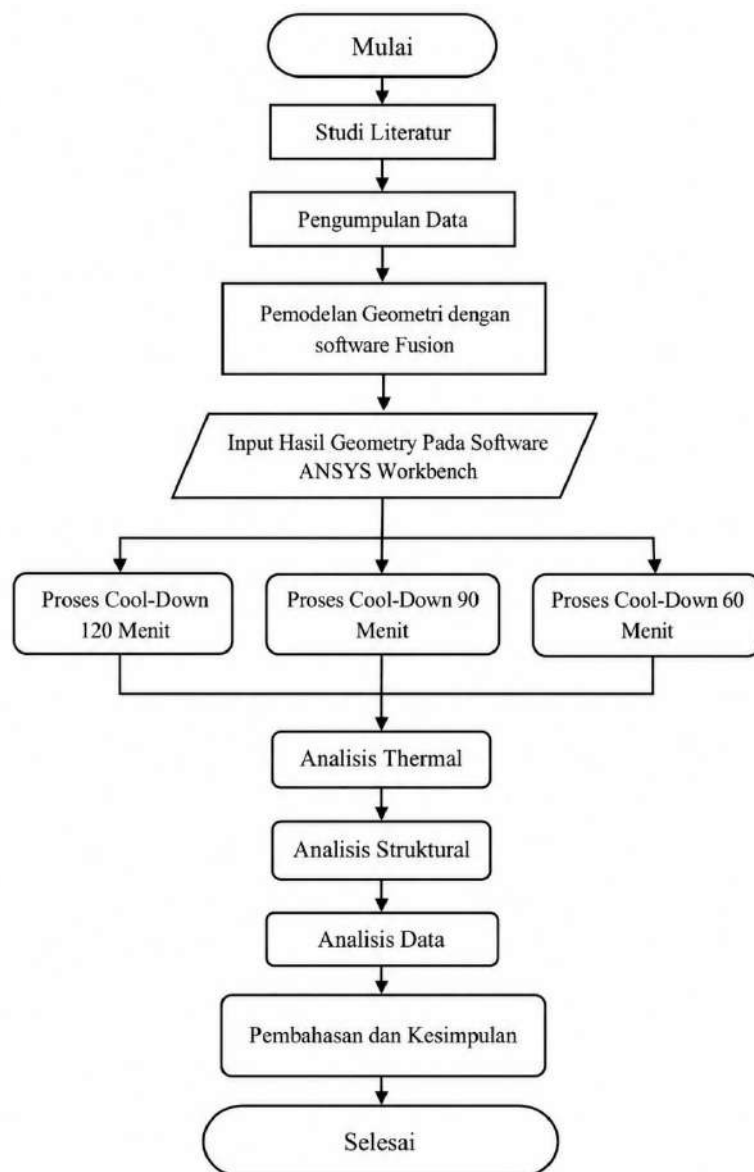
Berdasarkan tinjauan tersebut, dapat disimpulkan bahwa masih terdapat celah penelitian terkait pengaruh variasi durasi *cool-down* yang bersifat praktis (120, 90, dan 60 menit) terhadap respon termomekanik *inner tank* ISO LNG berbahan SA 240 *Type* 304 pada tekanan operasi 5 bar. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah tersebut dan memberikan dasar teknis yang relevan terhadap permasalahan operasional yang sering muncul di industri.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Untuk mempermudah pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini, maka disusun suatu diagram alir. Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Studi Literatur

Pada tahap studi literatur peneliti mengumpulkan literasi terkait teori-teori dasar yang nantinya berfungsi untuk membantu dalam pelaksanaan tugas akhir. Data yang dikumpulkan pada studi literatur adalah data tentang material, *handbook*, dan jurnal ilmiah yang pembahasannya selaras dengan penelitian yang akan dilakukan.

3.3 Perumusan Masalah

Setelah seluruh referensi yang relevan dan sejalan dengan topik penelitian berhasil dikumpulkan, tahap selanjutnya adalah menyusun pokok-pokok masalah dan arah tujuan penelitian. Poin-poin inilah yang kemudian menjadi dasar mengapa penelitian perlu dilakukan. Selanjutnya, dasar tersebut dikembangkan lebih rinci menjadi uraian latar belakang yang telah dijelaskan pada bagian awal penelitian.

3.4 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengacu pada manual book tangki LNG, standar desain, dan literatur pendukung. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Data geometri *inner tank* LNG, meliputi diameter *shell*, panjang silinder, jenis *head*, serta posisi *support*.
2. Material *inner tank*, yaitu *stainless steel* SA 240 Type 304.
3. Properti material bergantung temperatur, meliputi modulus elastisitas, konduktivitas termal, *specific heat*, koefisien ekspansi termal, densitas, dan *Poisson's ratio*, yang diperoleh dari ASME Section II, basis data NIST, dan *datasheet* Outokumpu.
4. Kondisi operasi tangki, yang meliputi:
 - Temperatur awal dinding tangki: 25 °C
 - Temperatur operasional LNG: -141 °C
 - Tekanan internal: 5 bar

Data-data tersebut digunakan sebagai input utama dalam proses simulasi FEM. Data properti material untuk simulasi FEM dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Properti Material SA 240 Type 304 untuk Simulasi FEM

No	Properti Material	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan / Sumber
1	Modulus Elastisitas (25°C)	E	193	GPa	ASME BPVC Section II
2	Modulus Elastisitas (-141°C)	E	210	GPa	NIST Cryogenic Database
3	Poisson's Ratio	ν	0,29	–	ASME BPVC Section II
4	Yield Strength (25°C)	σ_y	205	MPa	ASME BPVC Section II
5	Yield Strength (-141°C)	σ_y	270	MPa	ASME Section VIII Div. 1 App. 44
6	Ultimate Tensile Strength	σ_u	515	MPa	ASME BPVC Section II
7	Konduktivitas Termal (25°C)	k	16,2	W/m·K	Outokumpu Datasheet
8	Konduktivitas Termal (-141°C)	k	9,5	W/m·K	NIST Cryogenic Database
9	Specific Heat (25°C)	c_p	500	J/kg·K	Outokumpu Datasheet
10	Specific Heat (-141°C)	c_p	350	J/kg·K	NIST Cryogenic Database
11	Koefisien Ekspansi Termal (25°C)	α	$17,3 \times 10^{-6}$	1/K	ASME BPVC Section II
12	Koefisien Ekspansi Termal (-141°C)	α	$10,5 \times 10^{-6}$	1/K	NIST Cryogenic Database
13	Density	ρ	8000	kg/m ³	ASME / Outokumpu
14	Temperatur Awal Analisis	T ₀	25	°C	Kondisi awal simulasi
15	Temperatur Operasi LNG	T	-141	°C	Kondisi operasi (5 bar)

3.5 Penetapan Variasi Durasi Waktu dan Laju *Cool-down*

Dalam penelitian ini, parameter utama yang dianalisis adalah laju proses *cool-down*. Laju *cool-down* didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan temperatur dinding tangki terhadap waktu pendinginan, yang secara matematis dinyatakan pada Persamaan 3.1 berikut:

$$\text{Laju } cool\text{-down} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.1)$$

di mana:

- ΔT = Perubahan temperatur
- Δt = Durasi *cool-down*

Dengan temperatur awal dinding tangki sebesar 25 °C dan temperatur operasional LNG sebesar -141 °C, maka perubahan temperatur total yang dianalisis adalah sebesar 166 °C. Variasi durasi waktu *cool-down* yang digunakan terdiri dari:

- 120 menit sebagai kondisi *cool-down* standar.
- 90 menit sebagai *cool-down* dipercepat tingkat menengah.
- 60 menit sebagai *cool-down* dipercepat tingkat tinggi.

Pemilihan variasi waktu tersebut bertujuan menghasilkan perbedaan laju pendinginan yang cukup signifikan namun tetap berada dalam rentang yang masuk

akal secara operasional. Dengan pendekatan ini, pengaruh peningkatan laju *cool-down* terhadap respon termomekanik struktur dapat dianalisis secara lebih representatif.

3.6 Penentuan Ketebalan Plat

Ketebalan pelat *inner tank* ditentukan berdasarkan ketentuan desain bejana tekan sesuai ASME *Section VIII Division 1* dengan mempertimbangkan tekanan operasi sebesar 5 bar dan sifat material SA 240 *Type 304*. Parameter yang digunakan meliputi tekanan internal, jari-jari tangki, *allowable stress* material dari ASME *Section II*, serta faktor keselamatan yang disyaratkan.

Apabila ketebalan pelat telah ditentukan dalam I tangki LNG, maka nilai tersebut digunakan sebagai acuan. Jika tidak tersedia, ketebalan pelat dihitung menggunakan persamaan desain standar untuk bejana tekan silindris.

3.7 Pemodelan Geometri Menggunakan Autodesk Fusion 360

Pemodelan geometri *inner tank* dilakukan menggunakan perangkat lunak autodesk *fusion 360*. Pemodelan dilakukan dengan pendekatan penyederhanaan geometri agar simulasi dapat berjalan lebih efisien, namun tetap mewakili kondisi aktual tangki LNG.

Gambar *general arrangement* yang digunakan dalam penelitian ini tidak merepresentasikan desain ISO *tank* milik perusahaan secara langsung. Geometri yang digunakan merupakan model tangki LNG yang disederhanakan dan dimodifikasi agar sesuai dengan karakteristik *inner tank* ISO LNG. Pendekatan ini dilakukan untuk menjaga kerahasiaan data perusahaan, sekaligus memastikan bahwa model yang dianalisis tetap representatif secara teknis terhadap fenomena termomekanik yang diteliti.

Geometri yang dimodelkan meliputi *shell* silinder, *head*, dan *support (saddle)*. Model dibuat dalam bentuk *half-geometry* dengan memanfaatkan prinsip simetri struktur untuk mengurangi beban komputasi. Pendekatan ini telah banyak digunakan pada penelitian tangki LNG sebelumnya (Zhang & Cai, 2011). Model

geometri kemudian diekspor dalam format STEP untuk digunakan pada proses analisis di ANSYS *Workbench*.

3.8 Input Geometry pada ANSYS *Workbench*

Setelah geometri dimodelkan, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis menggunakan ANSYS *Workbench*.

3.8.1 Pre-processing di ANSYS *Workbench*

Pada tahap ini, geometri diimpor ke dalam ANSYS *Workbench* dan dilakukan pemeriksaan kontak antar komponen serta penerapan kondisi simetri. Selanjutnya, pada menu *engineering data* dimasukkan properti material SA 240 Type 304 yang bergantung temperatur.

Proses *meshing* dilakukan menggunakan elemen *tetrahedral*, dengan *refinement* pada area sambungan *head-shell* karena area tersebut berpotensi mengalami konsentrasi tegangan tinggi.

3.8.2 Transient thermal analysis

Analisis *transient thermal* dilakukan untuk mensimulasikan proses *cool down* pada *inner tank* LNG. Pada tahap ini, temperatur fluida LNG ditetapkan menuju $-141\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan fungsi waktu yang berbeda untuk masing-masing variasi *cool-down*. Analisis ini bertujuan memperoleh distribusi temperatur dan gradien temperatur pada dinding tangki sebagai fungsi waktu.

3.8.3 Analisis static structural

Hasil distribusi temperatur dari analisis *transient thermal* selanjutnya ditransfer ke modul *static structural* sebagai beban termal. Selain beban termal, diberikan pula tekanan internal sebesar 5 bar serta pembatasan deformasi pada area *support*. Analisis ini bertujuan untuk memperoleh nilai tegangan *von mises*, deformasi total, serta lokasi konsentrasi tegangan pada struktur *inner tank*.

3.8.4 Evaluasi faktor keamanan pada simulasi FEM

Pada penelitian ini, faktor keamanan dievaluasi berdasarkan perbandingan antara tegangan maksimum hasil simulasi FEM dan tegangan ijin material SA 240 Type 304 yang ditetapkan oleh ASME. Tegangan maksimum diperoleh dari hasil

analisis *static structural* dalam bentuk tegangan *von mises*, yang merepresentasikan kondisi tegangan ekuivalen pada struktur.

Pendekatan faktor keamanan yang digunakan dalam penelitian ini dinyatakan pada Persamaan 3.2 berikut:

$$SF = \frac{\sigma_{allowable}}{\sigma_{max}} \quad (3.2)$$

di mana:

- $\sigma_{allowable}$ = tegangan ijin material berdasarkan ASME BPVC *section II*
- σ_{max} = tegangan maksimum (*von mises*) hasil simulasi FEM

Kriteria keselamatan yang digunakan adalah:

- $SF \geq 1$: struktur berada dalam kondisi aman
- $SF < 1$: struktur tidak memenuhi kriteria keselamatan

Perhitungan faktor keamanan dilakukan untuk setiap variasi durasi *cool-down*, yaitu *cool-down* standar 120 menit, serta dua skenario percepatan dengan durasi 90 menit dan 60 menit, pada tekanan tetap sebesar 5 bar. Perbandingan nilai faktor keamanan antar ketiga skenario tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh percepatan laju pendinginan terhadap tingkat keselamatan struktur *inner tank* LNG.

Pendekatan ini sejalan dengan praktik evaluasi keselamatan struktur berbasis metode elemen hingga pada *pressure vessel* kriogenik, di mana hasil tegangan numerik dibandingkan secara langsung dengan tegangan izin material yang ditetapkan oleh standar desain sebagai dasar penilaian kelayakan dan keamanan struktur.

