Utskifting til bruk av naturlige kuldemedier NH_3 / CO_2

Seminar: Utfasing av R22 i fiskefartøy
Ålesund 26. april 2007

Arne Jakobsen
Forsker

SINTEF Energiforskning AS
Energiprosesser

Innhold

- Miljøbelastning
- Innføring i egenskaper CO_2 / NH_3
- Fryseanlegg
  - CO_2/NH_3 kaskade
  - NH_3 med CO_2 som kuldebærer
- RSW-anlegg
  - NH_3 og CO_2
- Energiforbruk ulike systemløsninger
- Hovedkomponenter
- Investering
- Oppsummering

- Forskrifter for NH_3 og CO_2 (Haukås)

Arbeidsmedier

	R404A	R407C	R410A	R134a	R717[1]	R744[3]
Molvekt	97,6	86,2	72,6	102,2	17,03	44,01
Kokepkt, 1 bar [°C]	-46,5	-43,8	-51,6	-26,2	-33,3	-78,03
Kritisk temp. t_c [°C]	74,4	87,3	72,5	101,1	132,3	31,1
Kritisk trykk p_c [bar]	37,3	46,3	49,5	40,7	113,3	73,8
p_{sat}, 0°C [bar]	6,0	5,7	8,0	2,9	4,3	34,9
Δh_f, 0°C [kJ/kg]	169	209	221	199	1262	231
ρ_v, 0°C [kg/m^3]	1114	1237	1171	1295	639	928
ρ_g, 0°C [kg/m^3]	30	20	31	14	4	98
t_k, 25 bar [°C]	55	60	53[4]	77	58	*
GWP [-]	3800	1700	2000	1300	0	0 (1)
Giftig/brennbar	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja/Nei	Nei

1) Ammoniakk (NH_3) 3) Karbondioksid (CO_2) 4) p_k ved 35 bar

Basiskostnad og avgift for ulike kuldemedier i NOK

(anslagsvis pr. 2006-01)

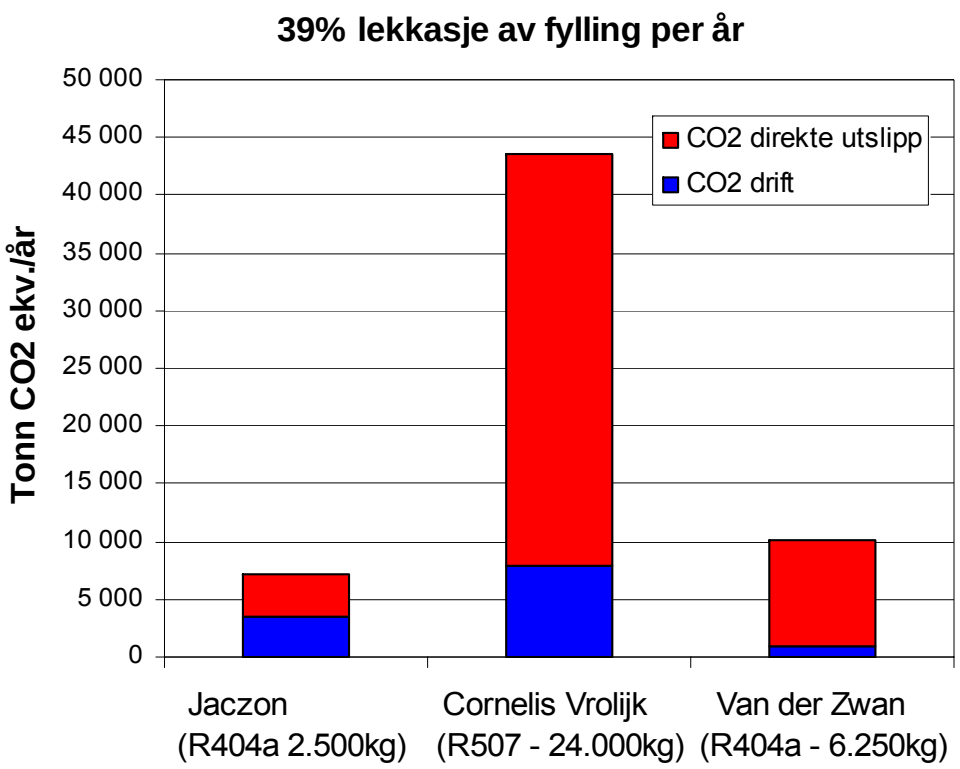
	Mediekost	Avgift (No**)	Totalt
R22	65	70	**135**
R507/R404A	220	625	**845**
R410A	350	329	**679**
R134a	145	248	**380**
R717 (NH_3)	45	0	**45**
R744 (CO_2)*	5	0	**5**

