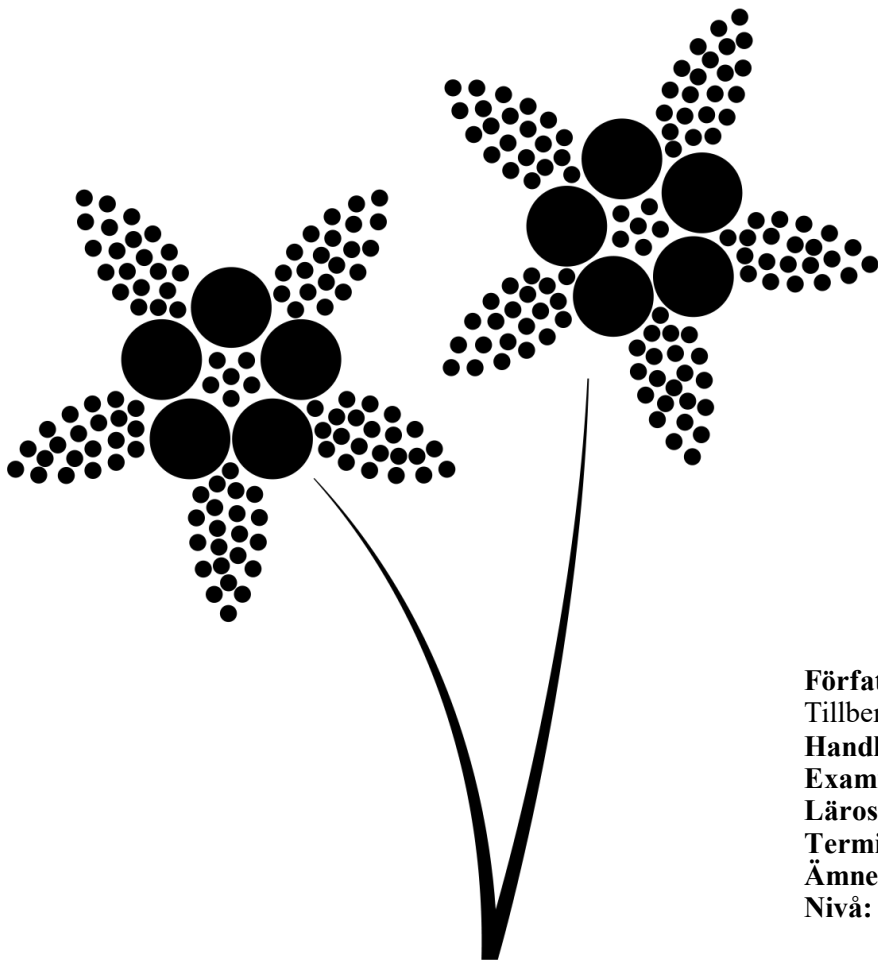


Studie om tillvaratagande av avkokad naturgas

*En fallstudie om förbättringar rörande oavsiktligt genererad
"boil-off gas" ombord ett fartyg aktivt i europeiska farvatten*



Författare: Theodor Larsson & Nisse
Tillberg

Handledare: Rolf Söderström

Examinator: Fredrik Hjorth

Lärosäte: Linnéuniversitetet

Termin: VT26

Ämne: Självständigt arbete, 1SJ51I

Nivå: Grundnivå /Kandidatarbete – 15hp.

English title

A study on utilization of boil off gas – A case study on improvements concerning unintentionally generated boil off gas onboard a ship in european waters

Abstract

This study evaluates the issues of unintended excess pressure generation inside a cryogenic storage tank aboard a Norwegian-flagged vessel following its retrofitting with an LNG-diesel hybrid propulsion system. The research focuses on three central elements: quantifying the release of greenhouse gases, identifying the root causes of the pressure build-up, and evaluating potential solutions to mitigate the environmental impact.

The findings present a comparative analysis of alternative solutions, ranked according to three criteria: environmental impact, energy retention, and economic feasibility. These solutions are critically discussed, culminating in a recommendation for the most suitable option based on the established criteria.

Nyckelord/Keywords

LNG, boil off gas, maskinteknik, effekt, generator, övertryck, dimensionering

Tack

Vi önskar här lämna ett tack till vår handledare **Rolf Söderström** som har guidat oss genom processen med detta arbete och givit feedback även bidragit med kontakter inom industrin.

Vi vill rikta ett stort tack till **Jørn Iversen** och **Jarno Häivälä** på Wärtsilä som med sin expertis har kunnat bidra med insikter inom sina respektive områden.

Vi vill också tacka vår kontaktperson och maskinist ombord fartyget vi studerat, som givit oss all den data och de fartygsritningar som vi använt oss av under skrivandet av arbete. Utan honom hade detta arbete inte kunnat genomföras.

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	3
1.1 Terminologi	3
1.2 Förkortningar	5
1.3 Avgränsning.....	6
1.4 Bakgrund.....	6
1.5 Problemformulering	8
1.6 Frågeställningar.....	8
1.7 Etiska ställningstaganden.....	8
2 METOD.....	9
2.1 Tillvägagångssätt.....	9
2.2 Metod för datainsamling	9
2.2.1 Metod för litteratursökning	10
2.2.2 Användandet av AI inom detta arbete.....	10
3 RESULTAT.....	11
3.1 Beskrivning av tekniska lösningsförslag.....	11
3.1.1 Nuvarande miljöpåverkan.....	11
3.2 Gasfackling (GCU).....	11
3.3 Gasdriven värmeenhet	13
3.4 Mikroturbin med tillhörande generator.....	14
3.5 Hjälpmotorer.....	15
3.5.1 Konvertering av existerande hjälpmotorer	15
3.5.2 Färdigställda “Gen-Set’s”.....	16
3.6 On-board “reliquefaction plant”.....	16
3.7 Ombyggnation av storage tanken.....	18
3.8 Ombyggnation av BOG-ledning	19
4 DISKUSSION	21
4.1 Utvärdering	22
4.1.1 Miljöpåverkan.....	22
4.1.2 Energitillvaratagande.....	23
4.1.3 Ekonomi	24
4.1.4 Rankning	24
4.2 Jämförelse av resultat	29
4.2.1 Resultatdiskussion.....	29
4.3 Metoddiskussion	35
4.4 För vidare studier	36
4.5 Sammanfattning	36
5 KÄLLFÖRTECKNING.....	37
5.1 Bilagor, intervjuer	38
5.2 Bilagor, fartygsdokumentation.....	38
5.3 Bilagor, prisuppgifter.....	39

Figurförteckning

Figur 1. Exempelbild på GCU med fyra fläktar i botten samt en genomskärning av förbränningskammaren. Källa: (Alfa Laval, u.å.)	13
Figur 2. Schematisk exempelbild över ett Re-Liq plant från Wärtsilä (Wärtsilä, u.å.)	17
Figur 3. Graf över tryck i tanken samt fyllnadsgrad över tiden 18 timmar vid LNG-drift.	20
Figur 4. Graf för tryck i tanken samt fyllnadsgrad över tiden 16 timmar vid MDO-drift.	20
Figur 5. Exempelbild (3D) på ett Reliq-plant Källa: (Wärtsilä, 2020)	32
Figur 6. Del av LNG-anläggning ombord, blå linje visar LNG:s (och BOG:ens) väg vid drift.	34

Tabellförteckning

Tabell 1. Bedömningskriterium för miljöpåverkan.	23
Tabell 2. Bedömningskriterium för energitillvaratagande.....	23
Tabell 3. Bedömningskriterium för omkostnader.....	24
Tabell 4. Resultat av jämförelser mellan lösningsförslagen	29

1 Inledning

1.1 Terminologi

Absoluttryck	Det totala trycket vid en mätpunkt, där även det aktuella atmosfärstrycket räknas in
Axelgenerator	En generator som är påhängd huvudmaskinen. Tänkt att leverera elektricitet till fartyget när behovet inte är så stort att hjälpkärror är nödvändiga
Calorifier	Vanlig benämning på en värmepanna, oftast tilldelad varmvatten för besättningsutrymmen ombord fartyg
Economizer	Utrustning för att tillvarata spillvärme genererad av fartygets maskiner, ofta bestående av vattenledningar lindade runt avgasrör
Greenwashing	En anglifierad term som innebär att någon, ofta ett företag, vill verka vara mer miljömedveten än vad de faktiskt är. Ofta genom att göra en åtgärd och belysa den kraftigt samtidigt som man inte nämner de baksidor som finns med ens bransch.
Huvudmaskin	Fartygets motor, dedikerad för framdrift. Vanligen kopplad till en propelleraxel via en växellåda, på denna växellåda sitter vanligen även en axelgenerator monterad.
Hjälpmotor/Gen-set	En dieselgenerator som, till skillnad från huvudmaskinen, enbart är till för att leverera elektricitet
Koldioxid (CO ₂)	En inert gas som bland annat ger upphov till växthuseffekten
Metan (CH ₄)	Brännbar naturgas, den simplaste formen av alla alkanföreningar (CH ₄).

Naturgas	Ett samlingsnamn för naturligt förekommande brännbara gaser, utgörs i industrin vanligtvis av övervägande del metan (CH ₄). Mindre delar av butan och propan kan även förekomma, men bortses oftast.
Storage tank	Ett engelskt begrepp för att benämna en förvaringstank. I denna studie rör det sig en kryogenisk tryckbehållare för flytande naturgas.
Övertryck	Alla tryck som överträffar det naturligt förekommande atmosfärstrycket

1.2 Förkortningar

BOG (English: Boil-Off Gas)	Gas som kokat från sin tidigare flytande form.
DF (English: Dual fuel)	En maskin eller motor med möjligheten att drivas med två olika bränslen. Vanligt för branschen är diesel och naturgas.
DG (English: Diesel Generator)	En dieselmotor som anslutits till en generator för att tillföra elektrisk effekt till ett elnät.
GCU (English: Gas Combustion Unit)	En brännare avsedd för att förbränna gas.
GVU (English: Gas Valve Unit)	En innesluten enhet som portionerar gas till det rätta trycket och flödet till en motor eller panna avsedd att förbränna den.
HM (English: Main Engine)	Huvudmaskin (ME)
LNG (English: Liquefied Natural Gas)	Flytande naturgas.
MDO (English: Marine Diesel Oil)	Dieseloilja, avsett för att användas i fartygs dieselmotorer.
MSB (English: Main Switchboard)	Huvudtavlan, fartygs elnät bygger vanligen på ett tre-fas system. Dessa tre faser läggs på kopparskenor inuti flera större elskåp för distribuering.
PMS (English: Power Management System)	Ett analogt eller digitalt program som kan avläsa förändringar i elnätets frekvens och kompensera för dem med generatorernas regulatorer.