3.9 Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi antara durasi *cool-down* 120 menit, 90 menit, dan 60 menit. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi temperatur, gradien temperatur, tegangan maksimum, serta deformasi struktural. Nilai tegangan maksimum kemudian dibandingkan dengan *allowable stress* material SA 240 *Type 304* untuk menilai tingkat keamanan struktur. Parameter simulasi dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Parameter Simulasi

No	Parameter	120 menit	90 menit	60 menit	Satuan
1	Temperatur awal dinding	25	25	25	°C
2	Temperatur akhir LNG	-141	-141	-141	°C
3	Perubahan temperatur (ΔT)	166	166	166	°C
4	Durasi <i>Cool-down</i> (Δt)	120	90	60	menit
5	Laju <i>cool-down</i>	1.38	1.84	2.77	°C/menit
6	Tekanan internal	5	5	5	bar

3.10 Pembahasan dan Kesimpulan serta Data Pembeding

Berdasarkan hasil analisis dan pengolahan data yang telah dilakukan, selanjutnya dilakukan pembahasan untuk menjelaskan pengaruh variasi laju *cool-down* terhadap respon termomekanik *inner tank* LNG pada tekanan 5 bar. Pembahasan ini juga dikaitkan dengan hasil penelitian terdahulu dan juga data pembeding dari durasi *cool-down* aktual dari perusahaan sebagai bentuk validasi metode. Dari pembahasan tersebut kemudian ditarik kesimpulan yang akan dirumuskan secara lengkap pada BAB V, serta disertai saran untuk penelitian selanjutnya.

halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Ketebalan

Penentuan ketebalan dilakukan dengan perhitungan *inner shell*. Perhitungan ketebalan *inner shell* dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 4.1 berikut.

$$t_r = \frac{P_c R}{SE_1 - 0.6P_c} \quad (4.1)$$

Data dari material *inner tank* yaitu :

P	= 0.92 MPa
R	= 1250 mm
S	= 270 MPa
E	= 1

Di mana :

P	: <i>Design Pressure</i>
R	: <i>Jari-jari</i>
S	: <i>Stress Value</i>
E	: <i>Joint Efficiency</i>

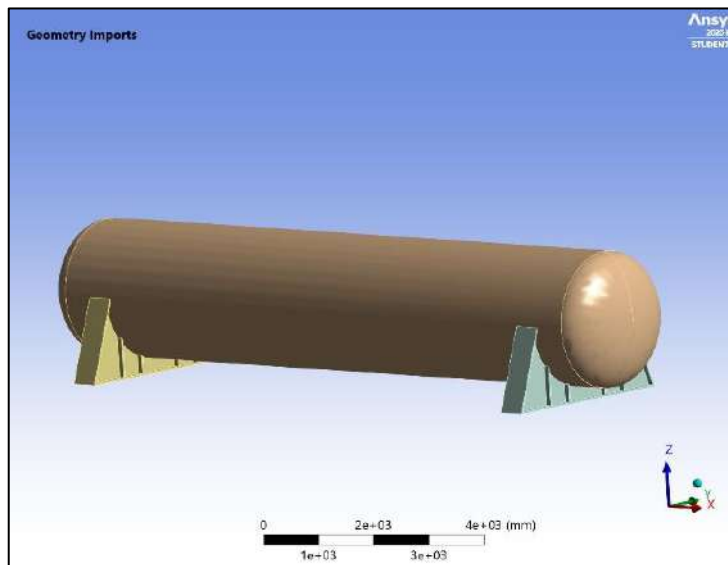
$$t_r = \frac{P_c R}{SE_1 - 0.6P_c} = \frac{0.92 \times 1250}{270 \times 1 - 0.6 \times 0.92} = 4.27 \text{ mm}$$

Pada proses perhitungan tebal *shell required* sebesar 4.27 mm, sehingga tebal yang akan digunakan pada *shell* sebesar 5 mm agar tidak kurang dari hasil perhitungan tebal. Pada perhitungan tebal *ellipsoidal head* hasil perhitungan ternyata sama dengan *shell* 4.27 mm, tetapi ketebalan plat yang dibutuhkan berbeda karena harus mempertimbangkan *thinning allowance* yaitu efek

penipisan ketika proses *head forming* terjadi, sehingga pada ketebalan *ellipsoidal head* dipilih ketebalan plat 6 mm.

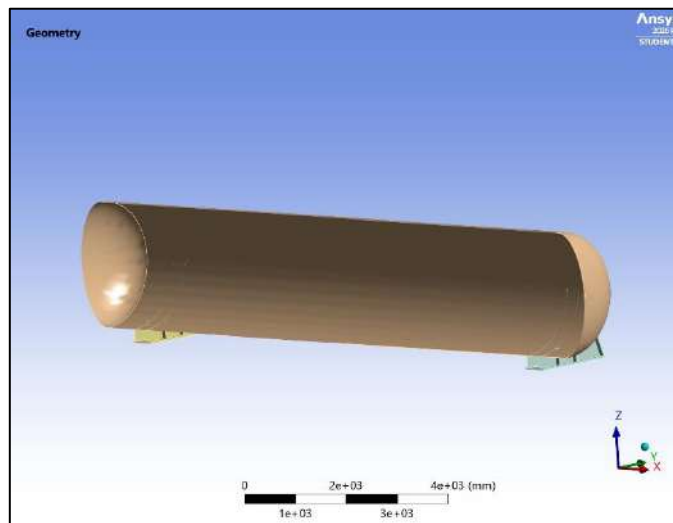
4.2 Pemodelan Geometri Tangki LNG

Model dari geometri dilakukan dengan mendesain menggunakan *software* autodesk *fusion 360* dengan ukuran sesuai dengan yang direncanakan. Tangki yang dimodelkan adalah tangki horizontal berkapasitas 60 m³. Hasil dari pemodelan di autodesk *fusion 360* kemudian di *export* menjadi format STEP. Detail dari desain dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pemodelan Geometri

Untuk detail dari geometri tangki dapat dilihat pada gambar 4.1, tangki menggunakan geometri utuh dan agar dapat terlihat surface bagian dalam tangki maka digunakan *section plane* dan tangki dipotong menjadi setengah seperti yang terlihat pada gambar. Untuk detailnya dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Detail *Geometry Section Plane*

4.3 Konvergensi *Mesh*

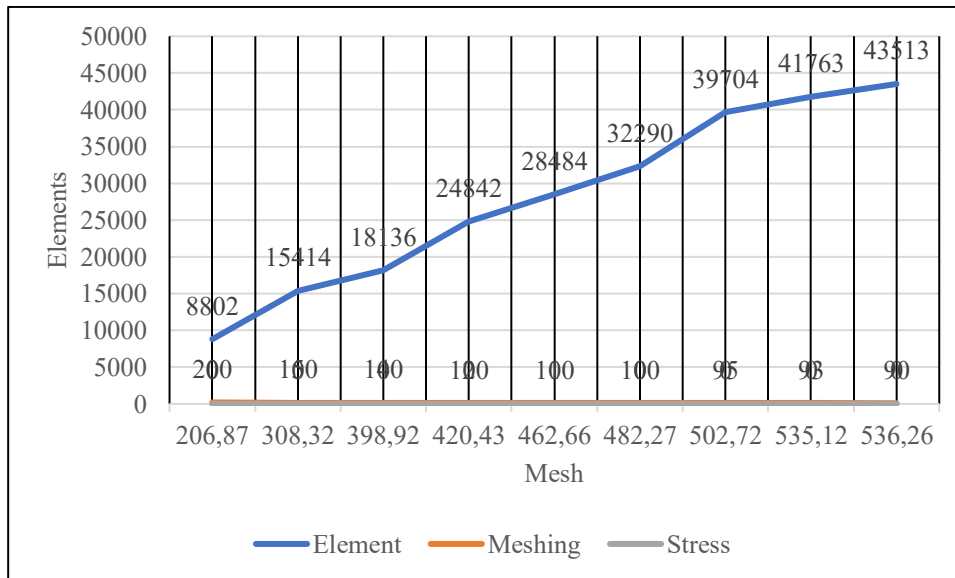
Konvergensi *mesh* pada geometri tangki ansys berfungsi untuk memastikan hasil simulasi akurat dan tidak berubah meski ukuran *mesh* dihaluskan lagi dilakukan dengan merubah *element size* saat melakukan *meshing* pada model. Rentang atau jarak *element size* untuk material SA 240 Type 304 mulai dari 200 mm, 150 mm, 100 mm, 93 mm, 90 mm setiap analisis diberikan *pressure* sebesar 0.5 MPa. Hasil konvergensi tertera pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.3.

Tabel 4.1 Hasil Konvergensi SA 240

<i>Meshing</i>	<i>Element</i>	<i>Stress (MPa)</i>
200	8802	206,87
150	15414	308,32
140	18136	398,92
120	24842	420,43
110	28484	462,66
100	32290	482,27
95	39704	502,72
93	41763	535,12
90	43513	536,26

Berdasarkan hasil uji konvergensi, peningkatan jumlah elemen menyebabkan perubahan nilai tegangan maksimum semakin kecil. Pada ukuran *mesh* yang dipilih yaitu 90, selisih tegangan maksimum terhadap ukuran *mesh*

sebelumnya sebesar 0.21%, sehingga telah memenuhi kriteria konvergensi karena berada di bawah 5%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran *mesh* yang digunakan telah menghasilkan solusi yang stabil sehingga layak digunakan pada seluruh simulasi penelitian.



Gambar 4.3 Grafik Konvergensi *Mesh*

4.4 Proses Simulasi

Proses simulasi pada simulasi ini dengan pemberian beban *heat flow* untuk menggambarkan *perfect insulation* pada *vacuum* pada luar bagian *inner tank* yaitu tidak ada temperatur yang keluar dari dalam *inner tank*. Selain itu pemberian beban *convection* pada simulasi ini juga diberikan untuk mengasumsikan perpindahan panas atau *heat loss*. Pemberian beban *convection* pada simulasi ini diberikan dengan nilai $100 \text{ W/m}^2\text{.K}$ dengan asumsi pendekatan koefisien perpindahan panas efektif rata-rata (*Lumped/Equivalent Heat Transfer Coefficient*) selama jendela simulasi (*conjugate heat transfer*). Angka $100 \text{ W/m}^2\text{.K}$ diperoleh dari nilai rata-rata integral antara fase *film boiling* yang rendah dan fase *nucleate boiling* yang sangat tinggi saat cairan LNG menyemprot dinding tangki yang bernilai $100\text{-}1500 \text{ W/m}^2\text{.K}$. dimana nilai pendekatan menengah yang disepakati untuk kestabilan simulasi struktural berkisar antara $100\text{-}1200 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (Sun et al., 2024). Pemilihan *convection* dilakukan pada *surface* dalam *inner tank*. *Film coefficient* untuk

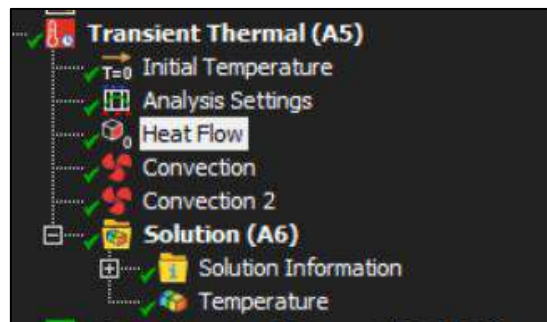
convection dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Film Coefficient Convection*

<i>Convection Process</i>	<i>Film Coefficient (W/m².K)</i>			
	<i>Air</i>	<i>Liquid</i>	<i>Gas</i>	<i>Oil</i>
<i>Free/Natural</i>	10-100	50-3000	5-37	50-350
<i>Forced</i>	10-1000	50-10000	10-350	300-1700

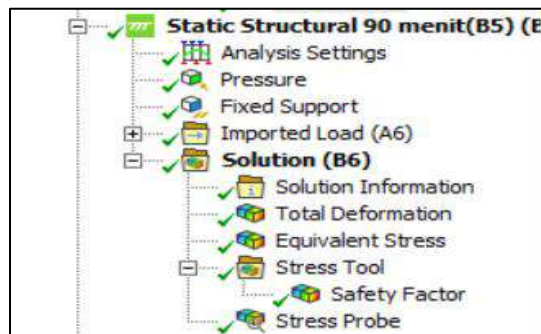
Sumber: ANSYS, 2020

Kemudian pada simulasi ini juga ditambahkan metode *heat flow*. Prinsipnya agar sesuai dengan tangki LNG *double wall* yang terdapat insulasi berupa *vacuum* agar temperatur tangki bagian dalam tidak keluar dan juga sebaliknya temperatur pada luar tangki tidak masuk kedalam tangki bagian dalam yang bersentuhan langsung dengan cairan LNG yang dapat menyebabkan perubahan temperatur pada tangki bagian dalam sehingga diberikan *heat flow perfectly insulated* pada surface bagian luar tangki. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat *outline tree* dari *transient thermal* pada Gambar 4.4 berikut ini.



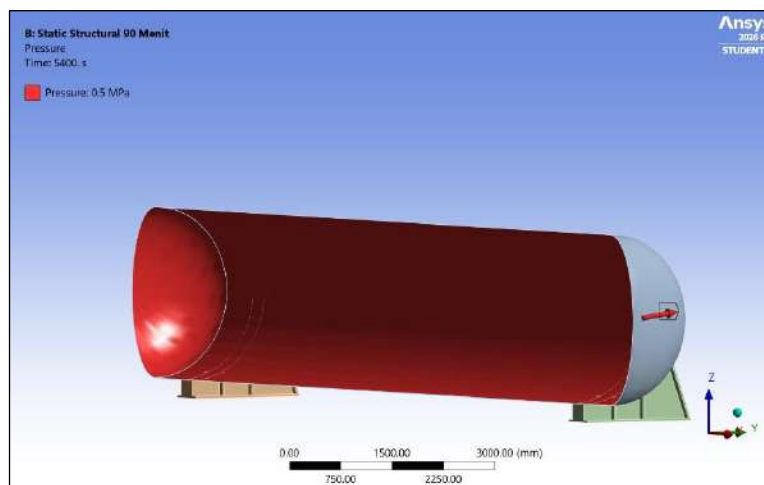
Gambar 4.4 *Outline Tree Transient Thermal*

Setelah analisis *transient thermal* dilakukan selanjutnya analisis ditarik ke *static structural* untuk mencari nilai tegangan dan deformasi. Setelah itu dilakukan *import body temperature* dari hasil analisis *thermal transient* sebelumnya. Selanjutnya diberikan *boundary condition* dengan cara diberikan *support* pada bagian *support* yang dimodelkan. Pada simulasi kali ini dipilih jenis *support* yaitu *fixed support*. Pemilihan jenis *support* ini dikarenakan asumsi kondisi *inner* tangki agar sesuai aktual tidak bergerak bebas dengan support dibawahnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat *outline tree* dari *static structural* pada Gambar 4.5 berikut ini



Gambar 4.5 Outline Tree Static Structural

Kemudian pada simulasi ini juga ditambahkan *pressure*. Prinsipnya agar sesuai dengan *internal pressure* yang ada pada tangki LNG sebesar 5 bar pada saat operasi. Pada simulasi dipilih pada bagian surface bagian dalam tangki. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut ini.



