# Bilag til Industriel varmegenvinding med $CO_2$- og $NH_3$-baserede varmepumper. Del1

# Indholdsfortegnelse


Bilag A - Fordamperenhed ..... 4

A1 - fordampertyper ..... 4

A2 - Overhedningens påvirkning på fordampningstemperaturen ..... 8

Bilag B - kompressor ..... 11

B1 – Eksempel virkningsgrad ..... 11

B2 – Driftgrænser for semi-hermetisk CO2 stempelkompressor ..... 12

B3 – Virkningsgrader for semi-hermetisk CO2 stempelkompressor ..... 14

B4 – Driftgrænser for NH3 stempelkompressor ..... 20

B5 – Virkningsgrader for NH3 stempelkompressor ..... 21

B6 – Driftgrænser for NH3 højtryk stempelkompressor ..... 25

B7 – Virkningsgrader for NH3 højtryk stempelkompressor ..... 26

B8 – Driftsgrænser for NH3 twin skruekompressor ..... 29

B9 – Virkningsgrader for NH3 twin skruekompressor ..... 31

B10 – Driftgrænser for NH3 single skruekompressor ..... 35

B11 – Virkningsgrader for NH3 single skruekompressor ..... 36

B12 – VSC Program ..... 44

B13 – Kapacitet ..... 45

B14 – Kapacitetsregulering ..... 46

Bilag C - Varmepumpetyper ..... 49

Bilag D - Analyse ..... 58

D1 - Sammenligning af kølemidler ..... 58

D2 - Sammenligning af varmepumpesystemer ..... 63

D3 - Varmepumpesystemer med begrænsninger ..... 68

D4 - Sammenligning af tilgængelige varmepumpesystemer ..... 71

Bilag E - Økonomi ..... 76

E1 - Afgifter ..... 76

E2 - Spotpriser ..... 78

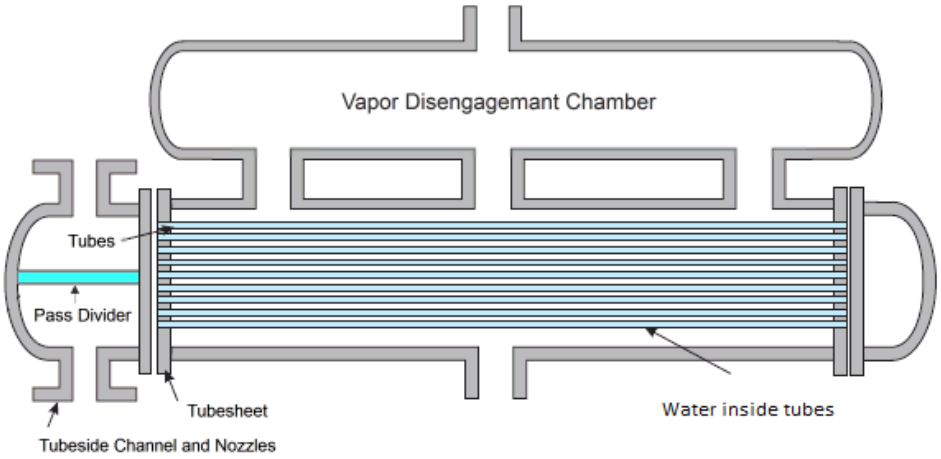
# Bilag A - Fordamperenhed

## A1 - fordampertyper

Påvirkning af COP fra tryktab i forskellige fordampertyper vil i dette bilag blive analyseret. Der vil ikke blive fastlagt nogle specifikke tryktab, da dette er meget afhængigt af størrelser på de forskellige fordampertyper. De nævnte tryktab er derfor relative, og benyttes kun til at forudsige om de resulterer i fald eller stigninger i COP.

### *Oversvømmet shell and tube fordamper med vand i rør og kølemiddel i svøbet*

I denne fordampertype vil kølemidlet stå og koge i svøbet, og en vandstrøm vil løbe gennem rørene. En principskitse af denne fordampertype er vist på Figur 1.




Figur 1: Principtegning af en oversvømmet shell and tube fordamper

Fordele:

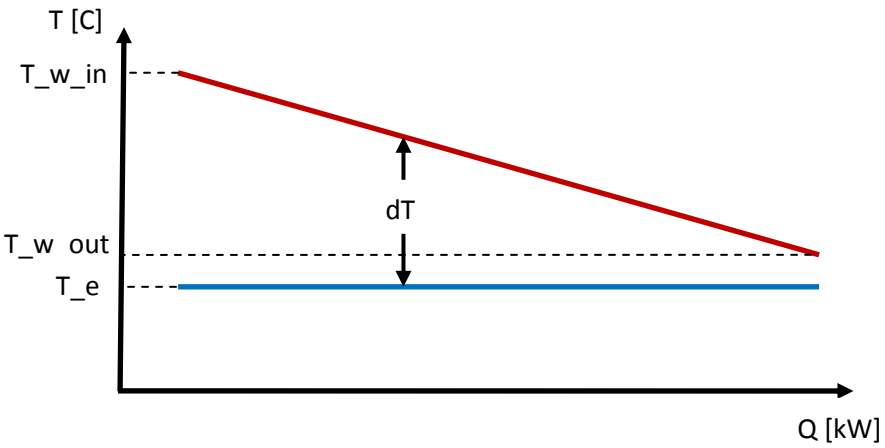
- Der er næsten intet tryktab på kølemiddelsiden grundet meget lav strømning.
- God varmeovergang så længe fyldningen gør, at rørene er dækket af kølemiddel på væskeform.
- Der kan opnås en lav temperaturforskel mellem vandets udgangstemperatur og fordampningstemperaturen for kølemidlet.

Ulemper:

- Der er relativt stort tryktab på vandsiden, da det er forholdsvis små rør og derved høj hastighed på vandet.
- Der skal bruges stor fyldning, da der er et stort volumen i svøbet hvor kølemidlet befinder sig.

Energioverførelsen som funktion af temperaturvariationen er for en denne fordamper vist på Figur 2. Det kan her ses, at det er T_w_out (Udgangstemperaturen på vandsiden) der er styrende for hvor høj en fordampningstemperatur der kan benyttes. Hvis vandsiden yderligere benyttes til at overhede kølemidlet, skal fordampningstemperaturen derved sænkes for at holde den samme pinch point

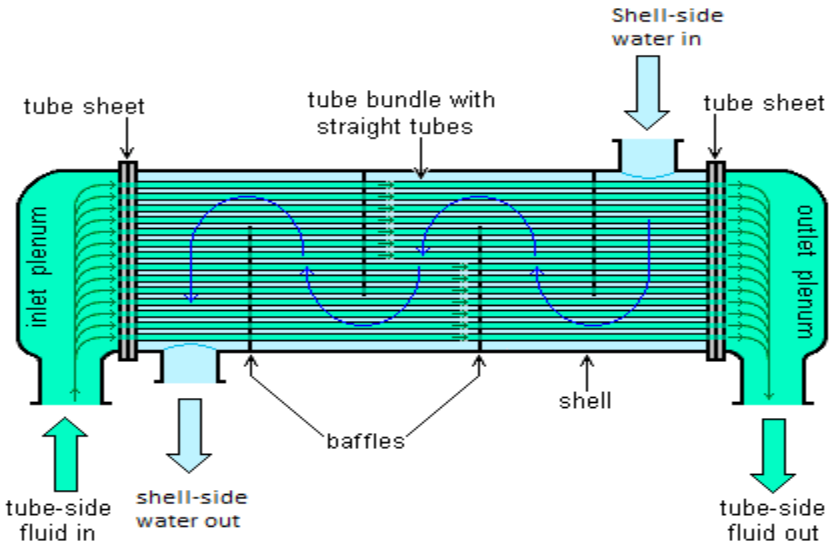
temperatur (mindste temperatur mellem vand og kølemiddel). Dette vil medføre en lavere COP. I stedet for at benytte vandsiden til at overhede kølemidlet, er det dog muligt at benytte en intercooler, og derved undgå en lavere fordampningstemperatur. Hvis tryktabet på vandsiden stiger vil en lavere fordampningstemperatur ligeledes være nødvendig.




Figur 2: Illustration af temperaturoverførsel i flooded shell and tube fordamper

### *Tør shell and tube fordamper med kølemiddel i rør og vand i svøbet*

I denne fordampertype, vil vandet strømme svagt gemmen svøbet, og vandet vil afgive energi til kølemiddelet som løber gennem rørene. Figur 3 viser en skitse for en mulig konstruktion af denne type fordamper.




Figur 3: Principtegning for en dry shell and tube fordamper

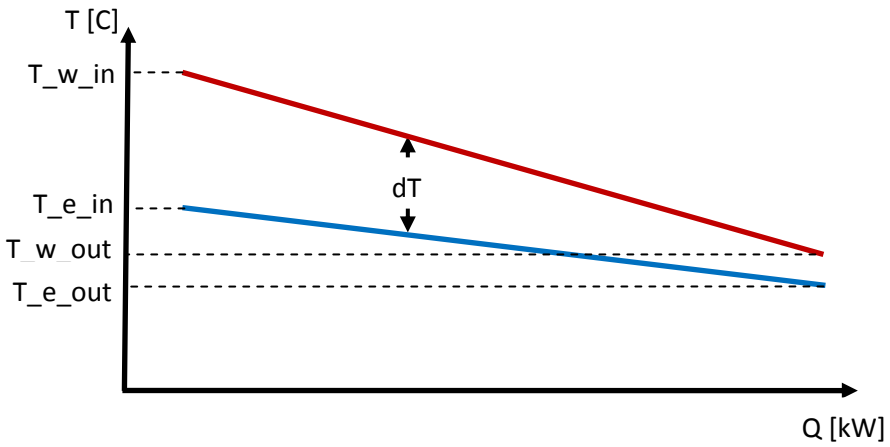
Fordele:

- Der er forholdsvis lidt tryktab på vandsiden da der ofte er en svag strømning.
- Lille fyldning da volumenet i rørene er lavt.

Ulemper:

- Der er dårlig varmeovergang i fordamperen, da kølemidlet fordamper i rørene, og der derved vil befinde sig mere og mere gas i rørene, jo længere henne i fordampningsprocessen man befinder sig.
- Svært at styre fordeling af væske og gas i rørene, så varmeovergangen bliver så optimal som muligt
- Svært at styre overhedning af kølemiddel

Figur 4 illustrerer energioverførslen som en funktion af temperaturfordelingen i en tør shell and tube fordamper. Den blå kurve symboliserer kølemidlet, og den røde kurve symboliserer vandet.




Figur 4: Illustreret temperaturfordeling for en dry shell and tube fordamper

Som det ses på Figur 4, er der et tryktab på kølemiddelsiden, hvilket resulteret i et fald i fordampningstemperaturen. Hvis trykket inden fordamperen sættes, så det kompenserer for tryktabet i fordamperen, vil kølemidlet forlade fordamperen i samme tilstand som hvis der ikke var et tryktab i fordamperen. På den måde kan man, på trods af tryktab, styre anlægget, så samme COP-værdi kan opnås. Trykfaldet i fordamperen har derfor ingen betydning i forhold til COP-værdien, med mindre tryktabet er meget stort. Et stort tryktab vil have indflydelse på LMTD, og derved skal fordamperen designes anderledes for at kunne levere den ønskede kuldeydelse.

Det kan være nødvendigt at overhede kølemiddelet for at være sikker på, at der ikke sker væskeslag i kompressoren. Hvis overhedningen sker i fordamperen vil det resultere i en dårligere COP, da fordampningstemperaturen da skal sænkes. Det er igen muligt at overhede dampen efter fordamperen via en intern varmeveksler. Dette vil ikke have indflydelse på fordampningstemperaturen.

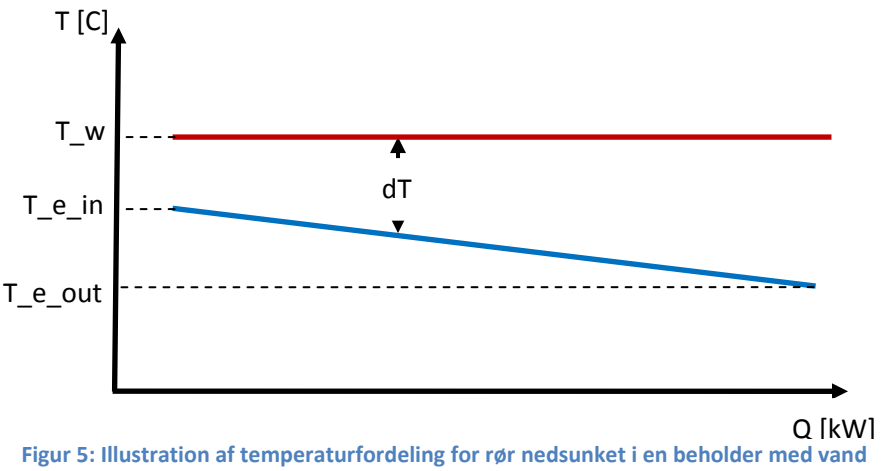
### *Rør nedsunket i en vandbeholder*

Fordele:

- Der er intet tryktab på vandsiden, og derved intet energiforbrug.
- Mindre fyldning da volumenet i rørene er forholdsvis lille.
- Simpelt design

Ulemper:

- Der er dårlig varmeovergang i fordamperen, da kølemidlet fordamper i rørene. Derved vil der være mere og mere gas i rørene jo længere fremme i fordampningsprocessen man befinder sig. Derudover er der stilstand på vandsiden, hvilket mindsker varmeovergangen yderligere.
- Det vil være svært at styre fordeling af væske og gas i rør, så varmeovergangen bliver så optimal som muligt
- Svært at styre overhedning af kølemiddel
- Tryktab på kølemiddelsiden, hvilket i denne fordampertype, resultere i en dårligere COP.




**Figur 5: Illustration af temperaturfordeling for rør nedsunket i en beholder med vand**

Som det ses på Figur 5, er denne fordampertype anderledes end en tør shell and tube fordamper. I denne type medfører et tryktab på kølemiddelsiden et direkte tab i COP, da det ikke er muligt at hæve fordampningstemperaturen før fordamperen. I dette tilfælde vil en overhedning i fordamperen ikke have indflydelse på COP-værdien, da fordampningstemperaturen ikke behøver at blive sænket for at vandet kan overhede kølemidlet. Dog er det et kriterium, at tryktabet forårsaget et større temperaturfald end temperaturstigningen for overhedningen. Er dette ikke tilfældet, vil det stadig være nødvendigt at sænke fordampningstemperaturen for at overhede gassen.

### *Pladevarmeveksler*

Fordele:

- Kompakt design
- Let at producere så den kan tilpasse specifikke varmepumpers designydelse
- Mindre fyldning da volumenet imellem pladerne er lavt.

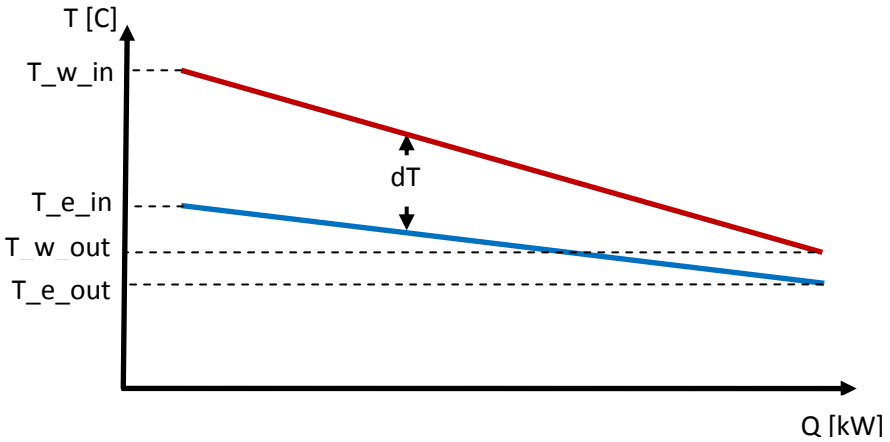
- Stor varmeovergang, hvilket resulterer i mindre dT

Ulemper:

- Stort tryktab på vandsiden
- Svært at styre overhedning af kølemiddel

Da en pladevarmeveksler er en modstrømsvarmeveksler, har tryktabet på kølemiddelsiden kun indflydelse på LMTD.

Pladevarmeveksleren har denne samme problemstilling mht. overhedning som tør shell and tube fordamperen. Det er nødvendigt at overdimensionere fordamperen en smule, så man er sikker på at der ikke sker væskeslag i kompressoren.



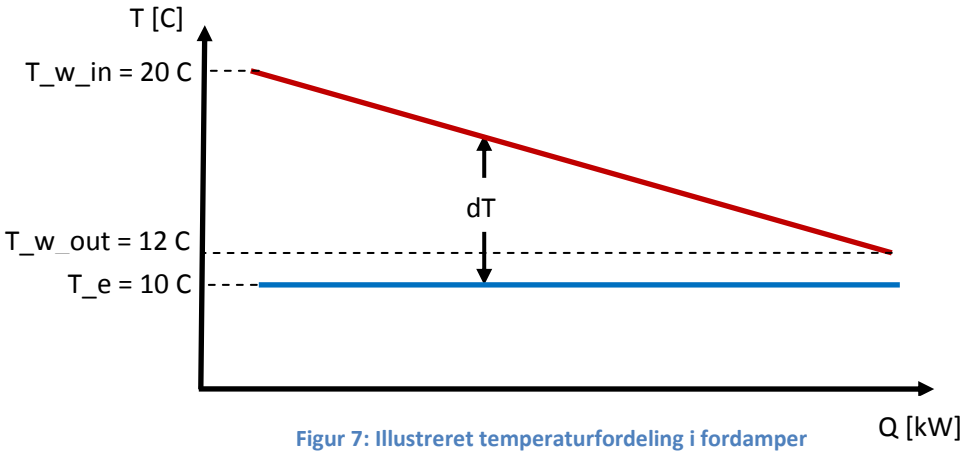

Figur 6: Temperaturfordeling i en pladevarmeveksler

## A2 - Overhedningens påvirkning på fordampningstemperaturen

Den interne varmeveksler har i nogle situationer en indvirkning på fordampningstemperaturen. Hvis et vandflow på den sekundære kølemiddelside ønskes sænket fra en bestemt indgangstemperaturtemperatur til en bestemt udgangstemperatur, og der samtidig ønskes at blive produceret en bestemt varmeydelse, er det nødvendigt at justere fordampningstemperaturen, når en intern varmeveksler benyttes. Dette illustreres ved at se på et eksempel, hvor der på den sekundære kølemiddelside eksisterer et vandflow med en massestrøm på 1 kg/s og en indgangstemperatur på 20 °C. Udgangstemperaturen ønskes fastsat til 12 °C.

***Situation 1 - uden intern varmeveksler***

Det antages at fordamperen er designet, så der i slutningen af fordamperen er en pinch point temperatur på 2 °C. Derved opnås en fordampningstemperatur på 10 °C. Dette er vist i Figur 7.




Figur 7: Illustreret temperaturfordeling i fordamper

Fra eksempel 1 samt det tilhørende EES program findes enthalpierne i systemet for en $CO_2$ varmepumpe. $CO_2$ kredsen benyttes, da den er mest ekstrem og derved illustrerer den interne varmevekslers indvirkning på fordampningstemperaturen bedst.

Kuldeydelsen udregnes efter hvor meget vandet skal køles.

$$Q_e = \dot{m}_{vand} \cdot c_p \cdot dT = 1\,kg/s \cdot 4{,}2\,kJ/(kgK) \cdot (20-12)K = 33{,}6kW$$

Ud fra denne kuldeydelse kan massestrømmen i systemet beregnes til:

$$\dot{m}_{køle} = \frac{Q_e}{dh} = \frac{33{,}6kW}{(426-300)kJ/kg} = 0{,}267\,kg/s$$

Dette giver en varmeydelse på.

$$Q_c = 0{,}267\,kg/s \cdot (484-300)kJ/kg = 49{,}1kW$$

***Situation 2 - med intern varmeveksler***

Hvis kuldeydelsen holdes konstant, vil den større fordampningsenthalpi resultere i en lavere massestrøm, hvilket ses i nedenstående udregning.

$$\dot{m}_{køle} = \frac{33{,}6kW}{(426-268)kJkg} = 0{,}213\,kg/s$$

Ud fra denne massestrøm samt ny enthalpi efter kompressoren kan varmeydelsen for denne varmepumpe beregnes til:

$$Q_c = 0{,}213\,kg/s \cdot (525-306)kJkg = 46{,}6kW$$

Det ses, at det ønskede varmebehov fra situation 1 (49,1kW) ikke længere kan opretholdes ved at køre systemet ved samme fordampningstemperatur. Det er

derfor nødvendigt at sænke fordampningstemperaturen for at opretholde dette behov. En lavere fordampningstemperatur vil resultere i en forringelse af COP-værdien.

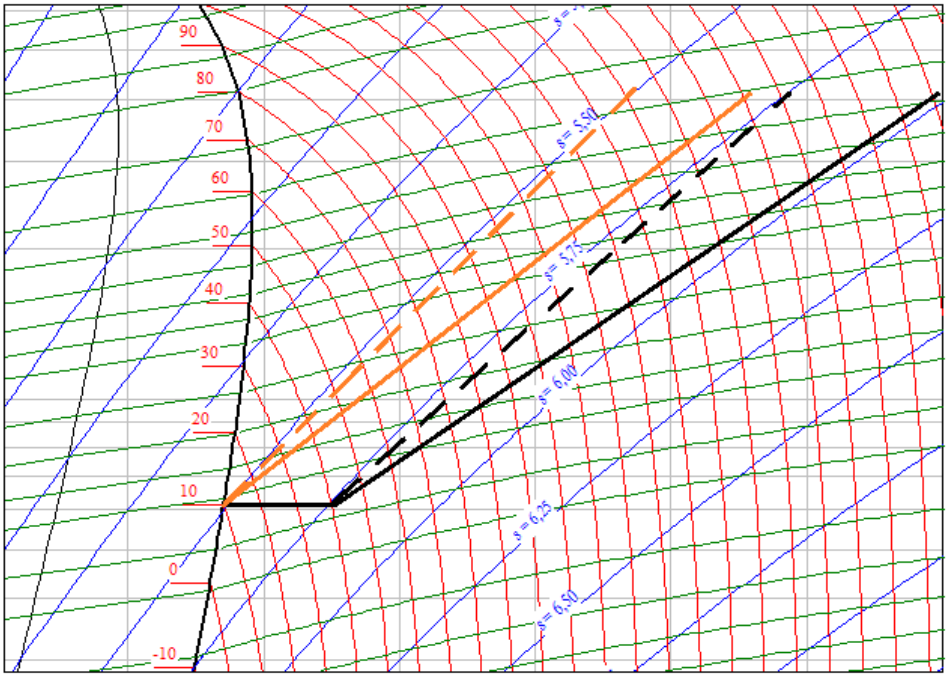
Indsættelse af en intern varmeveksler giver dog ikke altid en sænkning af fordampningstemperaturen. Hvis der ses på den fordampertype, hvor rør er nedsænket i en vandbeholder, giver det ikke en sænkning af fordampningstemperaturen, da der er en konstant vandtemperatur. Dette er meget situationsbestemt, og risikoen for, at det er nødvendigt at sænke fordampningstemperaturen, vil ikke blive medtaget i den generelle varmepumpesammenligning.

# Bilag B - kompressor

## B1 – Eksempel virkningsgrad

To identiske kompressorer undersøges. Den ene er installeret i et åbent system, mens den anden er i et semi-hermetisk system.  På Figur 8 er den åbne kompressor illustreret med orange, hvor den semi-hermetiske kompressor er illustreret med sort. De stribede linjer illustrerer en isentropisk proces.

Her ses det at den isentropiske virkningsgrad er væsentlig lavere for det semi-hermetiske system. Her skal lige pointeres at den isentropiske virkningsgrad regnes ud fra den isentropiske proces ved indsugningsgassen og ikke efter at motoren har varmet indsugningsgassen op. Den lavere virkningsgrad skyldes to ting. Først at energitabet i motoren bliver overført til sugegassen. Derudover bevirker overhedningen at enthalpilinjerne hælder mere hvilket resulterer i et større energiforbrug i kompressoren. For den identiske kompressor er den effektive virkningsgrad for den semi-hermetiske kompressor også en smule mindre end den effektive virkningsgrad for en åben kompressor. Dette skyldes ligeledes at enthalpilinjerne i for den semi-hermetiske kompressor har en anden hældning grundet overhedningen.

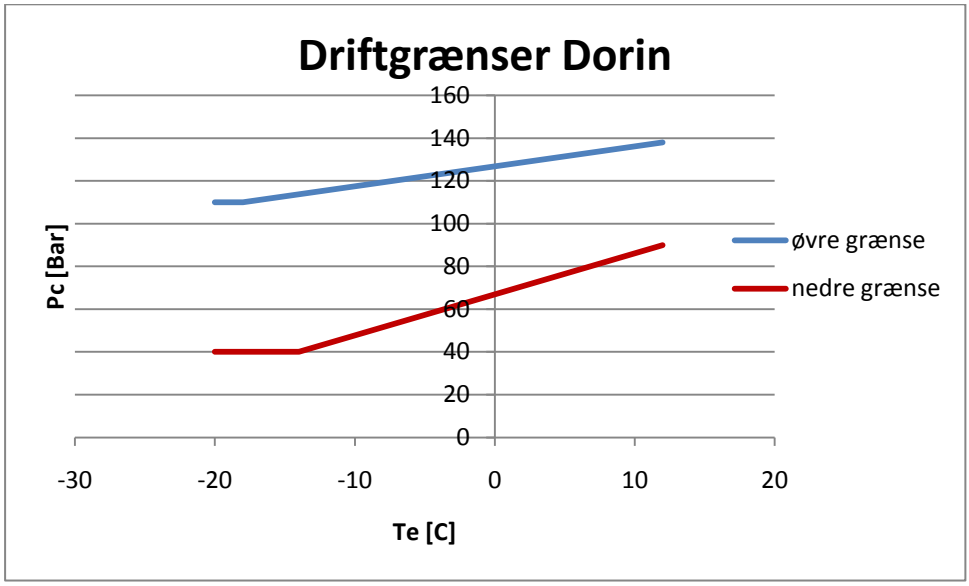


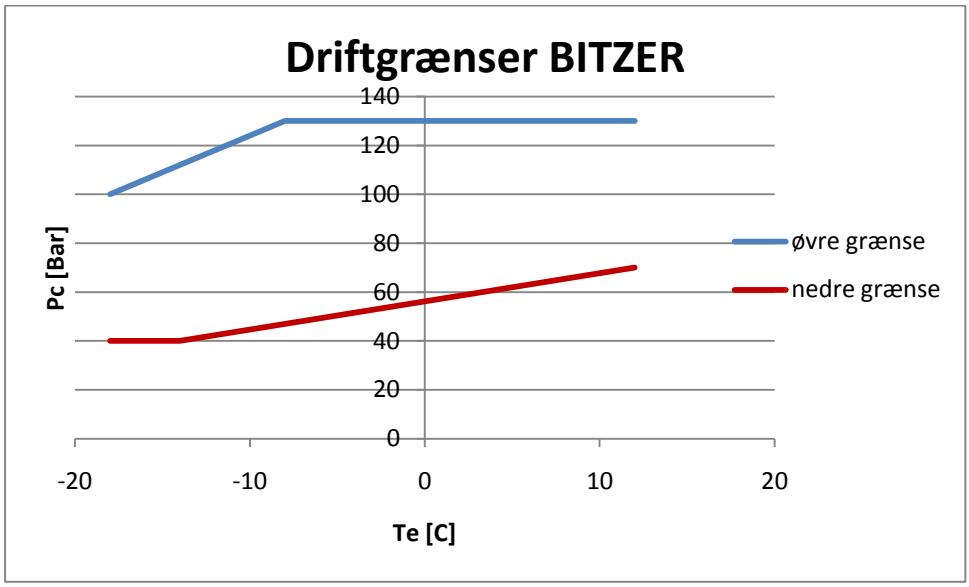

Figur 8: Illustration af åben og semi-hermetisk komprimering

Hvordan denne indflydelse er på selve COP værdien er svært at vurdere, da det mekaniske energitab for den åbne kompressor er et direkte tab af energi. Dette vil derfor være en del af den samlede undersøgelse.

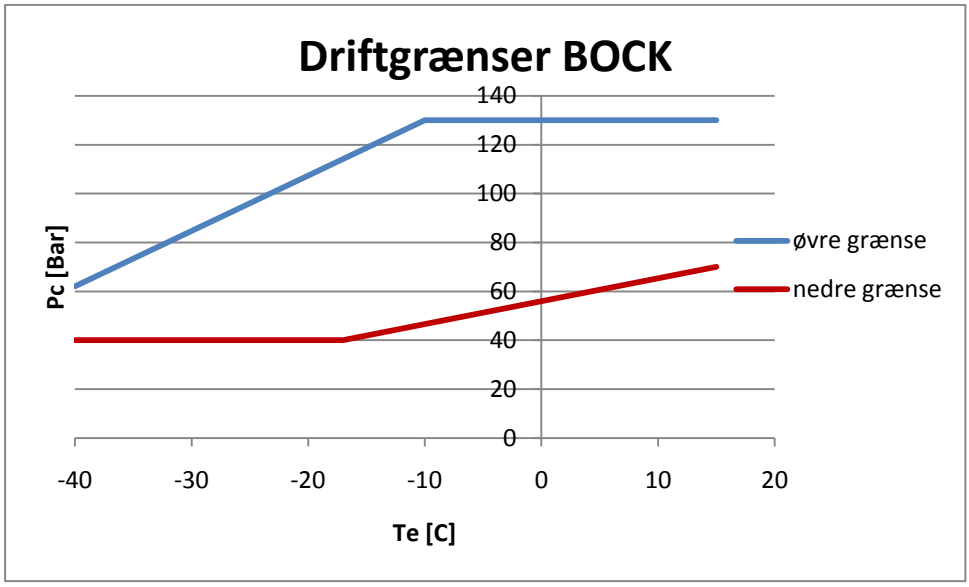
## B2 – Driftgrænser for semi-hermetisk CO2 stempelkompressor

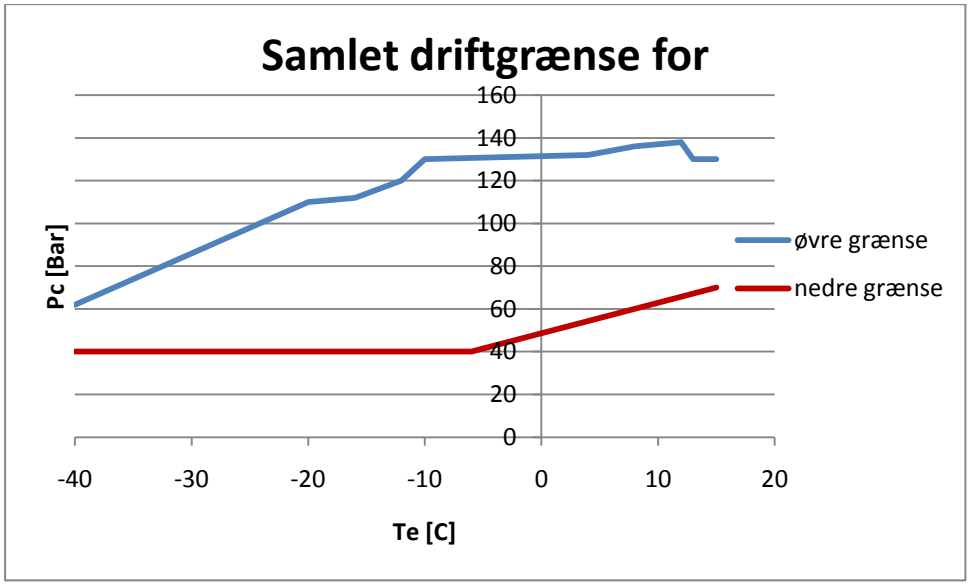
Driftgrænserne for Dorin og Bitzer kompressorerne er fundet ved brug af programmet Pack calculation 2. Driftgrænserne for BOCK kompressorerne er fundet på BOCKs hjemmeside[1], da disse kompressorer ikke findes i Pack calculation 2. De specifikke værdier for driftgrænserne kan ses i Excel arket *kompressor_driftgrænser* under fanebladet *CO2-måling*.




[1] http://www.bock.de/en/Product_overview.html?ArticleID=2112
http://www.bock.de/en/Product_overview.html?ArticleID=2184


Driftgrænser BOCK
140
120
100
80
60
40
20
0
Pc [Bar]
-40
-30
-20
-10
0
10
20
Te [C]
øvre grænse
nedre grænse


Samlet driftgrænse for
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Pc [Bar]
-40
-30
-20
-10
0
10
20
Te [C]
øvre grænse
nedre grænse

## B3 – Virkningsgrader for semi-hermetisk CO2 stempelkompressor

Til beregning af virkningsgrader for Dorin og Bitzer kompressorerne, er kompressorprogrammet tilhørende programmet pack Calculation 2 blevet benyttet. Her er afgangstemperaturen i gaskøleren, tgc, sat til 20 C, og overhedningen er sat til 5 C. Herefter er Qc, W og Qe kopieret over i Excel arket *kompressor_undersøgelse,* under fanebladet *CO2-måling* for nogle specifikke fordampningstemperaturer og kondenseringstryk.

Til beregning af virkningsgrader for BOCK kompressorerne er samme hjemmeside som ved driftgrænserne blevet benyttet[2]. Her er nogle beregninger for nogle situationer med en overhedning på 5 C. Disse er for en fordampningstemperatur på 0 og 10 C overført til Excel arket. På hjemmesiden for BOCK kompressorerne er der kun opgivet W og Qe. Dette gør, at der ikke kan beregnes noget varmetab.

### *Beregningsmetoder*

For Dorin og Bitzer kompressorerne beregnes først en varmetabsvirkningsgrad. Dette gøres ikke for BOCK da Qc ikke er kendt.

Beregningsmetode er vist for Dorin kompressoren TCS362-D under driftforholdene Te=0 C, Pc=100 bar, tgc=20 C og sh=5.