1.3 Avgränsning

Detta är en fallstudie, och är därmed avgränsad till enbart ett aktuellt problem på ett specifikt fartyg.

Fartyget som är utgångspunkten för detta arbete seglar under norsk flagg med hemmahamn i Norge. Hon är klassad av DNV och registrerad som “general dry cargo ship” men har möjlighet till att flytta olika typer av last. Hon är ungefär 100 meter LOA och är ursprungligen kölsträckt kring sekelskiftet. Idag ägs hon av ett eget AS och en mindre redare står för driften.

Vid senare bedömning av potentiell implementering av teknik ombord, är det med hänsyn till just detta fartyg med dess dimensioner och eventuella begränsningar som måste tas i beaktning.

1.4 Bakgrund

Det som föranledde detta arbete var att en av författarna i samtal med en före detta kollega till densamme, f.d. kollegan hädanefter benämnd NN, blev informerad om att de ombord det fartyg hen idag arbetar på upplevde problematik ombord rörande det LNG-system som nyligen installerats där.

Installationen av detta system ombord med alla tillhörande komponenter var utfört av inhyrda entreprenörer någon gång under tidigt 2020-tal, och var på det stora hela färdigkonstruerat år 2023. Efter installationen noterades systemet ha tekniska problem som kommer att belysas ytterligare längre fram i arbetet.

Begränsningen vid installationen av detta alternativa bränslesystem med naturgas som drivmedel var att det var tänkt att enbart fartygets huvudmaskin skulle kunna köras på LNG likväl som på MDO, vilket den tidigare gjort. I dagsläget har nu alltså fartyget möjligheten att framföras både med diesel och LNG som drivmedel, men då just för framdrift av fartyget. Med andra ord så är det för närvarande enbart huvudmaskinen som har detta “dual fuel”-system.

Den huvudsakliga problematiken för fartyget i fråga är att vid förvaringen av LNG i fartygets storage tank uppstår fenomenet ”boil-off” (avkok). Denna fasomvandling från flytande till gas drivs uteslutande av termodynamik och medför en kraftig tryckökning inuti storage tanken, då ämnet i gasform kräver en mångfaldigt större volym än i vätskeform. (Alvarez, kap. 5.1.4, 2006)

Eftersom denna process sker oberoende av yttre påverkan, såsom checklistor eller procedurer, bortser detta arbete från den mänskliga faktorn för att istället fokusera på tekniska aspekter och förslag till problemlösning.

För att storage tanken inte ska utsättas för tryckökningar större än vad den är klassad för så är den utrustad med en säkerhetsventil. Denna säkerhetsventil är en helt mekanisk apparat, kortfattat så är det en backventil belastad med en fjäder som utgör ett motstånd mot ventilen. När trycket i tanken till sist överskrider motståndet från denna fjäder så öppnar ventilen och gasen kan flöda ut från tanken ända till det att trycket inuti tanken har minskat så pass mycket att fjädern överkommer trycket inifrån igen, varpå backventilen åter stänger. Detta är en mycket vanlig komponent och den återfinns överallt inom industriteknik eller liknande sammanhang.

I dagsläget så är enbart denna säkerhetsventil deras lösning till oönskad uppbyggnad av tryck i tanken, och denna ventil öppnar mot uteluften, det vill säga mot atmosfären, när trycket i tanken blir för högt.

Detta är inte bara en rent ekonomisk förlust för redaren, utan även en miljömässig förlust. Naturgas av denna typ består nästan enbart av metan, vilket har en avsevärt mycket större inverkan på den globala uppvärmningen. (SMHI, 2026)

Jämfört med CO₂ så har metan 81 gånger högre potential till växthuseffekt. (IPCC AR6, 2021)

Detta något som är värt att ta i beaktning när dessa utsläpp sker regelbundet, om än intermitterant.

1.5 Problemformulering

När man försöker att hitta kryphål i naturlagarna för att kringgå dem så följer det oftast att naturen försöker motarbeta en likvärdigt genom nyttjande av samma fysikaliska lagar och principer. Detta ger upphov till vissa problem som då måste lösas eller begränsas på bästa möjliga sätt, dessa ofta med någon slags teknik.

Att i en tank som denna kunna bibehålla dess innehåll vid en temperatur som skiljer sig cirka 200 grader Celsius jämfört med dess omgivning är ingen trivial uppgift. Denna stora temperaturdifferens ger upphov till en kraftig gradient mellan dessa två fysiskt närbelägna områden. (Alvarez, 2006, kap. 5.1.9)

Som bekant jobbar naturen outtröttligt för att uppnå jämvikt på alla sätt som finns, så det är oundvikligt att värmeenergi lyckas ta sig genom isoleringen och in i tanken med LNG.

På grund av denna kraftiga temperaturgradient är systemet särskilt benäget att vilja jämna ut denna, någonting som går fortare ju större denna gradient är. Detta beskrivs genom termodynamikens andra postulat, där det framgår vilken energimängd som överförs och med vilken hastighet och riktning detta sker. (Alvarez, 2006, kap 5.1.9)

1.6 Frågeställningar

- Vilka lösningar finns att tillgå?
- Vilken av dessa lösningar passar fartygets situation bäst? (Miljöpåverkan, energitillvaratagande, inköps- och installationskostnader)

1.7 Etiska ställningstaganden

Efter samtal med de båda tekniska cheferna ombord så framfördes en önskan från rederiets sida om att förbli anonyma. Således har författarna i samråd valt att genomgående redigera alla dokument som erhållits från fartyget för att hedra denna överenskommelse.

De intervjuer som hållits har följt etablerade riktlinjer och i samtliga av dessa har samtycke till fullständig publicering av namn, arbetsgivare och profession erhållits av vardera intervjuobjektet. Dessa intervjuer har spelats in som ljudfiler i sin helhet och därefter transkriberats för användning som referensmaterial.

Taget från Vetenskapsrådets riktlinjer för god forskningssed;
Alla uppgifter hanteras med respekt för integritet och enligt god forskningsetik. Det innebär att forskningen bedrivs ärligt, ansvarsfullt och respektfullt, med fokus på tillförlitlighet, öppenhet och hänsyn till människor och miljö, så att resultaten blir pålitliga och användbara för samhället.

2 METOD

2.1 Tillvägagångssätt

Varför det här arbetet har skrivits var ett intresse som väckts hos författarna efter att de blivit upplysta av NN om problematiken som uppkommit med BOG ombord dennes fartyg.

Ursprungligen var det den miljömässiga aspekten som berörde, och vid vidare eftertanke uppdagades även de ekonomiska samt energitekniska nackdelarna som dessa BOG-utsläpp genererade. Detta ansågs vara ett mångfacetterat problem som blivit mycket relevant i dagens samhällsklimat.

Med dessa aspekter i åtanke formulerades frågeställningar vilka är ämnade att ligga till grund för senare bedömningskriterier rörande de möjliga tekniska lösningar som finns tillgängliga.

Därefter etablerades kontakt med tekniska experter vid koncernen Wärtsilä för att i samråd med dessa systematiskt gå igenom förslagen framlagda av författarna och få information samt vägledning av dem i huruvida dessa är gångbara eller inte.

Genom att sedan studera de ritningar som hafts att tillgå genom NN, främst diagrammen över LNG-systemet, har detta givit en uppfattning om ramarna inom vilka arbetet är möjligt.

2.2 Metod för datainsamling

För att kunna göra säkra ställningstaganden gällande den eller de bäst passande lösningarna för ett problem av denna typ och på just denna skala har författarna till detta arbete beslutat att genomföra intervjuer med experter inom marin energiteknik.

För att bilda en uppfattning om främst fysikaliska tillgångar och begränsningar ombord har flertalet informella intervjuer med fartygets ena 1:e fartygsingenjör, NN, hållits. Maskinisten i fråga har bidragit med de schematiska ritningarna över deras anläggning som finns tillgängliga samt data rörande relevanta parametrar vid drift med MDO respektive LNG.

Därtill har två separata intervjuer med experter vid teknikkoncernen Wärtsilä hållits. Först en med Jørn Iversen, expert på LNG och det som kallas för "reliquification", och sedan en med Jarno Häivälä, expert på gen-sets och konvertering av dieselmotorer. Dessa intervjuer spelades in som ljudfiler och kommer att citeras ur genom följande arbete.

11-03-26, intervju med Jørn Iversen, konsult för LNG Re-Liq på Wärtsilä.

Frågor till Jørn:

- Utifrån din erfarenhet, finns det någon lösning Wärtsilä erbjuder som en lösning på problemet med överproduktion av BOG?
- Återkondenserings anläggningar: Kapacitet (ton/h), pris, fysisk storlek samt effektåtgång?

Därefter hänvisades författarna vidare till Jarno Häivälä, Wärtsilä. Han hade mycket information om maskintekniska aspekter av LNG- och BOG-drift.

Frågor till Jarno:

- Gen-sets: Vilka alternativ finns det och är några av de gångbara?
- Konvertering av redan installerade MAN motorer, är det genomförbart?

2.2.1 Metod för litteratursökning

Tillvägagångssättet för sökning efter litteratur som kunde utgöra stöttepelare till den grund problemformuleringen som arbetet bygger på var huvudsakligen sökmotorer som Google Scholar, DIVA-portal samt AI som sökverktyg efter relevanta artiklar. På databaserna användes nyckelorden operander som ”or”, ”and” och ”not” för att bredda och samtidigt begränsa resultaten för att öka relevansen.

2.2.2 Användandet av AI inom detta arbete.

Författarna har för egen integritets skull valt att avstå från användandet av AI för språk och idéframtagning.

AI-verktyg har använts en handfull gånger och dessa var bland annat vid transkribering av de båda intervjuerna. AI:ns arbete granskades i efterhand genom att intervjun lyssnades igenom manuellt ett antal gånger och korrigeringar av mindre feltranskriberingar utfördes för att säkerställa ett felritt resultat.

AI användes dessutom, som nämnts i 2.2.1, som sökverktyg för att finna relevant litteratur och forskningsartiklar.

3 RESULTAT

3.1 Beskrivning av tekniska lösningsförslag

Författarna har i samråd med tekniska experter funnit sju olika sätt att lösa den aktuella problematiken. Var och en av dessa presenterar olika möjligheter men också individuella begränsningar.

