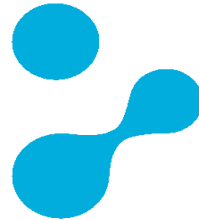




samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Satakunta University of Applied Sciences

ONUR CETIN

# **LNG Simulointimallin hyödyntäminen käyttöönotossa**

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIikka  
2023

Tekijä Cetin, Onur	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 03/2023
	Sivumäärä 34	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi <b>LNG simulointimallin hyödyntäminen käyttönotossa</b>		
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
Tiivistelmä  <p>Opinnäytetyön aiheena oli LNG simulointimallin hyödyntäminen käyttönotossa. Työn tarkoituksena oli selvittää, miten simulointimallia voidaan hyödyntää oikean LNG järjestelmän käyttönotossa. Työssä lähdettiin liikkeelle selvittämällä mitä LNG on ja mistä se tulee. Lisäksi selvitettiin, että miksi LNG:tä käytetään polttoaineena ja millaisen kokonaisuuden se vaatii alukselta. Työssä esitetään keskeiset LNG järjestelmän komponentit kuten LNG tankki, kompressori, jäähdytys, ja moottori.</p> <p>Lisäksi työssä selvitettiin simulointimallien historiaa ja niiden käyttötarkoituksia, esiteltiin keskeiset prosessisimulaation käsitteet kuten model-in-the-loop, software-in-the-loop ja hardware-in-the-loop. Työssä esiteltiin myös Aprosin ohjelmisto, jolla on aiemmin tehty Suomessa simulaatiomalleja esimerkiksi ydinvoimaloiden prosesseista, Aprosin on myös käytössä tämän työn kohteena olevassa LNG simulaatiomallissa.</p> <p>Opinnäytetyössä hyödynnettiin aikaisempia tutkimuksia, artikkeleita ja kirjoja ja tehtiin niiden pohjalta arvioita, miten simulaatiomallia voitaisiin hyödyntää järjestelmässä.</p> <p>Työssä todettiin, että simulaatiomallilla voi olla suuria hyötyjä, ei pelkästään käyttönotossa, mutta koko järjestelmän elinkaaren aikana. Konkreettisia tuloksia simulaatiomallin hyödyistä ei kuitenkaan tähän opinnäytetyöhön saatu, koska laiva johon simulaatiomalli on tehty, oli edelleen rakenteilla Meyer Turku Oy:llä.</p>		
Avainsanat digitaalinen kaksonen, nesteytetty maakaasu, LNG, maakaasu, simulaatiomalli, laivanrakennus, SIL, HIL, MIL		

Author Cetin, Onur	Type of Publication Bachelor's thesis	Date 03/2023
	Number of pages 34	Language of publication: Finnish
Title of publication <b>Utilizing an LNG simulation model in commissioning</b>		
Degree programme Electrical and automation engineering		
Abstract  <p>The topic of this thesis was the utilization of an LNG simulation model in commissioning. The purpose of the work was to investigate how the simulation model can be utilized in commissioning a real LNG system. The study started with the investigation of what is LNG and where it comes from. Study also looked into the reasons why is used as fuel and what it requires. The thesis presented the key components of an LNG system, such as the LNG tank, compressor, cooling system, and engine.</p> <p>In addition, the thesis explored the history and purposes of simulation models and presented key concepts of process simulation, such as model-in-the-loop, software-in-the-loop, and hardware-in-the-loop. The Apros software was also introduced, which has been used in Finland to simulate processes in nuclear power plants, and was also used in this LNG simulation model.</p> <p>The thesis relied on previous studies, articles, and books and made assessments based on them regarding the utilization of the simulation model in the system.</p> <p>The thesis concluded that the simulation model can have significant benefits not only in commissioning but throughout the system's life cycle. However, concrete results of the benefits of the simulation model were not obtained in this thesis, as the ship on which the simulation model was made was still under construction at Meyer Turku Oy.</p>		
Keywords digital twin, LNG, natural gas, shipbuilding, liquefied natural gas, simulation model, SIL, HIL, MIL		

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	5
2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA .....	6
3 MAAKAASU.....	7
3.1 Nesteytetty maakaasu.....	11
3.2 Maakaasun nesteyttämisen prosessi.....	11
3.3 LNG:n vaarat.....	14
4 LNG-LAITTEISTO RISTEILYALUKSESSA .....	16
4.1 Tankki .....	17
4.1.1 A-Tyyppi.....	17
4.1.2 B-Tyyppi.....	17
4.1.3 C-Tyyppi.....	18
4.1.4 Membraanitankki.....	19
4.2 BOG kompressori.....	20
4.3 Kaasunsyöttöyksikkö .....	20
4.4 Höyrykattila.....	20
4.5 Höyrystin ja polttoaineen lämmitin.....	21
4.6 Typpigeneraattori .....	21
4.7 Moottori.....	22
5 DIGITAALINEN KAKSONEN .....	23
5.1 Digitaalisen kaksosen historia.....	23
5.2 Digitaalisen kaksosen laajuus .....	24
5.3 Model in the Loop MIL.....	25
5.4 Software in the Loop SIL.....	26
5.5 Hardware-in-the-Loop HIL.....	26
5.6 APROS.....	27
5.6.1 Loviisan tehopäivitys.....	28
5.6.2 Apros digitaalisena kaksosena.....	28
6 LNG-SIMULAATIOMALLI.....	30
7 TULOKSET .....	34
LÄHTEET	

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tutkia Meyer Turun tekemää simulaatiomallia LNG-järjestelmästä. Työssä tutkitaan erityisesti mitä mahdollisia hyötyjä mitä “digitaalinen kaksonen” voi tuoda laivan tuotannon, käyttöönoton tai testien osalta. Tällä simulaatiolla on merkittävä vaikutus laivan käyttöönottoon, sillä kaikkia käyttöönottoon liittyviä testejä ei voida suorittaa rannassa, koska kaikkia koneita ei voida ajaa siellä, joten osa testeistä on suoritettava koeajolla.

Opinnäytetyössä tutustutaan myös eri määritelmiin, jotka ovat keskeisiä tämän tutkimuksen kannalta esim. digitaalinen kaksonen, LNG-järjestelmä sekä maakaasu.

Työ rajataan tutkimaan vain Meyer Turun saamat hyödyt ja säästöt. Tässä työssä ei tutkita kolmansien osapuolien kautta saatavia hyötyjä. Työssä tutkitaan vain LNG-simulointimallin käyttöä, ei esimerkiksi lämmöntalteenottoa tai muiden järjestelmien simulointimalleja. Työssä ei tutkita rahallisia säästöjä tai muita rahaan perustuvia lukuja. Työssä voidaan mainita LNG-järjestelmää osittain sivuavia järjestelmiä ja niiden vaikutusta LNG-järjestelmään, mutta niihin ei tutustuta syvällisemmin.

## 2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA

Meyer Turku on yksi maailman johtavista ja innovatiivisimmista telakoista, jossa rakennetaan maailman ympäristöystävällisimpiä ja huippuluokkaisimpia risteilyaluksia, autolauttoja sekä erikoislaivoja. Meyer Turku vastaa noin 15 prosentista maailman risteilyalusten rakentamisesta ja tilaukset ulottuvat tällä hetkellä vuoteen 2026. (Meyer Turku, 2023.)

Turun telakalla toimiva Meyer Turku Oy koostuu useista tytäryhtiöistä, kuten Piikkiössä sijaitsevasta hyttitehtaasta Piikkio Works Oy, kokonaisratkaisua tarjoavasta Shipbuilding Completion Oy sekä Raumalla sijaitsevasta ENG'nD Oy, joka tarjoaa laivanrakennuksen ja offshore-alan suunnittelupalveluja. Meyer Turku Oy muodostaa yhdessä Saksassa toimivien Meyer Werft ja Neptun Werft kanssa Meyer Groupin, joka on yksi maailman johtavista risteilyalusten rakentajista. (Meyer Turku, 2023.)

Meyer Group on perheyritys, joka sai alkunsa vuonna 1795, kun Willm Rolf Meyer perusti Meyer Werft -telakan Saksassa. Tänä päivänä Meyer Group koostuu Turun, Papenburgin ja Rostockin telakoista. (Meyer Turku, 2023.)

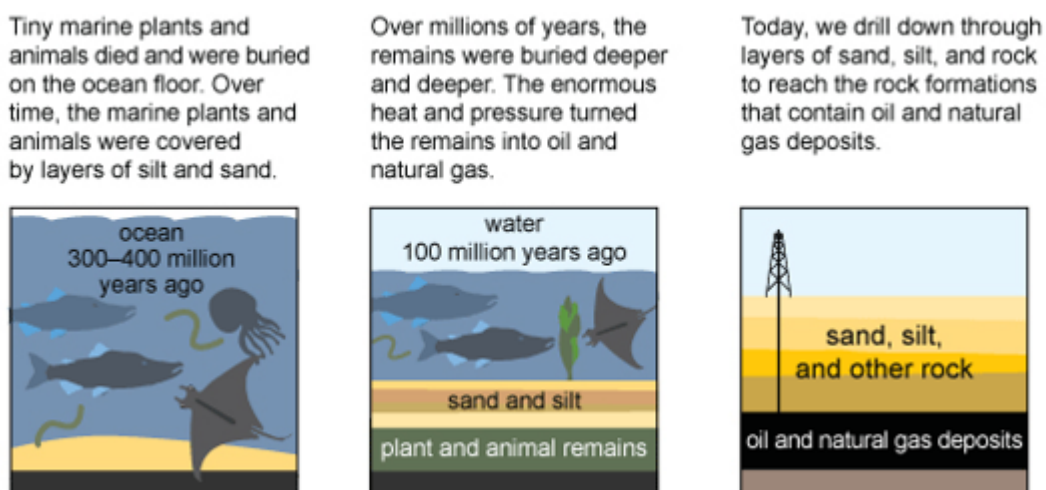
Meyer Groupin telakoilla suunnitellaan ja rakennetaan maailman kehittyneimpiä risteilyaluksia, jokilaivoja ja autolauttoja, jotka ovat täysin asiakkaiden tarpeisiin mukautettuja ja ylittävät kaikki odotukset. Tämä maailmanlaajuisesti tunnettu ja arvostettu perheyritys on jo seitsemännen polven hallinnassa. (Meyer Turku, 2023.)

