



CHALMERS



Energieffektiviteten hos konverterade kylanläggningar ombord på fartyg

En studie om konverteringsalternativ för maritima kylanläggningar

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

TOMMY FREJD

OLOF HIMMELMANN

RAPPORTNR. SI-17/199

Energieffektiviteten hos konverterade
kylanläggningar ombord på fartyg

En studie om konverteringsalternativ för maritima kylanläggningar

TOMMY FREJD
OLOF HIMMELMANN

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

Energieffektiviteten hos konverterade kylanläggningar ombord på fartyg
En studie om konverteringsalternativ för maritima kylanläggningar

The energy efficiency of retrofitted refrigeration plants on board ships
A study on conversion options for maritime refrigeration plants

TOMMY FREJD
OLOF HIMMELMANN

© TOMMY FREJD, 2017.
© OLOF HIMMELMANN, 2017.

Rapportnr. SI-17/199
Institutionen för sjöfart och marin teknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Kylkompressorer för en proviantkylanläggning ombord på ett Ro-Pax fartyg

Tryckt av Chalmers
Göteborg, Sverige, år 2017

Energieffektiviteten hos konverterade kylanläggningar ombord på fartyg

En studie om konverteringsalternativ för maritima kylanläggningar

TOMMY FREJD

OLOF HIMMELMANN

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Ombord på alla Ro-Pax fartyg finns det en kylanläggning innehållande någon typ av köldmedium. De flesta köldmedier har en negativ påverkan på miljön, vissa bidrar till växthuseffekten och en del är även skadliga för ozonlagret. Internationella regelverk för maritima kylanläggningar förbjuder endast användandet av köldmedier som påverkar ozonlagret. Köldmedier som bidrar till växthuseffekten regleras inte av internationella regler men svenska myndigheter har valt att tillämpa EU:s regler för landbaserade kylanläggningar även på svenskregistrerade fartyg. Nya EU regler träder i kraft år 2020 gällande användandet av köldmedier med hög växthuspåverkan vilket kommer påverka de svenskregistrerade fartygen. Därför är det angeläget att studera olika konverteringsalternativ för befintliga anläggningar.

Denna studie avser att teoretiskt undersöka hur energieffektiviteten och den totala klimatpåverkan påverkas vid konvertering av en proviantkylanläggning med R404A som köldmedium, samt undersöka olika köldmediers lämplighet som konverteringsalternativ med avseende på kylegenskaper och miljöpåverkan.

Arbetet har utförts i form av en fallstudie av en kylanläggning ombord på ett Ro-Pax fartyg där syftet är att använda anläggningen som referens för att genomföra teoretiska beräkningar med alternativa köldmedier. Genom insamling av driftsdata och information om referensanläggningen beräknas anläggningens prestanda. Därefter beräknas anläggningens prestanda för alternativa köldmedier som har lägre växthuspåverkan än anläggningens nuvarande köldmedium.

De köldmedier som undersöktes i studien resulterade i bättre energieffektivitet och mindre total klimatpåverkan än R404A. Köldmedierna; R407C, R407F, R454A, R449A, R455A, R448A och R442A är tänkbara konverteringsalternativ för referensanläggningen då de har bra egenskaper och mindre klimatpåverkan. Fortsatta studier bör omfatta mer detaljerade analyser med avseende på vad som behöver åtgärdas i befintliga kylanläggningar för en i alla avseenden lämplig konvertering.

Nyckelord: Ro-Pax fartyg, kylanläggning, köldmedium, klimatpåverkan, TEWI, GWP, konvertering, energieffektivisering, fallstudie

Abstract

Onboard all Ro-Pax vessels there is a refrigerant plant containing some type of refrigerant. Most refrigerants have a negative impact on the environment, some contribute to the greenhouse effect, and some are also harmful to the ozone layer. International regulations for marine refrigeration plants only prohibit the use of refrigerants that affect the ozone layer. Refrigerants that contribute to the greenhouse effect are not regulated by international regulations, but Swedish authorities have chosen to apply EU regulations for land-based refrigeration plants to Swedish-registered vessels. New EU regulations will come into force in 2020 regarding the use of refrigerants with a major impact on the greenhouse effect, which will affect the Swedish-flagged vessels. Therefore, it is important to study different conversion options for existing refrigeration plants.

This study intends to theoretically investigate how energy efficiency and overall climate impact are affected when converting a provision refrigeration plant with R404A as a refrigerant, as well as investigating the suitability of various refrigerants as conversion options with regard to cooling properties and environmental impact.

The work has been carried out in the form of a case study of a refrigeration plant onboard a Ro-Pax vessel where the purpose is to use the plant as a reference to carry out theoretical calculations with alternative refrigerants. Through the collection of operating data and information about the reference plant, the performance of the plant is calculated. Thereafter, the plant's performance is calculated for alternative refrigerants that have a lower greenhouse effect than the current refrigerant of the plant.

The refrigerants investigated in the study resulted in better energy efficiency and less overall climate impact than the R404A. Refrigerants; R407C, R407F, R454A, R449A, R455A, R448A and R442A are potential conversion options for the reference facility, as they have good characteristics and less climate impact. Continuous studies should include more detailed analyses regarding what needs to be addressed in existing refrigeration plants for a suitable conversion.

Keywords: Ro-Pax vessel, refrigeration plant, refrigerants, climate impact, TEWI, GWP, conversion, energy efficiency, case study

Förord

Författarna vill tacka vår handledare Cecilia Gabrielli (Universitetslektor vid Sjöfart och marin teknik/Maritim miljö och energisystem) och Bo Frejd (f.d. Konstruktionschef på f.d. STAL Refrigeration AB) som har hjälpt oss genom detta projekt. Vi vill också tacka Ro-Pax fartyget som gav oss tillgång till deras proviantkylanläggning som denna studie använt som en referensanläggning.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Förord	iii
Figurförteckning	vii
Tabellförteckning	viii
1 Inledning	1
1.1 Syfte.....	1
1.2 Frågeställning.....	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Bakgrund och teori	3
2.1 Historisk bakgrund	3
2.2 Kylteknik	4
2.2.1 Kompressorn 1→2	5
2.2.2 Kondensorn 2→3	6
2.2.3 Strypventilen 3→4	6
2.2.4 Förångaren 4→1	6
2.2.5 Kylprocessen.....	6
2.2.6 COP	7
2.3 Köldmedier	7
2.3.1 Typer av köldmedier.....	8
2.3.2 Varianter på köldmedier	10
2.3.3 Köldmedier – en sammanfattande tabell	14
2.3.4 Säkerhetsklass	16
2.4 Miljön.....	17
2.4.1 Ozonlagret	17
2.4.2 ODP.....	17
2.4.3 Växthuseffekten	17
2.4.4 GWP.....	18
2.4.5 TEWI	18
2.5 Regelverk.....	19
2.5.1 Montrealprotokollet.....	19
2.5.2 EU-reglementet (F-gas förordningen)	20
2.5.3 Svenskt reglemente – Naturvårdsverket.....	20

2.5.4	Svenskt reglemente - Transportstyrelsen	21
2.5.5	Sjöfartsrelaterade regelverk.....	21
2.6	<i>Referensanläggningen</i>	22
2.7	<i>Tidigare Studier</i>	23
2.7.1	“Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline”	23
2.7.2	“Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact”	24
2.7.3	“Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration”	25
3	Metod	27
3.1	<i>Fallstudie</i>	27
3.2	<i>Litteraturgenomgång</i>	27
3.3	<i>Insamling av data</i>	27
3.4	<i>Beräkningsgång</i>	28
3.4.1	Referensanläggningen - förenklad modell	28
3.4.2	Verkningsgrader för referensanläggningens kompressor.....	28
3.4.3	Prestanda för referensanläggningen.....	29
3.4.4	Prestanda med alternativa köldmedium.....	30
3.4.5	TEWI beräkning	31
4	Resultat	32
4.1	<i>Prestanda och effektivitet</i>	32
4.1.1	Kyleffekt vid en direkt konvertering.....	32
4.1.2	Kompressoreffekt vid en direkt konvertering.....	33
4.1.3	Kompressoreffekt.....	34
4.1.4	Energieffektivitet (köldfaktor).....	35
4.2	<i>Prestanda och effektivitet relativt referensanläggningen</i>	36
4.2.1	Värmeeffekt.....	36
4.2.2	Kompressoreffekt.....	37
4.2.3	Köldfaktor	38
4.3	<i>Totala klimatpåverkan</i>	39
4.3.1	TEWI	39
4.3.2	GWP & TEWI.....	40
5	Diskussion	41
5.1	<i>Metoddiskussion</i>	41

5.2	<i>Resultatdiskussion</i>	42
5.3	<i>Reliabilitet och validitet</i>	44
6	Slutsatser	46
6.1	<i>Vidare forskning</i>	46
	Referenser	47
	Bilagor	1
	<i>Bilaga 1</i>	1
	<i>Bilaga 2</i>	9
	<i>Bilaga 3</i>	10
	<i>Bilaga 4</i>	11

Figurförteckning

Figur 1 - Köldmediernas Historia Egen bild inspirerad av (Pearson, 2005)	4
Figur 2 - Kylprocess Egen bild inspirerad av (Nydal, 2010)	5
Figur 3 - Kylprocess med komponenter Egen bild inspirerad av (Nydal, 2010).....	7
Figur 4 - Glide förklaring Egen bild inspirerad av (Withouse & Ashrae, 2016)	9
Figur 5 - Beteckningsförklaring R134a (Hundy et al., 2008)	11
Figur 6 - Beteckningsförklaring R404A (Hundy et al., 2008).....	11
Figur 7 - ASHRAE Säkerhetsgrupper Egen bild inspirerad av (Reiniche, 2010).....	16
Figur 8 - Växthuseffekten (Egen bild)	18
Figur 9 - Globala utsläpp av ozonedbrytande ämnen 1984-2004 (Naturvårdsverket, 2007)	21
Figur 10 - Schematisk ritning av referensanläggningen (Egen bild).....	22
Figur 11 - Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact (Pigani et al., 2016)	25
Figur 12 - Kompressorns verkningsgrad	28
Figur 13 – Jämförelse av kyleffekten vid en direkt konvertering	32
Figur 14 – Kompressoreffekt vid direkt konvertering	33
Figur 15 - Jämförelse av kompressoreffekten	34
Figur 16 - Jämförelse av köldfaktorn	35
Figur 17 - Relativ skillnad på värmeeffekten vid kyleffekten 12,5kW	36
Figur 18 - Relativ skillnad på kompressoreffekten vid kyleffekten 12,5kW	37
Figur 19 - Relativ skillnad av köldfaktor	38
Figur 20 - TEWI Jämförelse	39
Figur 21 - GWP & TEWI relativt R404A	40

Tabellförteckning

Tabell 1 - Köldmedium	15
Tabell 2 - Köldmediernas ASHRAE Säkerhetsklass	16
Tabell 3 - Dimensioner kyl och frysrum.....	23
Tabell 4 - Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline.....	24
Tabell 5 - Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration	26

Terminologi

Beräkningar

COP_k	Köldfaktor
h	Entalpi [kJ/kg]
\dot{m}_R	Köldmediets massflöde i systemet [kg/s]
η_v	Volymetrisk verkningsgrad [%]
η_I	Isentropisk verkningsgrad [%]
p_f	Tryck på kompressorns sug sida [Bar(a) (absoluttryck)]
p_k	Tryck på kompressorns trycksida [Bar(a)]
\dot{P}_e	Elektrisk effekt för elmotor [kW]
\dot{P}_k	Kompressoreffekt [kW]
\dot{Q}	Värmeenergi avgiven/tillförd [kW]
\dot{V}_{max}	Maximalt volymflöde för kompressor [m ³ /h]
$\dot{V}_{verkliga}$	Verkligt volymflöde för kompressor [m ³ /h]
v	Volymiteten för köldmediet [m ³ /kg]

1 Inledning

Kylanläggningar finns ombord på alla större fartyg, bl.a. som AC- respektive proviantkylanläggningar. En stor del av de köldmedier som används idag ombord påverkar klimatet negativt om de kommer ut i atmosfären. Kylanläggningar bidrar därför till växthuseffekten på grund av läckage eller andra ofrivilliga utsläpp av köldmedium och vid indirekta utsläpp av koldioxid från till exempel dieselgeneratorer som producerar elektricitet till anläggningen. Därmed är det relevant att undersöka anläggningens totala klimatpåverkan (Total Equivalent Warming Impact, TEWI).

Klorfluorkarboner (CFC) också kallade freoner, har använts som köldmedium i kylanläggningar och dessa konstgjorda medier uppmärksammades framförallt på grund av att de bryter ner ozonskiktet, men bidrar även till växthuseffekten. Utsläpp av köldmedier är det näst största bidraget globalt till växthuseffekten efter koldioxidutsläppen. Vissa freoner har tiotusen gånger större påverkan som växthusgas än koldioxid (per kg) (Gröndahl & Svanström, 2010).

Utfasningen av ozonskadliga freoner pågår enligt Montrealprotokollet (UNEP, 2012). Alla ozonnedbrytande köldmedier har förbjudits och har till största del ersatts med hydrofluorkarboner (HFC). Nya regler träder i kraft inom EU år 2020 vilket medför att nyinstallationer av kylanläggningar inte får använda ett köldmedium med högre växthuspåverkan (Global Warming Potential, GWP) än 2500. I befintliga system kommer det bli påfyllnadsstopp av nytt köldmedium år 2020 och förbud mot användning år 2030 (Europaparlamentets och rådets förordning nr 517/2014, 2014). Dessa regler kommer även att gälla för svenskregistrerade fartyg, vilket innebär att de kommer behöva konvertera eller bygga om sina kylanläggningar. Troliga ersättare kommer att vara blandningar av HFC-köldmedier som uppfyller de nya kraven eller naturliga köldmedier som t.ex. ammoniak, koldioxid och propan.

Därför är det intressant att vidare undersöka hur en referensanläggning på ett fartyg kommer att påverkas vid en konvertering. Att undersöka vilka köldmedier som är tillgängliga och kan ersätta det befintliga är det första steget mot en konvertering.

1.1 Syfte

Syftet är att ta reda på hur energieffektiviteten påverkas vid en konvertering och därmed anläggningens totala klimatpåverkan (TEWI). Studien avser också att teoretiskt undersöka vilka köldmedier med lägre växthuspåverkan (GWP) som är relevanta konverteringsalternativ till en proviantkylanläggning ombord på ett Ro-Pax fartyg.

1.2 Frågeställning

Frågeställningen är följande:

- Hur påverkas energieffektiviteten och därmed kylanläggningens totala klimatpåverkan (Total Equivalent Warming Impact, TEWI) vid konvertering till köldmedier med lägre växthuspåverkan (Global Warming Potential, GWP)?
- Vilka köldmedier är relevanta konverteringsalternativ för referensanläggningen med hänsyn till kylegenskaper och miljöpåverkan?

1.3 Avgränsningar

Den fartygstyp som arbetet kommer att beröra är ett Ro-Pax fartyg och referensanläggningen är en proviant kyl- och frysanläggning. Arbetet begränsar antalet köldmedier till de kommersiellt tillgängliga som kan anses lämpliga med hänsyn till dess liknande egenskaper gentemot R404A. De teoretiska resultaten som presenteras i rapporten kommer inte att testas praktiskt. Studien tar inte hänsyn till praktiska aspekter vid en konvertering som t.ex. kompatibilitet på olja i kompressor, material i tätningar och eventuellt byte av strypventil.

2 Bakgrund och teori

Kapitlet berör historiken bakom maritima kylanläggningar, en bakgrund till de olika typerna av köldmedier och en beskrivning av de relevanta köldmedierna som berör detta arbete.

Kapitlet tar också upp köldmediernas miljöpåverkan och regelverken som styr detta. Hur en teoretisk kylprocess och dess komponenter fungerar. En redogörelse för referensanläggningen vilket arbetet grundar sig på och tidigare studier på ämnet.

2.1 Historisk bakgrund

Kylanläggningens historia sträcker sig till runt början på 1800-talet, då de första anläggningarna inte hade någon återcirkulering av köldmediet utan lät det förångas ut i atmosfären. Vid 1830-talet utvecklades en slutna kylanläggning med etyleter som köldmedium. Utvecklingen av det slutna kylsystemet med en kolvkompressor och etyleter som köldmedium fortsatte under 1800-talet av flera personer. Ferdinand Carre utvecklade på 1850-talet en vatten-ammoniak baserad absorptionsanläggning vilket fick stor spridning och blev en framgång. En fördel med absorptionsanläggningen är att den inte behöver någon kompressor (Pearson, 2005).

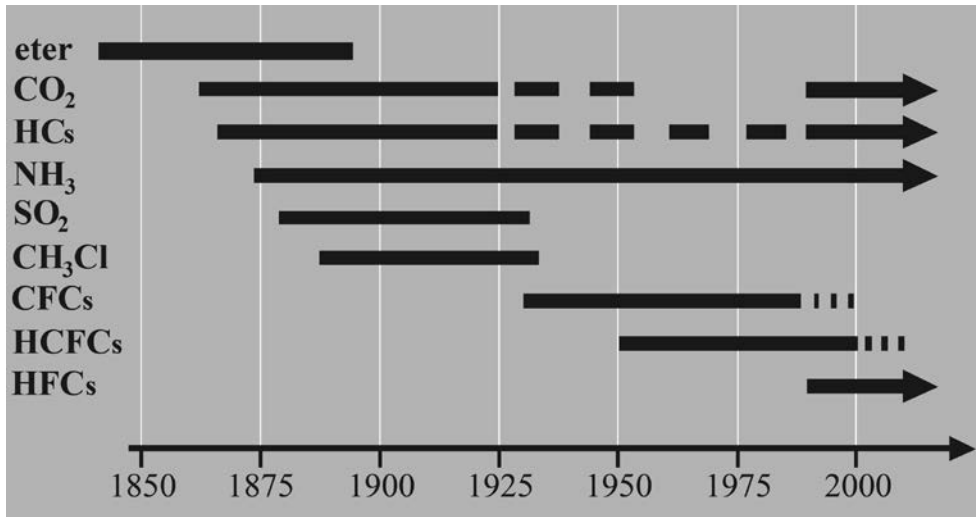
Australiensaren James Harrison hade tidigare haft framgång med utveckling av etyleteranläggningen år 1856. Han var den förste som försökte sig på att transportera kött från Australien till England ombord på segelfartyget "Norfolk" år 1873, vilket misslyckades. Joseph Coleman och slaktaren James Bell utvecklade tillsammans "Bell-Coleman air-cycle" systemet år 1877 för att passa marina transportmedel. Två år senare, 1879, lyckades den första transporten av fruset kött från Australien till England med fartyget SS Strathleven, utrustat med en Bell-Coleman-kylanläggning. Detta präglade de marina kylanläggningarna det nästkommande decenniet (Pearson, 2005).

Etyleter var bland de första köldmedierna att användas i kylanläggningar på 1800-talet. Nackdelen var bland annat att det krävs ett undertryck för att bilda is. Eter är också väldigt brandfarligt och blev aldrig tillräckligt säkert och pålitligt för att slå igenom på den kommersiella marknaden. Koldioxid var det stora genombrottet i kylbranschen på 1860-talet och till skillnad från eter är koldioxid inte brandfarligt eller giftigt. Den stora nackdelen var att det krävdes extremt höga tryck i anläggningen. Everard Hesketh utvecklade en kompressor för koldioxid år 1889 och under de nästkommande sex åren installerades över 400 stycken sådana system i huvudsak på fartyg. Ammoniak användes i absorptionsanläggningar på 1860-talet men fick sitt genombrott på 1870-talet då den första ammoniakkompressorn utvecklades (Pearson, 2005).

De huvudsakliga köldmedierna som användes under 1800-talet i slutna kylanläggningar med en gaskompressor var eter, koldioxid och ammoniak (Pearson, 2005).

När utveckling av kemiskt framställda köldmedium började på 1930-talet minskade användningen av de tidigare använda köldmedierna enligt Hwang, Ohadi, & Radermacher,

(1998). Ammoniak var det enda köldmedium som fortsatte att användas i stora industrier (Hwang et al., 1998). Användandet av eter, kolväten (HC), svaveldioxid (SO₂), klormetan (CH₃Cl) och koldioxid (CO₂) minskade enligt Figur 1. I dagsläget ser det ut som att de naturliga köldmedierna ammoniak och koldioxid är återkommande köldmedium med tanke på de regler som implementeras för att minska miljöpåverkan (Bolaji & Huan, 2013).



Figur 1 - Köldmediernas Historia Egen bild inspirerad av (Pearson, 2005)

Figur 1 förklarar vilka köldmedier som användes från 1850-talet fram till år 2000. Enligt Figur 1 användes eter i de tidiga kylanläggningarna fram till 1900-talet. Koldioxid användes till största delen fram till 1930 då de kemiska köldmedierna (CFC) utvecklades. Ammoniak (NH₃) har använts från 1870 och än idag. Kolväten (HC) som användes tidigt återkommer fram på 2000-talet, till exempel propan.

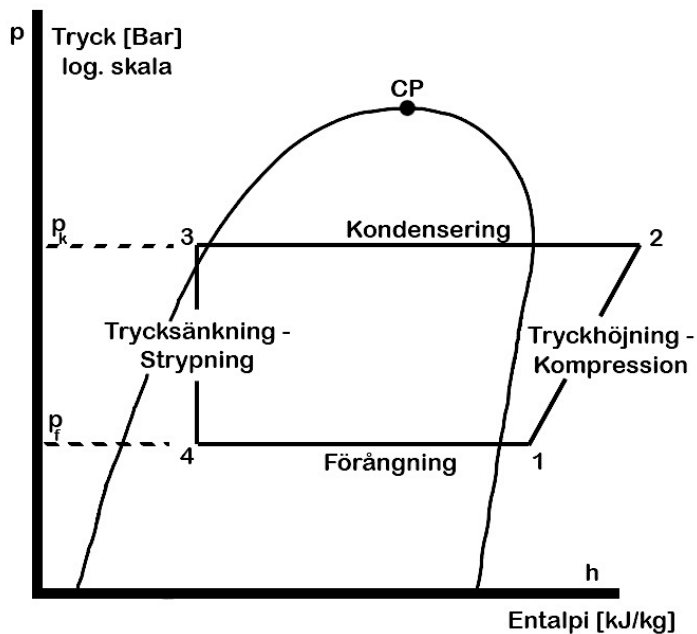
2.2 Kylteknik

Termodynamikens andra huvudsats kan formuleras enligt följande: värme kan inte övergå naturligt från en kropp med låg temperatur till en kropp med högre temperatur. Det krävs att processen tillförs energi (arbete) från teknisk utrustning i form av t.ex. en kompressor (Alvarez, 2006). I kylanläggningen cirkulerar ett köldmedium som binder värmeenergi vid förångning och avger värmeenergi vid kondensering. Beroende på vad som vill uppnås med en kylanläggning finns det olika utformningar och benämningar beroende på vilken process som används. En kylanläggning är en förutsättning för att kunna lagra livsmedel en längre tid utan att kvalitén försämras. På senare tid har tekniken utvecklats och fler tillämpningsområden har vuxit fram. Kyltekniken används ofta inom industri och handel (Nydal, 2010).

Följande avsnitt kommer att ta upp de olika komponenterna i kylanläggningen och hur de hänger ihop.

