



# CHALMERS

---



## **En kartläggning av energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg**

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

Markus Löfqvist

Gustav Skoglycke Morlin



RAPPORTNR. SI-17/197

En kartläggning energieffektiviseringsåtgärder för  
kylanläggningar ombord på fartyg

Markus Löfqvist  
Gustav Skoglycke Morlin

Institutionen för sjöfart och marin teknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige, 2017

# **En kartläggning av energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg**

Energy efficiency measures for refrigeration plants on board ships

Markus Löfqvist  
Gustav Skoglycke Morlin

© Markus Löfqvist, 2017.

© Gustav Skoglycke Morlin, 2017.

Rapportnr. SI-17/197  
Institutionen för sjöfart och marin teknik  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefon + 46 (0)31-772 1000

Omslag:  
Fartyg i solnedgång (Pixabay 2017)

Tryckt av Chalmers  
Göteborg, Sverige, 2017

# En kartläggning av energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg

Markus Löfqvist  
Gustav Skoglycke Morlin  
Institutionen för sjöfart och marin teknik  
Chalmers tekniska högskola

## Sammanfattning

Ombord på fartyg finns ett stort behov av att kyla och frysa proviant samt att kunna kontrollera klimatet i boendetrymmen, vilket uppfylls med hjälp av kylanläggningar. Köldmedier som idag används i kylanläggningar är skadliga för miljön vid läckage och det pågår forskning för att framställa mer miljövänliga köldmedier. Tidigare studier har dock visat att mer miljövänliga köldmedier leder till en försämrad energieffektivitet, vilket medför vikten av att utveckla och förbättra kylanläggningarnas system och komponenter. I denna studie kartläggs vilka åtgärder som finns tillgängliga för att öka energieffektiviteten hos kylanläggningar ombord på fartyg.

En litteraturstudie har genomförts för att undersöka vilka åtgärder som finns tillgängliga inom området. För att behålla en objektiv syn i ämnet kombinerades och jämfördes litteraturstudierna med information och åsikter som samlades in från branschfolk via personlig kommunikation samt en enkätundersökning.

Studien ledde till ett flertal funna potentiella effektiviseringsåtgärder vars lämplighet för att appliceras inom sjöfarten varierar, där en åtgärd med stor potential för att kunna appliceras i större utsträckning ombord på fartyg är frekvensstyrning av kylanläggningens kompressor och i vissa fall även andra komponenter. Ett annat förbättringsområde som denna studie har kartlagt är problemen med de läckage som förekommer och kraftigt bidrar till försämrad energieffektivitet.

Utifrån studerat vetenskapligt material, läroböcker och insamlat material från respondenter kan det konstaterats att det finns många lovande energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg. Frågan är hur effektiviseringsåtgärderna ska bli mer attraktiva att applicera för kylanläggningar ombord på fartyg, samt hur intresset för att utveckla mer hållbara tekniker med minimal miljöbelastning ska öka.

**Nyckelord:** Kylanläggningar, fartyg, sjöfart, energi, effektivisering, förbättring, utveckling, åtgärder, miljöpåverkan

## Abstract

On board marine vessels there is a large demand for keeping provision chilled or frozen and controlling the accommodation climate, this demand is achieved with the help of onboard refrigeration plants. The refrigerants that are used in today's refrigeration plants are harmful to the environment and continuous research are carried out to develop refrigerants that are less harmful. Studies show that using refrigerants that are less harmful to the environment results in a more inferior energy efficiency, which leads to the importance of improving the design of the system and its components. In this study, measures for achieving a better energy efficiency of refrigeration plants on board ships are examined and surveyed.

A literature study has been conducted to investigate what measures are available in the area. To maintain an objective view of the subject, the literature studies were combined and compared with information and opinions collected from professionals via personal communication and a questionnaire survey.

The study led to several potential efficiency measures which suitability to be applied in the shipping area varies. A measure with high potential for further application on board ships is the use of frequency control of the refrigeration compressor and, in some cases, other components as well.

It can be concluded that there are many promising energy efficiency measures for refrigeration systems on board ships. The question is how the efficiency measures can be more attractive to apply to refrigeration systems on board ships, and how the interest in developing more sustainable technologies with minimal environmental impact will increase.

**Keywords:** Refrigeration, marine, shipping, energy, efficiency, improvement, development, measures, environmental impact

## **Förord**

Författarna skulle vilja tacka Cecilia Gabrieli för ett mycket trevligt och bra handledande genom hela arbetets gång. Ett stort tack riktas också till S. Jacobsen och P. Lindholm som har besvarat frågor och bidragit med information på ett mycket hjälpsamt sätt, samt till deltagarna i enkätundersökningen.

# Innehållsförteckning

<b>Sammanfattning</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>i</b>
<b>Förord</b> .....	<b>iii</b>
<b>Figurförteckning</b> .....	<b>vi</b>
<b>1 Introduktion</b> .....	<b>1</b>
1.1 Syfte .....	1
1.2 Frågeställning .....	2
1.3 Avgränsningar.....	2
<b>2 Bakgrund</b> .....	<b>3</b>
2.1 Översikt kylanläggningen.....	3
2.2 Användningsområden till sjöss.....	4
2.3 Kylanläggningens komponenter .....	4
2.3.1 Kompressorn .....	4
2.3.2 Kondensorn .....	4
2.3.3 Expansionsventilen.....	5
2.3.4 Förångaren .....	5
2.3.5 Köldmediet .....	5
2.4 Kylanläggningens energieffektivitet .....	6
2.4.1 Coefficient of performance (COP).....	6
2.4.2 Total Equivalent Warming Impact (TEWI).....	6
<b>3 Metod</b> .....	<b>8</b>
<b>4 Resultat</b> .....	<b>10</b>
4.1 Operationell kontroll och styrning .....	10
4.1.1 Kompressorstyrning .....	11
4.1.2 Expansionsventilsstyrning .....	11
4.1.3 "Economizer" (Hushållning) .....	12
4.2 Värmeväxlareffektivitet .....	12
4.3 Systemkonfigureringar .....	13
4.3.1 Enstegsanläggningar.....	13
4.3.2 Tvåstegsanläggningar .....	15
4.3.3 Integrering med andra system .....	17
4.4 Förhindra köldmedieläckage .....	19



4.5	<i>Uträkning av miljöbelastning</i> .....	20
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>21</b>
5.1	<i>Resultatdiskussion</i> .....	21
5.2	<i>Metoddiskussion</i> .....	23
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b> .....	<b>26</b>
	<b>Referenser</b> .....	<b>27</b>
	<b>Bilagor</b> .....	<b>30</b>

## Figurförteckning

<i>Figur 1.</i> Flödesschema, enstegs-anläggning.....	<b>3</b>
<i>Figur 2.</i> Flödesschema, enstegsanläggning med intern värmeväxlare.....	<b>14</b>
<i>Figur 3.</i> Flödesschema, enstegsanläggning med ejektor.....	<b>15</b>
<i>Figur 4.</i> Flödesschema, tvåstegsanläggning.....	<b>16</b>
<i>Figur 5.</i> Flödesschema, kaskadanläggning bestående av HVAC-system och kyl- och fryssystem.....	<b>18</b>

## Terminologi

<i>ANN</i>	Atrificial Neural Network Reglermetod – Artificiellt neuronnät
<i>CFC</i>	Chlorofluorocarbon Klor-fluor-kol-föreningar
<i>COP</i>	Coefficient Of Preformance Prestandakoefficient
<i>E<sub>a</sub></i>	Årlig energiförbrukning (kWh/år)
<i>Entalpi</i>	Mått på energiinnehåll
<i>FCC</i>	Fixed Capacity Compresspr Fast kapacitets-kompressor
<i>Fuzzy logic</i>	Reglermetod – Logiska funktioner
<i>GWP</i>	Global Warming Potential Global uppvärmningspotential
<i>HCFC</i>	Hydrochlorofluorocarbon Väte-klor-fluor-kol-föreningar
<i>HFC</i>	Hydrofluorocarbon Väte-fluor-kol-föreningar
<i>HVAC</i>	Heat, Ventilation and Air Conditioning Värme, ventilation och luftkonditionering
<i>Isoterm</i>	Termodynamisk process med konstant temperatur
<i>L</i>	Kvot för årligt läckage i systemet
<i>n</i>	Anläggningens gångtid
<i>N</i>	Anläggningens livslängd
<i>PID</i>	Proportional, Integral, Derivative Reglermetod – Proportionell förstärkning, Integration, Derivering
<i>TEWI</i>	Total Equivalent Warming Impact Total motsvarande uppvärmningsinverkan (kgCO <sub>2</sub> )
<i>Q<sub>e</sub></i>	Anläggningens kylkapacitet (kW)
<i>VCC</i>	Variable Capacity Compressor Variabel kapacitets-kompressor
<i>W<sub>c</sub></i>	Tillfört arbete till kylanläggningen (kW)
<i>β</i>	Koldioxidsutsläppsfaktor (g CO <sub>2</sub> /kWh)

# 1 Introduktion

Sjöfartens miljöpåverkan är ett ämne som diskuteras allt oftare idag. Åtgärder för att försöka minska miljöpåverkan från sjöfarten tas fram i form av nya internationella och nationella regelverk och restriktioner där exempelvis gränsvärden för maximalt tillåtna miljöpåverkande utsläpp fastställs (Andersson, Brynolf, & Lindgren, 2016). I kylanläggningar både ombord på fartyg och iland används köldmedier som när de frigörs i atmosfären bidrar till växthuseffekten. Just för växthusgasutsläpp finns dock ännu inga restriktioner för sjöfarten men ämnet diskuteras inom bland annat International Maritime Organisation (IMO). Behovet av kylanläggningar till sjöss är stort, då besättningen både arbetar och bor ombord under längre perioder behövs det proviant som i sin tur behöver förvaras i kyl- och frysutrymmen, likväl lastrum som behöver kylas på vissa fartyg. Klimatkontroll i boendetrymmen är ett annat behov för att uppnå behaglig inomhustemperatur som kan åstadkommas genom installationer av kylanläggningar.

Genom emissioner till atmosfären orsakar kylanläggningar till exempelvis uttunning av ozonlagret och bidrar till växthuseffekten. *CFC* och *HCFC*-baserade köldmedier som främst har orsakat uttunning av ozonlagret är idag förbjudna eller under utfasning i de flesta välutvecklade länderna. Köldmedier som baseras på *HFC* som har ersatt de ozonnedbrytande köldmedierna bidrar istället till global uppvärmning vid läckage och användningen av dessa kommer därför också att begränsas, genom regleringar som utvecklats inom Europeiska Unionen (The European Parliament, 2014)

På grund av det stora behovet av kylanläggningar finns det nya utmaningar i att utveckla köldmedier som lever upp till kommande restriktioner och regleringar. Det har också genom tidigare studier (Pigani, Boscolo, & Pagan, 2016) visat sig att mer miljövänliga köldmedier leder till försämrade energieffektivitet och därmed högre växthusgasutsläpp i form av koldioxid från kylanläggningens elförbrukning. Detta medför också vikten av att utveckla kylanläggningens komponenter och system i helhet för att uppnå en större energieffektivitet och en total minskad miljöpåverkan. I den här studien undersöks vilka olika åtgärder det finns för att förbättra kylanläggningars energieffektivitet och resultatet analyseras utifrån hur dessa åtgärder har möjlighet att appliceras inom sjöfarten.