3.1.1 Nuvarande miljöpåverkan.

Den aktuella miljöpåverkan på grund av den rådande situationen ombord kan beräknas genom att ta de genomsnittliga utsläppen, som sker av säkerhetsskäl, av förgasat metan och räkna om det till "Global Warming Potential" över 20 år (GWP20) med hjälp av ett kalkylblad som erhålls av IPCC. (IPCC, 2007)

Ponera att ca 400 kg metangas dumpas till atmosfären genom storage tankens säkerhetsventil, något som vid flertalet tillfällen tidigare förekommit enligt NN i intervju.

Enligt IPCC så är GWP20 för metangas 81,2 kg CO₂e.

Således kan miljöpåverkan beräknas genom att multiplicera 400 kg med faktorn 81,2 som ger resultatet 32 480, vilket är ett jämförbart värde för senare analys.

Detta ger ett referensvärde för största möjliga miljöpåverkan. Med det som grund kan ställningstaganden gällande värden på utsläpp genom andra tekniker sedan göras.

3.2 Gasfackling (GCU)

Från en intervju med Jørn Iversen, låg inköpskostnad och enkel installation.

En GCU består av en förbränningskammare i en avlång cylindrisk form som i ovkant är öppen mot atmosfären. I nedkant av den långa kammaren så matas GCU:n av en eller flera elektriska fläktar som trycker stora mängder luft från botten av GCU:n upp genom förbränningskammaren och sedermera ut genom toppen av densamma. Ungefär halvvägs upp genom cylindern, i början av vad som kan kallas förbränningskammaren så finns ett munstycke genom vilken BOG leds för förbränning. (Alfa Laval, u.å.)

Förenklat uttryckt är det en eldstad där BOG kan förbrännas, vilket reducerar dess miljöpåverkan till så gott som bara CO₂.

Detta är en utrustning som är mycket enkel att använda, i och med att man som operatör enbart behöver starta fläktarna, öppna för gasflöde och tända en pilotlåga av något slag, exempelvis en elektrisk urladdning hade varit lämplig för att åstadkomma en fortsatt förbränning.

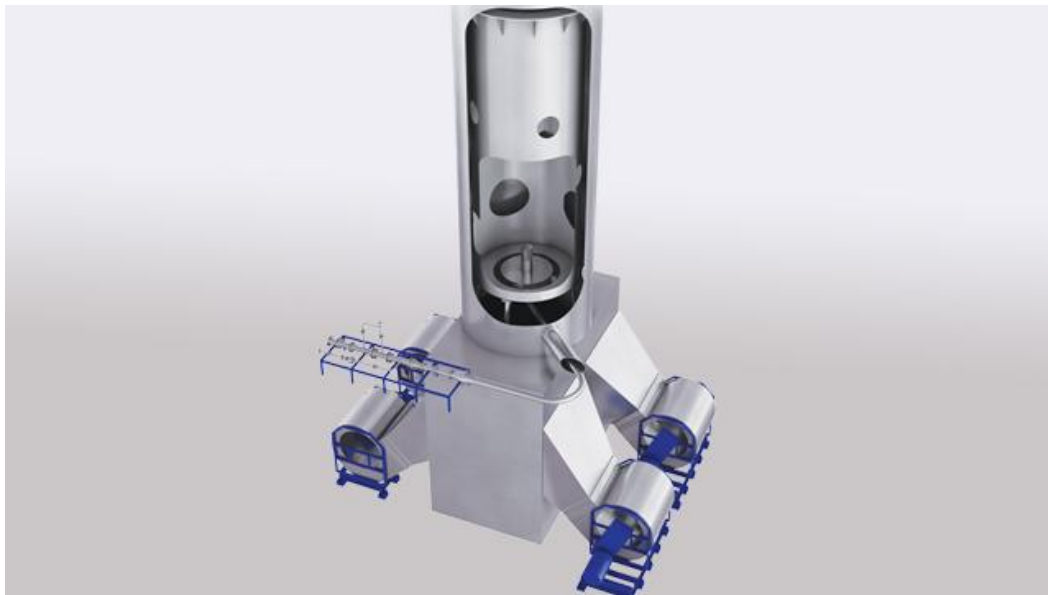
Det är även enkelt att åstadkomma en mycket god stökiometrisk förbränning genom att med en lambdasond placerad i GCU:n som kontinuerligt mäter och kompenserar för det aktuella avgasvärdet genom att justera luft/bränsleblandningen som tillförs. Detta är dessutom något som kan skötas per automatik, vilket det då även gör.

Något som talar för en installation av detta slag är de relativt låga materialkostnaderna och enkelheten att implementera tekniken. Allt som då krävs för att få något sådant på plats är att om utrymme nog finns i fartygets skorsten. Därtill så kan en GCU startas och stängas av nära på omedelbart, vilket är tacksamt om man exempelvis inte kan upprätthålla ett tillräckligt gasflöde över en längre tid.

Något annat som talar för denna teknik är som nämntes förmågan att med enkelhet justera förbränningen till en närmast perfekt sådan, med minimala utsläpp av oförbränd naturgas, även kallat *slip*. De miljömässiga vinsterna är nämnvärda i och med den massiva växthuseffekten som naturgas har förmågan att orsaka.

Om man ser till kommersiellt tillgängliga GCU:er så levererar exempelvis Alfa Laval sådana med en enkel förbränningskammare som är designad för gasflöden på 1000–3000 kg/h. Denna är dessvärre alldeles för stor både till dess fysiska dimensioner men även sett till det genomsnittliga gasflödet som skulle genereras ombord.

En annan leverantör är Saacke, som erbjuder större variation på mindre skalor. De har exempelvis en de kallar för GCU 40 som är ett mycket attraktivt alternativ. Denna typ bränner i området 400 kg/h, vilket är mer i linje med vad omständigheterna kräver. Med en storlek på 5,8 x 3,5 x 11 m så är det mer tänkbart att denna skulle kunna inkorporeras inom ramarna för fartyget. (Saacke, u.å.)



Figur 1. Exempelbild på GCU med fyra fläktar i botten samt en genomskärning av förbränningskammaren. Källa: (Alfa Laval, u.å.)

3.3 Gasdriven värmeenhet

En annan tänkbar hantering av BOG:en skulle vara att fartygets calorifier eller economizer antingen konverteras så att gasen kan acceptera till dess förbränningskammare, alternativt att en ny sådan som har den förmågan installeras i dess ställe.

Detta är en behändig apparatur som alla maskinister redan är välbekanta med, och som då skulle kräva begränsad vidareutbildning för att kunna användas felfritt av operatörerna på plats.

Fördelar med en gasdriven värmeenhet är dess renlighet enligt samma princip gällande god stökiometrisk blandning som togs upp när GCU:n avhandlades i föregående delkapitel. Med ett par lambdasonder samt simpel och lättillgänglig automatik kan luft- och bränsleflöden regleras i realtid för att konstant bibehålla en nära perfekt förbränning, resulterande i emissioner bestående enbart av, praktiskt taget, koldioxid och vattenånga.

Därtill så är även här kraven på specifika tryck och flöden inte alls lika relevanta för korrekt drift, i och med att den inte har några rörliga delar vars tröghetsmoment måste överkommas.

Med en gaseldad värmeenhet så tillkommer en annan fördel, det faktum att syftet med en sådan är att försöka maximera tillvaratagandet av värmen skapad av förbränningen inom dess väggar. Uppvärmning av vatten är en tacksam process då vatten har en mycket god värmekapacitet, alltså förmåga att ta upp, lagra samt avge värmeenergi och är utmärkt för att transmitta denna. Dessa fysikaliska egenskaper, ihop med den slutna konstruktionen

av enheterna, ger dem en mycket god verkningsgrad vilket gör dem attraktiva vad det gäller tillvaratagande av energi som annars går förlorad med den dumpade naturgasen.

Dessa värmeenheter kommer också utrustade med elektriska värme som per automatik kan ta över upphettningen av vattnet, skulle gasflödet avta till den grad att adekvat förbränning tillfälligt inte längre kan upprätthållas. På så vis skulle aldrig några avbrott i uppvärmningen aldrig noteras av förbrukarna ombord utan skulle enbart påvisas med att en annan lampa tänds på dess kontrollpanel.

En enhet av detta slag är också ekonomiskt försvarbar. De är kostnadseffektiva och inte särskilt dyra i inköp, skulle det visa sig att det vore för komplicerat att konvertera den nuvarande och därmed tvunget att ersättas med en kompatibel enhet.

3.4 Mikroturbin med tillhörande generator.

Ett annat sätt att tillvarata den energi som går förlorad genom utsläppen av BOG är att dirigera den till en mindre gasturbin som, kopplad till en generator, skulle kunna generera elektricitet till fartyget. Detta antingen genom en egen sektion förbrukare alternativt kopplad så att den kan fasa in på MSB via fartygets PMS.

Fördelen med en mikroturbin är att det med hjälp av tryckluft går snabbt att spola upp den till drifhastighet, då både avgasturbin- och kompressorhjul är relativt lätta komponenter. En gasturbin är också attraktiv då dess vikt/effekt-förhållande överträffar den av en traditionell kolvmotor flera gånger om.

Däremot så är själva mikroturbinen en relativt komplex enhet och kan därmed innebära en högre inköpskostnad än vad en del rederier är bekväma med, samt en viss fortbildning av de operatörer vars uppgift driften och framtida underhåll av densamma kommer att vara.

De snabba framstegen inom reglerteknik och elektronisk styrning möjliggör att i mikroturbiner kan lämnas oövervakade då de kan starta samt fasa sig själva till ett elnät automatiskt. De har även en stor fördel då de kan drivas på en rad olika typer av bränslen, såsom diesel, bensin, fotogen samt olika typer av brännbara gaser vilket gör den relevant för detta projekt. (Noroozian & Asgharian, 2017)

Eftersom det redan finns ett batteripaket installerade ombord är det en teoretisk möjlighet att förbipassera fartygets MSB och i stället via en egen uppsättning likriktare förse detta batteripack med elektricitet. Denna lösning är enklare rent tekniskt sätt i och med att det potentiellt ger förmågan att undgå inkorporering i PMS:en, något som kräver extern specialkompetens och därmed givetvis också innebär en kostnad för rederiet.

Alternativet till detta, där möjligheten att fasa in denna nya generator på MSB:n, är att med denna i drift så kan antingen en eller båda hjälpkärrorna ställas i viloläge, *stand-by*.

