

Optimalisasi Penanganan Muatan Liquefied Natural Gas (Lng) Di Kapal Gas Dengan Mesin Dual Diesel Fuel (Ddf)

Amalil Aziz¹, Yuni Mariah², Tazkiyah³

Akademi Maritim Djadajat – Jakarta

Corresponding Author: Amalil Aziz, e-mail: mbamalilaziz@gmail.com, yunimariah71@gmail.com, tazkiyah.kijo@gmail.com

Published: Agust , 2025

ABSTRAK

LNG atau Liquefied Natural Gas, adalah gas alam yang telah didinginkan hingga mencapai bentuk cair pada suhu sekitar -162°C (-260°F). Proses pencairan ini dilakukan untuk mengurangi volume gas LNG menjadi 1/600 kali, sehingga lebih mudah dan efisien untuk disimpan dan diangkut, terutama ke tempat-tempat yang tidak terjangkau oleh jaringan pipa gas. Gas alam, yang sebagian besar terdiri dari metana, dapat diubah menjadi LNG melalui proses pencairan di fasilitas khusus. LNG tersebut perlu diubah kembali menjadi gas dengan proses regasifikasi dan selanjutnya diangkut dengan kapal tanker LNG atau truk khusus ke berbagai lokasi untuk digunakan sebagai bahan bakar atau energi. Pengangkutan dan penanganan muatan LNG memiliki berbagai resiko dan bahaya yang perlu ditangani dengan ketat untuk mencegah insiden serius seperti kebocoran, ledakan, kriogenik, asfiksia, jet fire (pembakaran langsung) dan Boil off gas. LNG (Liquefied Natural Gas) dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam aplikasi Dual-Fuel Diesel yang menggabungkan gas alam cair (LNG) dengan solar (diesel). Teknologi ini memungkinkan mesin diesel konvensional untuk beroperasi dengan campuran gas dan solar, memberikan manfaat seperti efisiensi energi yang lebih baik, pengurangan emisi, dan penghematan biaya bahan bakar. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: 1). Bagaimana pelaksanaan pemuatan dan pembongkaran LNG di Kapal Gas untuk menjaga keamanan dan efektivitas. 2). Mengidentifikasi peralatan teknologi yang digunakan di Kapal Gas untuk mendukung penanganan muatan LNG. 3). Bagaimana prosedur keamanan dan keselamatan untuk pencegahan terjadinya resiko bahaya pada pengangkutan dan penanganan LNG di Kapal Gas. 4). Bagaimana teknologi Dual Diesel Fuel (DDF) sebagai penggerak mesin kapal yang mengangkut LNG. Metode penelitian ini adalah deskriptif kualitatif dengan menggunakan teknik pengumpulan data dari Interview, Observasi, dan Studi Pustaka. Hasil pengamatan di kapal LNG dalam penelitian ini adalah untuk optimalisasi dalam penanganan muatan LNG dengan menjaga keamanan dan efektivitas adalah mengetahui langkah-langkah prosedur pemuatan dan pembongkaran LNG, termasuk protokol keamanan, suhu, tekanan dan peralatan yang diperlukan untuk menjaga kondisi LNG selama proses tersebut. Peralatan teknologi yang digunakan di Kapal Gas untuk mendukung penanganan muatan LNG adalah tanki kriogenik, system pemantauan gas dan teknologi transfer LNG harus dievaluasi performanya untuk dapat membantu meningkatkan efisiensi dan keamanan. Untuk pencegahan terjadinya resiko bahaya pada pengangkutan dan penanganan LNG di Kapal Gas diperlukan prosedur keamanan dan keselamatan dalam penanganan LNG, termasuk peralatan keselamatan yang digunakan, pelatihan Awak Kapal, serta penanganan potensi kebocoran atau kebakaran. Teknologi Diesel Dual Fuel adalah salah satu dari penggerak mesin kapal LNG karena bahan bakar utama yang digunakan adalah LNG dan minyak diesel untuk pembakarannya.

Kata Kunci: Liquefied Natural Gas (LNG), Penanganan Muatan, Teknologi Dual Fuel Diesel

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Gas alam cair atau Liquefied Natural Gas (LNG) adalah salah satu bentuk energi yang memiliki potensi besar menjadi bahan bakar yang lebih bersih dan efisien. Jumlah LNG yang berlimpah di alam dan meningkatnya kebutuhan akan LNG, termasuk penggunaannya dalam powered ship (kapal bermotor LNG) sebagai sumber tenaga di mesin kapal dibandingkan dengan bahan bakar konvensional, LNG menawarkan beberapa keunggulan bagi dunia pelayaran seperti efisiensi energi dan ramah lingkungan. Untuk mempermudah proses transportasi atau shipping dan penyimpanan, gas alam dikondensasikan untuk diubah menjadi Liquefied Natural Gas (LNG) yang berwujud cair. Agar bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar, LNG tersebut perlu diubah kembali menjadi gas yang dikenal sebagai proses regasifikasi dan selanjutnya diangkut dengan kapal tanker LNG atau truk khusus ke berbagai lokasi untuk digunakan sebagai bahan bakar atau energi. LNG digunakan dalam berbagai kebutuhan, termasuk pembangkit listrik, industri, transportasi, dan pemanas. Dengan LNG, gas alam dapat dikirim di pasar internasional dan dimanfaatkan secara efisien di berbagai sektor energi, terutama di negara-negara yang memerlukan sumber energi bersih dan stabil.

LNG atau Liquid Natural Gas adalah gas alam yang telah didinginkan hingga mencapai bentuk cair pada suhu sekitar -162°C (-260°F). Proses pencairan ini mengurangi volumenya sekitar 600 kali, sehingga lebih mudah dan efisien untuk disimpan dan diangkut, terutama ke tempat-tempat yang tidak terjangkau oleh jaringan pipa gas. Gas alam yang sebagian besar terdiri dari metana, dapat diubah menjadi LNG melalui proses pencairan di fasilitas khusus.