### 3 MAAKAASU

Maakaasu on puhtain fossiilinen polttoaine mitä maasta löytyy, sen kemiallinen koostumus on yksinkertainen ja pääkomponenttina on metaani, se koostuu neljästä vetyatomista ja yhdestä hiiliatomista. Maakaasu on luonnollisessa tilassaan hajuton ja väritön kaasu, palaessaan se tuottaa vain vettä, hiilidioksidia ja pienen määrän typen oksideja. (AGA, 2022.)

Maakaasua käytetään Suomessa talojen lämmittämiseen ja sähkön yhteistuotannossa, Euroopassa maakaasua käytetään paljon enemmän, maakaasulla lämmitetään noin puolet Euroopan asunnoista ja teollisuudessa maakaasua käytetään paljon. (Fortum, 2023.)

Maakaasu syntyy maan sisällä biomassan hajotessa. Biomassa, eli miljoonia vuosia vanhoja jäännöksiä eläimistä ja kasvistosta kuten levästä on kerääntynyt maanpälle ja meren pohjaan, ajan myötä nämä jäänteet on sekoittunut hiekan, liejun ja kalsiumkarbonaatin kanssa. Vuosien saatossa nämä kerrokset on hautautunut hiekan, liejun ja kiven alle. Suuren paineen ja lämmön myötä osa näistä vety- ja hiilidioksidi rikkaista aineista muuttui hiileksi, öljyksi ja kaasuksi. (EIA, 2022.)



Kuva 1. Maakaasun elinkaari (U.S. Energy Information Administration, 2019)

Joissain paikoissa maakaasu virtaa suuriin halkeamiin ja tiloihin yläpuolisen kallion kerrostumien välissä. Tällaisista kerrostumista löydettyä maakaasua kutsutaan joskus perinteiseksi maakaasuksi. Toisissa paikoissa maakaasu esiintyy pienten huokosten (tilojen) sisällä joissakin liuske-, hiekkakivi- ja muissa sedimenttikivimuodostelmissa. Tätä maakaasua kutsutaan liuskekaasuksi tai tiukkakaasuksi, ja sitä kutsutaan joskus epätavalliseksi maakaasuksi. Maakaasu esiintyy myös raakaöljyvarantojen yhteydessä, ja tätä maakaasua kutsutaan liittyväksi maakaasuksi. Maakaasuesiintymiä löydetty maalta, ja joitakin esiintymiä on meren alla ja syvällä meren pohjassa. Hiilikerrostumista löydettyä maakaasua kutsutaan kivihiilimetaaniksi. (EIA, 2022.)

Maakaasu, joka otetaan talteen maakaasu- tai raakaöljykaivoista, on nimeltään kostea maakaasu, koska sen mukana on yleensä metaanin lisäksi NGL-yhdisteitä - etanolia, propania, butaania, pentaneja sekä vesihöyryä. Kaivon suulta otettu maakaasu voi sisältää myös epäpuhtauksia, kuten rikkiä, heliumia, typpeä, vetysulfidia ja hiilidioksidia, joista suurin osa on poistettava ennen kuin maakaasu myydään kuluttajille. (EIA, 2022.) NGL-yhdiste tulee englannin kielen sanoista natural gas liquids.

Kaivon suulta maakaasu lähetetään käsittelylaitokseen, joissa vesihöyry ja epäpuhtausyhdisteet poistetaan ja NGL-yhdisteet erotetaan kosteasta kaasusta ja myydään erikseen. Prosessoidussa maakaasussa voi olla jonkin verran jäljellä etanolia. Erotellut NGL-yhdisteet kutsutaan luonnollisiksi kaasunesteiksi (NGPL) ja prosessoitu maakaasu on kuiva-, kuluttaja- tai putkilinjalaatuista maakaasua. Osa kaivon suulta saatavasta maakaasusta on riittävän kuivaa ja täyttää putkikuljetusstandardit ilman käsitteilyä. Kaasuun lisätään hajuaineita, jotta maakaasuputkistossa tapahtuvat vuodot voidaan havaita. Kuiva maakaasu lähetetään putkistoja pitkin maan alle varastokentille tai jakeluyhtiöille ja sitten kuluttajille. (EIA, 2022.) Taulukossa 1 näkyy eri maista tulleen maakaasun koostumuksia ja niiden eroja.



Taulukko 1. Esimerkkejä eri maakaasujen koostumuksista (Suomen kaasuyhdistys ry, 6)

Kenttä		Venäjä Urengoi	Saksa Goldenstedt	USA Kansas	Hollanti Groningen	Norja Troll
<b>Metaani</b>	CH <sub>4</sub>	98 %	88,0%	84,1%	81,3%	93,2%
<b>Etaani</b>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,8%	1,0%	6,7%	2,8%	3,7%
<b>Propaani</b>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,2%	0,2%	0,3%	0,4%	0,4%
<b>Butaani</b>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,02%	–	–	0,4%	0,5%
<b>Typpi</b>	N <sub>2</sub>	0,9%	10,0%	8,4%	14,3%	1,6%
<b>Hiilidioksidi</b>	CO <sub>2</sub>	0,1%	0,8%	0,8%	0,9%	0,6%

Suurempi määrä metaania tarkoittaa parempaa polttoainetta. Taulukosta huomaa, että Venäjältä tuleva ns. siperialainen maakaasu on huomattavasti puhtaampaa kuin muiden maiden tuotokset, Siperian maakaasu on jopa 98% metaania. Tällainen maakaasu sopii todella hyvin poltettavaksi. Maakaasuille joissa on enemmän metaania raskaampia raaka-aineita, on paljon muita käyttötarkoituksia. (Suomen kaasuyhdistys, 2022, s. 6.)

Erilaiset kaasut joita käytetään, on luokiteltu kolmeen kaasuryhmään ja myös kaasuryhmien alaryhmiin, tämä on tehty laskemalla niiden lämpöarvon ja tiheyden avulla Wobbe-arvo. Yleensä maakaasut kuuluvat kaasuryhmään kaksi ja suomessa käytetty maakaasu kuuluu vielä alaryhmään H (= korkean lämpöarvon maakaasu). Näiden luokittelu eri ryhmiin on tärkeää, koska eri laitteissa ei voida käyttää kuin tietyn Wobbe-arvon omaavaa kaasua tai joudutaan tekemään muutoksia ilman suuttimeen ja paineen-säätimeen. Vastaavasti tietenkin kaasua käyttävät laitteet merkataan moneen eri laiteluokkaan, jotta voidaan käyttää varmasti sopivaa kaasua kyseiseen laitteeseen. Taulukossa 2 on näytetty kaasujen luokittelu. (Suomen kaasuyhdistys, 2022, s. 8.)

Taulukko 2. Kaasuryhmät ja alaryhmät (Suomen kaasuyhdistys, 2022, s. 8)

Kaasuryhmät ja alaryhmät	Ylempi Wobbe-arvo, MJ/m <sub>3</sub> (lämpötila 15°C ja paine 1013,25 mbar)	
	Minimi	Maksimi
<b>Ensimmäinen kaasuryhmä</b>	22,4	24,8
- alaryhmä a		
<b>Toinen kaasuryhmä</b>	39,1	54,7
- alaryhmä H	45,7	54,7
- alaryhmä L	39,1	44,8
- alaryhmä E	40,9	54,7
<b>Kolmas kaasuryhmä</b>	72,9	87,3
- alaryhmä B/P	72,9	87,3
- alaryhmä P	72,9	76,8
- alaryhmä B	81,8	87,3

Maakaasua käytetään pääasiassa sähkön tuottamiseen ja se onkin suurin maakaasun käyttötarkoitus maailmanlaajuisesti, Yhdysvaltain energiaministeriön mukaan 25% Yhdysvaltojen sähköntuotosta tulee maakaasusta, ja vuonna 2035 46% uudesta sähköntuotannosta olisi maakaasusta tulevaa. Suomessa taas maakaasun osuus energiankulutuksessa on noin 5 prosenttia. Maakaasua käytetään myös lämmittämiseen, tielikenteeseen ja teollisuudessa, varsinkin paperi ja metalli valmistuksessa. (American Petroleum Institute, 2022.)

Maakaasun huono puoli on sen suuri tilantarve. Se tarvitsee kuusi kertaa enemmän tilaa kuin diesel saman energiamäärän tuottamiseen. Suuret kaasusäiliöt vievät tilaa, painavat ja maksavat paljon. Erityisesti meriteollisuudessa, jossa tilankäyttö on erittäin tarkkaa ja halutaan optimoida kaikki, maakaasun käyttäminen sellaisenaan ei ole mahdollista sen suuren tilantarpeen takia. Maakaasun varastoiminen pienempään tilaan on mahdollista kahdella tavalla: paineistamalla se suureen paineeseen (tätä kutsutaan paineistetuksi maakaasuksi (CNG)) tai nesteyttämällä se. Paineistettu maakaasu on hyvin

yleinen liikenteessä ja käytetään kaasuautojen polttoaineena. Paineistamalla maakaasu saadaan se pienempään tilaan kuin normaalitilassa oleva maakaasu, ja nesteyttämällä se saadaan vielä tiheämmäksi.

