

**PENANGANAN KONDISI *COLD SPOT* PADA *CARGO PIPE LINE* DI KAPAL LNG PRIMA CONCORD**



**REINALD MILENIO RANDALINGGI**

**NIT. 21.41.070**

**NAUTIKA**

**PROGRAM PENDIDIKAN DIPLOMA IV PELAYARAN  
POLITEKNIK ILMU PELAYARAN MAKASSAR  
TAHUN 2025**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Nama : REINALD MILENIO R.  
NIT : 21.41.070  
Program Studi : NAUTIKA

Menyatakan bahwa skripsi dengan judul:

### **PENANGANAN KONDISI *COLD SPOT* PADA *CARGO PIPE LINE* DI KAPAL LNG PRIMA CONCORD**

Merupakan karya asli. Seluruh ide yang ada dalam skripsi ini yang saya nyatakan sebagai kutipan, merupakan ide yang saya susun sendiri.

Jika pernyataan diatas terbukti sebaliknya, maka saya bersedia menerima sanksi yang ditetapkan oleh Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.

Makassar, 19 September 2025



REINALD MILENIO R.

NIT: 21.41.070

**PENANGANAN KONDISI *COLD SPOT* PADA *CARGO PIPE LINE* DI KAPAL LNG PRIMA CONCORD**

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk  
Menyelesaikan Program Pendidikan  
Diploma IV Pelayaran

Program Studi Nautika

Disusun dan Diajukan oleh

REINALD MILENIO R.

NIT. 21.41.070

**PROGRAM PENDIDIKAN DIPLOMA IV PELAYARAN  
POLITEKNIK ILMU PELAYARAN MAKASSAR  
TAHUN 2025**

**SKRIPSI**

**PENANGANAN KONDISI *COLD SPOT* PADA *CARGO PIPE LINE* DI KAPAL LNG PRIMA CONCORD**

REINALD MILENIO R.


NIT. 21.41.070

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Skripsi  
Pada tanggal 19 September 2025

Menyetujui:

Pembimbing I

Pembimbing II

  
Dr. Capt. Nurwahidah, S.Pd., M.T., M.Mar  
NIP. 197410092009122001

  
Diah Vitaloka Hartati, M.Pd., M.Mar  
NIP. 199212282023212048

Mengetahui:

A.n. Direktur  
Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar  
Pembantu Direktur I

Ketua Program Studi Nautika

  
Capt. Faisal Saransi, M.T., M.Mar  
NIP. 19750329 199903 1 002

  
Subehana Rachman, M.Adm.S.D.A  
NIP. 19780908 200502 2 001

## PRAKATA

Puji Tuhan, Saya bersyukur atas rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan penulisan Skripsi dengan judul "PENANGANAN KONDISI *COLD SPOT* PADA *CARGO PIPE LINE* DI KAPAL LNG PRIMA CONCORD". Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Pendidikan Diploma IV Perkapalan di Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.

Selama proses penulisan Skripsi ini, saya menghadapi berbagai kendala, namun berkat bimbingan, arahan, dan kerjasama dari berbagai pihak, baik secara moral maupun materi, saya berhasil menyelesaikan Skripsi ini. Saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada kedua orang tua saya, yang telah memberikan kasih sayang, cinta, doa, perhatian, serta dukungan moral dan materi selama ini. Saya berharap dapat menjadi anak yang dapat membanggakan mereka dan meningkatkan derajat keluarga kami.

1. Terima kasih kepada Ayahanda Ibunda Serta keluarga besar yang selalu memberi dukungan kepada saya dalam menyelesaikan perkuliahan.
2. Terima kasih kepada Bapak Capt. Rudy Susanto, M. Pd yang menjabat sebagai Direktur Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
3. Juga kepada Ibu Subehana Rachman, M.Adm.S.D.A yang menjadi Ketua Jurusan Nautika di Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
4. Terima kasih kepada Dr. Capt. Nurwahidah, S.Pd., M.T., M.Mar yang telah menjadi Pembimbing 1.
5. Begitu juga kepada Ibu Diah Vitaloka Hartati, M.Pd.,M.Mar yang telah menjadi Pembimbing 2.
6. Serta kepada seluruh anggota akademik Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
7. Juga kepada Kapten, Mualim I, II, III, Masinis I, II, *Gas Engineer* III, IV, dan seluruh *crew* kapal LNG PRIMA CONCORD

Harapannya adalah agar semua kritik dan saran yang membangun akan saya terima dengan baik, sehingga pengetahuan saya di bidang Navigasi dan Pengoperasian Kapal dapat terus meningkat. Semoga tulisan dalam tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, wawasan, serta inspirasi bagi para Taruna-Taruni Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar dan pembaca pada umumnya.

Makassar, 19 September 2025

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Reinald Milenio R.', written in a cursive style.

REINALD MILENIO R.

NIT. 21.41.070

## ABSTRAK

REINALD MILENIO R. 2025, PENANGANAN KONDISI *COLD SPOT* PADA *CARGO PIPE LINE* DI KAPAL LNG PRIMA CONCORD (dibimbing oleh Nurwahidah dan Diah Vitaloka Hartati)

*Cold spot* merupakan salah satu permasalahan serius pada sistem perpipaan kargo kapal LNG yang dapat mengganggu kestabilan suhu, menyebabkan kondensasi, bahkan berpotensi menimbulkan kerusakan struktural. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab terjadinya *cold spot* pada *cargo pipe line* serta mengevaluasi efektivitas metode penanganan yang diterapkan agar dapat menjaga performa sistem insulasi tetap optimal.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kualitatif, dengan teknik pengumpulan data melalui observasi langsung, wawancara dengan kru kapal, dan dokumentasi teknis

Penelitian dilakukan di kapal LNG Prima Concord saat proses loading LNG di Terminal Tangguh pada tanggal 11 Oktober 2024 dan dilanjutkan dengan observasi kondisi *cold spot* di Terminal LNG Tangguh, Papua Barat. Kondisi *cold spot* ditemukan berupa area pipa dengan suhu lebih rendah dari standar, diduga akibat kerusakan insulasi karena usia material dan kelembapan. Penanganan dilakukan menggunakan metode injeksi *Polyurethane (PU) foam* secara langsung di area terdampak.

Berdasarkan hasil analisa, metode penanganan dengan injeksi *PU foam* terbukti mampu mengembalikan fungsi isolasi termal dan menghentikan penyebaran *cold spot* secara efektif. Kesimpulan menunjukkan bahwa perawatan sistem insulasi harus dilakukan secara rutin, terutama saat *dry dock*. Disarankan adanya inspeksi berkala untuk pencegahan dini.

Kata Kunci: *Cold spot*, insulasi termal, *PU foam*.

## ABSTRACT

REINALD MILENIO R. 2025, HANDLING OF COLD SPOT CONDITIONS ON CARGO PIPE LINE LNG SHIP PRIMA CONCORD (supervised by Nurwahidah and Diah Vitaloka Hartati)

*Cold spots* represent a significant challenge in LNG vessel *cargo* piping *Systems*, potentially disrupting temperature stability, inducing condensation, *and* even leading to structural damage. This study aims to analyze the causes of *cold spots* in *cargo pipelines* *and* evaluate the effectiveness of implemented treatment methods to maintain optimal *Insulation System* performance.

A qualitative method was employed, with data collected through direct observation, interviews with ship crew, *and* technical documentation review.

The research was conducted on the LNG Prima Concord during LNG loading operations at the Tangguh Terminal on October 11, 2024, followed by observation of *cold spot* conditions at the Tangguh LNG Terminal, West Papua. *Cold spots* were identified as *pipe* areas with temperatures below standard levels, likely due to *Insulation* damage resulting from material aging *and* humidity. Treatment was performed using direct *Polyurethane* (PU) *foam Injection* in the affected areas.

Based on the analysis, the PU *foam Injection* method proved capable of restoring thermal *Insulation* function *and* effectively halting the spread of *cold spots*. The conclusion indicates that regular maintenance of the *Insulation System* is necessary, especially during *dry dock* periods. Periodic inspections are recommended for early prevention.

Keywords: Cold spot, Thermal Insulation, PU foam.

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PRAKATA	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Batasan Masalah	4
D. Tujuan Penelitian	4
E. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Landasan Teori	6
B. Kerangka Pikir	54
BAB III METODE PENELITIAN	56
A. Jenis Penelitian	56
B. Definisi Operasional Variabel	57
C. Teknik Pengumpulan Data	57
D. Teknik Analisis Data	59
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	61
A. Hasil Penelitian	61
B. Pembahasan	71

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	85
A. Kesimpulan	85
B. Saran	85
DAFTAR PUSTAKA	86
LAMPIRAN	88
RIWAYAT HIDUP	98

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 <i>Membrane type LNG Carrier</i>	8
Gambar 2. 2 <i>Moss type LNG Carrier</i>	8
Gambar 2. 4 <i>Kangrim Type 1</i>	27
Gambar 2. 5 <i>Kangrim Type 2</i>	27
Gambar 2. 6 <i>LRI Type</i>	28
Gambar 2. 7 <i>Kerangka Pikir Penelitian</i>	55
Gambar 4. 1 <i>Cold spot pada Cargo Pipe</i>	63
Gambar 4. 2 <i>Pengeringan Area Insulasi</i>	77
Gambar 4. 3 <i>Inject PU Foam ke lokasi Insulasi</i>	78
Gambar 4. 4 <i>Penutupan lubang Inject dengan Kayu</i>	79
Gambar 4. 5 <i>Pemangkasan Kayu</i>	79
Gambar 4. 6 <i>Penghalusan area kerja</i>	80
Gambar 4. 7 <i>Pengecatan sesuai warna pipa</i>	81

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Kode warna pipa pada deck kapal LNG	24
Tabel 3. 1 Pertanyaan Wawancara	58
Tabel 4. 1 Ship Particular	62

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Kapal Lokasi Penelitian	88
Lampiran 2 Surat Keterangan Sign On Penulis	89
Lampiran 3 Surat Keterangan Sign Off Penulis	90
Lampiran 4 Ship Particular	91
Lampiran 5 Hasil Wawancara	92

# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Gas alam cair atau *Liquefied Natural Gas* (LNG) merupakan salah satu bentuk penyimpanan dan transportasi gas alam yang telah merevolusi industri energi global. Proses pencairan gas alam telah dikenal sejak awal abad ke-20, namun penggunaannya secara komersial baru berkembang pesat sejak tahun 1960-an. Pada tanggal 25 Januari 1959, kapal MV Methane Pioneer mencatatkan sejarah sebagai kapal pertama di dunia yang mengangkut LNG dari Sungai Calcasieu, Louisiana, menuju Inggris. Peristiwa ini menjadi tonggak awal industri LNG global. Kapal ini juga tercatat sebagai kapal LNG pertama yang menggunakan mesin diesel dan yang melakukan proses bongkar muat di laut. Sejak saat itu, penggunaan LNG berkembang pesat di berbagai negara seperti Jepang, Korea Selatan, dan negara-negara Eropa.

Seiring meningkatnya kebutuhan energi bersih dan rendah emisi karbon, LNG menjadi pilihan utama sebagai sumber energi transisi. LNG dianggap lebih ramah lingkungan karena menghasilkan emisi karbon lebih rendah dibandingkan batu bara dan minyak bumi. Dalam buku *LNG shipping knowledge 3rd edition*, LNG dalam bentuk cair memiliki volume hanya 1/600 dari gas aslinya, sehingga lebih efisien dalam penyimpanan dan pengangkutan. LNG juga tidak berbau, tidak beracun, dan tidak korosif, namun memerlukan infrastruktur khusus seperti terminal LNG, kapal tanker LNG, dan sistem perpipaan kriogenik untuk penanganannya (*International Maritime Organization* (IMO), 2020).

Menurut *Cargo Operation Manual of Prima Concord* (2013), LNG adalah campuran gas *hidrokarbon* (HC) dan *nitrogen*, dengan kandungan utama berupa *metana* (CH<sub>4</sub>) lebih dari 90%. Komponen lainnya termasuk etana, propana, butana, dan *nitrogen*, tergantung pada lokasi dan proses pengolahannya.

LNG disimpan dan diangkut pada suhu mendekati titik didihnya, yaitu sekitar  $-160^{\circ}\text{C}$  pada tekanan *atmosfer*. Karena suhu ekstrem ini, sistem insulasi pada kapal LNG sangat krusial untuk menjaga stabilitas suhu dan mencegah terjadinya kerusakan pada struktur perpipaan. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

Salah satu tantangan dalam pengangkutan LNG adalah adanya *Boil-off Gas (BOG)*, yaitu penguapan alami dari LNG karena adanya pertukaran panas dari luar tangki ke dalam. Walaupun insulasi tangki dirancang untuk meminimalisir perpindahan panas, tetap ada sebagian kecil LNG yang menguap menjadi gas. Untuk mengatasi ini, sebagian kapal LNG dilengkapi dengan sistem *reliquefaction* yang mengembalikan BOG ke bentuk cair. Namun, tidak semua kapal memiliki sistem ini. Akumulasi BOG yang tidak ditangani dengan baik bisa meningkatkan tekanan tangki, serta menimbulkan risiko keselamatan.

Kapal LNG dilengkapi dengan *cargo pipeline*, yaitu sistem pipa kriogenik yang berfungsi untuk mengalirkan LNG dari tangki penyimpanan ke *manifold* atau sebaliknya. Pipa-pipa ini harus tahan terhadap suhu rendah dan memiliki sistem insulasi yang andal. Namun, dalam kondisi tertentu seperti usia insulasi yang menua atau adanya kerusakan mekanis, sistem insulasi bisa mengalami penurunan performa. Salah satu fenomena yang bisa terjadi akibat degradasi insulasi ini adalah terbentuknya *cold spot*—area pada permukaan luar pipa yang mengalami penurunan suhu drastis secara lokal.

*Cold spot* dapat menyebabkan pembentukan es di permukaan luar pipa, kerusakan pada lapisan pelindung, bahkan retakan pada struktur pipa akibat efek *brittle fracture* pada material logam. Jika tidak segera ditangani, *cold spot* dapat berkembang menjadi kebocoran (*leakage*) yang membahayakan keselamatan awak kapal dan lingkungan sekitar. Oleh karena itu, deteksi dini dan penanganan yang tepat terhadap *cold spot* menjadi sangat penting dalam pengoperasian kapal LNG.

Kapal LNG PRIMA CONCORD merupakan salah satu armada yang aktif melakukan pengangkutan LNG dari Indonesia. Dalam salah satu kasus diketahui bahwa proses *loading* terjadi saat kapal LNG *Prima Concord* sedang sandar di Terminal Tangguh, Jetty LNG No. 2. Penulis bersama Chief Officer menemukan kejadian *cold spot* yang menjadi fokus penelitian ini berada di Terminal Tangguh. Kejadian tersebut pertama kali terdeteksi pada tanggal 11 Oktober 2024, ketika awak kapal mengamati adanya pembekuan pada permukaan pipa kargo selama proses pengisian muatan LNG. Fenomena pembekuan ini mengindikasikan adanya gangguan pada sistem insulasi pipa kargo, yang setelah dilakukan inspeksi lebih lanjut dikonfirmasi sebagai *cold spot*.

Munculnya *cold spot* ini disebabkan oleh degradasi insulasi akibat usia pakai yang sudah lama serta paparan suhu kriogenik LNG selama proses pemuatan. Insulasi yang telah mengalami kerusakan tidak lagi mampu menahan suhu ekstrem LNG yang dialirkan, sehingga terjadi pertukaran panas antara permukaan pipa dan lingkungan luar. Akibatnya, suhu permukaan pipa turun drastis hingga terjadi pembekuan, yang berpotensi menyebabkan kerusakan lebih lanjut jika tidak segera ditangani.