## 1.1 Syfte

Syftet är att studera och kartlägga hur energieffektiviteten hos kylanläggningar ombord på fartyg kan ökas genom operationella åtgärder eller förändrad system- och komponentdesign.

## **1.2 Frågeställning**

Huvudfrågeställningen har delats upp i två delfrågor för att kunna besvaras utifrån olika perspektiv.

Hur kan energieffektiviteten hos kylanläggningar ombord på fartyg ökas?

- Hur kan driften av kylanläggningen optimeras?
- På vilka sätt kan energieffektiviteten ökas genom ändrad system- och/eller komponentdesign?

## **1.3 Avgränsningar**

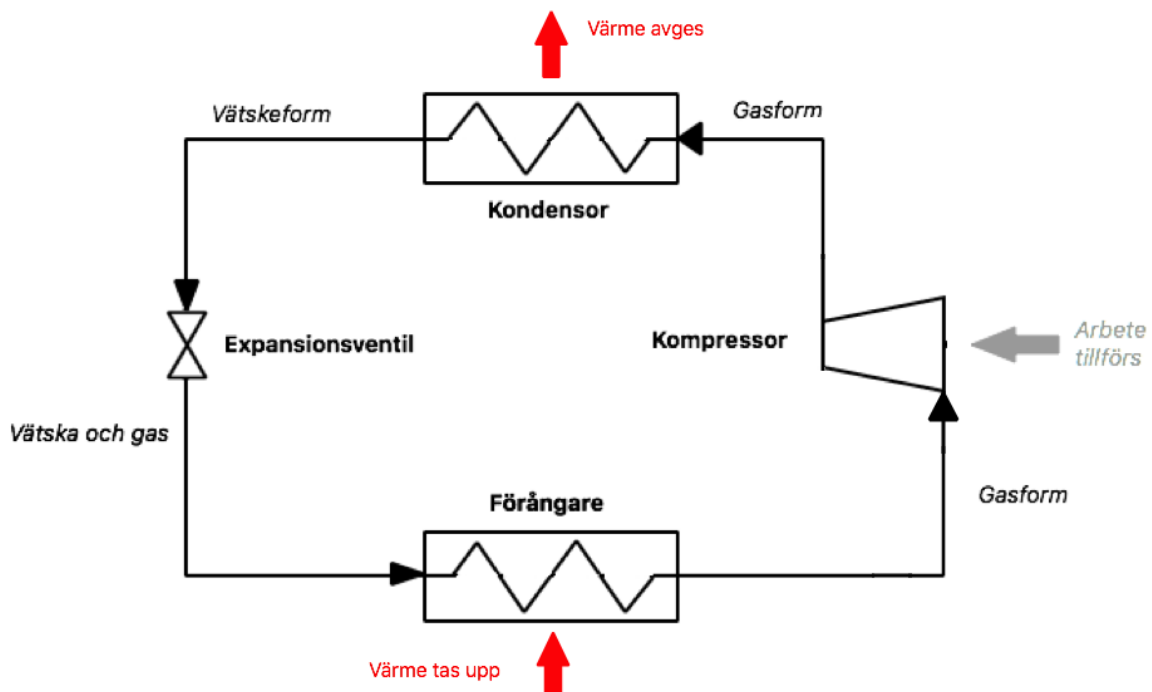
Det finns relativt många tidigare studier gjorda om köldmedier, till exempel om vilka nya köldmedier som framställs för att ersätta de som blivit förbjudna eller som är under utfasning och hur de olika köldmedierna påverkar kylanläggningars prestanda. Det är ett omfattande område att utforska och författarna har därför valt att avgränsa sig från jämförelsen av olika köldmedier, i denna studie ligger istället fokus på kylanläggningens system och komponenter. I denna studie utförs heller inga beräkningar av effekten från olika effektiviseringsåtgärder, på grund av de många faktorer som i verkligheten påverkar utgången. Ekonomiska aspekter tas heller inte hänsyn till i denna studie.

## 2 Bakgrund

I bakgrundsavsnittet görs en grundläggande genomgång av en kylanläggnings systemuppbyggnad och beskrivning av de fyra huvudkomponenterna samt köldmediet.

### 2.1 Översikt kylanläggningen

En kylanläggning kan se ut på olika sätt beroende på användningsområdet. Den går att applicera för exempelvis vanliga kyl- och frysskåp i hushåll, industriella frysar, kryoteknik och luftkonditionering. I grund och botten arbetar de olika applikationerna för kylning enligt samma princip; att under kontrollerade förhållanden förflytta värme från ett läge till ett annat. Den mest använda typen av kylanläggningar är kylkompressorsystemet (Feiza, 2015). Kylkompressorsystemet består i enkelhet av en kompressor, en kondensator, en expansionsventil och en förångare samt ett köldmedium som flödar genom systemet (Nydal, 2007). En typisk enstegsanläggning kan se ut enligt schemat nedan (*Figur 1*). Köldmediet som efter förångaren är i gasform komprimeras till ett högt tryck och en hög temperatur av kompressorn, i kondensorn avges värme när köldmediet kyls ned till vätskeform. Expansionsventilen sänker trycket och temperaturen och kontrollerar flödet av köldmediet till förångaren där köldmediet, som nu består av både vätska och gas, värms upp till gasform igen genom att ta upp värme från omgivningen, alltså från det som ska kylas (Şahin, 2011). Vad som menas med enstegs- och flerstegsanläggningar beskrivs i avsnitt 4.3.



*Figur 1.* Flödesschema över en enstegsanläggning. Författarnas egen bild.

## **2.2 Användningsområden till sjöss**

Ombord på fartyg finns det flera olika användningsområden för kylanläggningar. I och med att besättningen både bor och arbetar ombord måste det finnas proviant som behöver förvaras svalt eller nedfryst, där kylanläggningen kyler ned utrymmet som provianten förvaras i. I hytter och andra boendetrymmen behöver det också finnas möjlighet för klimatkontroll där kylanläggningar installeras i form av *HVAC*-anläggningar för att få möjligheten att styra över inomhustemperaturen. I vissa fall används även kylanläggningar för nedkyllning av större lastutrymmen på fartyg som fraktar kylvaror (Andersson et al., 2016).

## **2.3 Kylanläggningens komponenter**

Huvudkomponenterna i en kylanläggning kan som redan nämnt sammanfattas till kompressorn, kondensorn, expansionsventilen och förångaren (Nydal, 2007). Fler komponenter kan dock tillkomma i mer avancerade applikationer av kylanläggningar, exempelvis i flerstegsanläggningar, men i detta avsnitt presenteras huvudkomponenterna i en enkel kylanläggning samt en beskrivning av köldmediets uppgift i systemet.

### **2.3.1 Kompressorn**

Kompressorer förekommer i olika storlekar och sorter: exempelvis kolvkompressorer, skruvkompressorer och centrifugalkompressorer som alla används i kylanläggningar (Stosic, 2004). När köldmediet sugas in i kompressorn är det under gasform efter att ha blivit uppvärmt i förångaren. Kompressorns uppgift i systemet är att höja trycket på gasen vilket i sin tur leder till att temperaturen också ökar. Detta sker mekaniskt genom att gasen komprimeras till en mindre volym som på så vis skapar det högre trycket och temperaturökningen (Nydal, 2007). Kompressorn drivs normalt av en elmotor som kräver strömförsörjning och elproduktionen ombord är en stor anledning till de utsläpp som sjöfarten står för i form av exempelvis koldioxid. Det är därför viktigt att undersöka hur kompressorns elförbrukning kan minska och med det även minska fartygets totala behov av elproduktion (Forbes Pearson, 2003). Enligt Forbes Pearson (2003) är det också viktigt att till exempel temperaturlyftet hos gasen inte blir större än nödvändigt och att vätska inte finns närvarande hos köldmediet vid kompressorns insug för att behålla kompressorns effektivitet.

### **2.3.2 Kondensorn**

En kondensor är en värmeväxlare som används för att kyla ned en substans från gasform till dess vätskeform (Feiza, 2015). När gasen har komprimerats i kompressorn är nästa steg i cykeln att avge värmeenergi i kondensorn. Detta sker genom att den varma gasen passerar nära vatten eller luft med lägre temperatur och på så vis skapar en process av naturligt värmeutbyte (Nydal, 2007). Gasen kommer att avge värme och kylas ned till vätskeform samtidigt som det kallare mediet tar upp den avgivna värmen. Vitsen med kondensorn är helt enkelt att få bort värmen från systemet som köldmediet har tagit upp i förångaren. Viktiga aspekter för att uppnå önskad prestanda hos kondensorn är dess storlek och design (Shishov & Talyzin, 2015), temperaturen hos det kylande vattnet eller luften är också av stor betydelse för att värmeväxlingen ska fungera tillfredsställande. I kylanläggningar ombord på fartyg är det vanligt att använda antingen

färskvatten som kylande medium i kondensorn (Pigani et al., 2016), där färskvattnet i sig kyls ned av sjövattnet eller sjövattnet direkt som kylande medium.

### **2.3.3 Expansionsventilen**

Köldmediet passerar expansionsventilen efter att ha kylts ned till flytande form i kondensorn. Expansionsventilens uppgift är att reglera flödet av köldmedium till förångaren vilket orsakar ett tryckfall av köldmediet (Nydal, 2007). Detta leder i sin tur till att förångningstemperaturen sjunker och då kommer en del av köldmediet att förångas och köldmediet blir till en blandning av vätska och gas. Det låga trycket leder även till att temperaturen sjunker till den lägre nivån. Tryckfallet av köldmediet är nödvändigt för att det sedan ska kunna förångas, medan kontrollen av flödet är nödvändigt i system där man vill kunna kontrollera anläggningens kapacitet och även för att undvika att köldmedievätska ska tillåtas lämna förångaren och potentiellt skada kompressorn. Den mest använda expansionsventilen är den termostatiske expansionsventilen (Jiang, Wu, Wang, & Xu, 2011) där temperaturen på köldmediet som lämnar förångaren bestämmer flödet ut ur expansionsventilen.

### **2.3.4 Förångaren**

En förångare är liksom kondensorn en värmeväxlare vars uppgift är motsatt till kondensorns. När köldmediet, som i detta steg efter expansionsventilen är en blandning av vätska och gas med relativt låg temperatur och lågt tryck, kommer till förångaren får det passera i tuber som omges av ett varmare medium, vanligtvis luft som en fläkt blåser in genom förångaren. Värmen i luften absorberas av köldmediet och detta skapar den kylande effekten i det omgivande utrymme som då blir nedkylt av den nu kalla luften (Feiza, 2015). Grundförutsättningen för att den önskade värmeöverföringen ska kunna ske i förångaren är att trycksänkningen i expansionsventilen avpassas så att köldmediet förångas vid en temperatur som är lägre än omgivningens (Nydal, 2007). När gasen lämnar förångaren består den önskvärt till hundra procent av gas för att undvika att vätska ska sugas med in i kompressorn. Ofta är gasen några grader överhettad för att den termostatiske expansionsventilen ska reglera stabilt. Förångarens kylkapacitet är det värmefflöde som upptas från omgivningen vid viss temperaturdifferens mellan omgivningstemperaturen och förångningstemperaturen (Nydal, 2007).