### 3.1 Nesteytetty maakaasu

Nesteytetty maakaasu on keksitty vuonna 1820, kun englantilainen tiedemies nimeltä Michael Faraday onnistuneesti jäähdytti maakaasua saadakseen sen nestemäiseen muotoon, noin 100 vuotta myöhemmin ensimmäinen LNG laitos rakennettiin Länsi Virginiaan. Näitä laitoksia rakennettiin ympäri maailmaa nopeasti tämän jälkeen, jotta saavutettaisiin energiatarpeet ilman suuria putkistotöitä maakaasua varten. (Fluenta, 2019.)

Nesteytetty maakaasu, eli LNG on maakaasua nestemäisessä muodossa. Maakaasun kiehumispiste on -163 celsius astetta normaalissa ilmanpaineessa, eli ilman teollista jäähdyttämistä maakaasu ”kiehuu” koko ajan. Kaasun tilavuus on paljon suurempi kuin nesteen, tämän takia halutaan nesteyttää maakaasu, koska sen tilavuus on noin 600 kertaa pienempi nesteytettynä kuin kaasuna. (Shell, 2023.)

Varsinkin meriteollisuudessa on tärkeää käyttää käytettävissä olevat tilat hyvin, joten mitä enemmän kaasua saadaan pieneen tilaan sen parempi. LNG:tä käytetään nykyään myös paljon polttoaineena laivoissa, mutta aiemmin sen suurin tarkoitus merellä on ollut sen siirtäminen. Paikoissa joissa ei ole kaasuputkia siirtoja varten tai ovat muuten kaukana maakaasu lähteistä, voidaan niille toimittaa maakaasua nesteytettynä rathialusten kanssa ja taas kohteessa muuttaa takaisin kaasun muotoon.

### 3.2 Maakaasun nesteyttämisen prosessi

Maakaasun nesteyttämistä varten kaasun on käytävä moni vaiheinen prosessi LNG laitoksilla. Nämä laitokset voivat olla maalla tai merellä sijaitsevia. Merellä sijaitsevia laitoksia kutsutaan ”kelluviksi LNG laitoksiksi”. Merilaitoksilla on myös laitteisto

nesteytetyn maakaasun muuttamiseksi takaisin kaasuksi, joten koko LNG prosessi voidaan tehdä merellä. (Fluenta, 2019.)

Ensimmäiseksi täytyy puhdistaa maakaasu nesteyttämislaitoksella. Maakaasu täytyy olla vähintään 85-99% metaania, joten siitä täytyy puhdistaa kaikki muut epäpuhtaudet kuten butaanit, etaanit, propaanit.

Kuitenkaan esimerkiksi propaani ja butaani ei mene hukkaan, vaan se otetaan talteen maakaasusta erittämisen jälkeen ja prosessoidaan omana aineenaan, näitä aineita kutsutaan NGL-yhdisteiksi. (Fluenta, 2019.)

Maakaasun puhdistamisen jälkeen se käy nesteytysprosessin läpi. Tässä vaiheessa puhdistettu maakaasu kulkee LNG-linjaston läpi. Tällä linjalla tehdään useita eri vaiheita maakaasun nesteyttämiseksi. Maakaasu jäähdytetään, jotta se muuttuu nestemäiseksi. Tässä käytetään erillistä kylmäainetta, joka paineistetaan, jäähdytetään ja kondensoidaan. Tämä kylmäaine on yleensä jokin komponentti, joka on peräisin maakaasun puhdistusprosessista, esimerkiksi butaani. Kun kaasu on kondensoitu, paine laskee ja Joule-Thomsonin efektin takia lämpötila laskee. Tätä jäähdytettyä kaasua käytetään sitten maakaasun jäähdyttämiseen, kunnes maakaasun lämpötila laskee alle  $-163\text{ °C}$ . (Fluenta, 2019.)

Maakaasun ollessa nestemäisessä muodossa ja sen tiheys on kasvanut 600 kertaiseksi, sitä voidaan kuljettaa eri paikkoihin ympäri maailmaa. LNG:n kuljettamisessa on kuitenkin yksi rajoite, sen on pysyttävä nestemäisessä muodossa koko kuljetuksen ajan. Tämän takia kuljetuskaluston on sisällettävä oikeanlaiset varusteet välttääkseen kaasun lämpenemiseen johtavat katastrofit. Yleensä LNG siirretään erikoistuneilla rah-tialuksilla, joissa on esimerkiksi tuplaseinät rungossa varmistaakseen eristyksen ja lämpötilan ylläpidon. Kuljetuskaluston on myös hallittava säiliöiden painetta, joka nousee nesteen lämmitessä ja muuttuessa kaasuksi. Kaasun muodostumista on lähes mahdotonta välttää, joten säiliöiden painetta on hallittava. Boil-off kaasu syntyy tankissa tapahtuvista pienistä lämpötilavaihteluista, kun osa nestemäisestä kaasusta muuttuu takaisin maakaasuksi. (Fluenta, 2019.)

Kun LNG:n kuljetus on tehty onnistuneesti ja päästy toiselle puolelle maailmaa, minne maakaasua tarvitaan, alkaa kaasun viimeinen prosessi ennen käyttöä. Koska useimmiten kaasu tuodaan rahtialuksella tai erikoistuneella LNG aluksella, kaasun viimeinen käyttöpaikka ei todennäköisesti ole vielä satamassa. Viimeiseen prosessiin sisältyy nesteytetyn maakaasun varastointi, paineistaminen ja muuttaminen takaisin kaasuksi sekä siirtäminen.

Lämmönvaihdin on laite, joka käyttää lämpöä muuttaakseen nesteen kaasuksi. Uudelleenkaasuttaminen (regasification) on prosessi, jossa LNG muutetaan takaisin kaasuksi. Tätä varten käytetään lämmönvaihtimia, jotka käyttävät ulkopuolista lämpöä LNG:n lämpötilan nostamiseen tarvittavalle tasolle, jolloin se muuttuu kaasuksi. Yleensä meriveden lämpöä käytetään lämmönvaihtimissa kaasuttamiseen yhdessä isojen painepumppujen kanssa, jotka siirtävät LNG:tä ja paineistavat sen 70-100 bar paineeseen. (Marine insight, 2021.)

Paineistaminen on välttämätöntä uudelleenkaasutuksen jälkeen, jotta kaasu saadaan sopivaan paineeseen järjestelmiin, joissa sitä käytetään energiantuotantoon tai jakeluun. Matala paine maakaasulla ei ole käyttökelpoista, sillä se ei kulje tarpeeksi nopeasti järjestelmissä. Korkeammalla paineella kaasu liikkuu nopeammin ja tehokkaammin, ja sillä on tarvittavat ominaisuudet, jotta sitä voidaan käyttää tehokkaasti energiantuotantoon tai jakeluun.

Kun LNG on saatu takaisin kaasuksi, se käy vielä analyyseissa, testeissä sekä hajutuksessa. Koska maakaasu on hajuton ja mauton sekä herkästi syttyvä sen normaalissa tilassa, kaasuun lisätään hajustetta, jotta voidaan tunnistaa vuotoja putkistosta, tankeista, venttiileistä ja niin edelleen erilaisista kohdista, joissa maakaasua käy. Yleensä hajusteena käytetään tetrahydrotiofeenia, koska sillä on tunnusomainen erityisen voimakas ja epämiellyttävä haju. Tämän jälkeen maakaasu on valmis käytettäväksi joko putkistoa pitkin, rekalla tai muilla siirto toimenpiteillä. (Marine insight, 2021.)

### 3.3 LNG:n vaarat

LNG:tä on kuljetettu jo lähes 100 vuotta merellä ja pitkälti ilman suuria vahinkoja tai tapaturmia. LNG itsessään on palamatonta nestettä jota pidetään -163 celsius asteessa ja suuressa paineessa, mutta heti kun LNG reagoi ilman kanssa se muuttuu hyvin äkkiä kaasuksi joka on erittäin herkästi syttyvää, liekki tästä kaasusta voi nousta jopa yli 150 metrin korkeuteen ja se palaa pitkän aikaa, joten vaikkei erittäin suuria vahinkoja ole sattunut kuljetuksessa, täytyy niiden mahdollisuus kuitenkin ottaa tosissaan. (marine insight, 2019)

Pahin mahdollinen tapaturma tankkerissa olisi tankkerin tulipalo tai räjähdys. LNG:stä syntyvillä liekeillä on korkea korkeus ja laaja leviämisalue. Kriittiset alueet räjähdysriskille on konehuoneet ja kompressorihuoneet. Nämä alueet pitää olla suojattuina palosammutus järjestelmällä joka ylittää standardin ISO 14520 tasolle. Yleensä käytetään CO2 palosammutus järjestelmiä. (Marine insight, 2019.) Räjähdysriskin välttämiseksi varmistetaan, että kaikki laitteet joita LNG aluksessa tai räjähdysvaarallisilla alueilla käytetään ovat turvallisia ja standardien hyväksymiä.

LNG:n kuljetukset ovat yleisesti ottaen sujuneet hyvin ilman suuria vahinkoja tai tapaturmia jo lähes 100 vuoden ajan. LNG itsessään ei ole herkästi syttymään, pikemminkin erittäin haastavaa saada se syttymään ja vaatii noin. 580 celsius lämmön syttyäkseen, silloinkin LNG on pikemminkin hitaasti palavaa kuin räjähtävää. Jos LNG:tä vapautuu suljettuun tilaan josta se ei pääse haihtumaan pois, muuttuu se kuitenkin hyvinkin nopeasti herkästi syttyväksi. Tästä syystä LNG:n kuljetusten mahdolliset riskit täytyy ottaa vakavasti huomioon. (Marine insight, 2019.)