Den varmemængde der reelt tilføres systemet under kompression kan findes som:

$$W_{tilført} = Q_c - Q_e = 56{,}95 - 42{,}99 = 13{,}96$$

Varmetabsvirkningsgraden beregnes da som

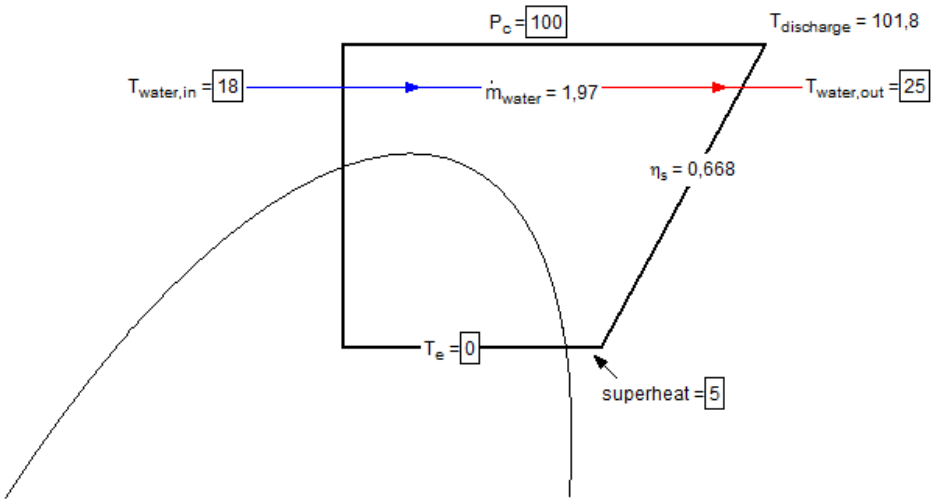
$$\eta_{tab} = \frac{W_{tilført}}{W} = \frac{13{,}96}{14{,}7} = 0{,}95$$

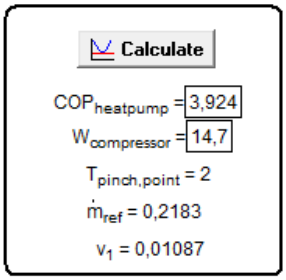
For at beregne den isentropiske virkningsgrad findes først køle COP værdien.

$$COP = \frac{Q_e}{W} = \frac{42{,}99}{14{,}7} = 2{,}924$$

Den isentropiske virkningsgrad findes så ved at bruge EES programmet *CO2-one_stage_beregning_virkningsgrad.* Køle COP værdien + 1 indsættes i programmet, da programmet regner med varme COP. Et screenshot af denne situation er vist nedenfor.

[2] http://www.bock.de/en/Product_overview.html?ArticleID=2112
http://www.bock.de/en/Product_overview.html?ArticleID=2184



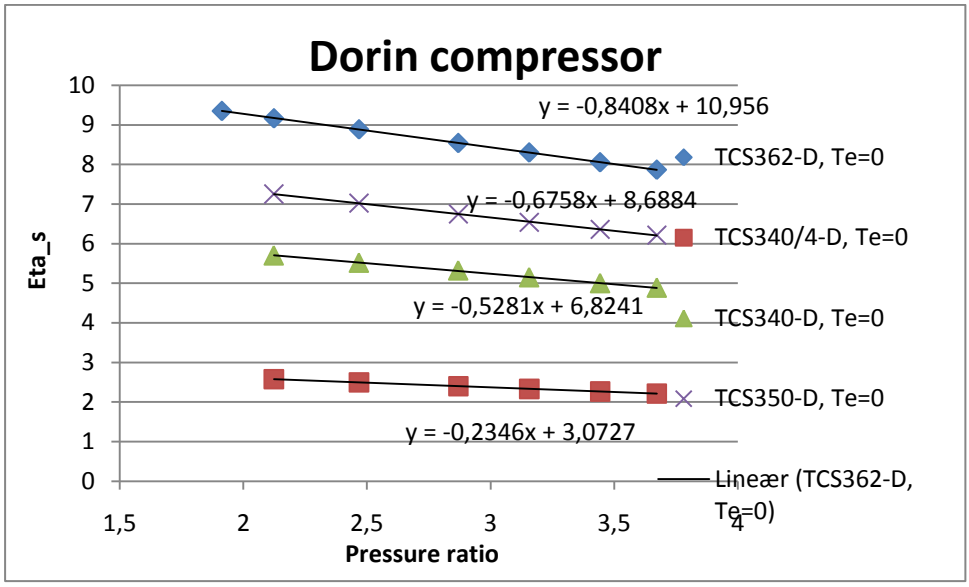

Her ses det, at den isentropiske virkningsgrad giver 0,668.

Indledningsvis beregnes volumenstrømmen for at beregne fremløbskoefficienten. Til at finde volumenstrømmen skal massestrøm og specifik volumen ved indsugning til kompressor først findes. Dette gøres i EES programmet CO2-*one_stage_beregning_virkningsgrad*, og kan ses i ovenstående figur.

Volumenstrømmen findes så til

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v = 0{,}2183\,kg/s \cdot 0{,}01087\,m^3/kg \cdot 3600\,s/h = 8{,}54\,m^3/h$$

Slagvolumenet findes da. Dette gøres ved at regne en masse forskellige volumenstrømme ud til nogle forskellige trykforhold. Når nok beregninger er lavet kan en ret linje føres igennem punkterne. Denne linjes skæring med y-aksen er slagvolumenet.




For kompressor TCS362-D er slagvolumenet da aflæst til $11\,m^3/h$.

For denne kompressor kan fremløbskoefficienten nu findes.

$$\pi = \frac{\dot{V}}{slagvolumen} = \frac{8{,}54}{11} = 0{,}776$$

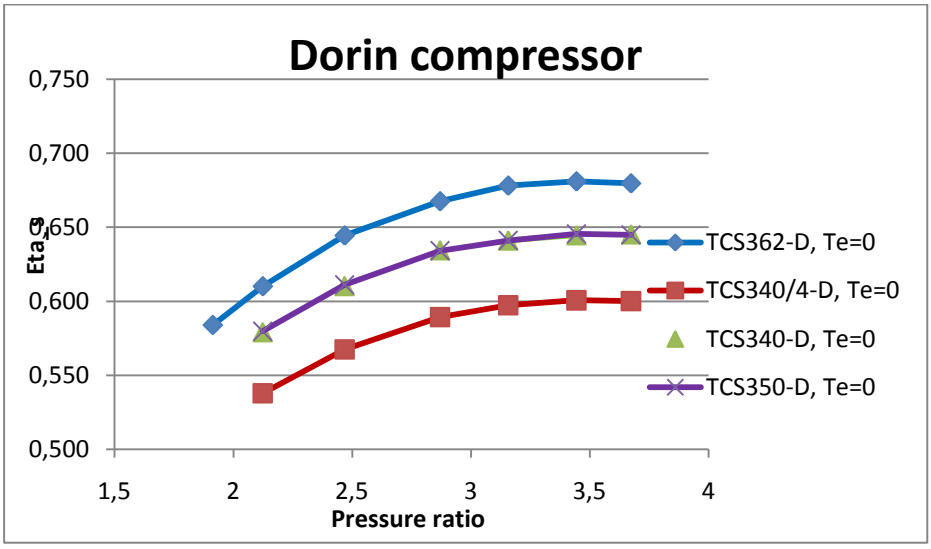
Alle virkningsgraderne er vist i Excel arket *kompressor_undersøgelse* under fanebladet *CO2-målinger*.

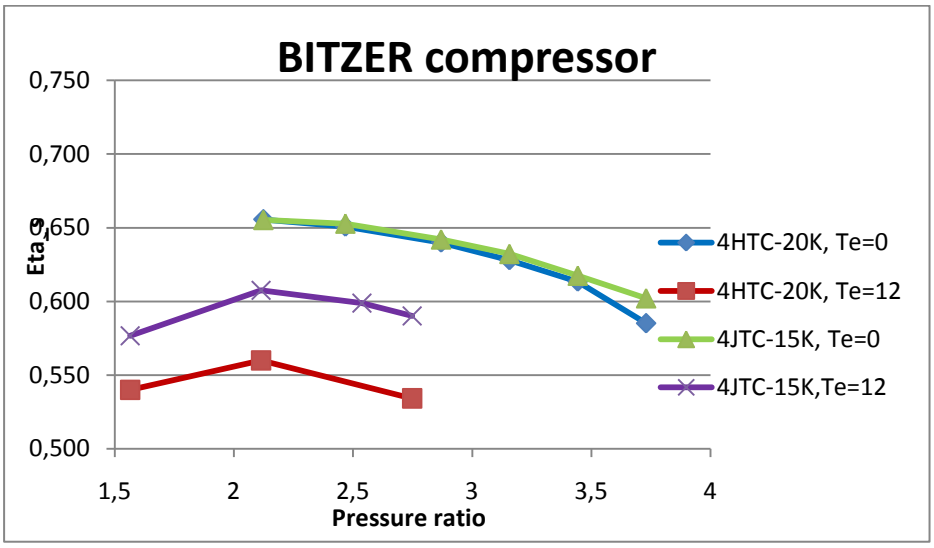
### *Validering og diskussion af resultater*

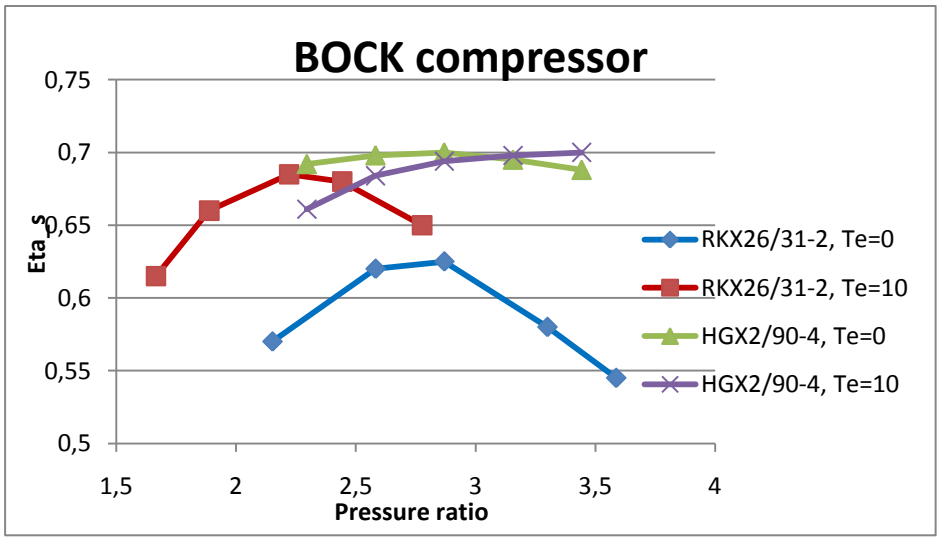
Som det kan ses på graferne og målingerne for Dorin og BITZER kompressorerne giver alle varmetabsvirkningsgraderne en konstant værdi. For Dorin er den 0,95 og for BITZER er den 0,98. Dette antyder at det er en værdi der er programmeret ind i Pack Calculation programmet for hver af kompressorerne. Udover dette ligger alle fremløbskoefficienterne på en ret linje. Dette antyder at fremløbskoefficienter for Pack calulation programmet er programmeret ind som en lineær funktion. Dette er indikation af at beregningerne er korrekt lavet. For Dorin kompressorerne ligger fremløbskoefficienterne på den samme rette linje. Dette viser at alle Dorin kompressorerne har samme funktion for fremløbskoefficienten. Dette er ikke helt tilfældet for BITZER kompressorerne hvor fremløbskoefficienterne er afhængigt af specifik kompressor og fordampningstemperatur.

For BOCK kompressorerne er der ikke opgivet varmetab. Fremløbskoefficienterne ligger på en helt ret linje hvilket antyder at de er beskrevet som en lineærfunktion. For de to typer af BOCK kompressor er der stor forskel på denne funktion.

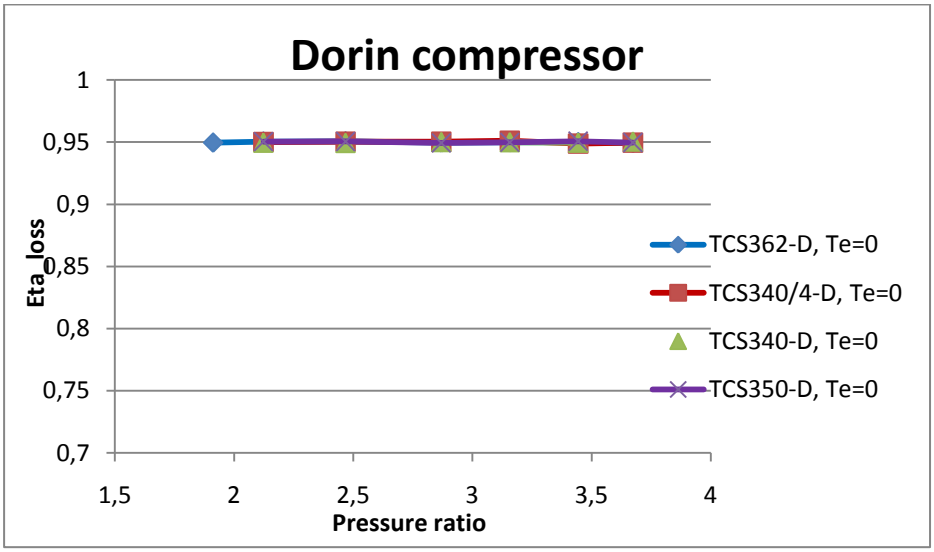
*Isentropisk virkningsgrad*

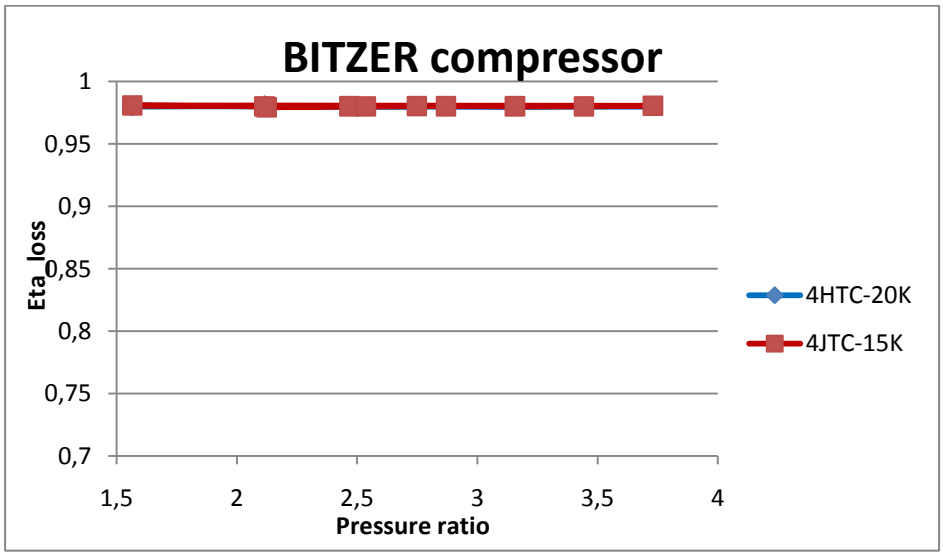


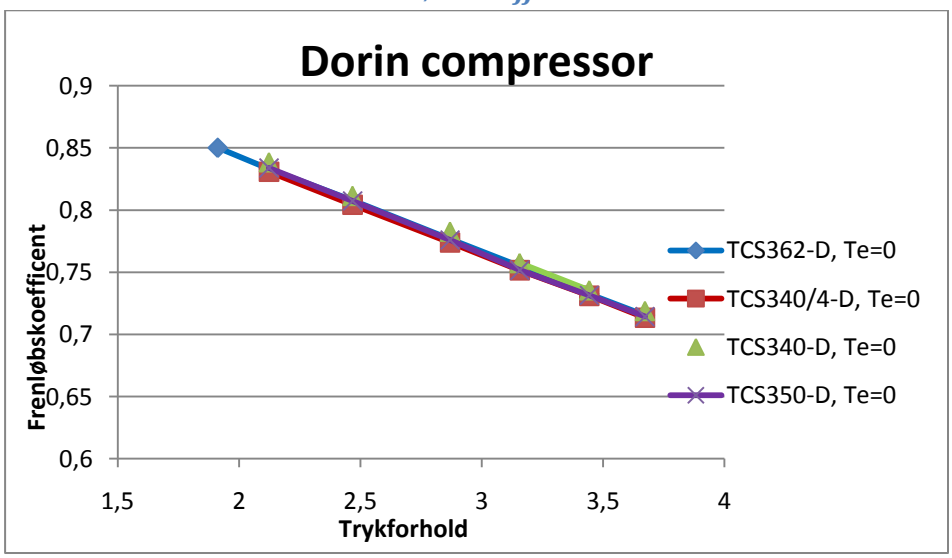



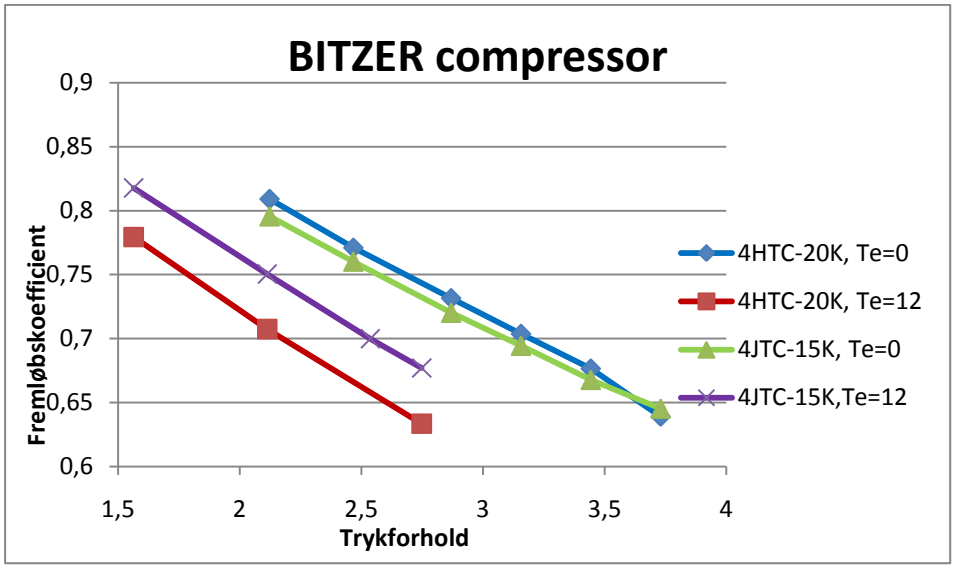
*Varmetabsvirkningsgrad*

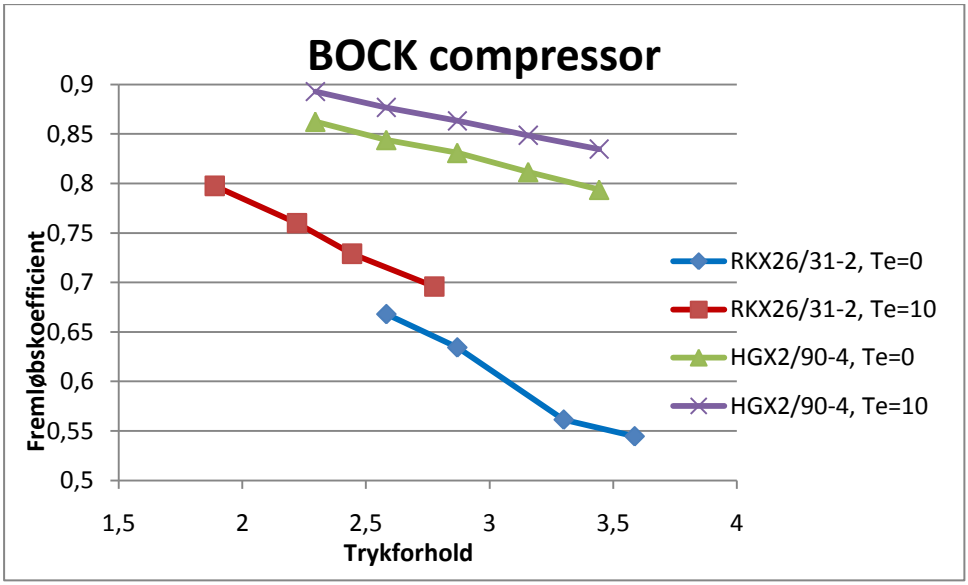



*Fremløbskoefficient*




BITZER compressor
0,9
0,85
0,8
0,75
0,7
0,65
0,6
Fremløbskoefficient
1,5
2
2,5
3
3,5
4
Trykforhold
4HTC-20K, Te=0
4HTC-20K, Te=12
4JTC-15K, Te=0
4JTC-15K,Te=12

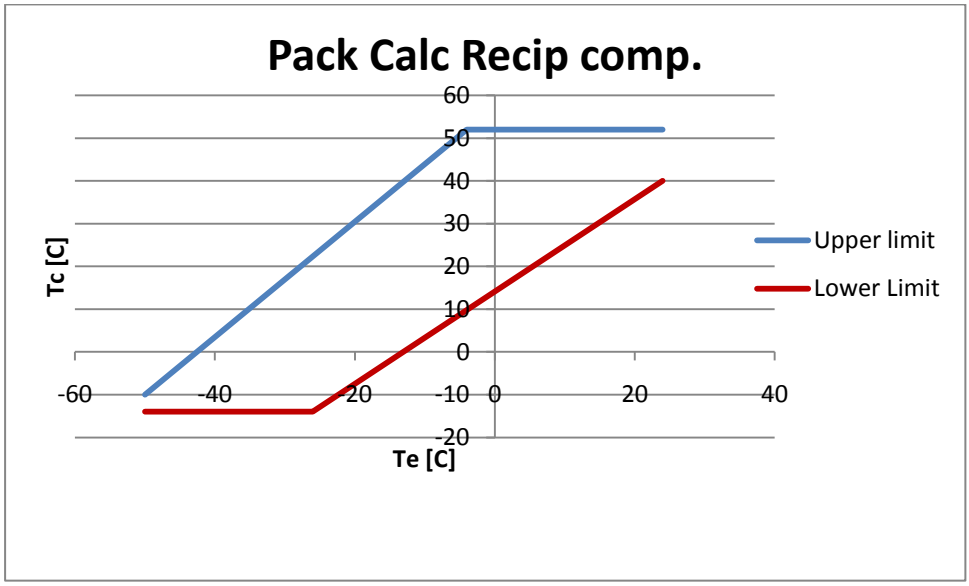

BOCK compressor
0,9
0,85
0,8
0,75
0,7
0,65
0,6
0,55
0,5
Fremløbskoefficient
1,5
2
2,5
3
3,5
4
Trykforhold
RKX26/31-2, Te=0
RKX26/31-2, Te=10
HGX2/90-4, Te=0
HGX2/90-4, Te=10

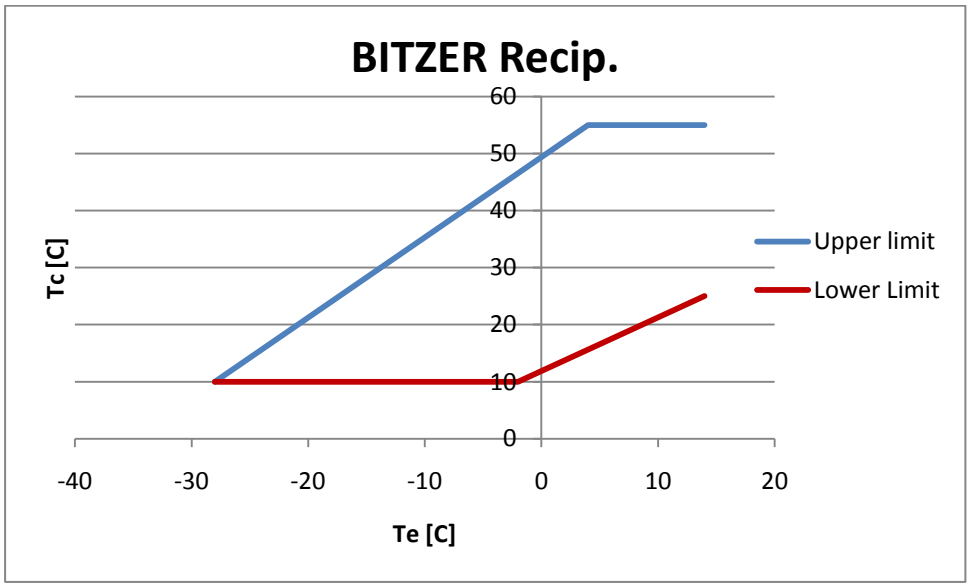
## B4 – Driftgrænser for NH3 stempelkompressor

Driftgrænserne for pack calculation kompressorerne Recip 1, 5 og 8 er alle fundet ved brug af kompressortoolboksen tilhørende programmet Pack calculation 2. De benyttede kompressorer er fundet under *industrial* og *Recip.* Grundet alle 3 kompressorer har samme driftgrænser er der kun vist en graf.

Driftgrænserne for BITZER kompressorerne er fundet ved brug af BITZERs eget kompressorprogram der kan hentes på deres hjemmeside. Driftgrænserne er ens for begge BITZERs kompressorer.

De specifikke værdier for driftgrænserne kan ses i Excel arket *kompressor_driftgrænser* under fanebladet *NH3-recip_måling*.



## B5 – Virkningsgrader for NH3 stempelkompressor

Til beregning af virkningsgrader for Pack calculation kompressorerne recip 1, 5, 8, er kompressortoolboksen tilhørende programmet pack Calculation 2 blevet benyttet. De benyttede kompressorer er fundet under *industrial* og *Recip*. Design kriterierne er overhedning på 5 C og en underkøling på 0 C. Herefter er Qc, W og Qe kopieret over i Excel arket *kompressor_undersøgelse,* under fanebladet *NH3-stemp_måling*. Disse er fundet for en fordampningstemperatur på 0 og 10 C ved varierende kondenseringstemperatur.

Til beregning af virkningsgrader for BITZER kompressorerne er fundet ved brug af BITZERs eget kompressorprogram. Beregninger er lavet for nogle situationer med en overhedning på 5 C og en underkøling på 0 C. Herefter er Qc, W og Qe kopieret over i Excel arket *kompressor_undersøgelse.* Disse er fundet for en fordampningstemperatur på 0 og 10 C ved varierende kondenseringstemperatur.

### *Beregningsmetoder*

Til beregning af virkningsgraderne for kompressorerne bruges EES programmet *beregning_virkningsgrader_komp.*

Her er input parametrene Te, Tc, Qe, W, Qc.

Som output fås Pe, Pc, $\eta_s$, $\eta_{tab}$, T2, $\dot{m}$, $v_1$

Volumenstrømmen findes så derefter

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v$$

Fremløbskoefficienten findes på samme måde som beskrevet under CO2-stempelkompressor. Dette er gjort ved at finde slagvolumenet og derefter er fremløbskoefficienten givet ved

$$\pi = \frac{\dot{V}}{slagvolumen}$$

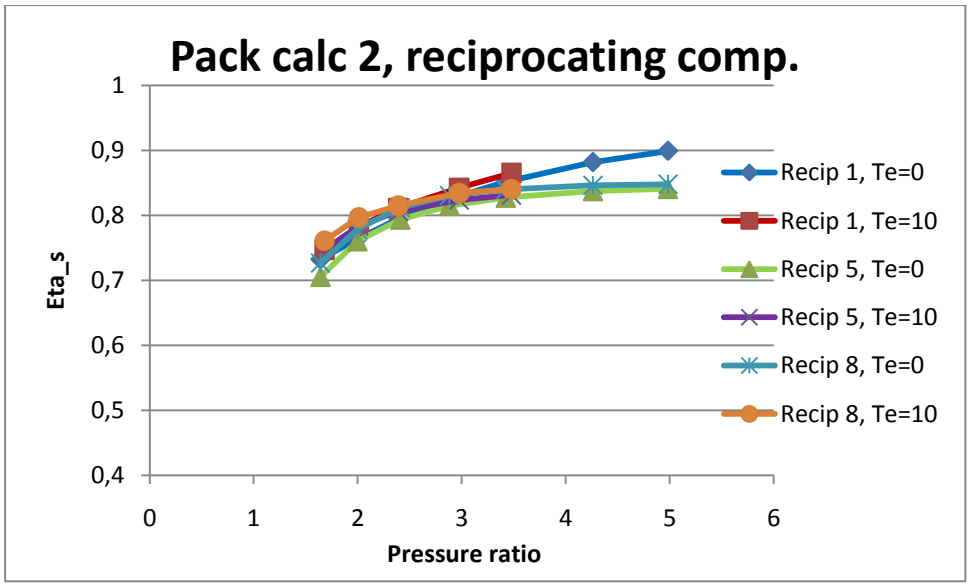
målingerne er vist i Excel arket *kompressor_undersøgelse* under fanebladet *NH3-stemp_målinger*.

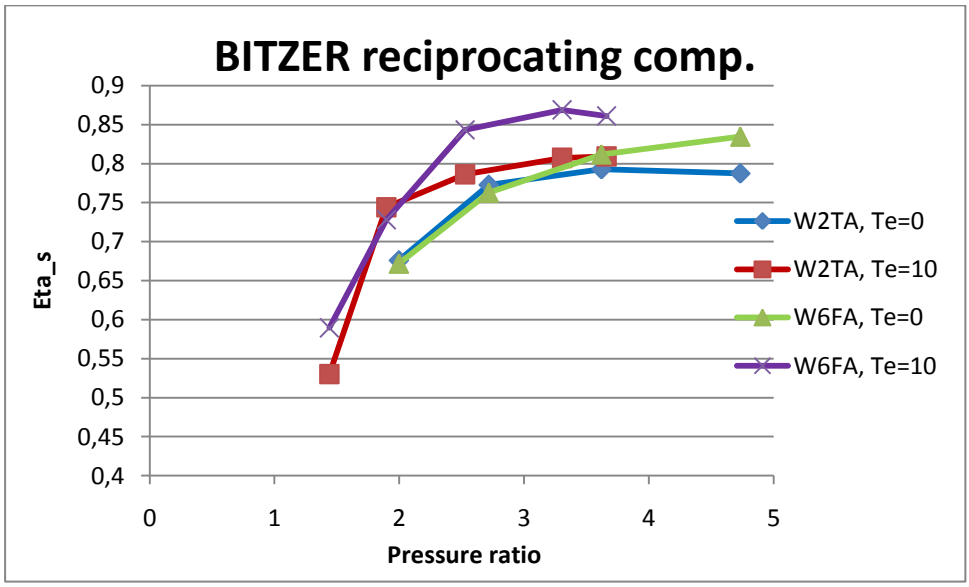
### *Validering og diskussion af resultater*

Som det kan ses på graferne og målingerne for Pack calculation kompressorerne er varmetabsvirkningsgraderne varierende med trykforholdet og fordampningstemperaturen. Recip 5 og 8 har næsten de samme isentropvirkningsgrader, varmetabsvirkningsgrader og fremløbskoefficienter. Recip 1 har nogle lidt anderledes virkningsgrader. Udover dette ligger alle fremløbskoefficienterne på en ret linje. Dette antyder at både varmetabsvirkningsgrader og fremløbskoefficienter for Pack calulation programmet er programmeret ind som en lineær funktion.

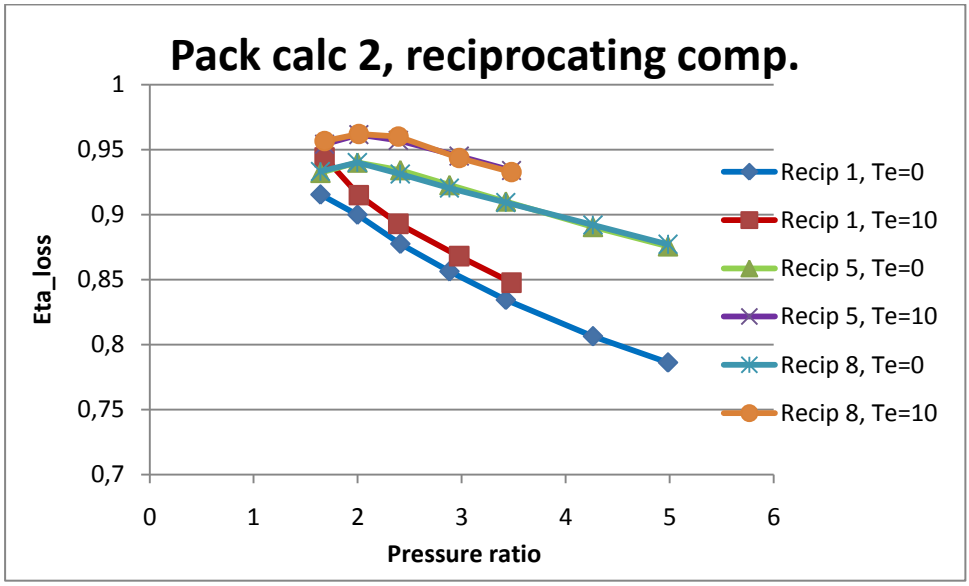
For den ene BITZER kompressor ligger fremløbskoefficienterne ikke på en helt ret linje, hvilket antyder at de ikke er programmeret ind som en lineær funktion. Slagvolumenet er dog stadig udregnet som var de på en ret linje da fejlen ikke antages at have stor betydning. Der er ikke opgivet noget varmetab for BITZERs kompressorer.