### **2.3.5 Köldmediet**

Köldmediet som cirkulerar mellan komponenterna är kylsystemets energibärare som alltså absorberar värme från det utrymme som ska kylas och transporterar det till kondensorn där värmen avlämnas och transporteras bort från systemet (Nydal, 2007). Det finns många olika köldmedier som används eller har använts som energibärare i kylanläggningar och egenskaperna är varierande. Utmaningen med köldmedier är som tidigare nämnts att finna energieffektiva substanser som klarar att leva upp till kommande restriktioner gällande klimatpåverkan (Dalkilic & Wongwises, 2010). Tidigare studier har gjorts inom området med resultat som visar på att framtagandet av köldmedier med lägre global uppvärmningspotential, *GWP*, faktiskt inte är en effektiv lösning för att minska kylanläggningens totala växthuseffektpåverkan, utan det är istället genom att försöka öka anläggningens energieffektivitet (Pigani et al., 2016).



## 2.4 Kylanläggningens energieffektivitet

En grundläggande definition av energieffektivitet är att det är förhållandet mellan hur mycket energi som kan tas ut från en process jämfört med hur mycket energi som tillförs till processen. Det ger en överskådlig bild av hur mycket energi som försvinner i delprocesser på vägen. För bedömningen av kylanläggningars effektivitet och miljöpåverkan används begreppen *COP* och *TEWI*, presentation av dessa följer nedan.

### 2.4.1 Coefficient of performance (COP)

Ett kylsystems prestanda utvärderas genom att man tar fram ett *COP*-värde, vilket är en koefficient som visar förhållandet mellan systemets kylningskapacitet ( $Q_e$ ) jämfört med det tillförda arbetet ( $W_c$ ) till processen (Yu, Ren, Chen, & Li, 2007). Det kan skrivas som en formel (1):

$$COP = \frac{Q_e}{W_c} \quad (1)$$

Skriver man enligt termodynamikens andra lag om formeln till (2):

$$COP = \frac{T_{varm}}{T_{varm} - T_{kall}}, \quad (2)$$

där  $T_{varm}$  = kondenseringstemperaturen och  $T_{kall}$  = förångningstemperaturen, kan det enkelt ses att ett sätt för att öka *COP*-värdet är att minska temperaturskillnaden som systemet arbetar under. Detta kan varieras genom användningen av olika komponenter, köldmedium och annan systemkonfigurering.

### 2.4.2 Total Equivalent Warming Impact (TEWI)

*TEWI* är ett mått på en kylanläggningens totala klimatpåverkan (Fischer, 1993). Förutom den direkta effekten på miljön som köldmedierna bidrar till vid läckage, tas vid uträkningen av en kylanläggningens *TEWI* även hänsyn till den mängd växthusgaser som bildas vid produktionen av el till kylanläggningen. Uträkningen av *TEWI* kan ställas upp som följande formel (3) (Makhnatch & Khodabandeh, 2014):

$$TEWI = (GWP \times L \times N) + (E_a \times \beta \times n) \quad (3)$$

*GWP = Global warming potential (hos köldmediet)*

*L = ratio för årligt läckage i anläggningen*

*N = anläggningens livslängd*

*n = anläggningens gångtid*

*E<sub>a</sub> = årlig energiförbrukning, kWh per år*

*β = Koldioxidutsläppsfaktor, g CO<sub>2</sub> per kWh*

### 3 Metod

För att besvara studiens frågeställningar har en litteraturstudie genomförts som huvudmetod för att undersöka vilka åtgärder som finns tillgängliga inom området. Materialet består av vetenskapliga artiklar funna genom sökningar i olika databaser, relevant ämneslitteratur och patent samt övriga artiklar och webbsidor. Urvalet av litteratur att använda bestämdes genom att påbörja sökandet med en relativt stor bredd, för att sedan begränsa sökområdet när djupare kunskaper hade erhållits och mer komponentspecifik information behövdes. Fastställning av materialets validitet har utförts genom att kontinuerligt granska autenticitet, representativitet, innebörd och trovärdighet hos litterära källor enligt metodhandboken "Forskningshandboken – för småskaliga projekt inom samhällsvetenskaperna" (Denscombe, 2016). Använda sökmotorer och sökord listas nedan.

För att behålla en objektiv syn i ämnet, genom att inte enbart förlita sig till ett metodval, och utvidga perspektiven kombinerades och jämfördes litteraturstudierna med information som samlades in från representanter hos leverantörer via personlig kommunikation. Detta även för att få en idé om tänkbara effektiviseringsåtgärder att inrikta litteraturstudierna mot. Urvalet av leverantörer att söka kontakt med bestämdes dels genom förslag från författarnas handledare som har god insyn i kylbranschen och genom att söka upp andra potentiella leverantörer på internet som är verksamma inom branschen. De representanter som var villiga att bidra med information och åsikter fick besvara ett antal frågor. Svaren analyserades sedan med utgångspunkten att jämföra vad verksamma aktörer inom branschen har för syn på denna studies frågeställningar jämfört med vad litteraturstudierna har resulterat i. Denna metodkombination är enligt Denscombe (2016) ett bra sätt att betrakta en studies ämne ur olika synvinklar. Frågorna de fick besvara redovisas under Bilagor – Bilaga 1.

En enkätundersökning gjord i Google Forms skickades också via e-post till ett nätverk som heter Sweship Energy, bestående av representanter från ett antal olika rederier, för att ge ytterligare insyn i hur studiens frågeställningar behandlas i vardagen hos verksamma aktörer. Nätverket har etablerats på initiativ från industrin och Svensk Sjöfarts forsknings- och innovationskommitté och ska enligt dem själva arbeta med frågor som rör utveckling och tillämpning av energieffektiv fartygsdrift, vilket bedömdes kunna vara av stor relevans för denna studie. Inkomna svar på enkäten analyserades på samma sätt som frågorna som skickades till kontakter hos leverantörer. Kontakten med nätverket upprättades genom författarnas handledare. Frågorna i enkätundersökningen redovisas under Bilagor – Bilaga 2.

#### **Sökmotorer:**

Summon

Web of Science

Google

Scopus

Science Direct

**Exempel på sökord:**

Refrigeration, plant, system, marine, ships, energy efficiency, efficient, compressor, evaporator, condenser, expansion valve, expansion device, single stage, two stage, multi stage, cascade, refrigerant leakage, vapor compression, improve, increase, operational control, variable capacity, fixed capacity, environmental impact, internal heat exchanger, flash tank, consumption, COP, TEWI, HVAC, cooling capacity, capacity control, kylanläggningar, sjöfart, fartyg, energi, effektivisering, förbättring, utveckling, åtgärder, miljöpåverkan

**Huvudrespondenter hos leverantörer i branschen:**

S. Jacobsen. Technical Manager, Refrigeration, Wilhelmsen Ship Service

P. Lindholm. Technical Manager, Teknotherm

**Enkätundersökning:**

Enkäten skickades till representanter för rederier som är med i nätverket Sweship Energy den 9 mars 2017, med följande deltagare;

- 5 rederier
- 7 respondenter

## 4 Resultat

I detta avsnitt presenteras kartlagda åtgärder för förbättring av kylanläggningars energieffektivitet som har samlats in genom litteraturstudier, genom kontakt med leverantörer i branschen och inkomna svar från enkätundersökningen. Många åtgärder gäller generellt för kylanläggningar, oavsett om de är landbaserade eller ombord på fartyg. Om åtgärderna är lämpliga att applicera till sjöss och stämmer överens med hur verksamma aktörer inom branschen arbetar diskuteras mer under avsnitt 5 Diskussion. Enkätundersökningen resulterade i 5 respondenter där svarexempel presenteras i löpande text i detta avsnitt.

### 4.1 Operationell kontroll och styrning

En metod för att optimera kylanläggningens energiförbrukning efter aktuella driftläget är genom kontinuerlig övervakning och styrning av anläggningens parametrar. Med hjälp av en kontrollenhet som har styrförmåga över komponenterna kan reaktionstiderna i processen minska och därmed också energiförbrukningen. På sikt kan det också bespara annars onödiga investeringar i kylanläggningen som uppkommer av till exempel utslitna komponenter som har belastats för hårt. Hur lönsamt det är med operationell kontroll varierar dock beroende på vilken typ av metod som används vid styrning av anläggningen, exempelvis *PID*-reglering, *ANN*-kontroll eller *Fuzzy logic*-kontroll (Ekren, Sahin, & Isler, 2010). I kontakt med leverantörer har det tydliggjorts att just styrningen av komponenter är någonting som leverantörer satsar på att utveckla. Detta är något som både S. Jacobsen och P. Lindholm uppger är ett av fokusområdena när det gäller förbättring av kylanläggningars effektivitet (personlig kommunikation, 10 mars 2017 respektive 13 mars 2017). Även genom enkätundersökningen uppger två av deltagarna att detta är ett fokusområde som respektive rederier arbetar med för att förbättra energieffektiviteten för kylanläggningar ombord på fartyg.

För att uppnå en funktionell styrförmåga i ett system är det nödvändigt att övervaka systemets parametrar. Sensorer placeras på lämpliga delar av anläggningen där övervakning behövs och mäter anläggningens olika temperaturer och tryck som sedan skickas till kontrollenheten. Signalerna som, i form av analoga signaler, skickas från sensorerna tas emot av en processor som omvandlar de analoga signalerna till digitala signaler. Dessa matas sedan vidare till kontrollenheten som bearbetar, beräknar och sedan jämför de digitala mätvärdena med systemets önskade värden. Med hjälp av felsignalen som beräknas ifrån mätvärdena och önskade värden, skickar kontrollenheten styrsignaler till anläggningens styr-don och komponenter. Det som regleras och styrs är kompressorns last för att optimera systemets tryck, eventuella fläktar och pumpar i enlighet med systemkraven, även ventiler som bestämmer flödet till värmeväxlare. Enheten larmar också vid avvikelser från anläggningens standardinställningar som är bestämda av leverantören för optimal drift (U.S. Patent No. 4325223 A, 1982).

#### **4.1.1 Kompressorstyrning**

I en kylanläggning är det kompressorn som står för den största delen av anläggningens energiförbrukning (S.-K. Park, Kim, Ahn, & Park, 2006): En liten förbättring i kompressoreffektivitet skulle därför leda till en stor reduktion av anläggningens totala energiförbrukning. I samma ovanstående studie redovisas en jämförelse mellan kompressorer med variabel kapacitet och kompressorer med fast kapacitet, förkortat *VCC* och *FCC*. Resultatet visade att *VCC*-kompressorer producerar en större kylkapacitet vid lägre energiförbrukning hos kompressorn jämfört med *FCC*-kompressorn. I en annan teoretisk jämförelse mellan *VCC* och *FCC* i en *HVAC*-anläggning gjord av Alkan och Hosoz (2010), visas det att anläggningen klarade av att behålla ett högre *COP*-värde när den arbetar under ett brett område av kompressorhastigheter, i kontrast till *FCC*-kompressorernas av/på-funktion. Detta indikerar att operationer med *VCC*-kompressor är mer effektiva än operationer med *FCC*-kompressor. För styrningen av en kompressor med variabel kapacitet använder kontrollenheten anläggningens parametrar för att beräkna felsignalen, för att sedan kunna skicka en styrsignal som ändrar kompressorns kapacitet. Styrsignalen skickas först till en frekvensomvandlare som möjliggör att kompressorns last kan anpassas efter systemets parametrar och styrs därefter (Ekren et al., 2010).