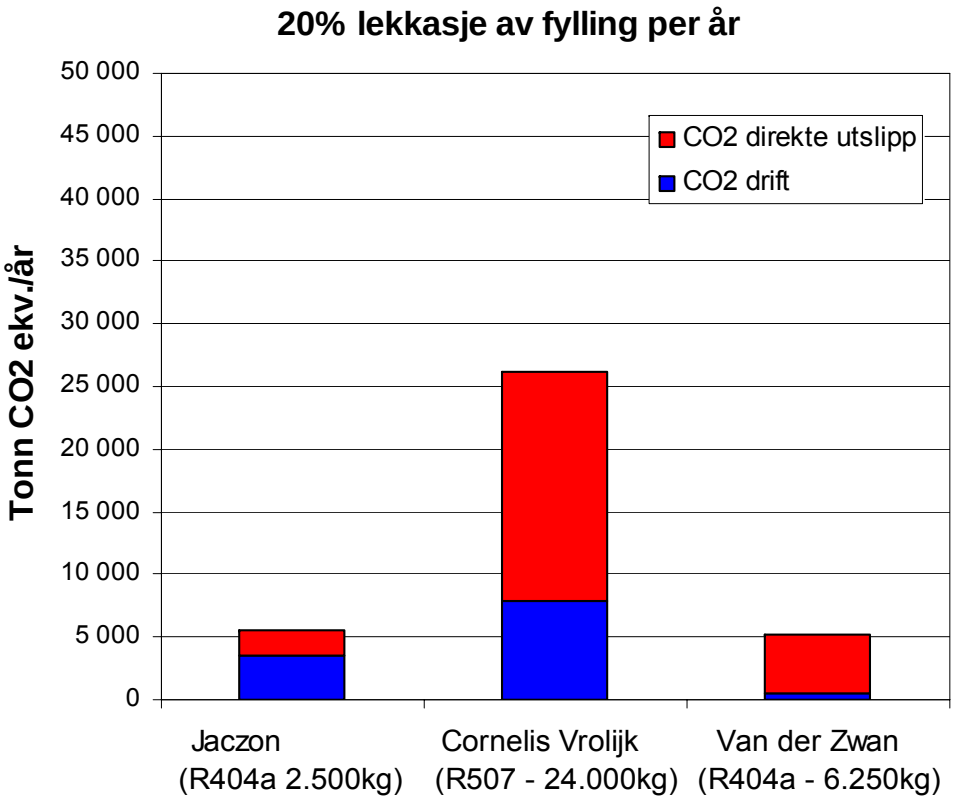
* Brukes idag også som brannslukningsmedium

** ~ 0.19 NOK/kg CO_2 ekvivalent

Lekkasjer fra Fiskeflåten

- Utslipsstall varierer:
  - SINTEF Rapport ~ 20% av fylling per år for R22. (I 1991: Totalt 122 tonn per år)
  - SenterNovem (Nederland): ~ 40% av fylling per år





Egenskaper NH_3 og CO_2

NH_3 som kuldemedium

- Ikke ozonreduserende
- GWP=0
- Giftig (TLV 25 ppm, IDLH 500 ppm) – svært illeluktende (>5-25 ppm)
- Brennbar (LEL/UEL 16 -26 vol%, AIT 651°C) – klasse L2/B2
- Relativt billig
- Fritatt for avgift