*Isentropisk virkningsgrader*

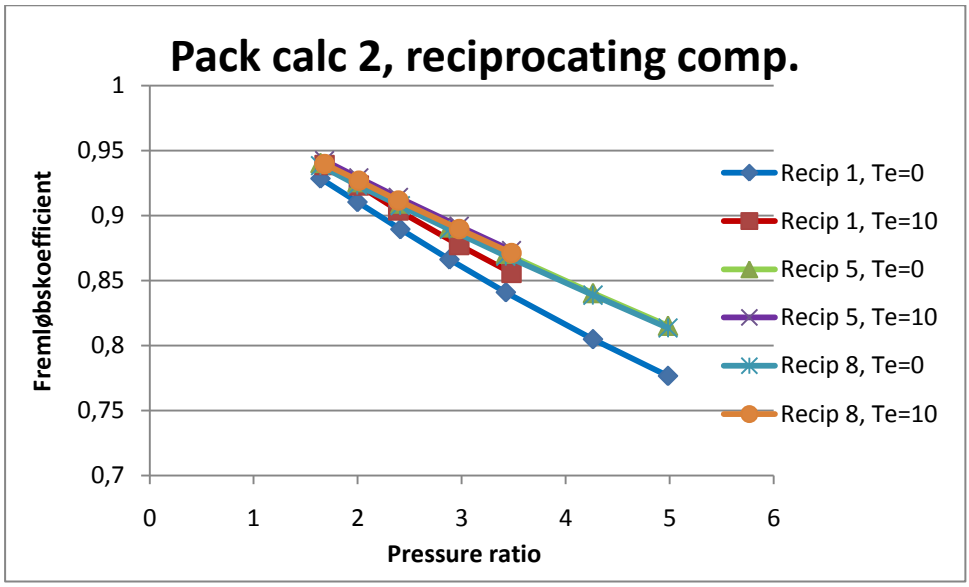


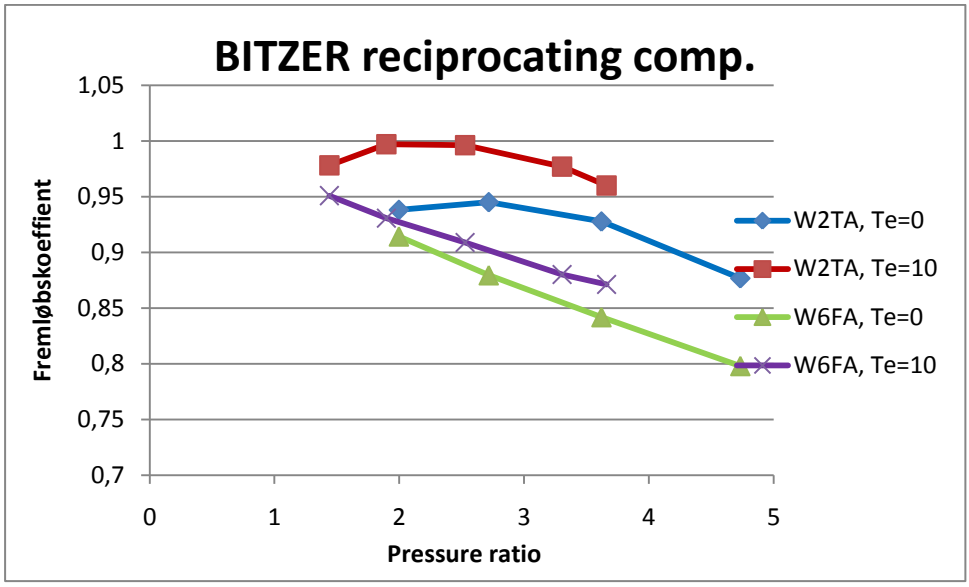



*Varmetabsvirkningsgrader*




*Fremløbskoefficient*

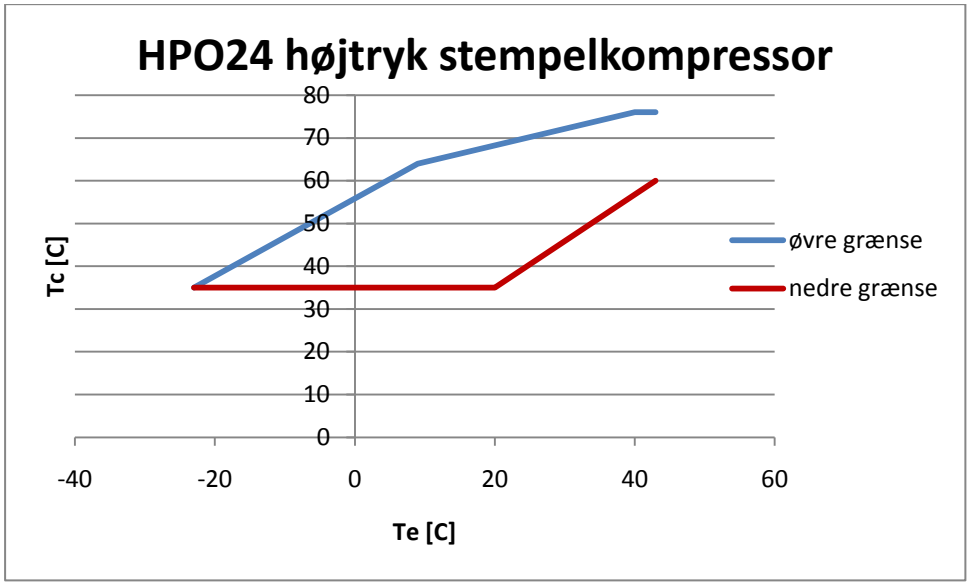


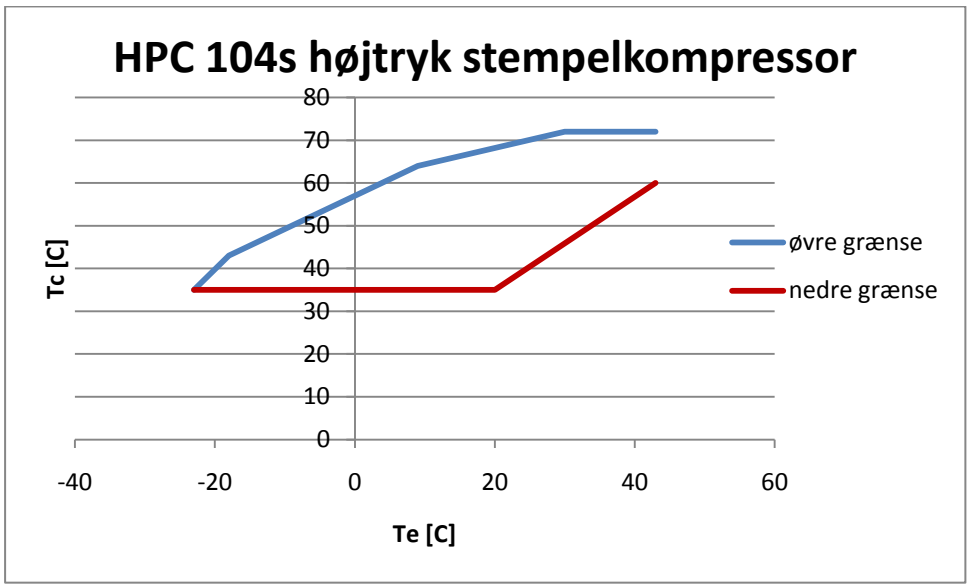

BITZER reciprocating comp.
Fremløbskoeffient
1,05
1
0,95
0,9
0,85
0,8
0,75
0,7
0
1
2
3
4
5
Pressure ratio
W2TA, Te=0
W2TA, Te=10
W6FA, Te=0
W6FA, Te=10

## B6 – Driftgrænser for NH3 højtryk stempelkompressor

Driftgrænserne for sabroes stempel kompressorer er fundet ved brug af Sabroes Matchmaster program. Dette er ikke et frit tilgængeligt program, og derfor er der screenshots af driftgrænserne i mappen *Sabroe Kompressor*. Det ses at de to kompressortyper næsten har samme driftgrænse.

De specifikke værdier for driftgrænserne kan ses i Excel arket *kompressor_driftgrænser* under fanebladet *NH3-recip_måling*.



## B7 – Virkningsgrader for NH3 højtryk stempelkompressor

Til beregning af virkningsgrader for Sabroe kompressorerne er Sabroes kompressorprogram Matchmaster blevet benyttet. Da dette ikke er et offentligt tilgængeligt software er der taget screenshots af alle målingerne så de kan eftervises. Disse findes i mappen *Sabroe Kompressor.* Design kriterierne er overhedning på 2 C og en underkøling på 2 C. Qc, W og Qe er for hver måling kopieret over i Excel arket *kompressor_undersøgelse,* under fanebladet *NH3-stemp_høj_måling*. Disse er fundet for en fordampningstemperatur på 10 og 30 C ved varierende kondenseringstemperatur.

### *Beregningsmetoder*

Til beregning af virkningsgraderne for Sabroe kompressorerne bruges EES programmet *beregning_virkningsgrader_komp.*

Her er input parametrene Te, Tc, Qe, W, Qc.

Som output fås Pe, Pc, $\eta_s$, $\eta_{tab}$, T2, $\dot{m}$, $v_1$

Volumenstrømmen findes så derefter

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v$$

Fremløbskoefficienten findes på samme måde som beskrevet under CO2-stempelkompressor. Dette er gjort ved at finde slagvolumenet og derefter er fremløbskoefficienten givet ved

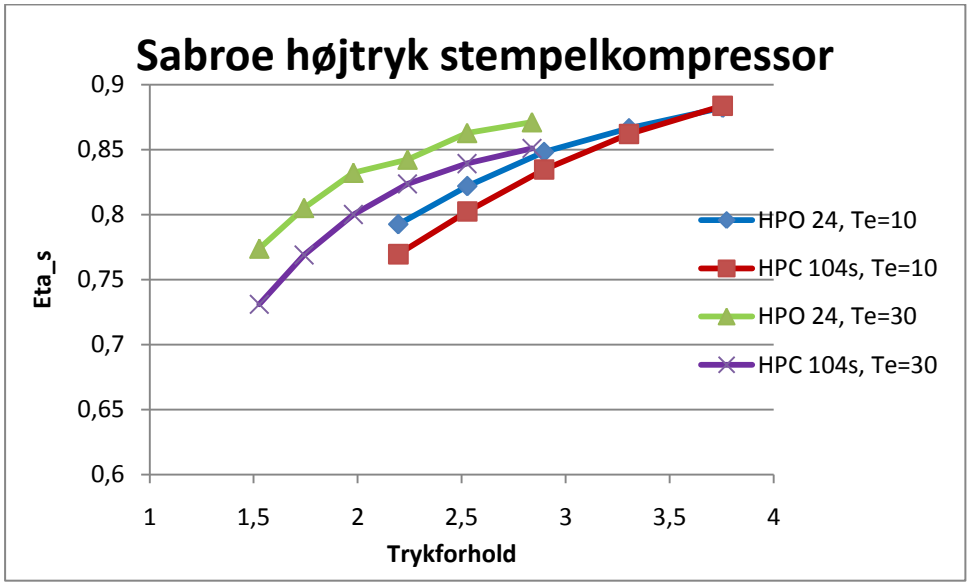
$$\pi = \frac{\dot{V}}{slagvolumen}$$

målingerne er vist i Excel arket *kompressor_undersøgelse* under fanebladet *NH3-stemp_høj_målinger*.

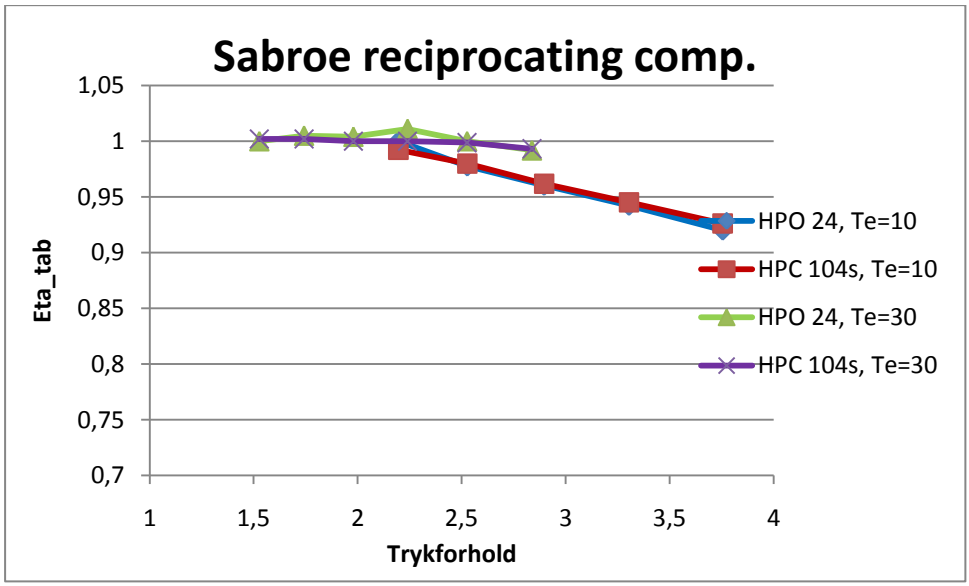
### *Validering og diskussion af resultater*

Som det kan ses på graferne og målingerne for Sabroes højtrykskompressorer, er varmetabsvirkningsgraderne varierende som en lineærfunktion med trykforholdet ved en fordampningstemperatur på 10 C. For en fordampningstemperatur på 30 C er der intet varmetab. Dette virker mærkeligt da afgangstemperaturen er i samme størrelsesorden for en fordampningstemperatur på 30 C. Afgangstemperaturen forventes at have stor indflydelse på varmetabet til omgivelserne.
Fremløbskoefficienterne ligger tæt på en ret linje. Dette antyder at både varmetabsvirkningsgrader og fremløbskoefficienter for Sabroes kompressorprogram er programmeret ind som en lineær funktion.

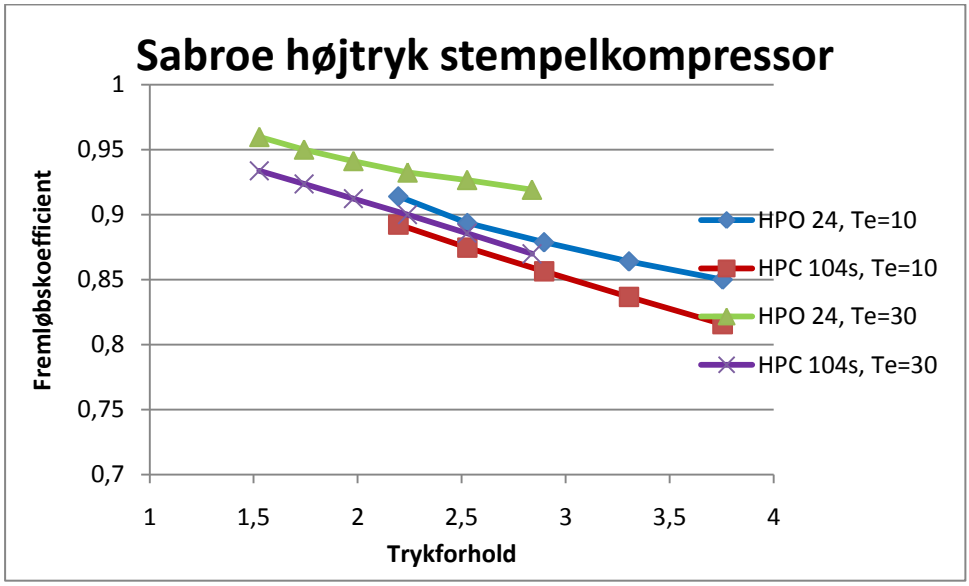
*Isentropisk virkningsgrad*




*Varmetabsvirkningsgrad*

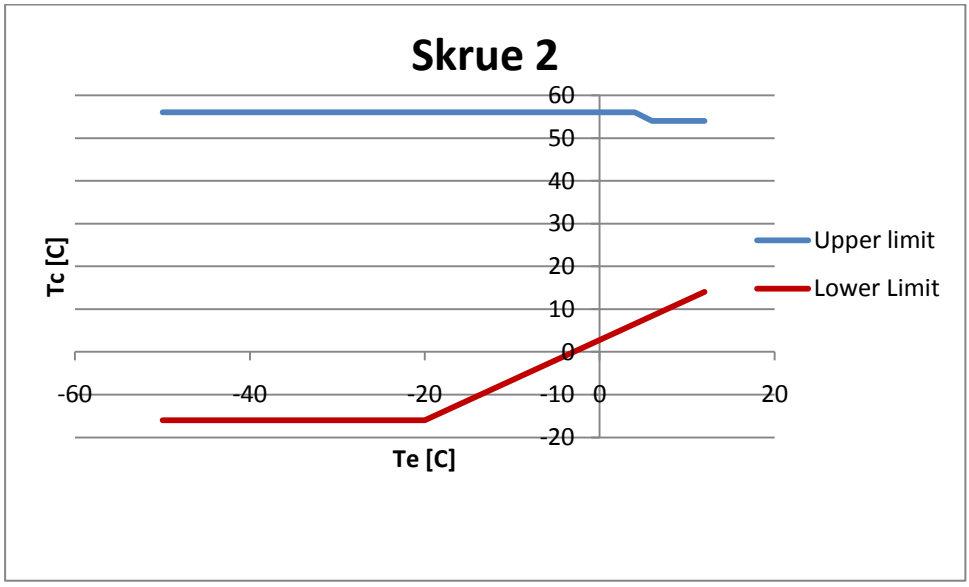


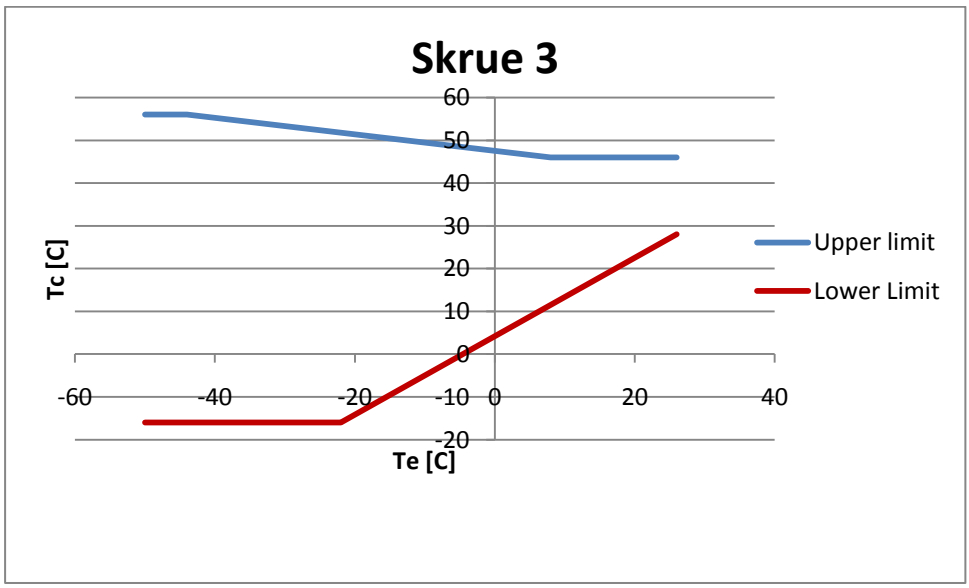
*Fremløbskoefficient*

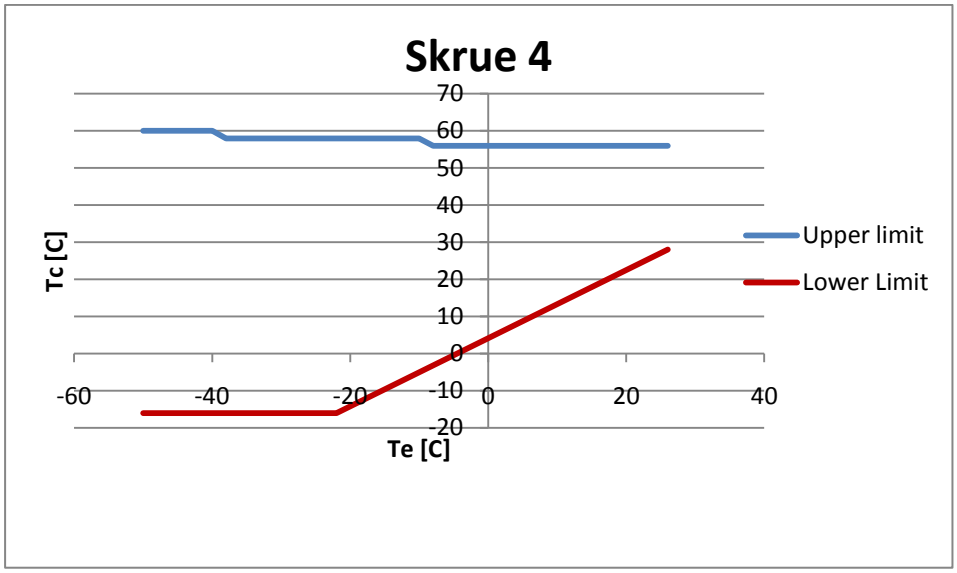


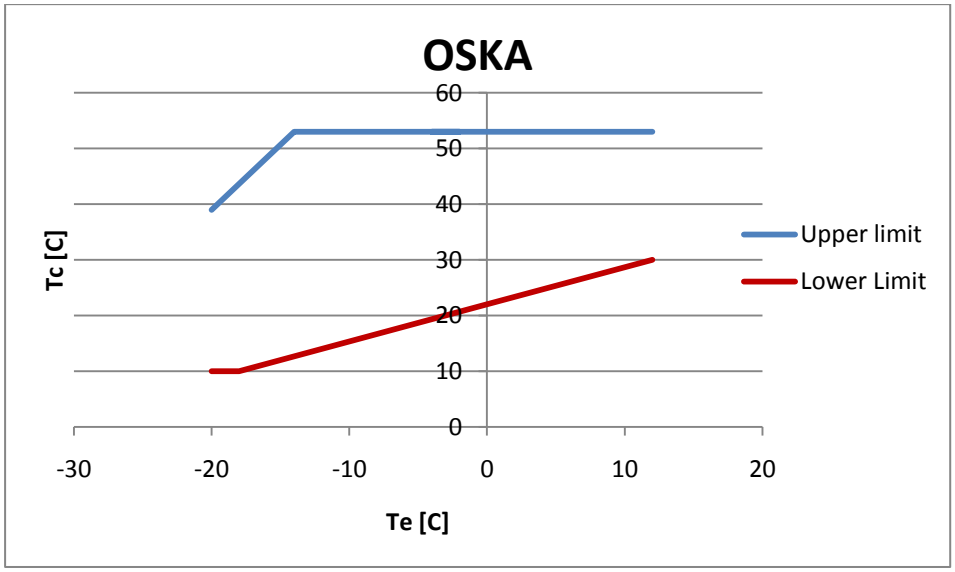
## B8 – Driftsgrænser for NH3 twin skruekompressor

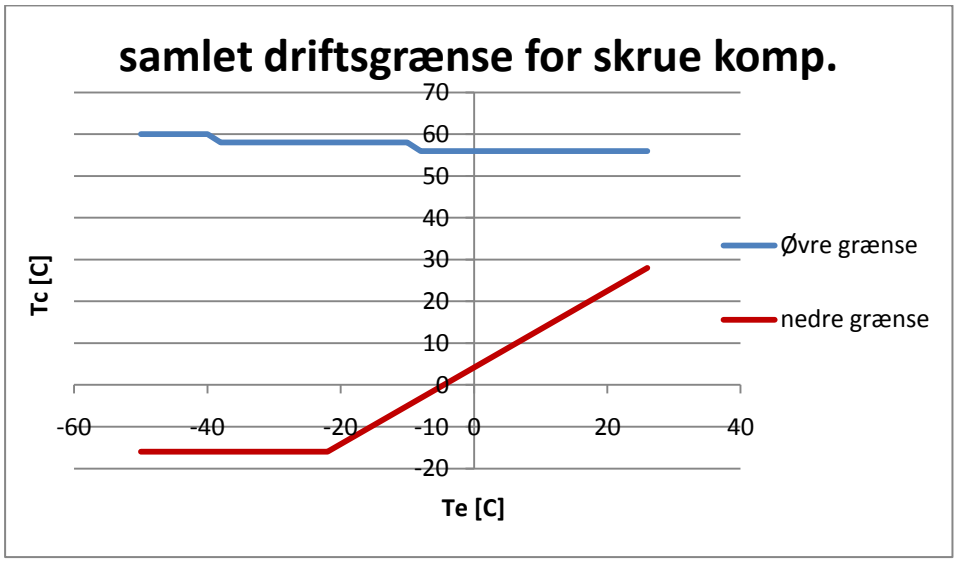
Driftsgrænserne for pack calculation kompressorerne 2, 3 og 4 er alle fundet ved brug af kompressortoolboksen tilhørende programmet Pack calculation 2. De benyttede kompressorer er fundet under *industial* og *screw.* Driftgrænserne for BITZER kompressorerne er fundet ved brug af BITZERs eget kompressorprogram der kan hentes på deres hjemmeside. De specifikke værdier for driftgrænserne kan ses i Excel arket *kompressor_driftgrænser* under fanebladet *NH3-skrue_måling*.




Skrue 4
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-60
-40
-20
0
20
40
Tc [C]
Te [C]
Upper limit
Lower Limit


OSKA
60
50
40
30
20
10
0
-30
-20
-10
0
10
20
Tc [C]
Te [C]
Upper limit
Lower Limit


samlet driftsgrænse for skrue komp.
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-60
-40
-20
0
20
40
Tc [C]
Te [C]
Øvre grænse
nedre grænse

## B9 – Virkningsgrader for NH3 twin skruekompressor

Til beregning af virkningsgrader for Pack calculation kompressorerne, er kompressortoolboksen tilhørende programmet pack Calculation 2 blevet benyttet. De benyttede kompressorer er fundet under *industrial* og *screw*. Design kriterierne er overhedning på 5 C og en underkøling på 0 C. Herefter er Qc, W og Qe kopieret over i Excel arket *kompressor_undersøgelse,* under fanebladet *NH3-skrue_måling* for nogle specifikke fordampnings- og kondenseringstemperaturer. Der er ikke opgivet noget olieforbrug. Olieforbruget må derfor være en del af Qc.

Til beregning af virkningsgrader for BITZER kompressorerne er fundet ved brug af BITZERs eget kompressorprogram. Beregninger er lavet for nogle situationer med en overhedning på 5 C og en underkøling på 0 C. Herefter er Qc, W, Qe og Q_oil kopieret over i Excel arket *kompressor_undersøgelse.* Disse er fundet for en fordampningstemperatur på 0 og 10 C.

### *Beregningsmetoder*

To forskellige beregningsmetoder bruges til at finde virkningsgraderne. Dette er grundet at der ved BITZER er opgivet Q_oil og dette er ikke tilfældet ved Pack calculation kompressorerne.

Til beregning af virkningsgraderne for Pack calculation kompressorerne bruges EES programmet *beregning_virkningsgrader_komp.*

Her er input parametrene Te, Tc, Qe, W, Qc.

Som output fås Pe, Pc, $\eta_s$, $\eta_{tab}$, T2, $\dot{m}$, $\nu_1$

Til beregning af virkningsgraderne for BITZER kompressorerne bruges EES programmet *beregning_virkningsgrader_komp_oil.*

Her er input parametrene Te, Tc, Qe, W, Qc, Qoil .

Som output fås Pe, Pc, $\eta_s$, $\eta_{tab}$, T2, T2oil, $\dot{m}$, $\nu_1$

Volumenstrømmen findes så derefter

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot \nu$$

Selvom fremløbskoefficienten for en skruekompressor ikke nødvendigvis er lineær, som den er ved stempelkompressoren, findes slagvolumenet ud fra en ret linje som beskrevet under *Virkningsgrader for CO2-stempelkompressor*. Fremløbskoefficienten er

$$\pi = \frac{\dot{V}}{slagvolumen}$$

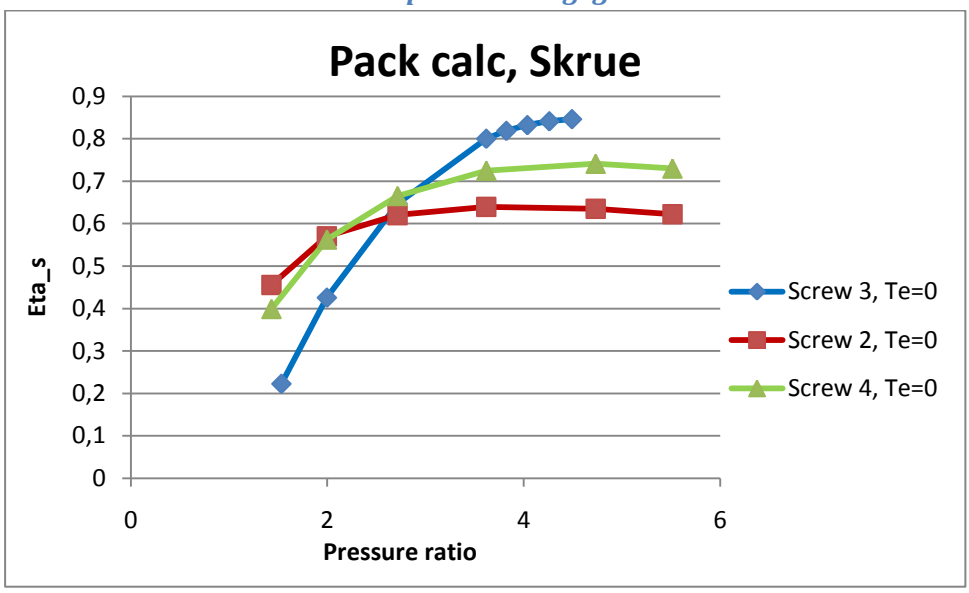
målingerne er vist i Excel arket *kompressor_undersøgelse* under fanebladet *NH3-skrue_målinger*.

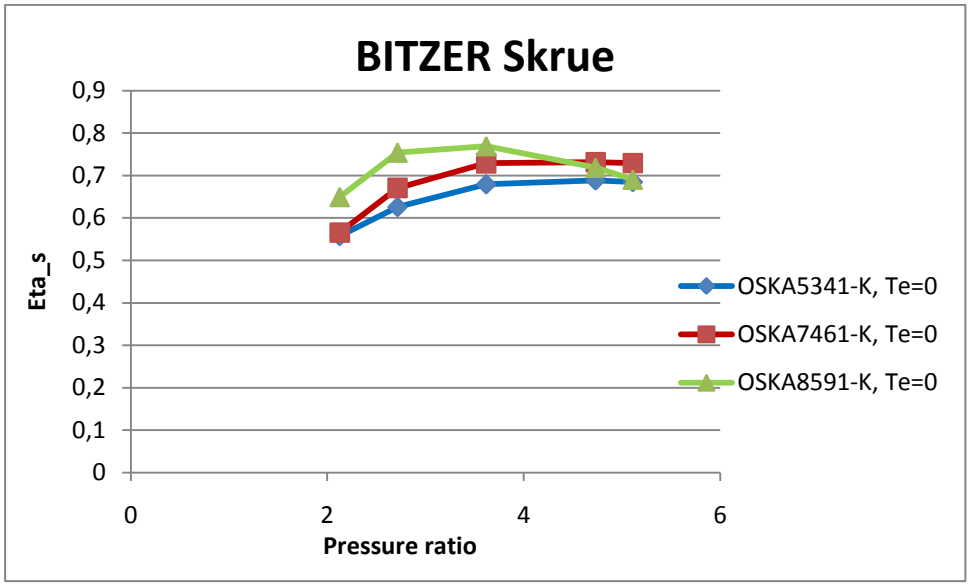
### *Validering og diskussion af resultater*

Som det kan ses på graferne og målingerne for Pack calculation kompressorerne giver alle varmetabsvirkningsgraderne 0,92 på nær en værdi. Udover dette ligger alle fremløbskoefficienterne på en ret linje. Dette antyder at både varmetabsvirkningsgrader og fremløbskoefficienter for Pack calulation programmet er programmeret ind på denne måde. Det kan også diskuteres om varmetabsvirkningsgraderne ikke kun er varmetab men også olieforbruget. Det antages dog, at dette bare er varmetab da olieforbruget er meget afhængigt af driftforholdene, og det derfor ikke ville være korrekt at indføre det som en konstantværdi.

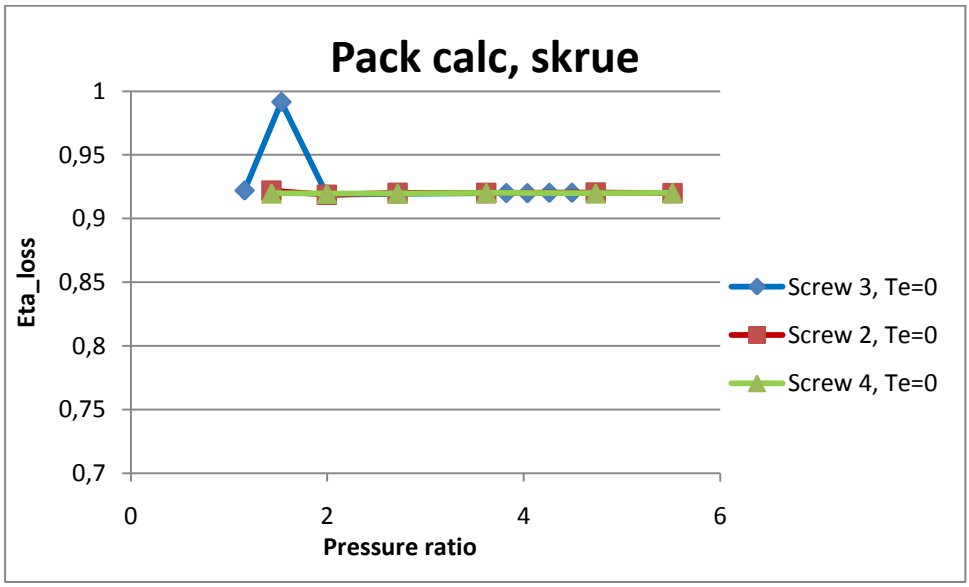
For BITZER er der ikke opgivet varmetab. Fremløbskoefficienterne ligger ikke på en helt ret linje hvilket antyder at de ikke er programmeret ind på samme måde som i Pack calculation programmet. Slagvolumenet er dog stadig udregnet som var de på en ret linje da fejlen ikke antages at have stor betydning. Som det ses i målingerne er afgangstemperaturen T2oil på ca. 80 C ved alle målinger. Dette antyder også at beregningerne er lavet korrekt. Udover dette, viser det også at oliestrømmen bruges til at styre afgangstemperaturen.

*Isentropisk virkningsgrad*

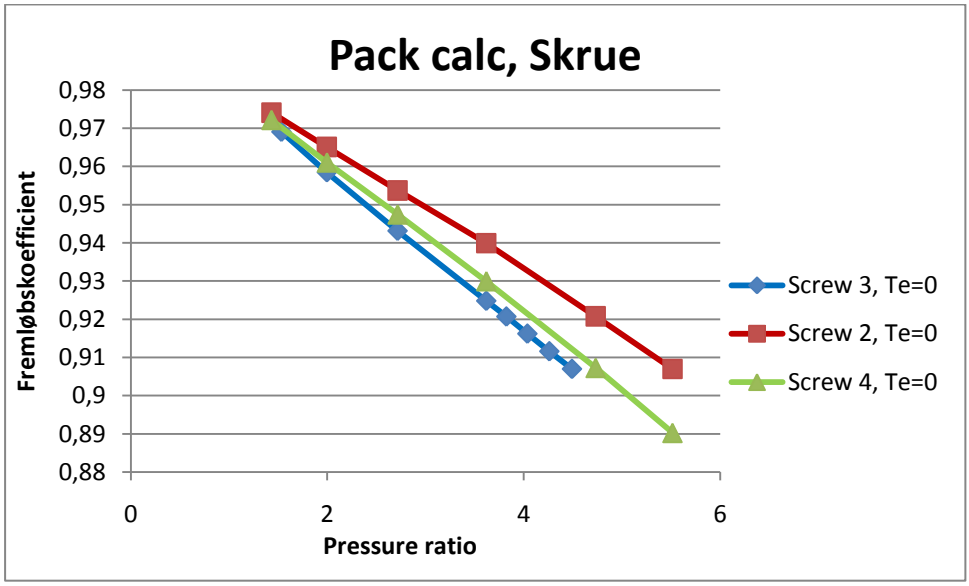


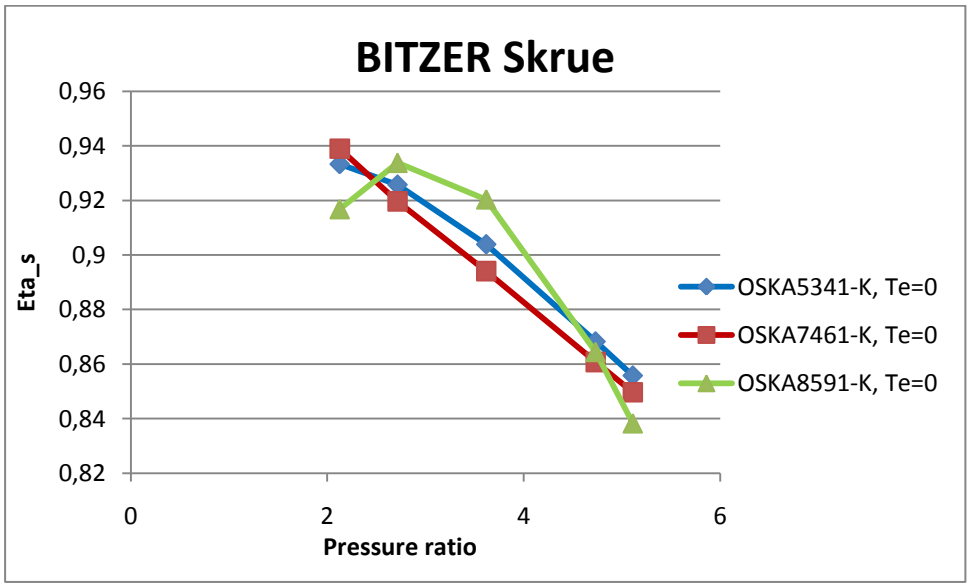



*Varmetabsvirkningsgrader*



*Fremløbskoefficienter*



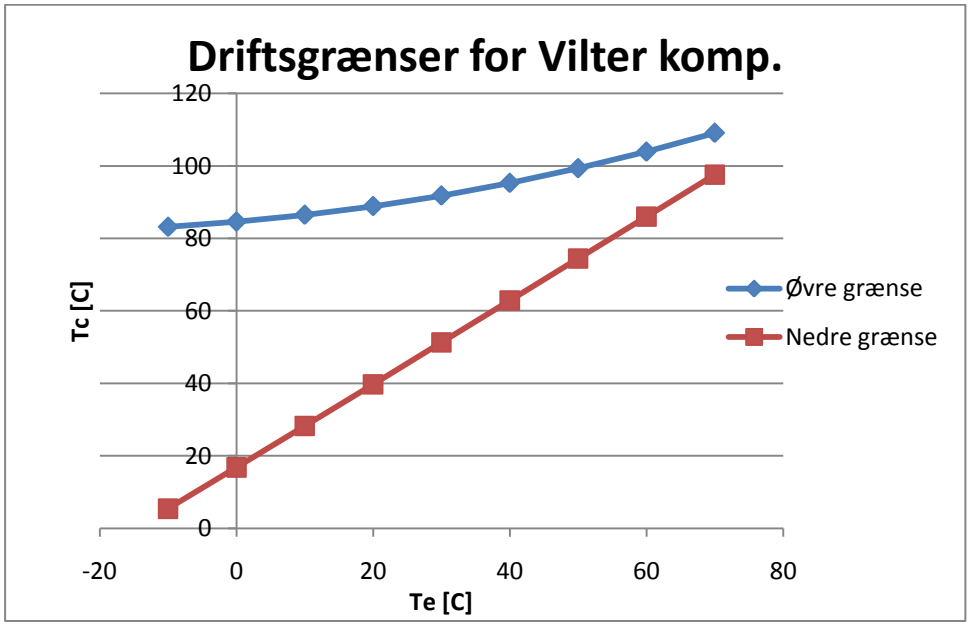
## B10 – Driftgrænser for NH3 single skruekompressor

Driftgrænserne for Vilter single skruekompressorer er fundet ved brug af VSC beregningsprogram. Dette er ikke et frit tilgængeligt program. Grænserne er fundet ved kompressormodellen VSS 291. Det antages at driftsgrænserne er tilsvarende for de andre modeller.