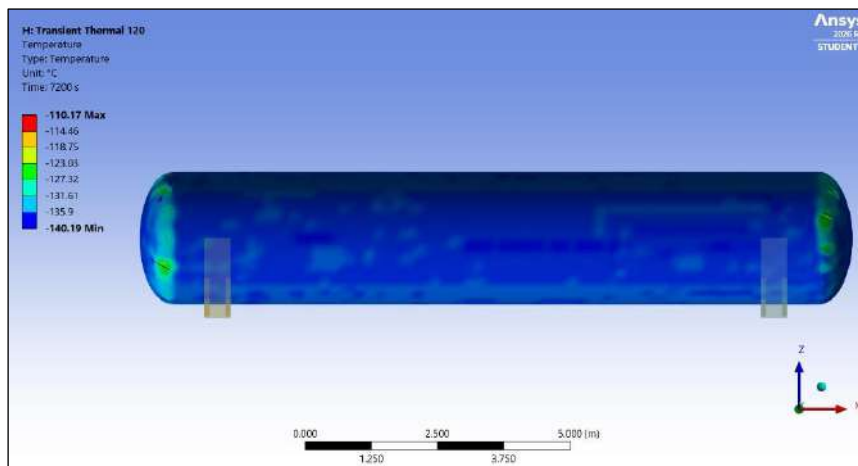
Gambar 4.6 Apply Pressure 5 Bar Pada Surface Dalam Tangki

4.5 Hasil Analisis Model

Pada analisis yang dilakukan *software ANSYS* akan melakukan pemodelan matematis dari gaya dan beban yang telah diberikan. Pada hasil analisis didapatkan berupa distribusi temperatur, tegangan, deformasi, dan *safety factor*.

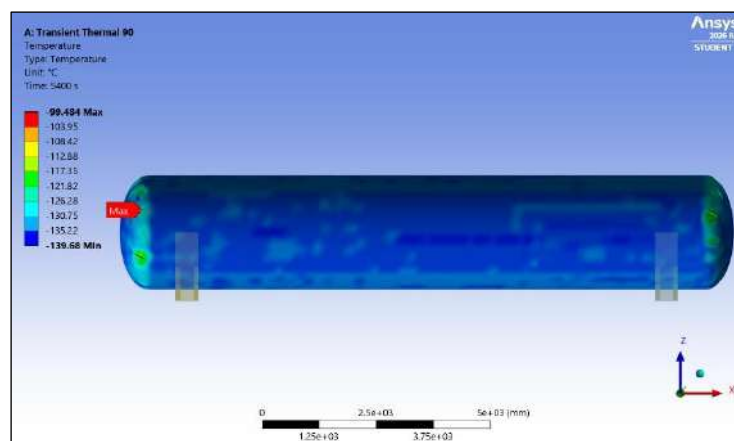
4.5.1 Distribusi temperatur

Analisis dari *transient thermal* ini digunakan untuk memodelkan perubahan temperatur terhadap waktu selama proses *cool-down*. Hasil analisis distribusi temperatur variasi 120 menit, 90 menit, dan 60 menit dapat dilihat pada Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9.



Gambar 4.7 Hasil Distribusi Temperatur Variasi *Cool-down* 120 Menit

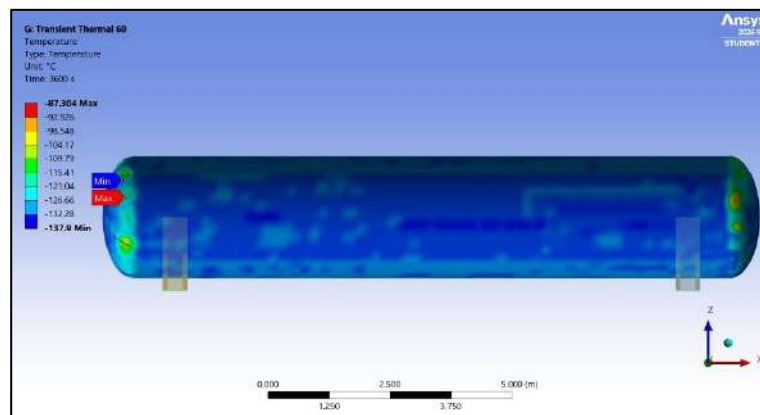
Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai distribusi temperatur pada variasi *cool-down* 120 menit dengan nilai minimum temperatur sebesar -110.17°C dan nilai maksimum sebesar -140.19°C . Dengan nilai dari perhitungan laju perubahan temperatur secara matematis sebesar $1.38^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar dan warna biru menunjukkan nilai yang paling rendah. Terlihat pada fungsi *probe* distribusi temperatur yang diterapkan distribusi temperatur belum merata pada bagian sambungan *head-shell* dan belum mencapai suhu operasi tangki di temperatur -141°C . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.8 Hasil Distribusi Temperatur Variasi *Cool-down* 90 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai distribusi temperatur pada variasi *cool-down* 90 Menit dengan nilai minimum temperatur sebesar -99.48°C dan nilai maksimum sebesar -139.68°C . Dengan nilai

dari perhitungan laju perubahan temperatur secara matematis sebesar $1.84^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar dan warna biru menunjukkan nilai yang paling rendah. Terlihat pada fungsi *probe* distribusi temperatur yang diterapkan distribusi temperatur belum merata pada bagian sambungan *head-shell* dan belum mencapai suhu operasi tangki di temperatur - 141°C . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.8.

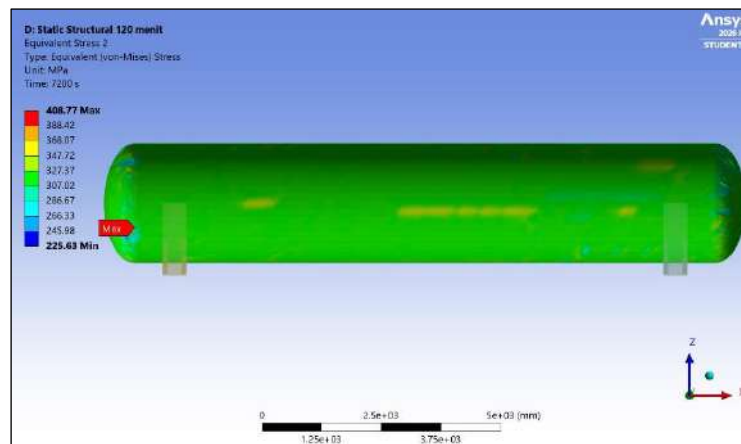


Gambar 4.9 Hasil Distribusi Temperatur Variasi *Cool-down* 60 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai distribusi temperatur pada variasi *cool-down* 60 Menit dengan nilai minimum temperatur sebesar -87.30°C dan nilai maksimum sebesar -137.9°C . Dengan nilai dari perhitungan laju perubahan temperatur secara matematis sebesar $2.77^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar dan warna biru menunjukkan nilai yang paling rendah. Terlihat pada fungsi *probe* distribusi temperatur yang diterapkan distribusi temperatur belum merata pada bagian sambungan *head-shell* dan belum mencapai suhu operasi tangki di temperatur - 141°C . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.9.

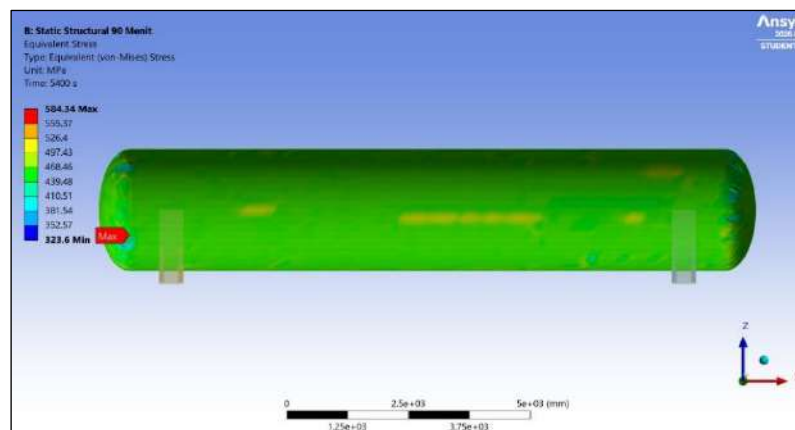
4.5.2 Tegangan *von mises*

Tegangan *von mises* khususnya tegangan pada tangki adalah tegangan internal yang muncul akibat adanya gradien perubahan suhu yang menyebabkan pemuaian atau penyusutan material. Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 4.10, Gambar 4.11, dan Gambar 4.12.



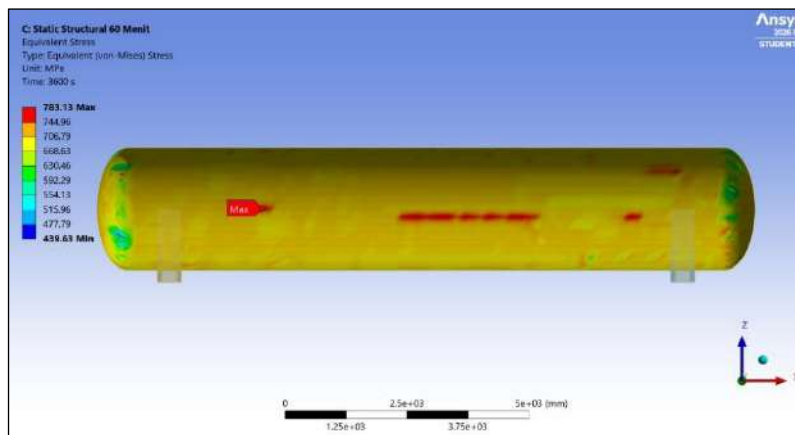
Gambar 4.10 Hasil Dari Tegangan *Von Mises* Waktu 120 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai tegangan *von mises* pada variasi *cool-down* 120 menit dengan nilai maksimum tegangan sebesar 408.77 MPa. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.11 Hasil Tegangan *Von Mises* Waktu 90 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai tegangan *von mises* pada variasi *cool-down* 90 Menit dengan nilai maksimum tegangan sebesar 584.34 MPa. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.11.

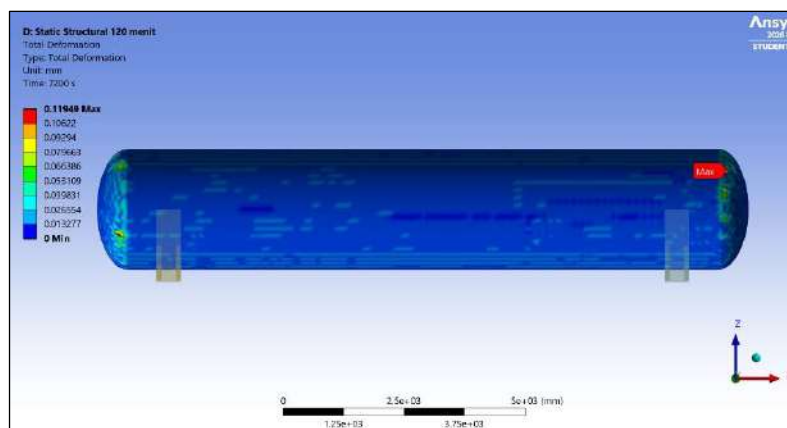


Gambar 4.12 Hasil Dari Tegangan *Von Mises* Waktu 60 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai tegangan *von mises* pada variasi *cool-down* 60 Menit dengan nilai maksimum tegangan sebesar 783.13 MPa. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.12.

4.5.3 Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran suatu material atau struktur dari sebuah objek karena diterapkan gaya dari eksternal. Hasil analisis deformasi pada model dapat dilihat pada Gambar 4.13, Gambar 4.14, dan Gambar 4.15.

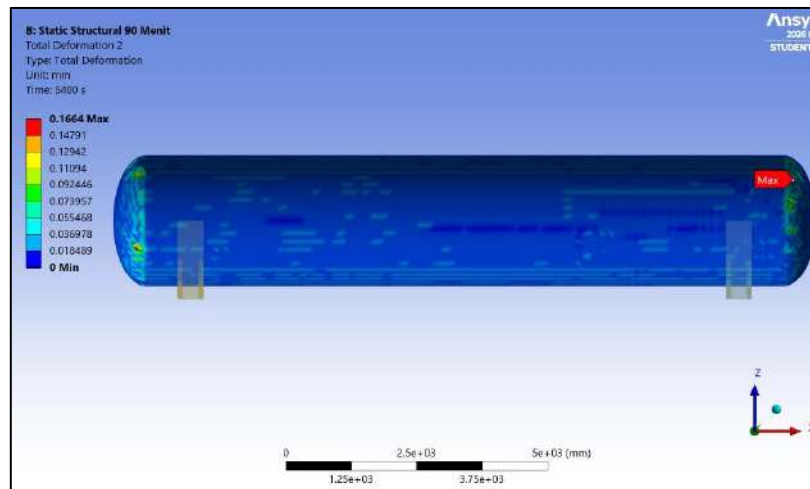


Gambar 4.13 Deformasi Variasi 120 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai deformasi pada variasi *cool-down* 120 menit dengan nilai maksimum deformasi sebesar 0.119 mm. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar. Untuk lebih

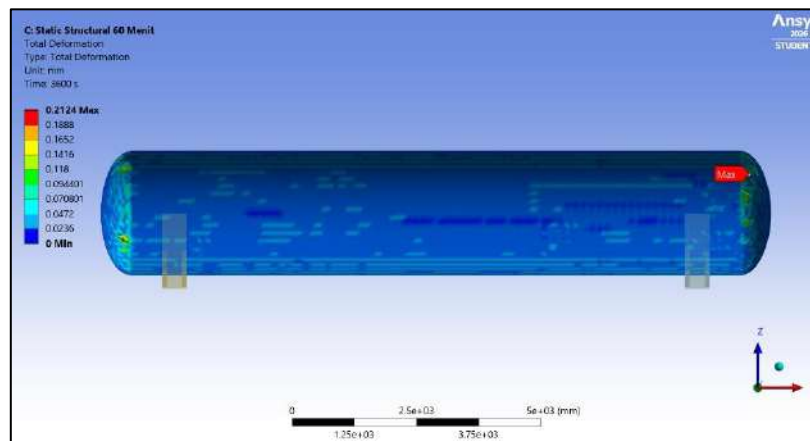
50

jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.14 Deformasi Variasi 90 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai deformasi pada variasi *cool-down* 90 menit dengan nilai maksimum deformasi sebesar 0.166 mm. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.14.