Sifat dari gas alam yang diubah menjadi LNG melalui proses pencairan (liquefaction) untuk disimpan dan diangkut maka membutuhkan infrastruktur khusus seperti fasilitas pencairan, kapal tanker LNG dan terminal regasifikasi. Kapal LNG dilengkapi dengan teknologi deteksi kebocoran canggih, sistem penghentian darurat, radar dan sistem penentuan posisi canggih dan berbagai teknologi lain yang dirancang untuk memastikan pengangkutan LNG yang aman dan terjamin.

Pengangkutan dan penanganan LNG memiliki berbagai resiko dan bahaya yang perlu ditangani dengan ketat untuk mencegah insiden serius seperti kebocoran, ledakan, kriogenik, asfiksia, jet fire (pembakaran langsung) dan Boil off gas. LNG yang disimpan di tangki perlahan-lahan menguap (boil-off) karena suhu lingkungan. Gas ini bisa menambah tekanan tangki dan jika tidak dikelola dengan baik bisa menyebabkan kerusakan atau kebocoran. Penanganan sistem boil-off dipantau dan dikendalikan, misalnya dengan menyerap gas berlebih dan memanfaatkannya sebagai sumber energi di kapal atau fasilitas. Pemanfaatan boil off gas ini bisa dimaksimalkan sebagai bahan bakar pengganti minyak atau paling tidak bisa mengurangi pemakaian bahan bakar minyak.

Tinjauan Pustaka

1. Karakteristik Lng

LNG atau Liquified gas adalah gas alam yang telah didinginkan hingga mencapai bentuk cair pada suhu sekitar -162°C (-260°F). Proses pencairan ini mengurangi volumenya sekitar 600 kali, sehingga lebih mudah dan efisien untuk disimpan dan diangkut, terutama ketempat-tempat yang tidak terjangkau oleh jaringan pipa gas. Gas alam yang sebagian besar dari metana CH_4 , dapat diubah menjadi LNG melalui proses pencairan di fasilitas khusus. Setelah menjadi LNG, gas tersebut diangkut dengan kapal tanker LNG atau truk khusus ke berbagai tempat untuk digunakan sebagai bahan bakar atau energi. LNG digunakan dalam berbagai kebutuhan termasuk pembangkit listrik, industri, transportasi dan pemanas.

1. Sifat Fisik & Kimia Dasar LNG (ISO 6976:2016).

Parameter	Nilai/ Deskripsi	Implikasi Teknis
Komposisi Utama	85-95% Metana (CH_4), sisanya Etana, Propana, Nitrogen	Pembakaran lebih bersih dibanding minyak/ HFO
Titik Cair	-162°C (pada tekanan atmosfer)	Memerlukan tangki kriogenik berinsulasi
Densitas Energi	$\sim 55\%$ dari diesel (22.2 MJ/L vs 38.6 MJ/L)	Butuh volume penyimpanan lebih besar
Warna & Bau	Tidak berwarna, tidak berbau (ditambahkan odorizer untuk deteksi kebocoran)	Bahaya tak terdeteksi tanpa sensor gas
Flammability Range	5-15% konsentrasi di udara	Risiko ledakan tinggi di ruang tertutup

2. Perilaku Termodinamika Kritis (Wang et al., 2022).

- Boil-Off Gas (BOG):
 - LNG secara alami menguap 0,1-0,15% volume/hari sehingga di lakukan Reliquefaction plant atau pemanfaatan sebagai bahan bakar.
- Rapid Phase Transition (RPT):
 - Jika LNG kontak dengan air, maka akan menguap secara ekspansif (1 volume LNG $\square$ 600 volume gas) dan dapat menyebabkan ledakan tekanan tanpa api.

3. Keamanan & Bahaya Utama

Risiko	Mekanisme	Mitigasi
Ledakan	Akumulasi gas metana di ruang tertutup + sumber api	Gas detection system + ventilasi
Cold Burns	Kontak kulit dengan LNG (-162°C)	PPE cryogenic (gloves, face shield)
Asfiksia	Gas metana menggantikan oksigen	Monitor kadar O ₂ di ruang terbatas
Sloshing Effect	Gaya cairan saat ombak besar merusak tangki	Anti-sloshing baffles

Keunggulan LNG vs Bahan Bakar Kapal Lain

Parameter	LNG	HFO	MGO
E misi SO _x	0%	3.5%	0.1%
E misi NO _x	85-90% lebih rendah	Tinggi	15-20% lebih rendah
Partikulat	Hampir nihil	Tinggi	Sedang
Biaya Operasional	Lebih murah (tergantung harga gas)	Murah tapi kena pajak emisi	Lebih mahal

(Sumber: IMO, 2023; Wärtsilä, 2022)

Selain itu Keunggulan LNG:

- Efisiensi pengangkutan: karena volumenya berkurang secara signifikan, LNG dapat diangkut ke tempat-tempat yang jauh dengan lebih mudah.
- Ramah lingkungan: LNG lebih bersih daripada bahan bakar fosil lainnya, terutama Heavy Fuel Oil karena menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah saat dibakar.
- Penyimpanan yang aman: LNG tidak mudah terbakar dalam bentuk cair karena suhu yang sangat rendah, sehingga relatif aman disimpan dan diangkut

Tantangan khusus:

1. Tantangan Teknis & Desain

- A. Penyimpanan LNG pada Suhu Ultra-Rendah (-162°C). Material tangki harus tahan retak akibat embrittlement kriogenik, dan Boil-Off Gas (BOG) terbentuk secara alami, meningkatkan tekanan dalam tangki. (Sandia Labs, 2020).
- B. Sloshing Effect (Gaya Cairan dalam Tangki Saat Ombak Besar), gerakan LNG di dalam tangki dapat menyebabkan stres struktural dan kerusakan. (Chen et al., 2022).
- C. Integritas Tangki Kriogenik Jangka Panjang, fatigue material akibat siklus termal

(pemanasan pendinginan berulang).