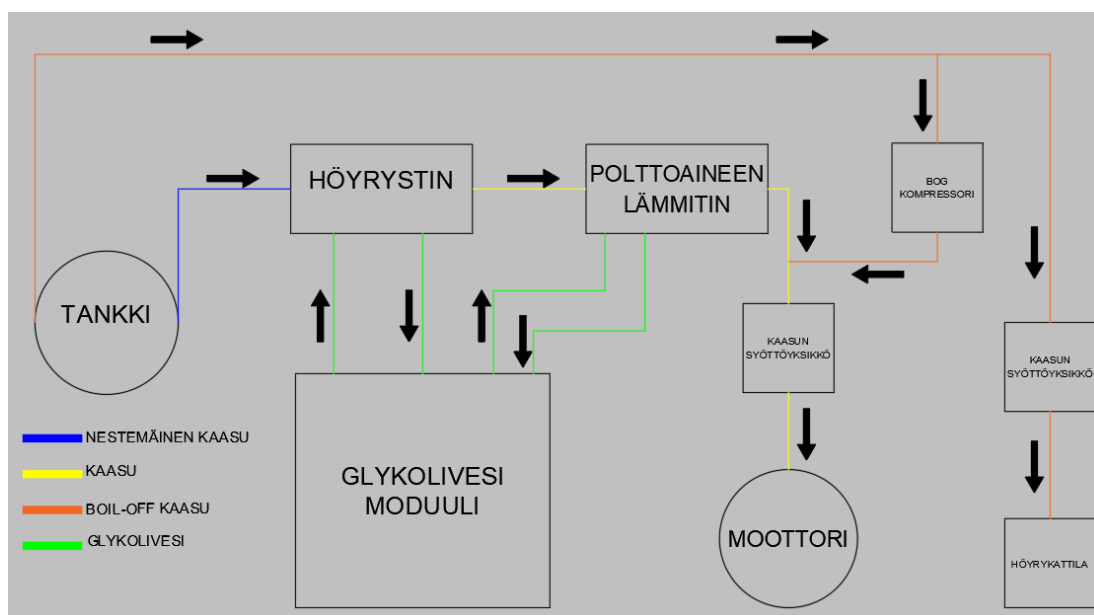
Lisäksi, LNG:n kuljetuksiin sovelletaan ATEX-määräyksiä, jotka edellyttävät erityistä varovaisuutta ja huolellisuutta kaasun käsittelyssä ja kuljetuksessa, jotta vältetään mahdollisilta räjähdysvaaroilta ja varmistetaan ihmisten ja ympäristön turvallisuus. ATEX-määräykset ovat EU:ssa voimassa olevia turvallisuusmääräyksiä, joilla turvataan ihmisten ja ympäristön turvallisuus elektroniikka- ja teollisuusalan laitteiden käytössä ja valmistuksessa. Nämä määräykset ovat tarpeen, sillä erittäin riskialttiiden tilojen käytössä ja valmistuksessa on olemassa mahdollisuus räjähdysvaaraan. ATEX-

määräyksiä noudatetaan erityisesti sellaisilla aloilla kuten kaivos, maakaasun ja öljyn jalostus, petrokemianteollisuus ja kemianteollisuus. (Klingecorp, 2020.) Koska LNG on kryogeeninen eli todella kylmä aine, on mahdollisena vaarana myös palovammat ihmisiin, sekä laivan runko voi vahingoittua LNG:stä.

## 4 LNG-LAITTEISTO RISTEILYALUKSESSA

Suurimmat erot tavallisella polttoaineella toimivaan alukseen verrattuna nestemäisellä maakaasulla toimivaan ovat LNG tankki, jossa polttoainetta säilytetään, siihen liittyvä LNG bunkkeriasema sekä kaasunsiirto putkitus, kaasun syöttö järjestelmä, kaksoisseinämä, eli DWP (Double Wall Pipe) polttoaineenjako putkitus, kaasuventtiili yksikkö, kaasun kuluttajat, typen generointi laitos, tuuletusputkitusjärjestelmä ja mastot, sekä joillekin tankki tyypeille ylimääräistä laitteistoa lämmön ja paineen hallitsemiseen tankissa. (ABS, 2022.)

LNG järjestelmä kokonaisuudessaan koostuu monesta eri laitteesta, jotka ovat tarpeellisia joko nesteen muuttamiseksi takaisin kaasumuotoon ja käytettäväksi moottorissa, tai sitten turvatoimenpiteitä joilla minimoidaan mahdolliset vahingot. Esimerkiksi aikaisemmin mainittu tuuletusputkitus ja mastot ovat tarpeellisia yleensä vain äärimmäisissä hätätilanteissa jolloin voidaan päästää kaasua ilmakehään tuuletusjärjestelmän ansiosta. Kuvasta kaksi näkee yksinkertaistetun version yleisestä kokoonpanosta LNG:llä toimivassa aluksessa.



Kuva 2. Yksinkertaistettu esitelmä LNG järjestelmästä



## 4.1 Tankki

LNG:tä säilyttävä tankki eli CCS (cargo containment system) on standardoitu säiliö, jolla on korkeat vaatimukset. Nämä erikoistuneet eristetyt säiliöt sisältävät LNG:tä, pitäen sen kylmänä ja helpottavat kaasun kuljetusta ja toimitusta. Vielä tänä päivänä on hyväksytty neljä erilaista tankki tyyppiä, kaikki omilla hyödyillä ja haasteilla. (Marine & Offshore, 2021.)

Kaikki CCS:t on International Code of Safety for Ships Using Gases or other Low-flashpoint Fuels, eli IGF standardin alla. Standardi sisältää monia eri sääntöjä liittyen LNG tankkeihin. IGF määrää monia turvallisuus ja rakenteellisia puolia, sisältäen materiaali valintoja sekä testausta, vuotojen ehkäisemistä sekä lämpötilan ja paineen ohjausta. (Marine & Offshore, 2021.)

Yleisimmin käytetyt tankit ovat kelluvia, eli erikseen rakennettuja tankkeja jotka rakennetaan erikseen aluksesta itsestään ja myöhemmin nostetaan aluksen sisään. Näitä tankkeja on kolme eri tyyppistä. (Marine & Offshore, 2021.)

### 4.1.1 A-Tyyppi

A-tyypin tankit ovat särmiömäisen muotoisia, näissä on tasaiset paneelit ja lisäeristeet. Alun perin kehitetty LPG (nestekaasu) tankkereille, A-tyypin tankit on myöhemmin hyväksytty myös LNG aluksiin. (Marine & Offshore, 2021)

Suurin huolenaihe käytettäessä A-tyypin tankkeja LNG:hen on lämpötila: LPG täytyy pitää vain -50 celsiusasteessa kuljetuksen aikana, mutta LNG täytyy olla vähintään -160 celsiusasteessa. A-tyypin tankeissa pitää näin ollen olla kokonaan uusi, lisätty eriste joka kattaa koko tankin alueen. (Marine & Offshore, 2021.)

### 4.1.2 B-Tyyppi

B-tyypin tankit ovat särmiömäisiä tai pyöreitä muodoltaan ja niitä käytetään pääasiassa keski- ja suurikokoissa aluksissa. B-tyypin tankit on suunniteltu ”vuoto ennen

vikaa” periaatteella. (Marine & offshore, 2021.) Tämä idea on käytössä pitkälti ydinvoimaloissa ja tarkoittaa käytännössä sitä, että putkistoon tai tässä tapauksessa tankkiin tulee särö tai vuoto ennen katastrofista vikaa.

Joka tapauksessa B-tyypin tankeissa on myös osittainen lisäsuoja tankin alaosassa suojaamaassa vuotoilta, mikäli niitä on. Särmiömäiset B-tyypin tankit on samantyyllisiä kuin A-tyypin tankit muodoltaan ja suurimman sallitun paineen osalta, sekä sallii paremman tilankäytön optimoinnin kuin pyöreämuotoiset vastaavat tankit. (Marine & offshore, 2021.)

#### 4.1.3 C-Tyyppi

C-tyypin tankit ovat eristettyjä sylinterimäisiä, bilobe-tyyppisiä tai trilobe-tyyppisiä, joissa on kaksi tai kolme sylinterimäistä tankkia yhdessä. C-tyypin tankit voidaan paineistaa kokonaan tai osittain, riippuen minkä tyyppistä nestemäistä kaasua säilytetään. C-tyypin tankit eivät tarvitse kaksoisseinää, koska niissä on todella pieni riski rakenteellisiin vikoihin tai vuotoihin. C-tyypin tankit voi varastoida LNG:tä korkeammalla paineella kuin A tai B-tyypin tankit, mutta tilan optimointi C-tyypissä on huonompi. (Marine & offshore, 2021.) Kuvassa 3 tyypillinen sylinterimäinen C-tyypin tankki.



Kuva 3. Tyypillinen sylinterimäinen C-tyyppin tankki (Marine & Offshore, 2021)

#### 4.1.4 Membraanitankki

Toisin kuin aiemmat kolme tyyppiä, membraanitankki on osa laivan rakenteita eikä erillinen tankki. Membraanitankki on suunniteltu niin, että kaksi ohutta membraani kalvoa käyttäytyy suojina ja näiden tukena on useampi kerros eristettä, membraanitankit pitää paineen alhaisena. Paksut kalvojen väliset eristetyt tilat mahdollistavat näiden säiliöiden ylläpitää matalaa lämpötilaa ja pitää nesteytettyä maakaasua vähintään noin  $-160^{\circ}\text{C}$ :ssa. Membraanitankit on alun perin kehitetty LNG:tä varten ja näiden muoto mahdollistaa vahvan tilan optimoinnin, jonka johdosta nämä tankit on suosittua teknologiaa nykypäivän suurille LNG tankkereille. (Marine & Offshore, 2021.)