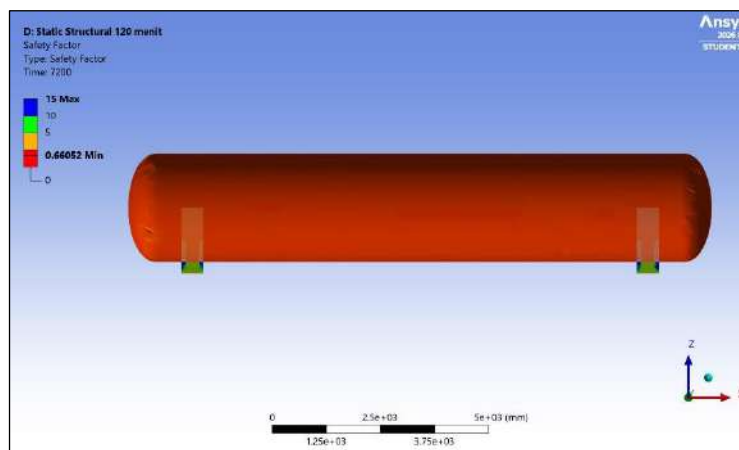


Gambar 4.15 Deformasi Variasi 60 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai deformasi pada variasi *cool-down* 60 menit dengan nilai maksimum deformasi sebesar 0.212 mm. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.15.

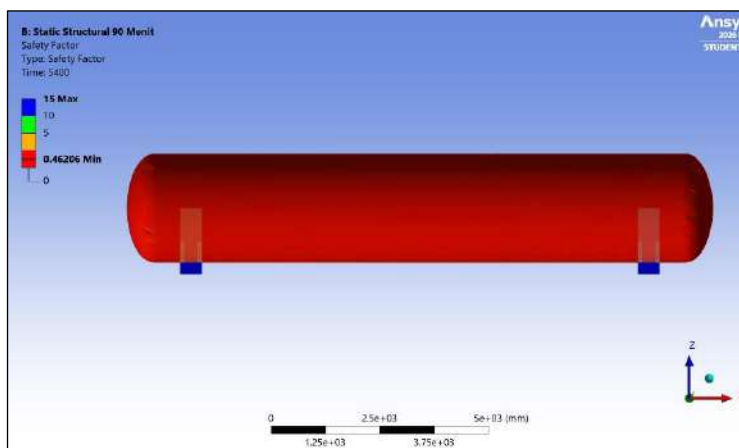
4.5.4 Safety factor

Safety factor adalah patokan yang paling utama yang digunakan dalam menentukan dari kualitas dari suatu desain. *Safety factor* menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan untuk dapat menerima beban dari luar dalam hal ini adalah beban tekan. Hasil dari *safety factor* tertera pada Gambar 4.16, Gambar 4.17, Gambar 4.18.



Gambar 4.16 *Safety Factor* Tangki 120 Menit

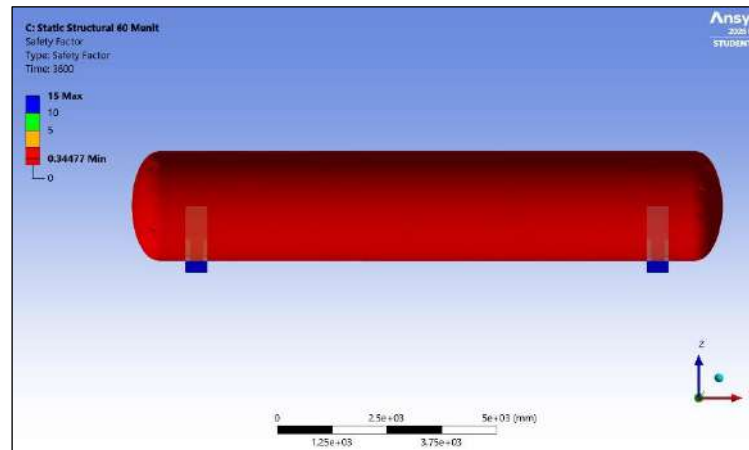
Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai *safety factor* pada variasi *cool-down* 120 Menit dengan nilai 0.660. terlihat dari hasil tersebut bahwa struktur jauh dibawah batas aman. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.17 *Safety Factor* Tangki 90 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai *safety factor* pada variasi *cool-down* 90 menit dengan nilai 0.462. terlihat dari hasil

tersebut bahwa struktur jauh dibawah batas aman. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.17.



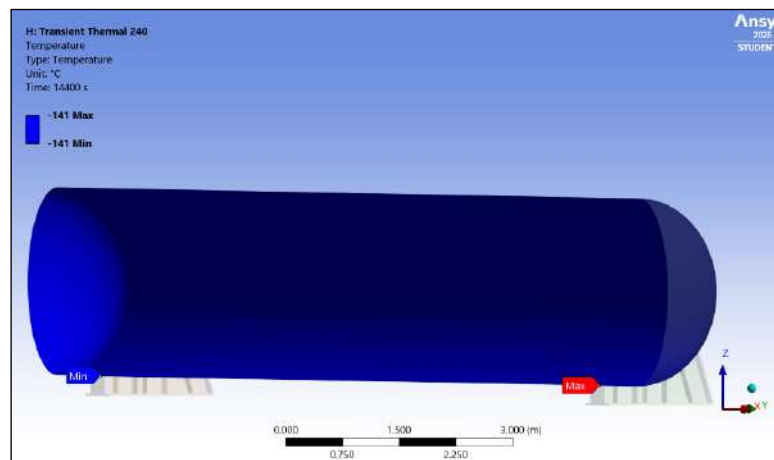
Gambar 4.18 *Safety Factor* Tangki 60 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai *safety factor* pada variasi *cool-down* 60 menit dengan nilai 0.344. terlihat dari hasil tersebut bahwa struktur masih jauh dibawah batas aman. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.18.

4.5.5 Data pembanding

Berikut disajikan data pembanding dari durasi *cool-down* aktual perusahaan sebagai data untuk memperkuat hasil dari simulasi yang telah dilakukan, dikarenakan dari ketiga variasi 120 menit, 90 menit, dan 60 menit belum memenuhi kriteria keamanan.

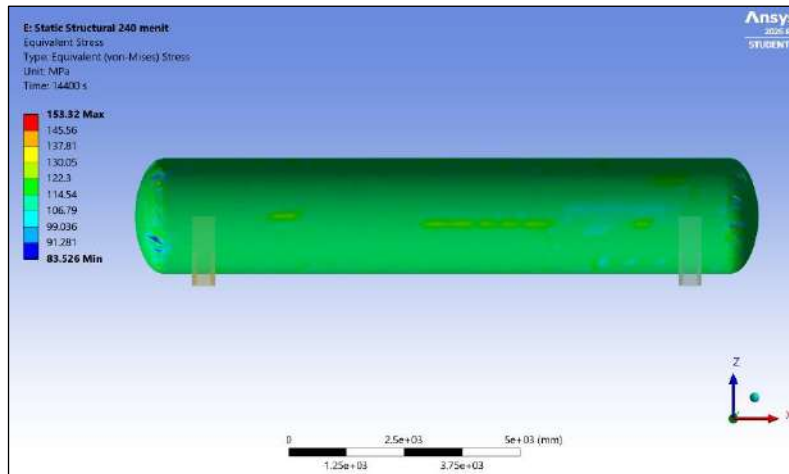
4.5.5.1 Distribusi temperatur



Gambar 4.19 Hasil Distribusi Temperatur Variasi *Cool-down* 240 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai distribusi temperatur pada variasi *cool-down* 240 menit, terlihat bahwa temperatur sudah merata pada temperatur operasi -141°C . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.19.

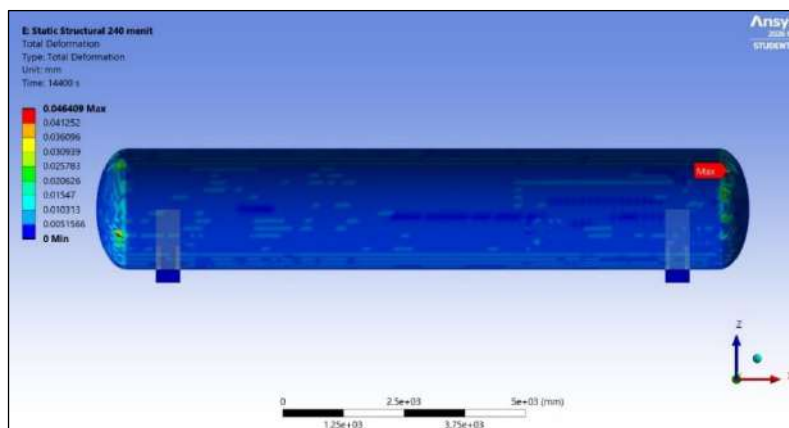
4.5.5.2 Tegangan *von mises*



Gambar 4.20 Hasil Dari Tegangan *Von Mises* Waktu 240 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai tegangan pada variasi *cool-down* 240 menit sebesar 153.32 Mpa. Letak distribusi temperatur terbesar dapat dilihat pada spektrum warna dimana warna yang merah menunjukkan nilai yang paling besar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.20.

4.5.5.3 Deformasi

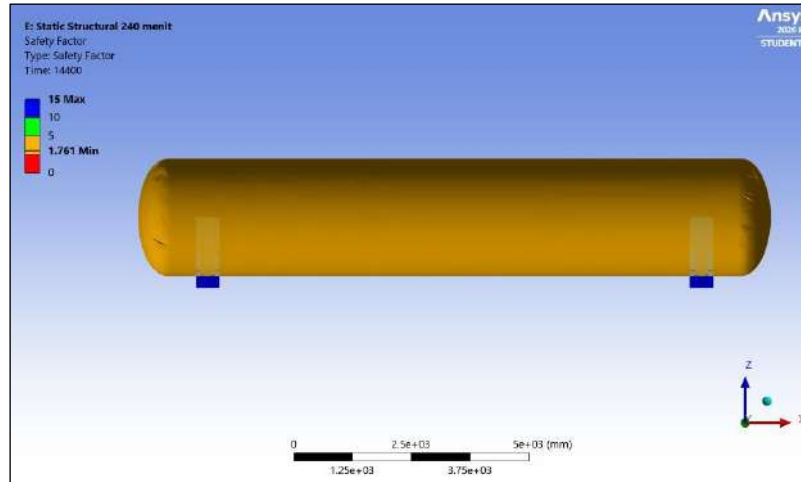


Gambar 4.21 Deformasi Variasi 240 Menit

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai deformasi pada variasi *cool-down* 240 menit sebesar 0.046 mm. Untuk

lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.21.

4.5.5.4 *Safety factor*



Gambar 4.22 *Safety Factor* Tangki 240 Menit

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, diketahui bahwa nilai minimum *safety factor* pada variasi *cool-down* 240 menit adalah sebesar 1,761. Nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur masih memiliki kemampuan menahan beban kerja sebelum mencapai batas kekuatan material. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.22.

4.5.5.5 Perbandingan data pembanding

Sebagai pembanding terhadap hasil simulasi yang telah dilakukan, digunakan data kondisi aktual yang diterapkan oleh perusahaan berupa durasi *cool-down* selama 240 menit. Data pembanding ini tidak termasuk dalam variasi penelitian, melainkan digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana hasil simulasi dengan durasi *cool-down* terbaik, yaitu 120 menit, mendekati kondisi operasi yang diterapkan di lapangan. Perbandingan ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai pengaruh penambahan durasi *cool-down* terhadap respons termomekanik *inner tank* LNG. Untuk hasil perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Penelitian

Parameter	Hasil Penelitian Terbaik	Kondisi Aktual Perusahaan
Durasi Cool-down	120 menit	240 menit
Distribusi Temperatur Max	-110.17°C	-141°C
Tegangan (Mpa)	408.77	153.32
Deformasi (mm)	0.119	0.046
Safety Factor	0.743	1,761

Sebagai pembandingan terhadap hasil simulasi yang telah dilakukan, digunakan data kondisi aktual yang diterapkan oleh perusahaan berupa durasi *cool-down* selama 240 menit. Data pembandingan ini tidak termasuk dalam variasi penelitian, melainkan digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana hasil simulasi dengan durasi *cool-down* terbaik, yaitu 120 menit, mendekati kondisi operasi yang diterapkan di lapangan. Perbandingan ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai pengaruh penambahan durasi *cool-down* terhadap respons termomekanik *inner tank* LNG. Berdasarkan hasil simulasi, variasi *cool-down* 120 menit menghasilkan distribusi temperatur maksimum sebesar -110.17°C , untuk nilai deformasi sebesar 0,119 mm dengan tegangan maksimum sebesar 408.77 MPa, dan menghasilkan nilai *safety factor* minimum sebesar 0.743. Sehingga menjadi kondisi terbaik dari seluruh variasi penelitian. Namun demikian, hasil evaluasi terhadap material menunjukkan bahwa kondisi tersebut masih belum memenuhi kriteria keamanan yang digunakan perusahaan karena dari hasil tegangan simulasi juga masih melebihi *allowable stress* sebesar 270 MPa. Oleh karena itu, dilakukan simulasi pembandingan menggunakan durasi *cool-down* 240 menit sesuai dengan prosedur operasi aktual perusahaan. Hasil simulasi pembandingan menunjukkan bahwa durasi *cool-down* 240 menit menghasilkan nilai distribusi temperatur maksimum sebesar -141°C , untuk nilai deformasi sebesar 0,046 mm dengan tegangan maksimum sebesar 153.32 Mpa dan menghasilkan nilai *safety factor* minimum sebesar 1.761. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan variasi penelitian, yang menunjukkan bahwa penambahan durasi *cool-down* mampu meningkatkan margin keamanan struktur.