Kylprocessen består av fyra grundläggande tillståndsförändringar:

1→2: Kompression 2→3: Kondensering
3→4: Strypning 4→1: Förångning



Figur 2 - Kylprocess Egen bild inspirerad av (Nydal, 2010)

Figur 2 beskriver hur köldmediets aggregationstillstånd ändras i kylprocessen i ett tryck-entalpi-diagram (log $p-h$).

2.2.1 Kompressorn 1→2

Köldmediet ändrar aggregationstillstånd mellan ånga och vätska då det cirkulerar i anläggningen. Kompressorn suger in köldmediet som ånga där den komprimeras vilket medför att tryck, densitet och temperatur ökar på köldmediet. Kall ånga med lågt tryck strömmar in i kompressorn och varm gas med högt tryck lämnar kompressorn. Det teoretiska (isentropa) kompressionsförloppet kallas isentropen och det verkliga kompressionsförloppet kallas polytropa. För att kunna bedöma de verkliga driftsförhållandena i en kylanläggning måste hänsyn till dessa avvikelser göras. Kompressionsarbetet är större i verkligheten än vad som teoretiskt har förutsatts på grund av de inre förhållandena i kompressorn. Det medför att tryckgastemperaturen efter kompressorn blir högre i det verkliga kompressionsförloppet (polytropa). Den isentropiska verkningsgraden är förhållandet mellan det teoretiska kompressionsförloppet och det verkliga kompressionsförloppet. Verkningsgraden kan avläsas i ett diagram, likt Figur 12, som visar verkningsgraden i förhållande till tryckförhållandet över kompressorn (Nydal, 2010).

Kompressorn har också en volymetrisk verkningsgrad som är det verkliga volymflödet i sugledningen dividerat med kompressorns teoretiska volymflöde. Utifrån tryckförhållandet

kan den volymetriska verkningsgraden utläsas ur ett diagram, likt Figur 12, för kompressorn. Den varma tryckgasen lämnar kompressorn och transporteras in i kondensorn (Nydal, 2010).

2.2.2 Kondensorn 2 → 3

Kondensorn är en värmeväxlare där gasen kyls ner av antingen luft eller vatten. Köldmediet avger sin värmeenergi enligt termodynamikens lagar och kyls först ner till kondenseringstemperaturen, fortsatt kylning medför att aggregationstillståndet hos köldmediet övergår från mättad gas till mättad vätska eller underkyld vätska. Varm gas med högt tryck strömmar in i kondensorn, vätska med högt tryck och lägre temperatur lämnar kondensorn och fortsätter till strypventilen (Nydal, 2010).

2.2.3 Strypventilen 3 → 4

Strypventilen sänker trycket på vätskan vilket medför att vätskan börjar förångas på grund av tryckskillnaden. I första fasen av förångningen tas värmeenergin från vätskan och temperaturen på köldmediet sjunker till förångningstemperatur. Först nu kan värme tas upp från omgivningen (Nydal, 2010).

2.2.4 Förångaren 4 → 1

Efter strypventilen har köldmediet sjunkit till förångningstemperatur och kan i förångaren ta upp värmeenergin i det utrymme som skall hållas kallt. Köldmediet förångas och transporterar därmed bort värmen. Kall vätska med lågt tryck når förångaren och kall gas med lågt tryck lämnar förångaren. Kompressorn suger in den kalla gasen och cykeln börjar om, se Figur 2.

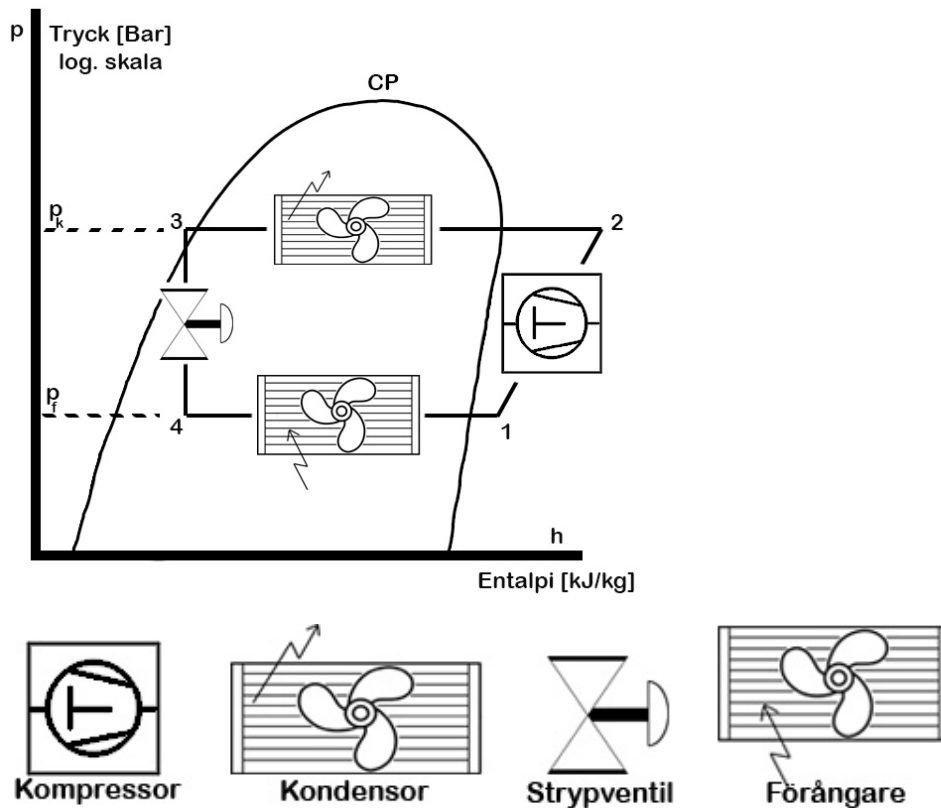
2.2.5 Kylprocessen

För att förstå kylprocessen räcker det inte bara med att känna till de enskilda komponenterna utan också hur de samverkar med varandra, se Figur 3, dvs hur en förändring i en del av processen påverkar de andra delarna. Med hjälp av Figur 3 kan dessa förhållanden göras lättöverskådliga utan komplicerade matematiska formler. Vid kyltekniska beräkningar används ofta ett tryck-entalpi-diagram ($\log p-h$) som ger en grafisk överblick av tillståndsförändringarna hos ett visst köldmedium, se Bilaga 1. Anläggningens tryck och temperatur förs in i tryck-entalpi-diagrammet för att kunna läsa av drifttekniska problem. Då två storheter, tryck och temperatur, är kända möjliggörs att kunna räkna ut andra egenskaper som köldmediet har under givna driftförhållanden. I kylprocessen förändras köldmediets aggregationstillstånd flera gånger innan grundtillståndet återfås (Nydal, 2010).

En förutsättning för att en kylprocess ska fungera är att vätskan som kommer ut ur kondensorn är mättad eller underkyld och har samma tryck och temperatur som i kondensorn innan den strömmar in i strypventilen. Gasen som lämnar förångaren är mättad eller överhettad innan den sugas in i kompressorn, samt har samma tryck och samma eller högre temperatur som i förångaren (Nydal, 2010).

2.2.6 COP

Anläggningens effektivitet bestäms genom köldfaktorn (Coefficient of Performance, COP) som är ett vanligt uttryck att använda vid beskrivning av hur mycket kyleffekt som erhålls i förhållande till hur mycket energi som tillförs kompressorn (Nydal, 2010).



Figur 3 - Kylprocess med komponenter Egen bild inspirerad av (Nydal, 2010)

2.3 Köldmedier

En kylanläggning som drivs av en kompressor behöver ett arbetsmedium, detta kallas köldmedium. Beroende på temperaturområdet som kylanläggningen skall arbeta inom behövs olika köldmedier för att anläggningen ska fungera optimalt (Johansson & Lundqvist, 2001). Det finns mängder av olika typer och sammansättningar av köldmedier. En del består av ett enda ämne och andra är blandningar av många olika köldmedier för önskade egenskaper. Genom åren har det upptäckts att vissa köldmedier, ”freoner”, skadar och påverkar miljön. Det som framförallt har uppmärksammats är deras påverkan och nedbrytning av ozonlagret. Hur mycket ett ämne påverkar nedbrytningen av ozonlagret anges i ozonnedbrytningspotential (Ozone Depletion Potential, ODP), ju högre ODP ett köldmedium har desto mer bryter det ner ozonet i stratosfären. Många av köldmedierna är också starka växthusgaser och bidrar till växthuseffekten och den globala uppvärmningen. Hur stark en växthusgas är anges i Global Warming Potential, GWP. För en överskådlig bild av köldmedierna rekommenderas Tabell 1.

2.3.1 Typer av köldmedier

Detta avsnitt förklarar vilka kategorier de olika köldmedierna kan delas in i beroende på sammansättning och ämnen. Det görs också en beskrivning av hur de olika köldmedietyperna påverkar miljön och hur de kan påverka kylprocessen.

2.3.1.1 CFC

Klorfluorkarboner (Chlorofluorocarbons, CFC), även kända under namnet "freon" från tillverkaren DuPont, kom allt mer på marknaden under 30-talet, se Figur 1. CFC -köldmedierna innehåller kol, fluor och klor. CFC -köldmediet R12 (CF_2Cl_2) hade väldigt bra kylegenskaper och revolutionerade kyltekniken. R12 i rent tillstånd är väldigt stabilt med en kokpunkt på $-21,8^\circ\text{C}$ vid normalt lufttryck. Nackdelen med köldmediet var dess skadliga miljöeffekter (Nydal, 2010). Freonerna är industriellt framtagna ämnen för användning som köldmedier, drivgaser, isolergaser, lösning- och rengöringsmedel. De är lukt- och färgfria, icke-toxiska och har varierande egenskaper. Sedermera upptäcktes det att de hade oönskade effekter på ozonskiktet. Freonerna har mest blivit uppmärksammade i miljödebatten för dess nedbrytande av stratosfärens ozonskikt och de har även stor påverkan på växthuseffekten. Freonerna är elaka växthusgaser och vissa är till och med tio tusen gånger "effektivare" som växthusgas än vad koldioxid är (per kg) (Gröndahl & Svanström, 2010).

2.3.1.2 HCFC

Skillnaden på klorfluorkarboner (CFC) och klorfluorkolväten (Hydrochlorofluorocarbons, HCFC) är att en väteatom (H) har tillkommit (Nydal, 2010). HCFC -köldmedierna togs fram som tillfälliga ersättare för CFC -köldmedierna. Egenskaperna hos de båda ämnena är väldigt lika, fördelen är att HCFC -ämnena har lägre ozonnedbrytningspotential, ODP. Nackdelen är att växthuspåverkan, GWP är högre hos HCFC -köldmedierna (Ghavampouri & Hansson, 2014).

2.3.1.3 HFC

Fluorklorväten (Hydrofluorocarbons, HFC) är nya klorfria köldmedier som är ersättningsalternativ för CFC - och HCFC -köldmedierna. Det har tillkommit en mängd nya köldmedium på marknaden som är blandningar av flera HFC -köldmedier. Detta leder till nya egenskaper och varianter men också att förångning och kondensering inte sker vid konstant temperatur vid det rådande trycket, vilket kallas att köldmediet har en glide, se avsnitt 2.3.1.6. Några vanliga HFC -blandningar är R404A, R407C och R410A (Nydal, 2010).

2.3.1.4 HFO

Vätefluorid-olefin (Hydrofluoro-olefine, HFO) är den nya generationens köldmedium med lågt GWP för att kunna möta kommande regelverk så som EUs F-gas förordning (Brown, J Steven, PhD, 2009). Både HFO -och HFC -köldmedierna består av väte, fluor och kol, skillnaden är att kolatomerna i HFO -köldmedierna binds ihop av en dubbelbindning gentemot en enkel bindning för HFC -köldmedierna. HFO -köldmedierna är relevanta ersättare till CFC, HCFC och HFC -köldmedierna tack vare att de inte har någon påverkan på ozonlagret och låga GWP-värden. Det första HFO -köldmediet (HFO 1234yf), utvecklades av

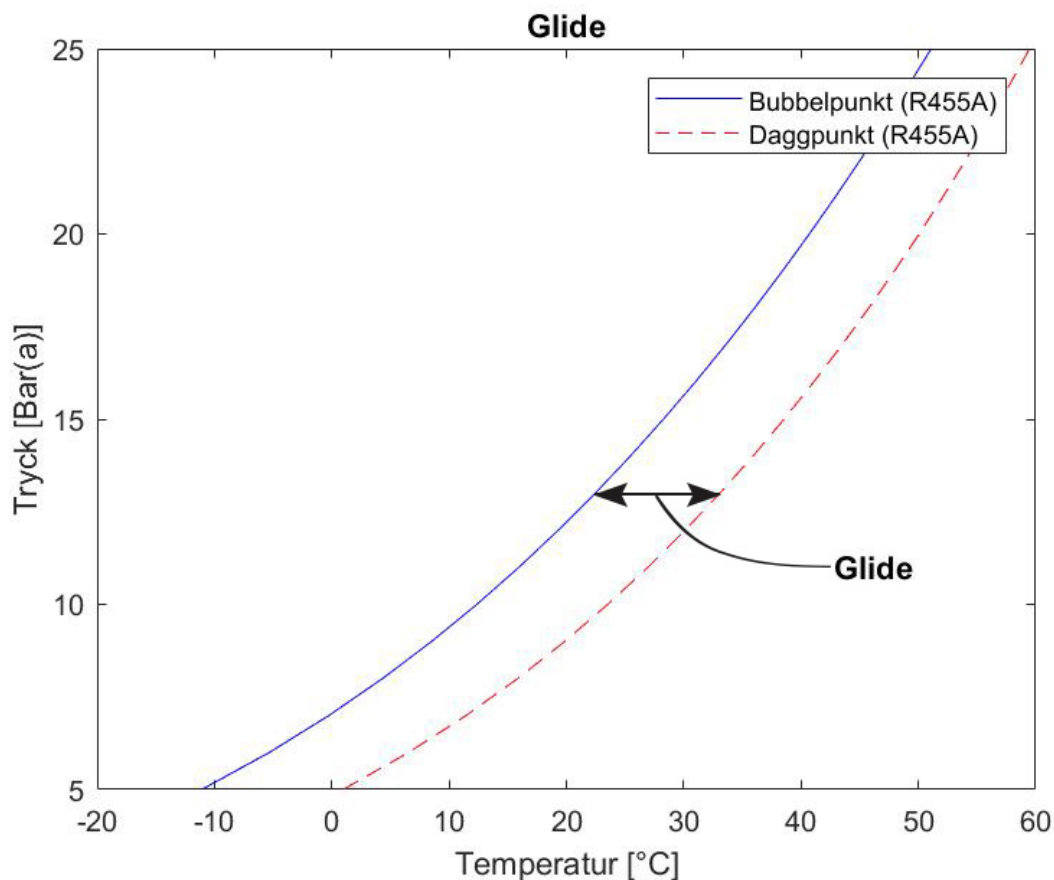
företaget DuPont och Honeywell som en ersättare till R134a i mobila AC-aggregat inom bilindustrin (Linde, 2017a).

2.3.1.5 Naturliga köldmedier

Naturliga köldmedier som vatten, ammoniak (NH_3), kolväten (HC) och koldioxid (CO_2) har använts i kylanläggningar i över 160 år (Bolaji & Huan, 2013). Då utvecklingen av de industriellt framtagna köldmedierna började konkurrerades de naturliga köldmedierna ut. Bara ammoniak fortsatte att användas i stora industrisystem (Hwang et al., 1998). Till följd av nya regler och miljökrav som implementeras har de naturliga köldmedierna fått ökad uppmärksamhet. De naturliga köldmedierna kan ersätta CFC, HCFC och HFC -köldmedier (Bolaji & Huan, 2013).

2.3.1.6 Glide

Temperaturskillnaden vid konstant tryck mellan förångning och kondensering kallas glide, se Figur 4 (Ghavampouri & Hansson, 2014). Det är framförallt de nya HFC -blandningarna som drabbas av fenomenet "temperaturglide". Varje köldmedium i blandningen har vid konstant tryck en bestämd förångningstemperatur (bubbelpunkt) och kondenseringstemperatur (daggpunkt), vilket medför att mediet med högt ångtryck kommer att förångas först (Nydal, 2010).



Figur 4 - Glide förklaring Egen bild inspirerad av (Withouse & Ashrae, 2016)

2.3.1.7 Azeotropiska köldmedier

Azeotropiska köldmedier är en blandning av köldmedium som tillsammans uppförs sig som en enskild substans. Förångning och kondensering sker vid konstant tryck, varken temperatur eller sammansättning ändras (Wang, Lavan, & Norton, 2000). American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) har listat alla köldmedium från 500-599 som Azeotroper. HFC -köldmediet R507A är exempel på en azeotrop (Walter et al., 2009).

2.3.1.8 Nästan azeotropiska köldmedier

Dessa köldmedier är också HFC -blandningar som har liknande egenskaper med de azeotropiska köldmedierna. Skillnaden är att de ”nästan” azeotropiska köldmedierna har en liten glide, en temperaturskillnad på ett par grader vid förångning och kondensering. HFC -köldmediet R404A är ett exempel på nästan azeotropiskt köldmedium (Wang et al., 2000).

2.3.1.9 Zeotropiska köldmedier

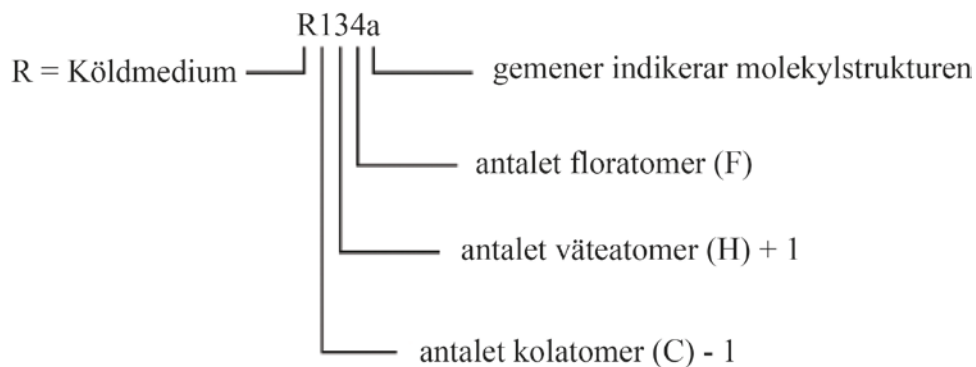
Zeotropiska eller icke azeotropiska köldmedier har en mycket större temperaturskillnad, glide, vid förångning och kondensering, se Figur 4. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) listar alla köldmedier från 400-499 som zeotropiska (Walter et al., 2009).

2.3.2 Varianter på köldmedier

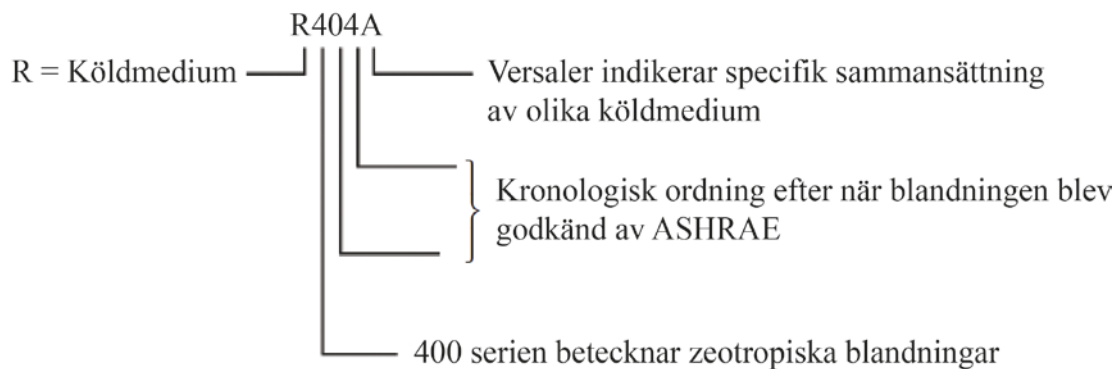
Här följer en beskrivning av de köldmedier som denna studien har begränsat sig inom och som har varit lämpliga att undersöka som alternativ till referensanläggningen. Valet av köldmedier grundar sig på tidigare studier där dessa köldmedier har undersökts som ersättare till R404A. Inga utav ämnena är CFC- eller HCFC -köldmedier. Studien har fokuserat på köldmedium med minde miljöpåverkan där ODP är 0 och GWP är lägre än 2500. Studien tar upp HFC -köldmedium och blandningar av HFC- och HFO -köldmedium, vilka är azeotropiska, nästan azeotropiska eller zeotropiska-köldmedier. Studien förklarar och jämför två naturliga köldmedier som historiskt sett återkommer igen på marknaden, ammoniak och propan. En översikt med relevant information om köldmedierna finns i Tabell 1 och Tabell 2.

2.3.2.1 Beteckningsförklaring

Köldmediernas beteckning är standardiserad av ASHRAE och beteckningen är angiven enligt vissa regler. Ett köldmedium som består av mättade kolväten och består av endast en substans betecknas enligt exemplet i Figur 5. Köldmedier som består av en blandning betecknas enligt exemplet i Figur 6 (Hundy et al., 2008).



Figur 5 - Beteckningsförklaring R134a (Hundy et al., 2008)



Figur 6 - Beteckningsförklaring R404A (Hundy et al., 2008)

2.3.2.2 R134a

R134a är ett HFC-köldmedium och fördelen är att det inte har någon påverkan på ozonlagret. Däremot har R134a en hög växthuspåverkan (GWP) vilket kan komma att begränsas i framtiden. R134a har en förångningstemperatur på -26°C vid normalt lufttryck (1 bar(a)). Köldmediet är en tänkt ersättare till CFC-köldmediet R12 för att de termiska och drifttekniska egenskaperna är likartade. Nackdelen vid konvertering till R134a från R12 är att minsta spår av klor från R12 inte får förekomma vilket kan finnas i antingen oljan eller gasen (Nydal, 2010). Det är också möjligt att ersätta HCFC-köldmediet R22 med R134a, nackdelen med den konverteringen är att R134a har en lägre densitet än R22 vilket medför att det behövs en kompressor med cirka 50 % större kapacitet (Ghavampouri & Hansson, 2014). R134a är inte brandfarligt eller giftigt och har säkerhetsklassen A1 enligt American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), se Figur 7 (Walter et al., 2009).

2.3.2.3 R404A

R404A är ett HFC-köldmedium, det är en blandning av köldmedierna R125/143a/134a, procentuellt fördelat 44/52/4%. R404A har en genomsnittlig förångningstemperatur på $-46,5^{\circ}\text{C}$ vid normalt lufttryck och har en liten glide vilken i praktiken kan bortses ifrån. Det lämpar sig väl i luftkylda anläggningar med låg förångningstemperatur (Nydal, 2010). Detta köldmedium finns övervägande i kyl- och frysanläggningar ombord på fartyg (Chalmers, 2017). Fördelen med R404A är dess likartade egenskaper med R22 vilket möjliggör

konvertering (Ge & Cropper, 2008). R404A har också en låg tryckgastemperatur efter kompressorn vilket är passande för anläggningar med enstegskompressorer (Hundy et al., 2008). R404A har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Walter et al., 2009).