## 4.2 BOG kompressori

BOG kompressorin eli boil-off gas kompressorin tehtävä LNG järjestelmässä on ylläpitää LNG tankin painetta tiettyjen rajojen sisällä. Kun tankissa muodostuu boil-off kaasua, se ohjautuu BOG kompressorin imupuolelle, paineistetaan ja lähetetään joko uudelleen nesteyttämisprosessiin tai menee kaasun syöttöyksikön kautta moottorille ja käytetään polttoaineena. Kaasun lämpötila on todella alhainen, kun se tulee BOG kompressorille, jopa -160 Celsiusastetta, joten kompressorin suunnittelussa täytyy olla todella tarkka. (IHI, 2022.)

## 4.3 Kaasunsyöttöyksikkö

Kaasunsyöttöyksikkö eli GVU (gas valve unit) on tärkeä komponentti ennen moottoria, jonka tehtävänä on säätää kaasunsyöttö painetta moottorille sekä varmistaa nopean ja luotettavan kaasunsyötön pysäytyksen. Jokaiselle moottorille täytyy olla oma kaasunsyöttöyksikkö. IGF standardi vaatii myös, että GVU yksikössä täytyy olla kaksi sulkuventtiiliä sekä tuuletusventtiili näiden välissä. Sulkuventtiilit on yleensä asennettu sarjaan, joka takaa täyden redundanttisuuden. (Wärtsilä, 2017.)

Jokaiselle moottorille kaasunsyöttöpaine säädetään pienen virhemarginaalin sisällä moottorin kuormasta riippuen. Sääto tapahtuu paineensäätöventtiilillä, joka sijaitsee erillään moottorista. (Raita, 2023.)

## 4.4 Höyrykattila

Aluksen höyrykattila on tärkeä kompleksi, joka tuottaa jatkuvasti höyryä muuntamalla eri energialähteet lämpöenergiaksi. Höyryä käytetään moniin kohteisiin kuten polttoaineiden, öljyjen, koneiden, lastitankkien ja lämmönvaihtimien lämmitykseen. Höyrykattilassa tapahtuu useita prosesseja, kuten polttoprosessi, aerodynaaminen prosessi, lämmönsiirtoprosessi ja hydrodynaaminen prosessi. Näiden prosessien aiheuttamat sivuvaikutukset, kuten saostumien muodostuminen ja metallikorroosio, vaikuttavat höyrykattilan pitkän aikavälin toimintaan ja turvallisuuteen. Nykyään käytetään kolmenlaisia höyrykattiloita: vesiputkellisia, tuliputkellisia ja yhdistettyjä höyrykattiloita.

Nestemäiset polttoaineet ovat yleisin lämpöenergian lähde aluksilla. (Beturin, 2019, s. 5-6.) Kattilassa voidaan hyödyntää LNG-tankista muodostuvaa boil-off kaasua.

#### 4.5 Höyrystin ja polttoaineen lämmitin

LNG höyrystin on käytännössä lämmönvaihdin, jonka tehtävänä on lämmittää nestemäinen maakaasu takaisin kaasuksi. Lämmönvaihtimia on erilaisia, mutta kaikilla on sama periaate. (Cryonorm, 2022) Lämmönvaihdin vaatii myös energiaa ja huonosti suunniteltuna se saattaisi käyttää liikaa energiaa suhteessa saatavaan energiaan (kaasu), yleinen tapa lämmittää kaasu on meriveden tai glykoliveden avulla. Usein suositaan glykolivettä meriveden sijaan, koska se vie korroosiomahdollisuudet pois. Tätä samaa jäähdytysvettä voidaan myös käyttää moottorin jäähdyttämiseen ja polttoaineen lämmittimeen.

Pelkkä höyrystin ei kuitenkaan riitä kaasun lämmittämiseen, koska LNG:n kiehumispiste on alle -160 celsiusastetta, on kaasumuodossakin tämä vielä todella kylmää. Kaasun lämmittämiseen moottorille käyvään lämpötilaan on käytettävä toista lämmitintä, yleensä polttoaineen lämmittimeksi kutsuttua laitetta, tämä lämmitys voidaan myös tehdä höyrystimessä.

#### 4.6 Typpigeneraattori

Kaikki alukset jotka kuljettavat kemiallisia aineita, kaasuja tai muita vaarallisia yhdisteitä tarvitsee puhdasta, kuivaa typpeä puhdistamiseen ja inertointia varten. Typpigeneraattorit ovat paras tapa tuottaa typpeä aluksella. On olemassa kahden tyyppisiä typpigeneraattoreita, toinen tyyppi käyttää onttoa kuitumembraani teknologiaa ja toinen perustuu ”Pressure Swing Adsorptioniin” eli PSA prosessiin. (Wärtsilä, 2022.) Typpigeneraattoreita käytetään käytännössä putkistojen täyttämiseen tyrellä, silloin kun niissä ei kulje tai ei haluta kulkevan kaasua.

#### 4.7 Moottori

Maakaasulla käyviä laivan moottoreita on monenlaisia ja niitä voidaan luokitella usealla eri tavalla. Esimerkiksi dieselsytytteisiin matalapainemoottoreihin, dieselsytytteisiin korkeapainemoottoreihin ja kipinäsytytteisiin moottoreihin. IGF standardin mukaan kuitenkin kaksoispolttoaineella toimivan moottorin pitää pystyä vaihtamaan polttoainetta ilman keskeytystä. Polttoaineen vaihto molempiin suuntiin pitää tapahtua niin, että tulee mahdollisimman vähän moottoritehon häviöitä.

## 5 DIGITAALINEN KAKSONEN

Digitaalinen kaksonen engl. ”digital twin“ on tarkka virtuaalinen malli oikean maailman fyysisestä kappaleesta. Mallinnettavaa kappaletta, esimerkiksi tuulivoimalaa varustetaan usealla anturilla kriittisiin toiminnallisiin paikkoihin, joista saadun datan perusteella voidaan tehdä tarkkoja tilanteita virtuaalisessa mallissa. Näitä kohtia esimerkiksi tuulivoimalassa olisi tuotettu energia, lämpötilat, sää ja suorituskyky. (IBM, 2022.)

Kun digitaaliseen kaksoseen on saatu lisättyä tämä data, sitä voidaan käyttää simulaatioihin, ennakoida suorituskyvyn ongelmia sekä kehittää parannuksia. Tavoitteena tuottaa tärkeää tietoa kappaleesta, joka voidaan sitten hyödyntää oikean maailman yksikössä. (IBM, 2022.)

### 5.1 Digitaalisen kaksosen historia

Ajatus digitaalisesta kaksosesta tuli alun perin esiin vuonna 1991, kun *Mirror Worlds*, *David Gelernter* julkaistiin. Tohtori Michael Grievesille on annettu tunnustus hänen ollessa ensimmäinen, joka käytti digitaalisen kaksosen konseptia valmistuksessa vuonna 2002. Loppujen lopuksi NASAn John Vickers esitti uuden termin ”digital twin” vuonna 2010. (IBM, 2022.)

Ydinajatus digitaalisen kaksosen käyttämisestä fyysisen objektin tarkastelua varten voidaan kuitenkin todistaa tapahtuneen jo paljon aikaisemmin. Voidaan oikeutetusti sanoa, että NASA oli edelläkävijänä digitaalisen kaksosen käyttämisessä sen niin sanotun avaruuskilpailun aikana 1960-luvulla. NASA teki jokaisesta matkaan lähtevästä aluksesta täydellisen, lentokyvyttömän kopion, jota käytettiin tutkimuksiin ja simulointiin tarkoituksiin NASAn henkilökunnalle jotka olivat lähdössä matkaan. (IBM, 2022.)

## 5.2 Digitaalisen kaksosen laajuus

Digitaalisia kaksosia on monenlaisia, riippuen järjestelmän koosta ja käyttötarkoituksesta. Suurin ero näiden erityyppisten mallien välillä on niiden eri sovellusalueet. Normaalisti voi olla useita erillisiä digitaalisia kaksosia prosessin eri alueista. Erityyppisiä digitaalisia kaksosia on esimerkiksi komponentti kaksonen, voimavarakaksonen, systeemikaksonen sekä prosessikaksoset. (IBM, 2022.)

Komponenttikaksonen on digitaalisen kaksosen perusyksikkö, pienin osa toimivasta kokonaisuudesta. Digitaaliseen kaksoseen halutaan saada järjestelmän oleelliset ja merkittävät komponentit, eli tällä pienimmällä toimivalla osalla ei kuitenkaan tarkoiteta kaikkia auton tai tuulimyllyn ruuveja. Yleensä termiä käytetään järjestelmän osista, jotka eivät ole niinkään tärkeitä kokonaisuutta ajatellen, mutta näihin vaikuttaa suuria tai epätasaisia voimia ja ne halutaan ottaa huomioon. (Tributech, 2019.)

Kun kaksi tai useampi komponenttia työskentelee yhdessä, niistä koostuu voimavara. Voimavarakaksonen mahdollistaa näiden komponenttien käyttäytymisen tutkimisen, josta saa arvokasta dataa suorituskyvystä joka voidaan prosessoida ja kiteyttää. Voimavarakaksonen on käytännössä ensimmäinen ”taso” jossa saadaan oikeita tuloksia järjestelmästä ja nähdään eri komponenttien yhteensopivuus. (Tributech, 2019.)