Hal ini terjadi karena proses pendinginan berlangsung lebih bertahap sehingga distribusi temperatur pada dinding tangki menjadi lebih merata. Gradien temperatur yang lebih rendah menyebabkan kontraksi termal berlangsung secara lebih seragam, sehingga konsentrasi tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur dapat dikurangi. Perbedaan hasil antara variasi 120 menit dan 240 menit menunjukkan bahwa durasi *cool-down* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons termomekanik *inner tank* LNG. Semakin lama proses *cool-down*, semakin kecil gradien temperatur yang terbentuk sehingga tegangan termal dan deformasi yang dihasilkan cenderung menurun. Dengan demikian, durasi *cool-down* selama

240 menit yang diterapkan oleh perusahaan dapat dijadikan acuan dalam meningkatkan tingkat keamanan struktur selama proses pendinginan sebelum pengisian LNG dilakukan.

4.6 Pembahasan

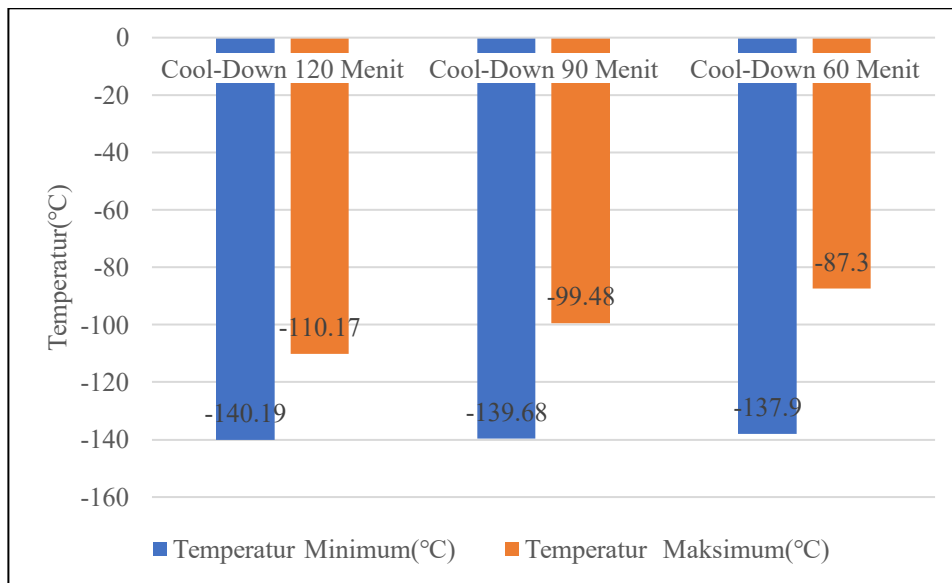
Selama proses *cool-down* tangki LNG terjadi penurunan temperatur yang sangat cepat sehingga terbentuk gradien temperatur antara permukaan bagian dalam dinding tangki. Penurunan temperatur secara matematis sesuai dengan perhitungan laju perubahan temperatur, dimana untuk variasi data pembanding *cool-down* 240 menit sebesar $0.69^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, dan untuk variasi penelitian, untuk *cool-down* 120 menit sebesar $1.38^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, untuk variasi *cool-down* 90 menit sebesar $1.84^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, dan untuk variasi 60 menit sebesar $2.77^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Perbedaan temperatur tersebut menyebabkan material mengalami kontraksi termal yang tidak seragam sehingga memunculkan deformasi dan tegangan termal. Besarnya deformasi dan tegangan yang terjadi dipengaruhi oleh laju pendinginan, sifat material, ketebalan dinding tangki, serta distribusi temperatur yang terbentuk selama proses *cool-down*. Temuan tersebut diperkuat oleh Kang et al. (2018), yang menyatakan bahwa laju pendinginan yang lebih tinggi akan menghasilkan gradien temperatur yang lebih besar, sehingga berpotensi meningkatkan respon tegangan termal pada struktur kriogenik. Hasil dari variasi *cool-down* pada tangki *inner tank* LNG terhadap nilai distribusi temperatur dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Hasil Dari Variasi *Cool-down* Terhadap Nilai Distribusi Temperatur

Variasi	Temperatur Minimum($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur Maksimum($^{\circ}\text{C}$)	Laju Perubahan Temperatur($^{\circ}\text{C}/\text{Menit}$)
<i>Cool-down</i> 120 Menit	-140.19	-110.17	1.38
<i>Cool-down</i> 90 Menit	-139.68	-99.48	1.84
<i>Cool-down</i> 60 Menit	-137.9	-87.30	2.77

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai distribusi temperatur yang paling besar berada pada variasi *cool-down* 60 menit dengan nilai minimum temperatur sebesar -87.30°C dan nilai maksimum sebesar -137.9°C , sedangkan nilai distribusi temperatur yang paling kecil berada pada variasi *cool-down* 120 menit dengan nilai minimum temperatur sebesar -110.17°C

dan nilai maksimum temperatur sebesar -140.19°C . Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.23 berikut.



Gambar 4.23 Grafik Distribusi Temperatur

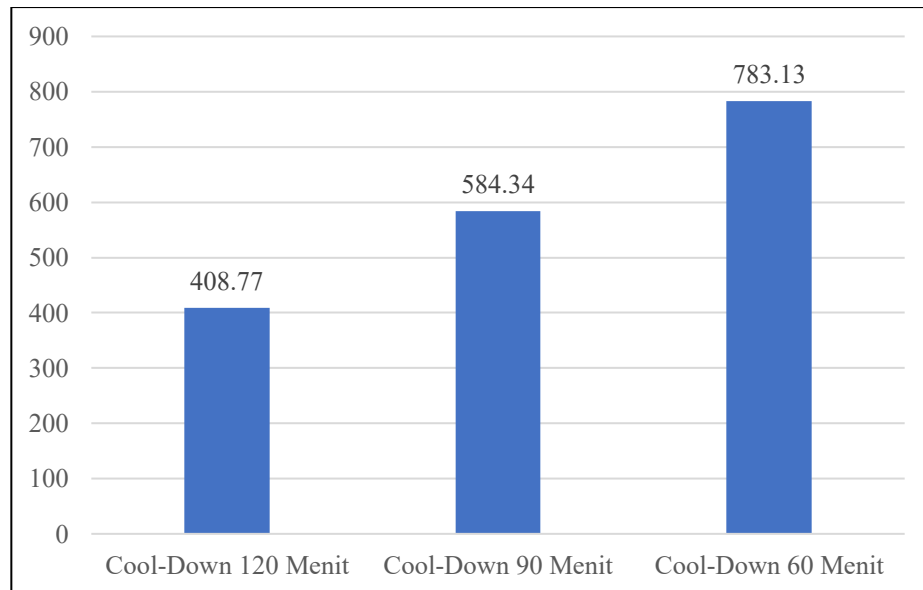
Dari pelaksanaan simulasi menggunakan metode elemen hingga dengan *software* ANSYS *Workbench* 2026 R1 serta analisis data yang dilakukan terhadap variasi *cool-down* pada tangki *inner tank* LNG terhadap nilai tegangan dan deformasi maksimum dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Hasil Variasi *Cool-down* Terhadap Nilai Tegangan dan Deformasi

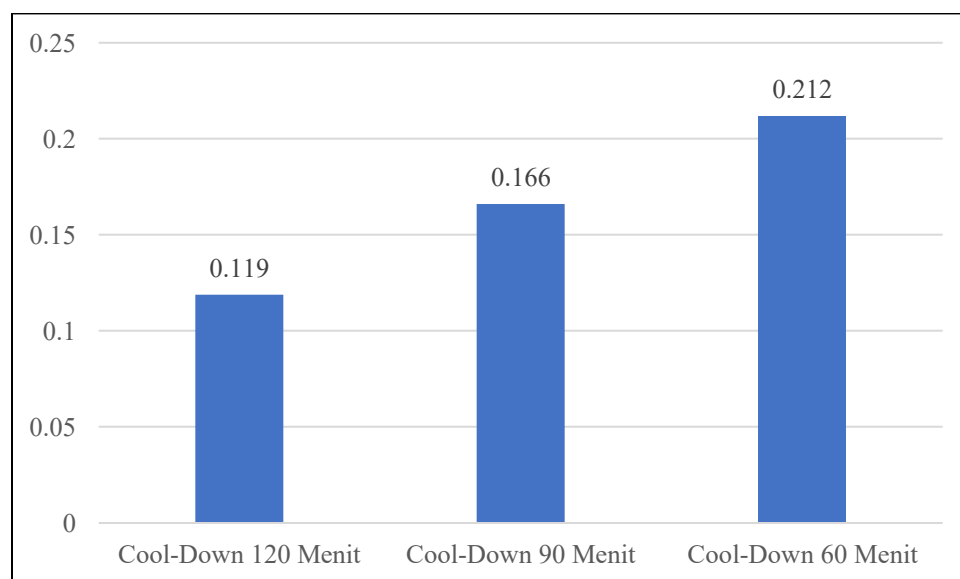
Variasi	Tegangan (MPa)	Deformasi (mm)
<i>Cool-down</i> 120 Menit	408.77	0.119
<i>Cool-down</i> 90 Menit	584.34	0.166
<i>Cool-down</i> 60 Menit	783.13	0.212

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai deformasi yang paling besar berada pada variasi *cool-down* 60 menit dengan nilai sebesar 0.212 mm, sedangkan nilai deformasi terkecil berada pada variasi *cool-down* 120 menit dengan nilai sebesar 0.119 mm. Pada hasil tegangan juga menunjukkan nilai demikian dimana nilai tegangan yang paling besar berada pada variasi *cool-down* 60 Menit dengan nilai sebesar 783.13 MPa, sedangkan nilai tegangan terkecil berada pada variasi *cool-down* 120 menit dengan nilai sebesar 408.77 Mpa dan untuk hasil dari data pembanding untuk deformasi sebesar 0.046 mm dan hasil untuk tegangan sebesar 153.32 MPa. Hasil tersebut dapat dilihat pada

Gambar 4.24 dan Gambar 4.25 berikut ini.



Gambar 4.24 Hasil Tegangan Variasi *Cool-down*



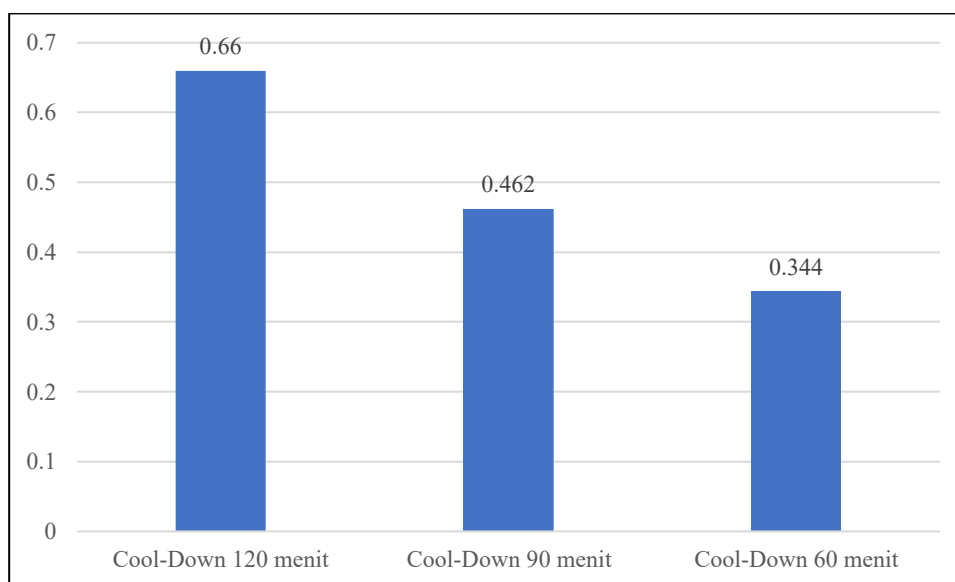
Gambar 4.25 Hasil Deformasi Variasi *Cool-down*

Dari pelaksanaan simulasi menggunakan metode elemen hingga dengan *software* ANSYS *Workbench* 2026 R1 serta analisis data yang dilakukan terhadap variasi *cool-down* pada tangki *inner tank* LNG terhadap nilai *safety factor* dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6 Hasil *Safety Factor*

Variasi	<i>Safety Factor</i>
<i>Cool-down</i> 120 menit	0.743
<i>Cool-down</i> 90 menit	0.578
<i>Cool-down</i> 60 menit	0.471

Berdasarkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai *safety factor* dari ketiga variasi *cool-down* berada dibawah batas aman struktur karena hasil dari tegangan pada simulasi melebihi *allowable stress* material. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.26 berikut ini.



Gambar 4.26 Hasil *Safety Factor* Variasi *Cool-down*

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, nilai minimum *safety factor* pada data pembandingan *cool-down* 240 menit adalah sebesar 1.761 dan untuk variasi *cool-down* 120 menit sebesar 0.743. Sebaliknya, variasi *cool-down* 60 menit menunjukkan nilai terendah 0.471. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa semakin lama durasi *cool-down*, *safety factor* pada tangki mengalami kenaikan menuju batas aman. Dalam perancangan *pressure vessel*, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1 tidak menetapkan batas minimum *safety factor* berdasarkan hasil analisis elemen hingga. Kriteria yang digunakan adalah bahwa tegangan yang terjadi pada struktur tidak boleh melebihi nilai *allowable stress* material sebagaimana tercantum dalam ASME Boiler and

Pressure Vessel Code Section II – Materials. Oleh karena itu, evaluasi keamanan struktur dilakukan dengan membandingkan tegangan maksimum hasil simulasi terhadap nilai *allowable stress* material SA-240 Type 304 yang ada pada ASME Section VIII Div. 1 App. 44 yang *allowable stress* nya bernilai 270 MPa. Apabila nilai minimum *safety factor* yang diperoleh sebesar 1,761, maka kondisi tersebut menunjukkan bahwa tegangan kerja yang terjadi masih berada di bawah batas kekuatan material yang diizinkan. Dengan demikian, struktur *inner tank* masih memiliki cadangan kekuatan (*margin of safety*) sehingga dapat dikatakan memenuhi persyaratan desain berdasarkan ketentuan ASME Section VIII Division 1, selama nilai tegangan hasil simulasi tidak melampaui nilai *allowable stress* material yang digunakan. Hasil tersebut juga mengindikasikan bahwa penerapan durasi *cool-down* 240 menit mampu menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata sehingga gradien temperatur berkurang. Kondisi tersebut menyebabkan kontraksi termal berlangsung lebih seragam, sehingga tegangan termal yang terbentuk menjadi lebih rendah dan menghasilkan nilai *safety factor* yang lebih tinggi dibandingkan variasi *cool-down* dengan durasi yang lebih singkat.