En mikroturbin som drivs på BOG när den körs ihop med huvudmaskinens SG, vilken drivs indirekt av LNG:n via växel på huvudmaskinen, skulle teoretiskt kunna erbjuda tillräcklig försörjning av elektricitet till fartygets alla nödvändiga funktioner.

Detta med förbehåll för att det skulle ske när fartyget befinner sig i "Sea Mode", det vill säga när kraven på manöverförmåga inte är lika strikta som i hamnar eller kustnära områden.

3.5 Hjälpmotorer

Moderna dieselmotorer har verkningsgrader som sällan överstiger 50%. Data som 45-48% är till stor del accepterat som det vanligaste förekommande. (Stålhammar et al., 2011, s.22)

Detta betyder att motorn kan bara tillgodogöra sig hälften av den energi som tillförs den i form av drivmedel.

Efter intervjun med Jørn Iversen upprättades kontakt med Jarno Häivälä, systemutvecklare och expert inom DF-konverteringar av existerande dieselmotorer för koncernen Wärtsilä. Denna kontakt gav en mängd information. I en dikterad intervju genomförd 23-03-2026 diskuterades följande:

3.5.1 Konvertering av existerande hjälpmotorer

För tillfället så är det enbart huvudmaskinen som är konverterad till att acceptera både LNG och BOG, vilket då innebär att fartygets två hjälpkärror (AE/DG) går på traditionell fartygsdiesel (MDO).

Dessa två hjälpkärror ombord är av typen MAN D2866 LXE och har potentialen att vid märkdrift leverera 425 kW vardera. Efter efterforskning har inte någon konverteringsmöjlighet för MAN motorer hittats, de erbjuder däremot nya motorer som är gjorda för gasdrift.

3.5.2 Färdigställda “Gen-Set’s”

Ett alternativt tillvägagångssätt för att kunna förbruka den överflödiga naturgasen skulle kunna vara införskaffning av ett så kallat “Gen-Set”, en komplett modul innehållande både generator för elproduktion samt ställverk för frammatning av effekten som levereras.

Efter sökningar på MAN:s hemsida så fann författarna en DF DG med rätt axe-effekt att tillgå. Denna heter MAN E3262 och levererar en effekt på 450 kW. (MAN, 2026)

Även Wärtsilä levererar färdiga gen-sets för gasdrift. Dessa finns i olika fysiska storlekar med olika alternativ av drivmedel och med möjligheten att leverera olika mycket effekt. Den minsta gas-diesel hybrid generatoren i deras produktkatalog är en 6L20DF på 1100 kW. Dessa säljs som kompletta enheter, med eller utan generator, vilket gör att man måste finna en som uppfyller alla de krav som kommer av de specifika förutsättningarna i denna fallstudie. (Wärtsilä, 2026)

3.6 On-board “reliquefaction plant”

Denna teknik öppnar upp för möjligheten att genom en samling aggregat ändra den avkokade naturgasens aggregationstillstånd åter till flytande form, och därefter samla denna kondenserade LNG och leda tillbaka den antingen till den ursprungliga storage tanken, till mixing-tanken, eller så kanske det visar sig att bägge retrurrör är gångbara alternativ.

Vid begynnelsen av detta arbete var det just insikten om denna tekniks existens som blev gnistan vilken tände författarnas intresse för förmågan att inte bara utvinna varenda joule av energi ur den flyktiga naturgasen, utan att genom tekniska lösningar återföra den till sin, i detta falls, ursprungliga flytande form.

Vad som syftas till här är en teknik som kallas för *”Reliquification”*.

Vad ett sådant här “reliq-plant” gör är att samla in BOG och sedan leda den genom ett antal värmeväxlare i vilka kvävgas expanderas på ena sidan av plattorna i värmeväxlaren. Detta gör att temperaturen däri sjunker avsevärt och när BOG:en leds förbi den andra sidan av plattorna så kyls den ner avsevärt.

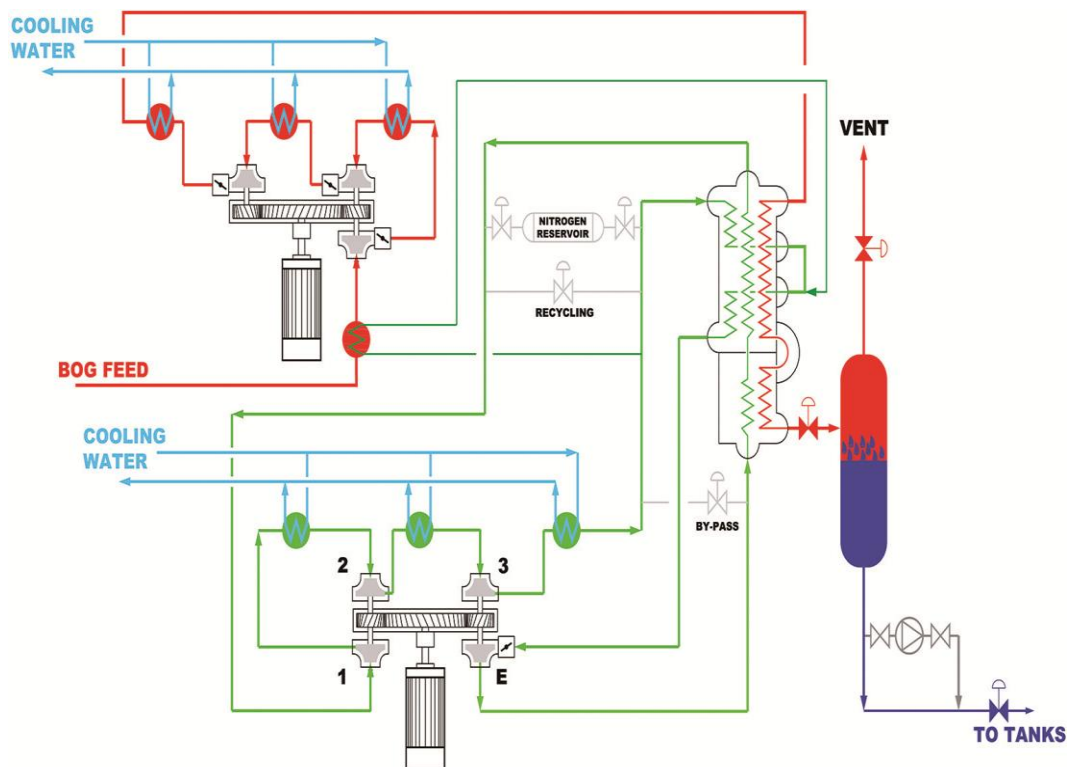
Om denna process upprepas ett antal gånger så kommer till sist BOG:en att nå den kritiska temperaturen vid vilken metan kondenserar och åter blir till LNG.

Processen består av en eller flera BOG-kompressorer drivna av traditionella elmotorer. Efter vardera kompressionssteg så kyls den komprimerade BOG:en med kylvatten innan den leds till nästa kompressor.

I en angränsande del av ReLiq-plantet återfinns ytterligare en eller flera kompressorer och vattenkylda värmeväxlare, men skillnaden är att i dessa så komprimeras istället kvävgas (N₂). Denna komprimerade kvävgas är nyckeln till att återfå den kryogeniska temperatur vid vilken metanet kondenserar.

Dessa två ledningar, vardera fylld med de två olika gaserna i sina komprimerade stadier, möts sedan i en separat värmeväxlare, kallad coldbox, där BOG leds in i ovankant på ena sidan kylplattorna och N₂ leds in i nederkant på andra sidan kylplattorna genom en expansionsventil.

Detta ger till slut den efterfrågade kondenseringen av BOG:en, och i nederkant av BOG-sidan så kan sedermera återskapad LNG ledas via en backventil till en reservoar från vilken LNG:n kan pumpas tillbaka till fartygets storage tank, alternativt till förgasarenheten.



Figur 2. Schematisk exempelbild över ett Re-Liq plant från Wärtsilä (Wärtsilä, u.å.)

Det ska nämnas att utrustning av denna typ vanligtvis kräver en hel del utrymme för att inte vara för skrymmande och för att operatörer ska ha förmågan att kunna utföra underhållsarbete på anläggningen.

Det ingår även en hel del kringutrustning såsom temperatursensorer och pressostater, för att inte tala om all elektronik som skall integreras för att enheten ska kunna arbeta optimalt.

En enhet av den här komplexiteten kräver även fortbildning av maskinisterna ombord. Detta är i sig inget hinder för implementering av reliquification, men det är dock en aspekt som måste belysas.

Därtill kan man hypotisera om energiåtgången som krävs, inte bara för att driva de två separata flerstegskompressorerna, utan då även pumparna som skall föra kylvatten genom alla värmeväxlare samt pumpen vars funktion är att transportera återskapad LNG till storage tanken.

3.7 Ombyggnation av storage tanken

En bidragande faktor till att storage tanken inte klarar av att hålla naturgasen flytande tänkas vara att tankens konstruktion är undermålig.

Det finns flera eventuella källor och typer av felkonstruktion. Det kan vara att isoleringen är undermålig eller att utrustning placerad i tanken tillför värme till vätskan (tex pumpar). Bägge dessa leder i sin tur till att ångtrycket stiger och vätskan kokar av i en högre hastighet än vad fartyget kan tillvarata den.

Allt eftersom nivån i tanken sjunker, ju mindre massa kvarvarande vätska finns att absorbera värmeenergi.

$$Q = mcT \rightarrow m = \frac{Q}{cT} \rightarrow 2m = \frac{2Q}{cT}$$

Där Q är värmeenergi, m är massan, c är specifika värmekapaciteten för ämnet och T representerar temperaturen. (Fagergren, 2021, s. 42)

Efter granskning av tankens schematiska ritningar uppdagades att konstruktörerna har placerat bägge supply-pumparna för gasdrift av huvudmaskinen inuti storage tanken. Dessa pumpar är sedvanliga centrifugalpumpar på 1,8 kW vardera med en elektronisk interlock vars funktion är att säkerställa att enbart en av pumparna kan köras åt gången.

Med en total verkningsgrad på ca 65-70% innebär detta att varje sekund en av dessa pumpar är i drift så utsöndrar de 500-600W av värmeenergi. (Baxter, 2023)

Detta är inget ovanligt i sig, då man ofta väljer att göra på detta vis på större så kallade LNG-tankers. Dessa fartyg är dock designade för att transportera naturgas till andra distributörer och konsumenter, inte för egen förbrukning, vilket då innebär att dessa

innefattar avsevärt mycket större volymer av LNG än vad som är aktuellt för studieobjektet i fråga.