Følgende grænser er sat fra Vilter.

- 41,4 bar i differenstryk
- Min 1,8 i trykforhold
- 118,3 C i afgangstemperatur
- Max kondenseringstryk 70,5 bar

De specifikke værdier for driftgrænserne kan ses i Excel arket *VSC_undersøgelse* under fanebladet *Driftsgrænser*. Dette excelark er vedlagt som bilag MS-1-1-7.



## B11 – Virkningsgrader for NH3 single skruekompressor

Til beregning af virkningsgrader for Vilter single skruekompressor er kompressorprogrammet VSC blevet benyttet. Dette ikke er et offentligt tilgængelig software. I bilag B12 er et screenshot af programmet i en driftssituation vist. Alle målinger er ved brug af programmet lavet med overhedning på 1,5 C og nogle effektiviteter på 82 %, 93 % og 95 % på henholdsvis subcooler, condensor og desuperheater. For hver måling er følgende værdier kopieret over i Excel arket *VSC_undersøgelse,* under fanebladet *Beregn_291* og *Beregn_alle*. Dette excelark findes på bilag MS-1-1-7.

- Pe
- Pc
- $\dot{m}$
- $T_{afgang}$
- $Q_{olie}$
- $T_{olie,ind}$
- Q
- W

Disse er fundet for varierende fordampningstemperatur mellem 0 og 45 C ved varierende kondenseringstryk.

### *Beregningsmetode*

Til beregning af virkningsgraderne for Vilter kompressoren bruges EES programmet *beregning_af_virkningsgrader.*

Her er input parametrene Pe, Te, Pc, $\dot{m}$, $T_{afgang}$, $Q_{olie}$, $T_{olie,ind}$.

Som output fås $\rho_1$, $\eta_s$, $W_{beregn}$

Beregningsmetoden til generering af outputtet er lidt anderledes end metoderne til de andre typer kompressorer. Dette er grundet at VSC programmet ikke er opbygget efter at vise hvad Vilterkompressoren kan yde, men hvad en varmepumpe med denne kompressor kan levere af varmt vand. Dette giver nogle lidt andre målepunkter.

Tilstanden af kølemidlet ved indsug til kompressor er kendt, og tilstanden efter komprimeringen er også kendt. Men grundet en høj oliestrøm er afgangsgassen blevet afkølet. Situationen hvor olien ingen indvirkning har på afgangstemperaturen ønskes fundet, da det muliggør en beregning af isentropisk virkningsgrad for kompressoren. Den enthalpi som afgangsgassen har mistet ved at tilføre energi til olien under komprimeringen tilføres igen afgangsgassen.

$$\Delta h = \frac{Q_{olie}}{\dot{m}}$$

$$h_2 = h_{afgang} + \Delta h$$

Det er nu muligt at regne den isentropiske virkningsgrad og det beregnede arbejde ud for kompressoren.

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$W_{beregn} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

Volumenstrømmen og varmetabsvirkningsgraden er fundet i Excel arket ved brug af følgende formler

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$\eta_{tab} = \frac{W_{beregn}}{W}$$

Fremløbskoefficienten findes på samme måde som beskrevet under CO2-stempelkompressor. Dette er gjort ved at finde slagvolumenet og derefter er fremløbskoefficienten givet ved

$$\pi = \frac{\dot{V}}{slagvolumen}$$

målingerne er vist i Excel arket *VSC_undersøgelse* under fanebladet *_291* og *Beregn_alle*.

### *Validering og diskussion af resultater*

Som det kan ses på graferne for de isentropiske virkningsgrader er punkterne ikke mulige at beskrive med et polynomium som det var tilfældet med de andre typer kompressorer. Dette tyder på at der er nogle faktorer som ikke er medregnet, da virkningsgraderne må være programmeret ind som en funktion. Fejlen vurderes ikke at have stor betydning da virkningsgraderne ifølge Thomas Lund er realistiske.

De isentropiske virkningsgrader ændrer sig en smule alt efter hvilken type kompressor og fordampningstemperatur der benyttes. Ud fra graferne vurderes, at VSS291 og VSS341 har ca. de samme isentropiske virkningsgrader, og VSS451 og VSS601 har de samme. Nedenstående skema viser antagelserne for de isentropvirkningsgrader.

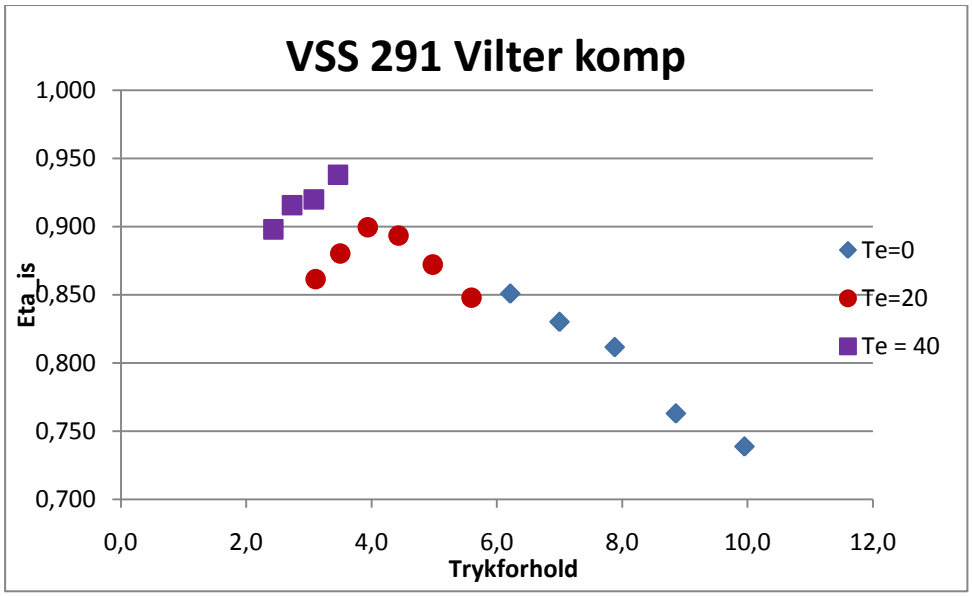
| | Te = [-10,10] | Te = [10;60] |
|---|---|---|
| **VSS291 og VSS341** | 0,82 | 0,88 |
| **VSS451 og VSS601** | 0,8 | 0,84 |

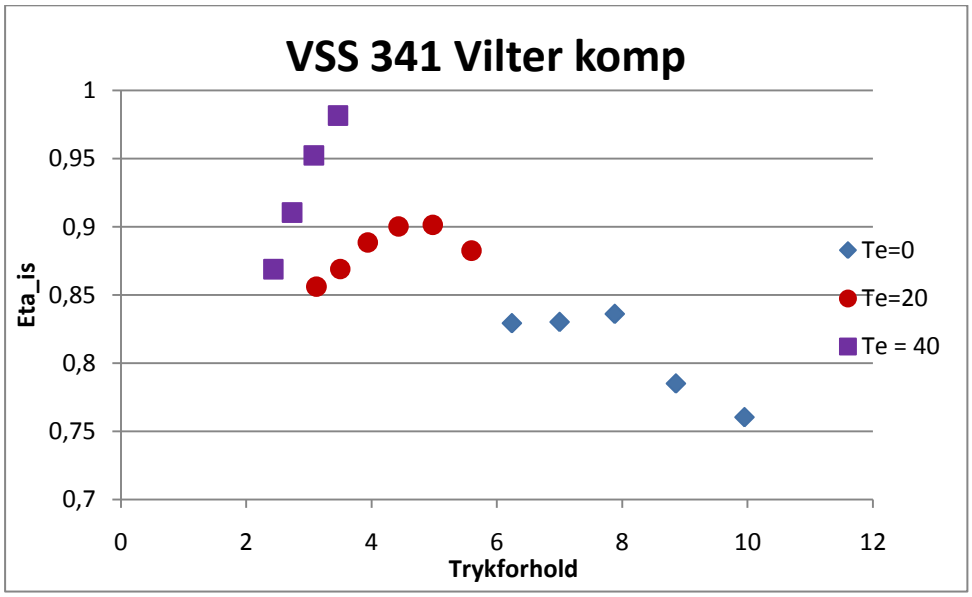
Varmetabsvirkningsgraden virker meget lille i forhold til hvad andre typer af kompressorer har af varmetab til omgivelserne. Der er ikke nogen forklaring hvorfor denne værdi er så meget større for Vilter single skruekompressoren end for en almindelig skruekompressor. Værdierne virker ifølge Thomas Lund realistiske.

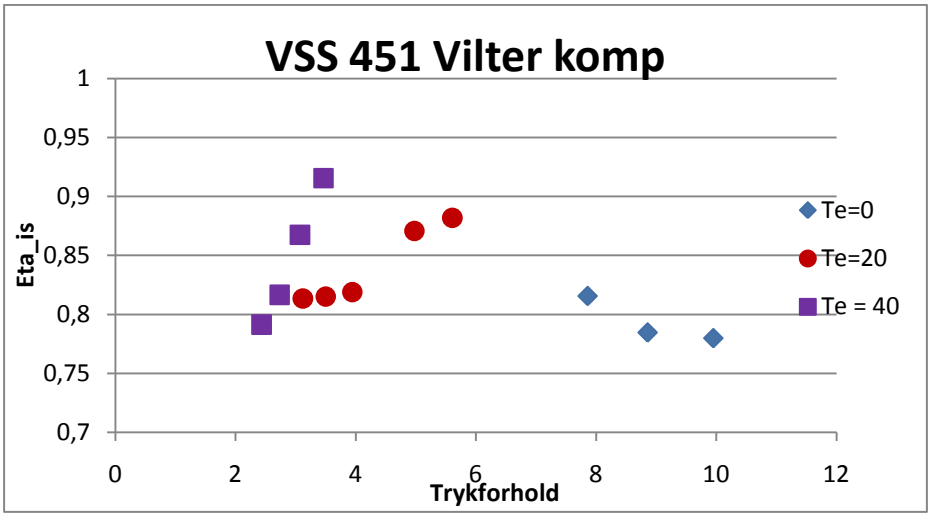
Den effektive virkningsgrad svinger ikke meget i værdi. Denne vurderes til at være ens for alle kompressormodellerne. Den effektive virkningsgrad antages at have værdien 0,65 i alle driftspunkter.

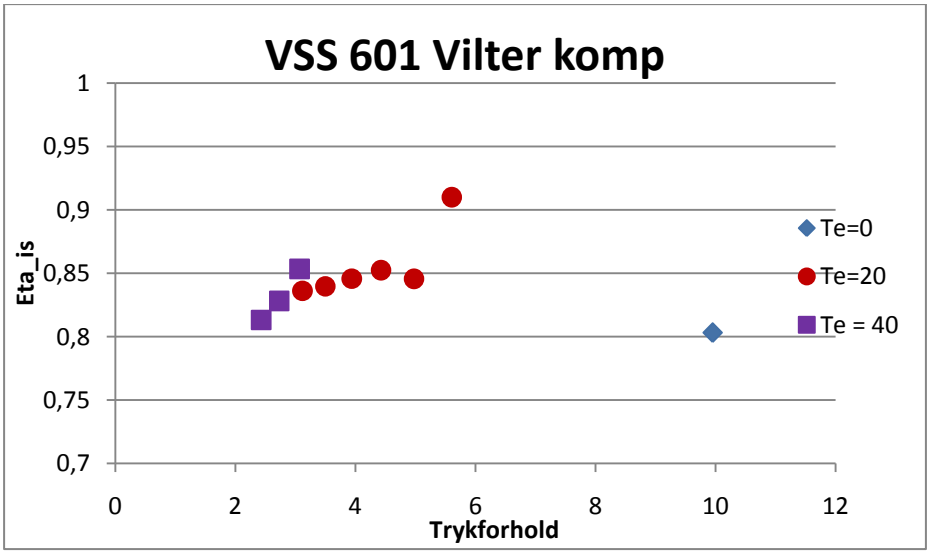
Fremløbskoefficienten ligger mellem 0,89 0g 0,97.

*Isentropisk virkningsgrad*

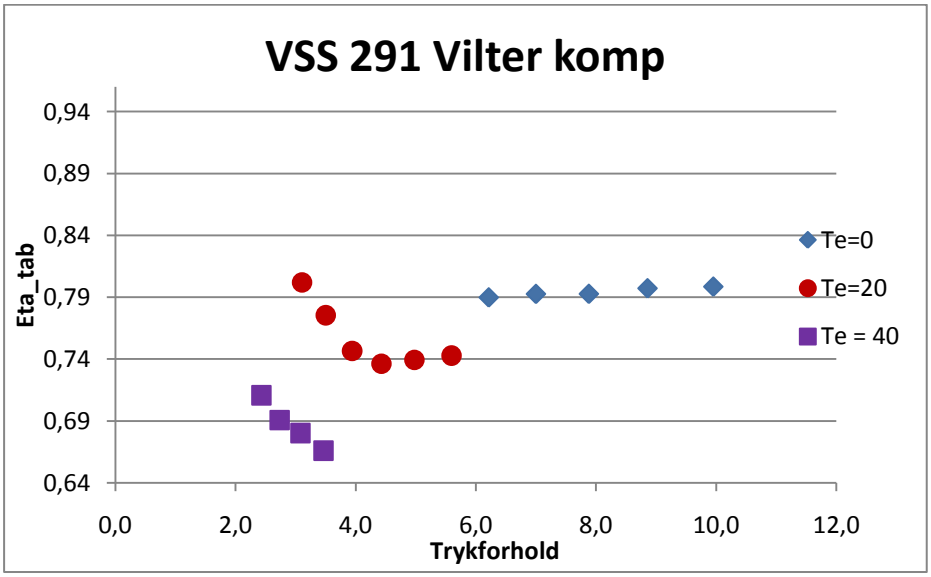


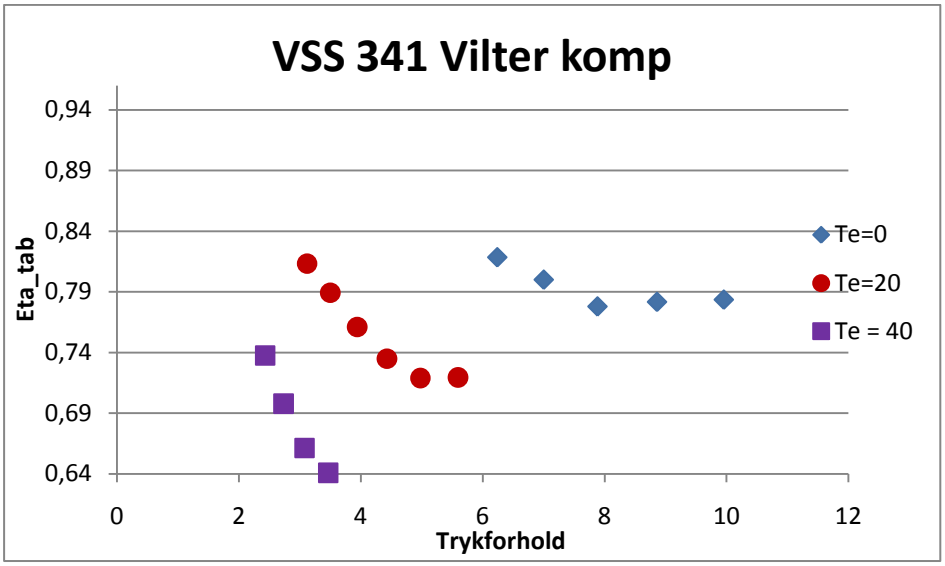



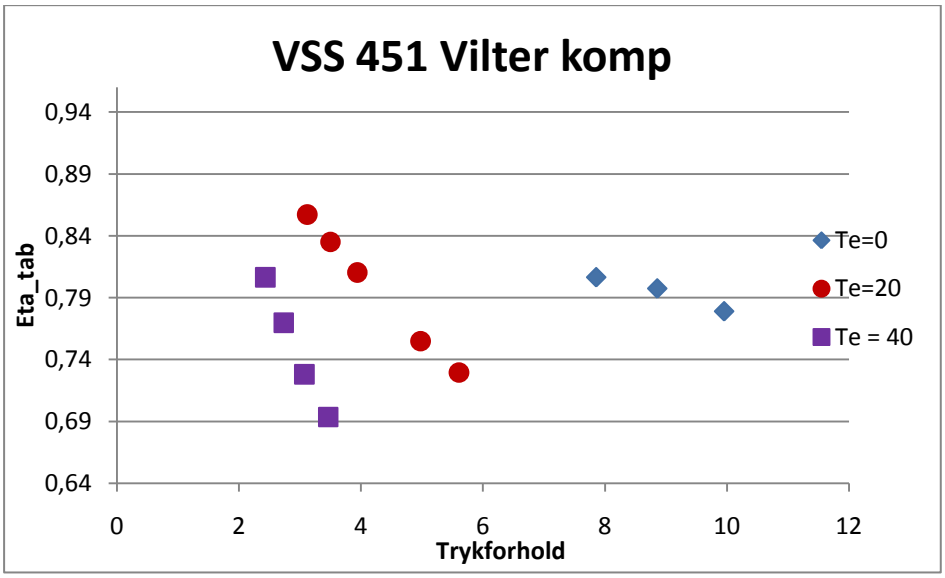


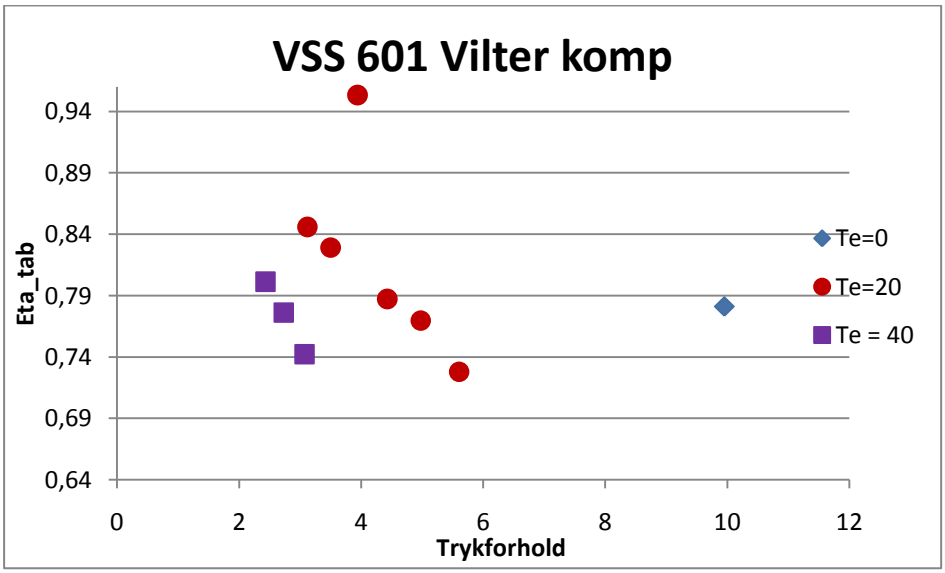




*Varmetabsvirkningsgrad*

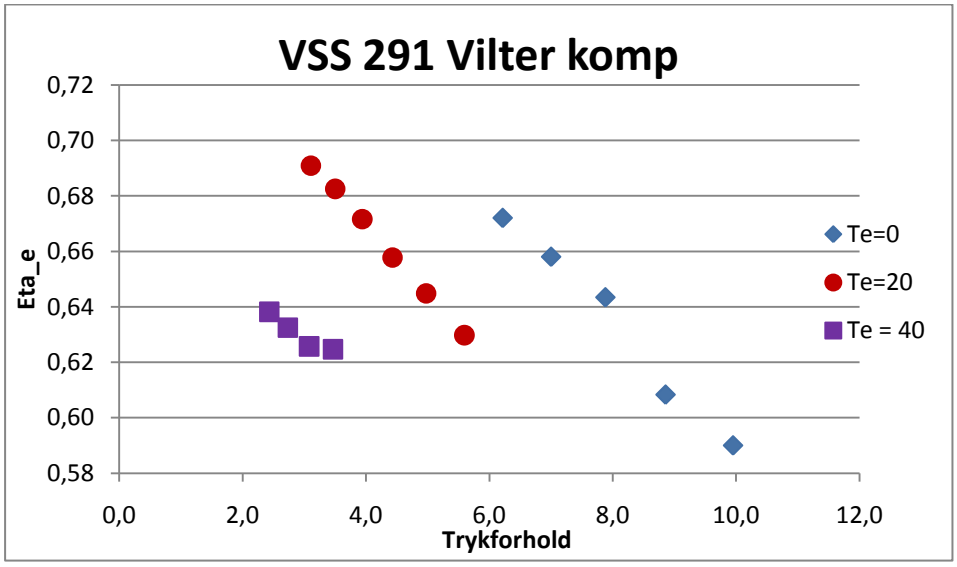


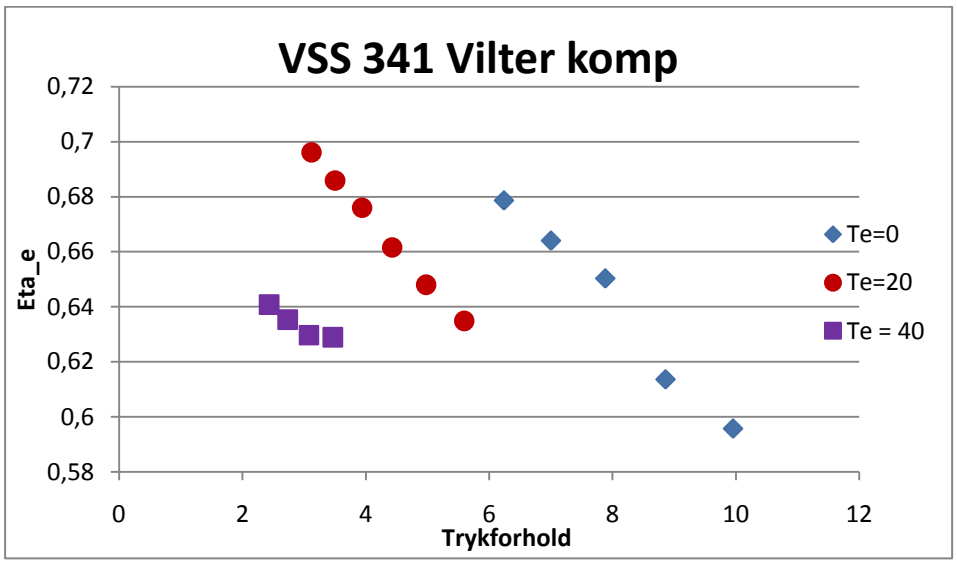

VSS 341 Vilter komp
0,94
0,89
0,84
0,79
0,74
0,69
0,64
Eta_tab
0
2
4
6
8
10
12
Trykforhold
Te=0
Te=20
Te = 40

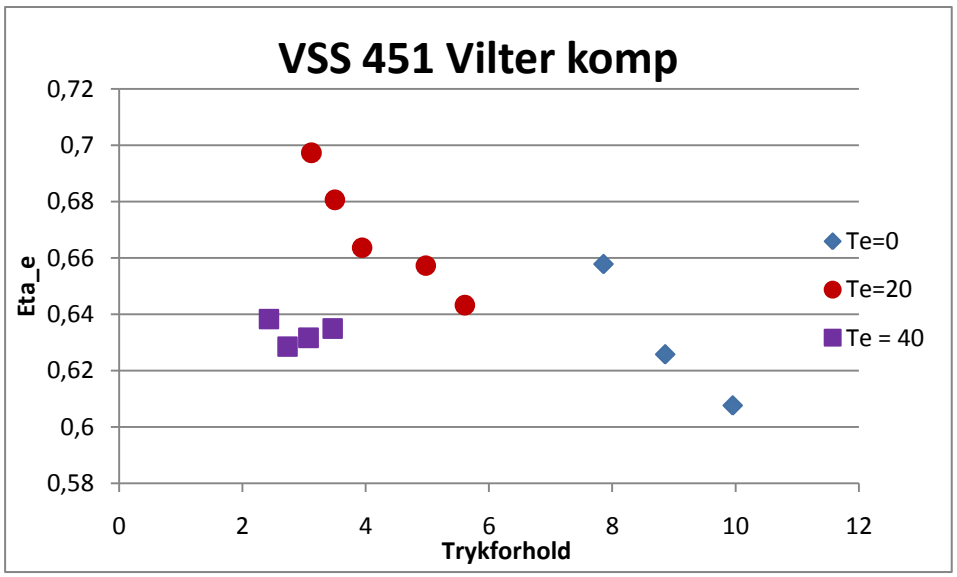

VSS 451 Vilter komp
0,94
0,89
0,84
0,79
0,74
0,69
0,64
Eta_tab
0
2
4
6
8
10
12
Trykforhold
Te=0
Te=20
Te = 40

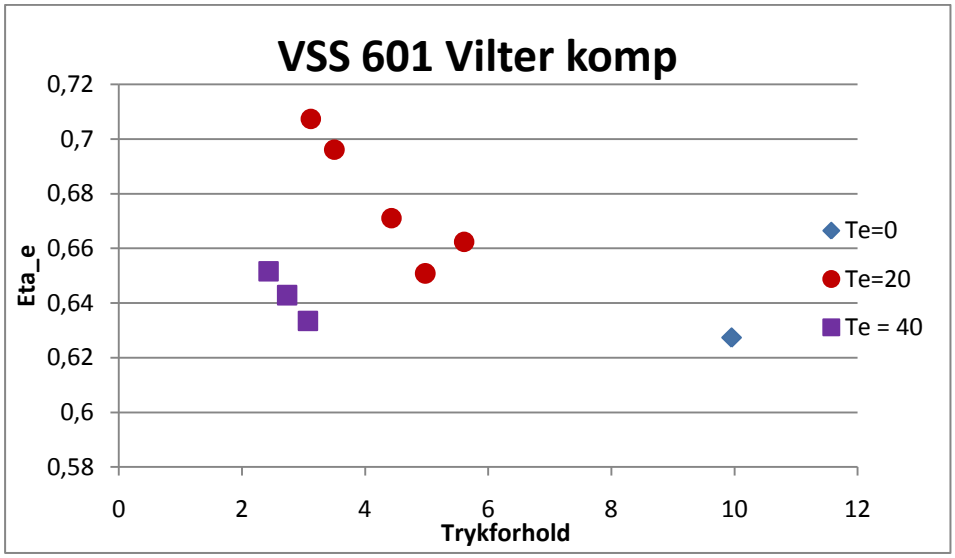

VSS 601 Vilter komp
0,94
0,89
0,84
0,79
0,74
0,69
0,64
Eta_tab
0
2
4
6
8
10
12
Trykforhold
Te=0
Te=20
Te = 40