2.3.2.4 R407C

R407C är en zeotropisk blandning av köldmedierna R134a/125/32, procentuellt fördelat 52/25/23% (Hundy et al., 2008). R407C har en genomsnittlig förångningstemperatur på -41°C vid normalt lufttryck och i de flesta förhållandena en stor glide på ca $7,5^{\circ}\text{C}$ vilket medför speciella åtgärder vid konstruktion och reglering av anläggningen (Nydal, 2010). Köldmediet har liknande egenskaper med HCFC -köldmediet R22 vilket har medfört en ökad användning av R407C runt om i Europa på grund av utfasningen av HCFC -köldmedierna (Hundy et al., 2008). Köldmediet lämpar sig väl till konvertering av R22 i luftkonditioneringsanläggningar eller kylanläggningar. R407C har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Walter et al., 2009).

2.3.2.5 R407F

R407F är en zeotropisk blandning av köldmedierna R134a/125/32, procentuellt fördelat 40/30/30%. Köldmediet är anpassat till kyl- eller frysanläggningar. Det är inte brandfarligt eller giftigt men har en glide på $6,4^{\circ}\text{C}$ mellan kondenseringen och förångningen (Pigani, Boscolo, & Pagan, 2016). Det är ett idealt köldmedium för konvertering av kommersiella och industriella kylanläggningar med R404A med tanke på dess lägre GWP och energieffektivitet (Linde, 2017b). R407F har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Mota-Babiloni, Navarro-Esbrí, Barragán, Molés, & Peris, 2014).

2.3.2.6 R410A

R410A är ett nästan azeotropiskt köldmedium, det är en blandning av HFC -köldmedierna R32/125 (50/50%). Vid normalt lufttryck har R410A en genomsnittlig förångningstemperatur på -52°C och en relativt liten glide vilken kan försummas. Köldmediet har goda küldegenskaper vilket medfört en bredare användning inom kyl- och värmepumpsanläggningar. Problemet och nackdelen är att ett högt tryck krävs även vid normal kondenseringstemperatur ($+30^{\circ}\text{C} \rightarrow 18,8 \text{ bar(a)}$ och $+40^{\circ}\text{C} \rightarrow 24 \text{ bar(a)}$) (Nydal, 2010). Optimerade system med R410A har 5% högre prestanda än system med R22 vilket gör köldmediet till en god ersättare till R22 (Hundy et al., 2008). R410A har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Walter et al., 2009).

2.3.2.7 R442A

R442A (RS-50) går också under namnet RS-50 och är ett zeotropiskt köldmedium med sammansättning av HFC -köldmedierna R125/32/134a/227ea/152a (31/31/30/3/5%). Användningsområdet för R442A är i kommersiella kyl- och frysanläggningar. Det kan vara ett konverteringsalternativ till anläggningar med köldmedierna R22, R404A eller R507A. Det har ett GWP värde på 1888 vilket är nästan hälften av GWP-värdet för R404A och R507A. R442A har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Linde, 2017d).

2.3.2.8 R448A (N40)

Solstice N40 (R448A) är en zeotropisk blandning av HFC- och HFO -köldmedierna R32/125/134a/1234ze/1234yf, (26/26/21/7/20%). N40 har en förångningstemperatur på -45,9 °C och har en glide på 6,2°C. Köldmediet är framtaget som en ersättare till R22 och R404A för kommersiella kyl- och frysanläggningar, vilket innefattar (plug-in) automater i mataffärer och liknande. N40 har låg växthuspåverkan (GWP) och hög energi effektivitet (Honeywell, 2014). N40 har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Mota-Babiloni et al., 2014).

2.3.2.9 R449A (XP40)

Opteon XP40 (R449A) är ett zeotropiskt köldmedium med en blandning av HFC och HFO - köldmedierna R32/125/134a/1234yf, procentuellt fördelat (24,3/24,7/25,7/25,3%) (Chemours Company FC, 2016b). Köldmediet har inget ozonnedbrytnings potential (ODP) och ca 65% lägre växthuspåverkan (GWP) än R404A och R507. Det är en ersättare till kommersiella och industriella låg- och medeltempererade anläggningar som använder köldmedierna R404A, R507, R407A/F eller R22. Det är möjligt att konvertera befintliga anläggningar eller ersätta med ny utrustning. Enligt Chemours Company FC, (2017) har Opteon XP40 en förbättrad prestanda och kapacitet jämfört med R404A och R507. XP40 erbjuder en minskning av GWP med 67% och en energieffektivisering på 8–12%. Det är inte brandfarligt och har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Chemours, 2017).

2.3.2.10 R454A (XL40)

Opteon XL40 (R454A) är ett zeotropiskt köldmedium med en blandning av HFC och HFO - köldmedierna R32/1234yf, (35/65%). Det har en förångningstemperatur på -48,3°C och en glide på 5°C. Enligt Chemours Company FC, (2016a) har Opteon XL40 optimala egenskaper för att ersätta R404A i kommersiella och industriella kylanläggningar för låg- och medeltemperaturs system. Enligt tillverkaren erbjuder XL40 en förbättrad energiprestanda och högre kylkapacitet vilket gör konverteringar kostnadseffektiva och stora ingrepp undviks. Fördelar med XL40 är dess liknande egenskaper med R404A vilket gör konverteringar enkla med mindre ingrepp i den befintliga anläggningen. Effektiviteten och kylkapaciteten förbättras jämfört med R404A. Växthuspåverkan GWP minskar med 94% och ingen ozonpåverkan. Köldmediet är måttligt brandfarligt och har fått säkerhetsklass A2L av ASHRAE (Chemours Company FC, 2016a).

2.3.2.11 R455A (L40x)

Solstice L40x (R455A) är en zeotropisk blandning av HFC- och HFO -köldmedierna R1234yf/32/744, (75,5/21,5/3%). L40x har en förångningstemperatur på -52,1°C och har en stor glide på 7,7°C. Enligt tillverkaren är L40x framtaget som ett köldmedium till nya låg-, medel- och högtemperatursanläggningar. Det är ett utmärkt alternativ till kommersiella kyl- och frysanläggningar som (plug-in) automater, kondenseringsenheter, matservering och liknande. Det har snarlika egenskaper som R404A. Med en ultra låg växthuspåverkan (GWP) är det ett köldmedium som är redo att möta EUs´ F-gas förordning, se avsnitt 2.5.2. Den har hög effektivitet och utökad utveckling gör att detta köldmedium kommer att passa in för många ändamål; i mataffärer, kylaggregat, värmepumpar och transport kylning

(Honeywell, 2016). Nackdelen är att det är måttligt brandfarligt, enligt ASHRAE har det en säkerhetsklass på A2L (Mota-Babiloni et al., 2014).

2.3.2.12 R290 (Propan - C₃H₈)

Propan är en kolväteförening (Hydrocarbon, HC). Det är ett naturligt köldmedium och dess egenskaper täcker in ett stort område inom kyltekniken i anläggningar som tidigare använde CFC- och HCFC -föreningar (Hundy et al., 2008). Propan har en förångningstemperatur på -42°C vid normalt lufttryck och kan användas i temperaturområdet -30°C till +7°C. Propan är en kolväteförening och mycket brandfarlig, vilket är dess största nackdel (Nydal, 2010). Enligt ASHRAE är propan placerad i säkerhetsgrupp A3 vilket är den högsta säkerhetsklassen beträffande brandfarlighet (Walter et al., 2009).

2.3.2.13 R717 (Ammoniak - NH₃)

Ammoniak är ett naturligt köldmedium som fortfarande används och har historiskt sett varit i bruk längst. Ammoniakgasen är giftig men den starka lukten varnar långt innan det blir farligt. Ammoniakgasen har lägre densitet än luft vilket gör att den stiger vid läckage, därför skall ventilationen i maskinrum placeras i takhöjd. Kylanläggningar med ammoniak måste byggas i stål, aluminium eller legeringar som kan stå emot dess korroderande inverkan. Fördelarna med ammoniak är att den har hög förångningsvärme, är billigt och ger inga miljömässiga skadeverkningar på varken ozonet eller växthuseffekten. Med tanke på att utvecklingen av köldmedier går mot att de inte får påverka ozonlagret eller växthuseffekten kommer användningen av ammoniak att öka (Nydal, 2010). Nackdelarna är dock dess starka lukt och giftiga gas samt att tryckgastemperaturen från kompressorn är hög (Nydal, 2010). ASHRAE har listat ammoniak i säkerhetsgrupp B2 (Walter et al., 2009).

2.3.2.14 R744 (Koldioxid - CO₂)

Koldioxid kategoriseras som ett naturligt köldmedium och har ofta använts i kylanläggningar ombord på fartyg långt in på 50-talet. Driften av anläggningen i tropiska farvatten där vattentemperaturen kan ligga över +30°C blev problematisk för att den kritiska kondenseringstemperaturen för koldioxid ligger på +31°C, det krävs inte mycket för att det ska vara omöjligt att kondensera gasen.

Koldioxid har ingen påverkan på ozonlagret och de CO₂-utsläppen som anläggningen kan orsaka ökar inte växthuseffekten eftersom detta är en biprodukt i den industriella produktionen vilket ändå skulle ha läckt ut. Förutom dess största nackdel att den kritiska kondenseringstemperaturen ligger på +31°C krävs det också ett högt tryck i anläggningen, +31°C motsvarar ett tryck på 73,733 bar(a) (Nydal, 2010). Koldioxid har säkerhetsklass A1 enligt ASHRAE (Walter et al., 2009).

2.3.3 Köldmedier – en sammanfattande tabell

Tabell 1 ger en överskådlig information och förklaring till köldmediernas indelning tidigare kapitel. Här finns information om vilken grupp köldmedierna tillhör, beteckningen, sammansättningen, kokpunkten vid normalt lufttryck, ODP-värde, GWP-värde och glide.

Tabell 1 – Köldmedium

Indelning	Köldmedium (R)	Sammansättning	Förångnings temperatur [°C vid 1,013 bar]	ODP	GWP	Glide [°C]
Grupp 1						
CFC	11		24	1	4000	
	12	CCl ₂ F ₂	-30	1	8500	
	13B1		-58	10	5600	
HCFC	22	CHF ₂ Cl	-41	0,055	1700	
	123		28	0,02	93	
	124		-12	0,022	480	
HFC	134a	CF ₃ CH ₂ F	-26	0	1300	
	152a		-24	0	140	
	125		-48	0	2800	
	32		-51	0	650	
	143a			0	3800	
Blandningar						
Nästan Azeotrop	404A	R125/134a/143a (44/4/52%)	-46,5	0	3922	0,8
Zeotrop	407C	R134a/125/32 (52/25/23%)	-41	0	1525	7,5
Zeotrop	407F	R134a/125/32 (40/30/30 %)	-46,3	0	1824	6,4
Nästan Azeotrop	410A	R32/125 (50/50%)	-52	0	1725	0,1
Zeotrop	442A (RS-50)	R125/32/134a/152a/227ea (31/31/30/5/3 %)	-46,5	0	1888	4,6
Zeotrop	448A (N40)	R32/125/134a/1234ze/1234yf (26/26/21/7/20%)	-45,9	0	1205	6,2
Zeotrop	449A (XP40)	R32/125/1234yf/134a (24,3/24,7/25,3/25,7%)	-44,3	0	1410	6,0
Zeotrop	454A (XL40)	R32/1234yf (35/65%)	-48,3	0	246	5,0
Zeotrop	455A (L40x)	R1234yf/32/744 (75,5/21,5/3%)	-52,1	0	145	7,7
Grupp 2 – Giftiga	717	NH ₃	-33	0	0	
	744	CO ₂	-71	0	1	
Grupp 3 – Brandfarliga	290	Propan	-42	0	3	

(Nydal, 2010), (Honeywell, 2014), (Chemours, 2017), (Chemours Company FC, 2016a), (Chemours Company FC, 2016b), (Honeywell, 2016), (Linde, 2017b), (Linde, 2017c), (Linde, 2017d), (Hundy et al., 2008), (Pigani et al., 2016)

2.3.4 Säkerhetsklass

Köldmedier kan bestå av många olika ämnen, dessa kan i vissa fall vara brandfarliga eller giftiga. Den amerikanska organisationen American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) har därmed delat in köldmedier i olika säkerhetsgrupper med hänsyn till köldmediets giftighet och antändlighet. I Figur 7 illustreras vilka grupper köldmedier delas in i, dels antändlighet 1-3 samt även giftighet A-B (Reiniche, 2010).

	Säkerhetsgrupp	
Lättantändlig	A3	B3
Lägre antändlighet	A2	B2
	A2L*	B2L*
Ingen flamspridning	A1	B1
	Lägre giftighet	Högre giftighet

*A2L och B2L har en låg antändlighet med en max brinnhastighet av ≤ 10 cm/s

Figur 7 - ASHRAE Säkerhetsgrupper Egen bild inspirerad av (Reiniche, 2010)

Tabell 2 – Köldmediernas ASHRAE Säkerhetsklass

Tabell 2 presenterar de köldmedierna som rapporten berör och vilken säkerhetsklass de är indelade i enligt ASHRAE.

Köldmedium	ASHRAE Säkerhetsklass
<i>R404A</i>	<i>A1</i>
<i>R407C</i>	<i>A1</i>
<i>R407F</i>	<i>A1</i>
<i>R410A</i>	<i>A1</i>
<i>R134A</i>	<i>A1</i>
<i>R442A (RS-50)</i>	<i>A1</i>
<i>R455A (L40x)</i>	<i>A2L</i>
<i>R454A (XL40) (DR-7)</i>	<i>A2L</i>
<i>R449A (XP40) (DR-33)</i>	<i>A1</i>
<i>R448A (N40)</i>	<i>A1</i>
<i>R744 (CO₂)</i>	<i>A1</i>
<i>R717 (Ammoniak)</i>	<i>B2</i>
<i>R290 (Propan)</i>	<i>A3</i>

(Mota-Babiloni et al., 2014), (Nydal, 2010), (Walter et al., 2009), (Honeywell, 2016), (Linde, 2017d), (Refrigerant Solutions Ltd, 2012)

2.4 Miljön

Detta kapitel belyser de mest omtalade miljöpåverkningarna som utsläppen av köldmedierna har. Begreppen ODP, GWP och TEWI förklaras.

2.4.1 Ozonlagret

Ozonskiktet (ozonlagret) sträcker sig i stratosfären på mellan 15 – 50 km höjd. Ozonlagret förhindrar att jorden träffas av solens skadliga ultraviolettera strålning (UV-strålning) genom att absorbera UV-strålning inom ett visst våglängdsintervall. Den ultraviolettera strålningen från solen brukar delas in i tre grupper:

- **UV-A** strålningen har en våglängd över 320nm (ca 590 km) vilket gör att den passerar atmosfären och når jorden till stor del.
- **UV-B** strålningen har en våglängd på 280-320nm (ca 520–590 km) och absorberas till stor del i stratosfärens ozonskikt.
- **UV-C** strålningen har en våglängd under 280nm (ca 520 km) vilket gör att den absorberas helt i atmosfären för bildning av ozon (Gröndahl & Svanström, 2010).

Till följd av människans utsläpp av klorinnehållande CFC -föreningar har ozonhalten i ozonlagret sjunkit vilket har lett till en ökad instrålning av den skadliga **UV-B** strålningen. En förhöjd UV-strålning kan skada delar av fotosyntesprocessen hos växterna och de encelliga planktonalgen i hav och sjöar. Planktonalgen får söka sig djupare ner i vattnet dit inte UV-B strålningen når vilket minskar fotosyntesen och mängden plankton i havet som är basfödan för fisk och marina däggdjur. UV-B strålningen har direkt inverkan på DNA-molekylen vilket ökar risken för hudcancer vid en längre tids exponering (Gröndahl & Svanström, 2010).

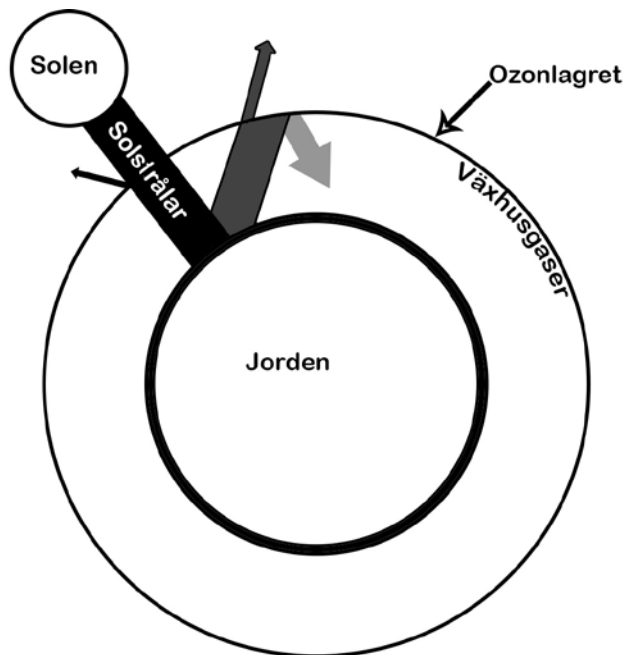
2.4.2 ODP

CFC -och HCFC -köldmedierna har en ozonedbrytningspotential, (Ozone Depletion Potential, ODP), vilket är ett mått på förmågan att bryta ner ozon i förhållande till köldmediet R11 som har ODP = 1. Ett högt ODP-värde betyder att ämnet reagerar mer med stratosfärens ozon (Ghavampouri & Hansson, 2014). Det är framförallt ämnena klor och brom som har negativ inverkan på ozonlagret. Därför har användandet av dessa köldmedier begränsats (Nydal, 2010).

2.4.3 Växthuseffekten

Växthuseffekten är en förutsättning för livet på jorden och för att medeltemperaturen är +14°C istället för -18°C. En tredjedel av solens kortvågiga ultraviolettera strålning reflekteras bort men resterande värmeenergi absorberas till största delen av jordytan. Långvågig värmestrålning lämnar sedan jorden men en del av värmestrålningen fångas upp av växthusgaserna i atmosfären och omvandlas till värme, se Figur 8. Vattenånga är den viktigaste växthusgasen och står för mellan 70–90% av den ”naturliga” växthuseffekten.

Andra naturligt förekommande växthusgaser är koldioxid, metan och lustgas (Gröndahl & Svanström, 2010).



Figur 8 - Växthuseffekten (Egen bild)

2.4.4 GWP

Växthuspåverkanspotential, (Global Warming Potential, GWP), är ett mått på hur stor inverkan ett ämne har på växthuseffekten i förhållande till 1 kg koldioxid. Vissa ämnen och köldmedier som läcker ut ur kylanläggningarna påverkar inte enbart nedbrytningen av ozonlagret utan bidrar också till att förstärka växthuseffekten (Nydal, 2010). Köldmediernas GWP-värde är ett sätt att räkna ut hur mycket koldioxid (CO_2) utsläpp ett köldmedium är ekvivalent med. R134a har $\text{GWP} = 1300$ vilket betyder att 1kg R134a motsvarar 1300kg CO_2 i atmosfären (Ghavampouri & Hansson, 2014).

Till följd av de ökade utsläppen av växthusgaser har jordens medeltemperatur ökat med $0,8^\circ\text{C}$ under 1900-talet och 2000-talets början. Om den av människan orsakade växthuseffekten fortsätter visar framtidsmodeller att medeltemperaturen på jorden kommer att öka till 1°C år 2025 och till 3°C år 2100 (Gröndahl & Svanström, 2010).

2.4.5 TEWI

Total Equivalent Warming Impact (TEWI) är den totala klimatpåverkan med hänsyn till det direkta och indirekta koldioxidutsläppet. De direkta orsakerna till växthuspåverkan är utsläppen från kylanläggningarna i form av läckage av köldmedium. De indirekta utsläppen av koldioxid är en följd av förbränningen av de fossila bränslena som olja, kol och gas vid generering av elektricitet till kylanläggningen. Den kombinerade växthuspåverkan av dessa effekter resulterar i TEWI (Bolaji & Huan, 2013). TEWI är en bättre indikator än GWP på kylanläggningens växthuspåverkan då det tar hänsyn till anläggningens påverkan över tid och

de indirekta utsläppen. Dock tar det inte hänsyn till alla indirekta utsläpp relaterat till tillverkningsprocessen och transport av köldmediet (Makhnatch & Khodabandeh, 2014).

TEWI för en anläggning bestäms med följande formel

$$TEWI = [Direkt_{Läckage}] + [Direkt_{Återvinning}] + [Indirekt_{Användning}] \quad (1)$$

$$TEWI = [GWP \times L \times n \times m] + [GWP \times m (1 - \alpha_{återvunnet})] + [n \times E_{årligt} \times \beta] \quad (2)$$

GWP = Global Warming Potential [Relativt CO_2]

L = Andel årligt läckt mängd köldmedium [%]

n = Anläggningens livslängd [år]

m = Fyllnadsmängd [kg]

$\alpha_{återvunnet}$ = Andel återvunnet vid utrangering [%]

$E_{årligt}$ = Energiförbrukning [kWh]

β = CO_2 – utsläpp per kWh producerad el [kg – CO_2 /kWh]

(Johansson & Lundqvist, 2001)

2.5 Regelverk

Ozonhålet upptäcktes år 1985 och sedan 1986 har utsläppen av CFC-föreningarna minskat med 40% tack vare internationella överenskommelser, se Figur 9. Det kommer tyvärr att dröja innan det märks någon förändring av dessa beslut på grund av CFC -föreningarnas långa uppehållstid i atmosfären (Gröndahl & Svanström, 2010).

Den Internationella Sjöfartsorganisationen (International Maritime Organization, IMO) reglerar utsläppen från fartyg och har förbjudit användandet av ozonnedbrytande CFC - köldmedium. Däremot finns inga regler på hur högt GWP ett köldmedium får ha. Med tanke på internationella förslag och europeiska regler kring minskning av användandet av köldmedium med högt GWP dröjer det säkerligen inte länge innan globala restriktioner kommer för de marina kylanläggningarna (Pigani et al., 2016).

2.5.1 Montrealprotokollet

Beläggen för att CFC -föreningarna bröt ner ozonskiktet ökade och år 1977 inleddes ett samarbete mellan FN:s miljöorganisation United Nations Environment Program (UNEP) och Meteorologiska Världsorganisationen. Detta resulterade i Wienkonventionen som syftade till att skydda ozonskiktet, konventionen antogs i mars år 1985 och denna konvention skulle senare leda fram till Montrealprotokollet (Ghavampouri & Hansson, 2014).