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa variasi dari data pembanding *cool-down* 240 menit merupakan kondisi yang paling efektif dalam menurunkan deformasi dan tegangan termal pada tangki LNG. Sehingga dapat digunakan untuk Sebaliknya, untuk ketiga variasi, variasi *cool-down* 120 menit merupakan kondisi paling efektif dalam menurunkan deformasi dan tegangan termal pada tangki LNG. Hasil tersebut memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian Kang et al. (2018), yang menunjukkan bahwa karakteristik proses *cool-down* berpengaruh terhadap distribusi temperatur dan perkembangan tegangan termal pada tangki kriogenik selama proses pengisian LN₂. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian (Dong & Xu, 2018) yang menyatakan bahwa distribusi temperatur yang lebih merata mampu menghasilkan distribusi tegangan termal yang lebih rendah pada struktur tangki LNG. Selain itu, (Sun et al., 2024) bahwa proses *pre-cooling* yang berlangsung secara lebih terkendali dapat mengurangi gradien temperatur pada struktur tangki sehingga respons termomekaniknya menjadi lebih stabil. Oleh karena itu, hasil simulasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa

penambahan durasi *cool-down* memberikan pengaruh yang positif terhadap penurunan deformasi dan tegangan termal, sehingga kondisi struktur tangki menjadi lebih aman ketika mencapai temperatur operasi LNG. Selain itu, juga diperkuat dengan hasil dari data pembandingan dari durasi aktual *cool-down* dari perusahaan x bahwa penambahan durasi memberikan pengaruh yang positif terhadap penurunan deformasi dan tegangan termal, sehingga dari hasil yang diperoleh memperkuat bahwa operasi *cool-down* sebelum pengisian ulang tangki LNG memang sangat krusial dan harus dilakukan sesuai prosedur yang berlaku pada perusahaan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada bab sebelumnya didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh variasi *cool-down* pada *inner tank* LNG terhadap variasi *cool-down* 120 menit menghasilkan nilai temperatur maksimum -140.19°C dan nilai temperatur minimum sebesar -110.17°C diikuti variasi *cool-down* 90 menit menghasilkan nilai temperatur maksimum -139.68°C dan nilai temperatur minimum sebesar -99.48°C diikuti variasi *cool-down* 60 menit menghasilkan nilai temperatur maksimum sebesar -137.9°C dan nilai temperatur minimum sebesar -87.30°C .
2. Pengaruh variasi *cool-down* pada *inner tank* LNG terhadap tegangan dan deformasi adalah variasi *cool-down* 120 menit menghasilkan nilai tegangan yang paling kecil 408.77 MPa dan deformasi sebesar 0.119 mm, diikuti variasi *cool-down* 90 menit dengan tegangan 584.34 Mpa dan deformasi sebesar 0.166 mm, dan diikuti dengan variasi *cool-down* 60 menit dengan tegangan 783.13 Mpa dan deformasi sebesar 0.212 mm, semakin cepat durasi *cool-down*, semakin besar hasil tegangan dan deformasi yang dihasilkan.
3. Bagian struktur yang mengalami konsentrasi tegangan tertinggi akibat kombinasi beban termal dan tekanan internal adalah bagian pada sambungan *head-shell* pada tangki untuk variasi 90 menit dan 120 menit, dan untuk 60 menit tegangan tertinggi terletak pada bagian *shell* pada tangki.
4. Respon tegangan yang terjadi pada setiap variasi antara lain, variasi 120 menit memiliki nilai *safety factor* 0.743, variasi 90 menit memiliki nilai *safety factor* 0.462, variasi 60 menit memiliki nilai *safety factor* 0.344, hasil *safety factor*

dari ketiga variasi berada di bawah batas aman material SA 240 *Type* 304 pada variasi laju *cool-down* yang dianalisis.

5.2 Saran

Pengerjaan pada tugas akhir ini masih belum dapat dikatakan sempurna. Masih terdapat banyak kekurangan dalam pengerjaan serta pelaksanaan tugas akhir ini. Dikarenakan hal tersebut maka diberikan beberapa saran dengan tujuan untuk perbaikan pada penelitian berikutnya. Beberapa saran yang diberikan antara lain:

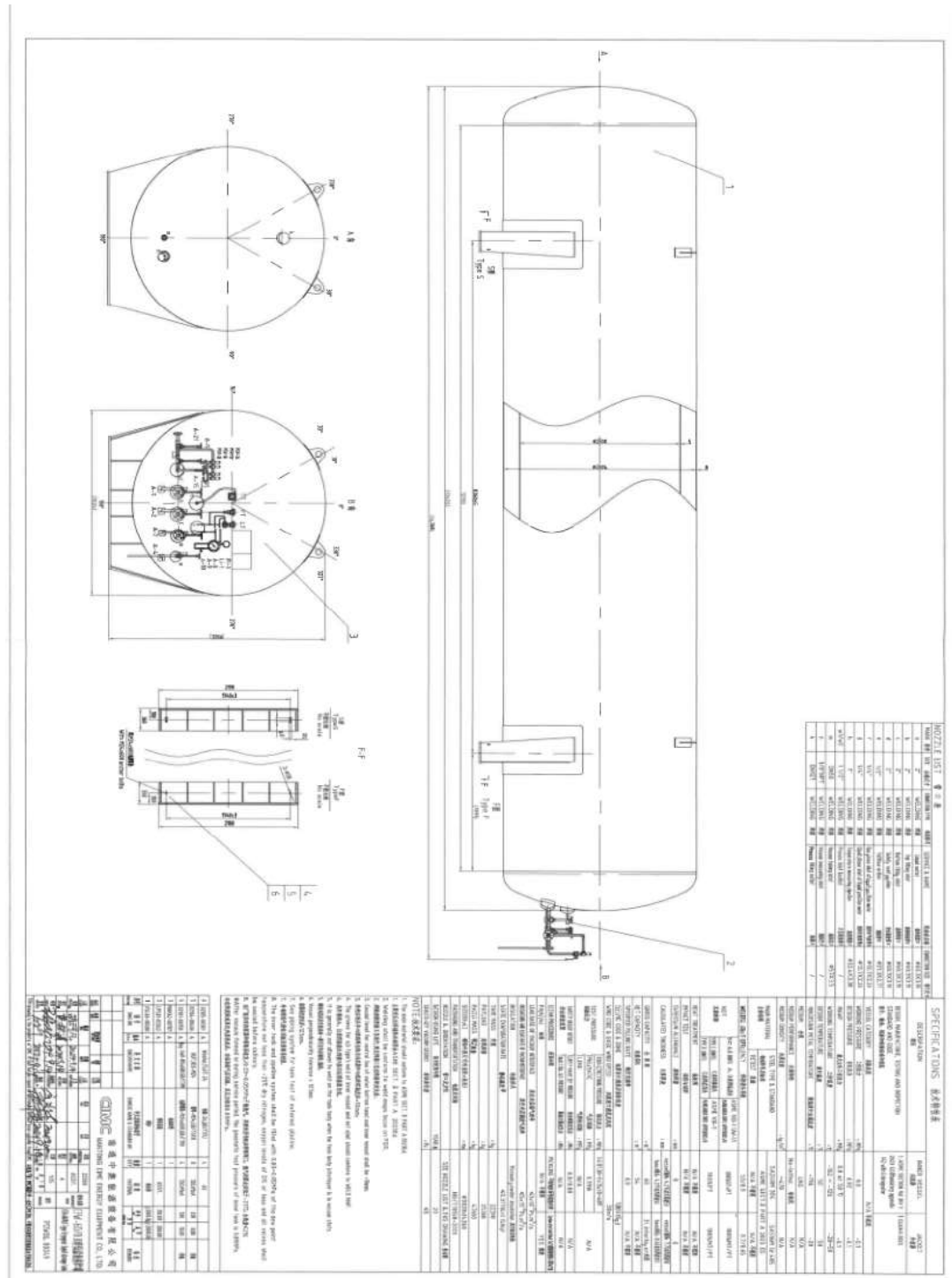
1. Melakukan simulasi dengan model geometri yang lebih utuh.
2. Dapat ditambahkan variasi lain seperti, tekanan, dan material.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME boiler and *Pressure vessel* code: *Section II – Materials*. ASME International.
- American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME boiler and *Pressure vessel* code: *Section VIII, Division 1 – Pressure vessels*. ASME International.
- American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code: *Section VIII, Division 2 – Alternative Rules*. ASME International.
- American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code: *Section VIII, Division 3 – Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels*. ASME International.
- Chem.Eng.Dep. (2024) 4th year, Chem.Eng.Dep. Equipment Design Mechanical Design of Process Equipment DESIGN OF *PRESSURE VESSELS* Classification of *pressure vessels*
- Dong, H., & Xu, Q. (2018). Finite element analysis on the thermal stress of LNG carriers' tanks. *Chemical Engineering Transactions*, 67, 793–798. <https://doi.org/10.3303/CET1867133>
- Kang, Z., Li, Y., Ma, Y., Wang, L., & Xie, F. (2018). Experimental study on *Cool-down* characteristics and thermal stress of cryogenic tank during LN₂ filling process. *Applied Thermal Engineering*, 130, 951–961. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.079>
- Lee, D.-Y., Jo, J.-S., Nyongesa, A. J., & Lee, W.-J. (2023). Fatigue analysis of a 40 ft LNG ISO tank container. *Materials*, 16(1), 428. <https://doi.org/10.3390/ma16010428>
- Lu, H., Ma, G., Li, X., & Wu, S. (2018). Stress analysis of LNG storage tank outlet pipes and flanges. *Energies*, 11(4), 877. <https://doi.org/10.3390/en11040877>
- Marpaung, F., Wibowo, E. T., & Harmadi, R. (2022). Desain dan analisis tangki ISO LNG kapasitas 40 feet menggunakan teknik finite element analysis. *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa dan Inovasi*, 4(1), 163–170. <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v4i1.2989>
- Megyesy, E. F. (2008). *Pressure vessel handbook* (13th ed.). *Pressure vessel Publishing*.
- Moss, D. and Basic, M. (2021) *Fourth Edition Pressure vessel Design Manual*.

- National Fire Protection Association. (2022). NFPA 59A: Standard for the production, storage, and handling of liquefied natural gas (LNG). NFPA.
- National Institute of Standards and Technology. (2022). Cryogenic material properties database. U.S. Department of Commerce. <https://trc.nist.gov/cryogenics/>
- Outokumpu. (2022). *Stainless steel* grade 304/304L datasheet. Outokumpu Oyj.
- Sun, Q., Zhang, Y., Lv, Y., Peng, D., Zhang, S., Lu, Z., & Yan, J. (2024). Comparative analysis of heat transfer in a *Type B* LNG tank pre-cooling process using various refrigerants. *Energies*, 17(16), 4013. <https://doi.org/10.3390/en17164013>
- U.S. Congressional Research Service. (2004). Liquefied natural gas (LNG) in Algeria: The 2004 Skikda accident (CRS Report No. RL32205). <https://www.everycrsreport.com/reports/RL32205.html>
- United States Coast Guard & U.S. Department of Transportation. (2005). Appendix H – Major LNG incidents involving LNG release. Regulations.gov. https://downloads.regulations.gov/USCG-2005-22611-0155/attachment_1.pdf
- Zhang, X.-C., & Cai, Y.-Q. (2011). Thermal analysis on the *shell* stiffeners of double steel wall LNG storage tank. *Applied Mechanics and Materials*, 105–107, 403–407. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.105-107.403>

Lampiran A Data Tangki



Product No.

FORM U-1A MANUFACTURER'S DATA REPORT FOR PRESSURE VESSELS

(Alternative Form for Single Chamber, Completely Shop or Field Fabricated Vessels Only)

As Required by the Provisions of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code Rules, Section VIII, Division 1

Page 1 of 2

1. Manufactured and certified by

Nantong CIMC Energy Equipment Co., Ltd., No. 429, Chenggang Road, Chongchuan District, Nantong City, Jiangsu Province, 226003, People's Republic of China

(Name and address of Manufacturer)

2. Manufactured for

Linde Lihwa Industrial Gases Co., Ltd., 8th Fl, Building A, No. 209, Nangang Rd., Sec. 1, Nangang Dist, Taipei 11568,

(Name and address of Purchaser)

3. Location of Installation

Not known

(Name and address)

4. Type

Horizontal tank

NCEE24G03927

None

INV60-00196 Rev.A

19256

2024

(Horizontal or vertical tank)

(Manufacturer's serial number)

(CRN)

(Drawing number)

(National Board number)

(Year built)

5. ASME Code, Section VIII, Division 1

2023/ None

None

Low temperature UHA-51

(Edition and Addenda, if applicable (date))

(Code Case numbers)

(Special sentence per UC-129(c))

6. Shell:

SA-240M Type 304

5 mm

NIL

2500 mm (ID)

SEE REMARKS

(Material spec. number, grade)

(Nominal thickness)

(Cor. allow.)

(Inner diameter)

(Length (overall))

Body Flanges on Shells

No.	Type	ID	OD	Flange Thk	Min Hub Thk	Material	How Attached	Location	Num & Size	Boiling Material	Washer (OD, ID, thk)	Washer Material
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

7. Seams:

Type 1 Butt

Full

100

None

N/A

Type 1/2 Butt

Full

100/90

6

(Long. (welded, dbl. angl., lap, butt))

(R.T. (spot or full))

(EF, %)

(H.T. temp.)