*Effektiv virkningsgrad*

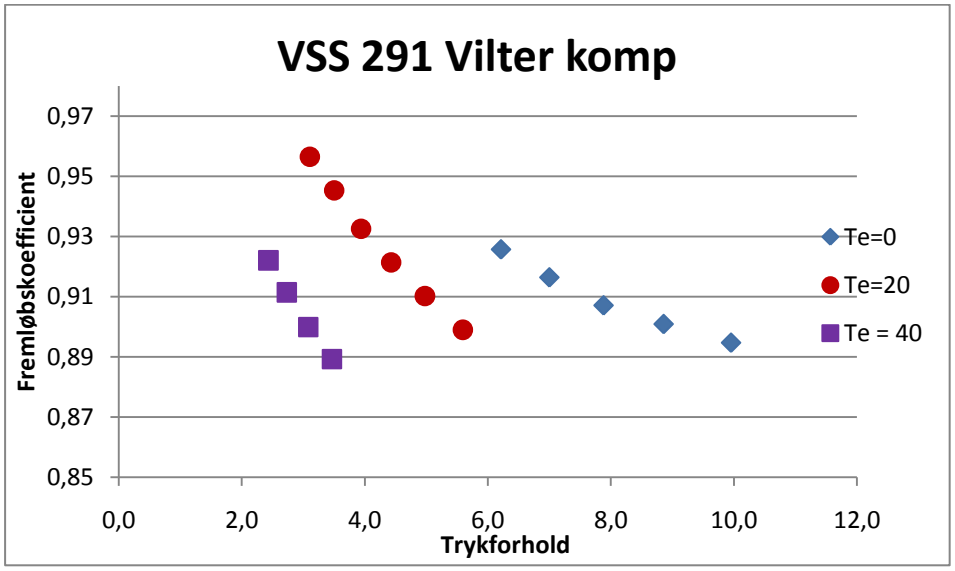


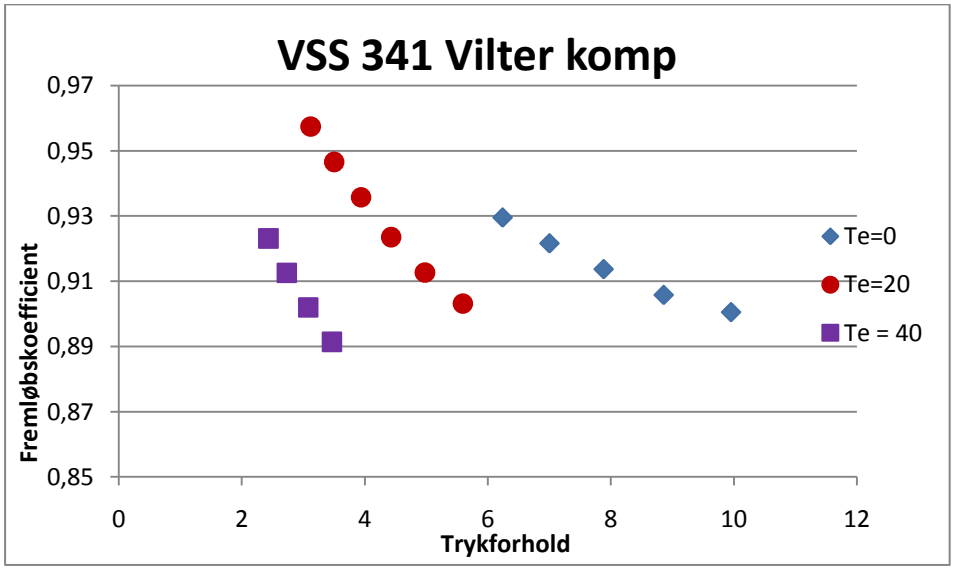



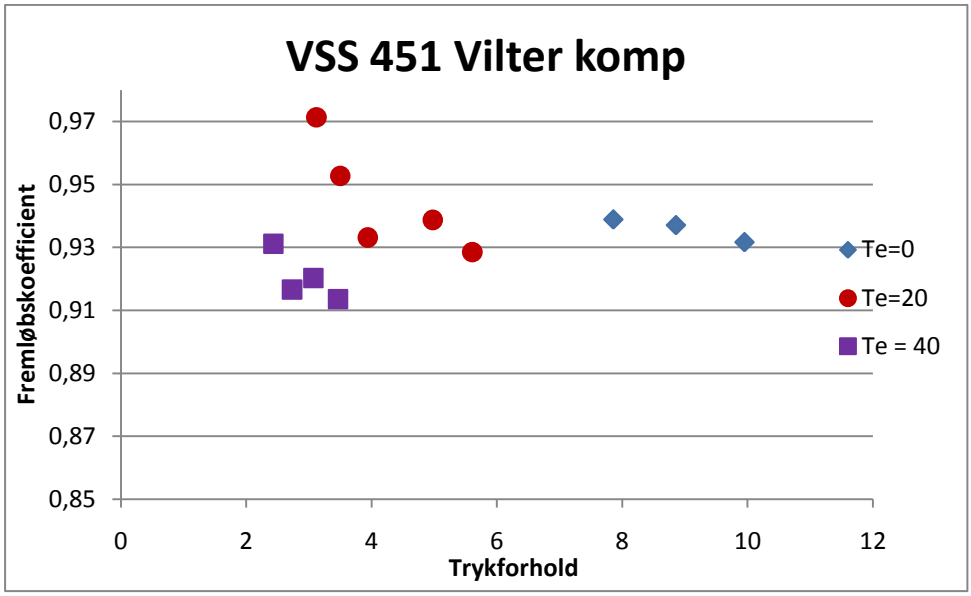



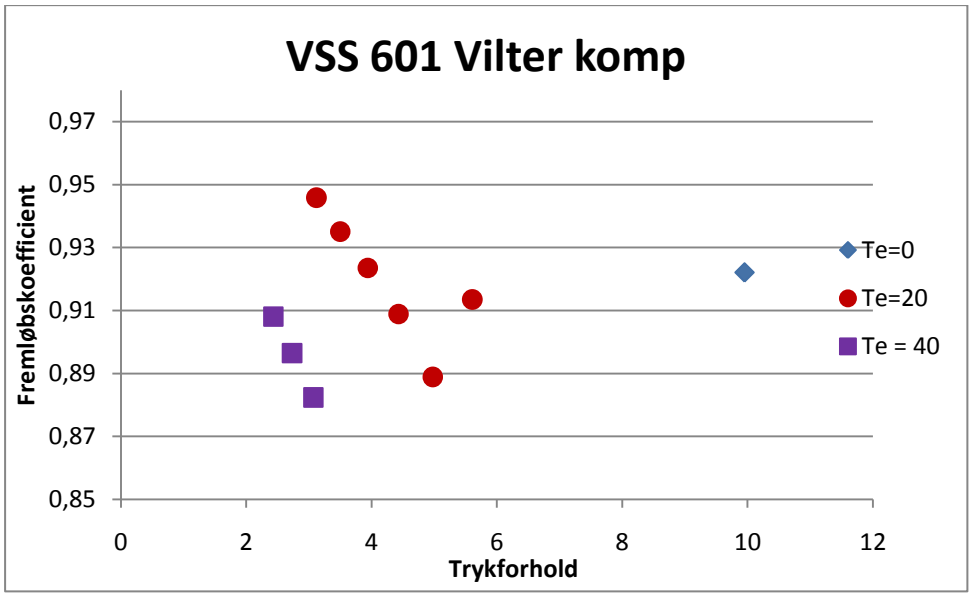


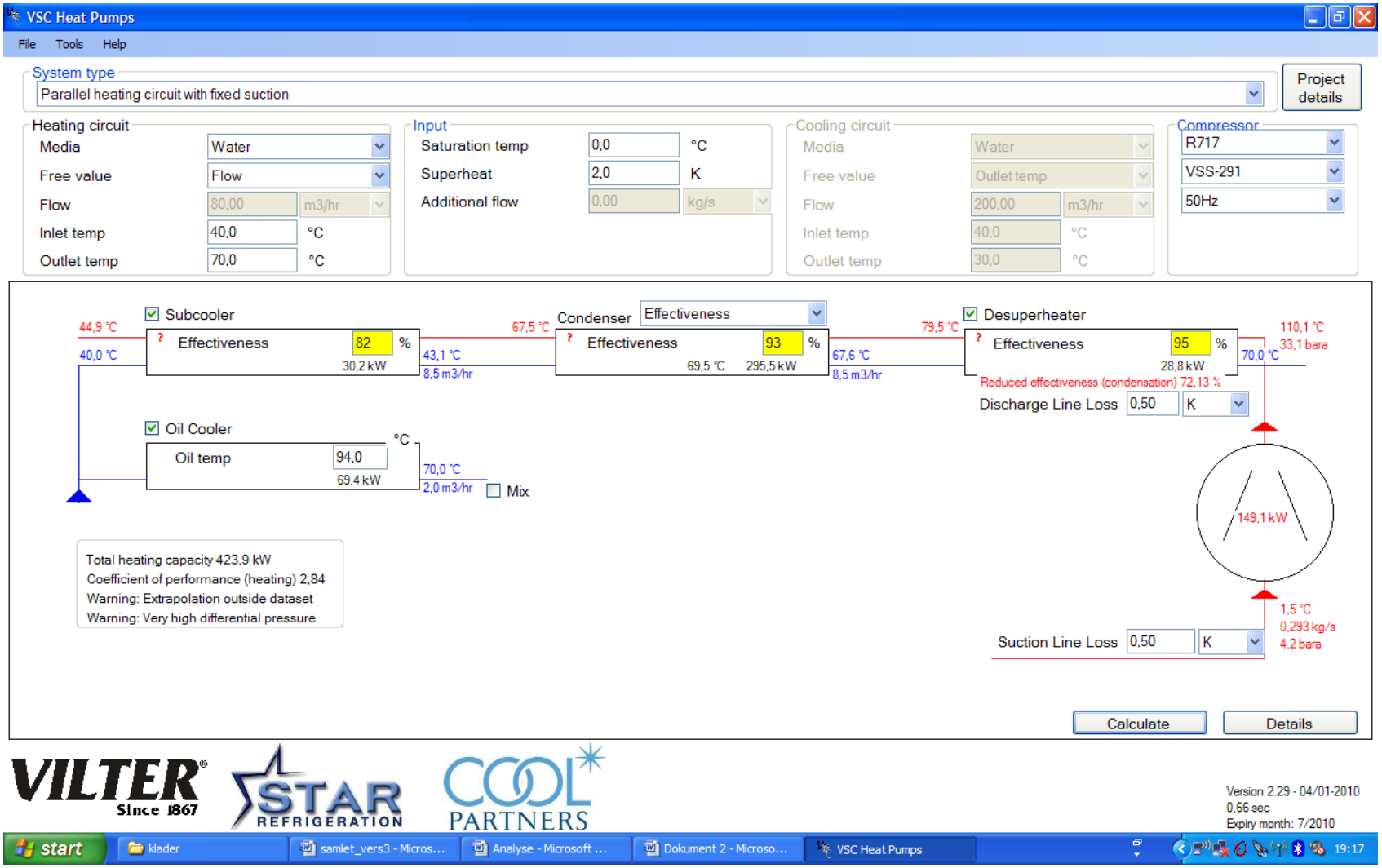

*Fremløbskoefficient*




VSS 451 Vilter komp
Fremløbskoefficient
0,97
0,95
0,93
0,91
0,89
0,87
0,85
0
2
4
6
8
10
12
Trykforhold
Te=0
Te=20
Te = 40

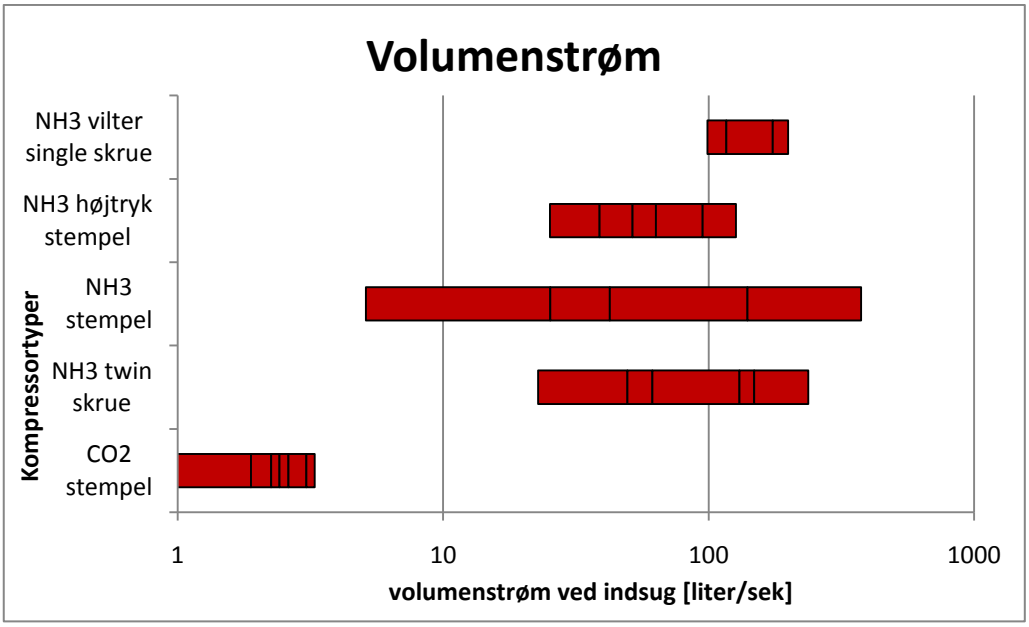

VSS 601 Vilter komp
Fremløbskoefficient
0,97
0,95
0,93
0,91
0,89
0,87
0,85
0
2
4
6
8
10
12
Trykforhold
Te=0
Te=20
Te = 40

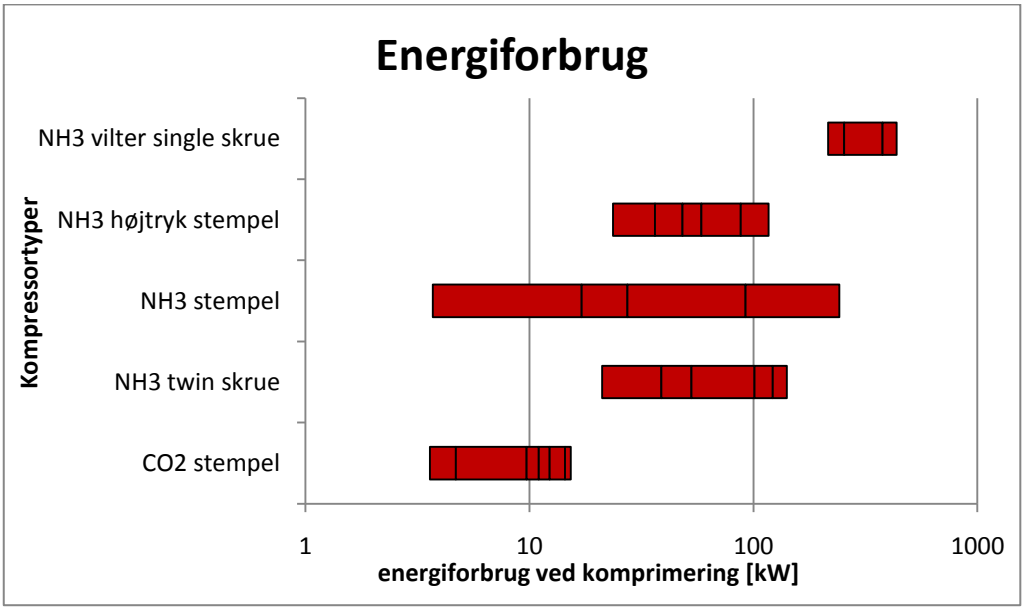

VSC Heat Pumps
File Tools Help
System type
Parallel heating circuit with fixed suction
Project details
Heating circuit
Media Water
Free value Flow
Flow 80,00 m3/hr
Inlet temp 40,0 °C
Outlet temp 70,0 °C
Input
Saturation temp 0,0 °C
Superheat 2,0 K
Additional flow 0,00 kg/s
Cooling circuit
Media Water
Free value Outlet temp
Flow 200,00 m3/hr
Inlet temp 40,0 °C
Outlet temp 30,0 °C
Compressor
R717
VSS-291
50Hz
Subcooler
44,9 °C
40,0 °C
Effectiveness 82 %
30,2 kW
43,1 °C
8,5 m3/hr
Condenser Effectiveness
67,5 °C
Effectiveness 93 %
69,5 °C 295,5 kW
67,6 °C
8,5 m3/hr
Desuperheater
79,5 °C
Effectiveness 95 %
28,8 kW
110,1 °C
33,1 bara
70,0 °C
Reduced effectiveness (condensation) 72,13 %
Discharge Line Loss 0,50 K
Oil Cooler
Oil temp 94,0 °C
69,4 kW
70,0 °C
2,0 m3/hr
Mix
149,1 kW
Total heating capacity 423,9 kW
Coefficient of performance (heating) 2,84
Warning: Extrapolation outside dataset
Warning: Very high differential pressure
1,5 °C
0,293 kg/s
4,2 bara
Suction Line Loss 0,50 K
Calculate
Details
VILTER Since 1867
STAR REFRIGERATION
COOL PARTNERS
Version 2.29 - 04/01-2010
0,66 sec
Expiry month: 7/2010
start
klader
samlet_vers3 - Micros...
Analyse - Microsoft ...
Dokument 2 - Microso...
VSC Heat Pumps
19:17

## B13 – Kapacitet

Dette bilag vil kort gennemgå kapaciteterne for de undersøgte kompressorer i dette projekt. Den første figur viser slagvolumenet for de undersøgte kompressorer. Slagvolumenet er fundet ud fra volumenstrømningerne og dette er beskrevet under hver enkelt kompressor. Slagvolumenerne er samlet under filen *kapaciteter*. Slagvolumenet er benyttet i stedet for volumenstrømmen da denne værdi er konstant, mens volumenstrømmen er afhængig af driftsforholdene.

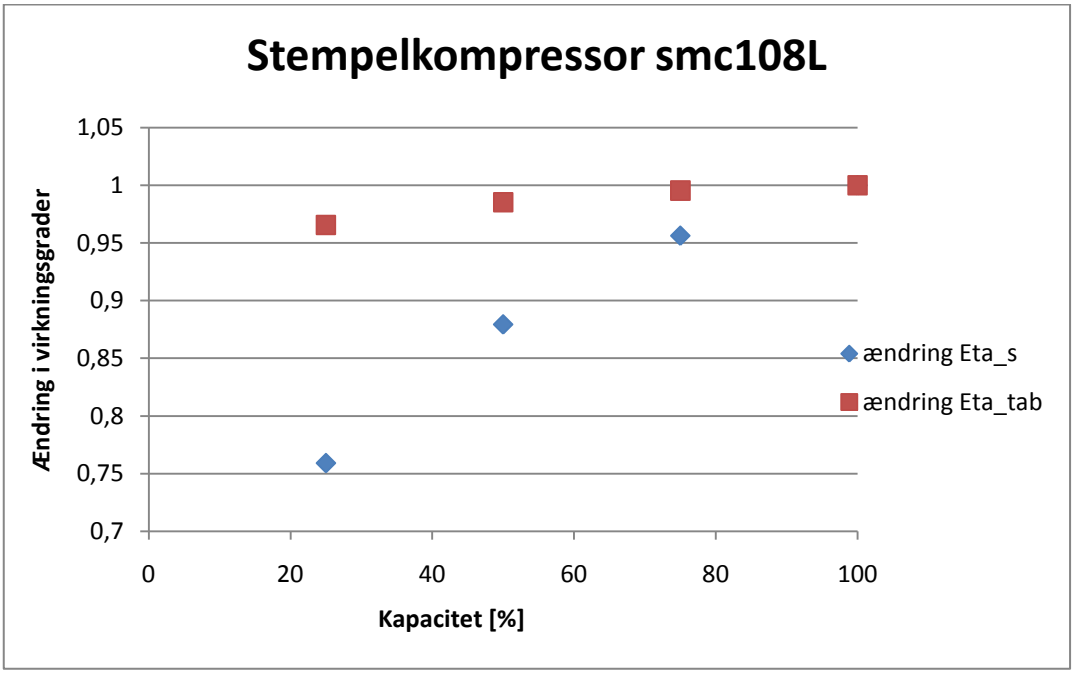
Den næste figur viser kompressorernes kapacitet i form af energiforbrug. Da energiforbruget er varierende med driftsforholdene er der lavet et gennemsnit af energiforbruget under alle undersøgte driftsforhold. Gennemsnitlige energiforbrug er også samlet under filen *kapaciteter*.

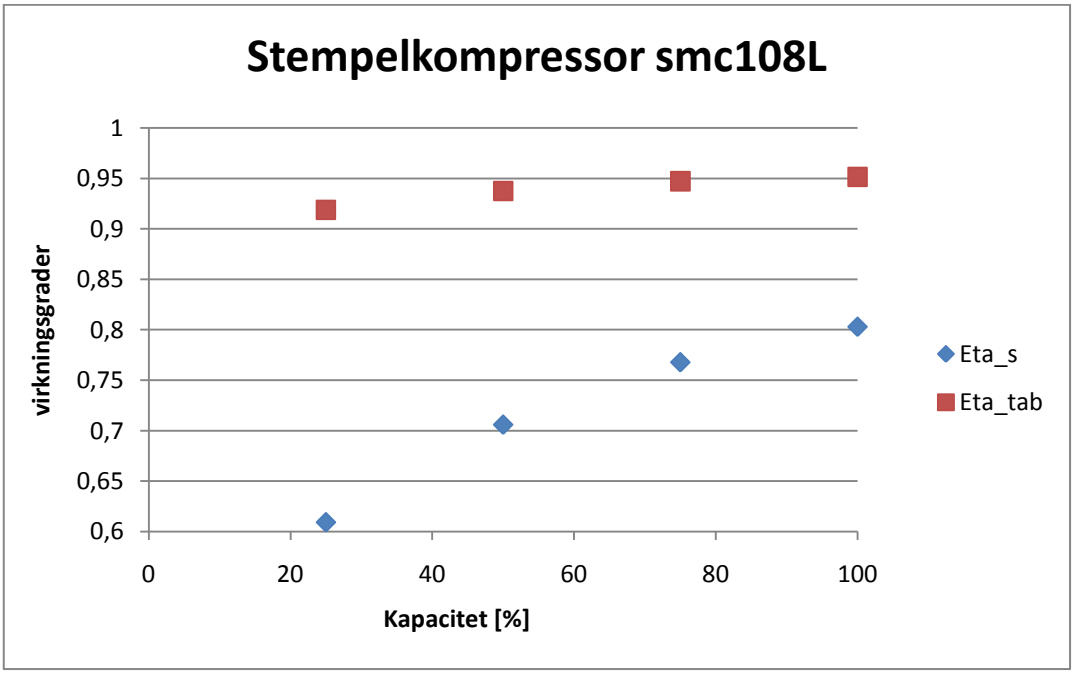


## B14 – Kapacitetsregulering

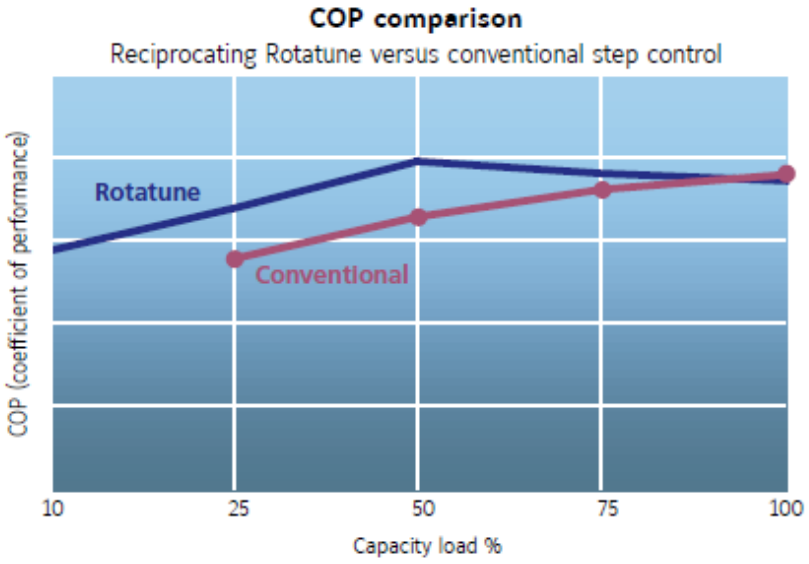
Ved kapacitetsregulering er det ikke kun kapaciteten der ændres. Både den isentropiske og varmetabsvirkningsgraden ændrer sig også. Alt efter hvilken kompressortype der benyttes er der forskellige måder at ændre kapaciteten på. For en stempelkompressor er de to mest almindelige udkobling af stempler og frekvensregulering. Nedenstående figurer viser hvordan udkoblingen af stempler påvirker disse to virkningsgrader for stempelkompressoren smc108L fra Sabroe.



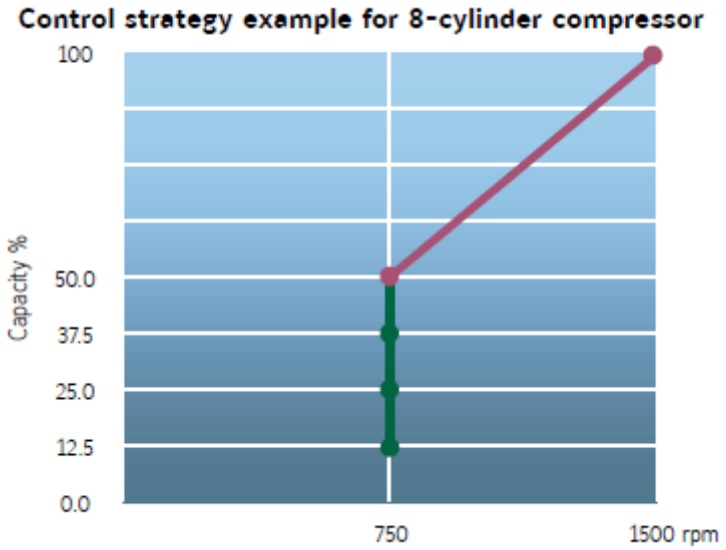




På Figur 9 kan det ses hvordan COP værdien ændre sig med hensyn til kapacitetsændringen ved brug af en frekvensomformer. Det kan her ses at COP

værdien stiger jo lavere frekvens stemplerne operere under. Først ved 50 % ændres frekvensen ikke længere og kapaciteten ændres herefter ved at koble stempler ud. Dette får COP værdien til at falde. COP værdiens ændring er skabt pga. en ændring i virkningsgraderne. Stigende COP betyder stigende virkningsgrad.



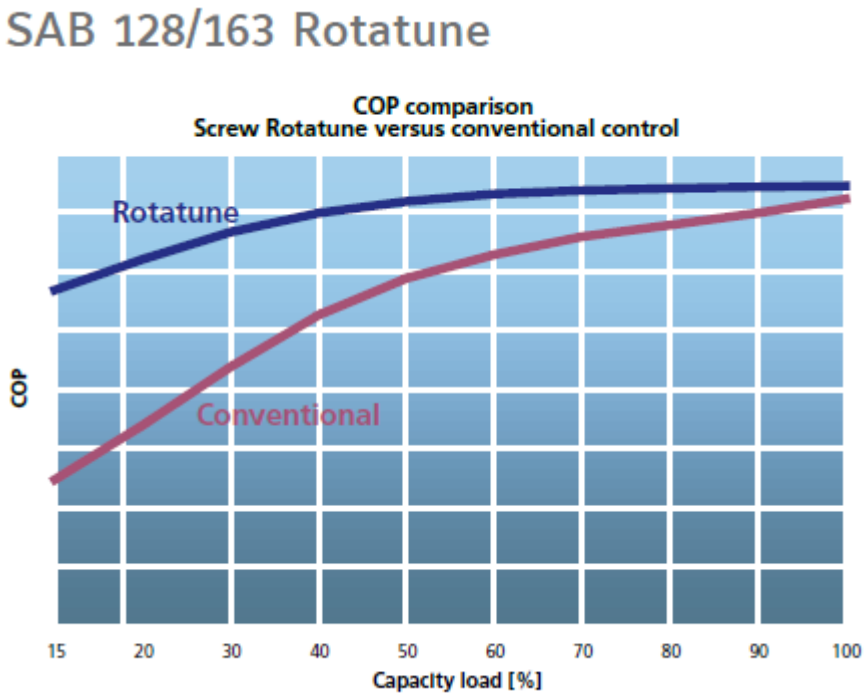

Figur 9: Viser en Sabroe stempelkompressors kapacitetsændrings indvirkning på COP[3]




Figur 10: Viser hvordan kapacitetsændringen foregår

3 http://www.sabroe.com/fileadmin/filer/Brochures/Recips/Rotatune_recip_2975_SB_2010.02_scr.pdf

Som ved stempelkompressorer kan skruekompressorer også kapacitetsstyres. Dette gøres på to måder, enten ved brug af en slider eller en frekvensstyring. På samme måde som ved stempelkompressoren er frekvensstyringen den mest økonomiske. Figur 11 viser en Sabroe skruekompressors COP som funktion af kapaciteten. Her ses det tydeligt at frekvensstyringen giver højere COP.




Figur 11: Viser en skruekompressors kapacitetsændring[4]

[4] http://www.sabroe.com/fileadmin/filer/pdf/Brochurer/Screws/Rotatune_screw_SB-2827_2008.10.pdf

# Bilag C - Varmepumpetyper

I dette bilag vil de forskellige EES programmer tilhørende nedenstående varmepumpeopstillinger blive beskrevet og valideret. EES programmerne findes på bilag MS-1-3. Trykket i vandkredsen er sat til 2 bar, da det skal kunne lade sig gøre at producere vand på 100 °C.

***Følgende varmepumpeopstillinger vil blive behandlet:***

- Ettrins $CO_2$ med stempelkompressor
- Ettrins $CO_2$ med stempelkompressor og intern varmeveksler

- Ettrins $NH_3$ med stempelkompressor
- Ettrins $NH_3$ med oliekølet single-skruekompressor
- Ettrins $NH_3$ med oliekølet single-skruekompressor og economizer

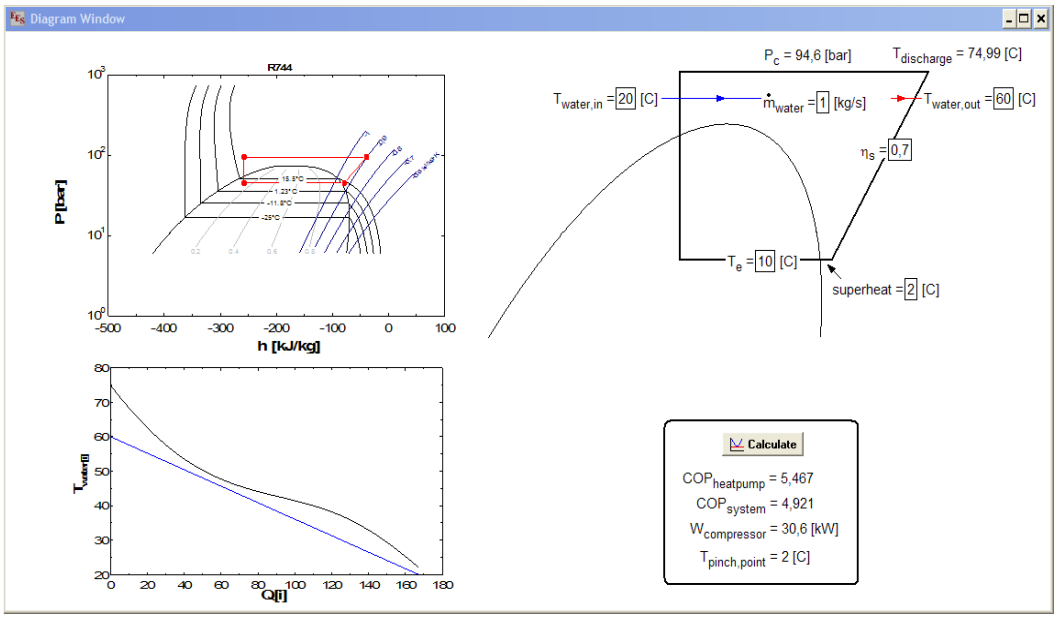
- Totrins $NH_3$ med åben mellemkøler samt stempelkompressorer i både top og bund
- Totrins $NH_3$ med lukket mellemkøler samt stempelkompressorer i både top og bund
- Totrins $NH_3$ med åben mellemkøler samt oliekølet single-skruekompressor i top samt stempelkompressor i bund

## Et-trins $CO_2$ med stempelkompressor

På Figur 12 ses brugerfladen for EES programmet tilhørende en et-trins $CO_2$ varmepumpe med stempelkompressor. Programmet kan findes på bilag MS-1-3-1. Der er i denne brugerflade vist følgende eksempel:

- Fordampningstemperatur er 10 °C
- Isentropisk virkningsgrad er 0,7
- Overhedning er 2 °C
- Pinch point temperatur er 2 °C
- Indgangstemperatur på vand er 20 °C
- Udgangstemperatur på vand er 60 °C

Dette eksempel betegnes som eksempel 2.




**Figur 12: Brugerflade tilhørende EES programmet for en et-trins $CO_2$ varmepumpe**

Øverst i højre hjørne på Figur 12 findes de nødvendige inputs for at programmet kan køre. Ved at trykke på "Calculate" knappen, fremkommer et vindue, hvor man beder programmet om at finde den højeste COP[5] ved at variere på kondenseringstrykket $P_c$.

Da $CO_2$ er transkritisk i dette tilfælde, er energioverførerselen i gaskøleren ulineær mht. temperaturfordelingen i mediet. Gaskøleren opdeles derfor i 50 skridt, hvor energioverførslen beregnes som funktion af temperaturfaldet i mediet. Da pinch point temperaturen er sat til 2 °C, vil mediet i dette eksempel blive kølet fra 74,99 °C til 22 °C. Hvert skridt i gaskøleren giver da et temperaturfald på $\frac{(74{,}99-22)\,°C}{50} = 1{,}06\,°C$. Derved kan det udregnes, hvor meget energi der er i hvert skridt, ved at kigge på massestrøm og enthalpiforskelle. Da det antages, at al energi overføres til vandet, kan den samlede energioverførsel estimeres. Der bliver i hvert skridt derudover udregnet, hvor stor temperaturforskellen mellem vand og $CO_2$ er. Dette gøres for at sikre, at kølemidlet hele tiden er varmere end vandet i gaskøleren. Den mindste temperaturforskel sættes lig med pinch point temperaturen. Temperaturfordelingen i gaskøleren er vist i brugerfladen på Figur 12, nederst i venstre hjørne. Den sorte linje symboliserer kølemidlet, og den blå linje symboliserer vandet. Det ses tydeligt, at kølemidlet opfører sig ulineært.

Øverst i venstre hjørne er varmepumpeprocessen tegnet ind i et log(P), h-diagram.

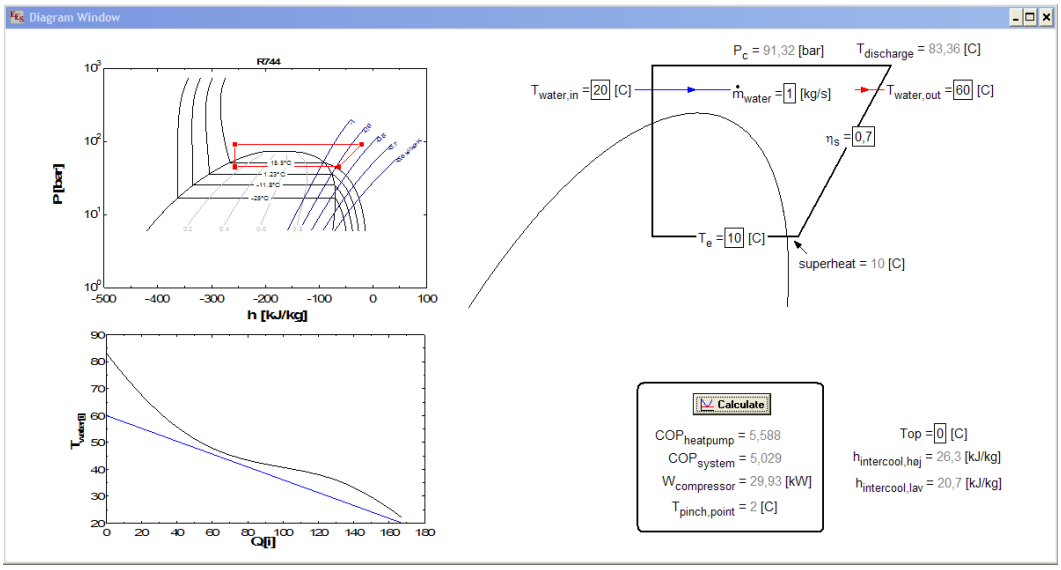
Det ses på Figur 12, at kompressorens energiforbrug er 30,6 kW. Med en COP på 5,467 betyder dette, at energioverførslen i gaskøleren skal være $30{,}6\,kW \cdot 5{,}467 = 167{,}3\,kW$, hvilket stemmer over ens med grafen nede i venstre hjørne. Den effektive virkningsgrad er sat til 0,63, hvilket vil sige, at COP-system skal være på $5{,}467 \cdot \frac{0{,}63}{0{,}7} =$

[5] I EES programmet er COP betegnet som $COP_{heatpump}$.

4,92, hvilket stemmer over ens med den udregnede værdi, som ses nederst i højre hjørne.

### Et-trins $CO_2$ med stempelkompressor og intern varmeveksler

Samme skelet som er benyttet for et "et-trins $CO_2$ med stempelkompressor" er blevet benyttet i dette system. Den eneste forskel på de to programmer er, at den energi der er til rådighed i gaskøleren bliver benyttet i en intern varmeveksler. Hvis eksempel 2 følges, så køler gaskøleren mediet til 22 °C. Da fordampningstemperaturen er på 10 °C, vil det være muligt at overhede mediet efter kompressoren. Der benyttes en modstrømsvarmeveksler, og derfor kan mediet i gaskøleren afgive energi ned til 12 °C. Denne energi udregnes og placeres som overhedning efter fordamperen. Derudover kan overhedninge maksimalt gå op til 20 °C i dette tilfælde.

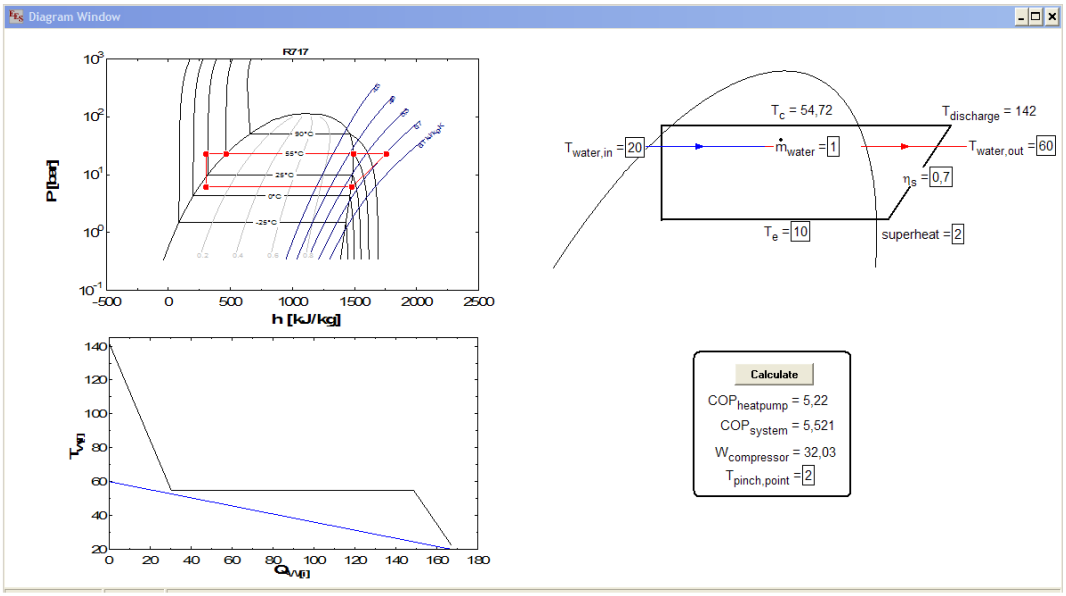



**Figur 13: Diagramvindue fra EES program tilhørende "et-trins $CO_2$ med stempelkompressor og intern varmeveksler"**

Det eneste anderledes ved dette program er, at der er tilføjet tre nye parametre: Top, h_intercool_lav og h_intercool_høj. Parameteren Top bestemmer hvor meget overhedning der må være. En værdi på 0 vil give den maksimale overhedning som er på vandets indgangstemperatur minus fordampningstemperaturen. Overhedningen mindskes ved at sætte Top op. H_intercool_høj og h_intercool_lav beskriver energier i den interne varmeveksler. H_intercool_høj beskriver hvor meget energi der er til rådighed i gaskøleren, og h_intercool_lav beskriver hvor meget energi der skal bruges til at lave den ønskede overhedning. H_intercool_lav skal derfor være mindre eller lig med h_intercool_høj. I dette eksempel kan den maksimale overhedning opnås, og det ses fra Figur 13, at COP værdien er steget til 5,588. Der vil på grund af overhedningen blive fundet et andet optimalt tryk for gaskøleren, hvilket ses ved sammenligning af Figur 12 og Figur 13.