2. Tantangan Operasional

- A. Bunkering LNG yang Aman dimana proses pengisian bahan bakar LNG (bunkering) berisiko kebocoran dan ledakan.
- B. Manajemen Boil-Off Gas (BOG), LNG menguap 0,1-0,15% per hari, meningkatkan tekanan tangki.
- C. Operasi di Lingkungan Ekstrem (Arktik/Laut Kasar) terjadi pembekuan peralatan dan risiko struktural di suhu sangat dingin.

3. Tantangan Regulasi & Lingkungan

- A. Kepatuhan terhadap Regulasi Emisi dimana IMO 2020 & EEXI/CCI mengharuskan pengurangan emisi CO₂ dan NO_x.
- B. Larangan Heavy Fuel Oil (HFO) di Arktik (Mulai 2024) menyebabkan kapal LNG harus beralih ke LNG/MGO di wilayah Arktik.

4. Tantangan Ekonomi & Logistik

- A. Biaya Konstruksi Tinggi
Biaya pembuatan kapal LNG 2-3x lebih mahal dari kapal konvensional.
- B. Infrastruktur Bunkering yang Terbatas dan tidak semua pelabuhan memiliki fasilitas bunkering LNG.

5. Keamanan dan keselamatan: LNG sangat mudah terbakar ketika dalam bentuk gas dan terpapar udara, sehingga memerlukan protokol ketat untuk penanganan dan transportasi.

2. Resiko Dan Bahaya Pengangkutan Dan Penanganan Lng

Pengangkutan dan penanganan muatan LNG memiliki berbagai resiko dan bahaya yang perlu ditangani dengan ketat untuk mencegah insiden serius. Berikut adalah beberapa bahaya utama yang terkait dengan muatan LNG:

- a. Kebocoran Gas & Ledakan (Flammability & Explosion): LNG sangat mudah terbakar ketika dalam bentuk gas / uap LNG. Jika terjadi kebocoran pada tanki penyimpanan atau saluran transfer sehingga LNG tercampur udara, maka uapnya dapat membentuk campuran yang mudah terbakar dan berpotensi meledak.

Penanganan: Kapal dan fasilitas penyimpanan LNG dirancang untuk menjaga ketat sistem isolasi dan perlengkapan deteksi kebocoran. Inspeksi dan perawatan rutin sangat penting untuk mengurangi resiko kebocoran.

- b. Resiko suhu ekstrim/Kriogenik: LNG disimpan pada suhu yang sangat rendah sekitar - 162°C.

Jika terjadi kontak dengan kulit atau peralatan yang tidak sesuai, dapat menyebabkan luka bakar kriogenik (luka bakar dingin) atau retakan pada logam dan material lainnya. Penanganan operator harus menggunakan peralatan pelindung diri khusus untuk LNG, dan semua peralatan harus terbuat dari material yang tahan suhu rendah agar tidak rusak.

- c. Rapid Phase Transition (RPT) – Ledakan Non-Api, jika LNG tumpah ke air, terjadi penguapan sangat cepat sehingga menyebabkan ledakan tekanan tanpa api.
- d. Asfiksia atau kekurangan Oksigen: LNG yang menguap menjadi gas alam dapat menggantikan oksigen disekitar tempat penyimpanan atau penanganan. Dalam ruang tertutup atau terbatas, hal ini dapat menyebabkan resiko asfiksia bagi orang disekitarnya. Dalam hal ini penanganannya harus diadakan pengawasan yang ketat dan system ventilasi yang baik yang diperlukan untuk menjaga konsentrasi Oksigen di lingkungan sekitar tanki LNG.
- e. Resiko pembakaran langsung (Jet Fire): Jika ada kebocoran yang menghasilkan jet gas dan terkena sumber api, hal ini dapat memicu jet fire, yaitu api yang berbentuk seperti aliran jet yang dapat mengakibatkan kebakaran serius. Oleh sebab itu harus selalu dipantau kebocoran dengan sensor gas serta zone larangan api disekitar area tanki adalah langkah penting untuk mencegah resiko ini.
- f. Resiko Boil Off Gas (BOG): LNG yang disimpan di tanki perlahan-lahan menguap (Boil Off) karena suhu lingkungan. Gas ini dapat menambah tekanan dalam tanki dan jika tidak dikelola secara baik, dapat menyebabkan kerusakan atau kebocoran. Boil Off harus selalu dipantau dan dikendalikan, misalnya dengan menyerap gas berlebih dan memanfaatkannya sebagai sumber energi dikapal atau fasilitas lainnya.
- g. Resiko Polusi Lingkungan: LNG yang bocor kelaut atau ke darat akan menyebabkan lingkungan disekitar menjadi sangat dingin. Dampak lingkungan langsung dari LNG umumnya kecil karena LNG menguap dengan cepat, tetapi bahaya kriogenik dapat berdampak pada ekosistem laut dan darat. Pencegahan kebocoran harus dilakukan dengan system penyimpanan dan transfer yang baik, serta prosedur respons darurat untuk menangani tumpahan LNG.
- h. Kondisi cuaca ekstrim dan Stabilitas Kapal: Pengangkutan LNG dikapal menghadapi tantangan terkait laut yang ekstrim, seperti badai atau ombak tinggi, yang dapat mempengaruhi stabilitas kapal dan muatan LNG. Dengan rancangan kapal LNG yang mempunyai system stabilitas yang baik dan operasi kapal disesuaikan untuk menghindari cuaca buruk yang dapat meningkatkan resiko.