(Time, hr)

(Birth. (welded, dbl. angl., lap, butt))

(R.T. (spot or full))

(EF, %)

(No. of courses)

8. Heads: (a)

SA-240M Type 304, See remark(1)

(Material spec. number, grade or type) (H.T. - time and temp.)

(b)

SA-240M Type 304, See remark(1)

(Material spec. number, grade or type) (H.T. - time and temp.)

	Location (Top, Bottom, Ends)	Thickness		Radius		Elliptical Ratio	Conical Apex Angle	Hemispherical Radius	Flat Diameter	Side to Pressure		Category A		
		Min.	Cor.	Crown	Knuckle					Convex	Concave	Type	Full	Spot
(a)	Front	4.27mm	NIL	N/A	N/A	2:1	N/A	N/A	N/A	N/A	X	N/A	Full	N/A
(b)	Rear	4.27mm	NIL	N/A	N/A	2:1	N/A	N/A	N/A	X	N/A	Full	N/A	

Body Flanges on Heads

No.	Location	Type	ID	OD	Flange Thk	Min Hub Thk	Material	How Attached	Num & Size	Boiling Material	Washer (OD, ID, thk)	Washer Material
(a)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

9. MAWP

800 kPa

None

at max. temp.

50 °C

None

(Internal)

(Examine)

Min. design metal temp.

-196 °C

at

800 kPa

Hydro, pneu., or comb. test pressure

COLD-STRETCHING AT at 1410 kPa

Proof test

None

10. Nozzles, inspection and safety valve openings:

Purpose (Inlet, Outlet, Drain, etc.)	No.	Diameter or Size	Type	Material		Nozzle Thickness		Reinforcement Material	Attachment Details		Location (Insp. Open.)
				Nozzle	Flange	Norm.	Cor.		Nozzle	Flange	
Liquid outlet	1	ID50mm	Forged nozzle	SA182 F304	N/A	13mm	NIL	Inherent	Fig.UW-16.1(c)	N/A	N/A
Top filling	1	ID50mm	Forged nozzle	SA182 F304	N/A	13mm	NIL	Inherent	Fig.UW-16.1(c)	N/A	N/A
Bottom filling	1	ID50mm	Forged nozzle	SA182 F304	N/A	13mm	NIL	Inherent	Fig.UW-16.1(c)	N/A	N/A

Additional Nozzles - See Attached U-4..

11. Supports: Skirt

None

Lugs

None

Legs

None

Other

Eight support plants

Attached

Welded to the inner shell

(Yes or no)

(Number)

(Number)

(Describe)

(Where and how)

12. Remarks: Manufacturer's Partial Data Reports properly identified and signed by Commissioned Inspectors, have been furnished for the following items of the report:

Heads, Item 8, Changzhou Kuangda Weide Machinery Co., Ltd. S/N: (a)PA2430417-1, (b)PA2430418-1, ASME Certification Mark with PRT Designator.

(Name of part, item number, Manufacturer's name and identifying stamp)

(1) Heads are cold formed, no heat treatment, full RT of category A welds; (2) Impact test of shell, head and nozzle are exempted per 44-5.1(g)(1) and UHA-51(d)(1)(c-a); (3) Code jurisdiction terminates at the end of nozzle of inner vessel; (4) Overpressure Protection is provided in the piping system; (5) Inspection opening omitted per UG-46(a)(4) for noncorrosive service; (6) This vessel has been constructed using cold-stretching processes in accordance with Mandatory Appendix 44; (7) After cold-stretch test, 100% RT are carried out for all category A/B weld joints and all

Additional Remarks - See Attached U-4..

FORM U-1A

Page 2 of 2

Manufactured by	Nantong CIMC Energy Equipment Co., Ltd., No. 429, Chenggang Road, Chongchuan District, Nantong City, Jiangsu Province, 226003, People's Republic of China		
Manufacturer's Serial No.	NCEE24G03927	CRN	None
National Board No.	19256		

CERTIFICATE OF SHOP/FIELD COMPLIANCE

We certify that the statements made in this report are correct and that all details of design, material, construction, and workmanship of this vessel conform to the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Section VIII, Division 1. "U" Certificate of Authorization Number **52058** expires **January 22, 2028**

Date **11/14/2024** Co. name **Nantong CIMC Energy Equipment Co., Ltd.** Signed **Chen Lailai**
(Manufacturer)

CERTIFICATE OF SHOP/FIELD INSPECTION

Vessel constructed by **Nantong CIMC Energy Equipment Co., Ltd.** No. 429, Chenggang Road, Chongchuan District, Nantong City, Jiangsu Province, 226003, People's Republic of China

I, the undersigned, holding a valid commission issued by The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors and employed by **LROA Verification Limited, of Solihull, United Kingdom**

have inspected the component described in this Manufacturer's Data Report on **November 18, 2024** and state that, to the best of my knowledge and belief, the Manufacturer has constructed this pressure vessel in accordance with ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Section VIII, Division 1. By signing this certificate neither the Inspector nor his/her employer makes any warranty, expressed or implied, concerning the pressure vessel described in this Manufacturer's Data Report. Furthermore, neither the Inspector nor his/her employer shall be liable in any manner for any personal injury or property damage or a loss of any kind arising from or connected with this inspection.

Date **11/18/2024** Signed **[Signature]** Commissions **13685**
(Authorized Inspector) (National Board Authorized Inspector Commission number)

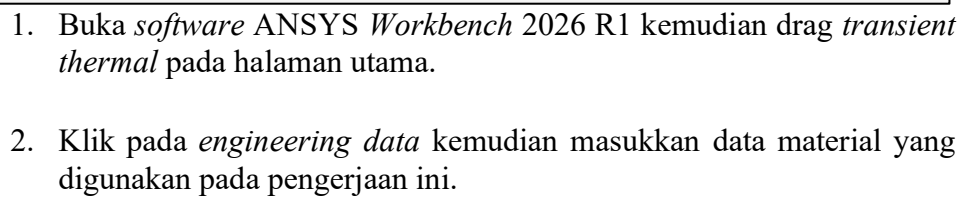
4D40954

ENR: v8.4.38

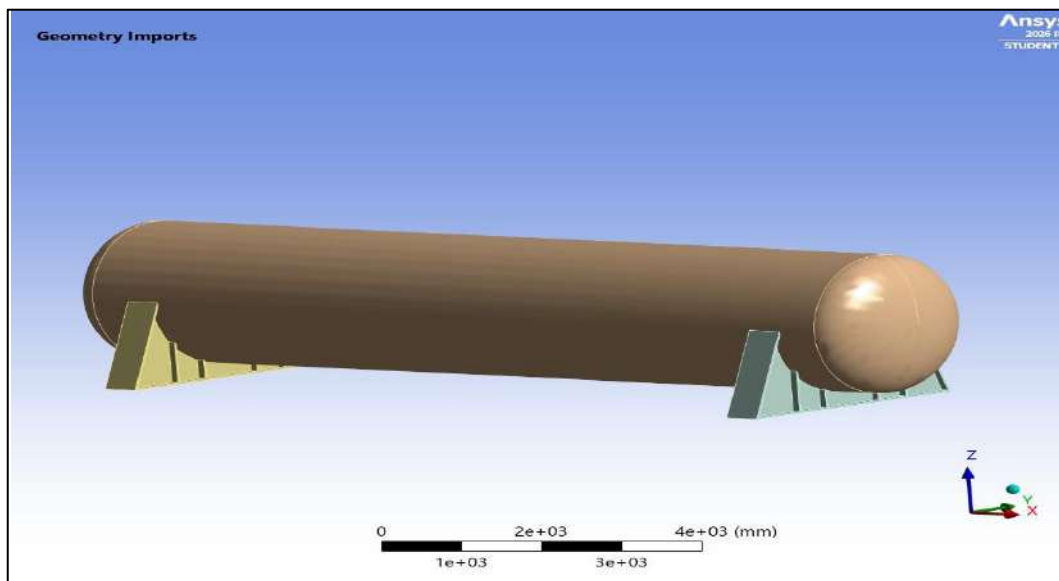
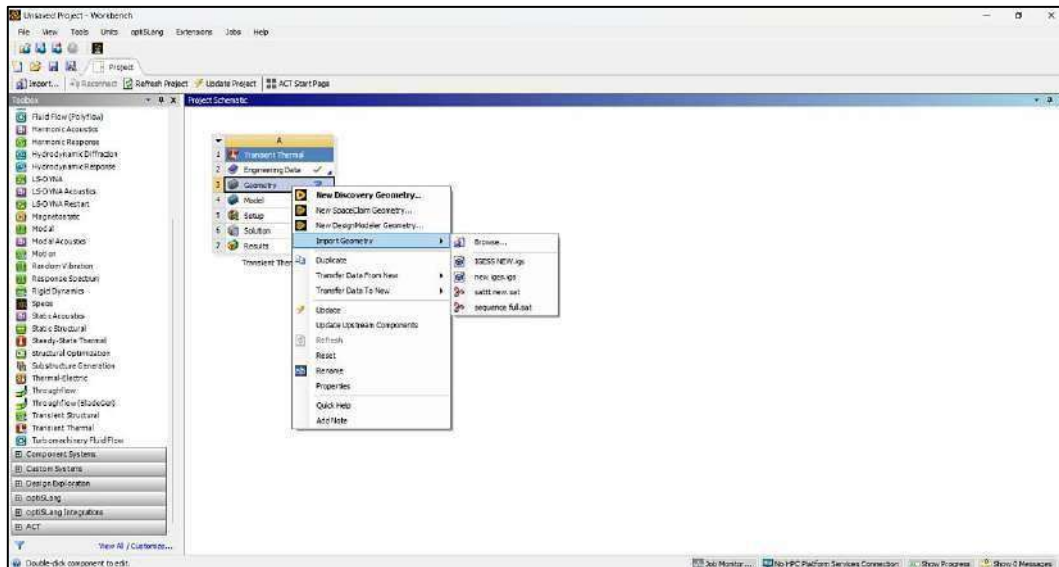
Form and version: U-1A-20



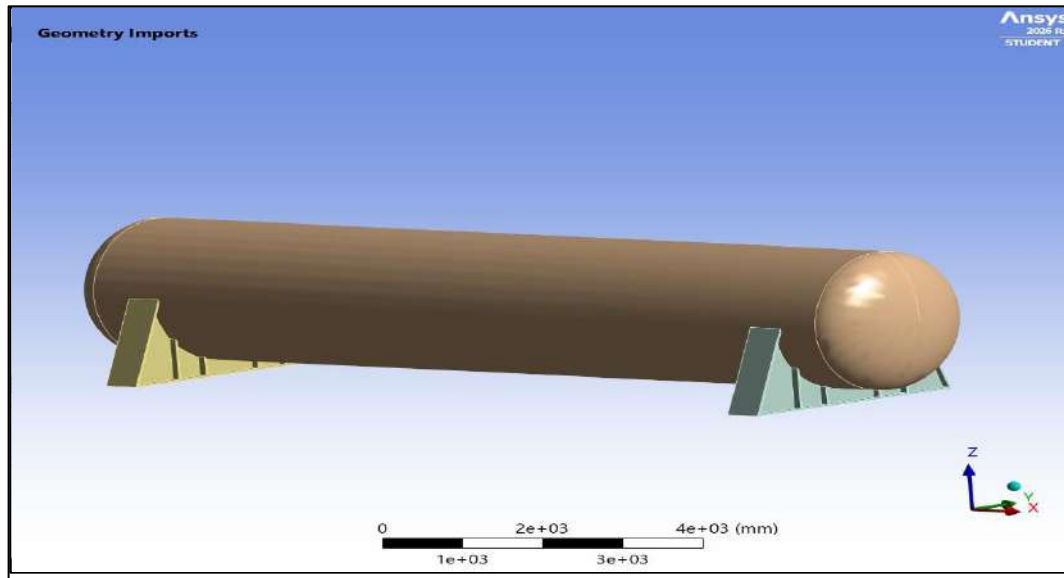
Lampiran B Langkah-Langkah Pengerjaan Elemen Hingga

71

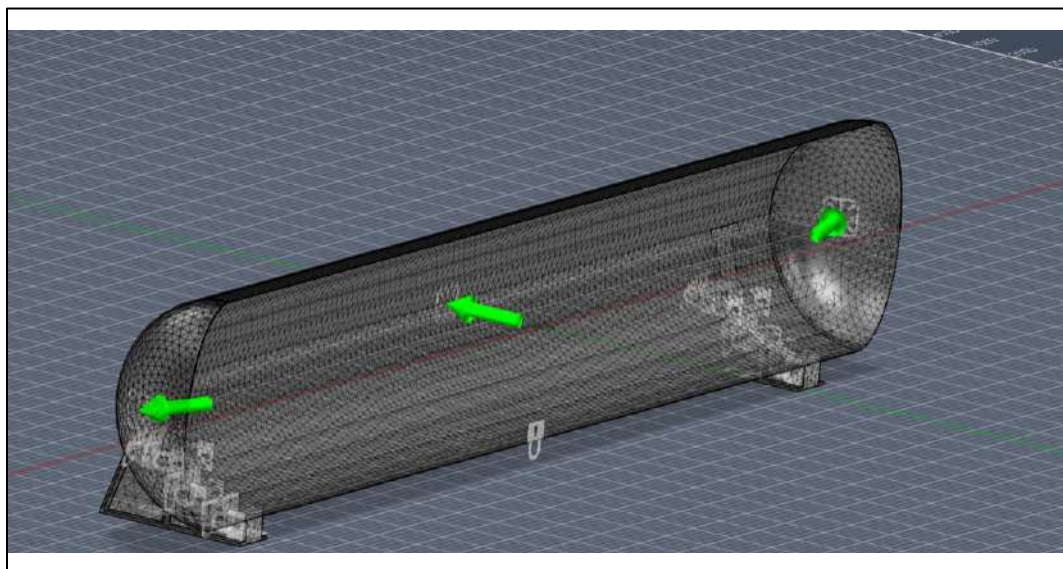
3. Kembali ke halaman utama klik kanan pada *geometry* kemudian *import* file yang telah dibuat dengan format SAT.