#### **4.1.2 Expansionsventilsstyrning**

Kontrollenheten kan också ha som uppgift att styra en elektronisk expansionsventil i de fall en sådan används i systemet istället för en termisk expansionsventil. Den elektroniska expansionsventilen tillåter systemet att arbeta under ett större spann av tryckförhållanden, så om exempelvis kylvattnet till kondensorn blir kallare kan anläggningen jobba vid ett lägre kondensortryck vilket då ger ett lägre kompressorarbete (Lazzarin & Noro, 2008). Detta uppnås tack vare den elektroniska expansionsventilens kontrollenhet som med hjälp av systemets variabler kan optimera förångaren, oberoende av omgivningens förhållande. Styrsignalerna till ventilen bestäms av att aktuella värden som tas emot, ifrån sensorerna i kylutrymmet och efter förångaren där trycket och temperaturen avläses, behandlas av kontrollenheten och ändras då efter önskad respektive aktuell temperatur i kylutrymmet samt förångarens givna variabler.

Tack vare den överblickande funktionen kontrollenheten har, uppvisar den elektroniska expansionsventilen förbättring av kontrollkvalitet, energisparande funktioner och ökad reglerhastighet i kylsystem jämfört med den termiska expansionsventilen (Sukri, Musa, Senawi, & Nasution, 2015). På samma sätt som den frekvensstyrda kompressorns kapacitet bestäms av systemets parametrar bestäms den elektroniska expansionsventilens öppningsgrad på motsvarande sätt. Expansionsventilen bestämmer systemets kylkapacitet genom att reglera massflödet till förångaren, som i sin tur bestäms av kontrollenheten (Y. C. Park, Kim, & Min, 2001). På så sätt kan kontrollenheten kombinera styrning av expansionsventilen och kompressorn för att bevara systemets *COP*. När kontrollenheten sänker kompressorns kapacitet minskar även expansionsventilens öppningsgrad. I studien av Park et al. (2001) visades det att detta leder till att både kompressorns elkonsumention och massflödet till förångaren minskar och kylanläggningen blir mer energieffektiv och driften optimeras.

### 4.1.3 “Economizer” (Hushållning)

En deltagare i enkätundersökningen uppger att dennes rederi arbetar med att indirekt minimera antalet drifttimmar och kylenergiebehovet för att förbättra kylanläggningarnas energieffektivitet ombord på deras fartyg. Tidigare studier visar att ett sätt för att avlasta kompressorn och därmed minska dess elförbrukning är att utnyttja utomhusluftens låga temperatur för att kyla utrymmen kostnadsfritt (Seem & House, 2010). Detta möjliggörs av att kontrollenheten bestämmer koncentrationen av uteluft respektive returluft genom styrning av spjäll och fläktar. Koncentrationen av respektive luft bestäms med hjälp av sensorer som mäter ute- och inomhusluften, samt ingående luft till kylutrymmet. Om det är temperatur eller *entalpi* som mäts varierar med anläggningsupplägget, dessa mätningar tas emot av kontrollenheten och jämförs med önskad temperatur. Med den data som samlas in bestämmer kontrollenheten spjällens vinkel och fläktarnas pådrag som i sin tur bestämmer hur mycket av respektive luft som ska användas (Li, Li, & Seem, 2010). Utomhustemperaturen används alltså som hjälpmedel för att kyla utrymmet, eventuellt ersätter själva anläggningen då temperaturen är tillräckligt låg, vilket leder till att behovet för mekanisk kylning och anläggningens elkonsumtion minskar (Seem & House, 2010).

## 4.2 Värmeväxlareffektivitet

Värmeväxlarna i en kylanläggning, kondensorn och förångaren, står för den största delen av förluster av värmeenergi i anläggningen (Shishov & Talyzin, 2015). Behovet av att förbättra kondensorn är något som också bekräftas av S. Jacobsen. Han uppger att kondensorn är systemkomponenten som är i särskilt fokus för leverantören han arbetar hos när det handlar om att öka energieffektiviteten. Kondensorns storlek måste vara av sådan karaktär att utloppstrycket håller en acceptabel nivå och det gäller att se till att hålla kondensorn ren. Orenheter kan leda till ett ökat kondensortryck vilket i sin tur ger en högre effektförbrukning och ökat slitage på kompressorn och snabbare haveri (personlig kommunikation, 10 mars 2017).

Ett sätt för att åstadkomma en bättre värmeöverföring är enligt Shishov & Talyzin (2015) genom att öka värmeväxlarnas yt-area, vilket ger utmaningar i fråga om vikt, dimensioner och materialkostnad. En alternativ metod skulle kunna vara att använda så kallade mikrokanalsvärmeväxlare eller kompakta värmeväxlare. Dessa är vitt använda i moderna kylsystem tack vare deras potential att förbättra värmeöverföringskoefficienten (Han, Liu, Li, & Huang, 2012) och för deras fördelaktiga kompakthet i jämförelse med traditionella förångare och kondensorer inom området. I en tidigare studie av mikrokanalsvärmeväxlare gjord av (Qi, Zhao, & Chen, 2010) visar de att dessa värmeväxlare kan minska volymen med 17,2% och 15,1%, samt minska vikten med 2,8 och 14,9% hos förångaren respektive kondensorn.

Ytterligare en fördel med mikrokanalsvärmeväxlare är att flödet av köldmedium inuti rören kan bestämmas. (Liebenberg & Meyer, 2008). Med hjälp av kanalerna på insidan av rören ges köldmediet ett ringformigt flöde genom kondensorn. På så sätt ökar värmeöverföringskoefficienten enligt Liesenberg & Meyer (2008) då köldmediet blandas väl och mer värme kan avges av köldmediet. I ett experiment som gjordes av Patil (2012)

undersöktes två kondensorer med olika typer av rör, en med slät yta och en med kanaler på insidan av rören. Det visade sig att kondensorn som hade rör med kanaler på insidan gav 10% högre kylkapacitet än den med slät yta i rören. Samma anläggning hade en ökad *COP* med 17%. Med det ringflöde som uppstår medförs ökat massflöde av köldmediet genom anläggningen, därav den ökade kylkapaciteten och *COP* (Patil, 2012).

### **4.3 Systemkonfigureringar**

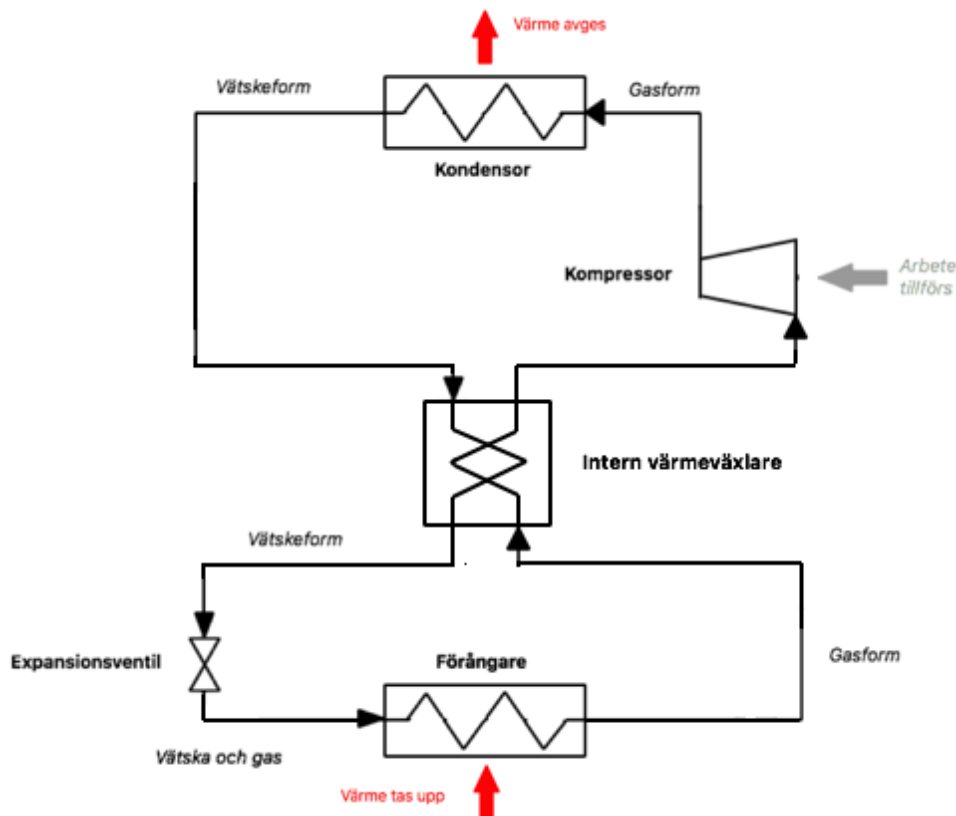
#### **4.3.1 Enstegsanläggningar**

En enstegsanläggning är en kylanläggning där hela kompressionen av köldmediet sker under endast ett steg. Enstegsanläggningar brukar anses som fullgoda när temperaturskillnaden mellan kondensorn och förångaren är relativt liten. Generellt sett vid en temperaturskillnad upp till ungefär 40 °C (Torrella, Larumbe, Cabello, Llopis, & Sanchez, 2011) i jämförelse med vad den kan bli i anläggningar där det finns behov av antingen en väldigt hög kondenseringstemperatur eller en väldigt låg förångningstemperatur. I de fallen kan en enstegsanläggningens totala operationella effektivitet bli betydligt sämre än för en flerstegsanläggning som arbetar under samma temperaturskillnader, på grund av det höga tryck som krävs för att uppnå den önskade temperaturskillnaden. (Jekel & Reindl, 2008). Ytterligare en begränsning för enstegsanläggningar i dessa fall är att vissa köldmedier, på grund av sina egenskaper uppnår så höga temperaturer när trycket ökar, att kompressorn i sig behöver en extern källa för kylning för att undvika materialslitage och försämrade smörjolje-egenskaper, nackdelar som alltså kan överkommas vid övergången till flerstegsanläggningar.

#### **Intern värmeväxlare**

För att optimera funktionaliteten hos enstegsanläggningar är det möjligt att använda en intern värmeväxlare där köldmediet i form av vätska som kommer ut från kondensorn kyls ned innan det kommer till expansionsventilen enligt bilden nedan (*Figur 2*). Kylningen av kondensatet som inträffar på högtryckssidan i systemet ökar kylkapaciteten och minskar risken för spontan förångning innan expansionsventilssteget. På lågtryckssidan absorberar gasen som kommer ut från förångaren värmeenergin från kondensatet, vilket leder till temperaturökning och minskat tryck hos gasen som sugas in av kompressorn (Klein, Reindl, & Brownell, 2000). Om denna inverkan både på systemets högtryckssida och lågtryckssida leder till en bättre effektivitet totalt sett hos kylanläggningen beror på tryckfallet hos köldmediet i anläggningen. I vissa fall ökar en intern värmeväxlare anläggningens effektivitet och i andra fall minskas effektiviteten. (Sukri et al., 2015). I studien om olika systemkonfigureringar av en kylanläggning på ett fartyg diskuterar Pigani et al. (2016) resultatet av en systemkonfigurering med intern värmeväxlare (system B). I jämförelse med referenssystemet som var ett vanligt enstegssystem utan intern värmeväxlare (system A) hade system B en positiv inverkan på kylanläggningens effektivitet. Som en frysanläggning hade dock konfigureringen enligt system B en negativ inverkan på anläggningens effektivitet, på grund av begränsningar hos kompressorns maximala utloppstemperatur vilket hindrade systemet från att ta full nytta av den interna värmeväxlaren.