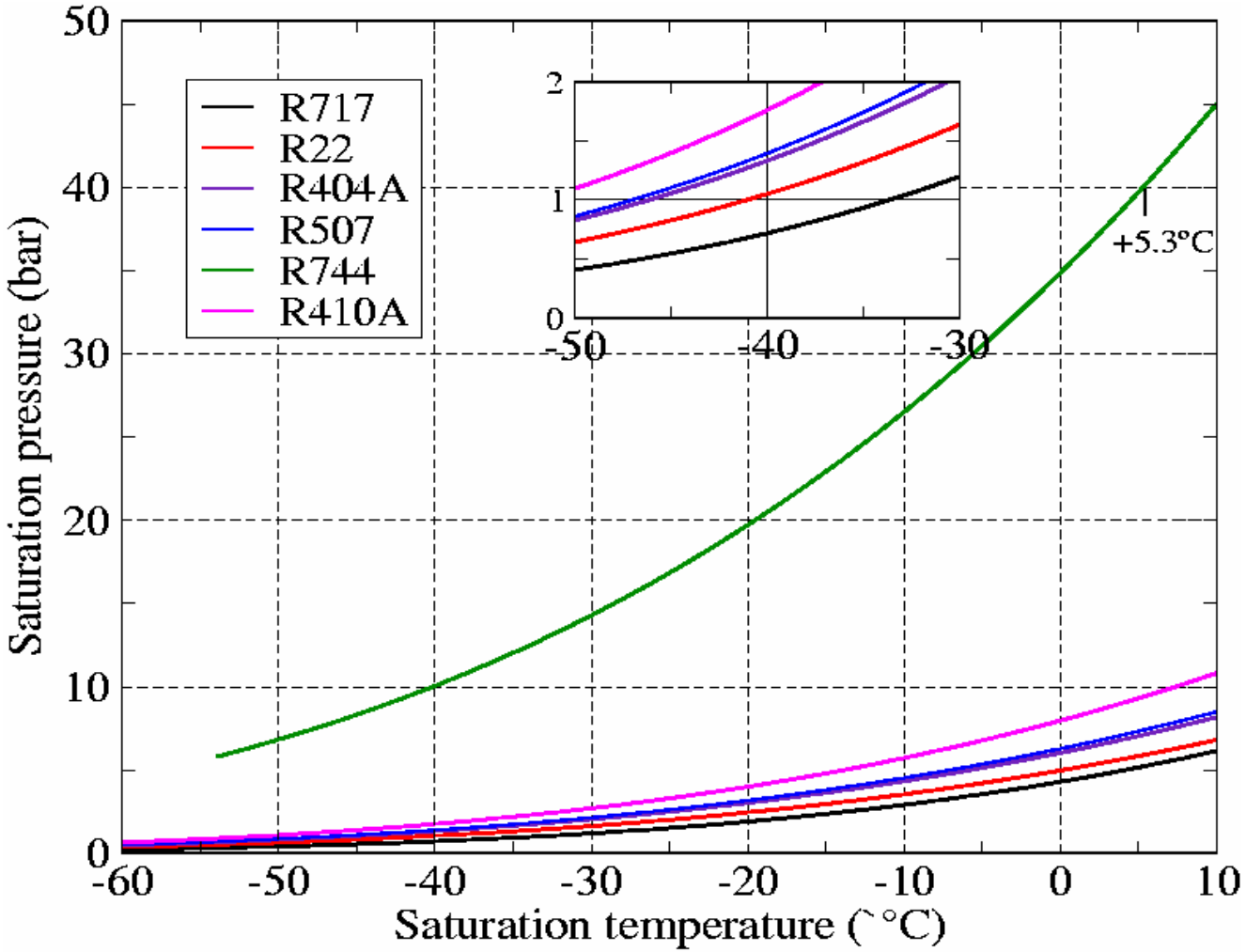
- Kjent og velprøvd teknologi
- Krever ekstra sikkerhetsinstallasjoner om bord
- Egen sikkerhetsklasse (Veritas)

CO_2 som kuldemedium

- Ikke ozonreduserende
- GWP=0 (Kun gjenvunnet avfallsgass benyttes)
- Ugiftig, ubrennbar
- Billig og lett tilgjengelig over alt
- Fritatt for avgift
- Naturlig forekommende i biosfæren

- Krever høyere trykk
- Modifiserte systemløsninger og komponenter
- Modifisert styring og regulering ved trans-kritisk drift