Proses penanganan *cold spot* dimulai pada hari yang sama, yaitu 11 Oktober 2024, dengan melakukan penandaan pada area yang terindikasi mengalami kerusakan. Dua hari kemudian, pada 13 Oktober 2024 di pagi hari, dilakukan pelubangan pada area tersebut untuk mengakses rongga insulasi dan mengeringkannya terlebih dahulu. Pada sore harinya, tim teknis kapal melanjutkan dengan proses injeksi *foam* menggunakan bahan aerosol atau *Polyurethane (PU) foam* ke dalam rongga insulasi hingga rongga tersebut benar-benar terisi dan tidak lagi dapat menerima injeksi tambahan, menandakan bahwa rongga telah tertutup sempurna. Lubang injeksi kemudian ditutup dengan potongan kayu kecil dan dilapisi cat hitam sesuai warna pipa, lalu dibiarkan

mengering agar insulasi dapat kembali berfungsi secara optimal. Penanganan ini dilakukan secara hati-hati untuk memastikan sistem perpipaan kembali aman digunakan dalam proses pengangkutan LNG.

Oleh karena itulah, penulis tertarik untuk meneliti lebih lanjut mengenai fenomena *cold spot* pada *cargo pipeline* kapal dengan judul **“Penanganan Kondisi *Cold spot* Pada *Cargo Pipe Line* Di Kapal LNG PRIMA CONCORD”**

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan permasalahan utama dalam penelitian ini, yaitu:

1. Apa faktor penyebab terjadinya *cold spot* pada *cargo pipe line* kapal LNG PRIMA CONCORD?
2. Bagaimana penanganan yang tepat dan efektif dalam mengatasi *cold spot* pada *cargo pipe line* di kapal LNG?

## **C. Batasan Masalah**

Agar penelitian lebih terfokus dan tidak melebar, maka batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Penelitian hanya membahas *cold spot* pada sistem *cargo pipe line* kapal LNG PRIMA CONCORD, tidak mencakup sistem tangki atau sistem perpipaan lain.
2. Penanganan yang dibahas terbatas pada metode injeksi aerosol atau *Polyurethane (PU) foam* sebagai solusi perbaikan insulasi yang rusak.

## **D. Tujuan Penelitian**

Tujuan khusus yang ingin dicapai penulis dari penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi dan menganalisis faktor-faktor penyebab terjadinya *cold spot* pada sistem perpipaan kargo LNG.
2. Menjelaskan metode penanganan *cold spot* menggunakan injeksi aerosol atau *PU foam* berdasarkan pengalaman praktik di lapangan.

## **E. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang ingin dicapai penulis dalam penelitian ini adalah:

### **1. Manfaat Teoritis**

- a. Menambah kajian ilmiah dalam bidang teknik perkapalan, khususnya dalam penanganan sistem perpipaan kriogenik pada kapal LNG.
- b. Memberikan acuan teoritis dalam memahami fenomena *cold spot* sebagai akibat degradasi insulasi.
- c. Menjadi referensi akademik dalam pengembangan metode perawatan dan mitigasi kerusakan pada sistem LNG *Carrier*.

### **2. Manfaat Praktis:**

- a. Memberikan solusi teknis yang aplikatif bagi kru kapal dalam menangani *cold spot* secara cepat dan efektif.
- b. Membantu operator kapal LNG dalam menyusun prosedur inspeksi dan perbaikan sistem insulasi pipa.
- c. Mendukung peningkatan keselamatan kerja dan mencegah kerusakan struktural yang lebih parah pada sistem perpipaan LNG.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Landasan Teori

##### 1. LNG (*Liquefied Natural Gas*)

*Liquefied Natural Gas* (LNG) merupakan bentuk cair dari gas alam yang didinginkan hingga mencapai suhu sekitar  $-160^{\circ}\text{C}$  pada tekanan atmosferik, sehingga gas berubah menjadi cair. Proses ini bertujuan untuk mengurangi volume gas secara signifikan, yaitu hingga sekitar 1/600 dari volume aslinya dalam bentuk gas, sehingga memudahkan penyimpanan dan transportasi dalam jumlah besar secara ekonomis Wira et al., (2021).

LNG memainkan peran penting dalam pasar energi global sebagai salah satu bahan bakar fosil yang paling bersih. Produk ini terbentuk melalui serangkaian proses pemurnian dan pencairan gas alam yang menghilangkan kotoran seperti air, karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), *hidrogen sulfida* ( $\text{H}_2\text{S}$ ), merkuri, dan sebagian besar fraksi berat *hidrokarbon*. Proses ini menghasilkan LNG yang sangat murni dan stabil dalam penyimpanan kriogenik.

*Liquefied Natural Gas* (LNG) digunakan sebagai bahan bakar kapal karena dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan minyak berat. Hal ini terutama disebabkan kandungan metana yang dominan dalam LNG, sehingga menghasilkan emisi gas buang yang lebih rendah, khususnya  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ , dan partikulat. Walaupun metana menjadi komponen utama, keberadaan hidrokarbon berat seperti etana ( $\text{C}_2$ ), propana ( $\text{C}_3$ ), dan butana ( $\text{C}_4$ ) tetap berpengaruh signifikan terhadap nilai kalor (*heating value*) serta karakteristik LNG dalam sistem mesin. Dengan demikian, LNG dapat dipahami sebagai bahan bakar cair berbasis metana yang komposisinya bervariasi, di mana perbedaan kandungan hidrokarbon berdampak langsung pada kualitas energi dan emisi yang dihasilkan. Umumnya LNG mengandung lebih dari 85% metana ( $\text{CH}_4$ ), meskipun

variasi tetap dimungkinkan tergantung asal gas dan proses pengolahannya. Selain itu, LNG juga dapat mengandung etana, propana, butana, dan sejumlah kecil nitrogen. Perbedaan komposisi ini menentukan besarnya nilai kalor LNG, sehingga dalam praktik industri dikenal istilah lean LNG untuk LNG dengan kandungan metana tinggi dan nilai kalor lebih rendah, serta rich LNG untuk LNG dengan proporsi hidrokarbon berat lebih besar dan nilai kalor yang lebih tinggi, Wärtsilä (2024). Karakteristik dari LNG sebagai berikut:

- a. LNG tidak berwarna dan tidak berbau.
- b. Kepadatan sekitar 430–470 kg/m<sup>3</sup>, tergantung pada komposisi gas.
- c. Tidak beracun dan tidak korosif, namun dapat menyebabkan asfiksia bila terjadi pelepasan besar di ruang terbatas karena menggantikan oksigen di udara.
- d. Sifat kriogenik ekstrem menyebabkan LNG mampu membekukan sebagian besar material dalam kontak langsung.
- e. Mudah menguap (volatile), paparan pada suhu lingkungan akan menyebabkan LNG langsung menguap dan membentuk gas yang sangat mudah terbakar.

Menurut studi terbaru, LNG juga dinilai sebagai energi transisi yang mendukung pergeseran dari bahan bakar fosil berat ke energi rendah karbon karena emisinya yang lebih bersih. Pembakaran LNG menghasilkan emisi karbon dioksida sekitar 30% lebih rendah dibandingkan minyak, dan hingga 45% lebih rendah dibandingkan batu bara untuk jumlah energi yang sama IEA, (2021).

Dengan pertumbuhan permintaan energi global yang lebih ramah lingkungan, produksi dan pengangkutan LNG terus meningkat. Hal ini juga memunculkan tantangan baru terkait aspek teknis dan keselamatan, terutama dalam sistem perpipaan dan penyimpanan kriogenik di kapal LNG.

## 2. Kapal LNG

Kapal LNG (*Liquefied Natural Gas Carrier*) merupakan jenis kapal khusus yang dirancang untuk mengangkut gas alam cair (LNG) dalam kondisi kriogenik, yaitu sekitar  $-162^{\circ}\text{C}$  dan tekanan *atmosfer*. Proses pencairan gas alam dilakukan untuk mengurangi volumenya hingga sekitar 1/600 dari bentuk gas aslinya, sehingga memungkinkan transportasi yang lebih efisien secara ekonomi dan logistik, terutama untuk pengiriman jarak jauh melalui laut Al-kuwari et al., (2025).

Gambar 2. 1 *Membrane type LNG Carrier*



Sumber: (SIGTTOa, 2016)

Gambar 2. 2 *Moss type LNG Carrier*



Sumber: SIGTTOa, (2016)

LNG sebagai komoditas memerlukan perhatian tinggi dalam penanganannya karena sifatnya yang mudah menguap dan risiko tinggi terhadap keselamatan. Oleh sebab itu, kapal LNG dirancang dengan sistem keselamatan berlapis yang mencakup sistem isolasi termal tingkat tinggi, sistem kontainmen kargo yang terstandarisasi internasional, dan konstruksi lambung ganda (*double hull*) untuk mencegah kebocoran dan memberikan perlindungan tambahan terhadap benturan. Standar-standar ini diatur dan diawasi oleh organisasi internasional seperti IMO (*International Maritime Organization*) dan SIGTTO (*Society of International Gas Tanker and Terminal Operators*).

#### a. Jenis-Jenis Kapal LNG

Secara umum, kapal LNG diklasifikasikan ke dalam kategori kapal pengangkut gas (*gas Carrier*), namun memiliki desain yang sangat spesifik sesuai jenis gas yang diangkut dan kondisi termodinamika muatannya. Klasifikasi ini merujuk pada standar dari SIGTTO dan IGC Code:

##### 1) *Fully Pressurised (FP)*

Kapal dengan kapasitas kecil (500–11.000 m<sup>3</sup>) yang membawa gas seperti LPG pada tekanan tinggi tanpa pendinginan. Tidak digunakan untuk LNG karena LNG membutuhkan suhu sangat rendah.

##### 2) *Semi-Refrigerated (SR)*

Kapal serbaguna yang memungkinkan pengangkutan gas pada kombinasi tekanan dan suhu menengah. Digunakan untuk berbagai jenis gas, namun bukan LNG utama.

##### 3) *Fully Refrigerated (FR)*

Kapal yang dirancang untuk mengangkut gas seperti LPG dan etana pada suhu rendah dan tekanan *atmosfer*.

##### 4) *LNG Carriers*

Kapal khusus untuk LNG, dengan sistem kontainmen dan isolasi kriogenik canggih, serta kapasitas besar (biasanya 125.000–266.000 m<sup>3</sup>).

#### 5) FSRU (*Floating Storage and Regasification Unit*)

Kapal LNG dengan sistem regasifikasi terintegrasi, memungkinkan konversi LNG menjadi bentuk gas di atas kapal, lalu dialirkan langsung ke daratan. FSRU menjadi solusi populer untuk negara-negara dengan keterbatasan infrastruktur terminal darat.

#### 6) *Regasification Vessels* (RVs) dan LECs

Kapal yang mengangkut gas-gas khusus seperti etilen dan etana pada suhu di bawah LNG.

### b. Karakteristik Umum Kapal LNG

Kapal LNG memiliki sejumlah karakteristik teknis dan keselamatan yang membedakannya dari kapal lainnya:

#### 1) Isolasi Termal Tinggi

Kapal LNG menggunakan isolasi termal yang sangat efisien untuk mempertahankan suhu -162°C. Kehilangan muatan akibat *boil-off* gas diminimalkan, dan gas yang menguap biasanya dimanfaatkan sebagai bahan bakar.

#### 2) Sistem Tertutup (*Closed System*)

Tidak ada pelepasan uap gas ke *atmosfer*. Sistem ini mencakup *vapour return lines* untuk mengalirkan gas kembali ke tangki saat bongkar muat.

#### a. *Double Hull*

Struktur lambung ganda memberikan perlindungan ganda terhadap kebocoran dan kerusakan akibat tabrakan, sesuai standar SOLAS dan *IGC Code*.

#### 3) Kelas Es (*Ice-Class*)

Beberapa kapal LNG, seperti ARC7, dirancang untuk beroperasi di wilayah bersalju atau Arktik. Kapal ini dilengkapi

struktur lambung dan sistem propulsi yang mampu menembus es laut.

#### 4) Propulsi Alternatif

Teknologi propulsi modern telah beralih dari turbin uap ke mesin dual-fuel dan sistem gas-diesel-electric (GDFE). Hal ini memberikan efisiensi bahan bakar yang lebih baik serta fleksibilitas operasional.

### 3. Sistem Pemuatan dan Penyaluran LNG

Operasi kargo LNG mencakup proses *inertization* (inertisasi) tangki kargo, yaitu penggantian atau pengenceran atmosfer dalam tangki menggunakan nitrogen. Proses ini penting untuk mencegah terbentuknya kondisi berbahaya seperti risiko kebakaran atau ledakan, serta memastikan keselamatan sebelum tahap loading maupun discharging dilakukan. Operasi kargo pada kapal LNG merupakan rangkaian prosedur yang sangat kompleks dan terstandarisasi untuk memastikan keamanan dan efisiensi selama pengangkutan LNG dari terminal muat ke terminal bongkar. Operasi ini melibatkan pengaturan *temperature, pressure*, dan komposisi atmosfer di dalam cargo tank serta seluruh *cargo piping System*. Prosedur ini diatur secara ketat oleh *International Gas Carrier (IGC) Code* serta standar internal perusahaan pelayaran dan terminal LNG Matieiko, (2024).

#### a. Loading Progress

Setelah proses pendinginan (*cooling down*) selesai dan suhu tangki kargo telah mencapai  $-130^{\circ}\text{C}$  atau lebih rendah, maka kapal LNG siap untuk memulai proses pemuatan kargo. Tahapan ini merupakan salah satu operasi paling kritis dalam sistem penanganan kargo LNG, karena menyangkut volume besar muatan kriogenik yang sangat sensitif terhadap suhu dan tekanan.

#### 1) Tahapan Umum Pemuatan

Pemuatan LNG dilakukan secara serentak ke empat tangki kargo dengan menggunakan dua hingga empat lengan cair (*Liquid*

*arms*) dari terminal. Dengan dua lengan dan tekanan 2,4 bar di *manifold* kapal, laju pemuatan dapat mencapai 12.000 m<sup>3</sup> per jam, sehingga seluruh kapasitas kargo dapat dimuat dalam waktu sekitar 12 jam. Penggunaan tiga atau empat lengan lebih disukai, karena dapat mengurangi kecepatan aliran di setiap lengan, meminimalkan keausan pada *strainers*, serta memberikan cadangan (*redundancy*) jika terjadi gangguan pada salah satu lengan.

Pengisian dianggap selesai ketika masing-masing tangki mencapai tingkat pengisian maksimum yang diperbolehkan, yaitu 98,9% dari volume tangki. Selama proses ini, air ballast juga dipompa keluar (*deballasting*) secara simultan untuk menjaga kestabilan kapal dan mematuhi batasan trim, draft, dan tegangan struktural.

## 2) Penanganan Gas dan Tekanan Selama Pemuatan

Selama pemuatan, uap LNG (*boil-off gas/BOG*) dan gas displacement akibat pengisian cairan akan dialirkan kembali ke fasilitas darat melalui sistem *vapour return*. Awalnya, uap dapat mengalir bebas melalui *manifold crossover*, namun seiring meningkatnya tekanan di dalam tangki, satu unit kompresor tekanan tinggi (*HD compressor*) biasanya diaktifkan untuk mempercepat aliran uap kembali ke terminal dan menjaga tekanan tangki antara 70–100 mb.