Seuraava oleellinen taso on systeemikaksonen, tämä tarkoittaa käytännössä useamman kuin yhden voimavara kaksosen yhdistämistä ja niiden seuraamista. Esimerkiksi autossa voisi olla voimavara kaksonen tehtynä voimansiirrosta, sähkölaitteista, korista ja viihdelaitteista. Nämä ovat kaikki eri järjestelmiä mutta saman systeemin sisällä ja näin ollen kaiken tulee pelata keskenään. Toinen esimerkki, joka saattaa olla helpompi ymmärtää olisi autotehdas: autotehtaan yksi linja olisi systeemi kaksonen, linjalla on komponentteja ja komponenteista saadaan voimavara kaksoset, voimavara kaksoset esittävät linjalla aina yhtä tapahtumaa, pellin taivutus, maalaus ja hitsaus. Systeemi kaksonen tarkoittaa näiden kaikkien eri voimavarojen yhdistämistä ja näiden keskenään toimimista. (Tributech, 2019.)



Prosessikaksonen, kokonaisuus. Aikaisempaan esimerkkiin nojautuen, prosessikaksonen olisi koko tuotantolaitos, kaikki systeemikaksoiset samassa simulaatiossa ja näiden toiminnan seuraaminen. Prosessikaksoiset vastaavat esimerkiksi kysymyksiin, onko nämä kaikki järjestelmät hyvin synkronoitu toimiakseen parhaalla mahdollisella hyötysuhteella, vai onko järjestelmän jossain kohdassa pullonkaula, joka hidastaa koko laitoksen toimintaa? Prosessi kaksoiset voi auttaa päättämään tarkat ajoitukset jotka loppujen lopuksi vaikuttavat kokonaisuuden toiminnallisuuteen. (Tributech, 2019.)

### 5.3 Model in the Loop MIL

Mekaaniset järjestelmät useasti testataan laboratoriotiloissa varmistuaksemme niiden dynaamisista piirteistä. Esimerkiksi uudet suunnitelmat kulkuneuvoista, lentokoneista tai rakennusten rakenteista voidaan tutkia tällä tavalla. Yleensä tällaiset testit koostuvat mekaanisten rasitusten synnyttämisestä käyttäen erityyppisiä toimilaitteita simuloidaksemme kyseisen mallin rasituksia oikean maailman tilanteessa ja mitataksemme mallin vasteita liikkeen, voiman, heilumisen ja muiden kriittisten elementtien kanalta.

Model-in-the-loop tai MIL testaus on erilainen ajatusmalli, jossa testattava malli on osittain oikea ja osittain virtuaalinen malli, tai kokonaan virtuaalinen malli. Virtuaalinen osuus toteutetaan tietokone simulaatiolla. Tällä toteutustavalla on useita potentiaalisia hyötyjä, riippuen testattavasta mallista. (Plummer, 2005, s. 183.)

- Vain tietty avain komponentti jolla on tuntemattomia piirteitä tarvitsee fyysisesti testata, alentaen kyseisen laitteen monimutkaisuutta ja hintaa.
- Uusi järjestelmän suunnitelma voidaan testata, vaikkei kaikkia osia olla vielä fyysisesti realisoitu, nämä osat voidaan simuloida.
- Joskus voi olla haastavaa fyysisesti kopioida oikeanlaiset olosuhteet, jotka vastaisivat laitteen oikeaa toimintaa ympäristössä, nämä vaikuttavat voimat voidaan esittää tarkemmin tietokonemallilla.
- Simuloidun järjestelmän piirteitä voidaan muuttaa esittääksemme vaihtoehtoisia konfiguraatioita, tämä on tietenkin paljon näppärämpää kuin fyysisen mallin muokkaaminen.

#### 5.4 Software in the Loop SIL

Software-in-the-loop testaus eli SIL testaus, tarkoittaa testaukseen sulautettua ohjelmistoa, algoritmia tai kokonaisia ”control loopeja” tietokoneella joko ympäristömallilla tai ilman, näin ollen ilman ECU (Electronic control unit) laitteistoa. SIL testaus on olennainen osa autoteollisuuden ohjelmisto testausta. Lähdekoodi sulautetulle järjestelmälle on koostettu tietokoneelle ja testattu tietokoneella. (Piketec, 2021.)

Suurin hyöty software-in-the-loop testauksessa on, että sen kanssa voidaan tunnistaa järjestelmän bugeja ja vikakoodeja niin aikaisin kuin mahdollista. Tämä ei pelkästään mahdollista nopeita korjauksia, mutta myös pienentää kehitykseen käytettävää aikaa ja pitää kehityksen kustannukset alhaisina. (Piketec, 2021.)

Termi ”in-the-loop” tarkoittaa että ohjelmisto kokonaisuudessaan tai osa ohjelmiston ympäristöstä, eli ohjattu järjestelmä tai laitteisto, on simuloitu. Simulaatio suljettuna ohjaus ”looppina” ei ole pakollista, koska osa testattavista järjestelmistä, etenkin moduuli testauksessa, eivät tarvitse suljettua looppia. (Piketec, 2021.)

Software-in-the-loop testaus on yleensä MIL testausta seuraava testi, jossa generoidaan koodi esimerkiksi ainoastaan kontrolleri mallista ja vaihdetaan simulaation kontrolleri blokki tämän koodin kanssa. Tämän kanssa voidaan ajaa alkuperäinen model-in-the-loop testi uuden ohjauksen koodin kanssa ja näin voidaan testistä kaiken muun lisäksi nähdä, että voidaanko ohjausmallia sisällyttää laitteistoon. (Robotics knowledgebase, 2022.)

#### 5.5 Hardware-in-the-Loop HIL

Hardware in the loop eli HIL testaus on tekniikka, jossa oikeat signaalit kontrollerilta on yhdistettynä testi systeemiin joka simuloi oikeaa maailmaa, huijaten kontrollerin luulemaan, että se on oikean, valmiin tuotteen sisällä. Testaus ja suunnittelu iteroidaan

niin kuin käytössä olisi ihan oikea systeemi. Voidaan helposti käydä läpi tuhansia mahdollisia skenaarioita ja kunnolla harjoitella kontrollerin kanssa ilman oikean fyysisen tuotteen vaatimaa hintaa ja ajan käyttöä. (NI, 2022.)

Ajatellaan autoa. Moottorinohjauksesta vastaava moduuli ECU on vastuussa sensorien havaitsemien parametrien avulla tekemään käytännön muutoksia esimerkiksi muuttaa ilman sisäänottoa, kun kaasupoljin vapautetaan. (NI, 2022.)

HIL testi vaihtaa moottorin simulaatioon, joka sisältää laitteiston ja ohjelmiston, joka toimii oikeiden lähtöjen ja tulojen kanssa, ja käyttäytyy niin kuin oikea moottori olisi paikalla. Koska ohjelmistoon voidaan tehdä päivityksiä, voidaan nopeasti tehdä muutoksia koko järjestelmään, testata laajalla skaalalla relevantteja skenaarioita, sekä laajentaa testialuetta niin paljon kuin tarvetta on, jotta voidaan pelottomasti ja kokonaisvaltaisesti testata ilman riskejä fyysistä, kallista järjestelmää. (NI, 2022.)

Lyhyesti sanottuna, hardware in the loop mahdollistaa kontrollerin, eli jonkun järjestelmän ohjauksen testaamisen, kehittämisen ja varmistamisen ennen kuin itse ohjattava järjestelmä on olemassa fyysisesti.

## 5.6 APROS

Apros on monikäyttöinen simulaatio ohjelmisto, jota on käytetty voimalaitosten ja niiden ohjausjärjestelmien suunnitteluun ja dynaamisen käyttäytymisen analysointiin. Se mahdollistaa moninaisten voimalaitosten prosessien mittavan mallintamisen. Nämä simulaatiot ovat erityisen arvokkaita voimalaitoksen suunnittelun vahvistamiseen ja kelpuuttamiseen, uusien prosessien ja ohjaus konseptien arviointiin, hetkellisten operatiivisten ja hätätilanteiden testaukseen sekä operaattoreiden koulutukseen. (Fortum, 2021.)

Aproksen tarina ulottuu aina vuoteen 1986 asti, jolloin Aproksen kehitys alkoi yhteisprojektina VTT Technical Research Centre of Finlandin ja Fortumin edeltäjän, Imatran

Voima:n (IVO) kanssa. Projektin tarkoituksena oli tukea Loviisan ydinvoimalan ope-  
rintia. Kun Aproksen kehittäminen eteni, tuli pian selväksi, että Aproso voisi tukea  
voimalaitoksia niiden koko elinkaaren aikana: suunnitteluvaiheessa, käyttöönotossa  
sekä operaattoreiden ja insinöörien kouluttamisessa. (Fortum, 2021.)

### 5.6.1 Loviisan tehopäivitys

Yksi suurista etapeista Aprokselle tuli vuosina 1995-1997 kun Loviisan ydinvoima-  
lassa haluttiin nostaa tehoa. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun Aprosta käytettiin näin  
laajalla skaalalla sekä tehtiin turvallisuusanalyysi. Haasteena oli selvittää täsmälleen,  
miten tehonnosto vaikuttaisi kokonaisuuden prosessien käyttäytymiseen ja miten  
muunneltu järjestelmä toimisi kokonaisuutena. Luonnollisesti, ydinvoimalan turvalli-  
nen käyttö piti myös todistaa suomen säteilyturvakeskukselle STUK:ille. Olemassa  
oleva Loviisa NPP simulaatiomalli tarvitsi näin ollen kehittää entistä pidemmälle, jotta  
sillä voisi tehdä turvallisuus analyysyjä – tarkoittaen että jokainen detalji tästä mallista  
piti olla hyvin dokumentoitu ja Aproksen tekemät laskelmat vahvistettuna. (Fortum,  
2021.)