3. Tipe Tangki Lng

Tipe Tangki LNG berdasarkan klasifikasi IMO adalah sebagai berikut:

1. Tangki Membran (Membrane Tank)

Tangki ini menggunakan lapisan membran tipis dari baja tahan karat atau nikel untuk menjaga LNG tetap di dalam tangki. Membran ini dipasang di atas lapisan insulasi dan dinding kapal. Tipe Membran: Ada dua jenis tangki membran yang umum, yaitu:

- GTT Mark III: Menggunakan lapisan baja tahan karat dan dua lapisan isolasi berbahan poliuretan untuk menjaga suhu LNG.
- GTT NO96: Menggunakan dua lapisan baja beraluminium dengan dua lapisan isolasi dari perlite dan material kaca untuk perlindungan suhu.

Keunggulan: Desain membran memungkinkan kapasitas penyimpanan yang lebih besar dalam ruang terbatas, dengan efisiensi ruang dan berat yang lebih tinggi. Juga memiliki tingkat penguapan (boil-off) rendah.

2. Tangki Bola (Spherical Tank)

Tangki ini berbentuk bola dan dikenal sebagai tangki Moss-Rosenberg (atau Moss-type). Tangki bola ini terbuat dari baja yang sangat kuat dan biasanya dipasang di dek kapal. Struktur Tangki bola dipasang di dalam penyangga di dek utama kapal, memberikan kestabilan struktural tinggi dan tahan terhadap tekanan.

- Keunggulan: Struktur bola memberikan kestabilan mekanis yang baik, membuat tangki ini lebih aman dalam menghadapi tekanan dan pergerakan kapal. Selain itu, lebih tahan terhadap perubahan tekanan, sehingga cocok untuk perjalanan jarak jauh.
- Kekurangan: Ukurannya yang besar mempengaruhi desain dan stabilitas kapal serta mengurangi kapasitas penyimpanan karena desain bola mengambil lebih banyak ruang.

3. Tangki Prismatic (Prismatic Tank)

Tangki berbentuk prisma ini memiliki sisi-sisi yang rata dan sering kali digunakan pada kapal dengan desain self-supporting. Contoh teknologi tangki prismatic adalah IHI SPB (Self-supporting Prismatic Shape IMO Type B). Struktur Tangki ini terbuat dari material baja khusus dan dirancang agar dapat menahan tekanan dari LNG. Sistem ini didukung oleh struktur tambahan yang membuat tangki kokoh dan stabil.

- Keunggulan: Efisiensi ruang lebih baik daripada tangki bola karena bentuk prisma lebih mudah disesuaikan dengan lambung kapal. Juga memiliki ketahanan tinggi terhadap pergerakan LNG selama berlayar, menjaga kestabilan kapal.
- Kekurangan: Memerlukan sistem struktur pendukung yang kuat, yang membuat kapal lebih berat dan lebih rumit dalam konstruksi.

4. Tangki Silindris (Cylindrical Tank)

Tangki ini berbentuk tabung atau silinder, dengan dinding berbentuk cincin yang diperkuat untuk menahan tekanan LNG.

- Keunggulan: Efisiensi struktur baik, dan mudah dipasang dalam desain kapal LNG yang lebih kecil atau pada kapal bunkering.
- Kekurangan: Tangki silindris kurang umum digunakan pada kapal LNG besar karena kurang efisien dalam memanfaatkan ruang penyimpanan jika dibandingkan dengan jenis membran atau bola.

5. Tangki ISO (ISO Tank)

Tangki ISO adalah tangki LNG yang berbentuk kontainer, sesuai dengan standar ISO. Biasanya digunakan untuk pengangkutan LNG dalam jumlah kecil atau pengiriman LNG antar pulau.

- Keunggulan: Tangki ISO lebih fleksibel karena dapat dipindahkan dari kapal ke truk atau kereta api dengan mudah. Biasanya digunakan untuk pengangkutan LNG dalam skala kecil atau pada kapal yang tidak dirancang khusus untuk LNG.
- Kekurangan: Kapasitas penyimpanan terbatas, sehingga hanya cocok untuk pengangkutan LNG dalam jarak pendek atau ke lokasi tertentu yang tidak memiliki infrastruktur LNG.

Perbandingan Tipe Tangki:

- Kapasitas Penyimpanan: Tangki membran dan prismatic umumnya lebih efisien dalam memaksimalkan ruang penyimpanan, dibandingkan dengan tangki bola dan silindris.
- Keamanan dan Ketahanan Tekanan: Tangki bola memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap tekanan internal, sedangkan tangki membran lebih rentan dan perlu sistem isolasi tambahan.
- Efisiensi Energi: Tangki membran, terutama GTT NO96 dan Mark III, dirancang untuk memiliki tingkat penguapan (boil-off rate) rendah, mengurangi kerugian LNG selama transportasi. Pemilihan jenis tangki untuk kapal LNG didasarkan pada berbagai faktor seperti ukuran kapal, rute pelayaran, dan kapasitas penyimpanan yang diperlukan. Kapal LNG modern biasanya menggunakan tangki membran atau bola karena keunggulannya dalam kapasitas dan keamanan, sementara tangki ISO digunakan untuk transportasi LNG dalam skala lebih kecil atau untuk pengiriman LNG regional.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini digunakan dengan menggunakan desain penelitian kasus untuk menganalisa permasalahan yang ada. Desain penelitian kasus dilakukan apabila pertanyaan “Bagaimana” menjadi permasalahan utama penelitian dengan keharusan membuat deskriptif atau analisis yang terbatas pada kasus tertentu untuk menjawab permasalahan tersebut agar dapat menjadi pertanyaan yang terdapat dalam

21514 | Journal of Innovative and Creativity , 5(2) 2025

rumusan masalah penulis melakukan pengamatan tentang Penanganan muatan LNG dan penggunaan bahan bakar gas LNG di Kapal Gas. Jenis data yang diperoleh adalah Primer dan Sekunder dengan menggunakan teknik pengumpulan data dari Interview, Observasi, dan Studi Pustaka. Kemudian Teknik Pembahasan dalam penelitian ini adalah pembahasan diskriptif yaitu tehnik untuk membuat gambaran atau deskripsi secara sistematis, faktual, dan akurat mengenai suatu obyek yang diteliti. Penelitian ini dilakukan di Kapal Gas pada periode September - Desember 2024.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemuatan dan pembongkaran LNG di Kapal Gas

Penanganan muatan adalah bagaimana cara melakukan pemuatan di atas kapal, bagaimana cara melakukan perawatan muatan selama dalam pelayaran, dan bagaimana melakukan pembongkaran di pelabuhan tujuan dengan memperhatikan keselamatan muatan, kapal beserta jiwa manusia yang ada di dalamnya. (Martopo, 2001: 11).