Penting untuk dicatat bahwa suhu tangki sebelum pengisian mempengaruhi laju produksi BOG. Jika suhu tangki tidak dijaga tetap dingin (di bawah -130°C) selama tiga hari terakhir dalam perjalanan ballast, maka sebelum pemuatan penuh dilakukan, sistem *spray pump* harus diaktifkan untuk menyemprotkan LNG ke seluruh tangki hingga suhu uap turun di bawah -150°C. Hal ini membantu mengurangi tekanan tangki dan mengoptimalkan kondisi termal selama dua hari pertama pelayaran *Cargo Operating Manual*, (2013).

### 3) Aspek Keamanan dan Prosedural

Seluruh operasi pengisian harus mengikuti prosedur keselamatan yang ketat. Persiapan sebelum pengisian meliputi:

- a) Menyusun rencana pemuatan dan deballasting, lengkap dengan analisis trim dan stabilitas kapal.
- b) Melakukan pengecekan instrumen pengukuran level (EHL dan HHL) serta pengujian megger pompa kargo dan semprot.
- c) Melakukan pertemuan pra-pemuatan (*pre-loading meeting*) dengan perwakilan terminal, serta menyusun dan menandatangani dokumen keselamatan kapal-darat (*ship/shore safety checklist*).
- d) Menyambungkan semua perlengkapan *manifold* (arm, kabel ESD, bonding wire, telepon) sesuai dengan prosedur terminal.
- e) Menyiapkan sistem pemadam kebakaran, menyambung selang dek, membuka katup water curtain, dan memastikan pompa air laut (GS pump) dalam posisi siap.

Setelah pemuatan selesai, proses penutupan dan pengamanan dilakukan, termasuk:

- a) Penutupan katup di *manifold* dan pemutusan lengan pemuatan.
- b) Menekan lengan cair dengan *nitrogen* dari terminal untuk mendorong sisa LNG kembali ke tangki atau terminal.
- c) Melakukan pengukuran Custody *Transfer Measurement* (CTM) akhir bersama pihak terminal dan otoritas terkait.

Sebagai langkah akhir, jika kapal tidak segera berlayar, boiler akan digunakan untuk membakar kelebihan *boil-off* gas guna menghindari tekanan berlebih pada tangki.

#### b. Discharging dengan *Vapour return*

Proses discharging atau pengosongan kargo LNG merupakan tahap akhir dalam siklus pengangkutan LNG dan dilakukan dengan memperhatikan keseimbangan tekanan antara kapal dan terminal. Karena LNG adalah zat kriogenik dengan volatilitas tinggi, discharging

harus dilakukan dengan sistem *vapour return* untuk menjaga kestabilan tekanan dan mencegah kehilangan produk akibat penguapan.

#### 1) Prinsip Dasar *Vapour return*

Selama proses discharging, LNG cair dipompa keluar dari tangki kargo menggunakan pompa kargo submersible dan dialirkan melalui sistem *manifold* ke fasilitas terminal darat. Karena LNG berada pada tekanan rendah dan suhu sangat rendah (sekitar -160°C), maka saat volume cair dikurangi dari tangki, volume gas harus menggantikannya agar tidak terjadi penurunan tekanan internal yang membahayakan.

Untuk itu, uap LNG dari terminal (*vapour return*) dialirkan kembali ke tangki kargo kapal guna menjaga tekanan tetap stabil pada kisaran 70–100 mb di atas tekanan *atmosfer*. Aliran balik ini dapat berupa uap LNG dari penyimpanan darat atau dari sistem *vapour header* kapal.

#### 2) Proses Operasional Discharging

Tahapan pengosongan dilakukan secara bertahap dan di bawah pengawasan ketat:

- a) Pompa kargo diaktifkan satu per satu untuk menghindari lonjakan tekanan mendadak dan mengontrol laju aliran LNG ke terminal.
- b) Tekanan tangki dipertahankan menggunakan uap LNG yang dikembalikan dari terminal, melalui koneksi *vapour arm*.
- c) Bila tekanan menurun, HD *compressors* kapal dapat digunakan untuk memindahkan uap dari *header* uap internal ke tangki kargo agar tekanan tetap dalam batas aman.
- d) Sistem Custody *Transfer System* (CTS) memantau perpindahan muatan cair dari kapal ke terminal secara real-time.

### 3) Kontrol Tekanan dan Keamanan

Untuk mencegah risiko implosi pada tangki akibat tekanan negatif, sistem *vapour return* wajib dioperasikan sebelum dimulainya pompa kargo. HD *compressors* siap diaktifkan bila tekanan menurun secara signifikan. Seluruh sistem pengendalian tekanan termasuk katup pengaman, pemantauan tekanan tangki, dan suplai *nitrogen* ke ruang isolasi (IBS/IS) harus dipastikan dalam kondisi operasional.

Catatan penting: Jika sistem *vapour return* gagal atau tidak tersedia, discharging tidak boleh dilakukan, kecuali dalam situasi darurat dan dengan prosedur keselamatan tambahan yang sangat ketat.

### 4) Penyelesaian Discharging

Setelah muatan LNG selesai dikosongkan dari tangki:

- a) Pompa kargo dimatikan secara bertahap.
- b) Pipa cair dan *header* dikeringkan dengan *nitrogen* atau dipompa kembali ke tangki terakhir (biasanya No. 4 *cargo tank*).
- c) Lengan cair dan *vapour arm* dari terminal dipisahkan, dan seluruh sambungan *manifold* ditutup rapat.
- d) Proses *final Custody Transfer Measurement* (CTM) dilakukan untuk mencatat total LNG yang telah diturunkan.

Proses ini diakhiri dengan pembersihan sistem pipa dan persiapan tangki kargo untuk kembali ke kondisi ballast atau operasi selanjutnya *Cargo Operating Manual*, (2013).

### 4. Cargo Pipe Line

Menurut buku *Guide for the Design and Operation of Liquefied Natural Gas ( LNG ) Carriers* Pipa kargo LNG harus dibuat dari baja tahan karat jenis austenitik. Untuk mengatasi perubahan panjang akibat suhu dan gerakan kapal, dipasang *expansion loop* atau bellows. Bellows sebaiknya bertipe multi-lapis dengan bahan luar Inconel 825 atau baja tahan karat.

Sambungan pipa harus sesedikit mungkin. Sistem perpipaan lebih baik dilas, tapi tetap disediakan flensa agar peralatan bisa dibongkar pasang saat perawatan. Baut flensa sebaiknya dari baja tahan karat 304L atau 316L. Kecepatan aliran dibatasi pada maksimum 10 m/s untuk cairan dan 30 m/s untuk uap. Sistem juga harus bisa dikeringkan dengan baik, dan jalur cairan didesain agar bisa mengalir sendiri ke tangki.

Sistem harus memungkinkan satu tangki diproses (seperti dipanaskan atau didinginkan) tanpa mengganggu tangki lain yang berisi muatan. Untuk ini, harus ada dua pengaman, seperti dua katup atau satu katup dan pelat penutup. Katup satu arah tidak boleh digunakan. Katup pengaman pada pipa cairan harus mengarah ke dua tangki kargo, bukan ke ventilasi. Semua katup pengaman harus dirancang untuk menjaga keselamatan SIGTTOa, (2016).

Dalam buku *Cargo Operation Manual* di kapal di jelaskan bahwa tekanan desain pada pipa cair dan uap kargo adalah 10 bar, kecuali untuk pipa ventilasi terbuka yang dirancang untuk 5 bar. Suhu desain berkisar antara -163°C hingga +80°C, kecuali untuk beberapa pipa yang digunakan untuk cairan *nitrogen* yang dirancang untuk -196°C. Sistem perpipaan kargo dan *nitrogen* di dek kapal terbuat dari baja tahan karat tipe 316L *schedule* 10S, kecuali pada lokasi-lokasi tertentu seperti *manifold* kargo yang menggunakan pipa *schedule* 40S. Pipa di dalam tangki kargo terbuat dari baja tahan karat tipe 304L SIGTTOa, (2016). Sambungan las butt welded digunakan di setiap kesempatan, dan apabila hal ini tidak memungkinkan, maka flensa standar ANSI dengan rating 150# dan permukaan rata digunakan. Semua gasket yang digunakan harus sesuai dengan standar ANSI 150# dan memiliki ketebalan 4,5 mm pada saat pemasangan, yang akan terkompresi menjadi sekitar 3 mm ketika diberi torsi yang tepat *Cargo Operating Manual*, (2013).

Sistem perpipaan kargo digambarkan dalam gambar perspektif sederhana yang hanya menunjukkan fitur-fitur utama dari sistem tersebut.

Cairan kargo dimuat dan dibongkar melalui dua jalur *crossover* cair di tengah kapal, yang diteruskan ke dan dari setiap dome cair tangki kargo melalui *Liquid header* yang berjalan dari buritan ke haluan sepanjang dek utama. Setiap jalur *crossover* di tengah kapal terpisah menjadi dua koneksi pemuatan/pembongkaran, masing-masing di sisi kiri dan kanan kapal, sehingga terdapat total empat koneksi pemuatan/pembongkaran cair di setiap sisi kapal.

Dome uap pada tangki kargo dipertahankan dalam komunikasi satu sama lain melalui *vapour header* yang berjalan dari buritan ke haluan sepanjang dek utama. *Vapour* main juga memiliki jalur *crossover* di *manifold* tengah untuk digunakan dalam mengatur tekanan tangki saat pemuatan dan pembongkaran. *Vapour header* menghubungkan dome uap pada masing-masing tangki untuk mengarahkan gas *boil-off* ke ruang mesin untuk dibakar, melalui HD *compressors* dan pemanas gas *boil-off/warm-up*. Dalam keadaan darurat, *vapour header* digunakan untuk membuang gas *boil-off* yang berlebihan ke *atmosfer* melalui No. 1 LNG vent mast.

Saat pemuatan, *vapour header* dan *crossover*, bersama dengan HD *compressors*, digunakan untuk mengembalikan gas yang terdisplace dari tangki kembali ke instalasi di darat. Saat pembongkaran, *vapour header* digunakan bersama *crossover* uap atau pemanas uap untuk memasok gas ke tangki guna menggantikan cairan kargo yang keluar.

Saluran *stripping/spray* dapat dihubungkan ke jalur *crossover* cair dan digunakan untuk *menstripping* atau mendinginkan setiap tangki kargo, serta untuk menyemprot selama pembongkaran jika uap balik tidak mencukupi. Saluran *spray* pada setiap tangki terbagi menjadi dua *header spray* independen di dalam tangki bagian atas untuk mendistribusikan cairan yang masuk ke dalam *header* kiri atau kanan. *Header spray* dilengkapi dengan nosel yang terpasang dengan jarak yang sama untuk mencapai tingkat pendinginan yang lebih baik.

Saluran *stripping/spray*, cair, dan *vapour* memiliki cabang-cabang yang menghubungkan ke ruang kompresor kargo dengan koneksi ke kompresor, pemanas, dan pemanas uap untuk berbagai fungsi tambahan. Bending yang dapat dilepas disediakan untuk dipasang bila diperlukan untuk memungkinkan saling koneksi antara berbagai sistem perpipaan untuk penggunaan yang tidak sering dilakukan, seperti persiapan untuk *dry dock* dan penyelesaian setelah *dry dock*.

Sistem Gas Inert dan Udara Kering (bagian 4.9), yang terletak di ruang mesin, digunakan untuk memasok gas inert atau udara kering ke tangki kargo melalui pipa yang terhubung dengan sistem kargo utama melalui katup *non-return* ganda dan spool piece yang dapat dilepas untuk mencegah gas kembali ke ruang mesin.

Seluruh perpipaan kargo dilas untuk mengurangi kemungkinan kebocoran pada sambungan. Baik sistem cair maupun uap dirancang sedemikian rupa sehingga ekspansi dan kontraksi dapat diserap dalam konfigurasi pipa. Ini dilakukan dengan menggunakan *expansion loops* pada pipa cair dan loops serta *expansion bellows* pada pipa uap. Dukungan dan panduan pipa tetap dan geser disediakan untuk memastikan tegangan pada pipa tetap dalam batas yang dapat diterima.

Semua bagian pipa cair yang dapat diisolasi, dan dengan demikian dapat terperangkap cairan di antara katup tertutup, dilengkapi dengan katup pengaman yang akan melepaskan tekanan berlebih ke dome cair terdekat. Ini adalah langkah pengamanan, meskipun praktik kerja normal adalah membiarkan cairan yang tersisa menghangat dan menguap sebelum menutup katup-katup tersebut.

Semua katup utama seperti katup *manifold* tengah (port dan starboard), yang juga disebut sebagai ESD *manifold Valves*, dan katup pemuatan dan pembongkaran individual pada tangki dioperasikan secara jarak jauh dari IAS (*Integrated Automation System*) sehingga semua operasi kargo normal dapat dilakukan dari ruang kontrol kargo.

Saat ESD diaktifkan, katup *manifold* akan tertutup, menghentikan operasi pemuatan atau pembongkaran. Sebuah katup *non-return* dipasang di dalam tangki pada pipa pembuangan masing-masing pompa kargo utama. Sebuah lubang 6 mm dibor pada disk katup untuk memungkinkan saluran pembuangan tangki mengalir dan dibebaskan dari gas. Katup *non-return* juga dipasang pada flensa pembuangan kompresor. Saluran pembuangan *spray/stripping* dan pompa kargo darurat memiliki katup *non-return* yang terletak langsung setelah katup pembuangan yang dioperasikan secara hidraulis.

Sebuah nosel *spray* kecil dengan diameter 6 mm juga dipasang di bagian atas setiap saluran pembuangan pompa kargo di dalam tangki untuk mendinginkan leg pompa darurat guna melindunginya dari tegangan tinggi di tower pompa. Sebuah lubang kecil dengan diameter 5 mm dibor di bagian bawah setiap pipa pembuangan pompa kargo untuk mengalirkan cairan.

#### a. Konfigurasi Sistem Pipa Kargo

##### 1) Sistem Pipa Cair (*Liquid Header Line*)

Sistem ini terdiri dari pipa *Stainless Steel* kriogenik berdiameter 600/400 mm yang dilas dengan metode butt welded, menghubungkan masing-masing dari empat tangki kargo ke loading/discharge manifolds di sisi kapal melalui satu jalur umum. Di setiap *Liquid dome* tangki terdapat *manifold* yang menghubungkan jalur pemuatan dan pembongkaran dari tangki untuk memungkinkan pemuatan dan pembongkaran kargo. *manifold* pada *Liquid dome* ini terhubung dengan jalur pembuangan tangki dari pompa kargo sisi kiri dan kanan, jalur pemuatan, sumur pompa darurat, dan saluran *spray*.

Pada titik-titik tertentu sepanjang jalur cair, flensa penutup dan titik sampel dipasang untuk memfasilitasi inerting dan aerasi sistem selama perawatan.

Semua bagian jalur cair di luar tangki kargo dilapisi dengan isolasi busa poliuretan yang diperluas, yang dibungkus dengan lapisan karet las untuk bertindak sebagai penghalang yang kuat terhadap air dan uap.

## 2) Sistem *Header Uap (Vapour Header Line)*

Sistem ini terdiri dari pipa *Stainless Steel* kriogenik berdiameter 600/500/400/350 mm yang dilas, menghubungkan masing-masing dari empat tangki kargo melalui jalur umum ke *vapour manifold* sisi kapal, ruang kompresor, dan tiang ventilasi depan.