### 5.6.2 Aproso digitaalisena kaksosena

Vaikka Loviisan ydinvoimala on yksi tärkeimmistä ja suurimmista projekteista mitä  
Aproksella on tehty, se on myös ollut mukana lukuisissa muissa projekteissa elinaika-  
naan, mukaan lukien olkiluoto 1, 2 ja 3. Espoossa Aprosta tullaan käyttämään todelli-  
sena digitaalisena kaksosena, kun sitä käytetään lämmitysverkoston kopioimiseen di-  
gitaaliseksi.

Osana E2E ohjelmaa, digitaalista kaksosta kehitetään esittämään ja optimoimaan koko  
Espoon alueellinen lämmitys todella tarkalla tasolla. Digitaalinen kaksonen projekti  
tuottaa kaksi pääasiallista työkalua insinööreille ja operaattoreille: suunnittelu kakso-  
nen ja operatiivinen kaksonen. Molemmat näistä työkaluista vaativat todella tarkan  
kaukolämpöverkoston ensimmäisen periaatemallinnuksen, jotta verkoston virtaukset

ja lämpötilat on tiedossa verkoston eri kohdissa kaikilla ajankohdilla. Apros ajaa avainroolia molemmissa malleissa, koska uutta tuotetta nimeltä Apros District käytetään mallintamiseen ja simulointiin kaikkiin kaukolämpöverkon tuotantopisteisiin, kuluttajiin sekä putkiverkoston. Apros district laskee kaukolämpöverkoston statuksen jokaisessa operaatio pisteessä, ja tämä malli ottaa huomioon myös kuljetus viiveet ja lämmönjakauman, koska tätä tietoa tarvitaan suunnittelu kaksosen sekä operatiivisen kaksosen käyttöön. (Fortum, 2021.)

## 6 LNG-SIMULAATIOMALLI

Meyer Turku on teettänyt rakenteilla olevasta Icon of the Seas risteilyaluksen LNG-järjestelmästä simulaatiomallin. Icon of the Seas on Royal Caribbeanin ensimmäinen LNGllä pääsääntöisesti kulkeva alus ja samalla tulee myös olemaan maailman suurin risteilyalus. Meyer Turulle LNG järjestelmät on tullut tutuksi, sillä ensimmäinen LNG:llä toimiva alus jonka Meyer Turku rakensi, oli Viking Grace jo vuonna 2012. Meyerin tilauskirja onkin siitä lähtien jo näyttänyt pitkää tulevaisuutta LNG:llä ope-roiville aluksille. Icon of the Seas on jo seitsemäs LNG- alus jonka Meyer Turku rakentaa.

Meyer Turun käyttöön kehitetty simulaatiomalli jonka pohjana on aiemmin mainittu Apros. Simulaatiomalli on täydellinen kopio todellisesta laivaan asennettavasta LNG järjestelmästä, kehityksessä on otettu huomioon lämpöhäviöt, virtaukset, venttiilien aukeamis- ja sulkuajat, putket sekä muita ympäristössä ja laitteistossa huomioitavia asioita, tarkoituksena tietenkin olla mahdollisimman tarkka malli, joka vastaa täydellisesti oikean järjestelmän toiminnallisuutta.

Aluksen LNG-järjestelmästä tehty simulaatiomalli on tehty Aproksella ja sille tehdään MIL ja SIL testit. MIL-testeissä sekä automaatio- ohjelma että LNG prosessi on mallinnettu Aprokselle. SIL- testeissä simulaatiomalli on yhdistetty Siemensin logiikkaan ja tällöin saadaan täysin sama laitteisto ohjaamaan simulaatiomallia kuin mikä tulee myös ohjaamaan oikeaa LNG järjestelmää. HIL testausta ei ainakaan toistaiseksi ole tiedossa tälle simulaatiolle.

Simulaatiomallille on useita käyttökohteita sekä telakalle itselleen, mutta myös mahdollisesti varustamolle. Risteilyaluksen voimansiirto on massiivinen ja risteilyalus voi sisältää jopa kuusi pääkonetta. Jokaisen koneen tuottama teho on useita megawatteja, tämän takia kaikkia koneita ei voida ajaa samanaikaisesti telakan laiturilla. Kaikkien koneiden tuottama yhteinen energia olisi liian suuri käsiteltäväksi laiturialueella. Tässä kohtaan simulaatiomallin hyödyt alkavat heti konkretisoitumaan, koska simulaatiomallilla voidaan testata LNG-järjestelmän toimintaa siinä tilanteessa, kun kaikki ko-

neet ovat täydellä teholla, ilman että aluksen tarvitsee olla liikenteessä. Tämä on tärkeää siinäkin mielessä, että jos simulaatiomallilla voidaan havaita poikkeamia järjestelmässä, ne voidaan korjata vielä aluksen ollessa varustelulaiturissa.

Rakennettavat alukset lähtevät aina ennen luovutusta vähintään kerran merikokeelle, jossa ajetaan erilaisia testejä ja tehdään järjestelmien käyttöönottoja, kuten esimerkiksi LNG järjestelmän. Tämä poikkeama, joka olisi juuri löydetty simulaatiomallista, löydettäisiin vasta merikokeessa. Tämä on merikokeen tehokkuuden kannalta merkittävää, koska se voi johtaa siihen, että poikkeama täytyy korjata heti merellä, jotta saadaan tarvittavat tulokset testeiltä. Pahimmassa tapauksessa poikkeamaa ei voi edes korjata merikokeella, jolloin se täytyy tulla korjaamaan telakalle ja myöhemmin tehdä uusi merikoe.

Simulaatiomallia voidaan käyttää myös vaikeiden olosuhteiden testaamiseen. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi LNG:n jäätyminen tai nopea haihtuminen takaisin kaasuksi, järjestelmän osien rikkoutuminen kuten kompressorin ja sen vaikutus ympäristöön, ja LNG:n kylmyyden vaikutus jäätyneisiin laitteistoihin tai putkiin. Simulaatiomallin avulla voidaan esimerkiksi määrittää, kuinka kauan kestää, ennen kuin kaksoisseinäminen putki alkaa kehittää jäätä ulkopintaan, kun välieristeenä toimiva vakuumi putkesta katoaa.

Simulaatiomallin hyödyt voi siis jakaantua koko laitteiston elinkaarelle, suunnittelusta rakentamiseen, käyttöönottoon, käyttöön, huoltoon ja lopuksi vielä järjestelmän poistoon eli purkamiseen ja hävittämiseen. Suunnittelussa simulaatiomalli voidaan ottaa heti rinnalle arvioimaan erilaisia toteutusvaihtoehtoja ja skenaarioita, joiden avulla voidaan optimoida järjestelmän suorituskyky, kustannuksia ja ympäristövaikutukset.

Mallia voidaan käyttää myös huoltojen ja ylläpidon ennakoimiseen sekä järjestelmän optimointiin. Simulaatiomallilla voidaan napinpainalluksilla muuttaa parametreja, joilla järjestelmä operoi, tätä hyödyntäen voidaan testata lukuisia eri asetuksia ja säätöjä järjestelmälle, täten löydetään se kaikkein optimaalisin asetus koko laitteistolle. Tämä tietenkin säästää polttoaineen kulutuksessa ja kun kyseessä on massiivinen alus, voivat säästöt olla huomattavia. LNG-järjestelmän huollon aikana simulaatiomallin

hyödyntäminen voi auttaa esimerkiksi huoltotöiden suunnittelun kanssa. Mallilla voidaan simuloida erilaisia huoltotilanteita ja suunnitella huoltotoimenpiteet etukäteen. Mallilla voidaan arvioida esimerkiksi vaadittavia työkaluja ja varaosia, huoltotoimenpiteiden aikataulua sekä arvioida huollon kustannuksia. Häiriötilanteiden simuloinnissa voidaan myös käyttää simulaatiomallia arvioimaan häiriötilanteen vaikutuksia huoltoon. Tämä auttaa valmistautumaan mahdollisiin ongelmatilanteisiin ja parantamaan huollon tehokkuutta. Simulaatiomallilla voitaisiin mahdollisesti arvioida huoltojen vaikutuksia LNG-järjestelmän toimintaan ja käyttöikäen. Mallilla voitaisiin simuloida erilaisia huoltovaihtoehtoja ja arvioida niiden vaikutuksia järjestelmän käyttöön ja käyttöikäen. Huoltotilanteiden simuloinnilla voitaisiin myös käyttää simulaatiota arvioimaan huoltojen vaikutusta järjestelmän turvallisuuteen. Tämä auttaisi parantamaan turvallisuutta ja vähentämään riskejä.

Rakentamisessa simulaatiomalli voi auttaa arvioimaan rakentamisen aikataulua sekä optimoimaan rakennusprosessia. Simulaatiomallilla voidaan esimerkiksi tunnistaa mahdollisia riskejä ja pullonkauloja sekä optimointimahdollisuuksia. Mallia voidaan myös käyttää apuna kustannusten arviointiin ja niiden optimointiin rakentamisen aikana. Simulaatiomallia hyödyntämällä voidaan mahdollisesti saada tehokkaampi ja turvallisempi rakennusprosessi.

Simulaatiomallia voidaan mahdollisesti myös käyttää suoraan korvaamaan käyttöönoton vaiheita. Mikäli tarvittavat viranomaiset ja luokituslaitokset tulkitsevat simulaatiomallin olevan tarpeeksi kattava, voitaisiin osa käyttöönotosta tehdä suoraan simulaatiomallin tulosten perusteella. Hyvin epätodennäköistä on ajatella simulaatiomallin korvaavan käyttöönoton kokonaan tai edes suurimmaksi osaksi, mutta sillä mahdollisesti voitaisiin tulevaisuudessa korvata joitain laivanpäällä tehtäviä testejä.