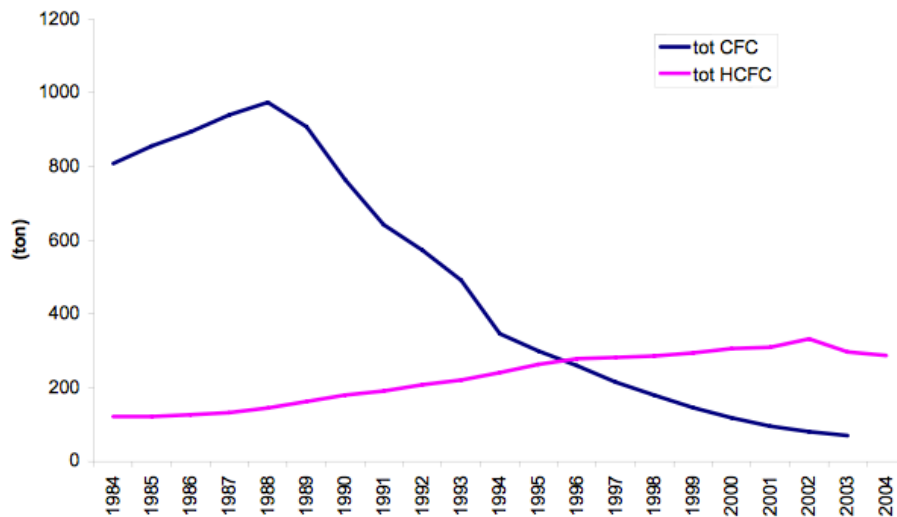
År 1987 skrevs den internationella överenskommelsen, Montrealprotokollet, under vilket innebar en utfasning av CFC-föreningar och andra ozonnedbrytande ämnen (Gröndahl & Svanström, 2010). Montrealprotokollet är ett initiativ från UNEP och har därmed representanter från en stor del av världens alla länder. Målet med överenskommelsen är att skydda ozonlagret genom rättvisa försiktighetsåtgärder för att minska de totala utsläppen av skadliga ämnen som flor och brom (UNEP, 2012). Användandet av CFC -köldmedium i utvecklingsländer har varit förbjudet sedan 1997. Användandet globalt av HCFC -köldmedium i kylanläggningar kommer att förbjudas år 2020 (Pigani et al., 2016).

2.5.2 EU-reglementet (F-gas förordningen)

Kyotoavtalet innebar en reglering av växthusgasutsläppen och varje land skrev på en viss utsläppskvot av växthusgaser omräknat till den mängden koldioxid som skulle ge motsvarande skada på miljön. Ur Kyotoavtalet växte F-gas förordningen fram i Europeiska Unionen (EU) vilket strävar mot att begränsa utsläppen av F-gaserna (freonämnen) (Nydal, 2010). F-gas förordningen syftar till att skydda miljön genom att minska utsläppen av florerande växthusgaser. Förordningen innehåller bland annat bestämmelser om kvantitativa begränsningar för utsläppen av fluorkolväten och särskilda användningsvillkor av dessa gaser (Europaparlamentets och rådets förordning nr 517/2014, 2014). Reglementet utvecklades år 2014 och grundade sig i en progressiv minskning av köldmedium med GWP över 150 mellan åren 2015-2022 (Pigani et al., 2016). Enligt bilaga III i förordningen punkt 12 anslås ett påfyllnadsstopp av köldmedium med en global uppvärmningsfaktor, GWP, över 2500 i kylutrustningar, vilket börjar gälla 1 januari 2020. Återvunnet köldmedium får användas i anläggningarna fram till år 2030 (Europaparlamentets och rådets förordning nr 517/2014, 2014).

2.5.3 Svenskt reglemente – Naturvårdsverket

Naturvårdsverket (2007) skriver ”Ozonskiktet skall utvecklas så att det långsiktigt ger skydd mot skadlig UV-strålning” (sid. 14). Detta fastställde den svenska riksdagen år 1999 som ett övergripande miljö kvalitetsmål för skyddandet av ozonskiktet. Det innebar att Sverige skulle verka för att halterna av brom, klor och andra ozonnedbrytande ämnen inte översteg naturliga nivåer i atmosfären och avvecklingen av ozonnedbrytande ämnen skulle genomföras inom loppet av en generation. Naturvårdsverket bedömer att målet kommer att uppnås till år 2020 (Naturvårdsverket, 2007). CFC -köldmedium är förbjudna att användas i Sverige (Nydal, 2010). På 20 år har Sverige lyckats att avveckla användandet av CFC -föreningar och avvecklingen av ozonnedbrytande ämnen är i stort sett genomförd. Sedan 1998 har det varit förbud mot användning av HCFC -köldmedium i nyproduktion och nyinstallation av kylanläggningar. Påfyllnadsstopp för HCFC -köldmedium infördes år 2002 (Naturvårdsverket, 2007). Användningsförbudet av HCFC -ämnen infördes år 2015 (Ujfalusi, 2016).



Figur 9 - Globala utsläpp av ozonnedbrytande ämnen 1984-2004 (Naturvårdsverket, 2007)

Figur 9 illustrerar att den globala minskningen av det ozonnedbrytande CFC -ämnet tog fart efter år 1987 då Montrealprotokollet infördes. HCFC -föreningarna ersatte CFC-ämnena i början vilket resulterade en ökning av användandet efter 1987.

2.5.4 Svenskt reglemente - Transportstyrelsen

Transportstyrelsen reglerar den svenska sjöfarten och i enlighet med Montrealprotokollet är det generellt förbjudet att använda CFC -köldmedium ombord på svenska fartyg. Befintliga anläggningar fick använda HCFC -köldmedium fram till 1 jan 2015, men påfyllnadsstoppet har gällt sedan 2002. Dessa anläggningar har därför behövt konverteras eller bytas ut till anläggningar med HFC -köldmedium. HFC -köldmedierna tillhör gruppen fluorerade växthusgaser och användandet av ämnena regleras av EG-förordning 517/2014 (F-gas förordningen) (Petrini, 2017). År 2020 är det påfyllnadsstopp av nytt köldmedium med GWP över 2500 men användning av kvarvarande mängd är tillåtet fram till år 2030 (Europaparlamentets och rådets förordning nr 517/2014, 2014). Kyl och frysanläggningar ombord på svenska fartyg använder till största delen HFC -köldmediet R404A vilket har ett högre GWP än 2500, se Tabell 1 – Köldmedium (Chalmers, 2017).

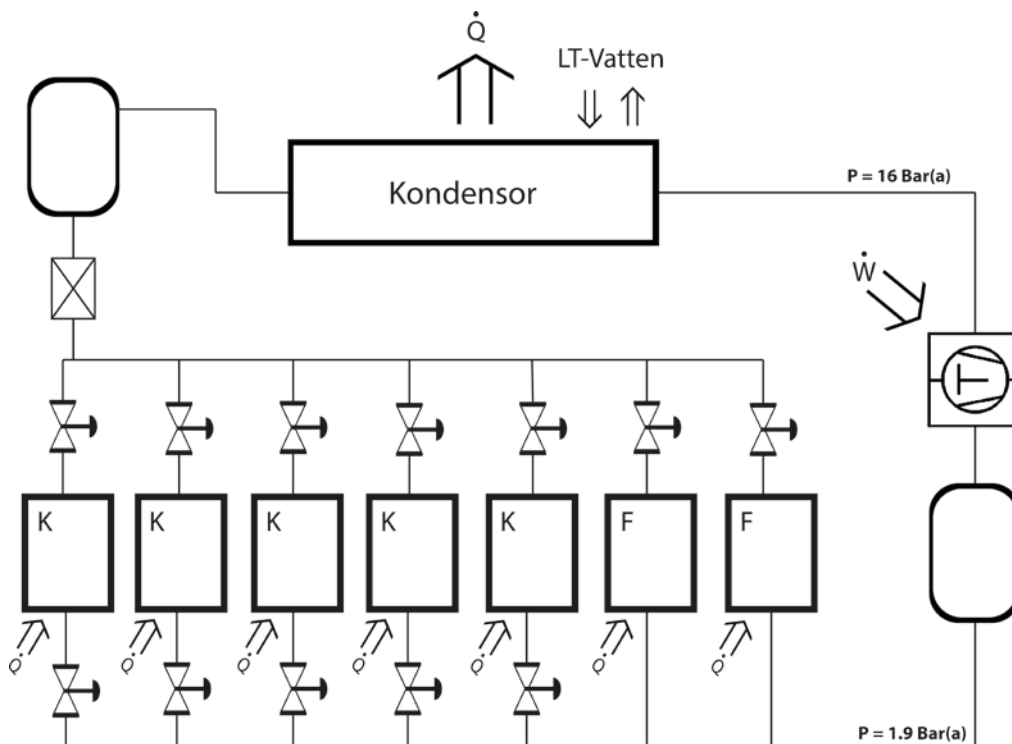
2.5.5 Sjöfartsrelaterade regelverk

Enligt IMO regleras utsläppen av köldmedium i MARPOL Annex VI. Enligt Annex VI är utsläpp av ozonnedbrytande köldmedium förbjudet för alla marina kylanläggningar (Pigani et al., 2016). Från och med 19 maj 2005 är det förbjudet att installera kylanläggningar med CFC -köldmedium ombord på fartyg. Från och med 1 januari 2020 är det förbjudet att installera kylanläggningar med HCFC -köldmedium ombord på fartyg. Befintliga system med antingen CFC eller HCFC -föreningar är tillåtna att användas och fyllas på vid behov (IMO, 2017). Det finns inga specifika krav på GWP-storleken i marina kylanläggningar. Vissa klassningssällskap föreslår användandet av köldmedium med lägre miljöpåverkan. Lloyd's Register (LR) föreslår en GWP-gräns på 1950 för att få klassbeteckningen ECO, Registro Navale Italiano (RINA) föreslår en GWP-gräns på 2000 för att få beteckningen CLEAN-AIR

och Bureau Veritas (BV) föreslår en GWP-gräns på 2000 för att få beteckningen CLEAN-SHIP (Pigani et al., 2016).

2.6 Referensanläggningen

För studien har en proviantkylanläggning ombord på ett Ro-Pax fartyg använts som referens. Anläggningen använder köldmediet R404A, en tvåstegs kolvkompessor och en vattenkyld kondensor. Kompressorn arbetar mellan trycken 1,9 och 16 bar(a) vilket motsvarar en kondenseringstemperatur på $+34,86^{\circ}\text{C}$ och en förångningstemperatur på $-31,72^{\circ}\text{C}$. Systemet har både kylrum och frysrum på samma kompressor vilket medför att kylsystemet skall hålla omkring $+5^{\circ}\text{C}$ i kylrummen och -25°C i frysrummen. Detta medför att trycket sänks i två steg i kylrummen. Dels innan förångaren för att hamna på korrekt förångningstemperatur, samt efter förångaren för att hamna på samma tryck som det är efter frysrummen i den gemensamma sugledningen till kompressorn. Anläggningen kyler fem kylrum och två frysrum där temperaturerna individuellt kan anpassas till behovet, se Figur 10.



Figur 10 - Schematisk ritning av referensanläggningen (Egen bild)

Tabell 3 - Dimensioner kyl och frysrum

Tabellen beskriver de sju olika rummen som finns på Ro-Pax fartyget vilket kylanläggningen kyler ner och storleken på dessa. Set point (SP) är de värden på temperaturen som kylanläggningen jobbar emot och vill hålla. Trycken efter expansionsventilen skiljer sig åt på grund av temperaturskillnaderna mellan kylarna och frysarna.

Area	Rummens storlek (m ³)	Absoluttryck Efter expansionsventilen (bar)	Temp in i Förångaren (°C)	Set Point (SP)
Vegetables	21,78	5,5	- 3	+6
Meat room	21,78	5,4	- 4	+4
Beverage room	21,78	5,4	- 4	+4
Dairy cold room	21,78	5,4	- 4	+4
Dry Store	18,04	5,4	- 4	+5
Fish room	8,14	1,9	- 32	- 25
Freezer room	29,70	1,9	- 32	- 25
Totalt	143 m³			

(Egna mätningar från Ro-Pax fartyget + fartygets R404A Flow Diagram, 2017), (Provision rooms and coolingplant, 1998)

2.7 Tidigare Studier

Här följer en sammanfattning av tre vetenskapliga studier som har fokuserat på jämförelser med alternativa köldmedium för R404A och köldmedium med lägre GWP än 2500.

2.7.1 *“Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline”*

Mota-Babiloni et al., (2014) gjorde en studie där målet var att teoretiskt jämföra energiprestandan i fyra olika utformningar av kylanläggningar med låga förångningstemperaturer, vid användande av alternativa köldmedium till R404A. De olika utformningarna av kylanläggningar som studien undersökte var en grundcykel (Basic cycle, BC), grundcykel med intern värmeväxlare (Basic cycle with Internal Heat Exchanger, BCiHX), direktinjektion (Direct Injection, DI) och underkyld cykel (Subcooled cycle, SC). Studien undersökte sex köldmedium, R407A, R407F, L40, DR-7, N40 och DR-33 med liknande egenskaper som R404A och lägre GWP, se Tabell 1. Dessa köldmedier är relevanta konverteringsalternativ till R404A och har goda miljömässiga fördelar. Resultatet av studien visar att energieffektiviteten (COP) blev bättre för de alternativa köldmedierna under alla driftförhållanden jämfört med R404A, se Tabell 4.

De mest energieffektiva och långsiktiga alternativen är de något brandfarliga köldmedierna DR-7 och L40. De bästa energieffektiva alternativen då brandfarliga köldmedium inte accepteras är DR-33 och N40. Lägst energiprestanda hade köldmediet R407F och sedan följt av R407A. Trots detta är de fortfarande lovande ersättare med fördelen att de är kommersiellt tillgängliga och tryckgastemperaturen var den lägsta bland de alternativa köldmedierna (Mota-Babiloni et al., 2014).

Tabell 4 - Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline

Grundcykeln (BC) är den mest relevanta utformningen av kylanläggning att jämföra mot studiens referensanläggning, enligt avsnitt 2.6. Tabellen visar att alla de alternativa köldmedierna gav bättre energiprestanda, då R404A motsvarar 100% och de alternativa köldmedierna var teoretiskt så många procent bättre vid den givna förångningstemperaturen och två olika kondenseringstemperaturer.

%COP Teoretiska resultat.		Förångningstemperatur $T_0 = -40^\circ\text{C}$	
		Kondenseringstemperatur $T_k = 40^\circ\text{C}$	Kondenseringstemperatur $T_k = 55^\circ\text{C}$
BC	Köldmedium		
	R407A	9,02%	20,52%
	R407F	10,62%	24,45%
	L40	15,07%	32,60%
	DR-7	15,09%	30,76%
	N40	11,31%	24,05%
	DR-33	11,87%	24,78%

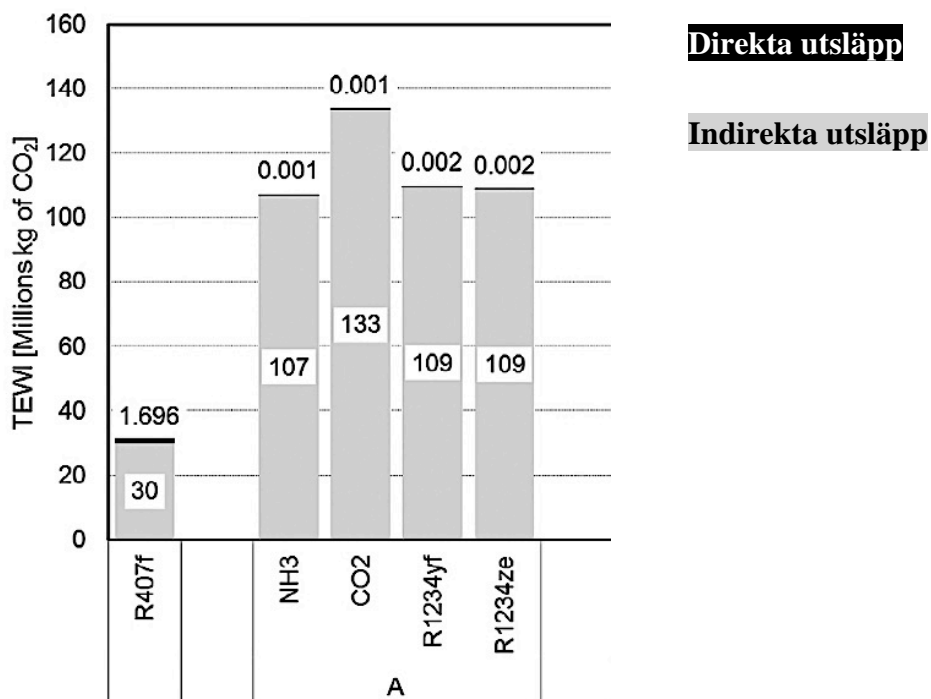
Egen tabell inspirerad av (Mota-Babiloni et al., 2014)

2.7.2 “Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact”

Studien syftar till att analysera och dra slutsatser kring användandet av köldmedium med lågt GWP på marina kylanläggningar ombord på ett passagerarfartyg. Studien jämför köldmedierna ammoniak (NH_3), koldioxid (CO_2) och HFO -köldmedierna R1234yf och R1234ze(E) med den befintliga proviantkylanläggningen som använder R407F. Resultaten analyseras och prestandan jämförs med den befintliga proviantkylanläggningen ombord. Studien tar hänsyn till effektiviteten (COP), volymetrisk kapacitet, säkerhet och totala klimatpåverkan (TEWI) för de olika alternativen. HFO -köldmedierna R1234yf och R1234ze(E) är relativt nya och säljs till högt pris av vissa återförsäljare. De är passande ersättningsalternativ till köldmediet R134a med tanke på deras liknande egenskaper. Detta medför att de är designade att användas i luftkonditioneringsanläggningar, HFO -köldmedierna är också något brandfarliga (Pigani et al., 2016).

Efter analyserna av studien drar Pigani et al. (2016) slutsatsen att inget av de alternativa köldmedierna medförde en total förbättring av kylanläggningen. Några köldmedier var bättre i vissa avseenden och hade någon bättre fördel jämfört med R407F men inget av de alternativa köldmedierna resulterade i en total förbättring av kylanläggningen med hänsyn till säkerhet, effektivitet, volymetrisk kapacitet eller total klimatpåverkan (TEWI), se Figur 11. Studien drar också slutsatsen att införa köldmedium med lågt GWP för den befintliga anläggningen inte är den mest effektiva lösningen för att reducera den totala klimatpåverkan. Pigani et al. (2016) poängterar också att för att bestämma den totala klimatpåverkan från kylanläggningar

representerar TEWI mer än GWP, på grund av att köldmedium med lägre GWP kan leda till att anläggningens totala klimatpåverkan ökar (Pigani et al., 2016).



Figur 11 - Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-GWP refrigerants and strategies to reduce environmental impact (Pigani et al., 2016)

Figur 11 presenterar jämförelsen mellan de olika köldmediernas indirekta utsläpp (koldioxidutsläpp från elförbrukningen) och de direkta utsläppen (GWP) från kylanläggningen. Alla de alternativa köldmedierna resulterar i en minskning av de direkta utsläppen gentemot R407F, detta tack vare deras låga GWP värden. Däremot genererar köldmediealternativen en större utsläppskvot av de indirekta utsläppen, vilket medför att den totala effektiviteten på kylanläggningen blir sämre.

2.7.3 “Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration”

Denna studie syftade till att jämföra två köldmedier som konverteringsalternativ till R404A i en kommersiell kylanläggning. De två köldmedierna som studerades var den icke brandfarliga R448A och den något brandfarliga R455A, för mer information se Tabell 1 och Tabell 2. Studien utvärderade två typer av kylanläggningar, en fristående frys och ett kommersiellt frysrum med R404A som referens. Studien redovisar också verkliga resultat från en konvertering av en frys i en mataffär från R404A till R448A (Sethi, Pottker, & Yana Motta, 2016).

Resultaten från testerna av den fristående frysen visade att R448A hade 9% lägre energikonsumtion för kompressorn och R455A hade 6% lägre energikonsumtion jämfört med R404A, se Tabell 5 (Sethi et al., 2016).

I frysrummet gjordes testerna med R448A och resultaten visar en liknande kapacitet med 4–8% högre effektivitet. Slutsatsen av studien visar att både R448A och R455A är lovande

ersättare till R404A i kommersiella kyl-och frysanläggningar. De ersättande köldmedierna har en lägre GWP-faktor och är energieffektivare vilket leder till minskad indirekt och direkt påverkan på miljö (Sethi et al., 2016).

Tabell 5 - Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration

Tabellen presenterar kompressorernas gångtid och minskade energikonsumtion för de två olika köldmedierna jämfört mot R404A. Tabellen och studien vill påvisa att kompressorns energikonsumtion minskar vid konvertering till något av dessa köldmedier.

Köldmedium	Gångtid Kompressor	24h energikonsumtion (kompressor)	24h energikonsumtion (system)
R404A	100 %	100 %	100 %
R448A	104 %	94 %	97 %
R455A	99 %	91 %	94 %

Egen tabell med inspiration av (Sethi et al., 2016).

3 Metod

I detta kapitel presenteras metoderna som användes för att nå fram till resultaten och en förklaring till dess beräkningar.

3.1 Fallstudie

En fallstudie görs med ett specifikt syfte och beskriver ett specifikt fall som ligger till grunden för slutsatserna. En fallstudie grundar sig ofta på följande tekniker; intervjuer, observationer och arkivanalys för datainsamling (Höst, Regnell, & Runeson, 2006).

Rapporten är en fallstudie av en kylanläggning ombord på ett Ro-Pax fartyg. Fallstudien av kylanläggningen ligger till grunden för rapporten där syftet var att teoretiskt ta reda på hur energieffektiviteten påverkas vid en konvertering, och därmed anläggningens TEWI, samt teoretiskt undersöka vilka köldmedier med lägre GWP som är lämpliga konverteringsalternativ till referensanläggningen. Genom observationer och arkivanalys kunde driftsdata samlas in för att användas som grund till de teoretiska beräkningarna och jämförelserna.

3.2 Litteraturgenomgång

En väl genomförd litteraturgenomgång är en viktig del av ett examensarbete som grundar sig i en god vetenskaplig metodik och stödjer påbyggnaden av befintlig kunskap. När en tydlig frågeställning och del-problem är fastlagda sker ett mer specifikt fokus på litteraturen (Höst et al., 2006).

Den litteratur som använts i arbetet är bland annat kurslitteratur från tidigare kurser på Sjöingenjörsprogrammet på Chalmers. Annan litteratur som är betydelsefull för detta arbete har varit tidigare studier och vetenskapliga artiklar med inriktning på konvertering av kylanläggningar. Tidigare studier som har gjort konverteringar från R404A till andra köldmedium med liknande egenskaper har varit viktiga för att styrka resultaten i denna studien.

3.3 Insamling av data

Under studiebesöket var kylanläggningen på Ro-Pax fartyget i drift varav driftsinformation från en aktiv anläggning kunde samlas in. Kompressorn hade installerade manometrar som visade trycken i anläggningen; det ingående sugtrycket och det utgående trycket. Temperaturerna registrerades med hjälp av en IR-termometer på rörens yta. Annan information kunde avläsas från märkplåtar på kompressorn samt elmotorn. Insamlade data ses i Bilaga 4 . Den informationen som inhämtades från studiebesöket (2017-02-05) ligger till grund för våra beräkningar och jämförelser.

3.4 Beräkningsgång

Här beskrivs beräkningsgången för hur driftsdata tas fram för alternativa köldmedier. Därefter visas metoden för att bestämma TEWI för referensanläggningen med de olika köldmedierna.