Jalur ke ruang kompresor kargo memungkinkan uap digunakan dalam hal-hal berikut:

- a) Dikirim ke darat selama pemuatan kargo menggunakan HD *compressors* untuk mengontrol tekanan di tangki kargo.
- b) Selama pelayaran ballast/muatan, gas *boil-off* dikirim ke ruang mesin melalui LD *compressors* dan pemanas untuk digunakan sebagai bahan bakar di boiler.
- c) Selama periode perbaikan, untuk memasok gas yang diuapkan yang digunakan untuk membersihkan tangki kargo.
- d) Jalur ke riser depan berfungsi sebagai katup pengaman untuk semua tangki dan digunakan untuk mengontrol tekanan tangki selama operasi normal.
- e) Pada titik-titik tertentu sepanjang jalur uap, flensa penutup dan titik sampel dipasang untuk memfasilitasi inerting dan aerasi sistem selama perawatan.

Semua bagian jalur uap di luar tangki kargo dilapisi dengan isolasi busa poliuretan yang diperluas, yang dibungkus dengan lapisan karet las untuk bertindak sebagai penghalang yang kuat terhadap air dan uap.

### 3) Sistem *Spray* dan *Stripping*

Sistem ini terdiri dari pipa *Stainless Steel* kriogenik berdiameter 80/65 mm yang dilas dengan metode butt welded, menghubungkan pompa *spray* di masing-masing dari empat tangki kargo ke *stripping/spray header* dan berfungsi untuk memasok LNG ke:

- a) Dua saluran *spray* di setiap tangki, yang digunakan untuk mendinginkan tangki dan menghasilkan gas.
- b) Jalur cair utama, yang digunakan untuk mendinginkan saluran sebelum operasi kargo.
- c) Memulai jalur pembuangan untuk mencegah lonjakan saluran saat pompa kargo utama mulai beroperasi.
- d) Memasok LNG atau ke vaporisers untuk menghasilkan gas bagi kompresor dan pemanas.

Pada titik-titik tertentu sepanjang jalur *spray*, flensa penutup dan titik sampel dipasang untuk memfasilitasi inerting dan aerasi sistem selama perawatan.

#### b. Spesifikasi Umum Sistem Pipa

Sistem pipa pada kapal LNG dirancang dengan mempertimbangkan ketahanan terhadap suhu ekstrem dan tekanan tinggi, serta kebutuhan untuk efisiensi operasional yang maksimal selama pengisian, pemuatan, dan pembongkaran kargo LNG. Beberapa spesifikasi penting terkait bahan, tekanan, suhu, sambungan, dan aksesori adalah sebagai berikut:

##### 1) Bahan Pipa

Pipa-pipa yang digunakan pada sistem ini terbuat dari *Stainless Steel* berkualitas tinggi yang memiliki ketahanan terhadap korosi dan kondisi ekstrem yang dihadapi selama transportasi LNG.

- a) Pipa untuk saluran cair (*Liquid Line*) menggunakan *Stainless Steel* Tipe 316L. Material ini dipilih karena kemampuannya untuk menangani korosi akibat kontak dengan LNG yang sangat dingin

pada suhu sekitar  $-163^{\circ}\text{C}$ . *Stainless Steel* 316L memiliki ketahanan terhadap karat dan korosi yang sangat baik, yang sangat penting dalam memastikan keberlanjutan dan keselamatan sistem pipa.

- b) Pipa untuk saluran uap (*Vapour Line*) menggunakan *Stainless Steel* Tipe 304L. Material ini memiliki ketahanan yang baik terhadap kondisi lingkungan dan reaksi kimia yang mungkin terjadi pada suhu yang lebih tinggi, di mana gas uap dapat mencapai temperatur sekitar  $+80^{\circ}\text{C}$ , namun tetap memerlukan daya tahan terhadap tekanan dan perubahan suhu yang signifikan.

## 2) Ketebalan Pipa

Ketebalan pipa bervariasi tergantung pada tekanan desain yang dihadapi oleh setiap bagian sistem pipa. Pipa dengan tekanan yang lebih tinggi, seperti pada sistem *Liquid/vapour header*, akan memiliki ketebalan yang lebih besar untuk mengakomodasi beban tekanan tersebut, sementara pipa untuk sistem dengan tekanan lebih rendah, seperti saluran ventilasi, mungkin menggunakan ketebalan yang lebih tipis.

## 3) Rentang Tekanan

### a) *Liquid/Vapour Header*

Sistem pipa yang menghubungkan tangki kargo dengan *manifold* di sisi kapal ini dirancang untuk menangani tekanan hingga 10 bar. Hal ini mencakup jalur untuk transportasi LNG cair dan gas *boil-off* yang membutuhkan kestabilan tekanan tinggi untuk menghindari kebocoran atau kegagalan struktural.

### b) *Vent/Relief Line*

Untuk saluran ventilasi dan pelepasan tekanan, pipa dirancang untuk menangani tekanan hingga 5 bar. Pipa ini memiliki fungsi untuk menjaga tekanan dalam tangki agar tetap

aman, terutama ketika terjadi peningkatan tekanan akibat gas *boil-off* atau kegagalan sistem lainnya.

#### 4) Rentang Suhu Operasi

Sistem pipa di kapal LNG beroperasi dalam rentang suhu -163°C hingga +80°C, yang mencakup suhu yang sangat rendah saat mengangkut LNG cair hingga suhu yang lebih tinggi pada gas *boil-off* yang digunakan sebagai bahan bakar. Pipa dirancang untuk menahan perubahan suhu yang ekstrim ini tanpa kehilangan kekuatan struktural atau terjadi deformasi.

Untuk sistem yang menangani *nitrogen* cair, pipa dirancang dengan toleransi ekstrem hingga -196°C. Ini penting karena *nitrogen* cair sering digunakan dalam operasi inerting atau sebagai bagian dari proses pembersihan sistem pipa.

#### c. Sambungan dan Aksesori Pipa

Untuk memastikan bahwa sistem pipa dapat berfungsi dengan optimal dalam berbagai kondisi operasi, beberapa aksesori penting digunakan dalam desain pipa:

##### 1) *Expansion loops*

Loops ekspansi digunakan untuk mengakomodasi perubahan panjang pipa yang disebabkan oleh perubahan suhu, sehingga menghindari stres atau kerusakan pada pipa yang dapat terjadi akibat ekspansi dan kontraksi.

##### 2) *Bellows*

*Expansion bellows* dipasang untuk menyerap pergerakan dan getaran dari sistem pipa, serta untuk mengurangi tegangan pada sambungan pipa. Ini sangat penting untuk menjaga integritas pipa dalam jangka panjang.

### 3) Katup Remote Operated (ROV)

Katup ini memungkinkan pengoperasian katup dari jarak jauh, sangat berguna dalam situasi darurat atau untuk mengontrol aliran LNG dengan lebih efisien tanpa harus berada di lokasi fisik.

### 4) ESD Valve (*Emergency Shutdown Valve*)

Katup ini digunakan dalam situasi darurat untuk menghentikan aliran LNG dan mencegah potensi kecelakaan atau kerusakan lebih lanjut pada sistem pipa.

### 5) Spool Piece

Untuk memudahkan isolasi operasional atau pemeliharaan, sistem pipa dilengkapi dengan spool piece yang dapat dilepas. Komponen ini memungkinkan pemisahan sementara antara bagian pipa untuk pemeliharaan atau perbaikan tanpa mengganggu operasi sistem lainnya.

#### d. Kode Warna (*Color Code Line*)

Pada kapal LNG, untuk mempermudah identifikasi jalur pipa dan mencegah kesalahan penanganan yang bisa berbahaya, diterapkan sistem kode warna pada setiap jenis pipa. Hal ini juga membantu dalam proses inspeksi dan perawatan rutin kapal. Kode warna ini dirancang sesuai dengan *Cargo Manual LNG Prima Concord*, dan memiliki fungsi yang jelas sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Kode warna pipa pada deck kapal LNG

Jenis <i>Line</i>	Warna	Fungsi
<i>Liquid Line</i>	Biru	Untuk transportasi LNG cair
<i>Vapour Line</i>	Kuning	Jalur uap gas <i>boil-off</i>
<i>Spray Line</i>	Biru	Untuk pendinginan tangki LNG
Fuel Gas <i>Line</i>	Oranye	Jalur yang menghubungkan ke boiler/turbin untuk bahan bakar

Sumber: (*International Maritime Organization (IMO)*, 2020)

Pemberian kode warna pada pipa kargo ini tidak hanya mempermudah identifikasi jalur pipa yang berbeda, tetapi juga

mengurangi kemungkinan kesalahan selama prosedur pemeliharaan atau pengoperasian. Setiap warna mengindikasikan fungsi spesifik dari jalur pipa, yang membantu kru kapal untuk dengan cepat mengidentifikasi sistem mana yang perlu diperiksa atau dioperasikan, baik itu untuk memuat LNG, mengontrol gas *boil-off*, mendinginkan tangki, atau menangani pelepasan tekanan. Selain itu, penggunaan kode warna ini juga meminimalkan kemungkinan terjadinya kesalahan teknis atau prosedural yang dapat berakibat fatal bagi keselamatan kapal dan kargo.

#### 5. *Pipe Insulation System*

Sistem insulasi pada pipa kargo LNG dirancang untuk mempertahankan suhu kriogenik dan mencegah kehilangan panas, yang sangat penting dalam pengangkutan LNG yang berada pada suhu sekitar  $-162^{\circ}\text{C}$ . Pipa-pipa ini termasuk *header* cairan, *header* uap, serta jalur semprot (*spray line*) yang masing-masing diinsulasi dengan material yang berbeda sesuai dengan kebutuhan lokasi dan kondisi operasi *Cargo Operating Manual*, (2013).

##### a. Insulasi di *Cargo Machinery Room* (CMR)

Di dalam CMR, insulasi yang digunakan merupakan medium density *Polyurethane foam* (PUF) yang dirancang untuk suhu antara  $-196^{\circ}\text{C}$  hingga  $80^{\circ}\text{C}$ . Tiga tipe utama insulasi digunakan di area ini, yaitu:

##### 1) Tipe 1

Digunakan untuk pipa berdiameter besar. Terdiri dari dua lapis PUF dengan densitas  $35\text{--}40\text{ kg/cm}^3$  di pipa dan  $300\text{ kg/cm}^2$  di tumpuan. Lapisan luar dilindungi oleh  $2\text{ mm}$  *fiberglass reinforced plastic* (FRP) dan lapisan dalam dilapisi aluminium foil dengan film poliester. Ketebalan total insulasi:

- 1)  $32\text{--}100\text{ mm}$ :  $50\text{ mm}$
- 2) Pipa cairan  $\geq 125\text{ mm}$ :  $80\text{ mm}$
- 3) Pipa uap  $\geq 125\text{ mm}$ :  $60\text{ mm}$

2) Tipe 2

Untuk pipa diameter 25 mm atau lebih kecil, menggunakan satu lapis PUF dan dilapisi dengan 2 mm FRP.

3) Tipe 3

Digunakan pada vaporiser dan pemanas. Menggunakan satu lapis kaca dan 2 mm FRP.

b. Insulasi di Dek dan *Starboard Passageway*

Pada area terbuka seperti dek dan *Starboard Passageway*, digunakan insulasi rigid PUF berdensitas tinggi ( $\geq 60 \text{ kg/m}^3$  dan 80% *closed cell*), dilapisi oleh jaket polyethylene (HDPE) sebagai pelindung mekanis dan penghalang gas. Sistem ini dirancang untuk suhu di bawah  $-196^\circ\text{C}$  dan lebih tinggi dari  $170^\circ\text{C}$ .

Ketebalan insulasi tergantung pada ukuran pipa:

- 1) 15 mm: 100 mm insulasi
- 2) 700 mm: 200 mm insulasi

Jaket HDPE ditarik ke atas pipa, spacer, dan cangkang ujung sebelum mesin busa menyuntikkan campuran PUF ke dalamnya. Warna hitam jaket ini membantu menyamarkan titik-titik sambungan *foam*.

c. Kode Warna dan Identifikasi

Untuk memudahkan identifikasi saat operasi, pipa cairan dan uap diberi kode warna:

- 3) *Liquid pipes*: dilabeli dengan blue bands round them (biru)
- 4) *Vapour pipes*: dilabeli dengan yellow bands round them (kuning)

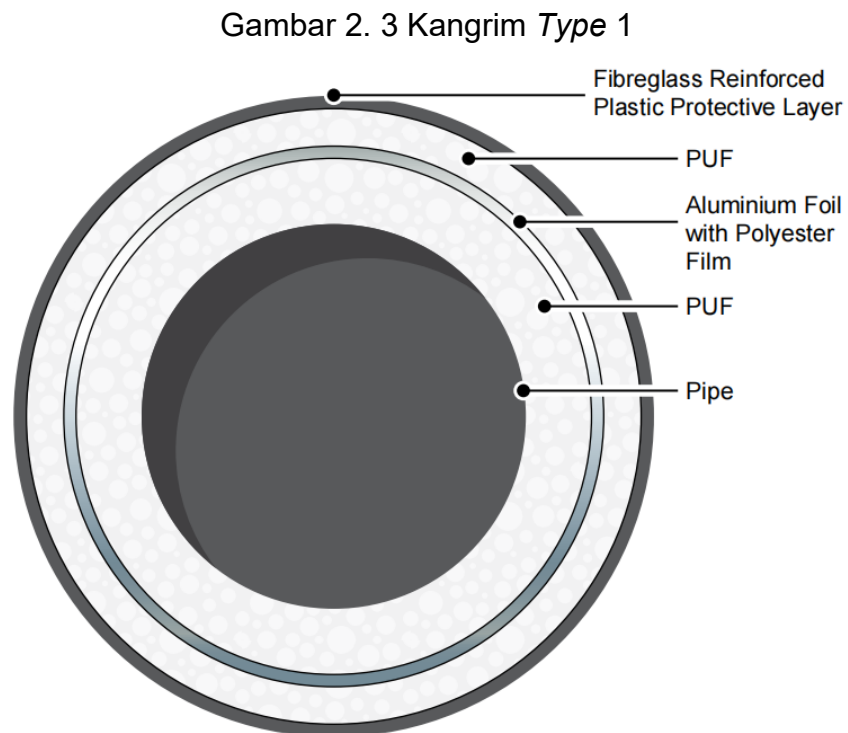
d. Kegagalan Insulasi

Kegagalan insulasi harus diperiksa secara rutin setiap kali operasi bongkar-muat berlangsung. Tanda-tanda kegagalan seperti terbentuknya es atau pengembunan akan terlihat jelas di bagian luar insulasi. Semua kerusakan harus dicatat di *Cargo Log Book*,

termasuk ukuran, lokasi, dan tanggal kerusakan, untuk menentukan apakah perbaikan harus dilakukan segera atau menunggu waktu dok.

e. Ilustrasi Sistem Insulasi

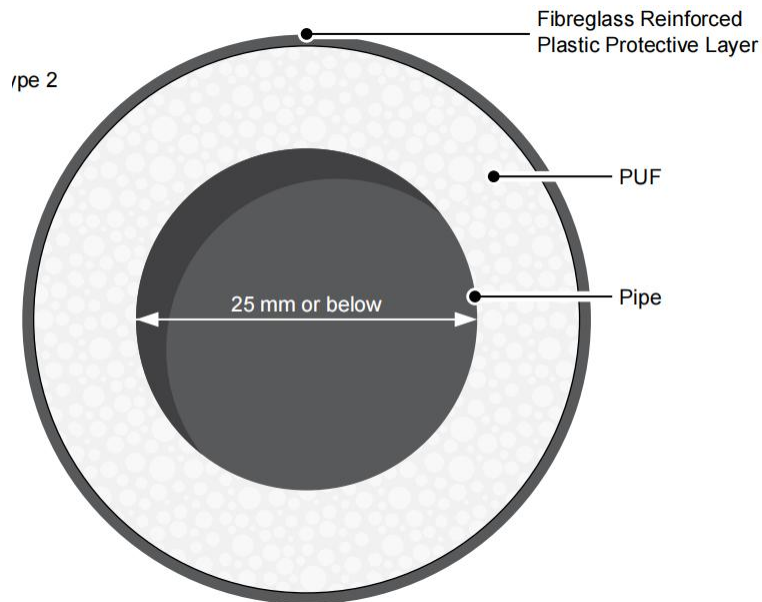
Gambar berikut menggambarkan struktur insulasi berdasarkan tipe:



Sumber: (*Cargo Operating Manual*, 2013)

Kangrim *Type 1* menggunakan dua lapisan PUF, dilapisi FRP 2 mm, digunakan pada pipa besar di area kargo.