Beberapa aspek penting yang harus dikuasai dalam proses pengolahan adalah penyimpanan dan pengangkutan serta karakteristik dari LNG.

Hal hal yang penting yang harus diketahui adalah:

1. Prosedur Muatan dan Pembongkaran LNG

- Untuk optimalisasi dalam penanganan muatan LNG di kapal LNG adalah dengan mengetahui langkah-langkah prosedur pemuatan dan pembongkaran LNG, termasuk protokol keamanan, suhu, tekanan dan peralatan yang diperlukan untuk menjaga kondisi LNG selama proses tersebut.
- Dalam penanganan muatan LNG hal yang harus diperhatikan sesuai prosedur adalah mulai dari persiapan ruang muat agar siap untuk dimuati, menyiapkan pipa-pipa muat, menyambung manifold ke terminal darat, purging liquid line, pendinginan ruang muatan dan pipa-pipa, dan persiapan alat-alat keselamatan yang harus dipersiapkan di area manifold bila terjadi hal-hal yang tidak diinginkan selama pelaksanaan bongkar muat.
- Dalam pelaksanaan penanganan muatan di kapal LNG sebagai panduan digunakan LNG Cargo Handling Manual yang di dalamnya terdapat prosedur penanganan LNG yang tepat. Selain itu IMO telah mengenalkan ISGOTT (International Safety Guide For Oil Tanker and Terminal) sebagai pedoman pokok perusahaan dalam hal keselamatan pengoperasional kapal tangki minyak dan terminal.
- Mengevaluasi tehnik dan prosedur pengisian dan pengosongan tanki untuk mengurangi

resiko kebocoran dan ledakan

- Pelaksanaan pemuatan LNG di kapal LNG adalah sebagai berikut:

1. Perencanaan Operasi (Operational Planning)

Sebelum melaksanakan kegiatan muat biasanya diadakan Safety meeting yang dilaksanakan oleh: Master, Chief Officer, Chief Engineer, Cargo Engineer, Electrician, Bosun serta Donkeyman untuk membahas perencanaan pemuatan dan yang berhubungan dengan safety and security (keselamatan dan keamanan).

2. Pendinginan pipa Muat (Line Cooldown)

Lima jam sebelum tiba di pelabuhan muat, tangki muatan harus didinginkan supaya tangki muat siap untuk dimuati dengan cara melaksanakan pendinginan pada pipa muat dan tangki muat agar pada saat tiba di pelabuhan muat keadaan pipa dan tangki sudah siap untuk dilakukan pemuatan.

3. Kapal sandar terikat

Setelah kapal sandar dan terikat selanjutnya dilakukan penyiapan gang way (tangga), hidupkan manifold water curtain (air pelindung), hubungkan trip signal line dan siapkan alat komunikasi.

4. Menghubungkan Lengan Muat (Liquid Arm Connection)

Setelah lengan muat kapal dihubungkan dengan lengan muat terminal, kemudian dilakukan stop pembakaran gas, mulai transfer BOG ke darat, pengukuran CTM, dilakukan sebelum lengan ESDS (Emergency Shut Down System) trip dites. Setelah menyambungkan lengan muat harus dilakukan purging dengan menggunakan N₂ (Nitrogen) untuk menghilangkan campuran hydrocarbon hingga kurang dari 1 %.

5. Pendinginan Lengan Muat (Loading/ Discharging Arms Cooldown)

Pendinginan dilakukan pada lengan muat kapal dan darat menggunakan cairan methanol dari darat agar temperatur lengan muat sama atau hampir sama dengan temperatur muatan.

6. Pengaturan Pipa (Line Up)

Chief Officer dan Gas Enginner berada di CCR (Cargo Control Room) melakukan line Up, sedangkan AB (Able Seamen) mengecek dan memastikan bahwa pipa telah bekerja dengan benar.

7. Mulai Bongkar Muat (Start Loading/ Discharging)

Dimulai transfer muatan dengan rate yang rendah, dan hidupkan H/D Compressor untuk

mengirim vapour (gas) kapal ke darat untuk proses memuat, untuk proses bongkar yaitu menerima vapour dari darat ke kapal.

8. Selesai Muat/Bongkar (Finish Loading/Discharging)

Setelah pemuatan selesai sesuai dengan hasil meeting maka lakukan Topping Off, diantaranya matikan H/D compressor. Begitupun sebaliknya untuk proses pembongkaran muatan. Pembongkaran ke darat 1 jam atau 30 menit dan 15 menit atau 10 menit notice untuk rate down.

9. Pengeringan (draining) gas dan Vapour Purgin

Pada tahap ini salah satu valve muat tangki yang masih dibuka setengah biasanya adalah tangki muat no.3 bertujuan untuk mengeringkan sisa liquid yang tertinggal pada pipa muatan, tanki di drain melalui spray line dan didorong masuk ke dalam tangki menggunakan N₂ dari darat begitu juga dengan lengan muat vapour dan purging lengan muat cargo di manifold. Serta menghentikan transfer BOG dan Final CTM

10. Pelepasan Lengan Muat (Loading Arm Disconnection)

Merupakan tanda bahwa pemuatan telah selesai yang diawali dengan pelepasan lengan muat liquid atau muatan dan kemudian disusul dengan lengan muat vapour di manifold.