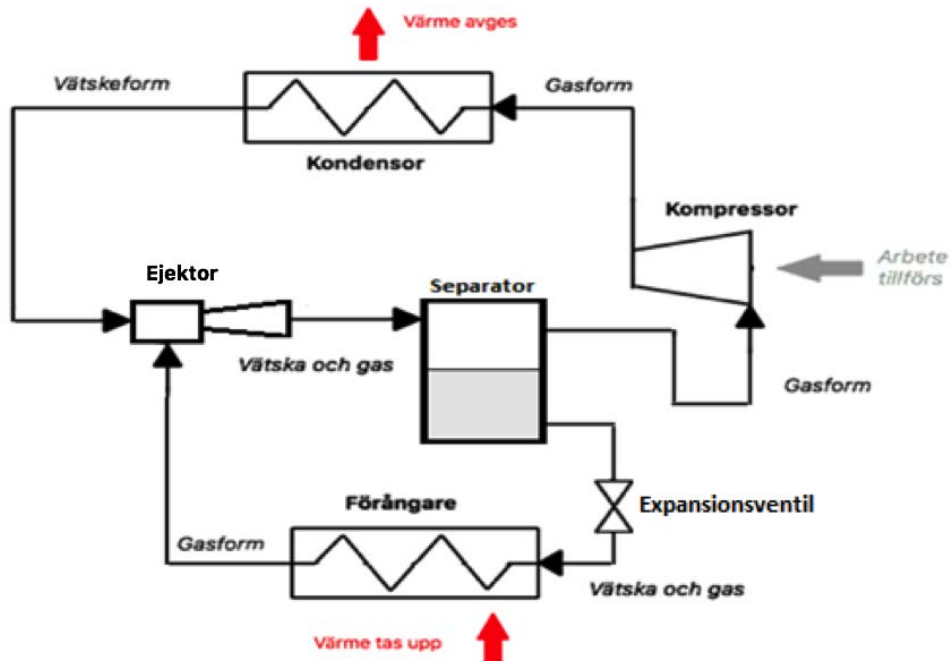
Figur 2. Flödesschema över en enstegsanläggning med intern värmeväxlare. Författarnas egen bild.

## Ejektorer

En annan åtgärd för att minska en enstegsanläggningens totala energikonsumtion är att lägga till en ejektor i expansionssteget. I expansionssteget hos en anläggning som använder sig av en termisk expansionsventil medför tryckfallet energiförluster och lägre kylkapacitet i förångaren. En ejektor ser till att behålla processens energi som skulle gått förlorad och kylkapaciteten i förångaren bibehålls (Sukri et al., 2015), (K. Sumeru, Nasution, & Ani, 2012), (Kasni Sumeru, Sulaimon, Nasution, & Ani, 2014). Ejektorn levererar dessutom köldmediet trycksatt till kompressorn som då inte behöver förbruka lika mycket energi för att höja trycket till driftnivå. Energikonsumtionen kan sjunka med ungefär 13%, vilket leder till att systemets  $COP$  ökar med ungefär 15%, detta jämfört med kylanläggningar som använder sig av en termisk expansionsventil (Sukri et al., 2015). Effekten av en ejektor blir optimal vid relativt höga kondensortemperaturer, därmed är användandet av ejektorer passande i miljöer med varmt klimat (K. Sumeru et al., 2012).

Standardkonfigureringen hos en kylanläggning med ejektor består av kompressor, kondensator, förångare, vätska- och gas-separator och expansionsventil (K. Sumeru et al., 2012) enligt bilden nedan (Figur 3). Köldmediet passerar genom kondensorn efter att ha trycksatts av kompressorn. Efter kondensorn tar sig köldmediet till ejektorn, som agerar som anläggningens expansionsinstrument. Ejektorn skickar köldmediet till en vätska- och gas-separator där köldmediet, beroende på sitt stadie, levereras till kompressorn om köldmediet är gas eller till förångaren om det är vätska (Kasni Sumeru et al., 2014). Under det höga tryck som

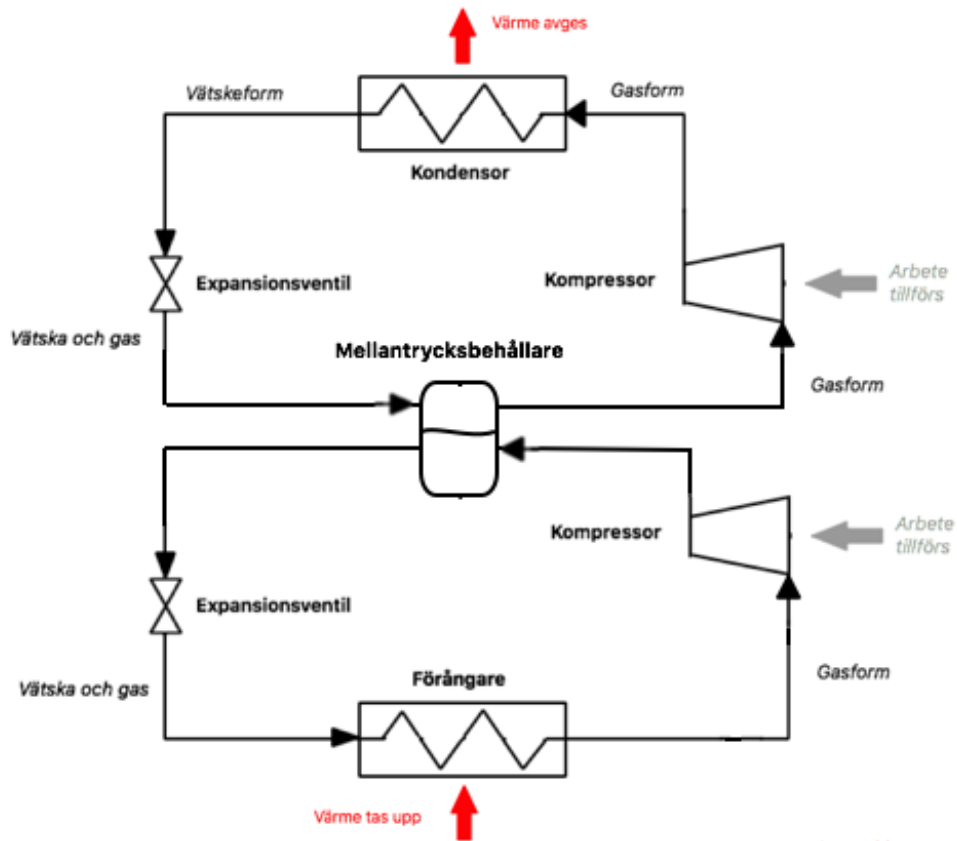
kompressorn levererar köldmediet till ejektorn bildas en så kallad ejektoreffekt. Ejektoreffekten skapas genom att kompressorn levererar det högt trycksatta köldmediet genom ejektorn, köldmediet expanderar i ejektorkammaren och bildar ett undertryck i förångare, enligt samma ovanstående studie av Sumeru et al. (2014). Undertrycket gör att vätskan i separatorn sugs igenom en expansionsventil till förångaren och blir uppvärmd till gasform. Med det här systemupplägget blir det ett högre tryck på kompressorns sug sida och ett större flöde genom förångaren, vilket resulterar i högre kylkapacitet och en energieffektivare kylanläggning (Disawas & Wongwises, 2004).



Figur 3. Flödesschema över en enstegsanläggning med ejektor. Författarnas egen bild.

#### 4.3.2 Tvåstegsanläggningar

Multipla steg av kompression brukar oftast kompletteras med multipla steg av vätske-expansion och mellankylning vilket medför tillkomna komponenter till anläggningen som illustreras i bilden nedan (Figur 4). I en tvåstegsanläggning kan det tillkomma en mellantrycksbehållare efter den första expansionsventilen. I behållaren separeras gasen från vätskan och även gasen från första stegets kompressor leds till behållaren. På så vis kyls den varma gasen ned innan den sugs in till andra stegets kompressor, vilket gör att kompressionen erhåller ett nära inpå *isotermiskt* som ger en ökad effektivitet. Vätskan i mellantrycksbehållaren skickas vidare till den andra expansionsventilen och flödet styrs av en reglerventil som kontrollerar att vätskenivån i mellantrycksbehållaren inte blir för låg. Detta leder också till att mer vätska kommer tillbaka till förångaren, vilket ökar den specifika kyleffekten och köldfaktorn (Nydal, 2007).



Figur 4. Flödesschema över en tvåstegsanläggning. Författarnas egen bild.

Användandet av tvåstegsanläggningar är vanligt i industriella kylsystem som kräver en relativt låg förångningstemperatur. Fördelarna i vunnen effektivitet blir större ju lägre temperatur som önskas få ut av systemet och är dessutom relativt svagt beroende av mellantrycket (trycket på köldmediet mellan de två kompressionsstegen). Detta och även att fördelarna med tvåstegskompression- och expansion blir större när kompressionsförhållandet ökar (pga lägre sugtryck) visades i en studie av Jekel & Reindl (2008) där en jämförelse gjordes av effektiviteten mellan tre olika systemkonfigureringar. Ett system bestod av enstegskompression med ett expansionssteg, det andra av enstegskompression med två expansionssteg och det tredje av tvåstegskompression med två expansionssteg. En intressant slutsats var att oavsett antalet kompressionssteg systemet består av kommer en konfigurering med tvåstegsexpansion näst intill alltid öka effektiviteten hos anläggningen.