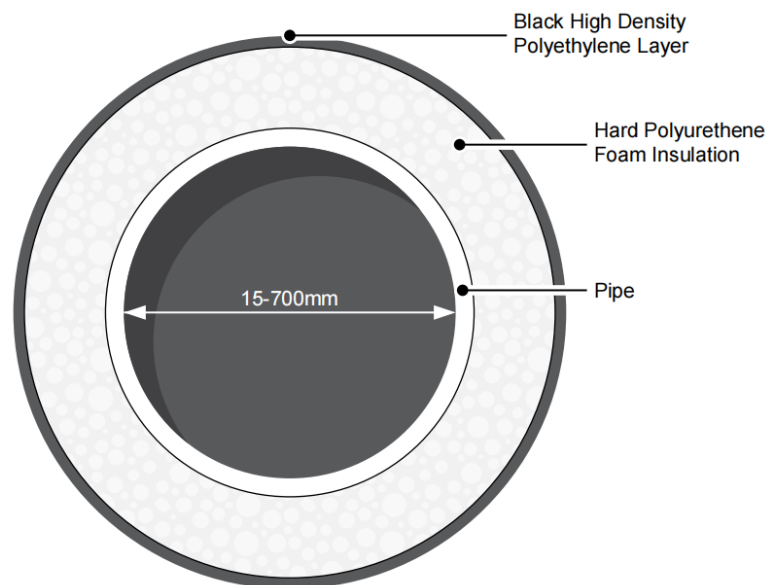
Gambar 2. 4 Kangrim *Type 2*



Sumber: (*Cargo Operating Manual*, 2013)

Kangrim *Type 2* menggunakan satu lapisan PUF dan (Fibreglass Reinforced Plastic) FRP 2 mm untuk pipa kecil ( $\leq 25$  mm).

Gambar 2. 5 LRI *Type*



Sumber: (*Cargo Operating Manual*, 2013)

LRI *Type* digunakan pada pipa HFO, glycol, dan steam. Terdiri dari lapisan luar High Density Polyethylene (HDPE) dan

Polyurethane *Foam* (PUF) keras sebagai lapisan dalam (DIN 8075).

#### 6. *Cold spot* pada *Cargo Pipe*

*Cold spot* merupakan suatu kondisi pada sistem perpipaan kargo LNG yang ditandai dengan adanya bagian tertentu pada permukaan luar insulasi pipa atau tangki yang menunjukkan pembentukan es atau frosting. Dalam *IGC Code* menjelaskan bahwa *Cold spot* merujuk pada bagian dari lambung kapal atau permukaan isolasi termal yang mengalami penurunan suhu secara lokal, yang lebih rendah dari suhu minimum yang diizinkan pada lambung atau struktur lambung sekitarnya. Kondisi ini juga dapat mengindikasikan ketidaksesuaian dengan kemampuan desain dari sistem pengendalian tekanan dan suhu kargo *IGC Code*, (2016).

Fenomena ini menjadi indikasi visual dari berkurangnya efektivitas isolasi termal di area tersebut. Dalam buku LGHP 4 SIGTTO, *cold spot* dijelaskan sebagai:

"An area indicated by frosting on the outer surface of *pipeline Insulation* or *cargo tank Insulation*, thereby showing the reduced thermal *Insulation* properties in that particular area." Wärtsilä, (2024).

Fenomena ini sangat penting untuk diperhatikan dalam pengoperasian kapal pengangkut LNG karena pipa dan tangki beroperasi pada suhu kriogenik ekstrem, yaitu sekitar  $-163^{\circ}\text{C}$  untuk LNG dan bahkan  $-196^{\circ}\text{C}$  untuk *nitrogen* cair. Oleh karena itu, sistem isolasi termal yang digunakan harus memiliki performa tinggi untuk menahan aliran panas dari lingkungan luar menuju ke fluida kriogenik.

##### a. Penyebab *Cold spot*

Beberapa penyebab umum terjadinya *cold spot* pada sistem perpipaan kargo LNG antara lain:

##### 1) Kerusakan fisik pada isolasi

Tekanan mekanis, benturan, atau proses instalasi yang tidak sempurna dapat menyebabkan retakan atau celah pada lapisan insulasi.

## 2) Pemasangan insulasi yang tidak sesuai standar

Kesalahan dalam proses pemasangan seperti sambungan yang tidak rapat, pemotongan yang tidak presisi, atau kurangnya lapisan pelindung luar (*vapour barrier*) dapat menurunkan efisiensi termal.

## 3) Kelembaban atau uap air yang masuk ke dalam sistem isolasi

Uap air yang terjebak dapat mengalami kondensasi dan membeku saat bersentuhan dengan pipa bersuhu rendah, menyebabkan pembentukan es di dalam insulasi.

## 4) Degradasi material insulasi seiring waktu

Umur pakai isolasi yang telah lama dapat menurunkan kemampuan material dalam menahan panas, terutama jika tidak dilakukan inspeksi dan perawatan secara berkala.

## 5) Infiltrasi udara atau gas hangat dari luar sistem

Jika terdapat kebocoran pada sambungan atau lapisan penutup insulasi, udara hangat dapat masuk dan mengakibatkan pencairan dan pembekuan ulang uap air.

## 6) Suhu Ekstrem dari Muatan LNG

Suhu kriogenik yang sangat rendah menimbulkan tantangan besar bagi integritas material insulasi. Sedikit celah atau penurunan performa insulasi dapat menyebabkan permukaan luar membeku.

### b. Dampak *Cold spot*

*Cold spot* yang dibiarkan tanpa penanganan dapat menimbulkan berbagai konsekuensi serius, baik terhadap keselamatan operasional maupun terhadap umur peralatan. Beberapa dampaknya antara lain:

#### 1) Risiko keselamatan personel

Permukaan pipa yang mengalami *cold spot* dapat mencapai suhu ekstrem, yang berbahaya bagi kru kapal jika terjadi kontak langsung. Luka bakar dingin (*frostbite*) merupakan salah satu risiko utama.

#### 2) Pembentukan Es di Permukaan Pipa

Es yang tampak pada permukaan luar insulasi merupakan tanda utama *cold spot*. Ini tidak hanya menandai kerusakan, tapi juga berbahaya jika menyebabkan jatuhnya kru akibat licin atau pelepasan es mendadak.

3) Tegangan termal yang tidak merata pada pipa

Area dengan isolasi buruk akan mengalami perbedaan suhu yang tajam dibandingkan bagian lain dari pipa, menyebabkan tegangan termal yang berpotensi menimbulkan retakan mikro atau deformasi logam.

4) Potensi Brittle Fracture (Retak Getas)

Ketika logam terkena suhu sangat rendah secara lokal tanpa isolasi yang memadai, maka risiko retak getas meningkat — kondisi di mana logam pecah secara tiba-tiba tanpa deformasi plastis.

5) Peningkatan laju *Boil-off Gas* (BOG)

Hilangnya efisiensi isolasi menyebabkan aliran panas dari lingkungan luar ke fluida LNG meningkat, mempercepat proses penguapan LNG menjadi gas. Hal ini dapat membebani sistem penanganan BOG seperti kompresor dan boiler.

6) Korosi bawah isolasi (*Corrosion Under Insulation* - CUI)

Akumulasi kelembaban dalam insulasi bisa menyebabkan korosi pada permukaan logam yang tersembunyi, yang sulit dideteksi hingga terjadi kebocoran atau kerusakan parah.

7) Penurunan integritas sistem perpipaan

Dalam jangka panjang, *cold spot* dapat menyebabkan kegagalan pipa secara struktural, yang sangat berisiko dalam operasi pengangkutan LNG.

8) Kebocoran LNG

Jika insulasi rusak tidak segera diperbaiki, maka dapat terjadi pendinginan berlebih pada permukaan pipa, menyebabkan tekanan internal meningkat atau bahkan kegagalan struktural yang berujung pada kebocoran LNG.

### c. Deteksi *Cold spot*

Deteksi *cold spot* dapat dilakukan melalui dua metode utama:

- 1) Inspeksi visual langsung, dengan melihat adanya es atau embun beku di permukaan luar pipa.
- 2) Penggunaan alat pencitraan termal (thermal imaging camera), untuk mendeteksi perbedaan suhu permukaan yang tidak terlihat oleh mata.

*Cold spot* bukan hanya masalah visual, tetapi indikator penting dari menurunnya kinerja sistem perpipaan kriogenik di kapal LNG. Oleh karena itu, deteksi dini dan penanganan cepat menjadi sangat penting untuk menjaga keamanan operasional, efisiensi energi, dan integritas peralatan dalam jangka panjang.

## 7. *Cooldown*

### a. Pengertian dan Tujuan *Cooldown*

*Cooldown* adalah proses menurunkan temperatur sistem kontainmen kargo hingga mencapai suhu yang aman untuk memulai pemuatan LNG cair. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk mencegah tegangan termal (thermal stress) yang berlebihan pada struktur tangki saat LNG dengan suhu sekitar  $-160^{\circ}\text{C}$  pertama kali dimasukkan ke dalam tangki yang awalnya bersuhu lingkungan SIGTTOa, (2016). Tanpa proses pendinginan yang tepat, perbedaan suhu ekstrem ini dapat menimbulkan tekanan mendadak pada struktur tangki dan menyebabkan kerusakan.

Menurut Liquefied Gas Handling Principles (LGHP), tujuan utama *Cooldown* adalah untuk menghindari tegangan termal yang dapat merusak integritas tangki. Tujuan sekunder dari *Cooldown* adalah untuk menghindari peningkatan tekanan yang berlebihan di dalam tangki akibat flash vaporization LNG ketika bersentuhan dengan permukaan tangki yang masih hangat. Oleh karena itu, *Cooldown* merupakan langkah penting dalam pengoperasian awal sebelum memulai pemuatan kargo LNG Wärtsilä, (2024).

#### b. Metode Pelaksanaan *Cooldown*

Proses *Cooldown* dilakukan dengan menyemprotkan LNG ke dalam tangki melalui sistem *spray header* dan *Cooldown grids* yang terpasang di bagian atas tangki. LNG yang disemprotkan akan langsung menguap ketika menyentuh permukaan tangki yang bersuhu lebih tinggi, sehingga secara bertahap menurunkan suhu keseluruhan tangki SIGTTOa, (2016). Proses ini dilakukan secara terkendali dan terus-menerus hingga suhu rata-rata tangki mencapai titik aman.

Menurut *Cargo Manual LNG Prima Concord* dalam fase pelayaran ballast, tangki-tangki kargo secara tipikal dijaga pada temperatur  $-100^{\circ}\text{C}$  atau lebih rendah melalui ekstraksi uap yang kemudian digunakan sebagai bahan bakar pada sistem boiler. Apabila temperatur tangki telah mencapai kondisi tersebut, proses penurunan suhu pada saluran pipa yang mengalirkan cairan kargo dapat diinisiasi. Prosedur ini perlu diaktivasi dalam rentang waktu yang memadai sebelum aktivitas pemuatan dilaksanakan (estimasi waktu yang dibutuhkan berkisar antara 45 hingga 60 menit)

*Liquefied Natural Gas* (LNG) dialirkan ke dalam sistem *crossover* cairan dan *header* cairan dengan menggunakan tingkat aliran yang telah dibatasi. Akibat perbedaan temperatur yang signifikan di dalam saluran pipa, cairan tersebut akan mengalami proses penguapan secara instan, dan uap yang terbentuk kemudian didistribusikan ke seluruh tangki melalui katup-katup pengisian yang dibuka sebesar 10%.

Saluran pendinginan memerlukan pemantauan yang komprehensif melalui observasi terhadap parameter suhu dan tekanan. Informasi temperatur pada *header* cairan bagian depan dan belakang dapat diakses melalui *Integrated Automation System* (IAS). Dengan kondisi katup pengisian dan uap yang telah terbuka, tekanan di dalam tangki akan mengalami peningkatan secara simultan. Pada saat tekanan mencapai titik tertentu, kompresor *High Duty* (HD)

pertama harus diaktifkan dan dikendalikan melalui sistem *Integrated Automation System* (IAS).

Setelah sistem perpipaan yang berada di kapal dan di darat telah mengalami proses pendinginan yang memadai (membutuhkan estimasi waktu 45 hingga 60 menit), seluruh katup pengisian pada tangki dibuka secara penuh dan aktivitas pemuatan dapat dimulai dengan menggunakan laju yang telah disepakati sebelumnya.

#### c. Aspek Tambahan pada Tipe Kapal Berbeda

Pada kapal LNG tipe membran, tekanan *nitrogen* di ruang antarbarier (*interbarrier space*) harus dikontrol selama *Cooldown* untuk menjaga kestabilan sistem insulasi. Sementara itu, kapal tipe *Moss* dan *SPB* harus mengelola tekanan *nitrogen* di ruang. Proses ini juga membutuhkan koordinasi dengan sistem tekanan *nitrogen* otomatis, sistem deteksi gas, dan unit pendingin kargo.

Buku LGHP juga menyatakan bahwa laju *Cooldown* dan batas maksimum perbedaan suhu antara bagian atas dan bawah tangki biasanya ditentukan dalam *cargo operating manual* masing-masing kapal. Hal ini penting untuk memastikan distribusi suhu yang merata dalam tangki, guna menghindari deformasi akibat perbedaan suhu lokal Wäertsilä, (2024).

#### 8. Leakage (Kebocoran)

Kebocoran pada sistem perpipaan kargo LNG merupakan salah satu risiko paling serius dalam pengoperasian kapal LNG. Kebocoran dapat terjadi pada pipa cairan maupun gas LNG, serta pada sambungan, gasket, katup, atau fitting lainnya. Mengingat LNG disimpan dan dikirim pada suhu kriogenik yang ekstrem (sekitar  $-163^{\circ}\text{C}$ ), kebocoran dapat menimbulkan dampak besar terhadap keselamatan awak kapal, keandalan sistem, serta lingkungan. Kebocoran LNG dapat memperburuk masalah lain seperti kebakaran, ledakan, dan kerusakan sistem, serta mempengaruhi keberlanjutan operasi Wira et al., (2021).