11. Pertemuan Setelah Cargo Operation

- Untuk mengecek ulang jumlah muatan yang telah dimuat dan yang telah dibongkar, untuk mendapatkan perhitungan muatan yang seteliti mungkin, berkaitan dengan isi bill of loading (konosemen) yang sudah diterima sesuai dengan shipping order (perintah pengapalan).

2. Sistem pengontrolan suhu dan tekanan pada pemuatan LNG

- Mengidentifikasi sistem yang digunakan untuk mengontrol suhu dan tekanan didalam tangki penyimpanan LNG. LNG disimpan pada suhu sangat rendah (sekitar - 160° C), sehingga system pengontrolan sangat penting agar gas tetap dalam keadaan cair.
- Mengkaji performa system refrigerasi dan isolasi yang digunakan untuk mempertahankan kondisi LNG selama dikapal.
- Sistem pengendalian suhu dan tekanan pada pemuatan LNG adalah sistem yang kompleks dan vital untuk menjaga keselamatan dan efisiensi operasional. Sistem ini mengandalkan kombinasi teknologi canggih dan prosedur operasional untuk mengelola suhu dan tekanan kriogenik LNG selama proses pemuatan.

3. Pengaruh cuaca dan kondisi laut:

- Mengetahui mengenai pengaruh kondisi cuaca dan laut terhadap stabilitas kapal dan keamanan muatan LNG selama pelayaran.
- Mengembangkan metode untuk menyesuaikan operasi pengangkutan LNG dikondisi laut yang berbeda guna meminimalisir resiko operasional.

B. Peralatan teknologi yang digunakan di Kapal Gas

1. Peralatan dan teknologi pendukung

- Mengidentifikasi peralatan dan teknologi yang digunakan di kapal untuk mendukung penanganan LNG, seperti tanki kriogenik, system pemantauan gas dan teknologi transfer LNG
- Evaluasi performa peralatan ini dan bagaimana teknologi baru dapat membantu meningkatkan efisiensi dan keamanan

2. Pemilihan jenis tanki untuk kapal LNG didasarkan pada berbagai faktor seperti ukuran kapal, rute pelayaran dan kapasitas penyimpanan yang diperlukan. Kapal LNG modern biasanya menggunakan tanki membran atau tanki bola karena keunggulannya dalam kapasitas dan keamanan, sementara tanki ISO digunakan untuk transportasi LNG dalam skala lebih kecil atau untuk pengiriman LNG regional

3. Pemeliharaan dan Perawatan kapal:

- Mengetahui prosedur pemeliharaan rutin dan khusus untuk dengan bahan bakar LNG. Pemeliharaan tanki, sistem pendingin, serta peralatan keselamatan harus dilakukan dengan ketat untuk menjaga kondisi optimal.
- Penilaian resiko kerusakan peralatan atau sistem dan bagaimana perawatan yang tepat dapat mengurangi resiko tersebut.

Berikut adalah daftar lengkap peralatan teknologi canggih yang digunakan di kapal gas (LNG/LPG carriers), beserta fungsi dan contoh penerapannya:

1. Sistem Penyimpanan Kriogenik

Peralatan	Fungsi	Contoh Produk
Tangki Membran (GTT Mark III)	Menyimpan LNG (-162°C) dengan lapisan stainless steel + isolasi poliuretan	Digunakan di 90% kapal LNG baru
Tangki Moss Spherical	Penyimpanan berbentuk bola dengan aluminium tebal	Kapal LNG generasi lama (contoh: Arctic Princess)
		Tangki Type C untuk kapal

Sistem Isolasi Vakum	Minimisasi boil-off gas (BOG)	kecil
----------------------	-------------------------------	-------

2. Sistem Pengelolaan Gas (BOG Management)

Peralatan	Teknologi	Kapasitas
Reliquefaction Plant	Mengembalikan BOG ke bentuk LNG menggunakan siklus nitrogen/ kompresi	0.15-0.25% volume/ hari (kapal 170,000 mi)
Gas Combustion Unit (GCU)	Membakar kelebihan BOG secara aman	Kapasitas 5-10 ton BOG/hari
BOG Compressor	Memompa BOG ke mesin dual-fuel	Wärtsilä LNGPac

3. Mesin Propulsi & Pembangkit Listrik

Tipe Mesin	Keunggulan	Contoh Implementasi
DFDE (Dual-Fuel Diesel Electric)	Efisiensi 50% + bisa switch HFO/MGO/LNG	Kapal LNG Q-Flex
X-DF (Low Pressure Dual Fuel)	Tekanan injeksi rendah (10 bar) - kurangi pemakaian bahan bakar	MAN Energy Solutions ME-GI
TFDE (Tri-Fuel Diesel Electric)	Bisa gunakan LNG/MGO/HFO + listrik	Kapal LNG Flex Aurora

4. Sistem Bunkering & Transfer LNG

Peralatan	Fungsi Khusus	Standar
Marine Loading Arms	Transfer LNG ke/ dari terminal dengan sambungan kriogenik	SIGTTO/OCIMF compliant
Peralatan	Fungsi Khusus	Standar
Submerged Combustion Vaporizer (SCV)	Menguapkan LNG untuk regasifikasi di FSRU	Kapasitas 500 MMSCFD (FSRU Lampung)
Emergency Release Coupling (ERC)	Memutus aliran LNG otomatis jika terjadi kebocoran	Sistem QuickConnect™

5. Sistem Keselamatan Mutakhir

Peralatan	Prinsip Kerja	Standar
Laser Methane Detector	Deteksi kebocoran gas dengan laser (akurasi 1 ppm)	ATEX Zone 1 certified
Cryogenic Emergency Shutdown Valve	Katup penutup cepat (< 2 detik) untuk isolasi tangki	API 607/ISO 15848
Water Curtain System	Mengurangi penyebaran uap LNG dengan semprotan air (500L/mI/menit)	NFPA 59A compliant