## Et-trins $NH_3$ med stempelkompressor

Programmet er for dette system bygget op omkring antagelsen, at mediet bliver underkølet ned til pinchpoint temperaturen, og at pinch point temperaturen yderligere kan findes ved overgang mellem desuperheater og kondensator. Dette er illustreret via energioverførslen mellem vand og medie, som er symboliseser nederst i venstre hjørne på Figur 14. Figur 14 illustrerer eksempel 2, hvor inputs til programmet gives øverst i højre hjørne, samt pinch point temperaturen nederst i højre hjørne.




**Figur 14: Diagramvindue fra EES program tilhørende "et-trins $NH_3$ med stempelkompressor"**

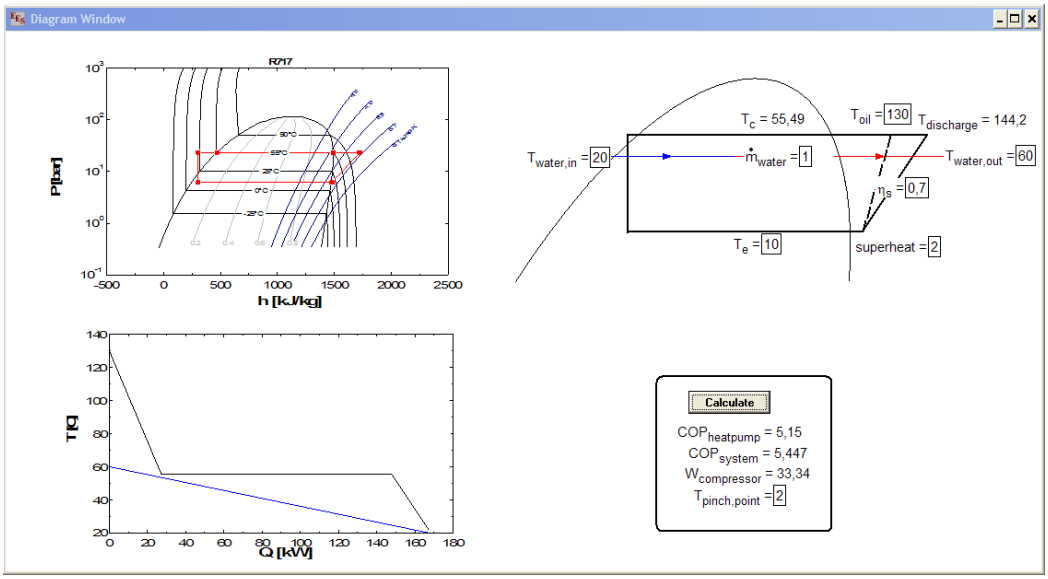
Energien i desuperheateren er sat til at svare til den energi der skal bruges til at varme vandet op fra kondenseringstemperaturen minus pinch point temperaturen og til udgangstemperaturen på vandet. I dette tilfælde vil dette være fra 52,72 °C til 60 °C.

COP værdien for eksempel 2 er på 5,22. Dette stemmer godt over ens mht. kompressorens energiforbrug i forhold til varmepumpens varmeydelse. Grunden til at COP-system er højere end COP værdien i dette tilfælde er, at den effektive virkningsgrad er sat til 0,74. Den er sat til denne værdi ud fra analysen af kompressorer. Eksempel 2 bliver benyttet til generel sammenligning af medierne, og derfor benyttes COP-system ikke. Den effektive virkningsgrad vil dog altid være mindre end den isentropiske virkningsgrad.

Øverst i venstre hjørne af Figur 14 ses processen indtegnet i et log(P), h-diagram. Det ses, at udregningerne virker realistiske. Kompressorens hældning er mindre end isentroplinjernes hældning, hvilket indikerer en isentropvirkningsgrad under 1. Punkterne i kondenseringsenheden er overgangene mellem desuperheater, kondensator og underkøler. Disse punkter er benyttet til at regne energioverførsler ud og derved også massestrøm for medier i varmepumpen.

## Et-trins $NH_3$ med oliekølet single-skruekompressor

*Dette program er opbygget på samme måde som "et-trins $NH_3$ med stempelkompressor". Den eneste forskel er, at afgangstemperaturen efter kompressoren sættes til en fast værdi. Som det ses i ovenstående EES program, vil eksempel 2 resultere i en afgangstemperatur på 142 °C. Hvis oliekølingen forårsager en afgangstemperatur efter kompressoren på 130 °C, vil der ikke være den samme energi at afgive til vandet i desuperheateren. Da pinch point temperaturen er den samme vil det være nødvendigt at hæve kondenseringstrykket for at opvarme vandet. Eksempel 2 med en oliekølet afgangstemperatur på 130 °C ses på* Figur 15.




**Figur 15: Diagramvindue fra EES program tilhørende "et-trins NH3 med oliekølet single-skruekompressor"**

Det ses øverst i højre hjørne på Figur 15, at afgangstemperaturen uden oliekøling vil være på 144,2 *°C. Mediet vil afgive energi til olien under komprimeringen, så afgangstemperaturen er på 130 °C. Olien skal køles for igen at kunne benyttes i kompressoren. En separat vandstrøm benyttes til at køle olien, og derfor vil alt energien fra komprimeringen blive overført til vandet. Derved vil oliekølingen ikke have direkte indflydelse på COP værdien. Dog skal det observeres, at kondenseringstemperaturen skal være højere, jo mere oliekøling der forekommer, for at holde samme pinch point temperatur. Dette vil give en smule dårligere COP. I dette tilfælde er COP værdien på 5,15.*

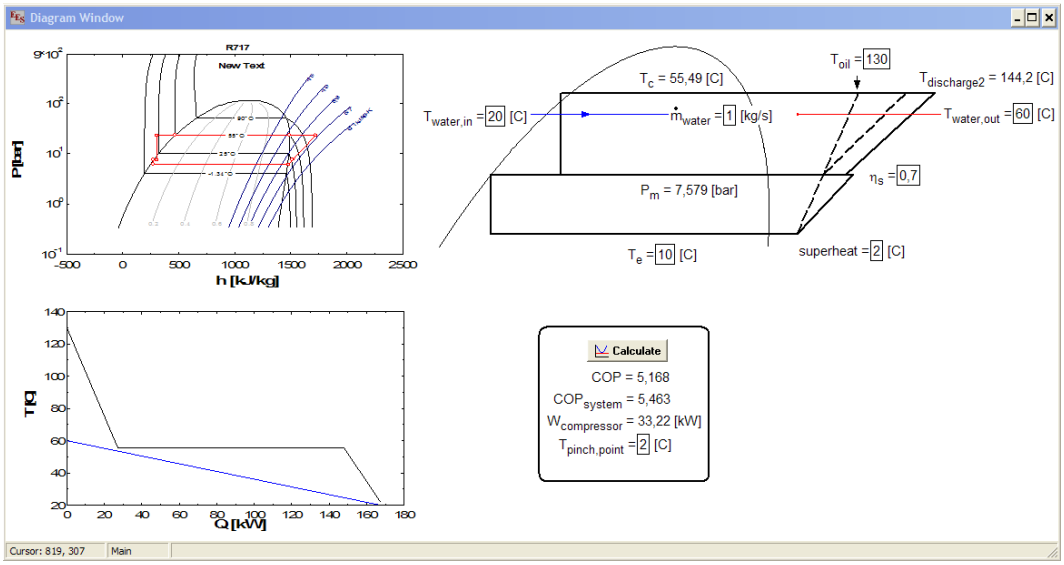
*Øverst i venstre hjørne på* Figur 15 *ses processen indtegnet i et log(P), h-diagram. Det ses her, at komprimeringen er tæt på at være parallel med isentroplinjerne. Dette vil ikke betyde en isentropisk virkningsgrad tæt på 1, men derimod, at kompressoren har afgivet energi til olien. Derved vil der være mindre enthalpi til rådighed ved energioverførslen til vandet.*

*Massestrømmen for mediet er regnet ud fra, at der skal opvarmes 1 kg vand/s i kondensatorenheden. Det ses nederst i venstre hjørne på* Figur 15*, at dette kræver en*

*energioverførsel i kondensatorenheden på ca. 167 kW. Hvis kompressorens energiforbrug ganges med COP værdien fås* $\mathbf{33,34\ kW\ \cdot 5,15 = 171,7\ kW}$*. Dette skyldes, at energien afgivet til olien bliver benyttet til at opvarme en separat vandstrøm. Energien afgivet til olien svarer derfor til ca. 5 kW.*

## Et-trins NH3 med oliekølet single-skruekompressor og economizer

I en single-skruekompressor er det muligt at benytte en economizer. Economizerporten sidder ved et bestemt tryk i kompressoren. Ved dette tryk føres damp fra ventilen ind i kompressoren. Derved vil der komme et lavere masseflow i den nederste del af kompressoren, og COP værdien kan øges. Diagramvinduet for det tilhørende EES program ses nedenstående.




**Figur 16: Diagramvindue fra EES program tilhørende "et-trins NH3 med oliekølet single-skruekompressor og economizer"**

Det antages i dette program, at tryk og temperaturer i kompressoren er det samme som for et "et-trins $NH_3$ med single-skruekompressor". Den eneste indflydelse economiceren har i dette program er, at den lave del af kompressoren har en lavere massestrøm end den høje del af kompressoren. Reelt vil temperaturen falde en lille smule ved economizeren, da der kommer damp ind med en lavere temperatur. Dette vurderes dog til at have minimal betydning, og er derfor ikke medregnet i dette program.

Det ses ved sammenligning mellem Figur 15 og Figur 16, at kompressoren bruger en lille smule mindre energi, og derved vil COP værdien blive en smule højere. Energien der er overført til olien i kompressoren benyttes ligeledes til at opvarme en separat vandstrøm i dette program.

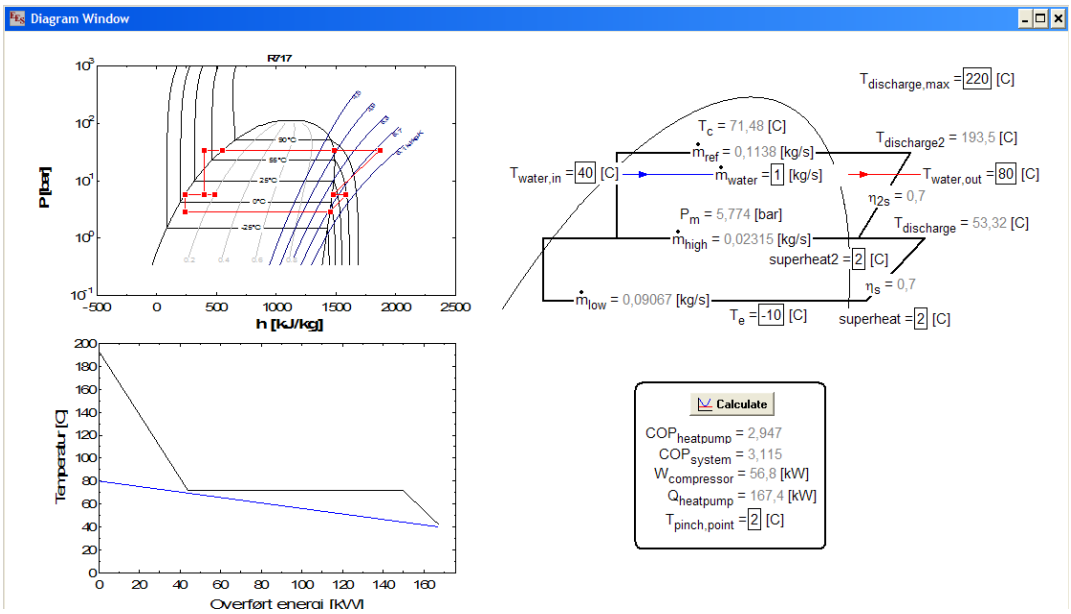
Dette program finder den højeste COP ved at skrue på placeringen af trykket for economizer porten.

## To-trins $NH_3$ med åben mellemkøler samt stempelkompressorer i både top og bund

*Følgende beskrives en to-trins varmepumpe der har stempelkompressor i begge trin. Denne varmepumpetype beskrives ud fra eksempel 3, som ses nedenfor*

- Fordampningstemperatur er -10 °C
- Isentropisk virkningsgrad er 0,7
- Overhedning er 2 °C
- Pinch point temperatur er 2 °C
- Indgangstemperatur på vand er 40 °C
- Udgangstemperatur på vand er 80 °C

*En mellemkøler benytter den overhedede gas efter det nederste trin til at afgive energi til en receiver. Derved vil der forekomme mede damp i receiveren, og massestrømmen i det øverste trin vil blive højere end i det nederste trin. Derved vil kompressorernes samlede energiforbrug blive formindsket. Diagramvinduet for det tilhørende EES program vises på* Figur 17.



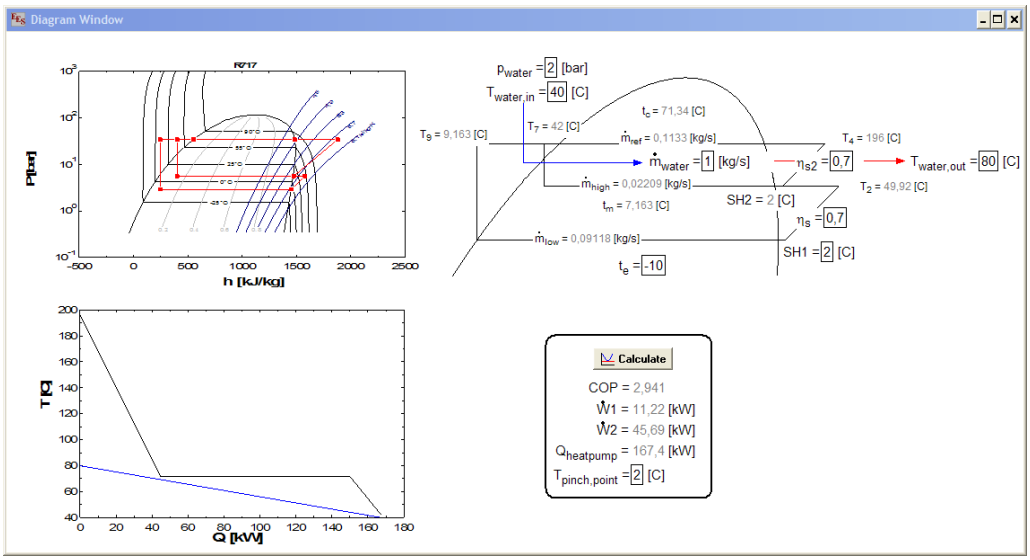

**Figur 17: Diagramvindue fra EES program tilhørende "to-trins $NH_3$ med åben mellemkøler samt stempelkompressor i begge trin"**

*Processen for eksempel 3 vises i et log(P), h-diagram nederst i venstre hjørne på* Figur 17*. Det er her indikeret, at energien fra den overhedede gas efter første kompressor benyttes til at producere damp i receiveren. Det ses, at ca. 20 % af massestrømmen ledes fra receiveren til det øverste trin. Derved er det kun ca. 80 % af massestrømmen der gennemgår begge komprimeringstrin. Dette passer med kvaliteten i receiveren, som er indikeret på log(P), h-diagrammet. På energioverførselsgrafen øverst i venstre hjørne ses det, at pinch point temperaturen opnås både ved overgangen mellem desuperheater og kondensator samt efter underkøleren. Dette program finder højest mulige COP ved at skrue på middeltrykket.*

*COP værdien udregnes som varmeydelsen divideret med det samlede energiforbrug fra de to kompressorer. Det ses nederst i højre hjørne, af COP-system værdien er større end COP værdien. Dette skyldes, at den effektive virkningsgrad for de to kompressorer er sat til 0,74. Den isentropiske virkningsgrad vil reelt altid være højere end den effektive virkningsgrad.*

## To-trins $NH_3$ med lukket mellemkøler samt stempelkompressorer i både top og bund

*Kondensatorenheden afgiver energi til vandet til mediet har samme temperatur som indgangstemperaturen på vandet plus pinch point temperaturen. I eksempel 3 er dette ved en temperatur på 42 °C. En del af mediet bliver flashet ned en receiver med samme tryk, som der er efter komprimeringen af første trin. Overhedningen efter denne komprimering samt den energi der er til rådighed efter kondensatoren benyttes til at fordampe det medie, der er flashet ned i receiveren. Mediet antages at kunne underkøles ned til temperaturen i receiveren plus pinch point temperaturen.*




**Figur 18: Diagramvindue fra EES program tilhørende "to-trins $NH_3$ med lukket mellemkøler samt stempelkompressor i begge trin"**

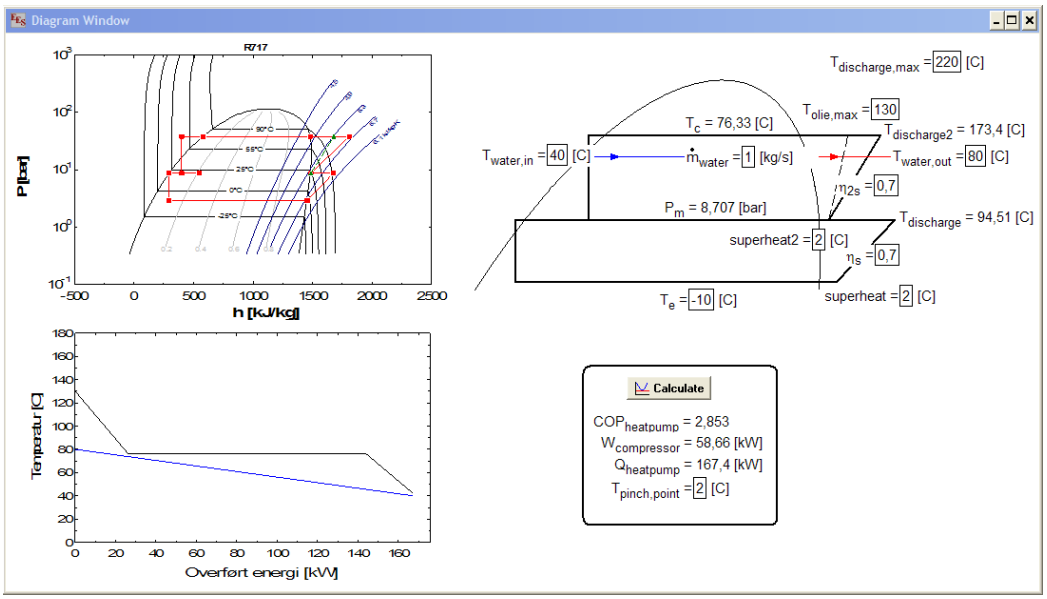
Alt mediet i receiveren skal kunne fordampes via energi fra underkøling og overhedet damp efter kompressoren. Der vil derfor sidde en ventil der bestemmer massestrømmen til receiveren. Det nederste trin i denne varmepumpe vil have en lavere massestrøm end kompressoren i øverste trin. Derfor vil energiforbruget for denne varmepumpetype være mindre, end for en varmepumpe uden mellemkøler.

Dette program udregner den højest mulige COP værdi ved at skrue på mellemtrykket samt overhedningen af dampen i receiveren (SH2).

### To-trins $NH_3$ med åben mellemkøler samt oliekølet single-skruekompressor i top samt stempelkompressor i bund

Princippet i dette EES program er det samme som for "To-trins $NH_3$ med åben mellemkøler samt stempelkompressorer i både top og bund". Den eneste forskel er, at der er en oliekølet single-skruekompressor i øverste trin. Det vil sige, at kondenseringstemperaturen skal være højere for at opvarme vandstrømmen, da der ikke er lige så meget enthalpi til rådighed i desuperheateren. En pinch point temperatur på 2 skal overholdes, og derfor skal kondenseringstrykket hæves. Den energi der bliver overført til olien i kompressoren afgives igen til en separat vandstrøm. Derfor er der ikke noget energi der går tabt, og denne energi medregnes derfor i COP værdien.

Diagramvinduet for det tilhørende EES program er vist på Figur 19. Opbygningen af dette diagramvindue er identisk med de resterende EES programmer. Processen vises på log(P), h-diagram i øverste venstre hjørne. Energioverførslen i kondensatorenheden ses nederst i venstre hjørne. Inputs og outputs i programmet ses øverst i højre hjørne. COP værdi, kompressor energiforbrug og pinch point temperatur ses nederst i højre hjørne sammen med "calculate" knappen. Dette program udregner den største COP værdi ved at skrue på middeltrykket.




**Figur 19: Diagramvindue fra EES program tilhørende "to-trins $NH_3$ med åben mellemkøler samt stempelkompressor nederste trin og oliekølet single-skruekompressor i øverste trin"**

# Bilag D - Analyse

## D1 - Sammenligning af kølemidler

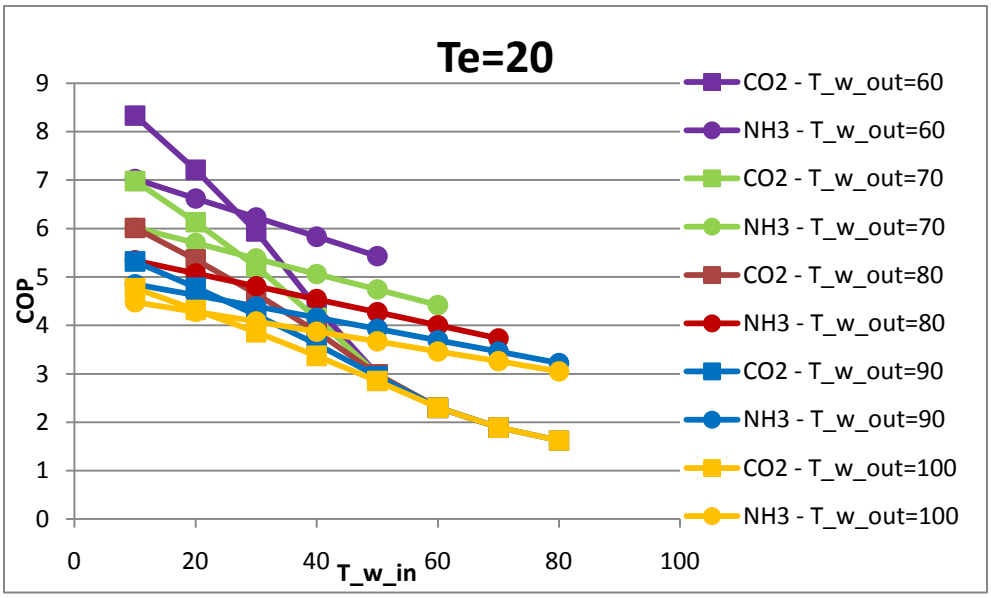
Ud fra EES programmerne tilhørende et-trins $CO_2$ og et-trins $NH_3$, er COP værdier udregnet i forskellige referencepunkter. Derefter er der blevet skruet på én parameter ad gangen for at se, hvordan denne parameter vil have indvirkning på COP værdien. Grænserne for de forskellige parametre er vist i Tabel 1.

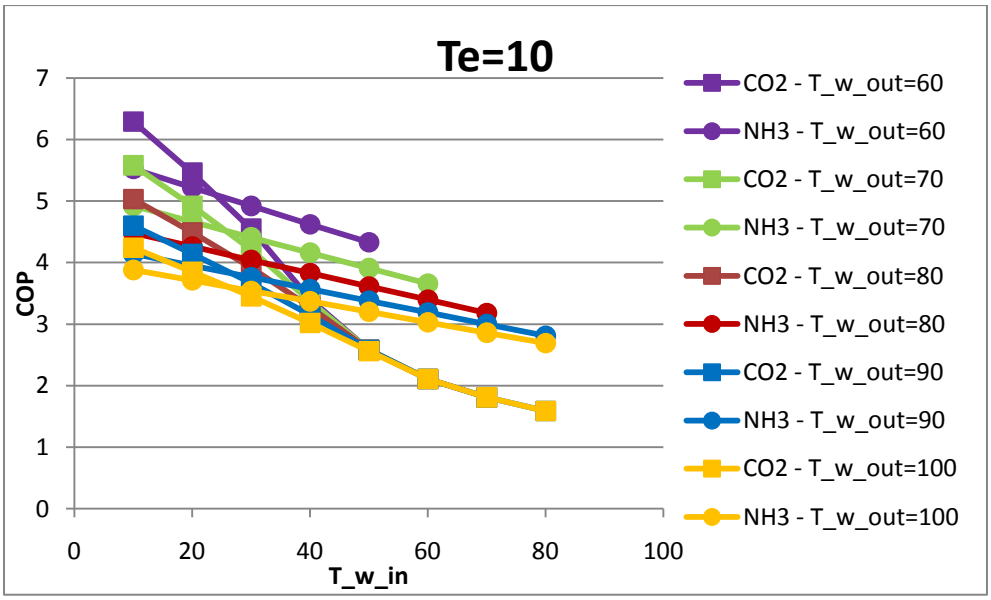
**Tabel 1: Intervaller for de udvalgte parametre**

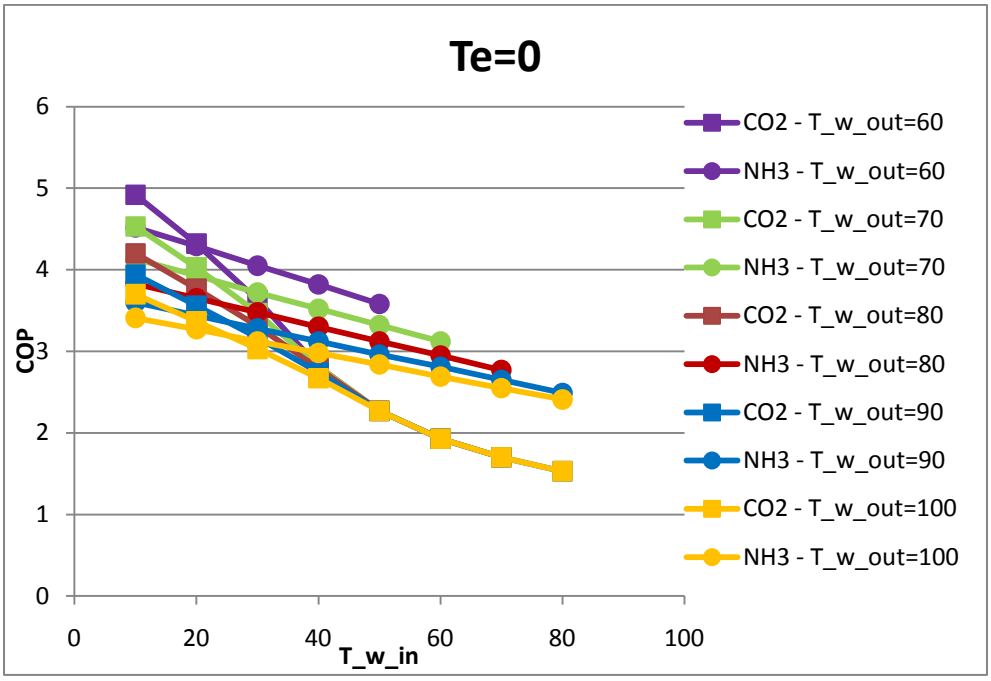
| Variable: | T_w_out | T_w_in | Eta_s | T_e | T_pinch | SH | PL_DS | PL_GC | COP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Interval:** | [50;90] | [20;60] | [0,5;0,9] | [-10;30] | [0;8] | [0;20] | [0;4] | [0;4] | output |

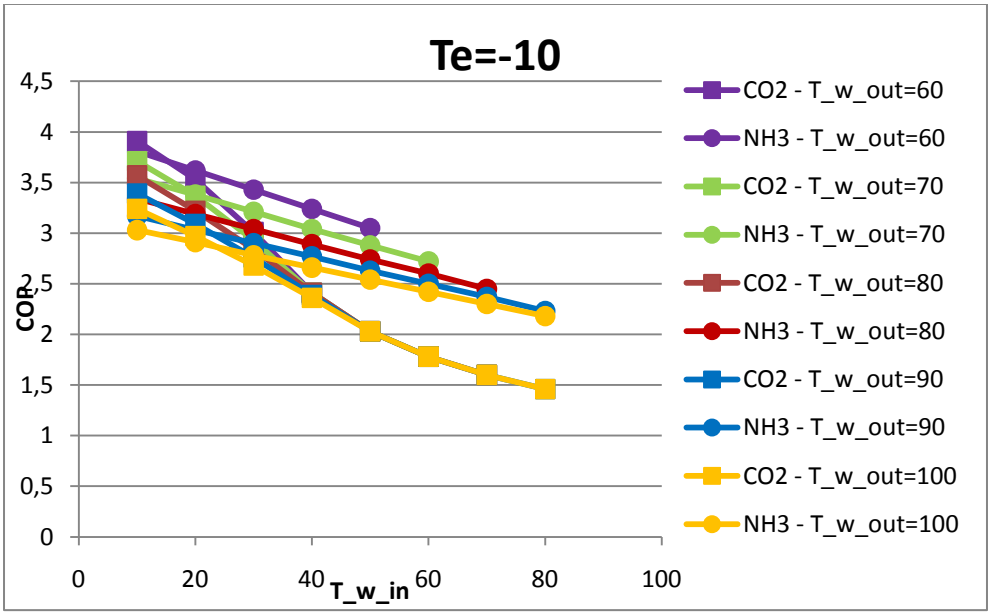
På de følgende to A3 sider ses variabeludviklingen for hhv. $CO_2$ og $NH_3$ i forskellige referencepunkter.

Nedenstående ses COP værdier for $CO_2$ og $NH_3$ for forskellige fordampningstemperaturer.




Te=0
COP
T_w_in
0
20
40
60
80
100
0
1
2
3
4
5
6
CO2 - T_w_out=60
NH3 - T_w_out=60
CO2 - T_w_out=70
NH3 - T_w_out=70
CO2 - T_w_out=80
NH3 - T_w_out=80
CO2 - T_w_out=90
NH3 - T_w_out=90
CO2 - T_w_out=100
NH3 - T_w_out=100


Te=-10
COP
T_w_in
0
20
40
60
80
100
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
CO2 - T_w_out=60
NH3 - T_w_out=60
CO2 - T_w_out=70
NH3 - T_w_out=70
CO2 - T_w_out=80
NH3 - T_w_out=80
CO2 - T_w_out=90
NH3 - T_w_out=90
CO2 - T_w_out=100
NH3 - T_w_out=100

## D2 - Sammenligning af varmepumpesystemer

Ud fra de tilhørende EES programmer, som er beskrevet i bilag C, er COP værdier for forskellige varmepumpesystemer blevet udregnet. Disse værdier er indsat i tabeller, som findes på den på bilag MS-1-1-3 og bilag MS-1-1-4.

$CO_2$ varmepumpesystemerne er blevet undersøgt i forhold til hinanden, og $NH_3$ varmepumpesystemerne er undersøgt i forhold til hinanden.

### $CO_2$ varmepumpetyper

Tabellerne er for sammenligning af $CO_2$ varmepumpesystemer vist for fordampningstemperaturer på -10 °C, 0 °C, 10 °C og 20 °C. Betydningen af farverne i disse tabeller er indikeret i nedenstående tabel.