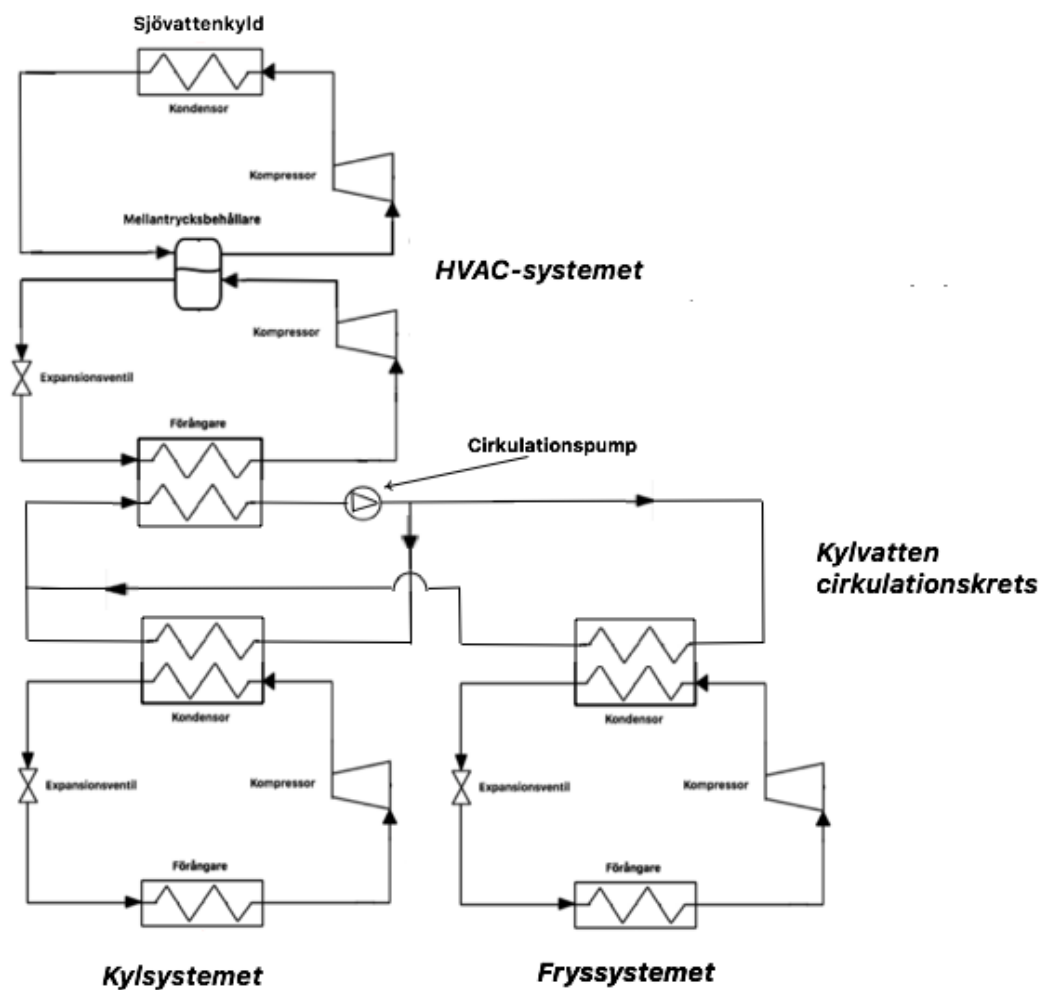
### 4.3.3 Integrering med andra system

#### LNG-fartyg

Ombord på LNG-drivna fartyg är det möjligt att använda LNG-gasens relativt låga temperaturer till så kallad "Cold Recovery" för olika kylsystem. Viking Grace är ett fartyg som drivs av LNG och som har applicerat denna metod där den kalla värmeenergin från LNG-gasen utnyttjas även av luftkonditioneringssystemet vilket enligt Wärtsilä ska leda till att kylkompressorerna minskar sin elförbrukning med signifikanta operationella besparingar och en förbättring av fartygets totala effektivitet som resultat av detta (Wärtsilä, 2017). Enligt Wärtsiläs patent (U.S. Patent No. US20160281932 A1, 2016) fungerar deras Cold Recovery-system sammanfattningsvis på följande sätt. Genom samma utrymme där en förvaringstank med LNG placeras ska en del av ett kylsystems- eller luftkonditioneringssystems flödeskrets ledas. Där sker överföringen av värmeenergin i en värmeväxlingskrets där den kalla LNG-vätskan absorberar värme som köldmediet från kyl- eller luftkonditioneringssystemet lämnar ifrån sig. LNG-vätskan leds sedan tillbaka, direkt eller indirekt, till förvaringstanken och värmeenergin från kyl- eller luftkonditioneringssystemet återanvänds på så vis i bränslet.

#### HVAC

Vanligtvis är kylanläggningar för klimatkontroll (*HVAC*) separerade från kylanläggningar för provianten ombord på passagerarfartyg (Pigani et al., 2016). Normalt använder sig *HVAC*-systemen av kylaggregat för att producera vatten med en temperatur på 7 °C till luftbehandlingsenheterna. I samma ovanstående studie undersöker Pigani et al. (2016) möjligheterna för en systemkonfigurering (system F) där vanliga enstegs-kyl- och frysanläggningar använder sig av *HVAC*-systemets förkylda vatten på 7 °C som kylvatten i respektive kondensator enligt bilden nedan (*Figur 5*). *HVAC*-systemet i sig har två kompressionssteg och en mellantrycksbehållare.



Figur 5. Flödesschema över kaskadanläggning bestående av HVAC-system och kyl- och fryssystem. Författarnas egen bild.

Att ha en systemkonfigurering bestående av två eller flera individuella system, sammankopplade så att förångaren i ett steg samtidigt är kondensator i nästa steg, som arbetar under olika temperaturer och tryck kallas för kaskadanläggning (Nydal, 2007). I ovanstående system kombineras alltså kaskaduppsättningen med en mellanliggande kylvattenkrets. Fördelar med kaskadkopplade anläggningar beskrivs av Nydal (2007) som maximal frihet att i varje steg välja både den kompressorstorlek, det köldmedium och det temperatursteg som ger bästa effektiviteten, utan att riskera för höga tryckgastemperaturer. I studien av Pigani et al. (2016) gav denna systemuppsättning (system F) höga  $COP$ -värden, mellan ca 4 och 6 beroende på köldmedium, för kyl- och frysanläggningarna i jämförelse med referenssystemuppsättningen (system A) där vanliga enstegs-kyl- och frysanläggningar arbetade individuellt enligt standardprincipen och resulterade i  $COP$ -värden på mellan ca 1 och 2,5. Dessa värden var vid relativt hög temperatur på sjövattnet där system F var effektivare än system A, medan vid lägre sjövattemperaturer sjönk  $COP$ -värdena för både kyl- och frysanläggningen med system F.

#### 4.4 Förhindra köldmedieläckage

Ett vanligt problem med kylanläggningar som orsakar både sämre energieffektivitet och negativ miljöpåverkan är läckage av köldmedium. I ett tidigare examensarbete om användandet av köldmedier ombord (Hanson & Ghavampouri, 2014, s. 38) visas det i en sammanställning av läckagekontrolluppgifter rapporterade till Transportstyrelsen att det årliga läckaget från kylanläggningar ombord på svenska fartyg under åren 2008–2012 i genomsnitt var mellan 13–22%. I denna studies enkätundersökning uppger två deltagare att fokusområden för respektive rederier för att förbättra energieffektiviteten hos kylanläggningarna på deras fartyg är att se till att läckagen är inom normala ramar och att befintliga anläggningar hålls i bra trim för att undvika läckage.

I branschen används en tumregel som S. Jacobsen (personlig kommunikation, 10 mars 2017) beskriver som att en kylanläggning som har förlorat 10% av fyllningen använder ungefär 20% mer energi för att producera samma kylkapacitet som samma anläggning utan läckande köldmedium. Detta medför vikten av att utveckla täta och tåliga system som minskar risken för läckage, särskilt ombord på fartyg där utrustningen ständigt utsätts för vibrationer, dynamiska krafter och liknande påfrestningar. S. Jacobsen, som har arbetat med kylanläggningar i över 25 år, tror att det behöver ställas högre kvalitetskrav på material, exempelvis rörledningar som provtrycks till lika högt tryck som kondensorer. Han anser också att det behöver finnas krav på inrapportering till myndigheterna av volymen påfyllt köldmedium som sedan kan uppföljas på EU-nivå om maxgränsen per år skulle överskridas (denna rapportering existerar idag bara i Sverige och bestäms av den svenska f-gasförordningen 29§). Till sist vill han även se mycket detaljerade materialspecifikationer vid nyinstallationer som inte öppnar upp för alternativa ”lågprislösningar”.

Generellt sett uppstår de flesta läckagen från trasiga rörledningar, utslitna eller bristfälliga tätningar och löst sittande kopplingar (Pearson, 2012). Förebyggande åtgärder som Pearson nämner, utöver materialval i designstadiet, i sin artikel (2012) är också vikten av kontinuerligt underhåll av kylanläggningen, inklusive att kontrollera att gastätningar på isolerade rörledningar är i gott skick. Inspektion av oisolerade rörledningar för att upptäcka tecken på förslitning och korrosion, samt att åtgärda dessa när de upptäckts är andra viktiga rutiner som kontinuerligt behöver utföras för att minska risken för läckage i kylanläggningar. I läroboken *Praktisk kylteknik* beskriver Nydal (2007) lösningen på den del av miljöproblemen som kylbranschen är ansvarig för, som täta kylanläggningar. Därför ska läcksökning göras dels före första påfyllningen av köldmedium i en ny anläggning och dels före serviceåtgärder i de fall det går att misstänka att felet beror på köldmedieläckage.

#### 4.5 Uträkning av miljöbelastning

I studiens inledande bakgrundskapitel presenterades begreppet *TEWI* som det mått som används för att bedöma en kylanläggnings totala klimatpåverkan, se avsnitt 2.4.2. Både S. Jacobsen och P. Lindholm uppgav att detta inte är ett begrepp som används av deras respektive företag vid bedömning av kylanläggningars miljöbelastning, utan att de istället använder begreppet *GWP* som alltså är själva köldmediets globala uppvärmningspotential. S. Jacobsen förklarade utförligt att *TEWI* försökte införas för många år sedan i branschen men aldrig blev någon succé. Detta på grund av att det ansågs vara för många olika kalkyleringsmetoder vilket ger en stor osäkerhetsfaktor i resultatet och att det kunde få oseriösa leverantör att framstå som miljövänliga. I stort sett används alltid *GWP* i kombination med *COP* och generatorns verkningsgrad vid bedömning av miljöbelastningen. Han tillägger också att en maximal läckagenivå sätts för anläggningen i samband med detta. I enkätundersökningen till rederierna gavs det blandade svar på frågan om de kände till begreppet *TEWI*. Några kände till det och andra inte, vilket styrker att *TEWI* inte tycks vara ett vanligt sätt för att bestämma kylanläggningars totala klimatpåverkan.

## 5 Diskussion

### 5.1 Resultatdiskussion

Som resultatet visar finns det många olika åtgärder och metoder för att förbättra en kylanläggnings energieffektivitet. Åtgärderna som har presenterats i denna studie är endast ett urval av alla de potentiella förbättringsåtgärder, systemkonfigureringar och komponentval som tidigare forskning har resulterat i. Att avgöra vilka åtgärder som är möjliga att applicera hos kylanläggningar ombord på fartyg har visat sig vara utmanande. I en bransch som är starkt styrd av ekonomiska förutsättningar, som sjöfarten är, är det inte troligt att förvänta sig att något större utrymme i budgeten lämnas åt investeringar som uppfyller mer än vad som förväntas av minimumkraven. Denna bild har också stärkts av kontakten med representanter hos leverantörer som är verksamma inom branschen för kylanläggningar till sjöss. Både S. Jacobsen och P. Lindholm, som båda har lång erfarenhet inom branschen, uppger att det viktigaste för deras respektive företags kunder vid val av anläggningsutformning är investeringskostnaden (personlig kommunikation, 10 mars 2017 respektive 13 mars 2017) medan energieffektiviteten endast förväntas uppfylla de nödvändiga kraven. Många uppfinningsrika förbättringar av komponenter och systemkonfigureringar finns tillgängliga men i slutändan handlar mycket om vilken lösning som blir mest ekonomiskt fördelaktig när de nödvändiga kraven har uppfyllts.

De tydligaste förbättringsåtgärder som faktiskt verkar utvecklas och appliceras för kylanläggningar ombord på fartyg tycks i dagsläget handla mycket om frekvensstyrning av komponenter som förbrukar elektricitet, till exempel kompressorer och fläktar. Hur mycket skillnad detta faktiskt kan göra för kylanläggningars totala energieffektivitet har varit svårt att hitta några exakta siffror på, liksom de flesta andra åtgärder som har undersökts i tidigare vetenskapliga studier. Det går dock helt klart att argumentera för att det ger en tydlig positiv inverkan på effektiviteten, då till exempel kompressorns belastning styrs av hur mycket den faktiskt behöver vid det aktuella driftläget, istället för att alltid belastas för fullt även när det inte är nödvändigt. Även metoden som kallas Economizer där utomhusluften används för att kyla utrymmen när utetemperaturen tillåter det är ett välanvänt sätt att avlasta kompressorn som denna studie har presenterat.