6. Sistem Kontrol & Otomasi

Sistem	Fitur	Vendor
Kongsberg LNG Cargo Control	Kontrol otomatis pengisian/ pelepasan LNG dengan AI	Kongsberg Maritime
ABB Ability™ Marine Pilot	Digital twin untuk simulasi operasi kriogenik	ABB
Wärtsilä LNGPac	Integrasi kontrol mesin dual-fuel + BOG management	Wärtsilä

7. Inovasi Terbaru (2024)

1. Rotary Saturated Expander (RSE) merupakan teknologi reliquefaksi baru dengan efisiensi 30% lebih tinggi. Dipakai di kapal LNG generasi X-DF 2.0.
2. Smart Insulation Monitoring yaitu Sensor IoT untuk deteksi kerusakan isolasi termal secara real-time.
3. Autonomous Bunkering System merupakan Robot docking otomatis untuk transfer LNG (dikembangkan di Singapura).

C. Prosedur keamanan dan keselamatan untuk pencegahan terjadinya resiko bahaya pada pengangkutan dan penanganan LNG

1. Keselamatan dan Pencegahan Resiko.
 - Mengetahui tentang prosedur keamanan dan keselamatan dalam penanganan LNG , termasuk peralatan keselamatan yang digunakan , pelatihan Awak Kapal , serta penanganan potensi

kebocoran atau kebakaran.

- Studi tentang peraturan Internasional dan Standard Keselamatan yang harus dipenuhi oleh kapal pengangkut LNG , seperti standard International Maritime Organization (IMO).

2. Evaluasi lingkungan dan Energi:

- Mengkaji dampak lingkungan dari penanganan dan pengangkutan LNG serta strategi mitigasi yang dilakukan , seperti pengendalian emisi dan kebocoran gas.
- Analisis efisiensi energi kapal serta metode untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi carbon selama pelayaran

D. Teknologi Dual Diesel Fuel (DDF) sebagai penggerak mesin kapal yang mengangkut LNG

System Diesel Dual Fuel adalah tehnologi yang memungkinkan mesin Diesel konvensional menggunakan dua jenis bahan bakar secara bersamaan, yaitu bahan bakar cair (diesel) dan bahan bakar gas (LNG). System ini dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi mesin, mengurangi emisi dan menurunkan biaya bahan bakar tanpa mengubah secara signifikan hanya menambah peralatan-peralatan struktur dasar mesin diesel dan juga tanki penampungan bahan bakar LNG. Kapal-kapal besar terutama kapal Eropa mereka sudah membuat kapal yang dilengkapi dengan 2 buah tanki bahan bakar LNG disebelah kanan dan kiri struktur kapal. Tentu saja mereka sudah menyiapkan sarana-arana dipelabuhan untuk melaksanakan bunker bahan bakar LNG. Bagi Indonesia sendiri banyak kendala-kendala dimana tidak semua pelabuhan dilengkapi sarana-sarana untuk bunker LNG.

Prinsip Kerja DDF

DDF dapat beroperasi dalam 3 mode:

1. Mode Gas (Gas Mode): Dimana LNG diuapkan dan dicampur udara sebelum masuk ke silinder. Pilot fuel (1-5% MDO) digunakan untuk memicu pembakaran. Sehingga Efisiensi termal mencapai 50%.
2. Mode Diesel (Diesel Mode): Menggunakan 100% MDO/MGO seperti mesin diesel biasa. Dapat digunakan saat pasokan LNG tidak tersedia.
3. Mode Campuran (Mixed Mode): Kombinasi LNG + MDO untuk transisi atau kondisi khusus. Penggerak kapal menggunakan mesin Diesel Dual Fuel adalah salah satu dari penggerak mesin kapal karena bahan bakar utama yang digunakan adalah LNG dan minyak diesel untuk pembakarannya.

Keunggulan system DDF dan mesin Diesel type lama:

- Efisiensi biaya , mengurangi konsumsi solar hingga 70 – 90% , tergantung pada ketersediaan gas. Gas LNG biasanya lebih murah dibanding bahan solar.
- Mengurangi Emisi: CO₂ lebih rendah karena LNG memiliki kandungan carbon lebih kecil.

Partikulat hampir 0 karena gas tidak menghasilkan partikel padat seperti Diesel. Nox relatif lebih dibandingkan mesin diesel murni. Flexibilitas operasional , jika tidak tersedia bahan bakar gas , kapal masih dapat beroperasi dengan mempergunakan solar.

Keunggulan DDF vs Mesin Konvensional

Parameter	DDF	Mesin Diesel Biasa
E misi CO ₂	20-25% lebih rendah	Tinggi
E misi NO _x	85% lebih rendah (dengan SCR)	Perlu scrubber/SCR
Biaya Operasional	Lebih hemat (LNG lebih murah)	Bergantung HFO/MGO
Fleksibilitas	Bisa switch LNG/MDO	Hanya MDO/HFO

KE S I M P U L A N

1. Optimalisasi penanganan muatan LNG di kapal LNG dalam pelaksanaan pemuatan dan pembongkaran LNG di Kapal Gas untuk menjaga keamanan dan efektivitas dengan mengetahui langkah langkah prosedur pemuatan dan pembongkaran LNG , termasuk protokol keamanan , suhu, tekanan dan peralatan yang diperlukan untuk menjaga kondisi LNG selama proses tersebut.
2. Peralatan teknologi yang digunakan di Kapal Gas untuk mendukung penanganan muatan LNG adalah tanki kriogenik , system pemantauan gas dan tehnologi transfer LNG harus dievaluasi performanya untuk dapat membantu meningkatkan efisiensi dan keamanan.
3. Untuk pencegahan terjadinya resiko bahaya pada pengangkutan dan penanganan LNG di Kapal Gas diperlukan prosedur keamanan dan keselamatan dalam penanganan LNG , termasuk peralatan keselamatan yang digunakan, pelatihan Awak Kapal, serta penanganan potensi kebocoran atau kebakaran.