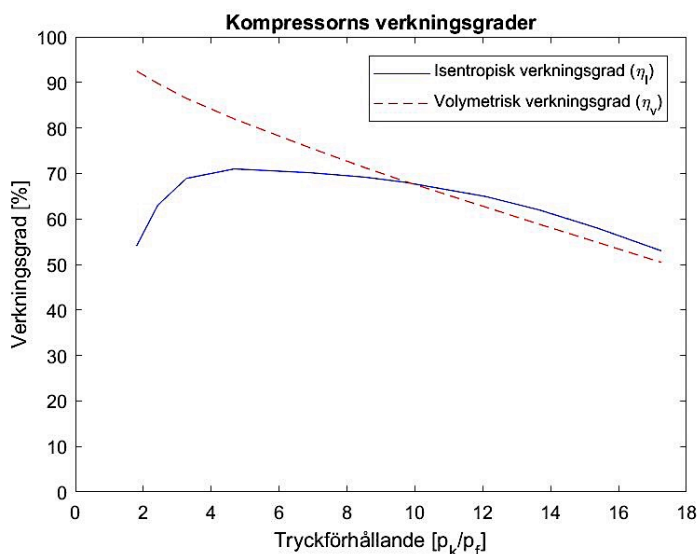
3.4.1 Referensanläggningen - förenklad modell

Vissa antaganden behövde göras innan prestandaberäkning för referensanläggningen med R404A som köldmedium kunde inledas. Antaganden är baserad på information tillgänglig om referensanläggningen och därefter har en förenklad modell tagits fram. De antaganden som tagits fram för den förenklade modellen är:

- 10K överhettning i förångaren
- Suggastemperatur 0°C
- Anläggningen motsvarar en frys
- Isentalpisk (ideal) expansion över expansionsventilen
- Tryckfall i systemet försummas
- Uppvärmning av köldmedium i rörledningar tas ej hänsyn till

3.4.2 Verkningsgrader för referensanläggningens kompressor

Den volymetriska verkningsgraden (η_v) för referensanläggningens kompressor förhåller sig till tryckförhållandet som beskrivs i avsnitt 2.2.1. Med hjälp av webbaserad mjukvara från Bitzer (2017) och tryck-entalpi diagram ($\log p-h$) för R404A har Figur 12 tagits fram som beskriver hur den volymetriska verkningsgraden (η_v) förhåller sig till tryckförhållandet i referensanläggningens kompressor. Dessutom har den isentropiska verkningsgraden (η_I) för kompressorn tagits fram med hjälp av Bitzer (2017) och tryck-entalpi diagram ($\log p-h$) för R404A. Den isentropiska verkningsgraden varierar också med tryckförhållandet, se Figur 12.



Figur 12 - Kompressorns verkningsgrad

Figur 12 visar den isentropiska och volymetriska verkningsgraden för referensanläggningens kompressor vilket har tagits fram med hjälp av Bitzer (2017) och tryck-entalpi diagram ($\log p-h$) för R404A.

3.4.3 Prestanda för referensanläggningen

Utifrån referensanläggningens driftdata beräknades dess kyleffekt/värmeeffekt (\dot{Q}), kompressoreffekt (\dot{P}_k) samt köldfaktor (COP_k). Med kompressoreffekt menas den energi som tillförs köldmediet i kompressorn.

Inledningsvis bestäms massflödet (\dot{m}_R) för köldmediet vilket kan tas fram genom att veta volymiteten (v) på kompressorns sug sida, se punkt 1 för R404A i Bilaga 1c. Förångnings- och kondenseringsstryck väljs i enlighet med referensanläggningens tryckmanometrar, 1,9 respektive 16 Bar(a), se Bilaga 4. Vidare behövs också det verkliga volymflödet ($\dot{V}_{verkliga}$) som tas fram genom den volymetriska verkningsgraden (η_v) och det maximala volymflödet (\dot{V}_{max}) för kompressorn. Den volymetriska verkningsgraden (η_v) för aktuellt tryckförhållande (p_k/p_f) kan utläsas ur Figur 12. Volymflödet blir således

$$\dot{V}_{verkliga} = \frac{\dot{V}_{max}}{\eta_v} \quad (3)$$

Massflödet \dot{m}_R kan nu bestämmas genom följande ekvation

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{V}_{verkliga}}{v} \quad (4)$$

Kompressoreffekten (\dot{P}_k) tas fram genom entalpin (h) före och efter kompressorn vid en isentropisk kompression, se punkt 1 och 2s för R404A i Bilaga 1c. Med hjälp av Figur 12 bestäms den isentropiska verkningsgraden för aktuellt tryckförhållande och kompressoreffekten (\dot{P}_k) kan bestämmas enligt

$$\dot{P}_k = \dot{m}_R \times \frac{(h_{2s} - h_1)}{\eta_I} \quad (5)$$

Värmeeffekten (\dot{Q}_k) är den energi som överförs till kylvattnet i kondensorn, vilket fås fram genom skillnaden på entalpin (h) före och efter kondensorn. Detta utläses ur mollierdiagram, se punkt 2 och 3 i Bilaga 1c för R404A. Värmeeffekten beräknas därmed genom

$$\dot{Q}_k = (h_3 - h_2) \times \dot{m}_R \quad (6)$$

För att beräkna kyleffekten (\dot{Q}_f) i referensanläggningen utläses entalpin (h) före och efter förångaren, se punkt 4 och 5 i Bilaga 1c för R404A. Därmed erhålls kyleffekten genom

$$\dot{Q}_f = (h_5 - h_4) \times \dot{m}_R \quad (7)$$

Köldfaktorn indikerar hur effektiv anläggningen är, det vill säga hur mycket kyleffekt som genereras i förhållande till tillförda kompressoreffekten. Vilket ger

$$COP_k = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{P}_k} \quad (8)$$

3.4.4 Prestanda med alternativa köldmedium

Efter att driftparametrar tagits fram för referensanläggningen tas nu driftdata fram för anläggningen om den skulle sättas i drift med ett annat köldmedium, utan att byta ut några komponenter. Här följer beräkningsgången för hur detta har genomförts i denna studie, vilket blir densamma för alla köldmedier som testas.

Först bestäms att samma kondenserings och förångningstemperatur skall gälla utifrån referensanläggningen. Detta leder till att förångningstryck och kondenseringsstryck kommer att variera på grund av köldmediernas egenskaper, se Bilaga 3

Kondenserings- och förångningstryck i den förenklade modellen

. För köldmedier som har glide väljs kondenserings- och förångningstryck utefter medeltemperaturen mellan bubbel och dagpunkt vid de aktuella temperaturerna.

Enligt avsnitt 3.4.3, beräknas kyl-, värme-, kompressoreffekt samt köldfaktor för respektive köldmedium. Värden tas fram på samma sätt som i avsnitt 3.4.3, skillnaden är att data avläses ur tryck-entalpi-diagram ($\log p-h$) eller tillståndstabeller för respektive köldmedium. I Bilaga 1d visas tryck-entalpi-diagram ($\log p-h$) för köldmediet R407C inklusive aktuella avläsningar för beräkning. Beräkningarna av resterande köldmedier genomförs därefter på samma sätt.

$\dot{P}_{k,aktuellt köldmedie}$ är kompressoreffekten som krävs för respektive köldmedie. För att denna skall vara jämförbar med referensanläggningen gäller det att samma kyleffekt genereras som vid användning av R404A som köldmedium. Eftersom kyleffekten ändras vid en konvertering till annat köldmedium kompenseras detta genom att justera kompressoreffekten för de alternativa köldmedierna. Med hjälp av den beräknade köldfaktorn enligt avsnitt 3.4.4 beräknas den nya kompressoreffekten ($\dot{P}_{k,kompenserad}$) med hjälp av

$$\dot{P}_{k,kompenserad} = \frac{\dot{Q}_{f,ref}}{COP_{k,aktuellt köldmedie}} \quad (9)$$

Vid kompensation för att få samma kyleffekt som i referensanläggningen kommer värmeenergin som avges i kondensorn att skilja sig, vilket tas fram genom att addera kompressor och kyleffekt

$$\dot{Q}_{k,kompenserad} = \dot{P}_{k,kompenserad} + \dot{Q}_{f,ref} \quad (10)$$

3.4.5 TEWI beräkning

Här beskrivs beräkningsgången av TEWI för referensanläggningen med respektive köldmedium. För att kunna beräkna TEWI behöver en del antaganden göras vilket i detta arbete är baserat på tidigare studiers antaganden samt med information tillgänglig om anläggningen.

Antaganden:

- Andelen läckt köldmedium (L) antas till 12.6 % vilket är ett genomsnitt av vad svenskregistrerade fartyg rapporterat in 2015 (Chalmers, 2017).
- Anläggningens livslängd (n) antas till 10 år.
- Andel återvunnet köldmedium vid utrangering antas till 90% av fyllnadsmängden enligt studien (Pigani et al., 2016)
- Kompressorns effekt antas vara densamma som tillförd elektrisk effekt till elmotorn som driver kompressorn, det vill säga $\dot{P}_k = \dot{P}_e$.
- Vid beräkning av energiförbrukningen tas endast hänsyn till kompressorns elektriska effekt \dot{P}_e .
- Kompressorn går kontinuerligt, d.v.s. 24 timmar om dagen och 365 dagar om året.

TEWI har tagits fram med hjälp av ekvation Error! Reference source not found., se avsnitt 2.4.5, där alla värden förutom GWP och energiförbrukningen ($E_{\text{årligt}}$) är densamma för alla köldmedier. Anläggningens fyllnadsmängd (m) är 29,6 kg, se Bilaga 4 . GWP för respektive köldmedium utläses ur Tabell 1 och $E_{\text{årligt}}$ tas fram med hjälp av följande ekvation

$$E_{\text{årligt}} = \dot{P}_{e,\text{aktuellt köldmedie}} \times 24 \times 365 \quad (11)$$

För att ta fram hur mycket CO_2 som släpps ut per kWh producerad el (β) måste hänsyn tas till hur mycket CO_2 som släpps ut vid produktionen av elektrisk energi. Här antas en dieselgenerator med en specifik bränsleförbrukning på $210g/kWh$ enligt Woud & Stapersma (2002). Genom att anta att Marin Gasolja (Marine Gas Oil, MGO) används som bränsle bestäms att mängden CO_2 -utsläpp är 3.2 kg per kg MGO (Sasaki, 2011). CO_2 -utsläpp per kWh producerad el (β) bestäms därmed genom

$$\beta = \frac{210}{1000} \times 3.2 = 0.672 \quad (12)$$

TEWI för respektive köldmedium kan därmed beräknas enligt ekvation Error! Reference source not found., se avsnitt 2.4.5.

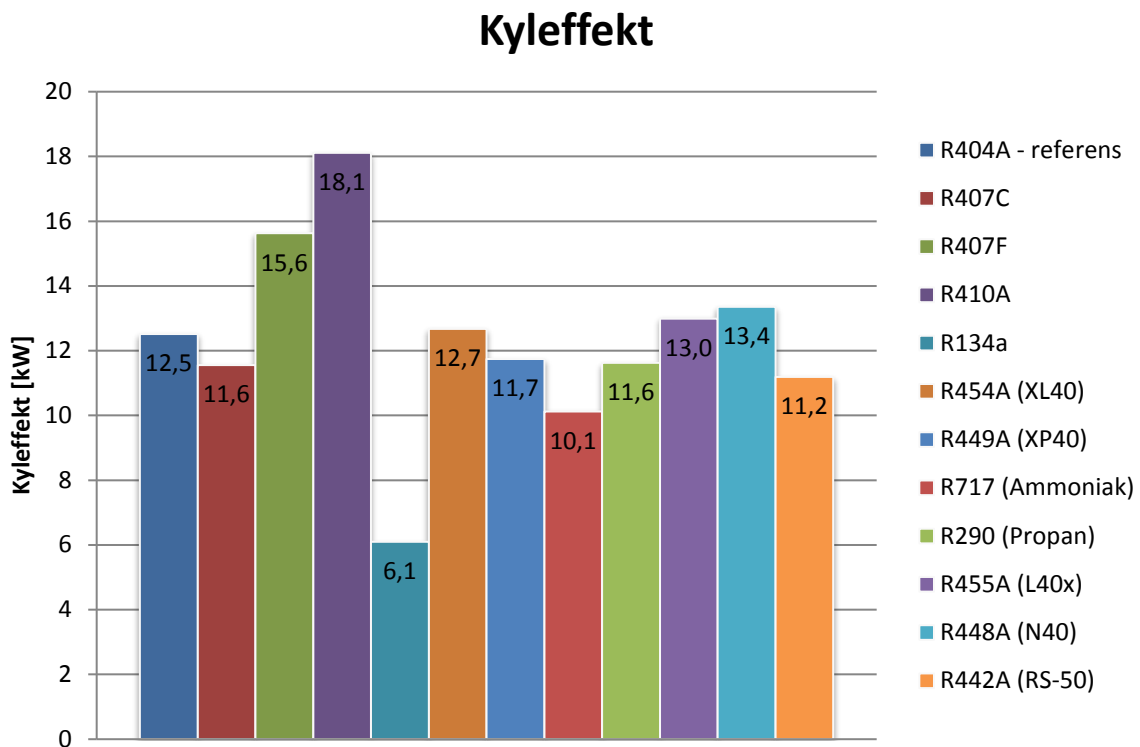
4 Resultat

I följande kapitel presenteras diagram med de teoretiska resultaten som studien har kommit fram till.

4.1 Prestanda och effektivitet

Här presenteras en jämförelse mellan de olika köldmedierna.

4.1.1 Kyleffekt vid en direkt konvertering

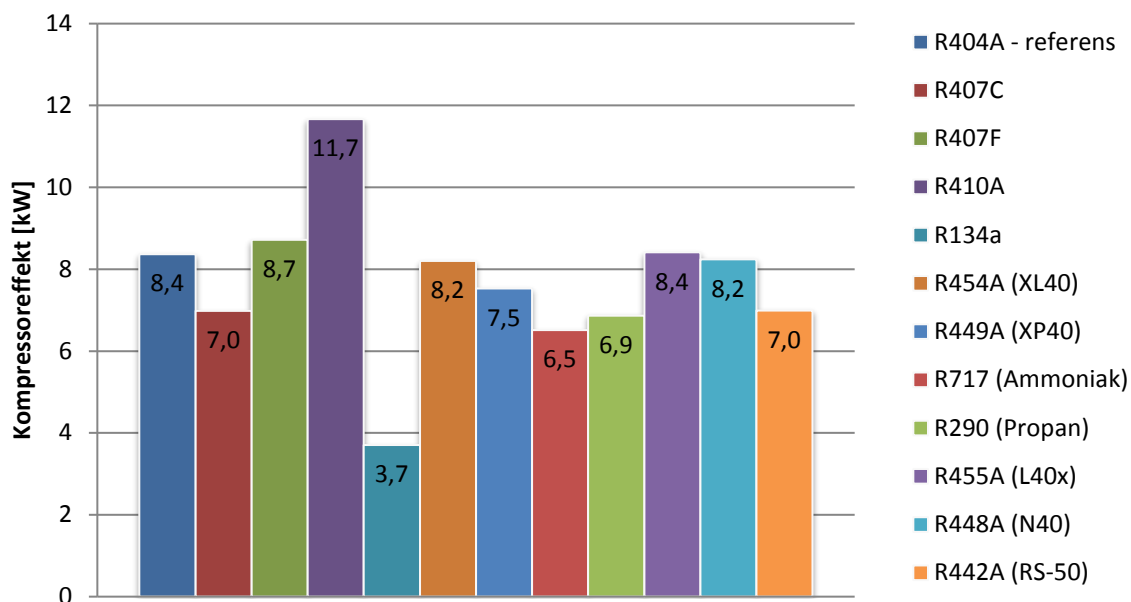


Figur 13 – Jämförelse av kyleffekten vid en direkt konvertering

I Figur 13 presenteras den beräknade kyleffekten som de olika konverteringsalternativen skulle leverera i referensanläggningen utan byte av kompressor eller annan komponent. I diagrammet ses att i förhållande till referensanläggningen (R404A) så ger R407C, R454A, R449A, R290, R455A, R448A samt R442A liknande kyleffekt (max 10,5% skillnad relativt R404A). Högst kyleffekt uppnås av R407F och R410A (+24,9% samt +44,7%). Lägst kyleffekt generas av R134a (-51,2%).

4.1.2 Kompressoreffekt vid en direkt konvertering

Kompressoreffekt vid konvertering utan byte av kompressor

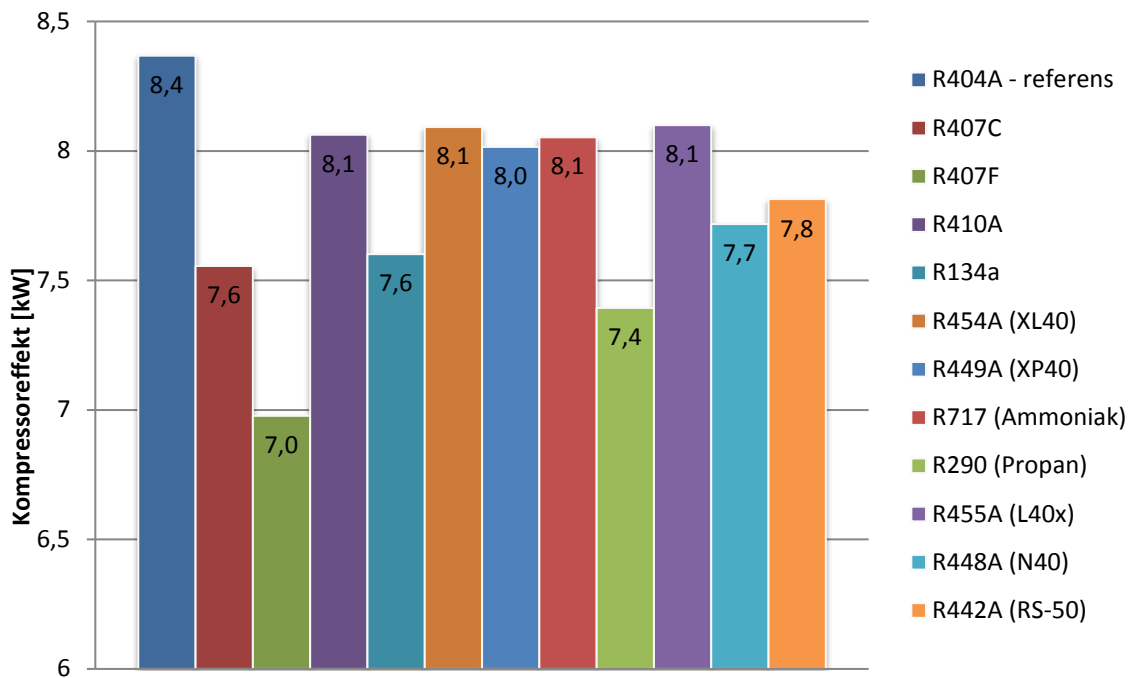


Figur 14 – Kompressoreffekt vid direkt konvertering

Figur 14 – Kompressoreffekt vid direkt konvertering visar vilken kompressoreffekt som krävs för att generera kyleffekten enligt Figur 13 vid en konvertering utan byte av kompressor eller annan komponent i referensanläggningen. Kompressoreffekten varierar ganska kraftigt. R407F och R410A förbrukar mer kompressoreffekt än R404A men samtidigt levererar de också mer kyleffekt enligt Figur 13. R454, R455A samt R448A förbrukar ungefär lika mycket kompressoreffekt som R404A men levererar också något mer kyleffekt. Resterande förbrukar mindre kompressoreffekt, speciellt R134a som förbrukar 66% mindre än R404A.

4.1.3 Kompressoreffekt

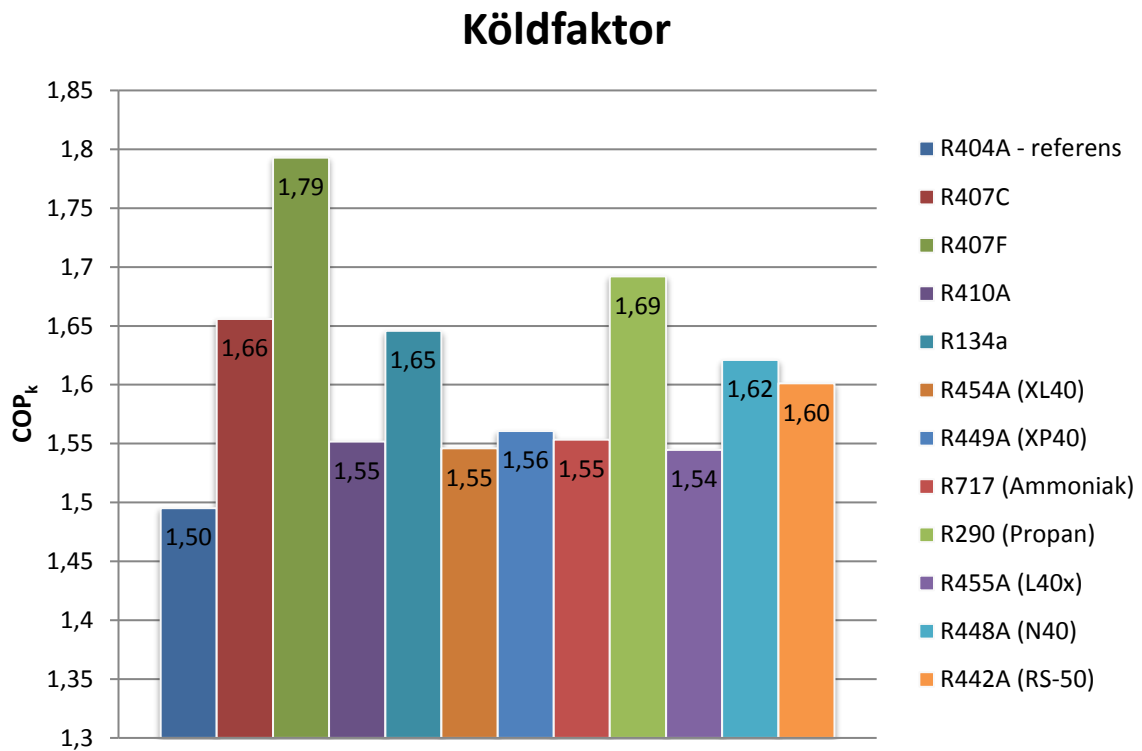
Kompressoreffekt vid kyleffekten 12,5kW



Figur 15 - Jämförelse av kompressoreffekten

Figur 15 visar hur mycket kompressoreffekt som behövs för att uppnå samma kyleffekt som i referensanläggningen. Alla köldmedier resulterade i en minskad kompressoreffekt gentemot referensanläggningen. Speciellt R407F visade sig generera en betydligt lägre kompressoreffekt (-16,6%).