Tabel 2: Farveindikation for tabeller til sammenligning af $CO_2$ varmepumpesystemer

| Varmepumpesystemer | Driftsforhold |
|---|---|
| **Ettrin $CO_2$ anlæg** | Overhedning, 2 C |
| **Ettrin $CO_2$ anlæg med internvarmeveksler** | Pinch point temperatur, 2 C |
| **Procentafvigelse mellem anlæg** | Isentropisk virkningsgrad, 0,7 |

T_e = -10

| T_w_out / T_w_in | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 3,91 | | 3,71 | | 3,57 | | 3,39 | | 3,24 | |
| | 3,97 | 1,5 | 3,78 | 1,9 | 3,6 | 0,8 | 3,44 | 1,5 | 3,3 | 1,9 |
| 20 | 3,53 | | 3,37 | | 3,22 | | 3,09 | | 2,97 | |
| | 3,56 | 0,8 | 3,41 | 1,2 | 3,28 | 1,9 | 3,16 | 2,3 | 3,05 | 2,7 |
| 30 | 3,01 | | 2,93 | | 2,84 | | 2,76 | | 2,68 | |
| | 3,07 | 2,0 | 3 | 2,4 | 2,92 | 2,8 | 2,85 | 3,3 | 2,78 | 3,7 |
| 40 | 2,41 | | 2,41 | | 2,41 | | 2,39 | | 2,36 | |
| | 2,5 | 3,7 | 2,5 | 3,7 | 2,5 | 3,7 | 2,5 | 4,6 | 2,48 | 5,1 |
| 50 | 2,03 | | 2,03 | | 2,03 | | 2,03 | | v | |
| | 2,17 | 6,9 | 2,17 | 6,9 | 2,17 | 6,9 | 2,17 | 6,9 | 2,17 | 6,9 |
| 60 | --- | | 1,78 | | 1,78 | | 1,78 | | 1,78 | |
| | --- | --- | 1,95 | 9,6 | 1,95 | 9,6 | 1,95 | 9,6 | 1,95 | 9,6 |
| 70 | --- | | --- | | 1,6 | | 1,6 | | 1,6 | |
| | --- | --- | --- | --- | 1,81 | 13,1 | 1,81 | 13,1 | 1,81 | 13,1 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | 1,46 | | 1,46 | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 1,7 | 16,4 | 1,7 | 16,4 |

Figur 20: Oversigt over COP værdier for $CO_2$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på -10 °C

T_e = 0

| T_w_out / T_w_in | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 4,92 | | 4,53 | | 4,2 | | 3,94 | | 3,7 | |
| | 4,95 | 0,6 | 4,57 | 0,9 | 4,26 | 1,4 | 3,99 | 1,3 | 2,76 | 1,6 |
| 20 | 4,32 | | 4,03 | | 3,77 | | 3,56 | | 3,37 | |
| | 4,36 | 0,9 | 4,11 | 2,0 | 3,88 | 2,9 | 3,67 | 3,1 | 3,49 | 3,6 |
| 30 | 3,63 | | 3,47 | | 3,31 | | 3,17 | | 3,03 | |
| | 3,71 | 2,2 | 3,58 | 3,2 | 3,44 | 3,9 | 3,31 | 4,4 | 3,18 | 5,0 |
| 40 | 2,81 | | 2,81 | | 2,79 | | 2,74 | | 2,67 | |
| | 2,93 | 4,3 | 2,93 | 4,3 | 2,93 | 5,0 | 2,89 | 5,5 | 2,84 | 6,4 |
| 50 | 2,27 | | 2,27 | | 2,27 | | 2,27 | | 2,27 | |
| | 2,44 | 7,5 | 2,44 | 7,5 | 2,44 | 7,5 | 2,44 | 7,5 | 2,44 | 7,5 |
| 60 | --- | | 1,93 | | 1,93 | | 1,93 | | 1,93 | |
| | --- | --- | 2,15 | 11,4 | 2,15 | 11,4 | 2,15 | 11,4 | 2,15 | 11,4 |
| 70 | --- | | --- | | 1,7 | | 1,7 | | 1,7 | |
| | --- | --- | --- | --- | 1,96 | 15,3 | 1,96 | 15,3 | 1,96 | 15,3 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | 1,53 | | 1,53 | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 1,82 | 19,0 | 1,82 | 19,0 |

**Figur 21: Oversigt over COP værdier for $CO_2$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på 0 °C**

T_e = 10

| T_w_out / T_w_in | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 6,29 | | 5,58 | | 5,03 | | 4,6 | | 4,24 | |
| | 6,29 | 0 | 5,58 | 0 | 5,03 | 0 | 4,6 | 0 | 4,24 | 0 |
| 20 | 5,46 | | 4,92 | | 4,49 | | 4,14 | | 3,85 | |
| | 5,58 | 2,2 | 5,05 | 2,6 | 4,62 | 2,9 | 4,27 | 3,1 | 3,97 | 3,1 |
| 30 | 4,55 | | 4,21 | | 3,92 | | 3,67 | | 3,45 | |
| | 4,73 | 4,0 | 4,41 | 4,8 | 4,13 | 5,4 | 3,88 | 5,7 | 3,67 | 6,4 |
| 40 | 3,41 | | 3,37 | | 3,28 | | 3,15 | | 3,02 | |
| | 3,59 | 5,3 | 3,58 | 6,2 | 3,51 | 7,0 | 3,41 | 8,3 | 3,29 | 8,9 |
| 50 | 2,58 | | 2,58 | | 2,58 | | 2,58 | | 2,56 | |
| | 2,83 | 9,7 | 2,83 | 9,7 | 2,83 | 9,7 | 2,83 | 9,7 | 2,82 | 10,2 |
| 60 | --- | | 2,11 | | 2,11 | | 2,11 | | 2,11 | |
| | --- | --- | 2,41 | 14,2 | 2,41 | 14,2 | 2,41 | 14,2 | 2,41 | 14,2 |
| 70 | --- | | --- | | 1,81 | | 1,81 | | 1,81 | |
| | --- | --- | --- | --- | 2,15 | 18,8 | 2,15 | 18,8 | 2,15 | 18,8 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | 1,59 | | 1,59 | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 1,97 | 23,9 | 1,97 | 23,9 |

**Figur 22: Oversigt over COP værdier for $CO_2$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på 10 °C**

T_e = 20

| T_w_out / T_w_in | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | --- | | --- | | --- | | --- | | --- | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 20 | 7,21 | | 6,13 | | 5,36 | | 4,78 | | 4,32 | |
| | 7,21 | 0 | 6,13 | 0 | 5,36 | 0 | 4,78 | 0 | 4,32 | 0 |
| 30 | 5,94 | | 5,21 | | 4,65 | | 4,21 | | 3,86 | |
| | 6,28 | 5,7 | 5,52 | 6,0 | 4,9 | 5,4 | 4,45 | 5,7 | 4,06 | 5,2 |
| 40 | 4,37 | | 4,15 | | 3,87 | | 3,61 | | 3,37 | |
| | 4,72 | 8,0 | 4,57 | 10,1 | 4,31 | 11,4 | 4,05 | 12,2 | 3,8 | 12,8 |
| 50 | 2,99 | | 2,99 | | 2,99 | | 2,95 | | 2,85 | |
| | 3,41 | 14,0 | 3,41 | 14,0 | 3,41 | 14,0 | 3,4 | 15,3 | 3,33 | 16,8 |
| 60 | --- | | 2,3 | | 2,3 | | 2,3 | | 2,3 | |
| | --- | --- | 2,78 | 20,9 | 2,78 | 20,9 | 2,78 | 20,9 | 2,78 | 20,9 |
| 70 | --- | | --- | | 1,89 | | 1,89 | | 1,89 | |
| | --- | --- | --- | --- | 2,4 | 27,0 | 2,4 | 27,0 | 2,4 | 27,0 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | 1,62 | | 1,62 | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,15 | 32,7 | 2,15 | 32,7 |

**Figur 23: Oversigt over COP værdier for $CO_2$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på 20 °C**

## $NH_3$ varmepumpetyper

Sammenligningen af $NH_3$ varmepumpesystemer er ligeledes foretaget ud fra de tilhørende EES programmer. Tabeller over COP værdier for forskellige varmepumpesystemer er vist for fordampningstemperaturer på -10 °C, 0 °C, 10 °C og 20 °C. Nedenstående tabel indikerer farvernes betydning i tabellerne tilhørende $NH_3$ varmepumpesystemer.

**Tabel 3: Farveindikation for tabeller til sammenligning af $NH_3$ varmepumpesystemer**

| Varmepumpesystemer | Driftsforhold |
|---|---|
| **Ettrin $NH_3$** | Overhedning, 2 °C |
| **Ettrin $NH_3$ med economizer** | Isentropisk virkningsgrad, 0,7 |
| **Totrin $NH_3$** | Pinch point temperatur, 2 °C |
| **Totrin $NH_3$ med åben mellemkøler** | Mellemkøling til 2 °C overhedning |
| **Totrin $NH_3$ med lukket mellemkøler** | |

T_e = -10

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | **3,81** | | **3,54** | | **3,34** | | **3,17** | | **3,03** | |
| | 3,70 | 3,81 | 3,44 | 3,56 | 3,24 | 3,35 | 3,07 | 3,17 | 2,94 | 3,03 |
| | 3,81 | --- | 3,55 | --- | 3,34 | --- | 3,17 | --- | 3,03 | --- |
| 20 | **3,62** | | **3,38** | | **3,19** | | **3,03** | | **2,91** | |
| | 3,51 | 3,66 | 3,28 | 3,41 | 3,09 | 3,22 | 2,94 | 3,06 | 2,82 | 2,93 |
| | 3,64 | 3,64 | 3,39 | 3,39 | 3,20 | 3,20 | 3,04 | 3,04 | 2,91 | 2,91 |
| 30 | **3,43** | | **3,21** | | **3,04** | | **2,90** | | **2,78** | |
| | 3,33 | 3,50 | 3,11 | 3,27 | 2,95 | 3,09 | 2,81 | 2,95 | 2,70 | 2,83 |
| | 3,49 | 3,48 | 3,25 | 3,25 | 3,07 | 3,06 | 2,92 | 2,92 | 2,80 | 2,80 |
| 40 | **3,24** | | **3,04** | | **2,89** | | **2,77** | | **2,66** | |
| | 3,14 | 3,35 | 2,95 | 3,14 | 2,80 | 2,97 | 2,68 | 2,83 | 2,58 | 2,72 |
| | 3,34 | 3,33 | 3,12 | 3,11 | 2,95 | 2,94 | 2,81 | 2,80 | 2,70 | 2,69 |
| 50 | **3,05** | | **2,88** | | **2,74** | | **2,63** | | **2,54** | |
| | 2,96 | 3,20 | 2,79 | 3,00 | 2,66 | 2,85 | 2,55 | 2,73 | 2,46 | 2,62 |
| | 3,21 | 3,20 | 3,00 | 2,99 | 2,83 | 2,83 | 2,70 | 2,70 | 2,60 | 2,59 |
| 60 | --- | | **2,72** | | **2,60** | | **2,50** | | **2,42** | |
| | --- | --- | 2,63 | 2,87 | 2,51 | 2,73 | 2,42 | 2,62 | 2,34 | 2,53 |
| | --- | --- | 2,88 | 2,87 | 2,73 | 2,72 | 2,60 | 2,60 | 2,50 | 2,50 |
| 70 | --- | | --- | | **2,45** | | **2,37** | | **2,30** | |
| | --- | --- | --- | --- | 2,37 | 2,62 | 2,29 | 2,51 | 2,22 | 2,43 |
| | --- | --- | --- | --- | 2,62 | 2,61 | 2,51 | 2,50 | 2,41 | 2,40 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **2,23** | | **2,18** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,16 | 2,41 | 2,11 | 2,33 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,41 | 2,40 | 2,32 | 2,31 |

**Figur 24: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på -10 °C**

T_e = 0

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | **4,52** | | **4,13** | | **3,83** | | **3,60** | | **3,41** | |
| | 4,41 | 4,52 | 4,02 | 4,13 | 3,73 | 3,83 | 3,50 | 3,60 | 3,31 | 3,41 |
| | 4,52 | --- | 4,13 | --- | 3,83 | --- | 3,60 | --- | 3,41 | --- |
| 20 | **4,29** | | **3,93** | | **3,65** | | **3,44** | | **3,27** | |
| | 4,18 | 4,32 | 3,82 | 3,95 | 3,55 | 3,67 | 3,34 | 3,46 | 3,17 | 3,28 |
| | 4,29 | 4,29 | 3,93 | 3,93 | 3,66 | 3,65 | 3,44 | 3,44 | 3,27 | 3,27 |
| 30 | **4,05** | | **3,72** | | **3,48** | | **3,28** | | **3,12** | |
| | 3,94 | 4,11 | 3,62 | 3,78 | 3,38 | 3,52 | 3,19 | 3,32 | 3,03 | 3,15 |
| | 4,09 | 4,08 | 3,75 | 3,74 | 3,49 | 3,49 | 3,29 | 3,29 | 3,13 | 3,13 |
| 40 | **3,82** | | **3,52** | | **3,30** | | **3,12** | | **2,98** | |
| | 3,71 | 3,92 | 3,42 | 3,61 | 3,20 | 3,37 | 3,03 | 3,18 | 2,89 | 3,03 |
| | 3,90 | 3,90 | 3,58 | 3,57 | 3,34 | 3,34 | 3,15 | 3,15 | 3,00 | 3,00 |
| 50 | **3,58** | | **3,32** | | **3,12** | | **2,96** | | **2,84** | |
| | 3,48 | 3,73 | 3,23 | 3,44 | 3,03 | 3,22 | 2,88 | 3,05 | 2,75 | 2,91 |
| | 3,74 | 3,73 | 3,43 | 3,42 | 3,20 | 3,19 | 3,02 | 3,02 | 2,88 | 2,88 |
| 60 | --- | | **3,12** | | **2,95** | | **2,81** | | **2,69** | |
| | --- | --- | 3,03 | 3,28 | 2,86 | 3,08 | 2,72 | 2,92 | 2,61 | 2,79 |
| | --- | --- | 3,29 | 3,28 | 3,07 | 3,06 | 2,90 | 2,89 | 2,77 | 2,76 |
| 70 | --- | | --- | | **2,77** | | **2,65** | | **2,55** | |
| | --- | --- | --- | --- | 2,68 | 2,94 | 2,57 | 2,79 | 2,47 | 2,68 |
| | --- | --- | --- | --- | 2,94 | 2,93 | 2,78 | 2,77 | 2,66 | 2,65 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **2,49** | | **2,41** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,41 | 2,67 | 2,33 | 2,56 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,67 | 2,66 | 2,55 | 2,54 |

**Figur 25: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på 0 °C**

T_e = 10

| T_w_out / T_w_in | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | **5,52** | | **4,92** | | **4,48** | | **4,14** | | **3,88** | |
| | 5,40 | 5,52 | 4,80 | 4,92 | 4,37 | 4,48 | 4,04 | 4,14 | 3,78 | 3,88 |
| | 5,52 | --- | 4,92 | --- | 4,48 | --- | 4,14 | --- | 3,88 | --- |
| 20 | **5,22** | | **4,66** | | **4,26** | | **3,95** | | **3,71** | |
| | 5,11 | 5,24 | 4,55 | 4,68 | 4,15 | 4,27 | 3,85 | 3,96 | 3,61 | 3,72 |
| | 5,22 | 5,22 | 4,67 | 4,67 | 4,26 | 4,26 | 3,96 | 3,96 | 3,72 | 3,72 |
| 30 | **4,92** | | **4,41** | | **4,04** | | **3,76** | | **3,54** | |
| | 4,81 | 4,97 | 4,31 | 4,45 | 3,94 | 4,07 | 3,66 | 3,79 | 3,45 | 3,56 |
| | 4,94 | 4,94 | 4,42 | 4,42 | 4,05 | 4,05 | 3,77 | 3,76 | 3,54 | 3,54 |
| 40 | **4,62** | | **4,16** | | **3,83** | | **3,57** | | **3,37** | |
| | 4,51 | 4,71 | 4,06 | 4,23 | 3,73 | 3,88 | 3,48 | 3,62 | 3,28 | 3,41 |
| | 4,69 | 4,68 | 4,20 | 4,20 | 3,85 | 3,85 | 3,59 | 3,59 | 3,39 | 3,38 |
| 50 | **4,33** | | **3,91** | | **3,61** | | **3,38** | | **3,20** | |
| | 4,22 | 4,47 | 3,81 | 4,02 | 3,51 | 3,70 | 3,29 | 3,46 | 3,11 | 3,27 |
| | 4,47 | 4,46 | 4,00 | 3,99 | 3,67 | 3,67 | 3,43 | 3,42 | 3,24 | 3,23 |
| 60 | --- | | **3,66** | | **3,40** | | **3,19** | | **3,03** | |
| | --- | --- | 3,56 | 3,82 | 3,30 | 3,53 | 3,10 | 3,30 | 2,95 | 3,12 |
| | --- | --- | 3,83 | 3,81 | 3,51 | 3,50 | 3,27 | 3,27 | 3,10 | 3,09 |
| 70 | --- | | --- | | **3,18** | | **3,00** | | **2,86** | |
| | --- | --- | --- | --- | 3,09 | 3,35 | 2,92 | 3,15 | 2,78 | 2,99 |
| | --- | --- | --- | --- | 3,36 | 3,34 | 3,13 | 3,12 | 2,96 | 2,95 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **2,81** | | **2,69** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,73 | 3,00 | 2,61 | 2,85 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,00 | 2,98 | 2,83 | 2,82 |

**Figur 26: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på 10 °C**

T_e = 20

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | --- | | --- | | --- | | --- | | --- | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 20 | **6,62** | | **5,7** | | **5,07** | | **4,62** | | **4,28** | |
| | 6,50 | 6,62 | 5,58 | 5,70 | 4,96 | 5,07 | 4,51 | 4,62 | 4,18 | 4,28 |
| | 6,62 | 6,67 | 5,70 | 5,74 | 5,07 | 5,11 | 4,62 | 4,66 | 4,28 | 4,31 |
| 30 | **6,23** | | **5,38** | | **4,81** | | **4,39** | | **4,08** | |
| | 6,11 | 6,25 | 5,27 | 5,40 | 4,70 | 4,82 | 4,29 | 4,40 | 3,98 | 4,08 |
| | 6,23 | 6,23 | 5,38 | 5,38 | 4,81 | 4,81 | 4,39 | 4,39 | 4,08 | 4,08 |
| 40 | **5,83** | | **5,06** | | **4,54** | | **4,16** | | **3,87** | |
| | 5,71 | 5,90 | 4,95 | 5,11 | 4,43 | 4,57 | 4,06 | 4,19 | 3,77 | 3,90 |
| | 5,86 | 5,86 | 5,08 | 5,05 | 4,55 | 4,54 | 4,16 | 4,16 | 3,87 | 3,87 |
| 50 | **5,43** | | **4,74** | | **4,27** | | **3,93** | | **3,67** | |
| | 5,32 | 5,57 | 4,63 | 4,84 | 4,17 | 4,34 | 3,83 | 3,99 | 3,57 | 3,72 |
| | 5,56 | 5,54 | 4,81 | 4,72 | 4,31 | 4,30 | 3,95 | 3,95 | 3,69 | 3,68 |
| 60 | --- | | **4,42** | | **4** | | **3,69** | | **3,46** | |
| | --- | --- | 4,31 | 4,58 | 3,90 | 4,12 | 3,60 | 3,79 | 3,37 | 3,54 |
| | --- | --- | 4,57 | 4,56 | 4,09 | 4,08 | 3,76 | 3,75 | 3,51 | 3,50 |
| 70 | --- | | --- | | **3,73** | | **3,46** | | **3,26** | |
| | --- | --- | --- | --- | 3,63 | 3,90 | 3,37 | 3,60 | 3,17 | 3,37 |
| | --- | --- | --- | --- | 3,90 | 3,89 | 3,58 | 3,57 | 3,34 | 3,33 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **3,22** | | **3,05** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,13 | 3,41 | 2,96 | 3,20 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,41 | 3,40 | 3,19 | 3,17 |

**Figur 27: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med fordampningstemperatur på 20 °C**

På den vedlagte memory stick findes disse skemaer som procentvise afvigelser i bilag MS-1-1-6.

## D3 - Varmepumpesystemer med begrænsninger

Nedenstående tabel viser farveindikationernes betydning for tabellerne med COP værdier for varmepumpesystemer med begrænsninger på afgangstemperaturen.

**Tabel 4: Farveindikation for tabeller til sammenligning af $NH_3$ varmepumpesystemer med begrænsninger**

| Varmepumpesystemer | Driftsforhold |
|---|---|
| **Ettrins $NH_3$ anlæg** | Overhedning, 2 °C |
| **Totrins $NH_3$ med max afg. 150 °C** | Pinch point temperatur, 2 °C |
| **Totrins $NH_3$ med max afg. 180 °C** | Isentropisk virkningsgrad, 0,7 |
| **Ettrins $NH_3$ med max olie temp 118,3 °C** | Mellemkøling til 2 °C overhedning |
| **Ettrins $NH_3$ med max olie temp 130 °C** | |

Nedenstående vises tabeller over COP værdier for varmepumpesystemer med begrænsninger. Disse tabeller er for fordampningstemperaturer på hhv. -10 °C, 0 °C, 10 °C og 20 °C.

T_e = -10

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | **3,81** | | **3,54** | | **3,34** | | **3,17** | | **3,03** | |
| | 3,78 | 3,81 | 3,44 | 3,53 | 3,16 | 3,29 | 2,90 | 3,07 | --- | 2,87 |
| | 3,59 | 3,63 | 3,28 | 3,32 | 3,03 | 3,07 | 2,83 | 2,87 | 2,65 | 2,70 |
| 20 | **3,62** | | **3,38** | | **3,19** | | **3,03** | | **2,91** | |
| | 3,63 | 3,64 | 3,33 | 3,39 | 3,06 | 3,17 | 2,83 | 2,97 | --- | 2,79 |
| | 3,44 | 3,47 | 3,16 | 3,19 | 2,93 | 2,96 | 2,74 | 2,78 | 2,58 | 2,62 |
| 30 | **3,43** | | **3,21** | | **3,04** | | **2,90** | | **2,78** | |
| | 3,48 | 3,49 | 3,21 | 3,25 | 2,97 | 3,05 | 2,76 | 2,87 | --- | 2,71 |
| | 3,30 | 3,32 | 3,04 | 3,06 | 2,83 | 2,85 | 2,65 | 2,68 | 2,50 | 2,54 |
| 40 | **3,24** | | **3,04** | | **2,89** | | **2,77** | | **2,66** | |
| | 3,34 | 3,34 | 3,10 | 3,12 | 2,89 | 2,94 | --- | 2,78 | --- | 2,63 |
| | 3,15 | 3,17 | 2,92 | 2,93 | 2,72 | 2,75 | 2,56 | 2,59 | 2,43 | 2,46 |
| 50 | **3,05** | | **2,88** | | **2,74** | | **2,63** | | **2,54** | |
| | 3,21 | 3,21 | 2,99 | 3,00 | 2,80 | 2,83 | --- | 2,69 | --- | 2,56 |
| | 3,01 | 3,02 | 2,80 | 2,81 | 2,62 | 2,64 | 2,48 | 2,49 | 2,35 | 2,37 |
| 60 | --- | | **2,72** | | **2,60** | | **2,50** | | **2,42** | |
| | --- | --- | 2,88 | 2,88 | 2,71 | 2,73 | --- | 2,60 | --- | 2,48 |
| | --- | --- | 2,68 | 2,68 | 2,52 | 2,53 | 2,39 | 2,40 | 2,27 | 2,29 |
| 70 | --- | | --- | | **2,45** | | **2,37** | | **2,30** | |
| | --- | --- | --- | --- | 2,62 | 2,62 | --- | 2,51 | --- | 2,40 |
| | --- | --- | --- | --- | 2,41 | 2,42 | 2,29 | 2,30 | 2,19 | 2,20 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **2,23** | | **2,18** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,41 | --- | 2,32 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,20 | 2,20 | 2,11 | 2,12 |

**Figur 28: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med begrænsninger på afgangstemperaturen ved en fordampningstemperatur på -10 °C**

T_e = 0

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | **4,52** | | **4,13** | | **3,83** | | **3,60** | | **3,41** | |
| | 4,51 | 4,52 | 4,05 | 4,13 | 3,66 | 3,80 | 3,33 | 3,52 | 3,04 | 3,27 |
| | 4,31 | 4,37 | 3,85 | 3,91 | 3,50 | 3,55 | 3,21 | 3,27 | 2,98 | 3,04 |
| 20 | **4,29** | | **3,93** | | **3,65** | | **3,44** | | **3,27** | |
| | 4,29 | 4,29 | 3,89 | 3,93 | 3,54 | 3,64 | 3,23 | 3,39 | 2,96 | 3,16 |
| | 4,11 | 4,16 | 3,69 | 3,74 | 3,37 | 3,41 | 3,11 | 3,16 | 2,89 | 2,95 |
| 30 | **4,05** | | **3,72** | | **3,48** | | **3,28** | | **3,12** | |
| | 4,09 | 4,09 | 3,73 | 3,75 | 3,42 | 3,49 | 3,14 | 3,26 | 2,89 | 3,06 |
| | 3,92 | 3,95 | 3,54 | 3,57 | 3,24 | 3,28 | 3,00 | 3,04 | 2,80 | 2,85 |
| 40 | **3,82** | | **3,52** | | **3,30** | | **3,12** | | **2,98** | |
| | 3,90 | 3,90 | 3,58 | 3,58 | 3,30 | 3,34 | 3,04 | 3,14 | --- | 2,95 |
| | 3,73 | 3,75 | 3,38 | 3,41 | 3,11 | 3,14 | 2,89 | 2,92 | 2,71 | 2,75 |
| 50 | **3,58** | | **3,32** | | **3,12** | | **2,96** | | **2,84** | |
| | 3,74 | 3,74 | 3,43 | 3,43 | 3,18 | 3,20 | 2,95 | 3,02 | --- | 2,85 |
| | 3,54 | 3,55 | 3,23 | 3,25 | 2,98 | 3,00 | 2,78 | 2,81 | 2,61 | 2,65 |
| 60 | --- | | **3,12** | | **2,95** | | **2,81** | | **2,69** | |
| | --- | --- | 3,29 | 3,29 | 3,06 | 3,07 | 2,86 | 2,90 | --- | 2,75 |
| | --- | --- | 3,08 | 3,08 | 2,86 | 2,87 | 2,67 | 2,69 | 2,52 | 2,54 |
| 70 | --- | | --- | | **2,77** | | **2,65** | | **2,55** | |
| | --- | --- | --- | --- | 2,94 | 2,94 | 2,76 | 2,78 | --- | 2,65 |
| | --- | --- | --- | --- | 2,72 | 2,73 | 2,56 | 2,57 | 2,42 | 2,44 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **2,49** | | **2,41** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,67 | 2,67 | --- | 2,55 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,45 | 2,45 | 2,32 | 2,34 |

**Figur 29: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med begrænsninger på afgangstemperaturen ved en fordampningstemperatur på 0 °C**

T_e = 10

| T_w_out / T_w_in | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | **5,52** | | **4,92** | | **4,48** | | **4,14** | | **3,88** | |
| | 5,52 | 5,55 | 4,89 | 4,92 | 4,34 | 4,48 | 3,89 | 4,10 | 3,50 | 3,77 |
| | 5,36 | 5,46 | 4,64 | 4,72 | 4,11 | 4,20 | 3,71 | 3,79 | 3,39 | 3,48 |
| 20 | **5,22** | | **4,66** | | **4,26** | | **3,95** | | **3,71** | |
| | 5,22 | 5,22 | 4,65 | 4,66 | 4,17 | 4,26 | 3,76 | 3,92 | 3,40 | 3,63 |
| | 5,08 | 5,15 | 4,43 | 4,50 | 3,95 | 4,01 | 3,58 | 3,65 | 3,28 | 3,36 |
| 30 | **4,92** | | **4,41** | | **4,04** | | **3,76** | | **3,54** | |
| | 4,94 | 4,94 | 4,42 | 4,42 | 3,99 | 4,05 | 3,63 | 3,75 | 3,30 | 3,49 |
| | 4,81 | 4,86 | 4,22 | 4,27 | 3,78 | 3,84 | 3,44 | 3,50 | 3,17 | 3,23 |
| 40 | **4,62** | | **4,16** | | **3,83** | | **3,57** | | **3,37** | |
| | 4,69 | 4,69 | 4,20 | 4,20 | 3,83 | 3,85 | 3,50 | 3,59 | 3,20 | 3,35 |
| | 4,54 | 4,57 | 4,02 | 4,05 | 3,62 | 3,66 | 3,31 | 3,36 | 3,06 | 3,11 |
| 50 | **4,33** | | **3,91** | | **3,61** | | **3,38** | | **3,20** | |
| | 4,47 | 4,47 | 4,00 | 4,00 | 3,67 | 3,67 | 3,37 | 3,43 | 3,10 | 3,22 |
| | 4,28 | 4,30 | 3,81 | 3,84 | 3,46 | 3,49 | 3,17 | 3,21 | 2,94 | 2,99 |
| 60 | --- | | **3,66** | | **3,40** | | **3,19** | | **3,03** | |
| | --- | --- | 3,83 | 3,83 | 3,51 | 3,51 | 3,25 | 3,27 | 3,00 | 3,09 |
| | --- | --- | 3,61 | 3,62 | 3,29 | 3,31 | 3,04 | 3,06 | 2,83 | 2,86 |
| 70 | --- | | --- | | **3,18** | | **3,00** | | **2,86** | |
| | --- | --- | --- | --- | 3,36 | 3,36 | 3,12 | 3,13 | 2,90 | 2,96 |
| | --- | --- | --- | --- | 3,13 | 3,14 | 2,90 | 2,92 | 2,71 | 2,74 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **2,81** | | **2,69** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,99 | 3,00 | 2,80 | 2,83 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,76 | 2,77 | 2,59 | 2,61 |

**Figur 30: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med begrænsninger på afgangstemperaturen ved en fordampningstemperatur på 10 °C**

T_e = 20

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | --- | | --- | | --- | | --- | | --- | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 20 | **6,62** | | **5,70** | | **5,07** | | **4,62** | | **4,28** | |
| | 6,62 | 6,62 | 5,70 | 5,70 | 5,03 | 5,07 | 4,46 | 4,62 | 3,98 | 4,24 |
| | 6,59 | 6,62 | 5,50 | 5,61 | 4,75 | 4,85 | 4,20 | 4,30 | 3,78 | 3,89 |
| 30 | **6,23** | | **5,38** | | **4,81** | | **4,39** | | **4,08** | |
| | 6,23 | 6,23 | 5,38 | 5,38 | 4,78 | 4,81 | 4,27 | 4,39 | 3,84 | 4,05 |
| | 6,18 | 6,23 | 5,21 | 5,29 | 4,53 | 4,61 | 4,03 | 4,11 | 3,64 | 3,73 |
| 40 | **5,83** | | **5,06** | | **4,54** | | **4,16** | | **3,87** | |
| | 5,86 | 5,86 | 5,08 | 5,08 | 4,54 | 4,55 | 4,09 | 4,16 | 3,70 | 3,86 |
| | 5,79 | 5,83 | 4,92 | 4,98 | 4,31 | 4,37 | 3,86 | 3,93 | 3,50 | 3,58 |
| 50 | **5,43** | | **4,74** | | **4,27** | | **3,93** | | **3,67** | |
| | 5,56 | 5,56 | 4,81 | 4,81 | 4,31 | 4,31 | 3,92 | 3,95 | 3,57 | 3,68 |
| | 5,40 | 5,43 | 4,64 | 4,68 | 4,10 | 4,14 | 3,69 | 3,74 | 3,36 | 3,42 |
| 60 | --- | | **4,42** | | **4,00** | | **3,69** | | **3,46** | |
| | --- | --- | 4,57 | 4,57 | 4,09 | 4,09 | 3,75 | 3,76 | 3,43 | 3,51 |
| | --- | --- | 4,37 | 4,38 | 3,89 | 3,91 | 3,52 | 3,55 | 3,22 | 3,27 |
| 70 | --- | | --- | | **3,73** | | **3,46** | | **3,26** | |
| | --- | --- | --- | --- | 3,90 | 3,90 | 3,58 | 3,58 | 3,30 | 3,34 |
| | --- | --- | --- | --- | 3,67 | 3,68 | 3,34 | 3,37 | 3,08 | 3,11 |
| 80 | --- | | --- | | --- | | **3,22** | | **3,05** | |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,41 | 3,41 | 3,17 | 3,19 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,16 | 3,18 | 2,93 | 2,95 |

**Figur 31: Oversigt over COP værdier for $NH_3$ varmepumpesystemer med begrænsninger på afgangstemperaturen ved en fordampningstemperatur på 20 °C**

## D4 - Sammenligning af tilgængelige varmepumpesystemer

Ved sammenligning af tilgængelige varmepumpesystemer er driftsgrænser fundet i rapporten benyttet til at sætte grænser i de tilhørende EES programmer. Disse EES programmer er derefter benyttet til at finde COP-system værdier for fem forskellige varmepumpesystemer. Dette er gjort for fordampningstemperaturer på: -10 °C, 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C og 40 °C. Nedenstående tabel viser farveindikation samt nogle driftsgrænser for de forskellige varmepumpesystemer.

Tabel 5: Farveindikation for tabeller til sammenligning af tilgængelige varmepumpesystemer

| Varmepumpesystemer | Driftsbetingelser |
|---|---|
| **Et-trins $NH_3$ med Vilters single-skruekompressor** | $\eta_s = 0{,}88, \eta_e = 0{,}65$<br>max trykdifferens er 41,4 bar<br>max olietemperatur er 118,3 °C<br>øvrige driftsgrænser i kompressorafsnit i rapport1 |
| **Et-trins $NH_3$ med Sabroe højtryk stempelkompressor** | $\eta_s = 0{,}85, \eta_e = 0{,}78$<br>øvrige driftsgrænser i kompressorafsnit i rapport1 |
| **To-trins $NH_3$ med Vilters single-skruekompressor og alm. stempelkompressor i bund samt åben mellemkøler** | Nederste trin: $\eta_s = 0{,}85, \eta_e = 0{,}74$<br>øvrige driftsgrænser i kompressorafsnit i rapport1<br>Øverste trin: $\eta_s = 0{,}88, \eta_e = 0{,}65$<br>øvrige driftsgrænser i kompressorafsnit i rapport1 |
| **To-trins $NH_3$ med Sabroe højtryk stempelkompressor i top og alm. stempelkompressor i bund samt åben mellemkøler** | Nederste trin: $\eta_s = 0{,}85, \eta_e = 0{,}74$<br>øvrige driftsgrænser i kompressorafsnit i rapport1<br>Øverste trin: $\eta_s = 0{,}85, \eta_e = 0{,}78$<br>øvrige driftsgrænser i kompressorafsnit i rapport1 |
| **Et-trins $CO_2$** | $\eta_s = 0{,}65, \eta_e = 0{,}63$<br>øvrige driftsgrænser i kompressorafsnit i rapport1 |

Nedenstående ses tabeller med COP-system værdier for forskellige fordampningstemperaturer.