#### a. Penyebab Kebocoran

Beberapa faktor yang dapat menyebabkan kebocoran pada sistem perpipaan LNG antara lain:

##### 1) Degradasi Material

Material pipa dan gasket bisa mengalami kelelahan (*fatigue*), getas (*brittle*), atau korosi terutama jika terjadi kerusakan pada insulasi atau jika ada masuknya uap air ke dalam sistem. Kebocoran ini dapat lebih parah jika material yang digunakan tidak sesuai dengan spesifikasi kriogenik atau telah terdegradasi seiring waktu. Penurunan kualitas material sering kali dipicu oleh perbedaan suhu yang ekstrem dan tekanan yang tinggi. Berdasarkan penelitian terbaru, degradasi material pipa bisa memperpendek umur operasional dan meningkatkan kemungkinan kegagalan sistem Howarth, (2024).

##### 2) Kegagalan Sambungan dan Flange

Sambungan pipa yang tidak terpasang dengan torsi yang tepat atau mengalami getaran terus-menerus dapat menyebabkan celah yang berujung kebocoran. Ketidaksihesuaian dalam pemasangan flange atau sambungan bisa menyebabkan kebocoran pada titik tersebut, terutama dalam kondisi ekstrem. Penelitian oleh menunjukkan bahwa kegagalan sambungan sering terjadi akibat kurangnya pemeliharaan atau kesalahan dalam pemasangan.

##### 3) Kondisi *Cold spot*

*Cold spot* adalah area pada pipa yang mengalami penurunan suhu ekstrim karena efek dari LNG yang mengalir di dalamnya. *Cold spot* ini bisa memicu pembekuan dan retakan mikro yang membuka jalur untuk kebocoran cairan atau gas LNG.

##### 4) Kegagalan Gasket

Gasket spiral wound yang rusak atau aus dapat kehilangan kemampuannya dalam menjaga kedap sambungan antar

flange. Kerusakan gasket ini dapat menyebabkan kebocoran LNG yang signifikan. Gasket sering kali menjadi titik lemah pada sambungan pipa, dan kegagalannya dapat dipengaruhi oleh tekanan, suhu ekstrem, serta siklus pembukaan dan penutupan katup.

#### 5) Kelebihan Tekanan

Jika tekanan dalam pipa melebihi desainnya (misalnya lebih dari 10 bar untuk cairan dan gas LNG), pipa atau sambungan dapat mengalami pelepasan paksa atau ruptur. Kelebihan tekanan ini sering kali terjadi pada sistem yang tidak memiliki pengawasan ketat terhadap kondisi operasional atau alat pengatur tekanan yang tidak berfungsi dengan baik.

#### 6) Kesalahan Operasional atau Perawatan

Kesalahan dalam pembukaan, penutupan katup, atau penggantian bagian pipa juga dapat menyebabkan kebocoran, terutama jika tidak dilakukan sesuai prosedur kriogenik. Praktik operasional yang tidak tepat, seperti membuka atau menutup katup dengan kecepatan yang salah atau mengganti komponen sistem dengan komponen yang tidak sesuai, dapat menyebabkan kebocoran yang tidak terdeteksi. Hal ini sering kali terjadi pada prosedur pemeliharaan atau pengoperasian yang tidak mengikuti standar kriogenik yang ketat.

#### b. Dampak Kebocoran

Kebocoran LNG menimbulkan berbagai dampak serius, di antaranya:

##### 1) Risiko Ledakan dan Kebakaran

LNG yang bocor dan menguap akan menjadi gas mudah terbakar jika bercampur dengan udara dalam proporsi tertentu. Jika ada sumber panas atau api, dapat terjadi ledakan. Penurunan suhu yang tiba-tiba pada permukaan logam akibat kebocoran LNG dapat menyebabkan retakan pada material tersebut, meningkatkan risiko

kebakaran atau ledakan. Menurut Al-kuwari et al., (2025), kebocoran LNG yang tidak segera terdeteksi dapat menyebabkan ledakan besar dan kebakaran yang membahayakan kapal dan awak kapal.

#### 2) Kerusakan Material dan Peralatan

LNG yang bersentuhan langsung dengan logam tanpa perlindungan insulasi bisa menyebabkan pendinginan ekstrem lokal, memicu retak getas (brittle fracture). Dampak ini sering kali menyebabkan kerusakan struktural pada pipa dan peralatan.

#### 3) Bahaya terhadap Awak Kapal

Paparan LNG cair dapat menyebabkan luka bakar dingin (cryogenic burns). Selain itu, uap LNG yang bocor dalam ruang tertutup bisa menyebabkan kekurangan oksigen, yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada kesehatan atau bahkan kematian. Penurunan oksigen ini dapat memperburuk risiko kesehatan bagi awak kapal yang bekerja di area yang terkontaminasi uap LNG.

#### 4) Pencemaran Lingkungan

Kebocoran besar yang mencapai laut dapat menyebabkan pendinginan air laut secara ekstrem lokal dan berdampak pada organisme laut. LNG yang tumpah ke laut dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem laut, yang dapat mempengaruhi fauna dan flora yang tinggal di sekitarnya.

### c. Deteksi dan Penanganan Kebocoran

Sistem LNG modern memiliki berbagai metode deteksi dan perlindungan terhadap kebocoran, seperti:

#### 1) Sistem Deteksi Gas

Sensor gas (methane detectors) dipasang di sepanjang jalur pipa dan ruang kompresor untuk mendeteksi adanya uap LNG. Teknologi deteksi gas ini telah mengalami peningkatan signifikan dalam hal sensitivitas dan kecepatan deteksi.

#### 2) Alarm Tekanan

Tekanan abnormal yang terdeteksi oleh transmitter (seperti CL05 dan CL067) dapat menjadi indikasi awal adanya kebocoran. Alarm ini memberikan peringatan dini untuk menghindari kerusakan lebih lanjut pada sistem.

### 3) Inspeksi Visual dan Termal

Pemeriksaan berkala menggunakan kamera termal dapat membantu mendeteksi perubahan suhu permukaan pipa akibat kebocoran. Teknologi inspeksi termal yang lebih canggih memungkinkan identifikasi kebocoran kecil yang sebelumnya tidak terdeteksi oleh metode konvensional.

### 4) *Shutdown* Otomatis (ESD)

Jika terdeteksi kebocoran besar, sistem ESD (*Emergency Shut Down*) secara otomatis menutup katup-katup utama untuk menghentikan aliran LNG, mencegah kerusakan lebih lanjut, dan meminimalkan potensi bahaya.

### 5) Pemeliharaan *Preventif* dan *Predictive*

Melakukan perawatan berkala pada flange, gasket, serta penggantian material yang telah melewati umur pakai adalah cara efektif untuk mencegah kebocoran. Pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan prediksi kegagalan komponen dapat mengurangi insiden kebocoran.

## d. Pencegahan Kebocoran

Untuk meminimalkan risiko kebocoran, langkah-langkah berikut dapat diambil:

### 1) Pemasangan gasket dengan standar torsi yang tepat

Pemasangan gasket yang tepat sangat penting untuk menjaga kedap sambungan dan mencegah kebocoran.

### 2) Pemeriksaan sistem insulasi untuk mencegah *cold spot*

Memastikan bahwa insulasi pipa berfungsi dengan baik untuk menghindari pembentukan *cold spot* yang dapat menyebabkan keretakan pada pipa.

3) Kalibrasi sistem deteksi tekanan dan gas secara berkala

Sistem deteksi gas dan tekanan harus dikalibrasi secara rutin untuk memastikan keakuratannya dalam mendeteksi kebocoran.

4) Penggunaan material pipa dan gasket yang sesuai dengan spesifikasi kriogenik

Menggunakan material yang sesuai dengan suhu dan tekanan kriogenik dapat mengurangi risiko kegagalan material dan kebocoran.

5) Training awak kapal mengenai prosedur darurat

Awak kapal perlu dilatih secara intensif dalam prosedur darurat untuk menangani kebocoran LNG dengan aman dan efisien.

Kebocoran pada sistem perpipaan LNG bukan hanya masalah teknis, tetapi juga merupakan isu keselamatan dan lingkungan yang krusial. Oleh karena itu, deteksi dini, perawatan berkala, dan desain sistem yang andal menjadi kunci utama dalam menghindari terjadinya insiden kebocoran yang membahayakan.

9. Brittle Fracture (Keretakan)

Keretakan getas (*brittle fracture*) adalah kegagalan struktur atau material secara tiba-tiba tanpa adanya peringatan sebelumnya, yang terjadi ketika material mengalami tegangan lebih besar dari kekuatannya dalam kondisi rapuh, terutama pada suhu rendah. Dalam konteks sistem perpipaan LNG, risiko brittle fracture sangat tinggi karena LNG disimpan dan di*Transfer* pada suhu kriogenik ekstrem yaitu sekitar  $-163^{\circ}\text{C}$  Livaniou, (2022). Suhu ekstrem ini dapat memperburuk kerentanannya terhadap keretakan getas, yang dapat berujung pada kegagalan struktural yang mengancam keselamatan dan operasional kapal.

a. Penyebab Terjadinya *Brittleness Fracture*

Beberapa penyebab utama keretakan getas pada sistem perpipaan LNG antara lain:

1) Suhu Ekstrem

Paparan suhu kriogenik secara terus-menerus menyebabkan struktur mikro logam menjadi lebih rapuh, terutama pada area yang tidak terinsulasi dengan baik (seperti *cold spot*). Pada suhu sekitar  $-163^{\circ}\text{C}$ , material logam mengalami kekerasan yang tinggi dan kehilangan kemampuan untuk meregang, sehingga rentan terhadap keretakan getas.

## 2) Degradasi Material dan Umur Pakai

Material logam yang sudah tua atau telah mengalami kerja berulang (*cyclic stress*) cenderung kehilangan ketangguhannya terhadap suhu rendah. Penggunaan material yang telah berusia panjang atau mengalami tegangan siklik dapat mengurangi ketangguhannya terhadap kondisi kriogenik, sehingga mempermudah terjadinya keretakan.

## 3) Cacat Mikro pada Permukaan Material

Cacat kecil seperti retakan mikro, goresan, atau pori-pori pada permukaan logam bisa menjadi titik awal retakan getas saat dikenai tekanan atau guncangan. Hal ini sering kali terjadi pada sambungan atau las pipa yang tidak sempurna. Cacat mikro ini bisa berkembang lebih lanjut jika berada di bawah tegangan yang tinggi, terutama dalam kondisi kriogenik.

## 4) Desain atau Pengelasan yang Tidak Tepat

Penyambungan pipa yang tidak sesuai prosedur, seperti pengelasan yang tidak memenuhi standar kriogenik, bisa menjadi titik lemah yang memicu keretakan. Pengelasan yang tidak tepat bisa menyebabkan ketidakrataan dalam struktur material, menciptakan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi.

## 5) *Cold spot*

Titik-titik *cold spot* akibat insulasi yang rusak atau tidak sempurna dapat menyebabkan perbedaan suhu ekstrem pada permukaan luar pipa, yang pada akhirnya menyebabkan retak karena tegangan termal. *Cold spot* dapat mengubah distribusi suhu

pada pipa, menyebabkan material mengalami tegangan termal yang besar yang memicu keretakan getas.

b. Dampak *Brittleness Fracture*

Keretakan getas pada sistem perpipaan LNG memiliki dampak yang sangat serius, antara lain:

1) Kebocoran LNG secara Mendadak

*Brittleness Fracture* dapat menyebabkan kebocoran LNG dalam jumlah besar yang terjadi secara tiba-tiba, karena material pipa atau sambungan langsung mengalami kegagalan struktural. Kebocoran ini berpotensi menimbulkan ledakan atau kebakaran, terutama karena LNG adalah gas yang sangat mudah terbakar.

2) Kegagalan Struktural Sistem Perpipaan

Fraktur getas dapat menyebabkan kegagalan struktural pada sistem perpipaan, yang pada gilirannya mempengaruhi integritas seluruh sistem *Transfer* LNG. Kegagalan ini bisa berakibat pada penghentian operasi yang tidak direncanakan, menambah *downtime* dan biaya operasional.

3) Risiko Keselamatan terhadap Awak Kapal

Pelepasan gas berbahaya secara tiba-tiba akibat keretakan getas bisa mengancam keselamatan awak kapal. Paparan langsung terhadap LNG cair atau uapnya dapat menyebabkan luka bakar kriogenik atau keracunan akibat kekurangan oksigen.

4) *Downtime* Operasional dan Biaya Perbaikan

Insiden yang disebabkan oleh keretakan getas dapat menambah *downtime* operasional dan biaya perbaikan yang tinggi, terutama jika insiden tersebut terjadi saat kapal sedang memuat atau membongkar kargo. Penutupan sementara kapal untuk perbaikan dapat berdampak pada jadwal operasional, dan proses perbaikan yang kompleks memerlukan biaya yang tidak sedikit.

### c. Pencegahan *Brittleness Fracture*

Untuk menghindari terjadinya brittle fracture pada sistem perpipaan LNG, beberapa tindakan *Preventif* diterapkan, antara lain:

#### 1) Pemilihan Material yang Sesuai

Penggunaan material yang tahan terhadap suhu kriogenik sangat penting. Baja tahan karat tipe 304L dan 316L sering digunakan dalam sistem perpipaan LNG karena ketahanannya terhadap suhu rendah dan kemampuan untuk menahan tegangan.

#### 2) Desain Pipa dengan Sistem Kompensasi Tegangan

Pemasangan *expansion loop* dan *expansion bellows* dapat membantu menyerap perubahan panjang pipa akibat ekspansi dan kontraksi suhu. Hal ini penting untuk mengurangi stres termal yang dapat memicu terjadinya keretakan.

#### 3) Insulasi Berkualitas Tinggi

Penggunaan insulasi seperti *Polyurethane foam* yang efektif dalam menjaga kestabilan suhu permukaan pipa akan mengurangi kemungkinan terjadinya *cold spot*, yang pada gilirannya dapat mengurangi risiko keretakan getas.

#### 4) Pemeriksaan *Nondestruktif* (NDT)

Pengujian berkala menggunakan metode seperti ultrasonik atau radiografi untuk mendeteksi cacat mikro pada sambungan dan permukaan pipa sangat penting. Pemeriksaan NDT ini membantu memastikan bahwa material tidak mengalami degradasi atau cacat yang dapat memicu keretakan.

#### 5) Manajemen Umur Material

Monitoring dan penggantian komponen yang telah melewati umur pakainya serta penggunaan data log tekanan dan suhu untuk memantau beban siklik sangat penting untuk menghindari kerusakan yang diakibatkan oleh kelelahan material.

## 10. IMDG Code (International Maritime Dangerous Goods Code)

International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG Code) merupakan peraturan internasional yang mengatur pengangkutan barang-barang berbahaya melalui laut. Kode ini diterbitkan oleh *International Maritime Organization* (IMO) dan bersifat wajib bagi semua negara anggota SOLAS (Safety of Life at Sea), termasuk Indonesia. Tujuan utama dari IMDG Code adalah untuk meningkatkan keselamatan kapal dan personel serta mencegah pencemaran laut akibat tumpahan atau kebocoran bahan berbahaya selama pengangkutan.

Menurut Buku dari Nurwahidah et al., (2025) dalam penjelasannya mengenai IMDG Code, disebutkan bahwa setiap barang berbahaya yang diangkut melalui laut harus diklasifikasikan sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan oleh IMO. IMDG Code memberikan pedoman teknis yang rinci mengenai klasifikasi, pengemasan, pelabelan, dokumentasi, dan penanganan barang-barang berbahaya, termasuk muatan cair seperti *Liquefied Natural Gas* (LNG).