Metningstrykk

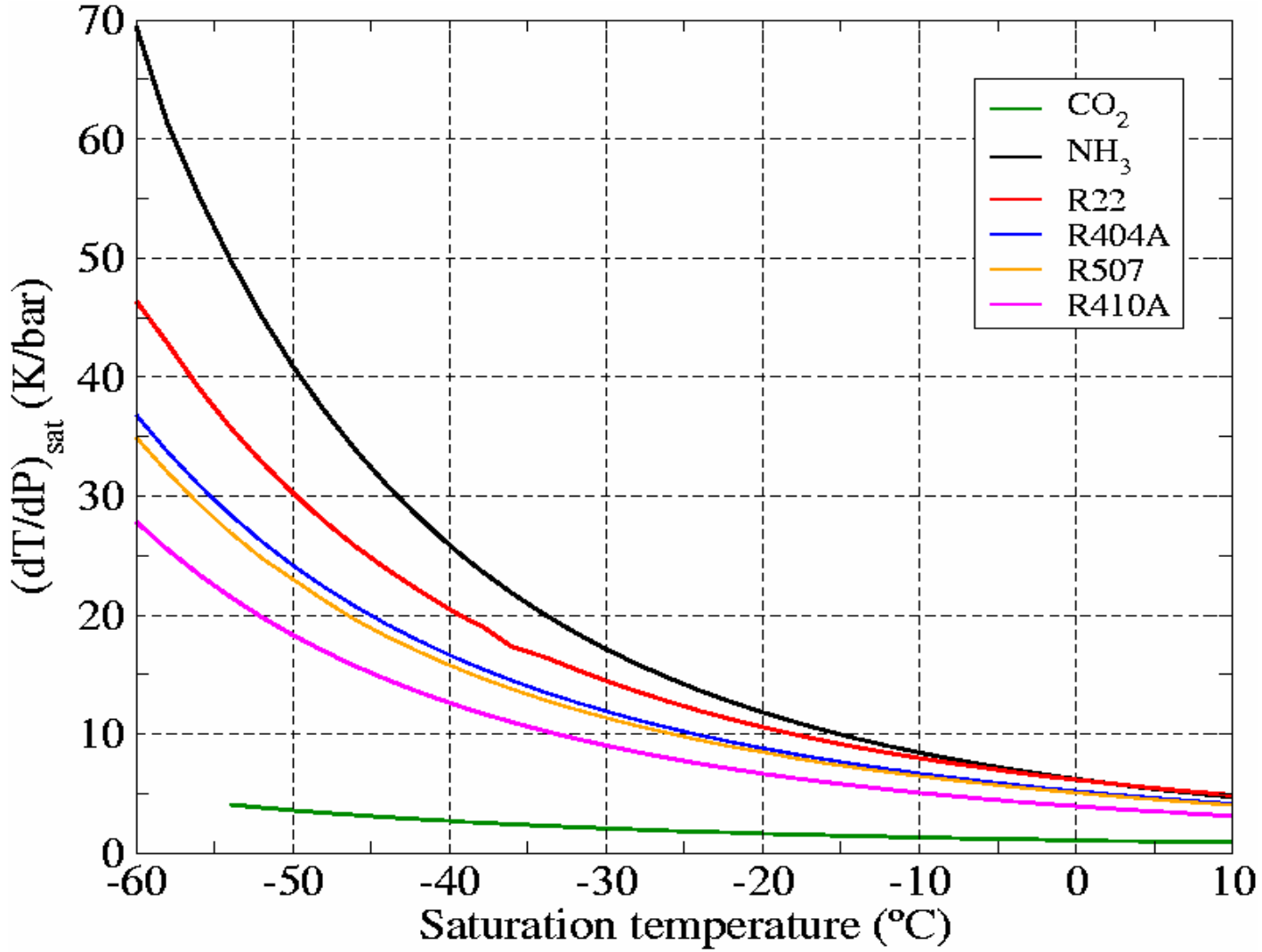


1 bar at:

NH_3 –33.6 °C
R22: -41.0 °C
R404A: -46.1 °C
R507: -47.0 °C
R410A: -51.8 °C

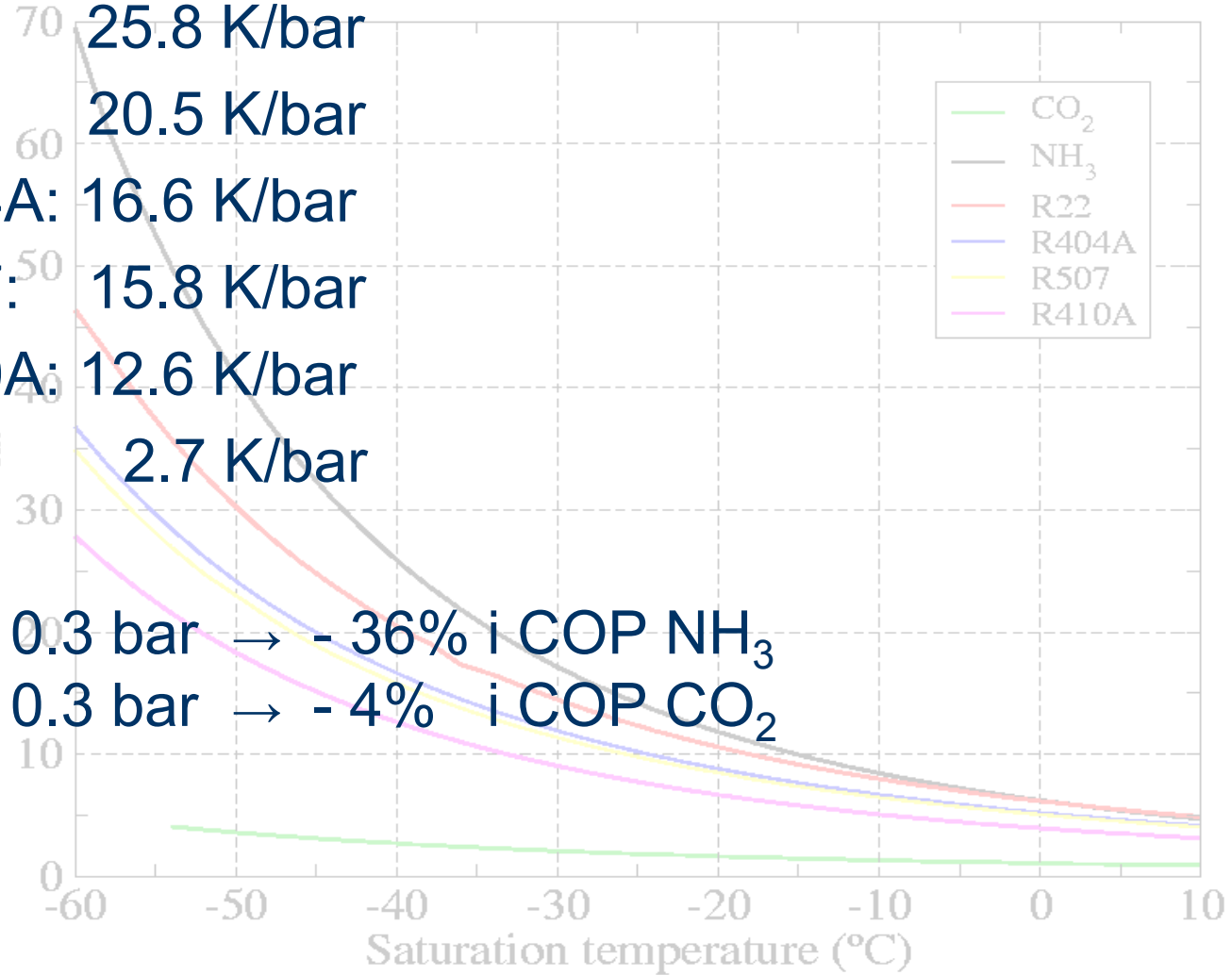
CO_2: 5.6 bar at -55°C

Følsomhet for trykktap (K/bar)



Følsomhet ved T_0 = - 40°C

NH_3: 25.8 K/bar
R22: 20.5 K/bar
R404A: 16.6 K/bar
R507: 15.8 K/bar
R410A: 12.6 K/bar
CO_2: 2.7 K/bar