4.1.4 Energieffektivitet (köldfaktor)



Figur 16 - Jämförelse av köldfaktorn

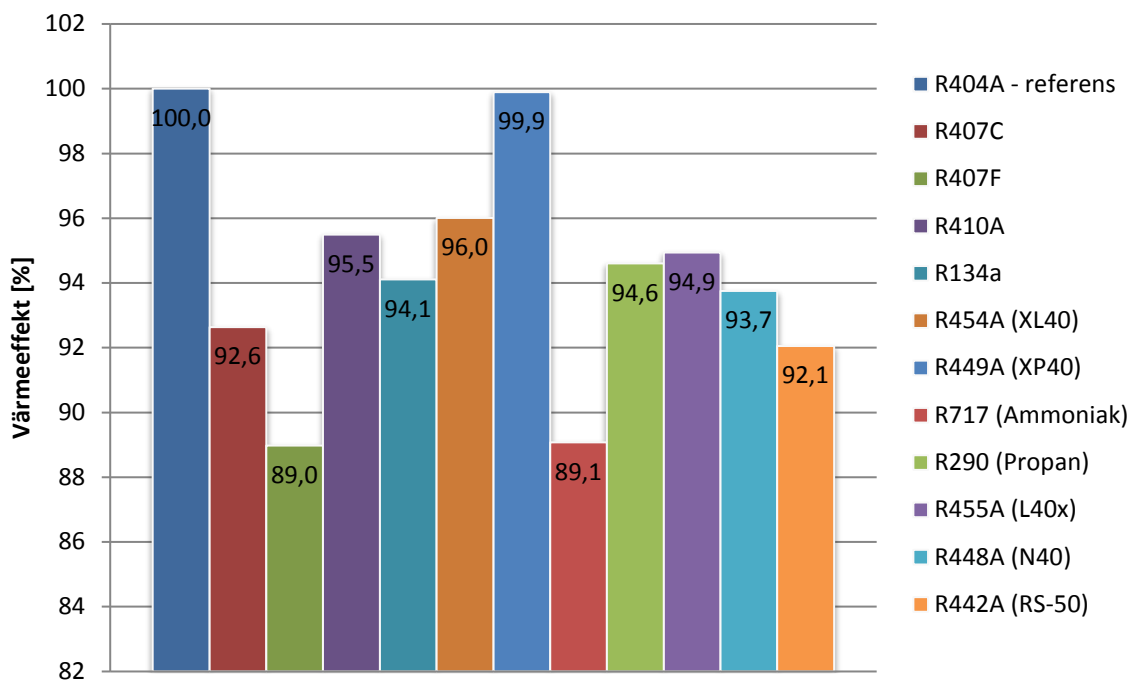
Figur 16 presenterar den teoretiska köldfaktorn som beräknades för de olika köldmedierna i referensanläggningen. Som det presenteras i diagrammet genererar alla alternativa köldmedier en ökad köldfaktor gentemot referensanläggningen. Den bästa köldfaktorn uppnås av R407F (+19,9%).

4.2 Prestanda och effektivitet relativt referensanläggningen

Här presenteras en procentuell skillnad mellan de olika köldmedierna då de genererar samma kyleffekt som referensanläggningen (R404A).

4.2.1 Värmeeffekt

Värmeeffekt vid kyleffekten 12,5kW

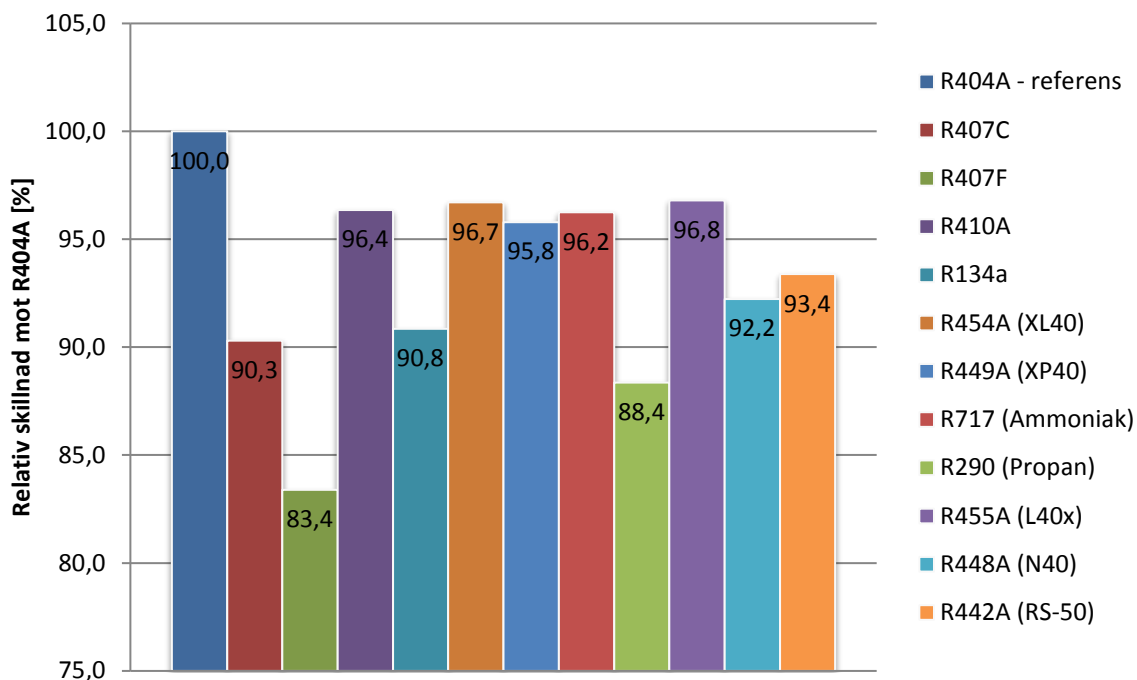


Figur 17 - Relativ skillnad på värmeeffekten vid kyleffekten 12,5kW

I Figur 17 presenteras hur värmeeffekten ändras vid konvertering till annat köldmedium. Värmeeffekten är den effekt som avges i kondensorn. Förutom R449A visar det sig att värmeeffekten som behöver avges i kondensorn är mindre för alla alternativen. Även här utmärker sig R407F som avger minst värme i kondensorn (-11%).

4.2.2 Kompressoreffekt

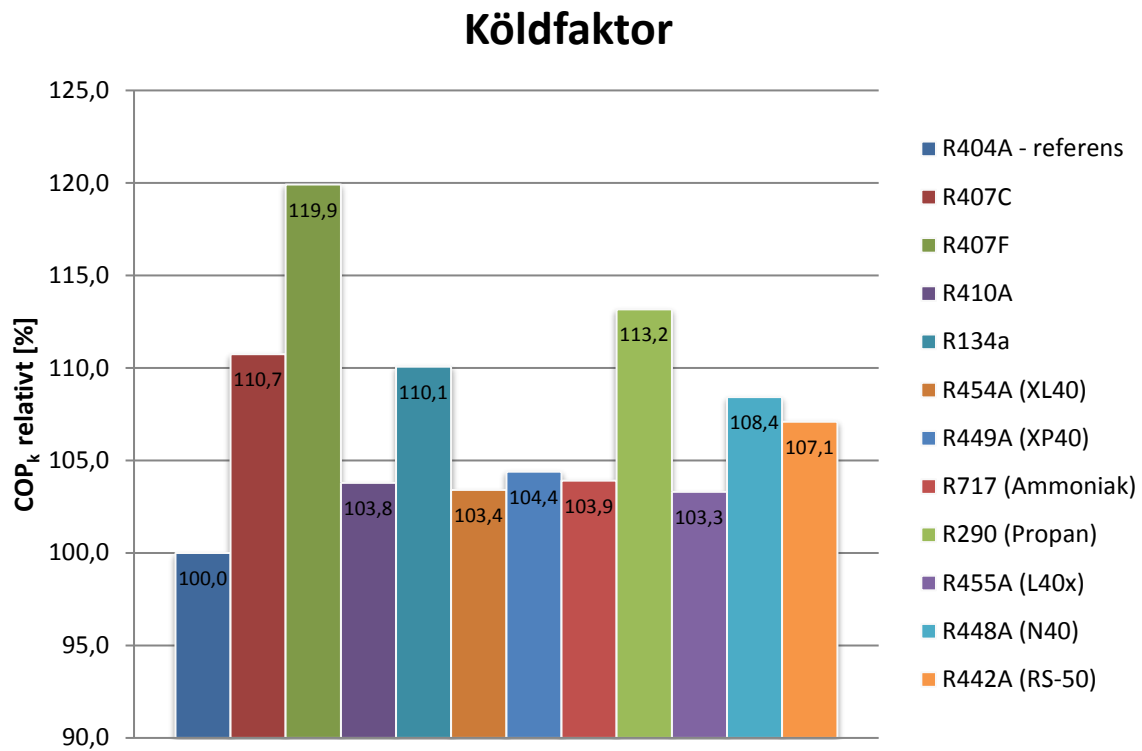
Kompressoreffekten vid kyleffekten 12,5kW



Figur 18 - Relativ skillnad på kompressoreffekten vid kyleffekten 12,5kW

Figur 18 visar hur kompressoreffekten procentuellt skiljer sig från referensensanläggningen. Alla alternativen förbrukar en lägre kompressoreffekt vilket betyder att anläggningens energiförbrukning kommer bli lägre. En minskning mellan 3,3 och 16,6% uppnås beroende på köldmedium.

4.2.3 Köldfaktor



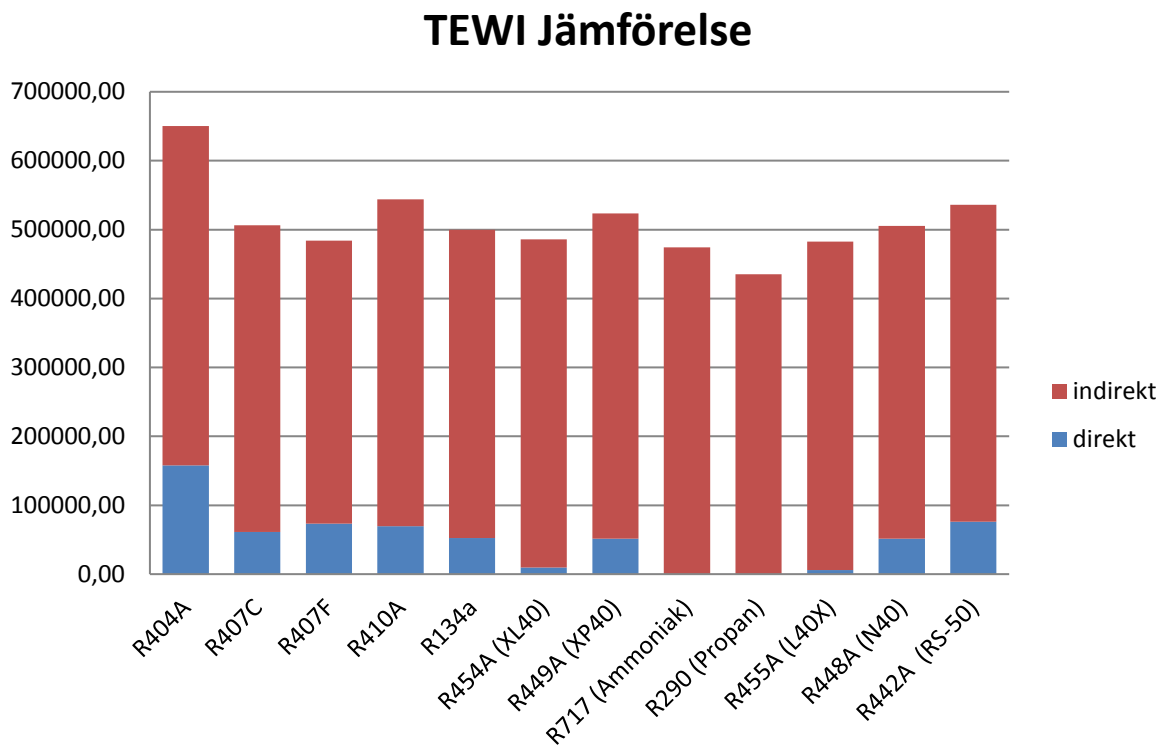
Figur 19 - Relativ skillnad av köldfaktor

Figur 19 visar hur köldfaktorn ändras vid byte av köldmedium i förhållande till R404A. Alla alternativen ger en bättre köldfaktor vilket betyder att anläggningen blir mer energieffektiv.

4.3 Totala klimatpåverkan

Här presenteras köldmediernas totala klimatpåverkan.

4.3.1 TEWI

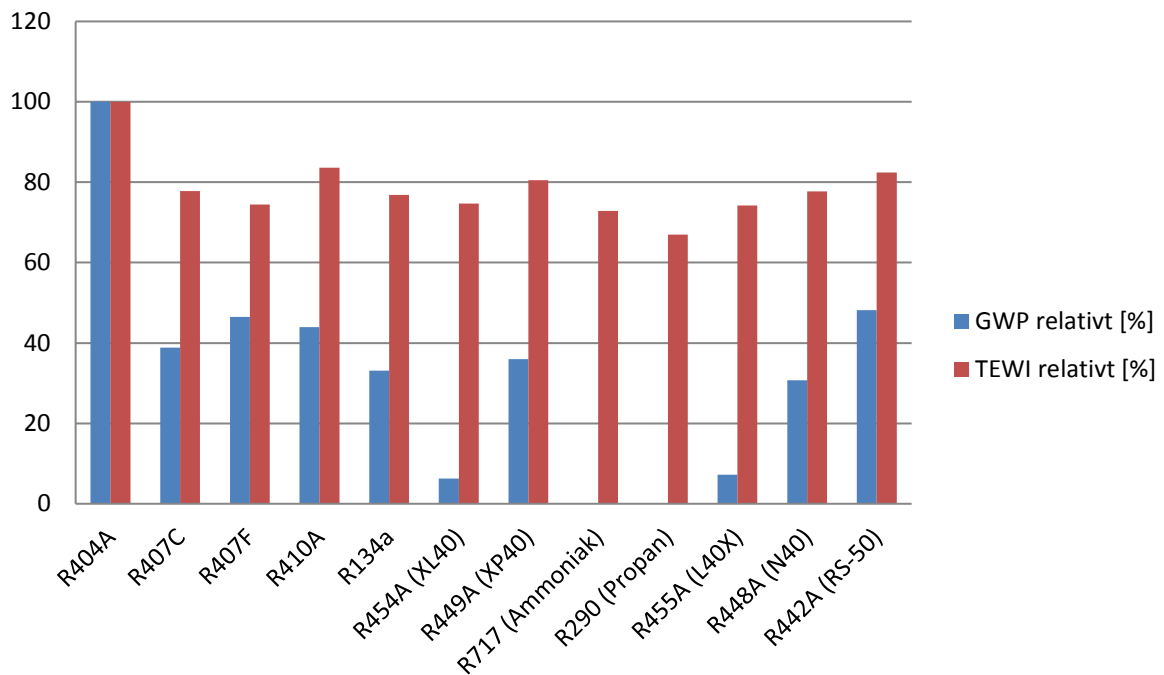


Figur 20 - TEWI Jämförelse

I Figur 20 presenteras TEWI för anläggningen med de olika köldmedierna. Det visas också hur stor del som är direkta respektive indirekta utsläpp. Alla alternativa köldmedierna ger ett lägre TEWI än referensen (R404A). Det som påverkar de direkta utsläppen är köldmediernas GWP och de indirekta utsläppen är kopplade till energiförbrukningen för anläggningen. Lägst TEWI fås av de naturliga köldmedierna ammoniak och propan. Av de resterande köldmedierna har R455A, R407F och R454A lägst TEWI, en minskning med omkring 26% gentemot R404A.

4.3.2 GWP & TEWI

GWP och TEWI relativt R404A



Figur 21 - GWP & TEWI relativt R404A

Figur 21 presenterar köldmediernas GWP och anläggningens TEWI procentuellt gentemot referensensanläggningen. Det syns tydligt att TEWI minskar för alla alternativa köldmedier. Det visar sig också att en stor procentuell minskning av GWP inte medför en betydande reduktion av TEWI.

5 Diskussion

Här diskuteras metoden och de resultat som presenteras i rapporten.

5.1 Metoddiskussion

Studien grundar sig på en fallstudie av kylanläggningen ombord på ett Ro-Pax fartyg. De värden som registrerades där ligger till grund för de teoretiska beräkningarna. Det svåraste var att veta tillförlitligheten av de temperaturmätningar som genomfördes. Anläggningen innehöll tryckmanometrar på kompressorns sug och trycksida vilket kunde avläsas men temperaturerna fick registreras ovanpå rören med hjälp av en IR-termometer. Hur exakta värden som registrerades kan diskuteras och kan ge en missvisande bild av anläggningen. Därmed togs en förenklad modell fram där endast tryck på kompressorns sug och trycksida användes tillsammans med data för kompressorn. Därmed kringgås osäkerheten i att använda de uppmätta temperaturerna.

Det var komplext att göra beräkningar på referensanläggningen på grund av dess utformning med kyl och frys i samma system. Temperaturen i kylarna skiljer sig ifrån temperaturen i frysarna vilket medför olika tryck och tryckförhållanden. För att komma vidare med beräkningarna antogs att hela anläggningen var en enda stor frys, enligt den förenklade modellen, avsnitt 3.4.1.

Flödet av köldmediet i anläggningen bestämdes med hjälp av kompressorns specifikation Bitzer (2017) samt med hjälp av tryck-entalpi diagram ($\log p-h$) för R404A. För att kunna komma vidare i beräkningarna fick generella antaganden göras utifrån diskussion och godkännande av handledaren, samt med råd från Bo Frejd (f.d. konstruktionschef på f.d. STAL Refrigeration) som har lång erfarenhet gällande konvertering av marina kylanläggningar. Antaganden är baserade på vad som ansågs relevant för referensanläggningen med hänsyn till den begränsade tillgången till information om referensanläggningens kylprocess och dess komponenter. Vidare är en del antaganden baserade på tidigare studier.

Tillgången till köldmediedata för de nyare köldmedierna är begränsade och i vissa fall saknas detaljerade köldmedietabeller. Då tillgången är begränsad är köldmediedata hämtat från flera källor vilka kan vara av varierad kvalitet och exakthet, denna variation bedöms dock vara så pass liten att det inte skall ha någon betydelse för resultaten. Det finns flera faktorer att ta hänsyn till vid beräkning av en faktisk konvertering, till exempel att värmeöverföringen i kondensator och förångare påverkas av vilket köldmedium som används. Den skillnaden anses däremot vara obetydlig så den försummas i denna studien.

Denna studie använder en referensanläggning ombord på ett befintligt Ro-Pax fartyg till grund för de teoretiska beräkningarna. En alternativ metod skulle till exempel kunna vara att ta fram en teoretisk modell, dels för en hypotetisk frysanläggning men även för en

kylanläggning. Där en del faktorer bestäms och sätts konstanta. Den teoretiska modellen kan då ställas upp med endast köldmediets egenskaper som variabel. I detta fallet skulle en kompressor som finns god kännedom om användas vid beräkning, alternativt ta fram en typisk kompressormodell baserad på tidigare studier.

Teori och praktik skiljer sig åt, men genom att vara konsekvent och göra beräkningarna med samma grundförutsättning utifrån de värden som kunde utläsas på Ro-Pax fartygets kylanläggning anses jämförelsen mellan olika köldmedier ha gett tillförlitliga resultat.

Vid beräkning av TEWI behöver en del antaganden åstadkommas gällande bland annat anläggningens livstid, CO_2 -utsläpp vid generering av elektricitet och kompressorns årliga gångtid. Dessa antaganden påverkar den indirekta klimatpåverkan vilket är den dominerande faktorn gällande TEWI. Dessa antaganden är samma för respektive köldmedium och har därmed mindre betydelse för resultatet då den procentuella skillnaden blir densamma. Däremot har de inverkan på förhållandet mellan indirekt och direkt klimatpåverkan, eftersom om den indirekta klimatpåverkan är lägre blir förhållandet mindre. Vad gäller antaganden som påverkar de direkta utsläppen som till exempel andelen läckt köldmedium, bedöms de vara så pass tillförlitliga antaganden att de ger en bra bild av verkligheten.

5.2 Resultatdiskussion

Resultaten som studien kom fram till är positiva gällande energieffektiviteten och TEWI med enbart hänsyn till köldmediernas kylegenskaper. Enligt resultaten ger alla köldmedierna som studien berört en minskning av den totala klimatpåverkan gentemot R404A, vilket kan förklaras med att R404A både har högre GWP samt sämre kylegenskaper än de andra köldmedierna.

De nya reglerna om påfyllnadsstopp för köldmedier med GWP över 2500 träder i kraft år 2020, detta kommer att påverka den svenska sjöfarten då övervägande kylanläggningar använder köldmediet R404A i proviantkylanläggningar enligt Chalmers (2017).

Kyleffekten för köldmedierna gav varierande resultat. R407F och R410A gav en utmärkande ökad kyleffekt vid en direkt konvertering utan att byta någon komponent i anläggningen. Samtidigt genererar det att kompressoreffekten ökar, speciellt för R410A. För R407F ökar endast kompressoreffekten cirka 3,6% varav den skulle kunna vara ett bra alternativ då kompressorn eventuellt inte behöver bytas. Köldmedierna R454A, R455A och R448A genererade samtliga något bättre kyleffekt än R404A vid en direkt konvertering samtidigt som de förbrukar mindre kompressoreffekt. Därmed kan även de vara bra alternativ för en direkt konvertering utan att byta ut kompressorn i anläggningen. Ett köldmedium var mycket sämre än de flesta, R134a, som vid en direkt konvertering genererar en mycket låg kyleffekt. Resterande köldmedier R407C, R449A, ammoniak, propan och R442A genererar 10-22% lägre kyleffekt vid en direkt konvertering och är därmed troligen inte ett bra alternativ för konvertering utan att byta någon komponent, som till exempel kompressorn.

Alla de alternativa köldmedierna ger en minskad kompressoreffekt för att uppnå samma kyleffekt som i referensanläggningen, vilket skulle kunna uppnås genom att byta kompressor i anläggningen. Därmed krävs det mindre energi för att uppnå samma kyleffekt. Minst energi till kompressorn krävs det för köldmediet R407F, se Figur 18.

Köldfaktorn är högre för alla de alternativa köldmedierna och därmed effektiviteten gentemot referensanläggningen med R404A som köldmedium. Det betyder att driften blir billigare än för R404A då kompressoreffekten blir lägre. Enligt studien visas en tydlig trend att det finns många bra alternativ till R404A och de är generellt bättre i alla avseenden. Speciellt utmärkande är R407F som dessutom har högst köldfaktor.

Värmeeffekten som genereras vid kyleffekten 12,5 kW påverkar valet av kondensor. Alla köldmedier resulterade i en minskad värmeeffekt vilket medför att en mindre kondensor eventuellt kan användas. Detta kan i sig bidra till att minska TEWI ytterligare då det går åt energi att pumpa kylvatten genom kondensorn som då skulle kunna reduceras och därmed kan den indirekta påverkan minskas ytterligare. Köldmediet R449A gav sämsta resultatet gällande värmeeffekten men är trots det inte sämre än R404A. R407F genererade minst värmeeffekt gentemot R404A varav den är mest fördelaktig även i det avseendet.

Vad beträffar anläggningens totala klimatpåverkan TEWI ger alla konverteringsalternativ, enligt studien, ett bättre resultat. GWP har stor betydelse för den direkta miljöpåverkan men enbart en stor procentuell minskning av GWP medför inte lika betydande minskning av TEWI. För att minska TEWI är det viktigt att fokusera på energieffektivisering av kylanläggningen samt vid generering av elektricitet. Eftersom de indirekta koldioxidutsläppen är dominerande för TEWI, vilket ses tydligt i Figur 20. Vid beräkning av TEWI antogs kompressorns årliga gångtid till 24 timmar om dygnet och 365 dagar om året, varav det i verkligheten troligtvis är mindre. Vilket innebär att de indirekta utsläppen i verkligheten skulle bli något mindre än vad denna studie visar, det vill säga att förhållandet mellan de indirekta och direkta utsläppen blir något mindre.