I det aktuella fallet däremot blir denna tillförda värmeenergi till en relativt liten tank troligtvis mer av en väsentlig faktor.

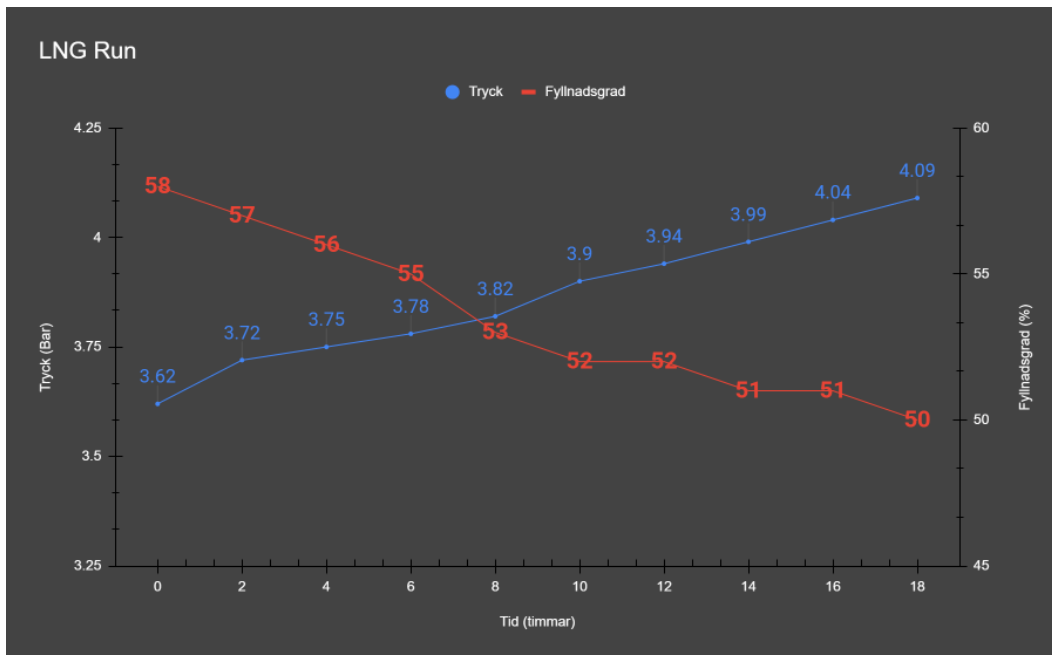
3.8 Ombyggnation av BOG-ledning

På nästa sida visas två grafer baserade på verkliga data från fartyget, erhållen av NN, som beskriver trycket i storage tanken och nivån i densamma. Den första gäller under LNG-drift och den andra gäller för drift med MDO.

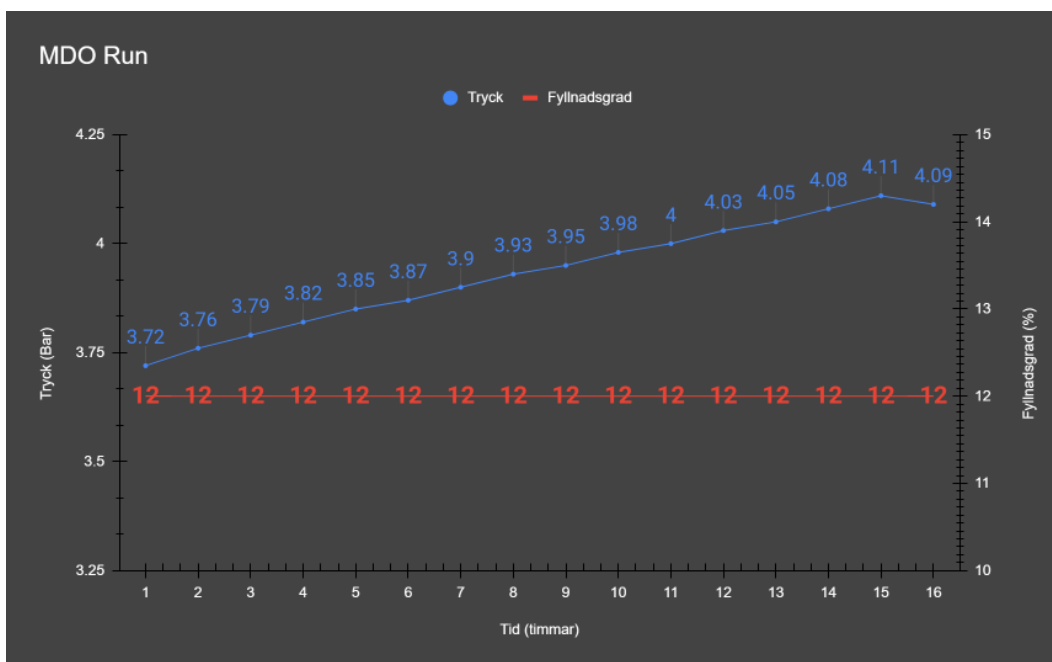
Dessa påvisar bägge två en påtaglig tryckökning i tanken oavsett vilket bränsle huvudmaskinen körs på.

Då det genom intervju med NN även har framgått att det inte går att lägga nämnvärd last på maskinen vid BOG-drift så följer det att det troligen krävs ett rör med grövre innerdiameter för att kunna producera en högre effekt.

Detta skulle då leda till större konsumtion av BOG och därmed till viss del neutralisera det övertryck som byggs upp i tanken.



Figur 3. Graf över tryck i tanken samt fyllnadsgrad över tiden 18 timmar vid LNG-drift.



Figur 4. Graf för tryck i tanken samt fyllnadsgrad över tiden 16 timmar vid MDO-drift.

I Figur 4, ovan, kan tryckökning utläsas trots att nivån LNG i tanken förblir densamma. Detta beror på att nivåskillnaden är för liten för att ge ett utslag på nivågivaren. Bakgrunden till detta är att gasen har en mångfaldigt lägre densitet än vätskan.

4 DISKUSSION

Vid fastställande av vilket av ovanstående beskrivna alternativ som skulle vara praktiskt tillämpbart så kommer alla inblandade i beslutsfattningen ha vitt skilda åsikter om den optimala lösningen och således även om vägen dit.

En ambitiös samling tekniker och ingenjörer med carte blanche att enligt egen devis ta sig an utmaningen har, som beskrivits, åtskilliga möjligheter vid sina fingerspetsar.

Hade man kunnat bortse de fysiska begränsningarna som fartygskonstruktionen i sig innebär, skulle ett kompetent arbetslag utan tvivel kunna genomföra vilket som helst av i resultatdelen nämnda alternativ.

Sett ur redarens perspektiv så rör med säkerhet den första frågan som ställs de direkta utgifterna som inköp av ny utrustning och den medföljande ombyggnationen som dess installation kommer innebära.

Den andra frågan som kommer att myntas rör den andra aspekten av installationen, vilken är omfattningen av en eventuell ombyggnation. Denna tillkommande kostnad beror på hur lång tid arbetet kommer ta, hur många arbetare som kommer krävas, och det materiel som då går åt.

Objektet för studien är som tidigare nämnts från sekelskiftet, vilket gör henne runt 30 år gammal, och enligt europeisk standard får hon därmed kallas för ett äldre fartyg. När det gäller ombyggnationer av äldre fartyg så måste då den aktuella nytto/kostnadsanalys som presenteras alltså tydligt tala fördelaktigt för redaren om det föreslagna projektet ska få fortlöpa.

En kostnadsanalys som påvisar en ekonomisk förlust i någon utsträckning skulle med största säkerhet sätta alla planer enligt det spåret i sank.

Vad gäller alternativa vinningar än ekonomiska skulle kunna vara en stämpel om miljömedvetenhet, något som rederiet eventuellt skulle finna tilltalande.

Att exempelvis tillvarata BOG alternativt fackla av den istället för att dumpa den ut i luften skulle ge rederiet en möjlighet att påpeka deras omtanke om omvärlden på deras hemsida samt måla hela fartygssidan med budskap om just denna omtanke, i enlighet med hur en del andra rederier valt att göra.

4.1 Utvärdering

För att kritiskt granska vilken av de föreslagna lösningsalternativen som bäst lämpar sig för fartyget i fråga har författarna valt att göra en analys baserad på tre kriterier. Dessa tre rankas och bedöms i ett trepoängssystem för att då på ett konkret sätt påvisa vilken av lösningarna som erbjuder bäst prestanda inom valda kriteriet. Högre poäng är att tolka som mindre fördelaktigt. Efter de sju alternativen fått sina tre poäng så adderas dem.

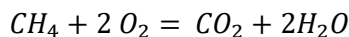
Kriterierna (4.1.1-4.1.3) ämnar besvara den andra frågeställningen.

4.1.1 Miljöpåverkan

Som nämnt i kapitlet ”3.1.1 Nuvarande miljöpåverkan” så släpper fartyget ut motsvarande 32 480 kg CO₂ i form av ren metangas vid varje dumpning som följd av övertryck i tanken. Författarna har här valt att enbart se till hur mycket påverkan utsläppet och/eller förbränningen av metanet skulle ha motsvarat i CO₂.

Grundläggande beräkning.

När rankning görs för förbrännande maskiner kommer förbränningsförloppen anses som ideella, det vill säga fullkomlig förbränning enligt följande kemiska balansformel:



Med denna balansuppställning tas molmassorna fram på följande vis med hjälp av det periodiska systemet:

Molmassa för CH₄:

$$C + (4 * H) = 12 + (4 * 1.008) = 16.032 \text{ g/mol}$$

Molmassa för 2 O₂:

$$2 * (O * 2) = 2 * (16 * 2) = 64 \text{ g/mol}$$

Molmassa för CO₂:

$$C + (O * 2) = 12 + (16 * 2) = 44 \text{ g/mol}$$

Molmassa för 2 H₂O:

$$2 * ((H * 2) + O) = 2 * ((1.008 * 2) + 16) = 36.032 \text{ g/mol}$$

(Fagergren, 2021, s.62)

För att beräkna miljöpåverkan på ett smidigt sätt är det intressant att erhålla ett förhållande mellan massan tillförd **CH₄** och frigjord **CO₂**. Detta görs genom en division av koldioxidens molmassa med metanets molmassa:

Molmassa för CO₂ dividerad med molmassan för CH₄:

$$\frac{44}{16.032} = 2.74$$

Resultatet av denna division blir ett sortlöst förhållande mellan förbränd metangas och restprodukten och växthusgasen koldioxid. Notera att detta är fullkomlig förbränning, vilket i stort sett aldrig förekommer i verkligheten. (Jernkontorets energihandbok, u.å.)