Teknologi Diesel Dual Fuel adalah salah satu dari penggerak mesin kapal LNG karena bahan bakar utama yang digunakan adalah LNG dan minyak diesel untuk pembakarannya, dengan keunggulan mengurangi kosumsi solar dan mengurasi emisi CO₂.

Saran

Dalam pelaksanaan penanganan muatan LNG, untuk menjaga efektivitas, keamanan dan keselamatan adalah:

1. Teknologi & Desain Kapal

- ✓ Gunakan Tangki dengan Isolasi Termal Mutakhir

Pilih teknologi membran GTT Mark III Flex+ untuk mengurangi boil-off gas (BOG) dan Pertimbangkan aerogel insulation untuk efisiensi lebih tinggi.

- ✓ Optimalkan Sistem Manajemen BOG

Pasang reliquefaction plant (efisiensi hingga 0,1% BOG/hari) dan Manfaatkan BOG sebagai bahan bakar mesin (DFDE/X-DF engines).

- ✓ Perkuatan Struktur untuk Sloshing & Laut Kasar

Tambahkan anti-sloshing baffles di tangki serta Hindari pengisian tangki <20% saat berlayar di ombak besar.

2. Operasional & Keselamatan

- ✓ Tingkatkan Prosedur Bunkering LNG

Gunakan konektor "dry break" dan sistem Emergency Shutdown (ESD) serta Lakukan simulasi kebocoran LNG secara berkala.

- ✓ Pelatihan Khusus untuk Kru. Sertifikasi IGF Code untuk penanganan LNG dan Latihan tanggap darurat kebocoran gas & kebakaran kriogenik.

- ✓ Pemantauan Real-Time dengan IoT & AI. Gunakan sensor suhu/tekanan berbasis IoT untuk deteksi dini masalah. Dan Implementasi Digital Twin untuk prediksi kerusakan.

3. Kepatuhan Regulasi & Lingkungan

- ✓ Penuhi Standar Emisi IMO 2023/EECI dengan menggunakan mesin dual-fuel (LNG+MGO) untuk

kurangi CO₂ & NO_x dan Pertimbangkan bio-LNG/hydrogen blend untuk dekarbonisasi.

- ✓ Persiapan Larangan HFO di Arktik (2024) , Alihkan ke LNG atau MGO untuk operasi di wilayah kutub.

4. Ekonomi & Infrastruktur

- ✓ Kolaborasi Pengembangan Infrastruktur Bunkering dengan Bangun jaringan bunker vessel di pelabuhan strategis (contoh: Tanjung Priok, Batam) dan Manfaatkan skema TTS (Truck-to-Ship) untuk daerah terpencil.

- ✓ Investasi dalam Inovasi Rendah Karbon,Eksplorasi ammonia/hydrogen-ready engines untuk masa depan.

5. Pemeliharaan & Inspeksi

- ✓ Jadwal Inspeksi Berkala dengan Ultrasonic Testing (UT) tahunan untuk tangki kriogenik serta

Kalibrasi gas detector CH₄ setiap bulan (di area berbahaya).

- ✓ Gunakan Predictive Maintenance dan Analisis data sensor untuk prediksi kerusakan komponen.

DAFTAR PUSTAKA

ABS. (2019). *Guidance Notes on LNG Carrier Cargo Containment Systems*.

American Bureau of Shipping. (2019). *Guide for Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships*. Houston: ABS.

Balat, M. (2009). Liquefied Natural Gas: An Important New Component in the Energy Supply and Demand Chain. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(9), 776-785.

Cao, W., Liu, P., & Ma, X. (2017). Safety Issues and Operation Strategies of LNG Carriers. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 40, 63-70.

Chiyoda Corporation. (2001). *LNG: Basics of Liquefied Natural Gas and LNG Transport*. Tokyo: Chiyoda Corporation.

Demirel, Y. (2012). LNG Transportation and the Role of Risk Assessment in Safety Improvement. *International Journal of Maritime Engineering* 154(2), 105-115.

Det Norske Veritas (DNV). (2019). *Recommended Practice for LNG Bunkering* (DNV-RP-G105).

IMO. (2022). *International Code of Safety for Ships Using Gases as Fuel (IGF Code)*.

Instanes, B., & Tirum, A. (2004). *Introduction to LNG Operations and Storage*. Springer-Verlag.

International Gas Union (IGU). (2021). *World LNG Report 2021*. Tersedia di situs resmi IGU: www.igu.org

International Maritime Organization (IMO). (2016). *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code)*. London: IMO.

International Maritime Organization (IMO). (2020). *International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)*. London: IMO.

Lu, Y., & Zhang, W. (2019). The Development of LNG Shipping Industry: Current Status and Future Directions. *Marine Policy*, 104, 176-185.

- M. Rajendran, & A. K. Bansal. (2016). LNG as a Fuel for Marine Applications. New Delhi: Alpha Science International Ltd.
- MacDonald, G. (2018). Operational Challenges in LNG Transportation. *Proceedings of the International Conference on LNG Technology*, London, United Kingdom.
- Nguyen, T., & Huynh, L. (2017). Risk Assessment for LNG Carriers under Extreme Weather Conditions. *Proceedings of the Society of Maritime Research Conference*, Shanghai, China.
- Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). (2008). International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT). 5th Edition. Witherby Seamanship.
- SIGTTO (Society of International Gas Tanker and Terminal Operators). (2014). Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals. London: Witherby Publishing Group.
- U.S. Department of Energy. (2020). Liquefied Natural Gas: Understanding the Basics. Tersedia di: www.energy.gov
- Wood Mackenzie. (2021). Global LNG Outlook: 2021 Edition. Laporan tahunan, tersedia di: www.woodmac.com
- Zhang, L. et al. (2023). Advanced Boil-Off Gas Management for LNG Carriers. *Journal of Marine Engineering*