Berdasarkan IMDG Code Volume 1 Edisi 2022, LNG (*Liquefied Natural Gas*) secara spesifik dikategorikan sebagai kelas 2.1, yaitu gases, flammable (gas mudah terbakar). Dalam daftar barang berbahaya (Dangerous Goods List), LNG tercantum dengan UN Number 1972 dan memiliki nama pengiriman resmi (Proper *Shipping Name*) sebagai Methane, *Refrigerated Liquid* or Natural gas, *Refrigerated Liquid* (with high methane content) *International Maritime Organization* (IMO), (2022).

Adapun klasifikasi tersebut memuat ketentuan penting yang harus dipatuhi, antara lain:

- a. LNG bersifat cryogenic (suhu sangat rendah), sehingga memerlukan sistem penyimpanan dan perpipaan khusus untuk mempertahankan suhu dan tekanan.
- b. LNG merupakan zat yang mudah menguap dan mudah terbakar apabila terkena udara terbuka, sehingga risiko kebakaran dan ledakan sangat tinggi.

- c. Pengangkutan LNG melalui laut harus menggunakan kapal khusus, yaitu LNG *Carrier* yang dilengkapi dengan sistem kontainmen dan isolasi termal yang sesuai dengan persyaratan IGF *Code* dan IMDG *Code*.

Lebih lanjut, IMDG *Code* menetapkan bahwa pengangkutan LNG harus mengikuti protokol keselamatan tertentu seperti:

- a. Pelabelan kontainer dengan simbol “flammable gas” (label kelas 2.1),
- b. Penggunaan Dangerous Goods Declaration (DGD) yang memuat informasi lengkap terkait jenis barang, UN number, dan prosedur darurat,
- c. Pemisahan (segregation) dari bahan kimia lain yang dapat menimbulkan reaksi berbahaya.

Dengan demikian, keberadaan IMDG *Code* tidak hanya berfungsi sebagai dokumen teknis semata, melainkan menjadi instrumen regulatif yang krusial dalam menjaga keselamatan pelayaran dan perlindungan lingkungan maritim, terutama dalam pengangkutan komoditas berisiko tinggi seperti LNG.

## 11. SOLAS dan SIGTTO

Sistem perpipaan kargo LNG di kapal harus dirancang, dibangun, dan dioperasikan sesuai dengan standar keselamatan internasional yang ketat. Regulasi tersebut bertujuan untuk memastikan keamanan pengangkutan LNG, melindungi lingkungan, serta menjamin keselamatan kapal dan awak. Beberapa regulasi dan panduan utama yang relevan meliputi SOLAS dan panduan teknis dari SIGTTO.

### a. SOLAS (Safety of Life at Sea)

SOLAS adalah konvensi internasional yang menetapkan standar minimum keselamatan untuk konstruksi, peralatan, dan pengoperasian kapal. Beberapa bagian penting dari SOLAS yang berkaitan dengan sistem perpipaan LNG adalah:

- 1) Bab II-2 – Proteksi Terhadap Bahaya Kebakaran

SOLAS Bab II-2 mengatur ketentuan insulasi terhadap pipa LNG, proteksi terhadap api, dan sistem deteksi kebocoran gas. Sistem perpipaan LNG harus dilengkapi dengan proteksi kebakaran yang efektif untuk mencegah terjadinya kebakaran yang dapat membahayakan keselamatan kapal dan awak.

## 2) Bab VII – Pengangkutan Barang Berbahaya

Bab ini menyediakan regulasi tentang peralatan, instalasi, dan operasi sistem perpipaan untuk barang berbahaya seperti LNG. Pengoperasian sistem perpipaan LNG di kapal harus mematuhi persyaratan ketat mengenai instalasi pipa, katup ESD (*Emergency Shut Down*), dan pengendalian kebocoran gas.

## 3) Sistem Pipa dan Katup

SOLAS mengharuskan sistem perpipaan LNG dirancang untuk menahan tekanan kerja maksimum yang terjadi selama operasi. Selain itu, sistem harus dilengkapi dengan katup ESD yang dapat dioperasikan dari ruang kontrol untuk mengurangi risiko kecelakaan akibat kebocoran.

## 4) Insulasi

Pipa kriogenik harus memiliki isolasi yang tahan terhadap air dan uap agar tidak menurunkan efisiensi termal dan menyebabkan kerusakan struktural pada pipa. SOLAS menekankan pentingnya penggunaan bahan isolasi berkualitas tinggi untuk mencegah kerusakan dan memastikan keandalan sistem.

## b. SIGTTO (*Society of International Gas Tanker and Terminal Operators*)

SIGTTO adalah organisasi industri yang mengembangkan standar teknis dan praktik terbaik dalam pengoperasian kapal dan terminal gas, khususnya LNG. Panduan dari SIGTTO bersifat rekomendasi tetapi sangat dihormati dalam industri pelayaran gas. Beberapa hal yang ditekankan dalam panduan SIGTTO terkait sistem perpipaan LNG adalah:

### 1) Design *and* Arrangement of Piping Systems

SIGTTO memberikan pedoman mengenai tata letak sistem perpipaan LNG, pemilihan material, serta fleksibilitas pipa untuk mengakomodasi ekspansi termal. Desain sistem perpipaan harus mempertimbangkan perubahan panjang pipa akibat perubahan suhu ekstrem, serta memberikan kelonggaran yang cukup untuk meminimalkan stres termal.

### 2) Integrity *and* Inspection

SIGTTO menekankan pentingnya inspeksi berkala terhadap sistem perpipaan LNG, pengujian sistem insulasi, serta kontrol terhadap *cold spot* yang dapat memicu keretakan getas. Inspeksi rutin ini penting untuk memastikan bahwa pipa dan sambungan berada dalam kondisi optimal dan bebas dari cacat yang dapat memengaruhi keselamatan operasional kapal.

### 3) *Emergency Shutdown Systems*

SIGTTO menggarisbawahi pentingnya sistem ESD yang terintegrasi dengan *manifold* dan jalur perpipaan untuk mencegah tumpahan LNG saat terjadi keadaan darurat. Sistem ESD harus dapat beroperasi dengan cepat dan efektif untuk menghentikan aliran LNG dan mengurangi risiko kecelakaan besar.

Walaupun ketiganya (IMDG, SOLAS, dan SIGTTO) memiliki fokus yang berbeda, regulasi-regulasi ini saling melengkapi dan membentuk sistem keselamatan yang menyeluruh dalam pengoperasian kapal LNG. Penerapan ketiga panduan ini secara terpadu akan memastikan:

#### 1) Keandalan Teknis Sistem Perpipaan LNG

Sistem perpipaan LNG akan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kebocoran, kerusakan, dan potensi kecelakaan jika ketiga regulasi tersebut diterapkan secara konsisten.

#### 2) Keselamatan Operasional dan Lingkungan

Dengan adanya pengawasan yang ketat terhadap desain, pengoperasian, dan pemeliharaan sistem perpipaan LNG, regulasi ini

membantu mengurangi dampak terhadap keselamatan awak kapal dan melindungi lingkungan dari potensi pencemaran akibat kebocoran LNG.

### 3) Kepatuhan Terhadap Persyaratan Internasional

Penerapan IMDG, SOLAS, dan SIGTTO memastikan bahwa kapal yang mengangkut LNG mematuhi standar keselamatan internasional yang berlaku saat berada di pelabuhan mana pun di dunia, serta memenuhi persyaratan pengangkutan LNG yang aman.

## 12. Definisi-Definisi

### a. LNG (*Liquefied Natural Gas*)

LNG adalah gas alam yang dicairkan melalui proses pendinginan hingga mencapai suhu sekitar  $-162^{\circ}\text{C}$ , yang membuat volumenya berkurang drastis. Hal ini memudahkan penyimpanan dan pengangkutan LNG dalam bentuk cair.

### b. Kapal LNG (*Liquefied Natural Gas Carrier*)

Kapal LNG adalah kapal khusus yang dirancang untuk mengangkut gas alam cair (LNG) pada suhu sangat rendah sekitar  $-162^{\circ}\text{C}$ . Kapal ini dilengkapi dengan sistem tangki kriogenik dan perpipaan untuk memuat, menyimpan, dan membongkar. *LNG Cargo Operating Manual, (2013)*.

### c. *Cargo Piping System*

Sistem perpipaan kargo adalah jaringan pipa pada kapal LNG yang digunakan untuk memuat, menyimpan, dan membongkar LNG. Sistem ini mencakup pipa cair (*Liquid header*), pipa uap (*vapour header*), serta pipa semprot (*spray line*) yang semuanya harus mampu menahan suhu kriogenik. *IGC Code, (2016)*.

### d. Insulasi Pipa (*Pipe Insulation*)

Insulasi pipa adalah lapisan pelindung yang dipasang pada sistem perpipaan LNG untuk menjaga suhu dalam pipa tetap rendah agar LNG tetap dalam bentuk cair. Insulasi ini juga berfungsi untuk

mengurangi kehilangan panas dan mencegah panas luar masuk ke dalam pipa. IGC Code, (2016)..

e. *Cold spot*

*Cold spot* merupakan bagian pada permukaan luar pipa yang ditandai dengan munculnya bunga es, yang menunjukkan adanya kerusakan atau penurunan kualitas pada lapisan insulasi. Kondisi ini berpotensi menimbulkan kebocoran serta gangguan pada sistem perpipaan LNG. Dalam kajian menggunakan metode *thermography*, *cold spot* dijelaskan sebagai anomali termal, yaitu area dengan suhu lebih rendah dari sekitarnya pada pipa atau tangki LNG, yang mengindikasikan adanya cacat atau degradasi pada insulasi. Cai, H., et al, (2024).

f. *PU Foam (Polyurethane Foam)*

*PU Foam* adalah bahan insulasi berbasis poliuretan yang digunakan untuk mengisi rongga atau memperbaiki kerusakan pada sistem insulasi pipa LNG. *PU foam* sering digunakan untuk menangani *cold spot* dengan cara injeksi. *Cargo Operating Manual*, (2013).

g. *Brittle Fracture (Keretakan Getas)*

*Brittleness Fracture* adalah jenis keretakan yang terjadi secara tiba-tiba tanpa adanya deformasi plastis, umumnya pada suhu rendah. Keretakan jenis ini terjadi pada material yang tidak dapat menahan tegangan akibat suhu ekstrem, seperti yang terjadi pada pipa LNG yang terkena *cold spot*. Livaniou, (2022).

h. *Leakage (Kebocoran)*

Kebocoran adalah keluarnya LNG dari sistem pipa atau peralatan lainnya akibat keretakan, korosi, atau kegagalan komponen. Kebocoran dapat membahayakan keselamatan dan lingkungan. Alfadri & Triwilaswandio, (2024).

i. *ESD (Emergency Shutdown)*

ESD adalah sistem darurat yang digunakan untuk menghentikan aliran LNG dalam keadaan darurat, seperti kebocoran atau kebakaran.

Sistem ini secara otomatis menutup katup utama untuk mencegah risiko lebih lanjut. *Cargo Operating Manual, (2013).*

j. *Boil-off Gas (BOG)*

*Boil-off gas* adalah gas yang terbentuk dari LNG cair akibat evaporasi pada suhu tertentu. Gas ini dapat digunakan untuk keperluan bahan bakar kapal atau dikembalikan ke sistem untuk mencegah kehilangan. *LNG Cargo Operating Manual, (2013).*

k. *Vapour Header*

*Vapour header* adalah pipa utama yang mengalirkan gas (BOG) dari tangki LNG ke berbagai sistem pemanfaatan gas, seperti mesin pembakaran atau sistem pemulihan energi. *Cargo Operating Manual, (2013).*

l. *Liquid Header*

*Liquid header* adalah pipa utama yang digunakan untuk mendistribusikan LNG cair dari tangki penyimpanan ke berbagai sistem pada kapal. *Cargo Operating Manual, (2013).*

m. *Spray Header*

*Spray header* adalah saluran pipa yang digunakan untuk menyemburkan LNG ke dalam ruang tertentu, seperti sistem evaporator atau pemanas, untuk mengubah LNG cair menjadi gas. *Cargo Operating Manual, (2013).*

n. SIGTTO (*Society of International Gas Tanker and Terminal Operators*)

SIGTTO adalah organisasi internasional yang menyusun standar teknis dan praktik terbaik untuk pengoperasian kapal gas dan terminal, termasuk standar keselamatan dan efisiensi sistem perpipaan LNG. Wärtsilä, (2024).

o. SOLAS (*Safety of Life at Sea*)

SOLAS adalah konvensi internasional yang mengatur keselamatan kapal dan perlengkapannya, termasuk standar untuk desain dan operasional kapal LNG, serta pengamanan sistem

perpipaan dan peralatan terkait LNG. (*International Maritime Organization*, 1978).

p. IMDG (International Maritime Dangerous Goods Code)

IMDG Code adalah peraturan internasional yang mengatur pengangkutan barang berbahaya melalui laut, termasuk LNG, dan menetapkan standar keselamatan untuk sistem perpipaan yang mengangkut LNG dalam kapal. Nurwahidah et al., (2025)

q. High Density Polyethylene (HDPE)

HDPE adalah jenis plastik yang digunakan sebagai bahan pelindung mekanis pada insulasi pipa, berfungsi untuk melindungi insulasi dari kerusakan fisik dan pengaruh lingkungan. *Cargo Operating Manual*, (2013).

r. Fibreglass Reinforced Plastic (FRP)

FRP adalah bahan komposit yang digunakan untuk melapisi insulasi pipa, memberikan perlindungan mekanis serta ketahanan terhadap suhu ekstrem dan korosi. *Cargo Operating Manual*, (2013).

s. *Cargo Machinery Room* (CMR)

*Cargo Machinery Room* adalah ruang di kapal LNG yang berisi peralatan untuk mengelola proses pemuatan, pembongkaran, dan penyimpanan LNG, termasuk kompresor dan pompa. *Cargo Operating Manual*, (2013).

t. HD Compressors

HD Compressors adalah jenis kompresor yang digunakan di kapal LNG untuk mengompresi gas LNG yang terbentuk akibat evaporasi (BOG), yang kemudian dapat digunakan untuk bahan bakar kapal atau diolah lebih lanjut. *Cargo Operating Manual*, (2013).

u. *Cooling down*

*Cooling down* adalah proses pendinginan tangki dan sistem perpipaan LNG untuk menurunkan suhu hingga mencapai kondisi

operasi yang aman sebelum LNG dipindahkan atau disimpan. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

v. IGC Code (International Gas Carrier Code)

IGC Code adalah peraturan internasional yang mengatur desain, konstruksi, dan operasional kapal pengangkut gas, termasuk kapal LNG, untuk memastikan keselamatan dalam pengangkutan gas berbahaya. *IGC Code, (2016)*

w. Loading

Proses pemindahan LNG dari terminal ke tangki kargo kapal LNG melalui sistem perpipaan kriogenik. Proses ini mengharuskan pengendalian suhu dan tekanan untuk menjaga LNG tetap cair dan aman. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

x. Discharge

Proses pengeluaran LNG dari tangki kargo kapal LNG ke fasilitas darat atau terminal. Sama seperti loading, proses ini memerlukan pengendalian suhu dan tekanan untuk mencegah kebocoran atau kerusakan pada sistem perpipaan. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

y. Absorpsi

Proses penyerapan suatu zat ke dalam bagian dalam suatu padatan. Wäertsilä, (2024).

z. Adsorpsi

Proses penempelan atau akumulasi zat pada permukaan luar suatu padatan. Wäertsilä, (2024).

aa. Aerasi

Proses pemasukan udara segar ke dalam tangki dengan tujuan menghilangkan gas inert dan meningkatkan kandungan oksigen hingga 20,9% volume. Wäertsilä, (2024).