Bedömningskriterium

Siffran	1	2	3
Gränsvärde (kg CO ₂ e)	0	0<1096	1096<32 480

Tabell 1. Bedömningskriterium för miljöpåverkan.

Anledningen till att gränsvärdet 1096 är så specifikt är att en dumpning av övertryck innehåller ca 400 kg metan, vilket multiplicerat med förhållanden 2.74 från balansformeln ger oss 1096 kg CO₂ vid en fullkomlig förbränning.

4.1.2 Energitillvaratagande.

För att bedöma energitillvaratagandet av lösningarna sätts enheten genom följande resonemang:

$$\frac{\text{Tillvaratagen energi}}{\text{Tillförd energi}} = \frac{\left(\frac{kWh (\text{Tillvaratagen})}{3600} \right)}{\left(\frac{kWh (\text{CH}_4 \text{ tillförd})}{3600} \right)} = \frac{kW}{kW} = \eta_{\text{Tillvaratagande}}$$

(Fagergren, 2021, s.87)

Detta ger en verkningsgrad ($\eta_{\text{Tillvaratagande}}$) som uttrycks i procent. Lösningarnas verkningsgrader ställs sedan mot denna räkning:

Siffran	1	2	3
Gränsvärde ($\eta_{\text{Tillvaratagande}}$)	>50%	50-0%	0%

Tabell 2. Bedömningskriterium för energitillvaratagande.

4.1.3 Ekonomi

(Inköp + installation)

Då en mängd ekonomiska data är svår till omöjlig att komma över för andra aktörer än varv och redare så kommer det spekuleras kring inköpskostnader av utrustning där ekonomiska data inte är allmän kändedom.

Siffran	1	2	3
Gränsvärde (kEUR)	0–100	100–500	>500

Tabell 3. Bedömningskriterium för omkostnader.

4.1.4 Rankning

Nedan genomförs rankningen av lösningarna som presenterats i arbetet.

4.1.4.1 GCU

Miljöpåverkan: 2

Enligt tillverkaren Saacke har deras GCU ingen slip, vilket innebär att allt bränsle som tillförs brännkammaren förbränns utan att fritt metan passerar obehindrat, vilket betyder att all gas som tillförs i detta arbetes fall blir till CO₂ enligt balansformeln i 4.1.1.

Energitillvaratagande: 3

Eftersom en GCU enbart är en brännkammare utan tillvaratagande av värmen så blir dess energitillvaratagande 0%.

Ekonomi: 3

Författarna spekulerar att inköp av en GCU med installationskostnad på varv kommer kosta en bit över 500 kEUR. Anledningen till att siffran kan uppfattas väl tilltagen är att skorstenen och akterskeppet måste byggas om för att ackommodera enheten, vilket placerar den i rank 3 på ekonomi.

4.1.4.2 Calorifier

Miljöpåverkan: 2

Då det rör sig om gaseldad värmepanna bedöms förbränningen vara fullständig, vilket resulterar i rankning 2.

Energitillvaratagande: 1

Eftersom värmen från förbränningen översätts till temperaturökning av vattnet så bedöms energitillvaratagandet vara upp till 90%, dvs rankning 1. (CEA, 2021, s.12)

Ekonomi: 2

Författarna spekulerar omkostnaden för inköp och installation samt tillbyggnation av rörssystem för tillförsel av gas till placering i rank 2.

4.1.4.3 Mikroturbin

Miljöpåverkan: 2

Då förbränningar har bestämts anses som fullständiga, placeras mikroturbiner avsedda för gas i rank 2.

Energitillvaratagande: 2

Moderna mikroturbiner i storleksklassen som arbetet åberopar har en verkningsgrad strax över 30%. (Noroozian & Asgharian, 2017, s.185). Detta placerar dem i rank 2.

Ekonomi: 2

Vid eftersökning av begagnat pris så hittades en enhet som gick för \$85 000 USD \approx 73 kEUR (valutakonvertering våren 2026). Lägg därtill installationskostnader så hamnar omkostnaden troligen över 100 kEUR. Det kommer bli dyrare om man ska ha en mikroturbin med SOLAS- och DNV-certifikat. Lägg därtill att den som nämns ovan är begagnad, vilket med stor sannolikhet skulle göra en ny enhet mer kostsam. För en begagnad enhet så placeras denna lösning i rank 2. En ny enhet skulle troligen placera den i rank 3.

4.1.4.4 Gen-sets

Miljöpåverkan: 2

Som tidigare nämnt; fullständig förbränning medför rank 2.

Energitillvaratagande: 2

Moderna förbränningsmotorer, dieselmotorer inräknade, når sällan en högre verkningsgrad än 48%. Rank 2.

Ekonomi: 3

I intervju med J. Häivälä framkom att riktpolis för en ny generator med tillhörande motor från koncernen Wärtsilä hamnar på ungefär 70- 80 kEUR per cylinder. Det leder till ett lägsta enhetspris på 420 kEUR (räknat på en Wärtilä 6L20DF).

I ”Bilaga 1” återfinns exempel på omkostnaden för en begagnad gasmotor från MAN, dock kommer mer omkostnader tillkomma än inköpspriset. Rank 3.

4.1.4.5 Re-Liq

Miljöpåverkan: 1

Eftersom återkondensering och återledning av kondenserad gas inte leder till direkta utsläpp av växthusgaser från anläggningen placeras den i rank 1.

Energitillvaratagande: 1

Då all BOG som tillkommit från avkokningen kondenseras och återförs till processen bedöms denna lösning tillvarata 100% av den gas som annars har gått förlorad, vilket placerar den i rank 1.

Ekonomi: 3

I intervju med J. Iversen framkom omkostnad för deras minsta Re-Liq (1 MW) till 4 500 kEUR. Detta är avsevärt dyrare än de andra lösningarna sammanslagna och detta resulterar i rank 3.

4.1.4.6 Ombyggnation av storage tanken.

Miljöpåverkan: 1

Då det har styrkts att tryckökningen i tanken vid LNG-drift sannolikt beror på supply-pumparnas placering skulle det vara intressant att vid varvsbesök flytta befintliga pumpar till utanför tanken. Förutsatt att detta minimerar problemet med avkokning placeras detta alternativ i rank 1.

Energitillvaratagande: 1

Likvärdigt Re-Liq så skulle förflyttningen av pumparna leda till att förlusten av gas upphör, i detta fall skulle avkoket i stort sett upphöra totalt. Detta placerar lösningen i rank 1.

Ekonomi: 2

Detta skulle troligen lösas på ett varv av inhyrda specialister, vilka kommer att utgöra en kostnad. Då pumparna eventuellt också måste bytas ut ihop med sina drivande motorer skulle omkostnaden för inköp och installation kunna överstiga 100 kEUR. Detta placerar lösningen i rank 2.

4.1.4.7 Ombyggnation av BOG-ledning.

Miljöpåverkan: 1

Likvärdig följd som att flytta pumparna, med skillnaden att tryckökning fortsatt kommer vara ett problem men som avhjälps av förhöjt belastningstak vid BOG- drift, vilket enligt beräkningar skulle tillåta att fartyget gör maximalt effektuttag och då fungera som en sänkning av trycket i tanken då ett för högt tryck råder. Detta placerar lösningen i rank 1.

Energitillvaratagande: 1

Då all avkokad gas i och med detta ledas till maskinen och göra nytta i form av framdrift följer att ingen gas skulle gå förlorad, därför hamnar den i rank 1.

Ekonomi: 1

Några meter rostfria, isolerade och godkända rör med böjar, ventiler och tryckvakter är så pass okomplicerat att genomföra att ombordvarande anställda kan lösa uppgiften att byta röret. Omkostnad för inköp av allt detta plus merdetaljer bedöms vara under 100 kEUR. Därav rank 1.

4.2 Jämförelse av resultat

Tabellen nedan presenterar resultaten av utvärderingen där låg totalsiffra är förknippat med att uppfylla kriterierna på bästa sätt.

Lösning	Miljöpåverkan	Energitillvaratagande	Ekonomi	TOTAL
BOG-ledning	1	1	1	3
Storage tank	1	1	2	4
Calorifier	2	1	2	5
Re-Liq	1	1	3	5
Mikroturbin	2	2	2	6
Gen-Sets	2	2	3	7
GCU	2	3	3	8

Tabell 4. Resultat av jämförelser mellan lösningförslagen

4.2.1 Resultatdiskussion

De efterforskningar som gjorts om vilken teknik som finns tillgänglig på marknaden har varit mycket lärorik. I början av undersökningen när ramarna för arbetet tog form fanns det en tydlig optimism hos författarna, med stora ambitioner och högt flygande tankar om vad som skulle kunna åstadkommas.

Denna optimism har dock under efterforskningar successivt mattats av mer och mer.

3.2 Marknaden erbjuder flera olika enheter för att genomföra gasfackling ombord. Det faktum att dessa finns tillgängliga i flertalet dimensioner öppnar för möjligheten till implementering av en sådan ombord. Exempelvis så saluför både Alfa Laval och Wärtsilä flera olika GCU:er, men efterforskningar kring dessa visade att inga av dem var dimensionerade för mängden BOG som är aktuell i denna studie.

Däremot finns det en leverantör som erbjuder en GCU som uppfyller kraven satta av våra omständigheter. Företaget Saacke säljer en GCU som de kallar för GCU EVO 40 och anledningen till att denna anses attraktiv är att den är designad för drift inom ramarna av den mängd BOG som produceras ombord. Saackes produktblad och hemsida utlovar dessutom att den följer alla riktlinjer satta av IMO och ska även vara godkänd av klassningssällskap.

Denna variant förbrukar enligt utsago 400 kg metan per drifttimme, vilket gör att vardera sekvens av gasfackling med en sådan skulle ta ungefär en timme att genomföra ombord fartyget i fråga.

Storleksmässigt så är enhetens area vid basen 3,4 x 5,8 meter med en totalhöjd på 10,3 meter. Av denna höjd utgör förbränningskammare och avgasrör 7,4 meter. Enhetens vikt uppgår sammanlagt till 30 ton med alla komponenter inräknade.

Det klargjordes dock av NN att det inte finns i närheten av den plats som krävs för att installera denna ombord, då fartygets skorsten redan är fylld till brädden med annan utrustning som är nödvändig för driften. Det var enligt honom inte heller tänkbart att placera denna ut på däck.