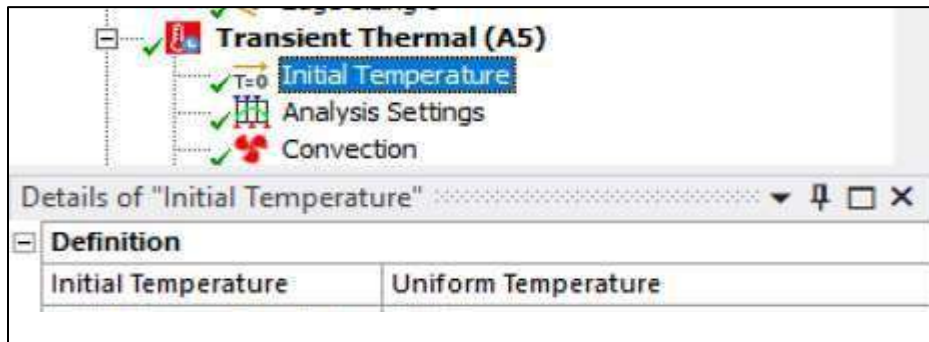
4. Kembali ke halaman utama lalu klik dua kali pada model untuk tahapan selanjutnya. Tampilan pada model akan seperti ini.



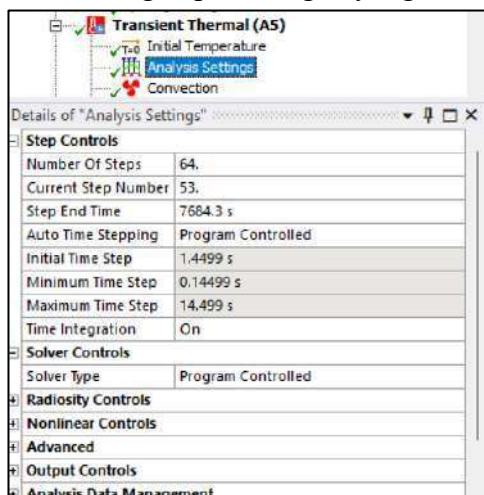
5. Setelah masuk model kemudian klik kanan pada *mesh* untuk melakukan pembagian elemen *mesh* dengan model *mesh* rapat di daerah pengelasan pada *ellipsoidal head*.



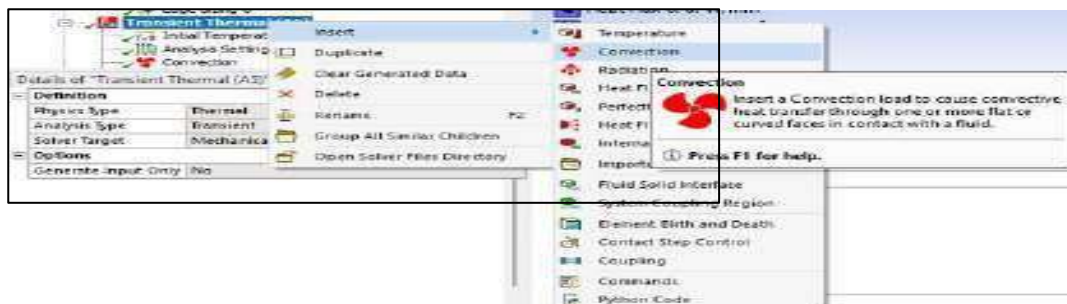
6. Kemudian klik pada *transient thermal* lalu klik *initial temperature* dan isi dengan suhu ruang 25°C.

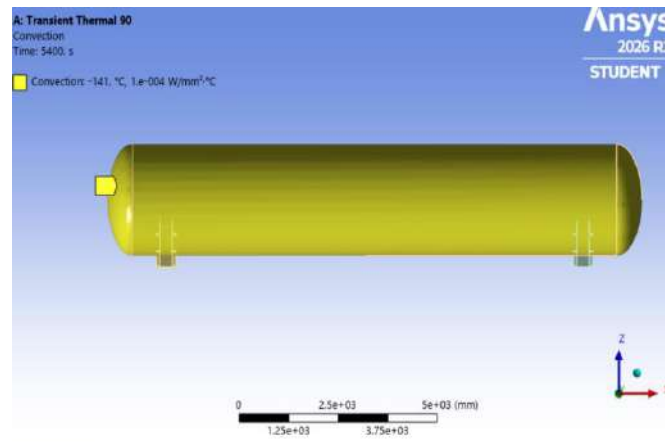


7. Kemudian klik *analysis setting* kemudian isi jumlah *step* dan waktu *loadstep* sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan.

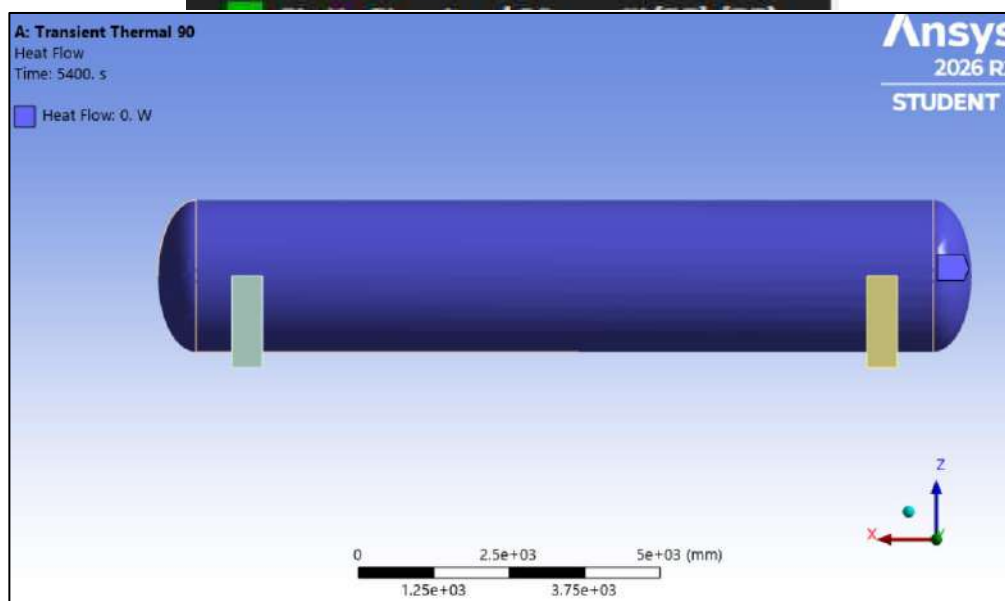
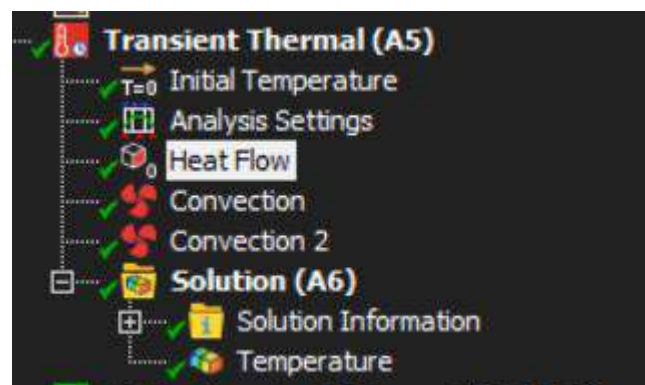


8. Kemudian klik kanan pada *transient thermal* lalu pilih *convection* dengan pemilihan pada seluruh *surface body*. Dan sesuaikan nilainya sesuai yang sudah ditentukan sebelumnya agar sesuai dengan kondisi aslinya.

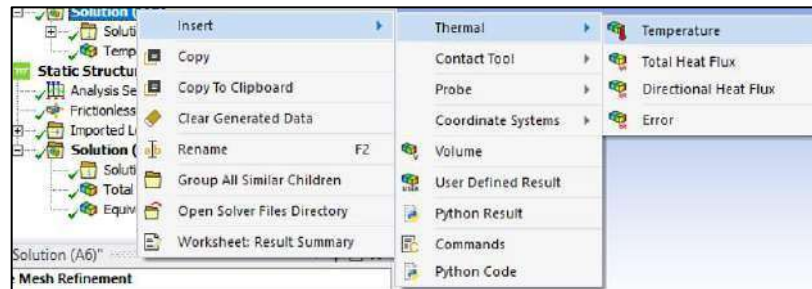




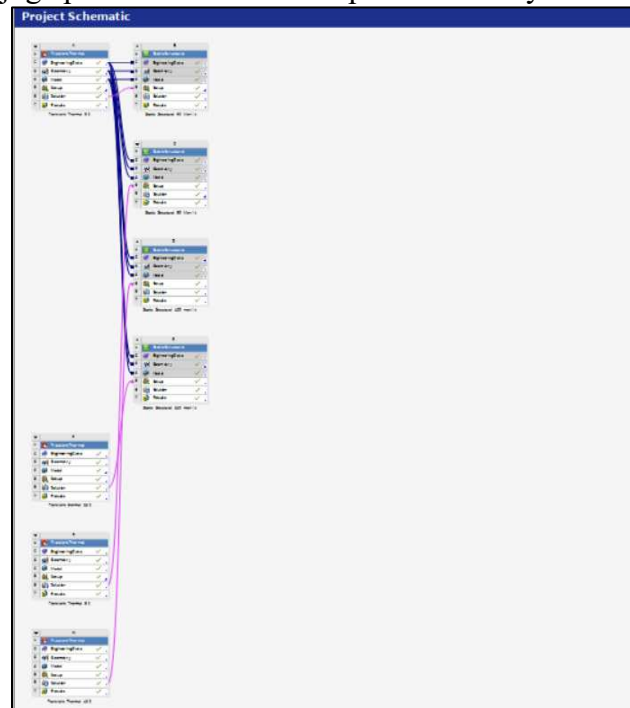
9. Kemudian klik kanan pada *transient thermal* pilih *heat flow* pilih pada surface bagian luar agar temperatur dalam tangki tidak keluar yang artinya *perfect insulation*.



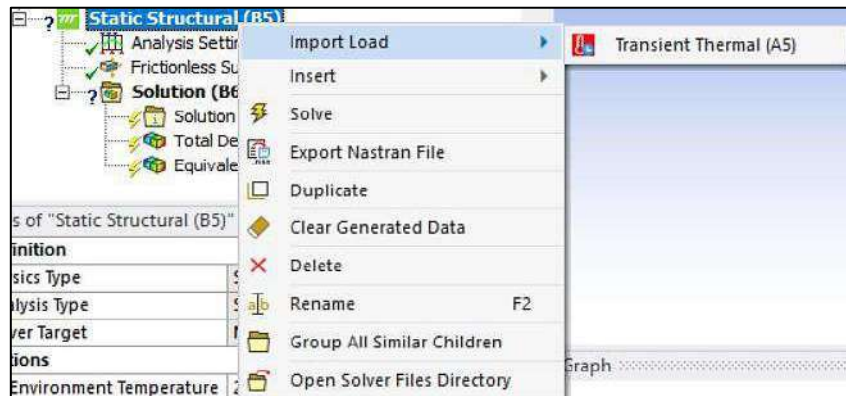
10. Selanjutnya pilih *solution* kemudian klik kanan pilih *temperature* untuk menjalankan simulasi lalu klik *solve*.



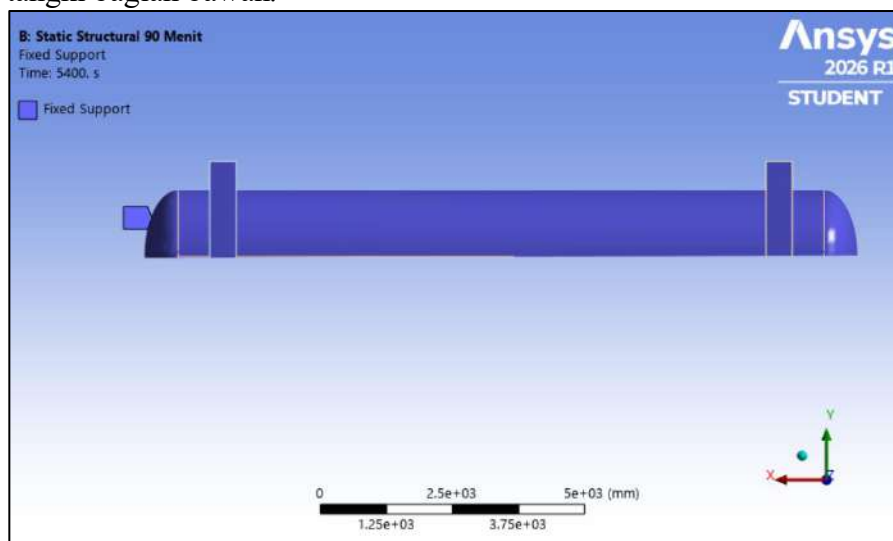
11. Setelah *running* simulasi *thermal* atau pengelasan selesai untuk mencari nilai deformasi dan tegangan maka harus menggunakan analisis *static structural*. Klik pada bagian *home* menu *analysis* kemudian pilih *static structural*. Kemudian cek juga pada halaman utama apakah keduanya sudah terhubung.



12. Kemudian pada *static structural* klik kanan *import load* untuk mengimport beban simulasi *thermal* sebelumnya pada analisis *transient thermal*.



13. Kemudian klik kanan pada *static structural* pilih *fixed support* sebagai kondisi penahanan material. Pemilihan dilakukan pada sisi *support* tangki bagian bawah.



14. Kemudian pada *solution* klik kanan pilih *deformation* pilih *total*. Klik kanan lagi pada *solution* kemudian pilih *stress* pilih *equivalent von misses stress*. Lalu klik *solve* untuk mengetahui hasil.



halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Nama : Wirangga Jakal Nurdiansyah

Alamat : Jl. Pattimura, Slambur, Geger, Kab. Madiun,
Jawa Timur

Agama : Islam

Jenis Kelamin : Laki-Laki

Hobi : Bersepeda

Email : wiranggajakal@student.ppns.ac.id

No.HP 085755664198

Riwayat Pendidikan :

2022-2026	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya Program Studi D4 – Teknik Pengelasan Jurusan Teknik Bangunan Kapal
2019-2022	SMA Negeri 1 Geger
2014-2019	SMP Negeri 1 Geger
2008-2014	MI Kresna Mlilir