Käyttöönotossa simulaatiomallia voidaan hyödyntää usealla eri tavalla, vaikkei simulaatiomallilla voitaisi suoraan korvata joitakin testejä, ei se kuitenkaan estä ajamasta samoja testejä. Oikean käyttöönoton ja simulaatiomallilla tehdyn käyttöönoton tuloksia voidaan myös verrata keskenään, jolloin saadaan ns. tuplavarmennus että kaikki on kunnossa, jos oikean käyttöönoton tulokset poikkeavat simuloidusta, voidaan olettaa jossain olevan virhe ja paikallistaa se.



Käytön aikana simulaatiomallia voitaisiin käyttää suorituskyvyn arviointiin ja sen optimointiin. Mallilla voidaan simuloida erilaisia käyttötapauksia ja arvioida esimerkiksi energiankulutusta, päästöjä ja kustannuksia. Mallilla voidaan simuloida myös häiriötilanteita ja arvioida niiden vaikutuksia LNG-järjestelmän toimintaan. Tämä auttaa valmistautumaan mahdollisiin ongelmatilanteisiin ja parantamaan järjestelmän luotettavuutta. Simulaatiolla voidaan simuloida erilaisia kunnossapitotilanteita ja arvioida niiden vaikutuksia järjestelmän toimintaan ja käyttöikäen. Tämä auttaa optimoimaan kunnossapidon aikataulua ja vähentämään käyttökatkoja. Simulaatiomallia voidaan käyttää myös järjestelmän käyttöön ja ylläpitoon liittyvässä koulutuksessa. Mallilla voidaan simuloida erilaisia käyttötapauksia ja harjoitella järjestelmän käyttöä erilaisissa tilanteissa.

LNG-järjestelmän elinkaaren lopussa voidaan vieläkin hyödyntää simulaatiomallia auttamaan erinäisissä asioissa loppuunsaattamisessa. Sillä voidaan esimerkiksi arvioida järjestelmän poiston vaikutuksia ympäristöön ja taloudellisiin resursseihin. Mallilla voidaan simuloida erilaisia skenaarioita, kuten poiston vaikutuksia ilman laatuun, veden laatuun, maaperään ja asukkaiden terveyteen. Simulaatiomallia voidaan hyödyntää turvallisuuden ylläpitämisessä poiston aikana, sillä voidaan arvioida esimerkiksi poiston aikaisia riskejä ja suunnitella turvallisuustoimenpiteitä ennen poistoa ja poiston aikana. Simulaatiomallilla voitaisiin myös arvioida poiston kustannuksia ja määrittää taloudellisesti tehokkaimmat vaihtoehdot. Simulaatiomallilla voidaan suunnitella poiston toteutus ja valmistella tarvittavat työkalut, materiaalit ja resurssit ennen poistoa. Tämä auttaa vähentämään poiston aikana ilmeneviä ongelmia ja vähentämään aikaa, joka vaaditaan poistotyön suorittamiseen.

## 7 TULOKSET

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli pohtia mahdollisia käyttökohteita LNG järjestelmän simulaatiomallille, jonka Meyer Turku on tehnyt rakenteilla olevan Icon of the Seas aluksen LNG järjestelmästä. Lähtökohtana oli, että käyttöönottoon voitaisiin saada runsaasti hyödyllistä tietoa simulaatiomallin avulla. Nopeasti voidaan huomata jo muutaman esimerkin avulla, että mahdollisia käyttökohteita simulaatiomallille löytyy useampia.

Simulaatiomallin todellinen potentiaali on tässä kohtaa mahdotonta määritellä, koska sen kaikkia mahdollisia käyttökohteita ei voida mitenkään ennustaa. Mallia voidaan mahdollisesti hyödyntää koko LNG järjestelmän elinkaareen, koska se on niin tarkka kopio todellisesta järjestelmästä. Aina laitteiston suunnittelusta rakentamiseen, käyttöönoton tueksi ja tehokkuuden optimointiin, huoltotoimenpiteiden optimointi ja ennakointi sekä ongelmien ratkaisuun ja loppusijoitukseen.

Opinnäytetyöhön liittyvä alue johon haluttiin selvittää simulaatiomallin hyödyntämistä, oli käyttöönottovaihe. Käyttöönotossa suurin yksittäinen potentiaalinen käyttökohte joka havaittiin, oli kokeet joita ei voida suorittaa varustelulaiturilla. Simulaatiomallilla voitaisiin ennen koeajoa suorittaa käyttöönoton vaiheita, jotka normaalisti suoritetaan ensimmäisen kerran vasta koeajolla. Eli kaikki testit, jotka pitää suorittaa järjestelmän täydellä teholla, esimerkiksi kuormitustestit, jäähdytysjärjestelmän toiminta, ylikuormitustestaus sekä kestävyystestaus, jossa mitataan järjestelmän kestävyttä ja luotettavuutta pitkäaikaisessa käytössä.

Telakka käyttää simulointimallia myös sisäisessä testauksessa, josta voidaan havaita simulaatiomallin vähentävän käyttöönotossa käytettyä aikaa. Tämä osoittaa, että simulaatiomallin hyödyntäminen käyttöönottovaiheessa voi tuoda hyötyjä ja kustannussäästöjä.

## LÄHTEET

- ABS. (2022). American Bureau of Shipping. LNG as marine fuel. s. 5.  
<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/sustainability-whitepaper-lng-as-marine-fuel.pdf>
- AGA. (n.d.). American Gas Association. What is natural gas. Haettu 23.10.2022 osoitteesta <https://www.aga.org/natural-gas/>
- American Petroleum Institute. (n.d.). What is natural gas used for? Haettu 4.11.2022 osoitteesta <https://www.api.org/news-policy-and-issues/natural-gas-solutions/natural-gas-used>
- Butorin, A. (2019). Laivojen höyrykattiloiden huolto- ja korjaustyöt [AMK-opinnäytetyö, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu]. Theseus.  
<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019062017403>
- Cryonorm. (n.d.). LNG Vaporizers. Haettu 2.12.2022 osoitteesta <https://cryonorm.com/liquefied-natural-gas/vaporizers/>
- EIA. (2022). Energy Information Administration. Natural gas explained.  
<https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>
- Fluenta. (2019). LNG – What is it and how is it made. <https://www.fluenta.com/lng-what-is-it-and-how-is-it-made/>
- Fortum. (n.d.). The story of Apros. Haettu 28.12.2022 osoitteesta <https://www.fortum.com/media/2021/12/story-apros>
- Fortum. (n.d.). Miksi euroopan polku puhtaaseen energiaan kulkee kaasun kautta. Haettu 14.2.2023 osoitteesta <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/puhtaampi-maailma/miksi-euroopan-polku-puhtaaseen-energiaan-kulkee-kaasun-kautta>
- IBM. (n.d.). International Business Machines Corporation. What is a digital twin. Haettu 15.12.2022 osoitteesta <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>
- IHI Rotating Machinery Engineering Co. (n.d.). LNG BOG (Boil-off gas) compressor. Haettu 2.12.2022 osoitteesta <https://www.ihico.jp/compressor/en/products/reciprocating/lngbog.html>
- Karlsson, S., Högnabba T. & Kuusisaari, M. (2017). The Wärtsilä Gas Valve Unit Enclosed Design for marine applications. Wärtsilä. <https://www.wartsila.com/insights/article/the-wartsila-gas-valve-unit-enclosed-design-gvu-ed-for-marine-applications>
- Klingecorp. (2020). What is the meaning of ATEX.  
<https://klingecorp.com/blog/atex-faq-guide/>
- Marine Insight. (2019). LNG tankers – Different types and dangers involved.  
<https://www.marineinsight.com/types-of-ships/lng-tankers-different-types-and-dangers-involved/>

Marine Insight. (2021). How does LNG terminal works. <https://www.marineinsight.com/ports/how-does-lng-terminal-works/>

Marine & Offshore. (2021). Choosing the right cargo containment systems. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/insight/choosing-right-cargo-containment-systems>

Meyer Turku. (2023). Yritys. Haettu 3.2.2023 osoitteesta <https://www.meyer-turku.fi/fi/yritys/index.jsp>

National Instruments. (2022). What Is Hardware-in-the-Loop. <https://www.ni.com/fi-fi/solutions/transportation/hardware-in-the-loop/what-is-hardware-in-the-loop-.html>

Piketec. (2021). Software-in-Loop Testing. Top points to know about SIL testing. <https://piketec.com/software-in-the-loop-testing/>

Plank, T. (16.12.2019). Digital Twins: The 4 types and their characteristics. Tributech. <https://www.tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins>

Plummer, A. R. (2005). Model-in-the-Loop Testing. <https://doi.org/10.1243/09596518JSCE207>

Raita, J. (20.01.2023). Meyer Turun Machinery osaston teknisen tiimin vetäjä, Juuso Raidan, haastattelu.

Robotics Knowledgebase. (2022). Hardware-in-Loop and Software-in-Loop Testing. <https://roboticsknowledgebase.com/wiki/system-design-development/In-Loop-Testing/>

Shell. (2023). Liquefied natural gas (LNG). Haettu 15.2.2023 osoitteesta <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/liquefied-natural-gas-lng.html>

Suomen kaasuyhdistys ry. (2014). Maakaasun käsikirja. Maakaasun käsikirja - Suomen Kaasuyhdistys ry

Wärtsilä. (n.d.). Nitrogen generator. Haettu 2.12.2022 osoitteesta <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/nitrogen-generator>