Frekvensstyrning av komponenter som konsumerar elektricitet är dessutom något som överlag tycks vara en populär lösning som börjar införas allt mer inom sjöfarten för att minska fartygens totala elförbrukning. Det är också något som författarna till denna studie har upplevt både ombord på fartyg under praktikperioder och i undervisning. I och med att frekvensstyrning redan är känt inom sjöfarten är det också logiskt att tro att det är en effektiviseringsåtgärd som kommer att kunna bli allt mer aktuell för just kylanläggningar ombord på fartyg inom en överskådlig framtid. Ytterligare en komponentdesign som har visat sig stå i fokus är utvecklingen av kondensorer. Lösningen med att utforma små kanaler på insidan av rören inuti kondensorn har i tidigare studier visat sig öka energieffektiviteten hos kylanläggningen och är ett spännande exempel på förbättringsåtgärder hos komponenterna. Det är dock svårt att avgöra



om det är en bra lösning att applicera ombord på fartyg. Tillverkningskostnad är inget som har presenterats i tidigare studier vilket givetvis är något som måste vägas in i slutändan.

Ett annat område som denna studie har visat behöver starka förbättringsåtgärder för att resultera i en ökad energieffektivitet hos kylanläggningar är problemet med läckage av köldmedium. Att en kylanläggnings energiåtgång är ungefär 20% högre när 10% av köldmediet har förlorats, vilket S. Jacobsen uppgav, är en kraftig försämring av effektiviteten som dessutom känns väldigt onödig. Det borde inte innebära någon tydlig negativ ekonomisk inverkan att se till att kylanläggningarna håller sådan standard att läckagen minskas rejält. Läckagesiffrorna som redovisades av det tidigare examensarbetet av Hanson och Ghavampouri (2014) är förvånansvärt höga med tanke på att det i Sverige ändå inrapporteras läckagekontrolluppgifter till Transportstyrelsen. Minskade läckage skulle uppenbarligen medföra besparingar i att inte behöva fylla på köldmedium lika ofta, kylanläggningarna skulle arbeta med högre effektivitet och miljön skulle besparas på utsläpp av köldmedium vilket borde slå ut de eventuella merkostnader det kan innebära att förstärka läckagetätheten hos kylanläggningarna. Det som kan tala för att det är svårare att motverka läckage än vad det spekuleras om i denna diskussion är att det till sjöss är en utmanande miljö, med mycket vibrationer och dynamiska krafter som kan göra det svårt att få det helt tätt i exempelvis rörledningar och kopplingar. Men detta medför också vikten av att kontinuerligt utföra underhåll av kylanläggningens komponenter, vilket förstås är en aspekt som är svår att kontrollera då det i slutändan blir upp till de berörda att se till att anläggningarna hålls i gott skick. För att kunna kontrollera det bättre skulle fler och tydligare krav kunna ställas på läckagetätheten med till exempel kännbara viten som påföljd om dessa inte efterföljs som S. Jacobsen föreslog.

Ett antal olika systemkonfigureringar har presenterats i denna studie. Några av konfigurationerna är av sådan typ som lämpar sig bäst för applicering hos till exempel industriella kylanläggningar iland där behovet är större av sådan kylkapacitet som ger möjlighet till mycket lägre temperaturer jämfört med hur behovet ser ut ombord på fartyg. Tvåstegsanläggningar är typexempel på systemkonfigurering som blir effektivare än enstegsanläggningar när det krävs en stor temperaturdifferens mellan förångnings- och kondenseringstemperatur. Vad som också måste vägas in i bedömningen av systemkonfigureringar är att det till sjöss ställs ännu större krav på säkerhet, vikt och dimensioner jämfört med landbaserade anläggningar (Pigani et al., 2016). Det är därför inte säkert att en systemkonfigurering som ger en ökad energieffektivitet hos landbaserade kylanläggningar ens har möjlighet att installeras ombord på fartyg. Ytterligare en aspekt att ta hänsyn till i verkligheten är att de olika systemkonfigureringarna kan fungera olika bra beroende på vilket köldmedium som är tänkt att användas, vilket denna studie har exkluderat att innefatta i resultatredovisningen. En systemkonfigurering som definitivt skulle göra en positiv skillnad, åtminstone i områden med varmare klimat där sjövattemperaturen är högre, är när HVAC-anläggningen integreras med kyl- och/eller frysanläggningen via en kylvattencirkulationskrets. Detta tillåter kyl- och frysanläggningarna att leverera samma kylkapacitet utan att behöva belastas hårdare trots högre sjövattemperaturer, se *Figur 5*

avsnitt 4.3.2. Även att integrera kylanläggningen med LNG-drivna fartygs bränslesystem är en lösning som troligen kommer att appliceras mer och mer allt eftersom fler LNG-fartyg byggs.

Systemkonfigureringen med en intern värmepump i en vanlig enstegsanläggning visade sig ge blandade resultat beroende på dels hur anläggningen skall användas och dels hur pass anpassade övriga komponenter i systemet är. Dock är det en relativt enkel åtgärd som kan ge positiv inverkan på anläggningens energieffektivitet om systemet är välanpassat vilket får ses som ett bra förbättringsalternativ till enstegsanläggningar. När det handlar om att lägga till komponenter till kylanläggningen blir det en svår avvägning att avgöra om det lämpar sig att applicera ombord på fartyg. Som med konfigureringen där en ejektor läggs till, i det fallet även en vätska- och gasseparator, innebär ytterligare systemkomponenter att det krävs större utrymme för anläggningen, vilket skulle kunna tala emot trovärdigheten i att dessa konfigurationer lämpar sig ombord. Men både ejektorverkan och intern värmepump har visat sig kunna ge goda förbättringar i energieffektiviteten så i mån av utrymme känns det absolut som bra lösningar.

Ett förvånande resultat från studien var att *TEWI* inte är ett begrepp som tycks användas av leverantörer i branschen. På förhand framstod detta begrepp som ett brett använt begrepp, främst av att flera vetenskapliga studier diskuterade begreppet och använde det i utvärderingar av effektiviseringsåtgärder. Möjligen är det så att det kan skilja sig mycket mellan vad verksamma företag inom en viss bransch använder sig av för benämningar jämfört med forskare inom samma område, vilket kan vara en bidragande faktor till att vissa effektiviseringsåtgärder används mindre än andra. Samtidigt är det absolut största området för att effektivisera kylanläggningar och att minska dess klimatpåverkan framtagandet av köldmedier som ska klara av kommande restriktioner. Då är *GWP* ett mycket mer användbart begrepp då det utvärderar själva köldmediet istället för hela anläggningen. Sedan kan det dock ifrågasättas varför sådant fokus ligger på att framställa köldmedier istället för att utveckla och förbättra systemet och dess komponenter för att undvika onödiga läckage, då det i vetenskapliga studier har visat sig att mer miljövänliga köldmedier leder till sämre energieffektivitet som istället ger högre koldioxidutsläpp i form av ökad elförbrukning. Det kan konstateras att det är en svår balansgång mellan att antingen utveckla mer miljövänliga köldmedier som inte har lika stor miljöpåverkan vid läckage och att utveckla, förmodligen ekonomiskt kostsamma, pålitliga och täta system som har betydligt mindre läckage.

## 5.2 Metoddiskussion

Valet av metoder för att genomföra kartläggningen av energieffektiviseringsåtgärder bestämdes efter hur tillämpningsbara dessa skulle vara till studien. Validiteten hos studien kan diskuteras utifrån de valda metoderna. I och med att syftet med studien var att kartlägga energieffektiviseringsåtgärder var det en nödvändighet att studera litteratur för att bli mer pålästa i ämnet och att samla in fakta. Detta också för att vara säkra på att studiens resultat skulle motsvara syftet. Det fanns dock svårigheter i att söka upp användbart vetenskapligt

material då relativt få tidigare studier har utförts för just kylanläggningar ombord på fartyg. Det har också varit svårt att hitta siffror som visar hur stor skillnad olika åtgärder faktiskt skulle kunna resultera i. Även ekonomiska aspekter är sådant som sällan redovisas i vetenskapliga studier inom området, vilket har bidragit till svårigheten i att bedöma om åtgärderna som har presenterats i denna studie faktiskt är applicerbara ombord på fartyg.

Att komplettera det insamlade materialet från vetenskapliga studier och läroböcker med att undersöka vilka åtgärder som verksamma inom branschen faktiskt arbetar med för att förbättra kylanläggningar ombord på fartyg gav dock bra varierande perspektiv på studien. Reliabiliteten i detta metodval kan dock diskuteras. Förhoppningarna var att få in ännu fler svar på enkätundersökningen och möjligtvis ett fåtal till kontakter hos verksamma leverantörer inom branschen. På så sätt hade mer underlag till argumenten kunnat erhållas och därmed också en större tillförlitlighet till studien. Det var dock därför litteraturstudien valdes sin huvudmetod då det alltid är osäkert att veta hur många svar en enkätundersökning kommer att resultera i samt att det kan vara svårt att få kontakt med rätt personer ute på företagen.

Urvalet av personer att skicka enkätundersökningen till bestämdes utifrån vad som kunde anses bidra med relevanta inslag och reliabilitet till studien. Sweship Energy består av rederier som använder detta nätverk som en plattform för diskussion av energieffektiviseringsåtgärder för fartyg, vilket gav studien viktig insikt i det dagliga arbete som pågår i rederiverksamheter. Dock är det ett relativt nystartat initiativ som etablerades år 2015 och i flera av de inkomna svaren uppger deltagarna att rederiernas fokus just nu ligger i andra områden än just kylanläggningseffektivisering. Detta kan bidra till ytterligare diskussion om studiens validitet, då enkätundersökningen egentligen inte resulterade i särskilt nämnvärt många förslag på effektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg. Undersökningen gav dock studien värdefulla perspektiv på vilka områden rederier just nu lägger störst fokus i när det gäller energieffektivisering av fartyg. Detta medförde att jämförelsen mellan leverantörers och kunders respektive avsikter att förbättra kylanläggningars energieffektivitet fick nya proportioner, vilket har bidragit till de slutsatser som presenteras i denna studie.

De två huvudrespondenterna hos leverantörer som kontakt har upprätthållits med för att bredda studiens innehåll visade sig ge mycket bra och intressanta svar på frågorna som de fick. Båda personerna har arbetat länge inom kylbranschen med inriktning mot just kylanläggningar till sjöss och får därmed ses som mycket pålitliga källor vilket också stärker studiens reliabilitet. Tack vare deras erfarenheter kunde studien därmed erhålla en synvinkel ur leverantörernas perspektiv, där personer som får antas ha tagit del av kylanläggningars utveckling genom åren har bidragit med värdefull information till studien. Att ställa åsikter från leverantörer som utför service av befintliga anläggningar och även nyproduktion av system och komponenter mot vetenskapligt material var också mycket intressant. På så vis blev det också enklare att avgöra vilka effektiviseringsåtgärder som var värda att sätta sig in i.

### **5.3 Etik**

De personerna som arbetar hos leverantörer inom branschen som nämns vid namn i denna studie har blivit tillfrågade om deras tillåtelse till detta. Just de två personerna valdes att namnges på grund av den mycket goda hjälp de har bidragit med till studien. I enkätundersökningen fick respondenterna vara anonyma då det inte var relevant för studien att nämna dessa vid namn.

## 6 Slutsatser

Syftet med studien var att studera och kartlägga energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg. Denna studie har presenterat ett flertal olika effektiviseringsåtgärder och diskuterat dessa utifrån de två huvudfrågorna – hur driften av kylanläggningar kan optimeras och hur energieffektiviteten kan ökas genom ändrad system- och/eller komponentdesign. Resultatet av litteraturstudier, enkätundersökning och kontakt med verksamma inom branschen har visat att för att optimera driften av kylanläggningar till sjöss finns det flera åtgärder som är möjliga att applicera för att öka energieffektiviteten. En mycket lovande driftoptimering är frekvensstyrning av kompressorer och i vissa fall även andra komponenter, en lösning som i allt större utsträckning appliceras inom sjöfarten. Att ta tillvara på utomhusluften för att kyla utrymmen när utetemperaturen tillåter det är en annan relativt enkel åtgärd som givetvis optimerar driften då kylanläggningen i sådana fall avlastas när det inte är nödvändigt att använda den.