3.3 Fartygets calorifierier saknar helt brännkammare utan värms enbart med elpatron, som de flesta sådana gör på fartyg med liten besättning och utan passagerare. Det går helt enkelt inte åt de mängderna varmvatten som gör att calorifier med brännkammare skulle vara en försvarbar installation.

Fartygets economizer däremot är, som sig oftast är, vattenledningar som omsluter avgasrören. Economizern har dessutom en elpatron som kopplas in automatiskt om avgastemperaturen skulle vara för låg för att bibehålla värmebehovet. Denna sitter i anslutning till det övriga systemet.

Det faktum att det redan finns en back-up på det systemet, som dessutom är fysiskt frångående från den huvudsakliga värmekällan gör det komplext att dra ytterligare rörledningar och skulle inte heller vara lätt att få till en specialbyggd "efterbrännkammare" med BOG-ledningar in innan economizern i ett väldigt varmt avgasrör, som skulle kännas driftsäker nog för operatörerna ombord.

Det skulle helt enkelt ta för lång tid att få detta gjort på nästa varvsbesök, och det faktum att den skulle behöva vara specialbyggd skulle göra det svårare att få den godkänd av klassningssällskapet.

Detta enligt NN.

3.4 Mikroturbin är en väldigt lovande teknik på de flesta fronter, däremot har de en stor nackdel och det är att de inte tål större, snabba belastningsändringar. Det blir speciellt känsligt med en mikroturbin då den har mindre roterande massa och inte heller en stor och tung växellåda, vilket innebär ett mindre roterande massa, *tröghetsmoment*, och därav direkt en mindre kapacitet för laständringar.

Detta gör den olämplig för ändamålet då fartyg har pumpar och andra elmotorer som startar och stoppar utan upp- eller nedrampning, vilket i värsta fall kan leda till att växellådan för mikroturbinen havererar.

3.5 Gen-sets från tillverkaren MAN kan teoretiseras att kosta 1,000,000 kr till 2,500,000 kr. Dessa siffror dras från erfarenhet samt denna exempelbild på en som vid skrivande stund låg ute för försäljning. (Bilaga 1.)

I och med att denna maskin är producerad 2021 så är den inte ny i skrivande stund, vilket medför att det att två nya skulle kosta avsevärt mycket mer. (Bilaga 2.)

Wärtsiläs DF DG:s verkar inte heller vara ett alternativ, då den minsta är 6L20DF, som levererar en effekt på 1100 kW, vilket är mer än dubbelt så mycket som de redan installerade generatorerna levererar. (Wärtsilä, 2026)

3.6 Den teknik som författarna var mest entusiastiska över var möjligheten till ett reliquification plant ombord. Denna teknik ansågs av författarna vara lite av ett epitet av uppfinningsrikedom och ingenjörskonst.

Intervjun med Jørn Iversen, LNG-experten hos Wärtsilä, gav mycket intressanta tekniska data om de olika reliq-system som de utvecklat.

Denna data ledde direkt till insikten att detta dessvärre inte var praktiskt gångbart för objektet i vår studie.

Enligt Jørn så är den minsta av deras reliq-system en apparat på 53 ton med en basarea på 7 x 8 meter, som kräver en tillförd effekt på 1 MW för märkdrift. Därtill så är kostnaden för enbart den kompletta apparaten i runda slängar € 4,500,000, plus kostnaden för ombyggnation av, och installation på, fartyget.

Vad som i och med detta blev tydligt var vilken del av handelsflottan de riktar sig till, med insikten om dimensioneringen av reliq-systemen som de erbjuder marknaden.



Figur 5. Exempelbild (3D) på ett Reliq-plant Källa: (Wärtsilä, 2020)

3.7 Idén om en förbättrad isolering av storage tanken är vid första anblick kanske det tillvägagångssätt som känns enklast och därmed mest gångbar. Detta är dock mer komplext än att bara addera ytterligare ett skal av isolerande material som innesluter tanken.

Idén att ändra supply-pumparna till externa pumpar istället för interna hade lett till en mindre åverkan från tillförd värme på ångtrycket men detta gör att tanken måste öppnas för att extrahera dem. Detta leder då också till att tanken måste klassas på nytt, vilket medför ytterligare en kostnad.

3.8 Flödet genom BOG-linan till huvudmaskinen, som inte finns utritad i diagrammen erhållna av NN, är som sagt begränsat av rörets dimension. Röret är ett DN25, vilket innebär 25 mm i innerdiameter. Detta ger röret en area av 0,000491 m². (Fagergren, 2021.)

Om man i stället tänker sig ett DN50-rör så fås en area på 0,00126 m². Detta är större med en faktor 2,57. Med samma tryck och flödes hastighet genom röret som innan så skulle detta teoretiskt sett innebära en ökning av massflödet med 257%, vilket skulle omvandlas till en potentiell effektökning med samma procentsats.

Den tidigare ”tomgångseffekten” (med SG inkopplad, utan någon framdrift) låg runt 850 kW. Den skulle då med ett DN50-rör kunna uppnå 2184,5 kW.

Detta är helt klart bättre, men når inte hela vägen till märkdrift vid vilken bäst verkningsgrad skulle uppnås.

Om man nu tänker sig att man byter röret mot ett DN75 så får man, enligt samma teoretiska modell som innan, en ökning av flödet med 900% jämfört med nuvarande DN25-rör.

$$\dot{m} = \rho * A_1 * c_1 = \rho * A_2 * c_2 \Rightarrow \dot{V} = A_1 * c_1 = A_2 * c_2$$

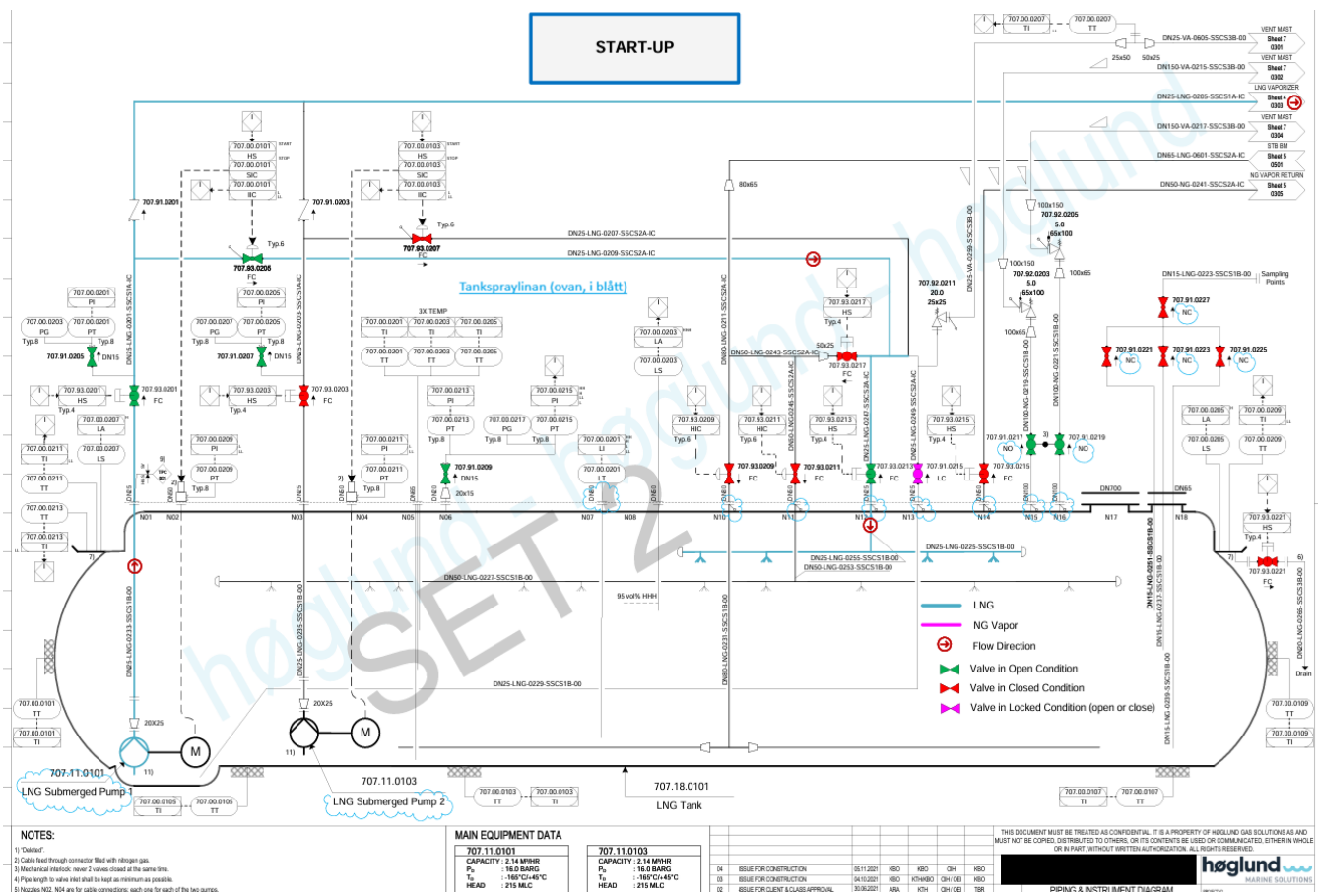
Förutsatt att hastigheten $c_1 = c_2$ och $A_2 = 9 * A_1$, samt att ρ förblir detsamma (vilket det givetvis är eftersom det är samma medie som flödar) medför detta: $\dot{V}_{Ny} = 9 * \dot{V}$ (Fagergren, 2021, s.32)

Detta DN75-rör skulle då kunna ge ett maximalt effektuttag på 7651,7 kW vilket faktiskt ligger över märkeffekten på huvudmaskinen.

Eftersom BOG-linan går till GVU:n som matar huvudmaskinen med en bestämd bränslemängd så är detta inga problem, GVU:n kommer ett strypa bränsleflödet automatiskt till den mängd som krävs för varje given stund, därmed är ett något ”överdimensionerat” rör att föredra.

En sådan omdimensionering av befintlig rördragning måste även uppfylla alla krav som ställs av IMO genom IGF-koden. (IMO, 2026)

Denna ombyggnation visade sig vara lätt att kunna åstadkomma då den nuvarande tillbyggda BOG-linan endast består av en T-koppling på en av tankspraylinorna, en expansion från det röret från 25 till 50 mm och därefter ett 50 mm rör, med två avstängningsventiler på, som leder in till GVU:n innan huvudmaskinen. Pumpen i början av den linan är heller inte i aktiv under BOG-drift, utan det är gasens självtryck som står för flödet av BOG.