Enligt den tidigare studien av Pigani et al. (2016) användes köldmediet R407F i den befintliga anläggningen ombord och resultaten av den studien medförde ingen förbättring av den totala klimatpåverkan vid jämförelse mot köldmedier med lägre GWP. Pigani et al. (2016)'s resultat styrker denna studies resultat eftersom R407F visat sig ha så pass bra egenskaper.

Enligt studien av Mota-Babiloni et al. (2014) förespråkar de köldmedierna R454A (XL40 alt. DR-7) och R455A (L40x) som långsiktiga konverteringsalternativ till R404A. Våra resultat ger en liknande bild och resulterar i en förbättrad klimatpåverkan. Båda alternativen resulterar i liknande prestanda för kyleffekt, köldfaktor och TEWI gentemot varandra. Nackdelen med dessa köldmedier är att de är något brandfarliga. Om brandfarliga köldmedier inte är ett alternativ presenterar Mota-Babiloni et al., (2014) köldmedierna R449A (XP40 alt. DR-33)

och R448A (N40) som långsiktiga konverteringsalternativ. Enligt våra resultat skiljer sig dessa två köldmedierna något åt men resulterar i en förbättrad klimatpåverkan gentemot R404A. De är något sämre alternativ gentemot de något brandfarliga köldmedierna troligtvis på grund av deras högre GWP.

Enligt studien av Sethi et al. (2016) jämförde de köldmedierna R455A (L40x) och R448A (N40). De hävdade att båda köldmedierna har liknande kapacitet och egenskaper med R404A. Energikonsumtionen minskade mest för R448A och det visar våra resultat också. Enligt våra beräkningar är R448A bättre än R455A i alla de avseenden som presenteras förutom TEWI som är högre, vilket troligtvis är på grund av att R448A har högre GWP, se Figur 21. Enligt våra beräkningar är båda köldmedierna goda konverteringsalternativ för R404A. R448A är inte brandfarligt medan R455A är något brandfarligt, se Tabell 2.

Utifrån de resultat som studien ledde till anses köldmediet R407F passa referensanläggningen bäst med hänsyn till kylgenskaper och miljö. Det som denna studie inte har fokuserat på är om denna konvertering skulle vara kompatibel med den befintliga utrustningen ombord på Ro-Pax fartyget. Då det vid en konvertering finns flera praktiska aspekter än enbart köldmediets kylgenskaper som måste tas hänsyn till. Vilket kan vara val av olja i kompressor, material i tätningar och eventuellt byte av strypventil etc. Detta är inget som denna studien har tagit hänsyn till.

Utifrån resonemang och köldmedieegenskaper är R134a, ammoniak och propan inte bra konverteringsalternativ. R134a har ett för lågt förångningstryck för att kunna användas i en frys, det vill säga att det skulle bli undertryck på lågtryckssidan vid den temperatur som krävs. Ammoniak och propan utesluts att användas ombord på ett Ro-Pax fartyg med tanke på ammoniaks starka doft och giftighet samt propans höga brandfarlighet.

5.3 Reliabilitet och validitet

Hur bra tillförlitligheten är hos den insamlade informationen kallas reliabilitet. Hur väl den informationen stämmer överens med vad studien anser att undersöka kallas validitet (Ghavampouri & Hansson, 2014).

Studien utgick ifrån avlästa värden från de installerade manometrarna för referensanläggningen. Reliabiliteten för den information som kunde avläsas direkt från manometrarna under studiebesöket har god tillförlitlighet för att det är registrerad information från en aktiv anläggning i drift. De avlästa trycken har använts till framtagandet och beräkning av den förenklade modellen. Dock finns det också en osäkerhet i tillförlitligheten hos manometrarna med tanke på deras kalibrering och kondition. Driftstemperaturerna för anläggningen uppmättes med hjälp av en IR-termometer utanpå rören då anläggningen var aktiv. Tillförlitligheten för den informationen är något missvisande för att det är svårt att få exakta temperaturer för mediet i rören då temperaturen tas utanpå dessa. Därmed har dessa

uppmätta temperaturer inte använts vid beräkningar utan mer som stöd till framtagande av den förenklade modellen.

Resultaten som studien presenterar är teoretiska beräkningar med antaganden gjorda för att underlätta beräkningen. Formler som använts vid beräkning återfinnes i kurslitteratur, Nydal (2010) och har därmed hög validitet. Studien är teoretisk med inspiration från verkligheten men teori och praktik stämmer oftast inte överens till 100% så med tanke på de antaganden som har gjorts för att skapa en förenklad modell kan det medföra en viss missvisning av resultatet. Samtidigt har studien varit konsekvent vilket resulterar i god validitet.

Med inspiration från tidigare studier och jämförelser med deras resultat pekar det mot att resultaten i denna studie är adekvata. Denna studie är baserad på referensanläggningen enligt avsnitt 2.6 men är relevant även på andra fartyg där R404A används i kyl och frysanläggningar. Men framförallt i frys, där frysen har en egen kompressor och inte delar slinga med en kyl. Eftersom vid beräkningar i denna studie antas anläggningen vara endast en frys och med de temperaturer som gäller där.

6 Slutsatser

Utifrån de resultat som studien presenterar kan följande slutsatser dras.

Alla de alternativa köldmedierna som studien valde att undersöka medför en minskning av den totala klimatpåverkan för referensanläggningen. Lägst total klimatpåverkan fås av de naturliga köldmedierna, propan och ammoniak. Dessa bedöms dock olämpliga att använda på ett Ro-Pax fartyg. De resterande köldmedierna är relevanta konverteringsalternativ för referensanläggningen då enbart hänsyn tas till hur den totala klimatpåverkan för anläggningen skulle påverkas. Bortsett från de naturliga köldmedierna fås lägst total klimatpåverkan av R455A som har 25,8% lägre TEWI än referensanläggningen (R404A).

Med hänsyn till Figur 21 dras slutsatsen att en stor procentuell minskning av GWP inte automatiskt medför en lika betydande reducering av TEWI. Detta tyder på vikten av att fokusera på energieffektivisering av en kylanläggning och inte enbart fokusera på köldmediernas GWP.

Köldmedierna; R407C, R407F, R454A, R449A, R455A, R448A och R442A är alla konverteringsalternativ för referensanläggningen, med avseende på deras liknande egenskaper gentemot R404A och att de medför en bättre energieffektivitet. Speciellt utmärkande är R407F som har bäst egenskaper med hänsyn till kyleffekt, köldfaktor och kompressoreffekt.

6.1 Vidare forskning

För vidare forskning på ämnet skulle det vara intressant att praktiskt undersöka vilka av dessa köldmedier som skulle fungera som konverteringsalternativ till referensanläggningen. Bland annat titta på kompatibilitet gällande olja i kompressor, tätningar, strypventil och rörledningar m.m. När det gäller tätningar är det speciellt axeltätningen i kompressorn som är viktig, materialet i tätningen måste vara kompatibel med köldmediet som används annars finns stor risk för läckage. Fortsättningsvis bör kompatibilitet med tryckkärl så som vätskeavskiljare, kondensator och förångare undersökas, till exempel om de klarar aktuellt köldmedium och tryckförhållande efter en konvertering. Det vore intressant att med en fördjupad undersökning ta reda på vilket köldmedium som skulle innebära minst ingrepp i systemet, samt även ta hänsyn till köldmediernas priser och tillgång för att se hur det kan påverka valet av köldmedium. Fortsättningsvis skulle det vara intressant att undersöka om denna studie är betydande för andra typer av fartyg än Ro-Pax.

Referenser

- Alvarez, H. (2006). *Energiteknik. D. 1* (3. uppl). Lund: Studentlitteratur. Retrieved from <http://libris.kb.se/resource/auth/270274> (Alvarez, Henrik, 1928-)
- Bitzer. (2017). Bitzer software. Sindelfingen, DE: Bitzer. Retrieved from <https://www.bitzer.de/websoftware/>
- Bolaji, B. O., & Huan, Z. (2013). Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.008>
- Brown, J Steven, PhD, P. (2009). HFOs. *ASHRAE Journal; New York*, 51(August 2009), 6. Retrieved from <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com/docview/220448891?accountid=10041>
- Chalmers. (2017). *Köldmedieanvändning på Svenska fartyg*. Göteborg, SE. Retrieved from <https://pingpong.chalmers.se/launchCourse.do?id=7519>
- Chemours. (2016). Chemours Refrigerant Expert. Wilmington, Delaware US: The Chemours Company. Retrieved from https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/DUPREX/DUPREX.html
- Chemours. (2017). Opteon™ XP40 (R-449A) refrigerant. Retrieved March 14, 2017, from https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/Opteon/Stationary_Refrigeration/products/Opteon_XP40.html
- Chemours Company FC, L. O. (2016a). *Opteon XL40* (Vol. 4). Retrieved from https://www.chemours.com/Opteon_Stationary/es_ES/assets/downloads/Opteon-XL40_PIB.pdf
- Chemours Company FC, L. O. (2016b). *Opteon XP40*. Retrieved from https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/Opteon/Stationary_Refrigeration/assets/downloads/Opteon-XP40-R-404A-R-507-retrofit-guidelines.pdf
- Europaparlamentets och rådets förordning nr 517/2014. (2014). *F-Gasförordningen. Europeiska Unionens officiella tidning* (Vol. 2014). Retrieved from http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2014_150_R_0008&from=SV
- Ge, Y. T., & Cropper, R. (2008). Performance simulation of refrigerated display cabinets operating with refrigerants R22 and R404A. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.01.004>
- Ghavampouri, A., & Hansson, J. (2014). *En kartläggning kring användandet av köldmedier ombord på svenska fartyg John Hansson*. (Examensarbete, Chalmers tekniska högskola, Institutionen för sjöfart och marinteknik). Retrieved from <http://studentarbeten.chalmers.se/publication/204106-en-kartlaggning-kring-anvandandet-av-koldmedier-ombord-pa-svenska-fartyg>
- Gröndahl, F., & Svanström, M. (2010). *Hållbar Utveckling - en introduktion för ingenjörer och andra problemlösare* (LIBER). Stockholm.
- Honeywell. (2014). *Solstice® N40 (R-448A)*. *Solstice® N40 (R-448A)* (Vol. 40). 3001 Heverlee, Belgium. Retrieved from <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp->

- content/uploads/2015/03/Solstice-N40-TDS-141216-vF.pdf
- Honeywell. (2016). *Solstice*® L40X (R-455A) (Vol. 145). 3001 Heverlee, Belgium. Retrieved from https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2016/10/Solstice_L40X_technical_datasheet.pdf
- Hundy, G. F., Trott, A. R., Welch, T. C., Hundy, G. F., Trott, A. R., & Welch, T. C. (2008). Chapter 3 – Refrigerants. In *Refrigeration and Air-Conditioning* (pp. 30–40). <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8519-1.00003-7>
- Hwang, Y., Ohadi, M., & Rademacher, R. (1998). Natural Refrigerants. *Mechanical Engineering*, 120(10), 4. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/230201987/fulltext/71C17EAB695D4FADPQ/1?accountid=10041>
- Höst, M., Regnell, B., & Runeson, P. (2006). *Att genomföra examensarbete* (1:6). Lund: Studentlitteratur AB. Retrieved from www.studentlitteratur.se
- IMO. (2017). Ozone-depleting substances (ODS) – Regulation 12. Retrieved April 4, 2017, from [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Ozone-depleting-substances-\(ODS\)---Regulation-12.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Ozone-depleting-substances-(ODS)---Regulation-12.aspx)
- Johansson, A., & Lundqvist, P. (2001). *ATT KONVERTERA R22 - INSTALLATIONER*. Stockholm, SE. Retrieved from http://www.energy.kth.se/proj/projects/r22_retrofit/www/files/r22inst.pdf
- Juel Skovrup, M. (2000). Refrigeration Utilities. Lyngby, DK: Technical University of Denmark. Retrieved from www.et.dtu.dk/CoolPack
- Linde. (2017a). HFOs Refrigerant solutions with zero ODP and very low GWP. Retrieved March 15, 2017, from http://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfo_refrigerants/index.html
- Linde. (2017b). R407F (Genetron PERFORMAX LT). Retrieved March 16, 2017, from http://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfc_refrigerants/r407f/index.html
- Linde. (2017c). *R442a (Rs-50)*. Seitnerstrasse 70, 82049 Pullach,. Retrieved from http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/R442A - RS-50 brochure17_113860.pdf?v=2.0
- Linde. (2017d). R442A (RS-50). Retrieved March 16, 2017, from http://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfc_refrigerants/r442a/index.html
- 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>
- Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Barragán, Á., Molés, F., & Peris, B. (2014). Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline. *International Journal of Refrigeration*, 44, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.015>
- Naturvårdsverket. (2007). *Skyddande ozonskikt*. Stockholm. Retrieved from <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5767-1.pdf>

- Nydal, R. (2010). *Praktisk Kylteknik*. Stockholm: Svenska kyltekniska föreningen.
- Pearson, A. (2005). Carbon dioxide - New uses for an old refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 28(8), 1140–1148. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.09.005>
- Petrini, C. (2017). Ozonförtunnande ämnen och fluorerade växthusgaser. Retrieved March 20, 2017, from <http://transportstyrelsen.se/sv/sjofart/Miljo-och-halsa/Luftforening/Ozonfortunnande-amnen/>
- 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>
- Refrigerant Solutions Ltd, R. (2012). Refrigerant Solutions. Retrieved March 19, 2017, from <http://www.refsols.com/RS-50.html>
- Reiniche, S. (2010). ANSI/ASHRAE Addendum ak to ANSI/ASHRAE Standard 34-2007. *ASHRAE Standard*, 4723, 5.
- Sasaki, N. (2011). Energy Efficiency Design Index EEDI, (April), 1–149. Retrieved from <https://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/4-Stroke-Engines/eedi-energy-efficiency-design-index.pdf?sfvrsn=6>
- Sethi, A. (2017). Genetron Properties. Buffalo, NY: Honeywell International, Inc. Retrieved from <https://www.honeywell-refrigerants.com/americas/genetron-properties-suite/>
- Sethi, A., Pottker, G., & Yana Motta, S. (2016). Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration. *Science and Technology for the Built Environment*, 22(8), 1175–1184. <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1209032>
- Ujfalusi, M. (2016). Ämnen som bryter ner ozonskiktet. Retrieved April 4, 2017, from <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Ozonskiktet/Ozonnedbrytande-amnen/Amnen-som-bryter-ner-ozonskiktet/>
- UNEP. (2012). *Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Nairobi: Secretariat for The Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer & The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Retrieved from https://ozone.unep.org/Publications/MP_Handbook/MP-Handbook-2012.pdf%0A
- Walter, W. F., Kenney, D. H., Badger, A. B., Brock, W. J., Doerr, R. G., Dugard, P. H., ... Cummings, S. D. (2009). ASHRAE STANDARD Designation and Safety Classification of Refrigerants, 4723.
- Wang, S. K., Lavan, Z., & Norton, P. (2000). *Air conditioning and refrigeration engineering*. Boca Raton. Retrieved from [https://books.google.se/books?hl=sv&lr=&id=8Bk0YrDHHh4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Lavan,+Z+Norton,+P+Wang,+S+\(2000\).+Air+conditioning+and+Refrigeration+engineering.&ots=KjUyn8g4pD&sig=Egt11XQThbt4ri7DQKcQhV5MjRc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.se/books?hl=sv&lr=&id=8Bk0YrDHHh4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Lavan,+Z+Norton,+P+Wang,+S+(2000).+Air+conditioning+and+Refrigeration+engineering.&ots=KjUyn8g4pD&sig=Egt11XQThbt4ri7DQKcQhV5MjRc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Withouse, B. Y. J., & Ashrae, M. (2016). High-Glide Refrigerant Blends & System Retrofits. *ASHRAE Journal; New York*, 59(1), 5. Retrieved from <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com.proxy.lib.chalmers.se/docview/1858058919?accountid=10041>

Woud, H. K., & Stapersma, D. (2002). *Design of propulsion and electric power generation systems* (Institute). London, GB: IMarEST.

Bilagor

Här följer för studien relevanta bilagor.

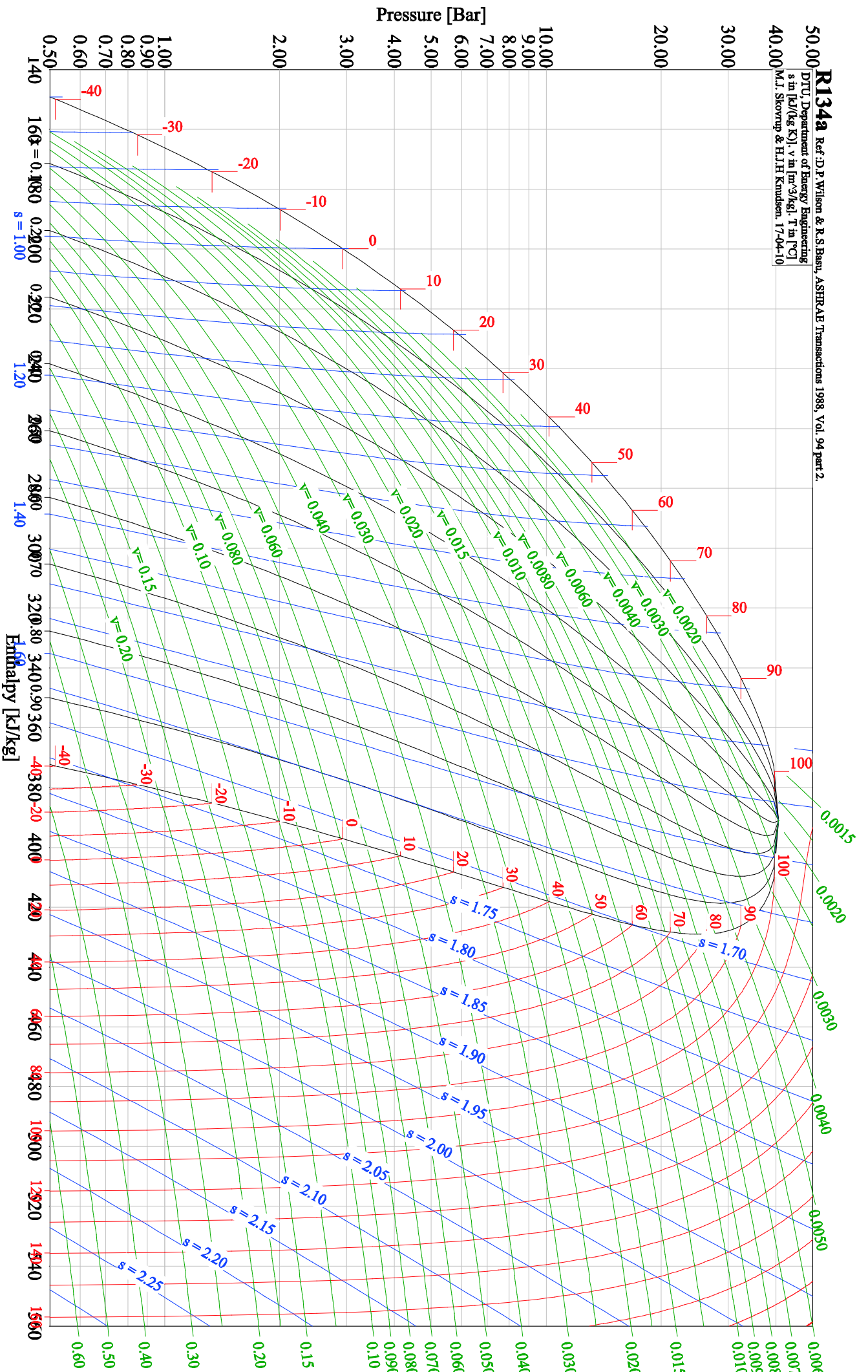
Bilaga 1

Tryck-entalpi-diagram ($\log p-h$)

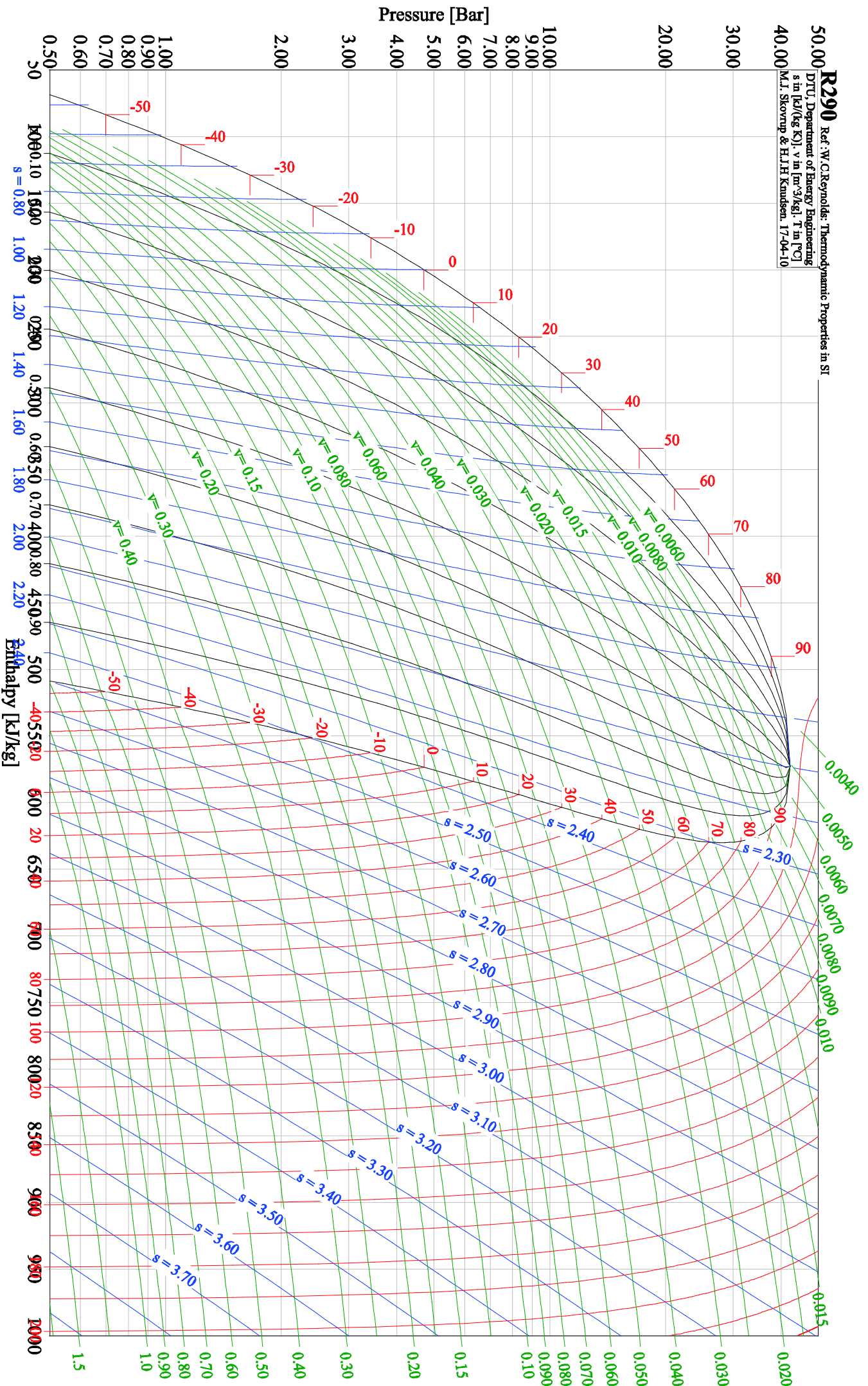
På de följande sidorna följer tryck-entalpi-diagram ($\log p-h$) för följande köldmedier:

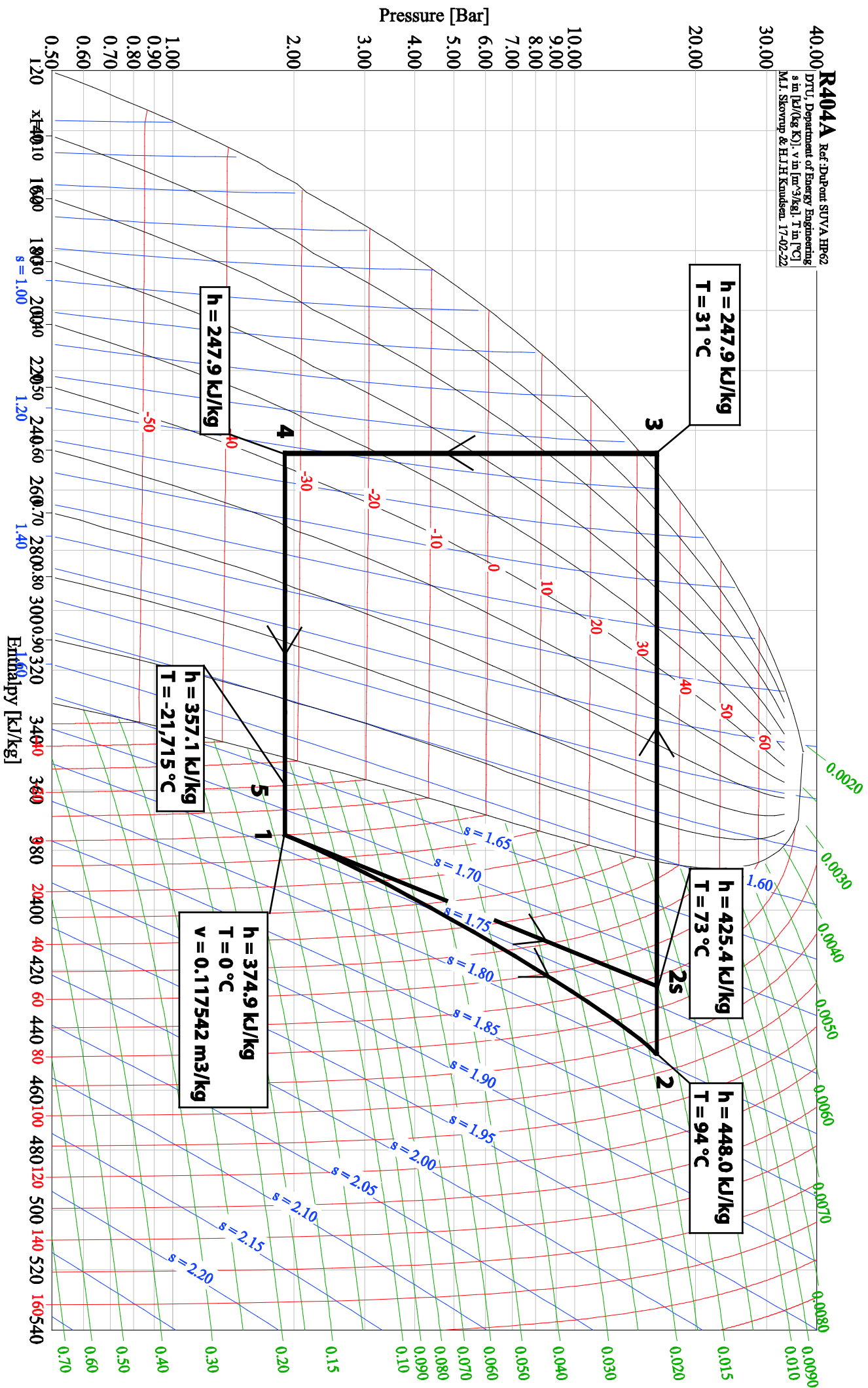
- a) R134a (Juel Skovrup, 2000)
- b) R290 (Propan) (Juel Skovrup, 2000)
- c) R404A (Juel Skovrup, 2000)
- d) R407C (Juel Skovrup, 2000)
- e) R410A (Juel Skovrup, 2000)
- f) R442A (RS-50) (Refrigerant Solutions Ltd, 2012)
- g) R717 (Ammoniak) (Juel Skovrup, 2000)

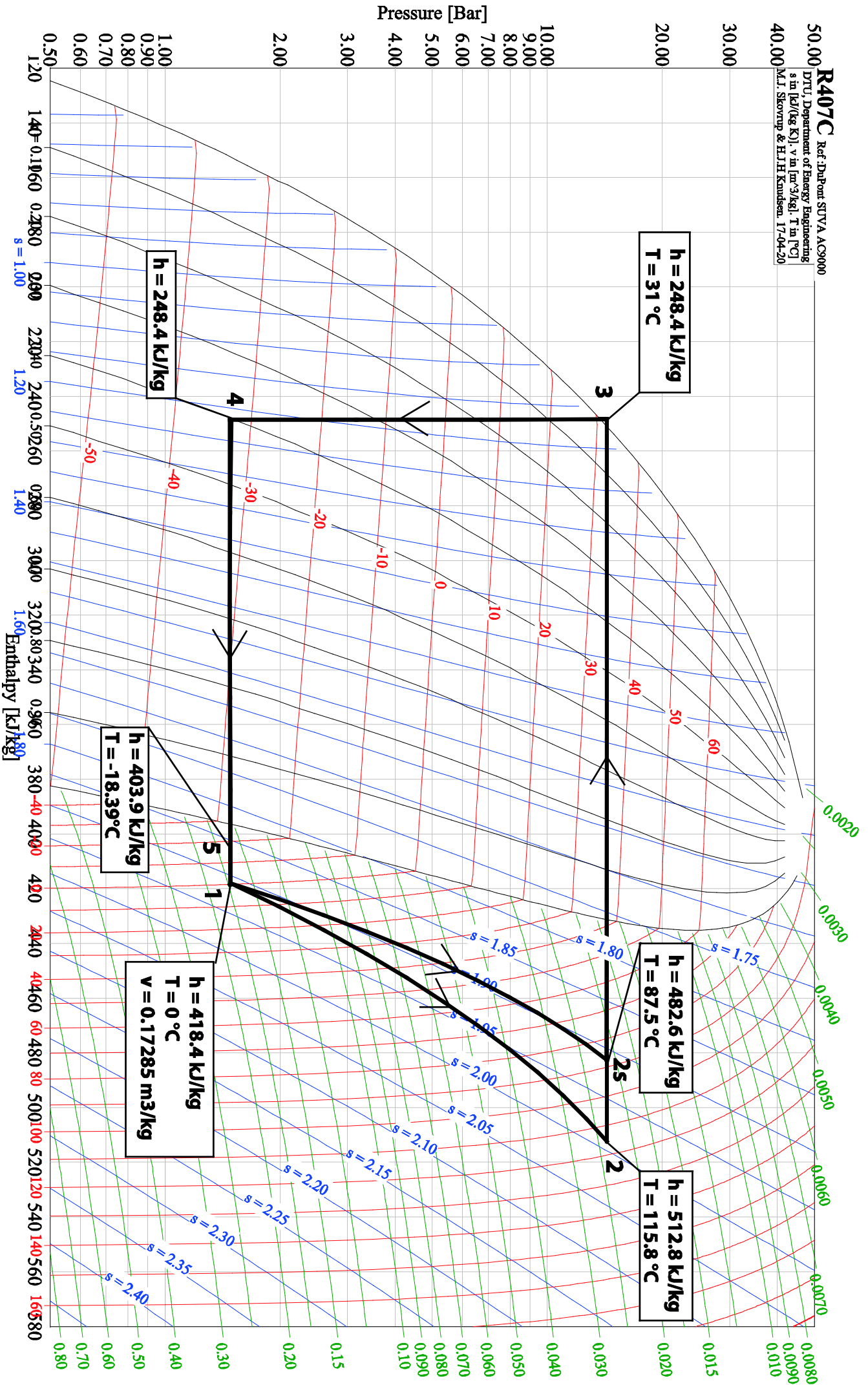
R134a Ref. D. P. Wilson & R. S. Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94 part 2.
 DTU, Department of Energy Engineering
 s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
 M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 17-04-10



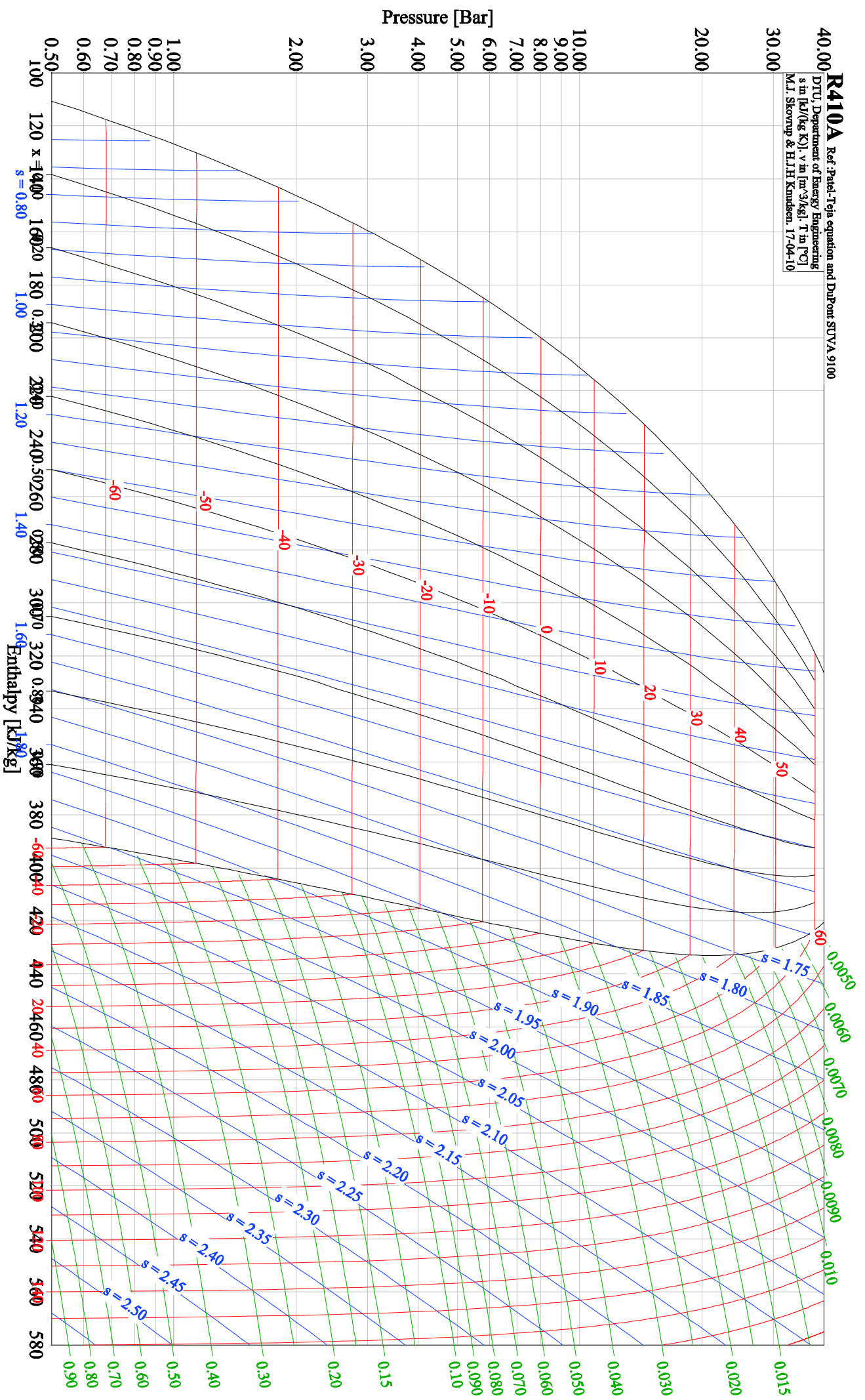
R290 Ref: W.C. Reynolds: Thermodynamic Properties in SI
DTU, Department of Energy Engineering
 s in [kJ/kg K], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 17-04-10



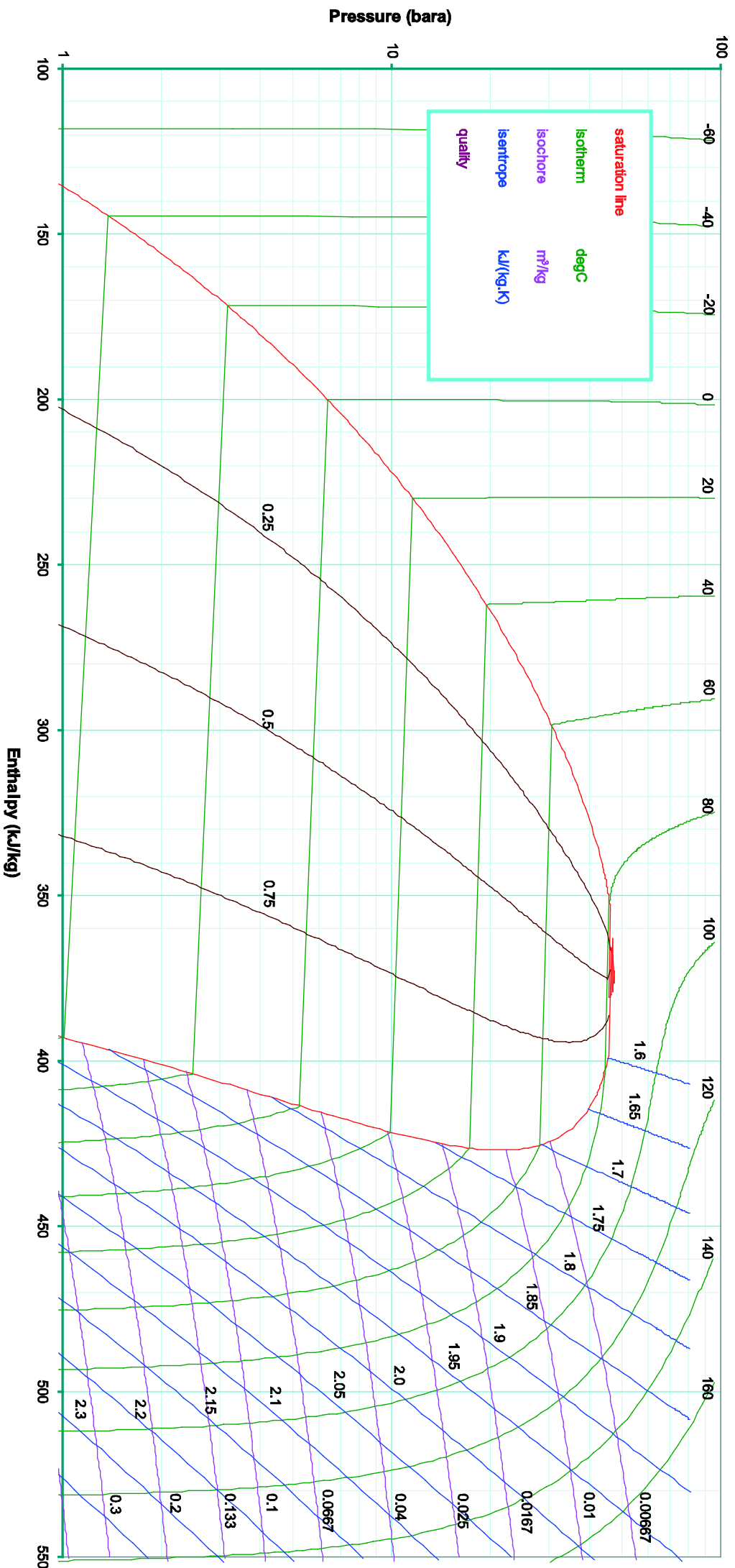


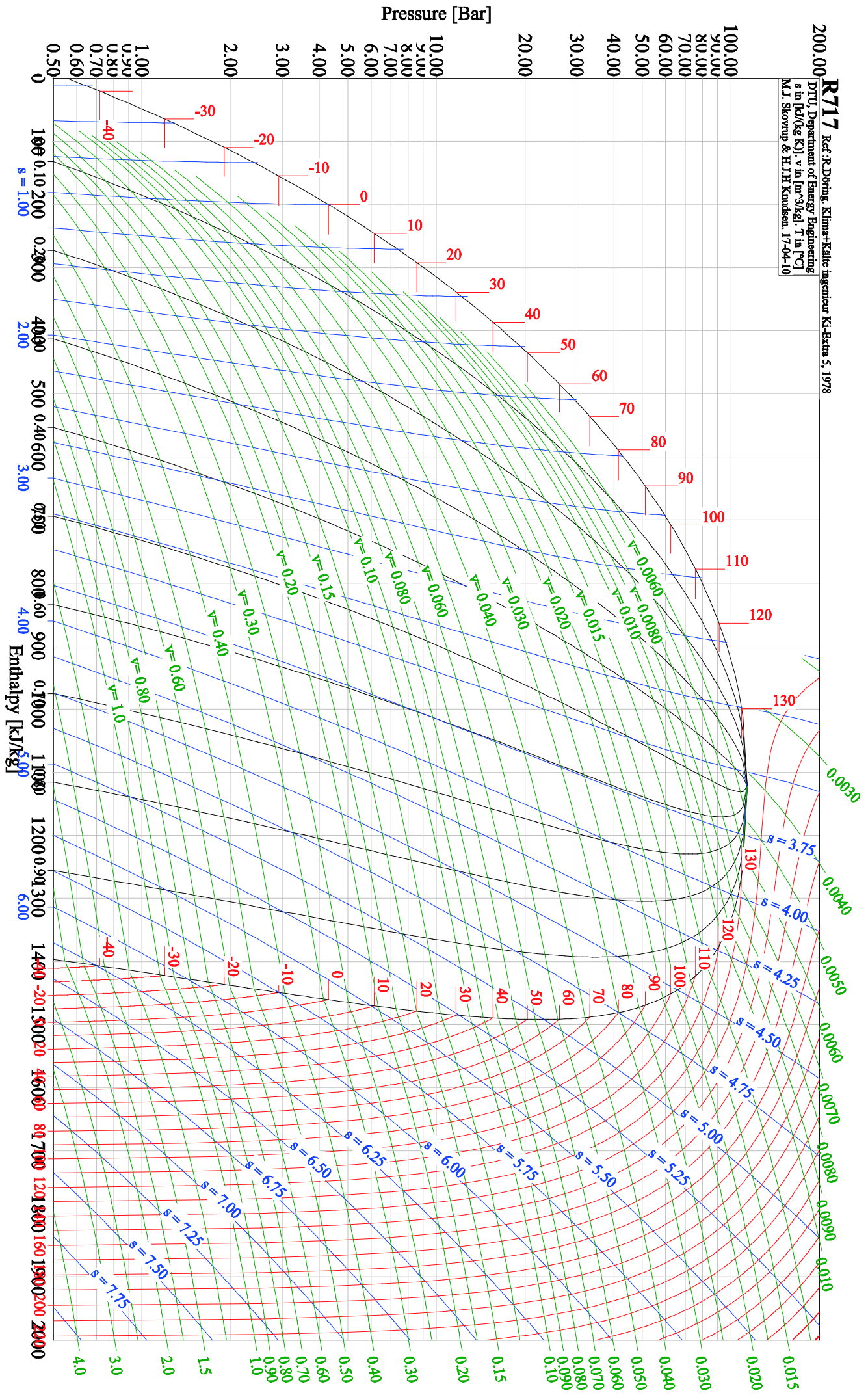


R410A Ref. Patel-Tra equation and DaPont SUVA 9100
 DTU, Department of Energy Engineering
 s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
 M.I. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 17-04-10



R442A Pressure Enthalpy Chart





Bilaga 2

Tillståndstabeller

Nedan följer en lista som visar var tillståndsdata har hämtats för dessa köldmedier:

- a) R407F - (Sethi, 2017)
- b) R454A (XL40) - (Chemours, 2016)
- c) R448 (N40) - (Sethi, 2017)
- d) R449A (XP40) - (Chemours, 2016)
- e) R455A (L40x) - (Sethi, 2017)

Bilaga 3

Kondenserings- och förångningstryck i den förenklade modellen

Tabellen presenterar de kondenserings- och förångningstryck som de alternativa köldmedierna skulle motsvara enligt referensanläggningens kondenserings- och förångningstemperatur. Kondenserings- och förångningstemperatur är en teoretisk medeltemperatur som har beräknats.

Köldmedium	Kondenserings temp (Medeltemp mellan bubblpunkt och daggpunkt [°C])	Kondenserings tryck (p _k) [Bar(a)]	Förångnings temp (Medeltemp mellan bubblpunkt och daggpunkt [°C])	Förångningst tryck (p _f) [Bar(a)]
R404A		16,00		1,90
R407C		14,30		1,48
R407F		16,92		1,91
R410A		21,25		2,48
R134A		8,625		0,77
R455A (L40x)		17,45		1,81
R454A (XL40)		15,78		1,74
(DR-7)	+ 34,69		- 32,05	
R449A (XP40)		15,40		1,60
(DR-33)				
R448A (N40)		16,51		1,76
R744 (CO ₂)		>73,73		13,36
R717 (Ammoniak)		13,40		1,01
R290 (Propan)		12,05		1,54
R442 (RS-50)		16,15		1,72

(Nydal, 2010), (Linde, 2017b), (Honeywell, 2016), (Honeywell, 2014), (Chemours, 2017), (Chemours Company FC, 2016a)

Bilaga 4

Insamlad data från referensanläggningen

Komponent - beskrivning	Typ
Kompressor	Bitzer 4N.2 Y
Elmotor (kompressor)	ABB - M2AA 160 L4 (18kW)
Kondensator	Bitzer - K 373 H

Avläst data - beskrivning	Data	Enhet
Fyllnadsmängd köldmedium	29,6	kg
Tryck kompressorns utlopp	16	Bar(a)
Tryck kompressorns sug sida	1.9	Bar(a)
Temp kompressorns utlopp	71	°C
Temp kompressorns sug sida	8	°C
Strömförbrukning kompressor	14	A
Gångtid kompressor	85323	Timmar
Kylvatten (LT-vatten) in	30	°C
Kylvatten (LT-vatten) ut	31	°C
Köldmedium in i kondensator	71	°C
Köldmedium ut ur kondensator	31	°C
Temperatur börvärde kyl 1	6	°C
Temperatur börvärde kyl 2	4	°C
Temperatur börvärde kyl 3	4	°C
Temperatur börvärde kyl 4	4	°C
Temperatur börvärde kyl 5	5	°C
Temperatur börvärde Frys 1	-25	°C
Temperatur börvärde Frys 2	-25	°C