Flera olika komponentdesigner och systemkonfigureringar som ger ökad energieffektivitet har presenterats, där den kanske troligaste förbättringsåtgärden ligger i att utveckla och förbättra komponenter och system för att undvika läckaget av köldmedium som är en stor orsak till förlorad energieffektivitet i kylanläggningen. Trots att det är känt att läckaget är en så pass bidragande faktor är det i dagsläget endast Sverige som har krav på inrapportering av läckkontrolluppgifter. Ytterligare ett konstaterande kan göras i att de åtgärder för förbättrad system- och/eller komponentdesign som presenterats är svåra att bedöma lämpligheten av att kunna appliceras i kylanläggningar ombord på fartyg. Möjligtvis på grund av ekonomiska aspekter, då sjöfarten är en bransch som präglas av ekonomiska förutsättningar finns det kanske inte mycket utrymme att budgetera för åtgärder som skulle göra större skillnad än vad som är absolut nödvändigt. En annan aspekt är att intresset för att utveckla och förbättra just kylanläggningarna på fartygen för att uppnå en ökad energieffektivisering tycks vara svårt, något som styrkts genom kontakten med leverantörer och rederier.

### 6.1 Förslag till vidare utredning

Det kan konstaterats att det finns flera lovande energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar ombord på fartyg. Frågan är hur intresset för att utveckla mer hållbara tekniker med en minimal miljöbelastning ska öka. Som förslag på fortsatt arbete inom området föreslås därför;

- en fördjupning i hur energieffektiviseringsåtgärder för kylanläggningar som finns tillgängliga idag ska bli mer attraktiva för att appliceras ombord på fartyg,
- en studie om hur köldmedieläckage påverkar ett fartygs energieffektivitet och ekonomi

## Referenser

- Andersson, K., Brynolf, S., & Lindgren, J. F. (2016). *Shipping and the environment - Improving environmental performance*.
- Andy Pearson. (2012). Refrigeration Applications: Reducing Leakage. *ASHRAE Journal*, 54(7). Retrieved from [http://www.techstreet.com/ashrae/standards/refrigeration-applications-reducing-leakage?product\\_id=1836389#jumps](http://www.techstreet.com/ashrae/standards/refrigeration-applications-reducing-leakage?product_id=1836389#jumps)
- Dalkilic, A. S., & Wongwises, S. (2010). A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(9), 1340–1349. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.006>
- Denscombe, M. (2016). *Forskningshandboken - För småskaliga forskningsprojekt inom samhällsvetenskaperna* (3:2).
- Disawas, S., & Wongwises, S. (2004). Experimental investigation on the performance of the refrigeration cycle using a two-phase ejector as an expansion device. *International Journal of Refrigeration*, 27(6), 587–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.04.002>
- Ekren, O., Sahin, S., & Isler, Y. (2010). Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve. *International Journal of Refrigeration*, 33(6), 1161–1168. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.05.005>
- Energy management system for refrigeration systems. (1981). Retrieved from <https://www.google.com/patents/US4325223>
- Feiza, M. (2015). A GUIDE FOR ASSESSING VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEMS, FOR FUTURE MARINE ENGINEERS. *Universitatii Maritime Constanta. Analele*, 16(23), 61–66. Retrieved from <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com/docview/1704264837?accountid=10041>
- Fischer, S. K. (1993). Total equivalent warming impact: a measure of the global warming impact of CFC alternatives in refrigerating equipment. *International Journal of Refrigeration*, 16(6), 423–428. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(93\)90059-H](https://doi.org/10.1016/0140-7007(93)90059-H)
- Forbes Pearson, S. (2003). How to improve energy efficiency in refrigerating equipment. Retrieved April 26, 2017, from [http://www.iifir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteTech\\_17\\_EN.pdf](http://www.iifir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteTech_17_EN.pdf)
- Han, Y., Liu, Y., Li, M., & Huang, , jin. (2012). Energy Procedia A review of development of micro-channel heat exchanger applied in air-conditioning system. *Energy Procedia*, 14, 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.910>
- Jekel, T. B., & Reindl, D. T. (2008). SINGLE- OR TWO-STAGE COMPRESSION. *ASHRAE Journal*, 50(8), 46-48-51. Retrieved from <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com/docview/220464758?accountid=10041>
- Jiang, M., Wu, J., Wang, R., & Xu, Y. (2011). Research on the control laws of the electronic expansion valve for an air source heat pump water heater. *Building and Environment*, 46(10), 1954–1961. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.003>

- Karlsson, S. (2016). No Title. Retrieved from <http://www.google.com/patents/US20160281932?hl=sv&cl=en>
- Klein, S. A., Reindl, D. T., & Brownell, K. (2000). Refrigeration system performance using liquid-suction heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 23(8), 588–596. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(00\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00008-6)
- L\_2014150SV.01019501.xml. (2014). Retrieved March 22, 2017, from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014R0517&from=SV>
- Lazzarin, R., & Noro, M. (2008). Experimental comparison of electronic and thermostatic expansion valves performances in an air conditioning plant. *International Journal of Refrigeration*, 31(1), 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.09.004>
- Li, P., Li, Y., & Seem, J. E. (2010). Efficient Operation of Air-Side Economizer Using Extremum Seeking Control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 132(3), 31009. <https://doi.org/10.1115/1.4001216>
- Liebenberg, L., & Meyer, J. P. (2008). Refrigerant Condensation Flow Regimes in Enhanced Tubes and Their Effect on Heat Transfer Coefficients and Pressure Drops. *Heat Transfer Engineering*, 29(6), 506–520. <https://doi.org/10.1080/01457630801891532>
- Makhnatch, P., & Khodabandeh, R. (2014). The Role of Environmental Metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the Selection Of Low GWP Refrigerant. *Energy Procedia*, 61, 2460–2463. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.023>
- Nydal, R. (2007). *Praktisk kylteknik*. Svenska kyltekniska föreningen. Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/11199965>
- Park, S.-K., Kim, H., Ahn, H., & Park, H.-S. (2006). Study on the Reduction of Fuel Consumption in the A/C System, used Variable Displacement Swash-Plate Compressor and the Performance Improvement by Field Test. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0164>
- Park, Y. C., Kim, Y. C., & Min, M.-K. (2001). Performance analysis on a multi-type inverter air conditioner. *Energy Conversion and Management*, 42(13), 1607–1621. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00147-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00147-3)
- Patil, P. A. (2012). Performance Analysis of HFC-404A Vapor Compression Refrigeration System Using Shell and U-Tube Smooth and Micro-Fin Tube Condensers. *Experimental Heat Transfer*, 25(2), 77–91. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/08916152.2011.562343?needAccess=true>
- Pigani, L., Boscolo, M., & Pagan, N. (2016). Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact. *International Journal of Refrigeration*, 64, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.01.016>
- Qi, Z., Zhao, Y., & Chen, J. (2010). Performance enhancement study of mobile air conditioning system using microchannel heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 33(2), 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.08.014>
- Şahin, A. Ş. (2011). Performance analysis of single-stage refrigeration system with internal heat exchanger using neural network and neuro-fuzzy. *Renewable Energy*, 36(10), 2747–2752. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.009>
- Seem, J. E., & House, J. M. (2010). Development and evaluation of optimization-based air economizer strategies. *Applied Energy*, 87(3), 910–924.

- <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.044>
- Shishov, V. V., & Talyzin, M. S. (2015). Improving the energy efficiency of refrigeration plants by decreasing the temperature difference in air-cooled condensers. *Thermal Engineering*, 62(9), 652–655. <https://doi.org/10.1134/S0040601515090098>
- Stosic, N. (2004). Screw Compressors in Refrigeration and Air Conditioning. *HVAC&R Research*, 10(3), 233–263. Retrieved from <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com/docview/213536473?accountid=10041>
- Sukri, M. F., Musa, M. N., Senawi, M. Y., & Nasution, H. (2015). Achieving a better energy-efficient automotive air-conditioning system: a review of potential technologies and strategies for vapor compression refrigeration cycle. *Energy Efficiency*, 8(6), 1201–1229. <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9389-4>
- Sumeru, K., Nasution, H., & Ani, F. N. (2012). A review on two-phase ejector as an expansion device in vapor compression refrigeration cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4927–4937. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.058>
- Sumeru, K., Sulaimon, S., Nasution, H., & Ani, F. N. (2014). Numerical and experimental study of an ejector as an expansion device in split-type air conditioner for energy savings. *Energy and Buildings*, 79, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.043>
- Torrella, E., Larumbe, J. A., Cabello, R., Llopis, R., & Sanchez, D. (2011). A general methodology for energy comparison of intermediate configurations in two-stage vapour compression refrigeration systems. *Energy*, 36(7), 4119–4124. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.034>
- Wärtsilä. (2017). Natural gas-fuelled ferry VIKING GRACE. Retrieved April 4, 2017, from <http://www.wartsila.com/encyclopedia/term/natural-gas-fuelled-ferry-viking-grace>
- Yu, J., Ren, Y., Chen, H., & Li, Y. (2007). Applying mechanical subcooling to ejector refrigeration cycle for improving the coefficient of performance. *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1193–1199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.009>



## Bilagor

Bilaga 1 – Frågor till kontaktpersoner hos företag verksamma inom kylbranschen

Vilken tjänst/roll har du i ditt företag?

Hur länge har du arbetat med kylanläggningar?

Hur ser den vanligaste typen av kylanläggningar ut som ditt företag levererar?

Vad tycker kunder är viktigast vid val av anläggning? (t ex investeringskostnad, energieffektivitet)

Vad försöker ditt företag göra för att öka energieffektiviteten hos kylanläggningar?

Hur mycket försöker ni optimera komponenterna i kylanläggningen efter vad för sorts köldmedium som ska användas?

Är det någon system-komponent som är i särskilt fokus när det handlar om att öka energieffektiviteten?

Vilka tydligaste hinder finns det för att öka energieffektiviteten hos kylanläggningar?

Ägnar ni er åt något särskilt projekt just nu, i så fall vad?

Vad har ni för mål inför framtiden?

Använder ni begreppet TEWI vid en bedömning av kylanläggningens miljöbelastning?

Du nämnde att de flesta fartyg har läckor i sina kylanläggningar, hur tror du att man skulle kunna lösa det problemet?<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Exklusiv följdfråga till huvudrespondent.

## Bilaga 2 – Frågorna i enkätundersökningen

Vilken typ av fartyg representeras av ert rederi? (tank, ropax, roro osv)

Vilken tjänst/roll har du i företaget?

Hur länge har du jobbat med energieffektivisering?

Vad försöker ni göra för att uppnå bättre energieffektivitet av kylanläggningar ombord på fartyg?

Är det någon av komponenterna som är i särskilt fokus när det handlar om att effektivisera anläggningen och i så fall varför?

Vilket är det största hindret i att utveckla energieffektiviteten hos kylanläggningar?

Vad ställer ni för krav hos leverantörerna?

Har ni en rekommenderad systemdesign från leverantören, hur ser den ut i så fall?

Är det något speciellt projekt ni ägnar er åt nu, i så fall vad?

Märker ni av påtryckningar från miljöhåll, i så fall hur?

Känner du till begreppet TEWI?

Vad har ni för mål inför framtiden?