bb. Bahaya (Hazard)

Sumber potensi cedera, kerugian, atau kerusakan. Wäertsilä, (2024).

cc. Evaporasi

Proses perubahan zat dari bentuk cair menjadi uap. Wärtsilä, (2024).

dd. Gas Free

Kondisi *atmosfer* yang telah diuji dan dinyatakan aman untuk dimasuki atau dilakukan pekerjaan tertentu, seperti pengelasan atau inspeksi. Wärtsilä, (2024).

ee. Kerapuhan (Brittleness)

Kondisi yang terjadi ketika LNG tumpah ke dek baja kapal dan menyebabkan pendinginan baja hingga di bawah suhu cairan, yang mengakibatkan kerapuhan material. Wärtsilä, (2024).

ff. Klasifikasi (*Classification Society*)

Organisasi yang menetapkan aturan teknis dan melakukan survei terhadap desain dan kondisi kapal untuk memastikan kepatuhan terhadap aturan tersebut. Wärtsilä, (2024).

gg. Kondensasi (*Condensation*)

Proses eksotermik di mana suatu zat berubah dari bentuk uap menjadi cair, disertai pelepasan panas. Wärtsilä, (2024).

hh. Manual Operasi Kargo

Dokumen wajib berdasarkan Kode IGC yang menjadi referensi utama bagi awak kapal terlatih dalam mengoperasikan kapal secara aman. Wärtsilä, (2024).

ii. Mudah Terbakar (*Flammable*)

Suatu zat yang dapat menyala dan terbakar. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

jj. Pembersihan Gas (*Gas Freeing*)

Proses menghilangkan gas beracun, mudah terbakar, dan inert dari ruang tertutup dengan menggantinya menggunakan udara segar. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

kk. Pendinginan Awal (*Cooldown*)

Proses penurunan suhu tangki kargo hingga ke tingkat aman untuk memulai proses pemuatan LNG. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

ll. Titik didih (Boiling point)

Suhu di mana tekanan uap suatu cairan (termasuk gas cair) sama dengan tekanan *atmosfer* sekitarnya. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

mm. *Integrated Automatic System (IAS)*

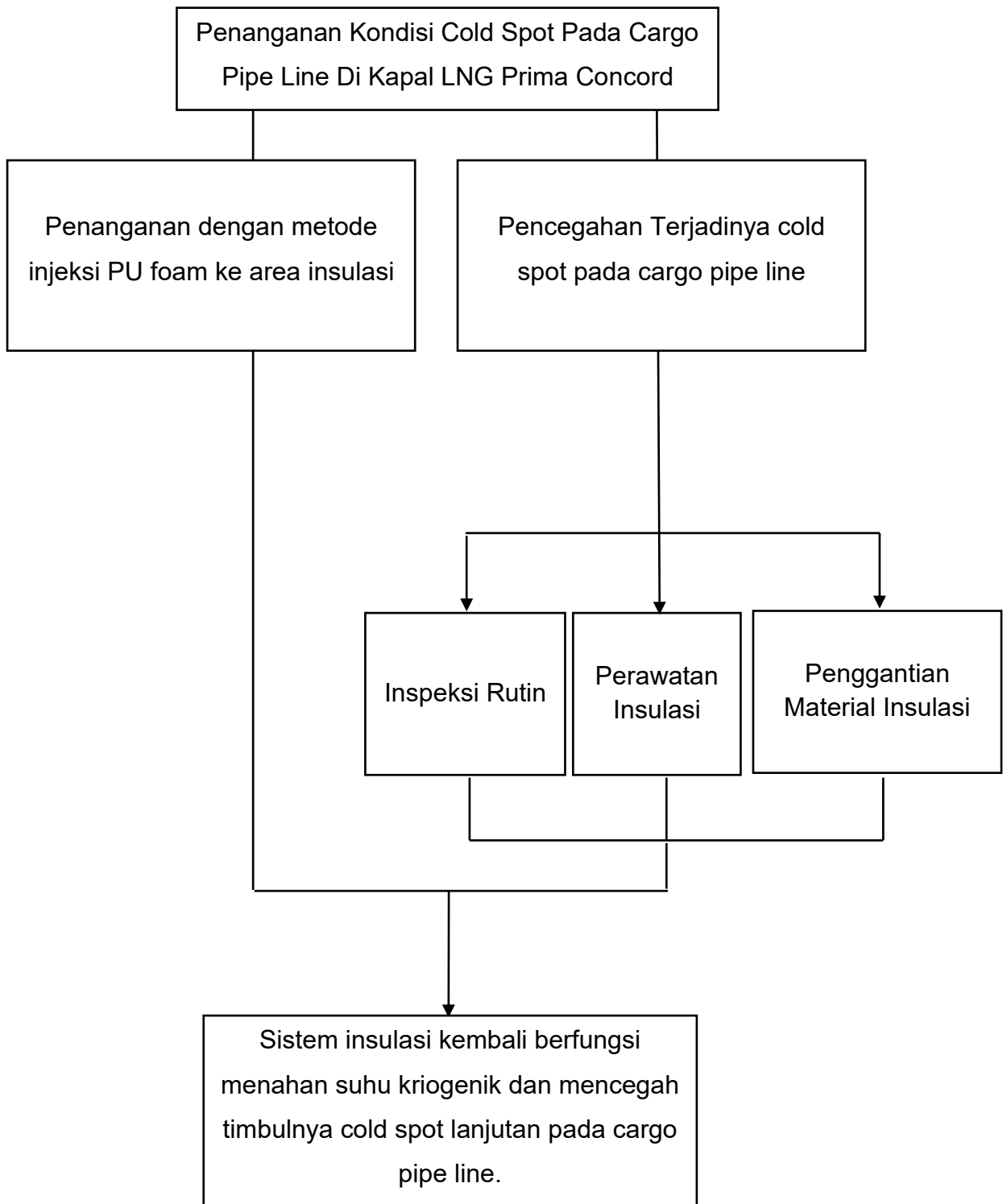
IAS di atas kapal disebut sebagai sistem pemrosesan terdistribusi, karena fungsi-fungsi kendali proses didefinisikan secara lokal di stasiun-stasiun proses dan bukan di stasiun-stasiun operator. Stasiun-stasiun operator berfungsi secara independen, sehingga dapat ditempatkan di pusat-pusat kendali kapal. Hal ini juga berarti bahwa setiap stasiun mampu mengendalikan proses apa pun, asalkan memiliki kendali atas kelompok perintah yang sesuai dan pengguna telah masuk (logged on) dengan kode akses yang benar. Setiap komputer stasiun memiliki penyimpanan hard disk yang berisi berkas-berkas perangkat lunak untuk peralatan yang terpasang. Nilai-nilai proses yang akan ditampilkan di stasiun-stasiun operator dihasilkan di stasiun-stasiun proses dan di*Transfer* ke setiap stasiun sesuai kebutuhan. *Cargo Operating Manual, (2013)*.

## B. Kerangka Pikir

Dalam penelitian ini, kerangka pikir disusun untuk memberikan gambaran sistematis mengenai alur logika dalam mengidentifikasi permasalahan, menganalisis penyebab, serta merumuskan solusi terhadap kondisi *cold spot* pada sistem perpipaan kargo LNG. *Cold spot* merupakan kondisi penurunan performa insulasi pada pipa kargo yang dapat menimbulkan risiko serius terhadap keselamatan dan efisiensi sistem, khususnya pada kapal pengangkut LNG seperti MV. Prima Concord. Kerangka pikir ini menggambarkan hubungan antara faktor-faktor penyebab *cold spot*, dampak yang ditimbulkan, serta metode penanganan teknis yang dilakukan.

Faktor utama yang dianalisis meliputi kerusakan insulasi, umur material, dan suhu ekstrem dari muatan LNG yang disimpan pada kondisi kriogenik. Dampak dari kondisi tersebut dapat berupa terbentuknya es pada permukaan pipa, potensi terjadinya brittle fracture, hingga kebocoran LNG. Untuk mengatasi permasalahan ini, diterapkan metode injeksi PU *foam* pada area insulasi yang terdampak untuk mengembalikan fungsi isolasi termal. Kerangka pikir ini diharapkan dapat menjadi dasar konseptual dalam menjelaskan pendekatan teknis penanganan serta mendukung hasil penelitian yang lebih terarah dan terukur.

Gambar 2. 6 Kerangka Pikir Penelitian



## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **A. Jenis Penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif deskriptif, Penelitian kualitatif merupakan jenis penelitian yang hasilnya tidak diperoleh melalui metode statistik atau perhitungan angka. Tujuannya adalah menggali dan memahami suatu fenomena secara menyeluruh dalam konteks alamiah, dengan peneliti berperan sebagai instrumen utama dalam proses pengumpulan data. Ciri utamanya bersifat deskriptif, menggunakan pendekatan analisis induktif, serta lebih menekankan pada makna dan proses yang dipandang dari sudut pandang subjek penelitian. Fadli, (2024). Pendekatan ini dipilih karena fokus utama penelitian adalah menganalisis dan mendeskripsikan faktor penyebab terjadinya *cold spot* serta langkah-langkah penanganan *cold spot* yang diterapkan pada *cargo pipe line* di kapal LNG PRIMA CONCORD.

Penelitian kualitatif memungkinkan peneliti untuk menggali makna di balik peristiwa teknis melalui interpretasi dan pemahaman terhadap situasi aktual di atas kapal, termasuk kondisi pipa kargo, prosedur penanganan, dan pengambilan keputusan teknis oleh kru kapal. Dalam hal ini, penulis bertindak sebagai instrumen utama dalam proses pengumpulan dan interpretasi data. Data yang dikumpulkan bersifat naratif, deskriptif, dan berasal dari pengalaman langsung, dokumentasi teknis, serta interaksi dengan personel kapal yang terlibat. Sugiyono, (2024).

Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk memecahkan masalah teknis secara praktis, tetapi juga untuk memberikan kontribusi teoritis terhadap pengelolaan insulasi kriogenik pada kapal LNG dan prosedur penanganan kondisi ekstrem seperti *cold spot*.

## B. Definisi Operasional Variabel

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus, maka variabel-variabel yang diteliti dijabarkan secara operasional sebagai berikut:

### 1. *Cold spot*

Dalam konteks ini, *cold spot* didefinisikan sebagai area pada permukaan luar *cargo pipe line* yang mengalami suhu ekstrem rendah secara lokal, yang ditandai dengan munculnya es atau embun beku. Kondisi ini timbul akibat kegagalan sistem insulasi, baik karena kerusakan fisik, umur insulasi yang tua, ataupun efek lingkungan ekstrem seperti suhu LNG yang sangat rendah. *Cold spot* merupakan indikasi awal adanya penurunan efisiensi sistem dan berpotensi menimbulkan risiko lebih besar seperti retak getas (*brittle fracture*) atau kebocoran (*leakage*) pada pipa kargo.

### 2. Penanganan *Cold spot*

Penanganan *cold spot* merujuk pada serangkaian tindakan teknis yang bertujuan untuk memperbaiki atau mengembalikan fungsi insulasi pipa kriogenik agar suhu permukaan pipa kembali normal dan tidak berbahaya. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah injeksi aerosol atau *Polyurethane (PU) foam* melalui lubang kecil yang dibuat pada area insulasi rusak, hingga *foam* memenuhi celah internal insulasi, lalu ditutup dan disegel kembali. Prosedur ini dilakukan secara manual oleh kru kapal saat kapal tidak dalam proses loading/unloading.

## C. Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, data dikumpulkan melalui tiga teknik utama:

### 1. Observasi Langsung

Observasi dilakukan secara langsung oleh penulis saat bertugas di kapal LNG PRIMA CONCORD, terutama selama proses loading LNG di Terminal LNG Tangguh, Papua barat setelah pelayaran dari Terminal Tangguh, Papua Barat. Observasi mencakup identifikasi visual area *cold spot*, pencatatan suhu permukaan pipa serta

pemantauan proses injeksi *foam* sebagai metode penanganan. Observasi ini juga mencakup pengamatan terhadap reaksi material pipa, efisiensi waktu pengerjaan, dan dampaknya terhadap operasional kapal.

## 2. Dokumentasi Teknis

Dokumentasi diperoleh dari berbagai sumber seperti:

- a. Data-data Kapal LNG PRIMA CONCORD (*Ship Particular*)
- b. Manual operasi kapal (*Cargo Operation Manual* LNG PRIMA CONCORD)
- c. Gambar teknis dan spesifikasi sistem insulasi dan perpipaan
- d. Foto-foto kondisi *cold spot* sebelum dan sesudah perbaikan
- e. Data teknis tentang jenis PU *foam* yang digunakan
- f. Dokumentasi ini digunakan untuk memperkuat dan memverifikasi hasil observasi serta mendukung narasi ilmiah dalam penelitian.

## 3. Wawancara

Penulis juga melakukan wawancara terstruktur dengan personel kapal, seperti Kepala Bagian Mesin (Chief Engineer), Mualim 1 (Chief Officer), Perwira Jaga, dan kru teknis yang terlibat langsung dalam perbaikan *cold spot*. Wawancara ini bertujuan untuk mendapatkan sudut pandang teknis, alasan pemilihan metode, kendala di lapangan, serta evaluasi efektivitas tindakan yang telah dilakukan.

Tabel 3. 1 Pertanyaan Wawancara

Inisial/nama :  
 Jabatan :  
 Usia :

Pertanyaan	Jawaban
Menurut anda, apa faktor penyebab terjadinya <i>cold spot</i> pada <i>cargo pipe line</i> saat proses loading tadi?	

Menurut anda, apa dampak yang di timbulkan jika tidak segera ditangani kejadian <i>cold spot</i> pada <i>cargo pipeline</i> ?	
Apa metode yang tepat untuk menangani konisi <i>cold spot</i> pada <i>cargo pipeline</i> ?	
Apa saran yang menurut anda cocok untuk mencegah kejadian <i>cold spot</i> pada <i>cargo pipeline</i> ?	

#### D. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode analisis deskriptif kualitatif, yaitu proses pengolahan data dengan cara menggambarkan, menafsirkan, dan menjelaskan data yang telah dikumpulkan secara sistematis. Teknik ini tidak menggunakan pendekatan statistik, melainkan menjelaskan secara naratif hubungan antara faktor penyebab dan tindakan yang diambil.

Tahapan analisis data dilakukan sebagai berikut:

##### 1. Reduksi Data

Data yang terkumpul dari observasi, dokumentasi, dan wawancara diseleksi, difokuskan, dan disederhanakan. Informasi yang tidak relevan atau tidak berkaitan langsung dengan tema penelitian akan dieliminasi, sementara informasi kunci akan dicatat dan dikelompokkan sesuai tema yaitu penyebab *cold spot* dan metode penanganan *cold spot* pada *cargo pipeline*.

##### 2. Penyajian Data

Data yang telah direduksi kemudian disusun dalam bentuk narasi teknis, tabel, dan dokumentasi visual. Tujuannya adalah untuk mempermudah pembaca dalam memahami alur kejadian, kondisi teknis pipa, serta langkah-langkah penanganan yang diambil.

### 3. Penarikan Kesimpulan dan Verifikasi

Langkah akhir adalah menyusun kesimpulan yang kemudian diverifikasi kembali dengan data lapangan, teori dalam tinjauan pustaka, dan hasil wawancara. Proses ini penting untuk memastikan bahwa kesimpulan yang diambil benar-benar mencerminkan kondisi aktual dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.