Figur 6. Del av LNG-anläggning ombord, blå linje visar LNG:s (och BOG:ens) väg vid drift.

4.3 Metoddiskussion

Vid påbörjan av detta arbete fanns, som tidigare nämnt, stark entusiasm för att det hela skulle gå smidigt till.

De begränsningar vi som författare har identifierat under arbetets gång är att tillvägagångssättet har haft sina största brister i just avsaknaden av komplett relevant fartygsdokumentation samt rederiets ovilja att delta i arbetet. Hade viljan från rederiet funnits där så hade studiebesök samt tillgång till nybyggnations dokument, specifikt linjeritningar, varit till stor nytta genom att tillåta en mer exakt planering och således uteslutande av vilka lösningar som inte är applicerbara.

Vi som författare anser att de metoder som använts för datainsamling har varit acceptabla för detta arbete. Expertintervjuer, informatör i form av NN och de tekniska rapporter, arbeten och den kurslitteratur vi som författare har haft tillgång till har gett oss en tillräckligt god vetenskaplig grund att genomföra arbete.

Tillkortakommanden av vissa lösningars fysiska storlek och omkostnader förekommer och är i detta arbetes fall ett problem som författarna är medvetna om. Det största hindret har här varit att många försäljare av utrustning inte vill delge specifika information än den som redan finns tillgänglig i form av deras produktdatablad.

Metoden som användes för jämförelsen mellan de olika alternativen är påkommen av oss som författare, avsiktligt designad för att ge läsaren en tydlig bild om resultatet av den andra frågeställningen.

Viss bias eller vinkling förekommer troligen då författarna har en kommande roll inom branschen och då troligen undermedvetet söker till den enklaste lösningen till problematiken. Det kan tänkas förekomma för- och nackdelar av detta.

Nackdelar kan vara att vi som författare misstolkat problemet i fråga något tillfälle under arbetets gång.

Fördelar kan tänkas vara att någon av dessa lösningar kommer till rätta med problematiken och löser den på ett ekonomiskt och verksamhetsmässigt fördelaktigt sätt.

Produktdatabladen presenterar sannolikt verklighetsnära värden, dock troligen friserade genom avrundning. Detta är inget som vi har tagit avsevärd höjd för, vilket en eventuell beställare inte heller skulle behöva oroa sig för då det för tillverkaren är intressant att vara så nära sanningsenlig som möjligt från start av en upphandling.

Felkällor kan vara flertaliga. De största misstänks vara uppskattningarna som görs rörande omkostnader kring utrustningen, i och med att några antaganden var tvungna att göras inom detta område.

4.4 För vidare studier

Om vidare studier ska göras finns en rad förslag att ta i beaktande. Dessa är, men inte begränsade till, nedanstående:

- Fler expertintervjuer
Under detta arbete kontaktades bara två och dessa var från samma koncern dock med vitt skilda befattningar och expertisområden. Under intervjuer uppdagades att en del av naturliga följdfrågor på det som experten och vi diskuterade var bortom dennes kompetens. Det skulle därför vara gångbart att intervjua fler experter, gärna från andra koncerner inom branschen för att bilda en bättre bild för framtida fortsättning av studien.
- Mer koncis produktfakta
Då mycket av den för allmänheten tillgänglig produktdokumentation troligen är friserad och avrundad skulle det för vidare studier vara intressant med faktiska datablad från tillverkaren som berättar om utrustningens exakta specifikation. Ett bra exempel på detta är Wärtsiläs ”Engine Configurator” funktion där användaren obehindrat kan komma över denna typ av information.
- Mer information om fartyget
Tillträde till fartyget hade varit till enorm hjälp med uteslutande av lösningarna. Med måttband, linjeritningar och produktspecifikationer i hand hade det funnits godare möjligheter att på ett tydligare sätt utesluta och bekräfta vilka lösningar som hade fungerat bäst för fartyget.
Mer data från tanken, specifikt bilder på pumparnas placering i botten samt hur temperaturen artar sig genom ett tryckökningsförlopp hade varit bra att ha till hands. Data om temperaturen hade möjliggjort beräkningar på hur ökande av ångtrycket ser ut och då eventuellt beräkningsmässigt kunnat peka på om det exempelvis är pumparnas som är problemet eller om det är isoleringen.

4.5 Sammanfattning

Sammanfattningsvis kan man dra slutsatsen att den vägen framåt som är mest praktiskt och ekonomiskt gångbart är att dimensionera upp BOG-linan så pass att huvudmaskinen kan användas även för framdrift under körning på BOG.

Detta är även samma slutsats som fartyget själva har kommit fram till enligt vår kontakt ombord, NN, och just denna ombyggnation är planerad att äga rum vid varvsbesök nästa år (2027).

5 KÄLLFÖRTECKNING

- Alfa Laval. (u.å.) *Alfa Laval Gas Combustion Unit*. [Broshyr].
www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/alfa-laval-gas-combustion-unit-2.0_product-leaflet_en.pdf
(Hämtad: 14-03-2026)
- Alvarez, H. (2006). *Eneriteknik – Del 1*. Studentlitteratur AB, Lund.
- Baxter, T. (2023). The Chemical Engineer. *Rules of Thumb: Centrifugal Pump Efficiency*.
<https://www.thechemicalengineer.com/features/rules-of-thumb-centrifugal-pump-efficiency/>
(Hämtad: 24-05-2026)
- Combustion Engineering Association. (2021). *Thermal Fluid Systems: A Practical Guide for Safe Design, Operation and Maintenance - 2nd edition*.
<https://cea.org.uk/wp-content/uploads/2025/07/CEA-BG07.pdf>
- Fagergren, S. (2021). *Teknisk Formelsamling*. Kalmar Maritime Academy.
- IMO (2026). *International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code)*
<https://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/codes/igf.cfm>
(Hämtad 15-05-2026)
- IPCC (2007). *Assessment Report 4 – Working Group I: The physical science basis*.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
(Hämtad 02-05-2026)
- Jernkontoret. (u.å.). *Förbränning*. Jernkontorets energihandbok.
<https://www.energihandbok.se/forbranning>
(Hämtad: 20-05-2026)
- Noroozian, R., & Asgharian, P. (2017). Microturbine generation power systems. I G.B. Gharehpetian & S. Mohammad Mousavi Agah (Eds.), *Distributed generation systems: Design, operation and grid integration* (s. 149–219). Butterworth-Heinemann.
(Hämtad: 13-05-2026)
- MAN. (2026). *MAN E3262 GAS ENGINE*.
<https://www.man.eu/engines/en/products/power-generation/gas/man-motor-e3262.html>
(Hämtad: 13-04-2026)
- Saacke. (u.å.). *GAS COMBUSTION UNITS*.
<https://www.saacke.com/en/marine/products/gas-combustion-units/>
(Hämtad: 23-03-2026)

Saacke. (u.å). *GCU Evo*. [Broshyr].

https://www.saacke.com/saacke/download_center/Produktionformationen/en/Gas%20Combustion%20Unit%20-%20GCUevo.pdf

(Hämtad: 01-04-2026)

SMHI. (2026) *Metan*

<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/kortlivade-klimatpaverkande-amnen/metan>

(Hämtad: 07-05-2026)

Stålhammar, P., Erlandsson, L., Willner, K. (2011) *Demonstration och utvärdering av dual-fuel-tekniken*. (1102-7371). Jörgen Held.

<http://sgc.camero.se/ckfinder/userfiles/files/SGC233.pdf>

Wärtsilä. (u.å.) *Wärtsilä LNG Reliquification System*.

<https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/lng-reliquefaction-system>

(Hämtad: 11-03-2026)

Wärtsilä (2026) *Wärtsilä Engine Configurator*

www.wartsila.com/marine/engine-configurator?Application=Mechanical+propulsion+%26+CPP&Fuel+type=Gas+-+LNG&Power=1110%2C8054&Emission=IMO+Tier+3+%28Gas%29+%2F+IMO+Tier+2+%28liquid%29

(Hämtad: 04-04-2026)

Wärtsilä. (2020). *Wärtsilä Compact Reliq.*

<https://www.wartsila.com/media/news/07-07-2020-new-wartsila-compact-reliq-adds-flexibility-to-the-growing-lng-market-2742258>

(Hämtad: 03-05-2026)


5.1 Bilagor, intervjuer


- Intervju med Jørn Iversen, Wärtsilä
- Intervju med Jarno Häivälä, Wärtsilä
- Flera samtal med NN

5.2 Bilagor, fartygsdokumentation

Bilaga 1 "4017-HMS-P-KA-0008-00 Gas Supply Procedure.pdf"


5.3 Bilagor, prisuppgifter

Category: 1101 power generators / Gas generators 24.03.2026 



Item-No.: 167457500
📦 New in: 2021 used

MAN E3262 LE202
Gas generators

Location:  United Kingdom

Price: 100.000 €

Key data: 550 V [more ...](#)

Gas Generation Unit with MAN E3262 LE202 Engine. Compatible with both natural gas and biogas. SCOPE OF SUPPLY • Engine • Alternator • Control panel Motortech All-in-One Vision 5 • Gas Ramp Technical documentation: Manufacturer's MAN datasheet, MAN Operating Instruction Manual. The engine has undergone borescope inspection, revealing all internal elements in well-preserved condition. Engine turns freely. The turbos have recently been overhauled. Available for sale from Gas Engine Exchange. Please check our full range of equipment at gasengineexchange.com.

approved dealer

▼

Bilaga 1. En MAN E3262 till salu på Resale.info

<https://www.resale.info/en/man-e3262-le202-gas-generators/No-167457500>

Manufacturer: **MAN**

Model: **E3262 LE202**

Type of machine: **Gas generators**

item-No.: 167457500

Quantity: 1

Date: 24.03.2026

Year of manufacture: 2021

Operating hours: 6740

Location:  United Kingdom

Price: 100,000 EUR

Machine in stock: Yes

Seller-item-No.: GEE1504

Bilaga 2. Information för tidigare nämnda MAN E3262, se "Year of manufacture: 2021".

Capstone #200R-HD4-BE00 Microturbine, 200 kW

Model: 200R-HD4-BE00 **Stock #** 005135 **Price:** \$85,000 USD

This listing was recently sold, but below are similar listings.

Bilaga 3. En Capstone Mikroturbin som såldes för \$85 000 USD.

Säljare: <https://surplusrecord.com/listing/microturbine-capstone-microturbine-200kw-673409/#:~:text=Model%3A%20200R%2DHD4%2DBE00,payment%20valid%20upon%20approved%20credit>