T_e = -10

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | | 3,93 | | 3,64 | | 3,02 | | --- | | --- |
| | 3,68 | 3,15 | 3,48 | 2,86 | 3,3 | 2,63 | 3,15 | --- | 3,01 | --- |
| | --- | 3,4 | --- | 3,1 | --- | 2,83 | --- | 2,61 | --- | 2,42 |
| 20 | | 3,78 | | 3,51 | | 2,97 | | --- | | --- |
| | 3,25 | 3,01 | 3,11 | 2,74 | 2,98 | 2,53 | 2,86 | --- | 2,76 | --- |
| | --- | 3,29 | --- | 3,01 | --- | 2,76 | --- | 2,56 | --- | 2,38 |
| 30 | | 3,64 | | 3,34 | | 2,9 | | --- | | --- |
| | 2,78 | 2,87 | 2,7 | 2,63 | 2,64 | 2,44 | 2,56 | --- | 2,49 | --- |
| | --- | 3,19 | --- | 2,93 | --- | 2,7 | --- | 2,5 | --- | 2,33 |
| 40 | | 3,49 | | 3,2 | | --- | | --- | | --- |
| | 2,23 | 2,74 | 2,23 | 2,52 | 2,23 | 2,34 | 2,23 | --- | 2,2 | --- |
| | --- | 3,1 | --- | 2,85 | --- | 2,63 | --- | 2,44 | --- | 2,28 |
| 50 | | 3,35 | | 3,08 | | --- | | --- | | --- |
| | *1,88* | 2,61 | *1,88* | 2,41 | *1,88* | 2,25 | *1,88* | --- | *1,88* | --- |
| | --- | 3,02 | --- | 2,77 | --- | 2,57 | --- | 2,39 | --- | 2,24 |
| 60 | | --- | | 2,98 | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | *1,51* | 2,3 | *1,51* | 2,15 | *1,51* | --- | *1,51* | --- |
| | --- | --- | --- | 2,69 | --- | 2,5 | --- | 2,33 | --- | 2,19 |
| 70 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | *1,19* | 2,05 | *1,19* | --- | *1,19* | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 2,44 | --- | 2,28 | --- | 2,14 |
| 80 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,22 | --- | 2,09 |

**Figur 32: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på -10 °C**

T_e = 0

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | | 4,59 | | 4,18 | | 3,58 | | --- | | --- |
| | 4,52 | 3,81 | 4,17 | 3,39 | 3,89 | 3,06 | 3,65 | 2,8 | 3,44 | --- |
| | 4,74 | 4,02 | --- | 3,61 | --- | 3,26 | --- | 2,96 | --- | 2,72 |
| 20 | | 4,43 | | 4,04 | | 3,48 | | --- | | --- |
| | 3,97 | 3,63 | 3,71 | 3,24 | 3,49 | 2,94 | 3,3 | 2,7 | 3,13 | --- |
| | 4,5 | 3,88 | --- | 3,5 | --- | 3,17 | --- | 2,89 | --- | 2,66 |
| 30 | | 4,27 | | 3,89 | | 3,36 | | --- | | --- |
| | 3,35 | 3,45 | 3,19 | 3,1 | 3,06 | 2,82 | 2,94 | --- | *2,8* | --- |
| | --- | 3,75 | | 3,39 | --- | 3,09 | --- | 2,82 | --- | 2,6 |
| 40 | | 4,1 | | 3,74 | | --- | | --- | | --- |
| | 2,6 | 3,27 | 2,6 | 2,95 | 2,58 | 2,7 | 2,54 | --- | *2,4* | --- |
| | --- | 3,64 | --- | 3,28 | --- | 3 | --- | 2,75 | --- | 2,54 |
| 50 | | 3,92 | | 3,58 | | --- | | --- | | --- |
| | *2,1* | 3,1 | *2,1* | 2,81 | *2,1* | 2,58 | *2,1* | --- | *2* | --- |
| | --- | 3,54 | --- | 3,18 | --- | 2,92 | --- | 2,68 | --- | 2,49 |
| 60 | | --- | | 3,43 | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | *1,62* | 2,67 | *1,62* | 2,46 | *1,62* | --- | *1,6* | --- |
| | --- | --- | --- | 3,09 | --- | 2,84 | --- | 2,62 | --- | 2,43 |
| 70 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | *1,21* | 2,34 | *1,21* | --- | *1,21* | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 2,75 | --- | 2,55 | --- | 2,37 |
| 80 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,47 | --- | 2,31 |

**Figur 33: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 0 °C**

T_e = 5

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | | 4,98 | | 4,5 | | 3,95 | | --- | | --- |
| | 5,08 | 4,25 | 4,62 | 3,72 | 4,24 | 3,32 | 3,93 | 3,01 | 3,63 | --- |
| | 5,23 | 4,4 | --- | 3,94 | --- | 3,52 | --- | 3,17 | --- | 2,89 |
| 20 | | 4,82 | | 4,35 | | 3,76 | | --- | | --- |
| | 4,44 | 4,03 | 4,09 | 3,55 | 3,79 | 3,19 | 3,56 | 2,9 | 3,22 | --- |
| | 4,96 | 4,25 | --- | 3,8 | --- | 3,42 | --- | 3,09 | --- | 2,83 |
| 30 | | 4,66 | | 4,2 | | --- | | --- | | --- |
| | 3,72 | 3,82 | 3,52 | 3,39 | 3,33 | 3,05 | 3,16 | 2,79 | 2,82 | --- |
| | 4,7 | 4,11 | --- | 3,67 | --- | 3,32 | --- | 3,01 | --- | 2,76 |
| 40 | | 4,48 | | 4,04 | | --- | | --- | | --- |
| | 2,84 | 3,61 | 2,83 | 3,22 | 2,79 | 2,92 | 2,72 | --- | 2,42 | --- |
| | 4,42 | 3,98 | --- | 3,55 | --- | 3,23 | --- | 2,94 | --- | 2,7 |
| 50 | | 4,29 | | 3,87 | | --- | | --- | | --- |
| | 2,23 | 3,41 | 2,23 | 3,06 | 2,23 | 2,78 | 2,23 | --- | 2,02 | --- |
| | 4,15 | 3,86 | --- | 3,44 | --- | 3,13 | --- | 2,86 | --- | 2,63 |
| 60 | | --- | | 3,7 | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | 1,68 | 2,9 | 1,68 | 2,65 | 1,68 | --- | 1,61 | --- |
| | --- | --- | --- | 3,34 | --- | 3,04 | --- | 2,78 | --- | 2,57 |
| 70 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | 1,21 | 2,51 | 1,21 | --- | 1,21 | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 2,94 | --- | 2,71 | --- | 2,5 |
| 80 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,62 | --- | 2,43 |

**Figur 34: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 5 °C**

T_e = 10

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | | 5,44 | | 4,86 | | 4,28 | | --- | | --- |
| | 5,76 | 4,79 | 5,13 | 4,12 | 4,64 | 3,63 | 4,25 | 3,26 | 3,46 | --- |
| | 5,83 | 4,85 | 5,16 | 4,29 | --- | 3,82 | --- | 3,41 | --- | 3,09 |
| 20 | | 5,27 | | 4,71 | | 4,07 | | --- | | --- |
| | 5,01 | 4,53 | 4,54 | 3,92 | 4,15 | 3,48 | 3,84 | 3,13 | 3,08 | --- |
| | 5,52 | 4,69 | 4,9 | 4,14 | --- | 3,71 | --- | 3,32 | --- | 3,01 |
| 30 | | 5,1 | | 4,55 | | --- | | --- | | --- |
| | 4,18 | 4,28 | 3,88 | 3,73 | 3,62 | 3,32 | 3,39 | 3,01 | 2,7 | --- |
| | 5,23 | 4,53 | 4,64 | 4 | --- | 3,59 | --- | 3,23 | --- | 2,94 |
| 40 | | 4,92 | | 4,38 | | --- | | --- | | --- |
| | 3,13 | 4,03 | 3,12 | 3,54 | 3,03 | 3,17 | 2,89 | 2,88 | 2,31 | --- |
| | 4,91 | 4,38 | --- | 3,86 | --- | 3,48 | --- | 3,14 | --- | 2,87 |
| 50 | | 4,72 | | 4,2 | | --- | | --- | | --- |
| | 2,39 | 3,79 | 2,39 | 3,35 | 2,39 | 3,02 | 2,32 | --- | 1,93 | --- |
| | 4,6 | 4,25 | --- | 3,73 | --- | 3,37 | --- | 3,06 | --- | 2,79 |
| 60 | | --- | | 4,02 | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | 1,75 | 3,16 | 1,75 | 2,87 | 1,74 | --- | 1,54 | --- |
| | --- | --- | --- | 3,62 | --- | 3,26 | --- | 2,97 | --- | 2,72 |
| 70 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | 1,19 | 2,71 | 1,19 | --- | 1,16 | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 3,16 | --- | 2,88 | --- | 2,64 |
| 80 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,78 | --- | 2,56 |

**Figur 35: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 10 °C**

T_e = 15

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | | 5,79 | | 5,1 | | 4,52 | | --- | | --- |
| | 5,74 | 5,12 | 5,00 | 4,37 | 4,54 | 3,82 | 4,00 | 3,4 | --- | --- |
| | 6,2 | 5,22 | 5,41 | 4,54 | --- | 4,04 | --- | 3,58 | --- | 3,22 |
| 30 | | 5,62 | | 4,94 | | 4,35 | | --- | | --- |
| | 4,73 | 4,84 | 4,31 | 4,14 | 3,94 | 3,64 | 3,43 | 3,26 | --- | --- |
| | 5,85 | 5,05 | 5,12 | 4,38 | --- | 3,91 | --- | 3,48 | --- | 3,14 |
| 40 | | 5,43 | | 4,77 | | --- | | --- | | --- |
| | 3,51 | 4,54 | 3,44 | 3,92 | 3,29 | 3,47 | 2,86 | 3,12 | --- | --- |
| | 5,5 | 4,88 | 4,83 | 4,22 | --- | 3,77 | --- | 3,38 | --- | 3,06 |
| 50 | | 5,23 | | 4,59 | | --- | | --- | | --- |
| | 2,56 | 4,25 | 2,56 | 3,7 | 2,56 | 3,29 | 2,29 | 2,98 | --- | --- |
| | 5,15 | 4,71 | --- | 4,08 | --- | 3,64 | --- | 3,28 | --- | 2,98 |
| 60 | | --- | | 4,39 | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | 1,8 | 3,48 | 1,8 | 3,12 | 1,8 | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | 3,95 | --- | 3,52 | --- | 3,18 | --- | 2,89 |
| 70 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | 1,14 | 2,95 | 1,14 | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 3,4 | --- | 3,08 | --- | 2,8 |
| 80 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 2,96 | --- | 2,71 |

**Figur 36: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 15 °C**

T_e = 20

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | 5,82 | --- | 4,91 | --- | 4,22 | --- | 3,71 | --- | --- |
| | 7,04 | --- | 6,02 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 30 | | | | 5,39 | | | | --- | | --- |
| | --- | 5,49 | --- | 4,64 | --- | 4,02 | --- | 3,55 | --- | --- |
| | 6,64 | --- | 5,7 | 4,83 | --- | 4,27 | --- | 3,77 | --- | 3,37 |
| 40 | | | | | | --- | | --- | | --- |
| | --- | 5,16 | --- | 4,38 | --- | 3,82 | --- | 3,39 | --- | --- |
| | 6,23 | --- | 5,37 | 4,66 | --- | 4,11 | --- | 3,65 | --- | 3,27 |
| 50 | | | | | | --- | | --- | | --- |
| | --- | 4,82 | --- | 4,12 | --- | 3,62 | --- | 3,23 | --- | --- |
| | 5,82 | --- | 5,04 | 4,5 | --- | 3,96 | --- | 3,54 | --- | 3,18 |
| 60 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | 3,87 | --- | 3,42 | --- | 3,08 | --- | --- |
| | --- | --- | --- | 4,34 | --- | 3,82 | --- | 3,42 | --- | 3,08 |
| 70 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 3,22 | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 3,68 | --- | 3,3 | --- | 2,98 |
| 80 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,16 | --- | 2,87 |

**Figur 37: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 20 °C**

T_e = 25

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | 6,33 | --- | 5,27 | --- | 4,47 | --- | 3,9 | --- | --- |
| | 7,65 | --- | 6,4 | --- | --- | 4,66 | --- | 4,11 | --- | 3,63 |
| 40 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | 5,94 | --- | 4,95 | --- | 4,23 | --- | 3,71 | --- | --- |
| | 7,17 | --- | 6,02 | 5,18 | --- | 4,5 | --- | 3,97 | --- | 3,52 |
| 50 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | 5,54 | --- | 4,64 | --- | 4 | --- | 3,53 | --- | --- |
| | 6,69 | --- | 5,64 | 5 | --- | 4,33 | --- | 3,84 | --- | 3,41 |
| 60 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | 4,34 | --- | 3,77 | --- | 3,35 | --- | --- |
| | --- | --- | 5,26 | 4,81 | --- | 4,18 | --- | 3,7 | --- | 3,3 |
| 70 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 3,54 | --- | 3,17 | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | 4,01 | --- | 3,55 | --- | 3,18 |
| 80 | | --- | | --- | | --- | | --- | | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,39 | --- | 3,05 |

**Figur 38: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 25 °C**

T_e = 30

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | --- | --- | --- | 6,01 | --- | 5,02 | --- | 4,3 | --- | --- |
| | 8,98 | --- | 7,27 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | --- | 6,96 | --- | 5,66 | --- | 4,74 | --- | 4,09 | --- | --- |
| | 8,4 | --- | 6,83 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 50 | --- | 6,49 | --- | 5,29 | --- | 4,47 | --- | 3,89 | --- | --- |
| | 7,83 | --- | 6,4 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 60 | --- | --- | --- | 4,92 | --- | 4,2 | --- | 3,68 | --- | --- |
| | --- | --- | 5,95 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 70 | --- | --- | --- | --- | --- | 3,93 | --- | 3,47 | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,25 | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

**Figur 39: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 30 °C**

T_e = 40

| T_w_in\T_w_out | 60 | | 70 | | 80 | | 90 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | --- | --- | --- | --- | --- | 6,19 | --- | 5,11 | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 50 | --- | --- | --- | 7,15 | --- | 5,78 | --- | 4,82 | --- | --- |
| | --- | --- | 8,63 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 60 | --- | --- | --- | 6,63 | --- | 5,38 | --- | 4,54 | --- | --- |
| | --- | --- | 7,99 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 70 | --- | --- | --- | --- | --- | 4,99 | --- | 4,25 | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 80 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 3,96 | --- | --- |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

**Figur 40: Oversigt over COP værdier for tilgængelige $NH_3$ varmepumpesystemer ved en fordampningstemperatur på 40 °C**

Disse tabeller findes yderligere på bilag MS-1-1-5.

# Bilag E - Økonomi

## E1 - Afgifter

Skatteministeriet oplyser følgende afgifter på de relevante energivarer

Tabel 6: Oversigt over energiafgift / $CO_2$ afgift på forskellige brændselstyper fra 2010 til 2015.[6]

| Brændsel | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **El til varme (øre/kWh)** | 54,5/6,2 | 61,4/6,3 | 62,4/6,4 | 63,4/6,5 | 64,5/6,6 | 65,6/6,7 |
| **Anden el (øre/kWh)** | 65,9/6,2 | 73/6,3 | 74,2/6,4 | 75,5/6,5 | 76,7/6,6 | 78/6,7 |
| **Fuelolie (øre/kg)** | 233/49,3 | 237,2/50,2 | 241,5/51,1 | 245,8/52 | 250,3/52,9 | 254,8/53,9 |
| **Fyringsgas og dieselolie til andet end motorbrændse (øre/l)** | 205,6/41,3 | 209,3/42 | 213,1/42,8 | 216,9/43,5 | 220,8/44,3 | 224,8/45,1 |
| **Naturgas til andet end motorbrændsel (øre/$m^3$)** | 227/35,1 | 231,1/35,7 | 235,3/36,4 | 239,5/37 | 243,8/37,7 | 248,2/38,4 |

For at kunne sammenligne disse priser med hinanden omregnes alle priser til øre/kWh. Dette gøres ud fra den nedre brændværdi af hver energivarer:[7]

Fuelolie: 40,4 MJ/kg
Fyringsgas og dieselolie: 35,9 MJ/l
Naturgas: 39,6 MJ/$m^3$

Da der går 3,6 MJ pr. kWh kan ovenstående tabel skrives som:

Tabel 7: Oversigt over energiafgift/$CO_2$ afgift på forskellige typer brændsler fra 2010 til 2015.

| Brændsel | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **El til varme (øre/kWh)** | 54,5/6,2 | 61,4/6,3 | 62,4/6,4 | 63,4/6,5 | 64,5/6,6 | 65,6/6,7 |
| **Anden el (øre/kWh)** | 65,9/6,2 | 73/6,3 | 74,2/6,4 | 75,5/6,5 | 76,7/6,6 | 78/6,7 |
| **Fuelolie (øre/kWh)** | 20,8/4,4 | 21,2/4,5 | 21,5/4,6 | 21,9/4,6 | 22,3/4,7 | 22,7/4,8 |
| **Fyringsgas og dieselolie som anvendes til andet end motorbrændsel (øre/kWh)** | 20,6/4,1 | 21/4,2 | 21,4/4,3 | 21,8/4,4 | 22,1/4,4 | 22,5/4,5 |
| **Naturgas som anvendes til andet end motorbrændsel (øre/kWh)** | 20,6/3,2 | 21/3,2 | 21,4/3,3 | 21,8/3,4 | 22,2/3,4 | 22,6/3,5 |

[6] Kilder: http://www.skat.dk/SKAT.aspx?oID=111049, http://www.skm.dk/public/dokumenter/lovstof/pdf_2009/L207.pdf
[7] Kilde: http://www.skm.dk/public/dokumenter/lovstof/pdf_2009/L207.pdf

Afgiftsforhold for momsregistrerede og ikke momsregistrerede virksomheder kan beregnes ud fra viden om, at der skal betales forskellige afgifter alt efter om varmen benyttes i en proces eller ej. Der findes fire forskellige scenarier som er illustreret på nedenstående tabel.

**Tabel 8: Oversigt over påkrævede afgifter for virksomheder i Danmark**

| | Ikke-momsregistreret erhverv | momsregistreret erhverv |
|---|---|---|
| **Varme til proces** | 1+2+4 | 1 |
| **Varme til ikke-proces** | 1+2+3+4 | 1+3 |

*1: $CO_2$-, $NO_x$- samt $SO_2$ afgift på benyttet energivare*
*2: Energiafgift på benyttet energivare*
*3: Varmeafgift på produceret varmemængde ifølge elpatronloven*
*4: Moms af afgifter*

Fra Tabel 7 benyttes $CO_2$ afgift samt energiafgift fra "Anden el" og "Naturgas" til at sammenligne afgifterne for varmepumper med naturgasvarme. Yderligere benyttes afgiftsloftet på 20,7, da dette er afgiften på varmesiden for naturgas. COP-værdien for varmepumpen antages at være højere end 3,48, hvilket i 2010 vil sige, at afgiften på varmesiden kan udtrykkes ved $CO_2$ afgift plus energiafgift divideret med COP.

For en ikke-momsregistreret virksomhed kan afgiften fra en varmepumpe samt afgiften for naturgas der bruges til proces udtrykkes ved hhv.:

Varmepumpe: $(6{,}2 \cdot W + 65{,}9 \cdot W) \cdot 1{,}25 = 90{,}125 \cdot \frac{Q_c}{COP}$
Naturgas: $(3{,}2 \cdot Q_c + 20{,}6 \cdot Q_c) \cdot 1{,}25 = 29{,}75 \cdot Q_c$

For en ikke-momsregistreret virksomhed kan afgiften fra en varmepumpe samt afgiften for naturgas der bruges til ikke-proces udtrykkes ved hhv.:

Varmepumpe: $\left(6{,}2 \cdot W + 65{,}9 \cdot W + 72{,}1 \cdot \frac{Q_c}{COP}\right) \cdot 1{,}25 = 180{,}25 \cdot \frac{Q_c}{COP}$
Naturgas: $(3{,}2 \cdot Q_c + 20{,}6 \cdot Q_c + 20{,}7 \cdot Q_c) \cdot 1{,}25 = 55{,}625 \cdot Q_c$

For en momsregistreret virksomhed kan afgiften fra en varmepumpe samt afgiften for naturgas der bruges til proces udtrykkes ved hhv.:

Varmepumpe: $6{,}2 \cdot W = 6{,}2 \cdot \frac{Q_c}{COP}$
Naturgas: $3{,}2 \cdot Q_c$

For en momsregistreret virksomhed kan afgiften fra en varmepumpe samt afgiften for naturgas der bruges til ikke-proces udtrykkes ved hhv.:

Varmepumpe: $6{,}2 \cdot W + 72{,}1 \cdot \frac{Q_c}{COP} = 78{,}3 \cdot \frac{Q_c}{COP}$

Naturgas: $3{,}2 \cdot Q_c + 20{,}7 \cdot Q_c = 23{,}9 \cdot Q_c$

Ud fra disse afgifter kan afgiftsforholdet findes, og derved illustrere hvor stor COP der skal til for en varmepumpe for at opnå samme afgift som for naturgasvarme. Disse forhold vises i Tabel 9.

**Tabel 9: Elafgift i forhold til naturgasafgift**

| | Ikke-momsregistreret erhverv | momsregistreret erhverv |
|---|---|---|
| **Varme til proces** | $3{,}029 \cdot \frac{1}{COP}$ | $1{,}938 \cdot \frac{1}{COP}$ |
| **Varme til ikke-proces** | $3{,}240 \cdot \frac{1}{COP}$ | $3{,}276 \cdot \frac{1}{COP}$ |

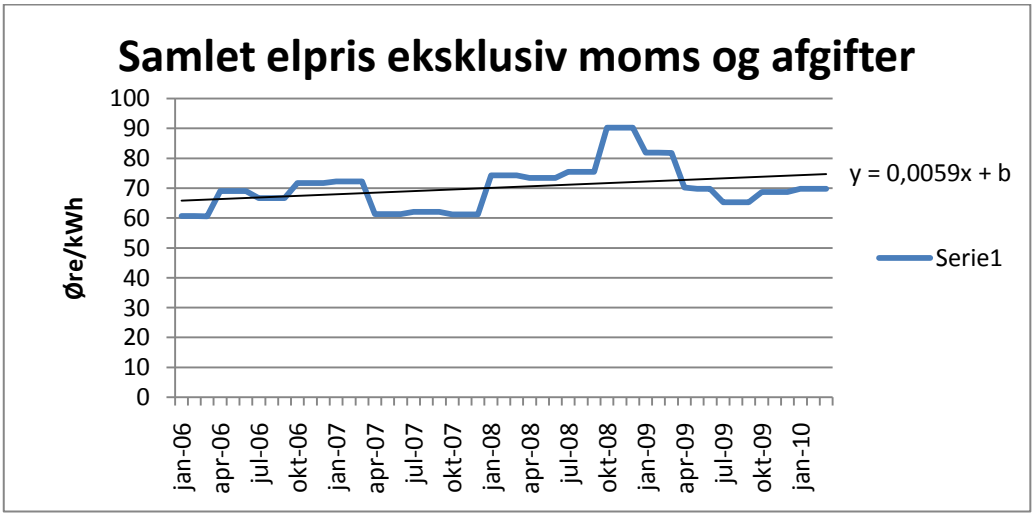
## E2 - Spotpriser

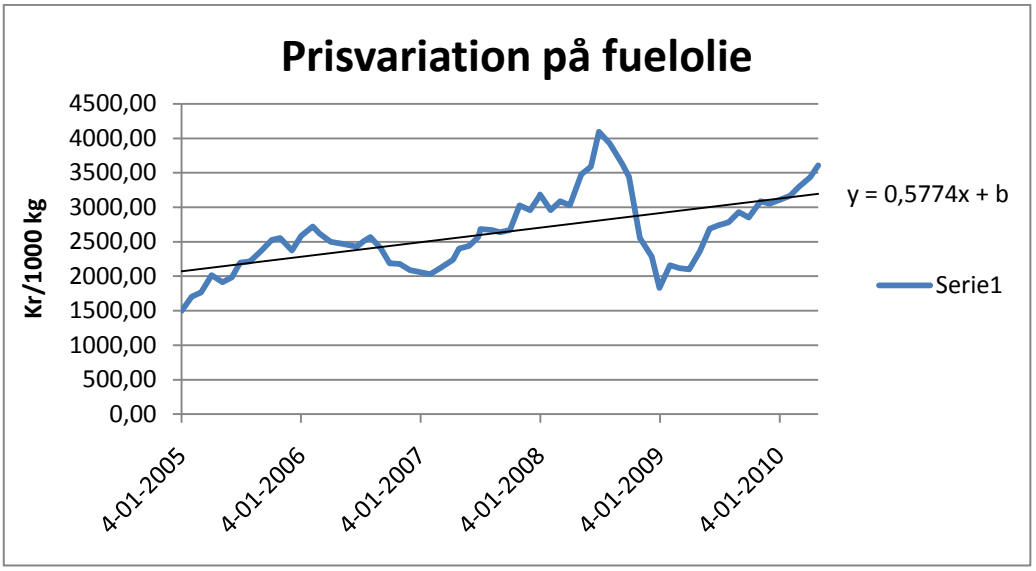
Priser for fyringsolie og fuelolie er fundet på EOF's hjemmeside. Link til denne side er http://oliebranchen.dk/da-DK/Priser-og-Forbrug/Fyringsolie.aspx.

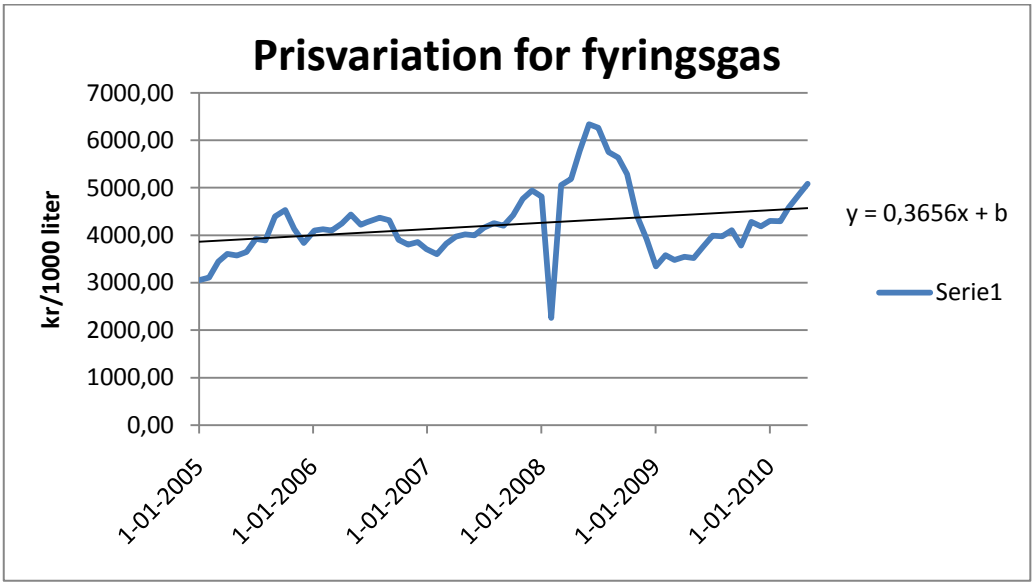
Priser for Naturgas er erhvervet fra Dong Energy. Naturgasprisens historik kan kun findes tilbage til 2009 på Dong Energys hjemmeside, så derfor er et excelark blevet erhvervet fra Dong Energy, som viser priser helt tilbage fra 2004.

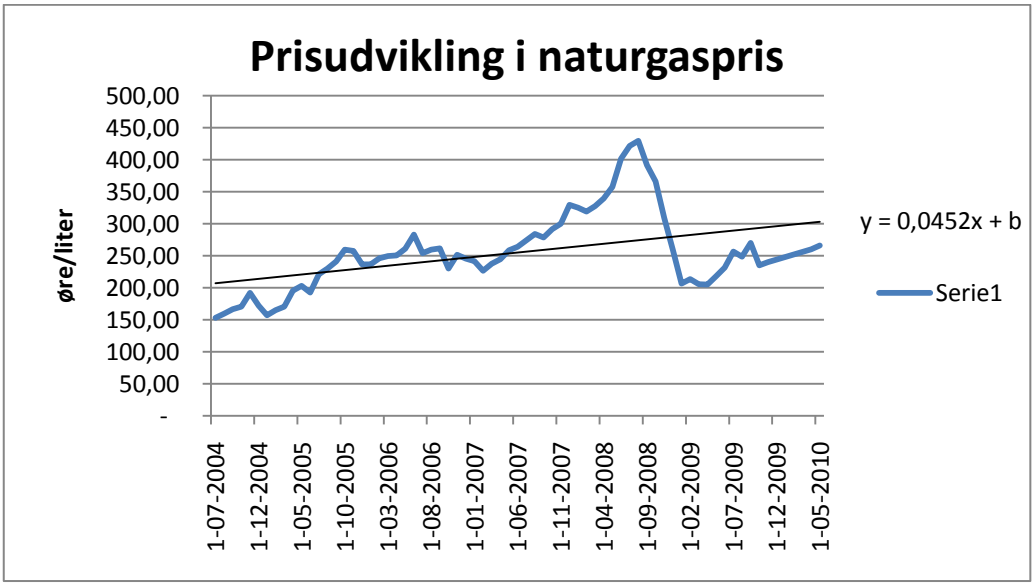
Priser for elektricitet er erhvervet fra Dansk energi. Excelark som er sendt fra Dansk energi findes under fanen "Elspotpris" i bilaget MS-1-1-1.

Ud fra ovenstående kilder er excelarket, som er vedlagt i bilag MS-1-1-1, blevet produceret. I dette excelark er følgende grafer for de historiske spotpriser for energivarer blevet produceret.




Prisvariation på fuelolie
Kr/1000 kg
4500,00
4000,00
3500,00
3000,00
2500,00
2000,00
1500,00
1000,00
500,00
0,00
4-01-2005
4-01-2006
4-01-2007
4-01-2008
4-01-2009
4-01-2010
y = 0,5774x + b
Serie1


Prisvariation for fyringsgas
kr/1000 liter
7000,00
6000,00
5000,00
4000,00
3000,00
2000,00
1000,00
0,00
1-01-2005
1-01-2006
1-01-2007
1-01-2008
1-01-2009
1-01-2010
y = 0,3656x + b
Serie1


Prisudvikling i naturgaspris
øre/liter
500,00
450,00
400,00
350,00
300,00
250,00
200,00
150,00
100,00
50,00
-
1-07-2004
1-12-2004
1-05-2005
1-10-2005
1-03-2006
1-08-2006
1-01-2007
1-06-2007
1-11-2007
1-04-2008
1-09-2008
1-02-2009
1-07-2009
1-12-2009
1-05-2010
y = 0,0452x + b
Serie1

På bilag MS-1-1-1 er spotpriserne for 1. jan 2010 blevet aflæst og blevet omregnet til øre/kWh ud fra de nedre brændværdier som er oplyst først i dette afsnit. Hældningerne på tendenslinjerne benyttes derefter til at estimere fremtidens spotpriser. Derved fås følgende tabel.

| Spotpris | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **El (øre/kWh)**[8] | 69,8 | 72,0 | 74,1 | 76,3 | 78,4 | 80,6 |
| **Fuelolie (øre/kWh)** | 31,1 | 33,2 | 35,4 | 37,5 | 39,6 | 41,7 |
| **Fyringsgas og dieselolie som anvendes til andet end motorbrændsel (øre/kWh)** | 43,2 | 44,5 | 45,8 | 47,2 | 48,5 | 49,9 |
| **Naturgas som anvendes til andet end motorbrændsel (øre/kWh)**[9] | 22,5 | 24,0 | 25,5 | 27,0 | 28,5 | 30,0 |

Distributionstariffer for naturgas ses i Tabel 10

**Tabel 10: Tabel over Dongs distributionstarif for naturgas**[10]

| Fast betaling | Ekskl. moms | Inkl. moms |
|---|---|---|
| 0 - 66.000 kWh<br>0 - 6.000 $m^3$ | 13,8364 øre/kWh<br>1,522 kr./$m^3$ | 17,2955 øre/kWh<br>1,903 kr./$m^3$ |
| 66.000 - 220.000 kWh<br>6.000 - 20.000 $m^3$ | 13,8364 øre/kWh<br>1,522 kr./$m^3$ | 17,2955 øre/kWh<br>1,903 kr./$m^3$ |
| 220.000 - 825.000 kWh<br>20.000 - 75.000 $m^3$ | 12,9727 øre/kWh<br>1,427 kr./$m^3$ | 16,2159 øre/kWh<br>1,784 kr./$m^3$ |
| 825.000 - 1.650.000 kWh<br>75.000 - 150.000 $m^3$ | 7,4364 øre/kWh<br>0,818 kr./$m^3$ | 9,2955 øre/kWh<br>1,023 kr./$m^3$ |
| 1.650.000 - 3.300.000 kWh<br>150.000 - 300.000 $m^3$ | 4,1636 øre/kWh<br>0,458 kr./$m^3$ | 5,2045 øre/kWh<br>0,573 kr./$m^3$ |
| 3.300.000 - 110.000.000 kWh<br>300.000 - 10.000.000 $m^3$ | 3,1273 øre/kWh<br>0,344 kr./$m^3$ | 3,9091 øre/kWh<br>0,430 kr./$m^3$ |
| 110.000.000 - 385.000.000 kWh<br>10.000.000 - 35.000.000 $m^3$ | 2,1909 øre/kWh<br>0,241 kr./$m^3$ | 2,7386 øre/kWh<br>0,301 kr./$m^3$ |
| > 385.000.000 kWh<br>> 35.000.000 $m^3$ | 2,0636 øre/kWh<br>0,227 kr./$m^3$ | 2,5795 øre/kWh<br>0,284 kr./$m^3$ |

### Fjernvarme

[8] Elpris bestemt ud fra en virksomhed der bruger 100.000 kWh om året. Denne pris er inklusiv abonnement, lokal nettarif, PSO tarif, net- og systemtarif og transmission. Dvs. den samlede elpris ekskl. Moms og afgifter. For nærmere beregning se Excelarket "Afgiftberegninger" på bilag MS-1-1-1

[9] Udover spotprisen er der for naturgas en distributionstarif der afhænger af mængden der aftages. Denne pris er derfor den samlede naturgaspris ekskl. Distribution, moms og afgifter. For nærmere beregning se Excelarket "Afgiftberegninger" på bilag MS-1-1-1

[10] Kilde: http://www.dongenergy.dk/erhverv/Naturgas/omprisen/Pages/distributionstarif.aspx

På dansk fjernvarmes hjemmeside[11] findes fjernvarmepriser tilbage fra år 2002. Priserne varierer fra værk til værk, og derfor er der lavet et vægtet gennemsnit for hvert år, der fortæller hvor meget fjernvarmeregningen lyder på i gennemsnit i et enfamiliehus på 130m$^2$ og som benytter 18,1 MWh varme om året. Disse priser indeholder det faste bidrag på 26,06 kr/m$^2$ inklusiv moms, som er fundet i takstbladet fra Borup varmeværk.

Nedenstående tabel viser de gennemsnitlige varmeregninger fra år 2002 til og med år 2009.

**Tabel 11: Gennemsnitspriser for fjernvarme for hus på 18,1 MWh og 130 m$^2$ inkl. moms og fast bidrag**

| | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gennemsnits varmeregning (kr/år)** | 11.000 | 11.000 | 11.000 | 11.100 | 11.700 | 11.200 | 11.750 | 12.118 |

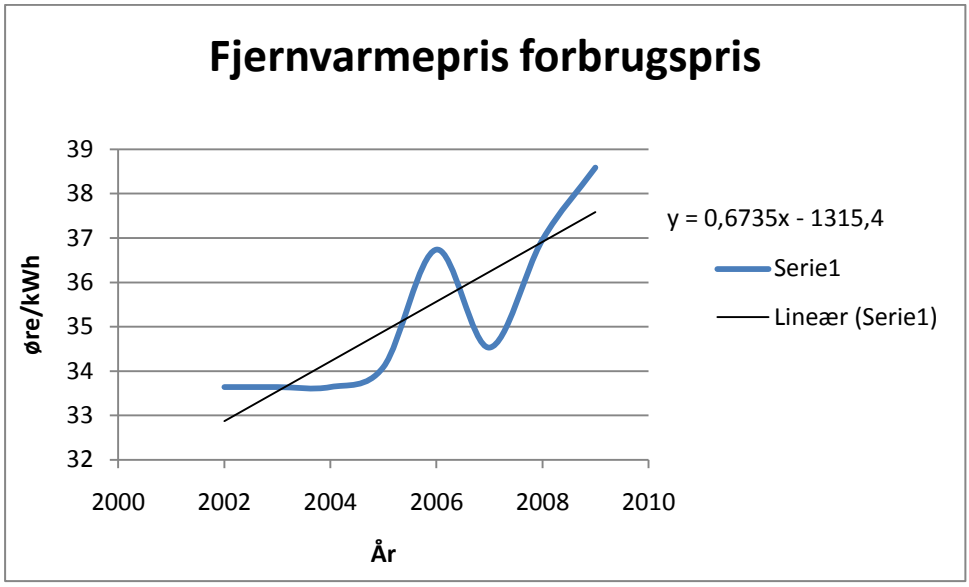
Da det faste bidrag er på $20{,}85\frac{kr}{m^2} \cdot 130m^2 = 2710{,}5\ kr$, og da priserne fra Tabel 11 er inklusiv moms, vil forbrugsbidraget kunne regnes ved at trække det faste bidrag samt momsen fra disse priser. Ved yderligere at dividere med det årlige forbrug kan forbrugsprisen pr. kWh findes. Disse priser er vist i Tabel 12

**Tabel 12: Pris pr. mængde fjernvarme eksklusiv moms og fast bidrag**

| | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Forbrugerpris (øre/kWh)** | 33,64 | 33,64 | 33,64 | 34,09 | 36,74 | 34,53 | 36,96 | 38,59 |

Disse værdier plottes, og tendenslinjen for fjernvarmeprisen plottes.

[11] http://www.danskfjernvarme.dk/Faneblade/HentMaterialerFANE4/Fjernvarmepriser.aspx




Figur 41: Fjernvarmepriser fra 2002 til 2009. Forbrugerpris eksklusiv moms

Tendenslinjens hældning på 0,6735 benyttes til at forudsige fremtidens fjernvarmepriser. Der tages udgangspunkt i fjernvarmeprisen fra 2009, hvor der hvert år frem i tiden er en stigning på 0,67 øre/kWh. Derved fås fremtidens priser som ses i Tabel 13.

Tabel 13: Estimeret forbrugsbidrag fra 2010 til og med 2015

| | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Pris på fjernvarme (øre/kWh)** | 39,26 | 39,94 | 40,61 | 41,28 | 41,96 | 42,63 |