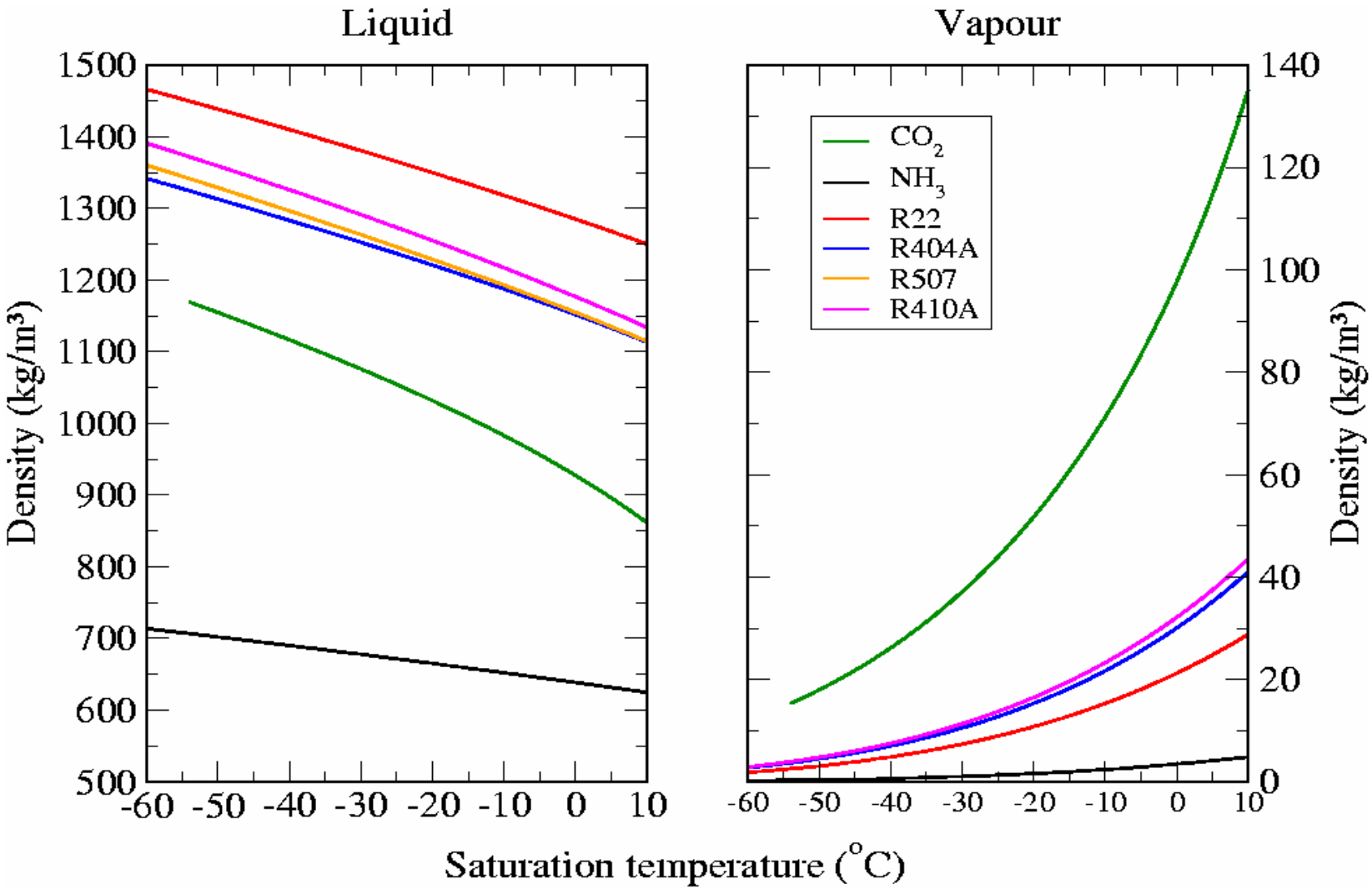
ΔP = 0.3 bar → - 36% i COP NH_3
ΔP = 0.3 bar → - 4% i COP CO_2

Følsomhet for trykktap

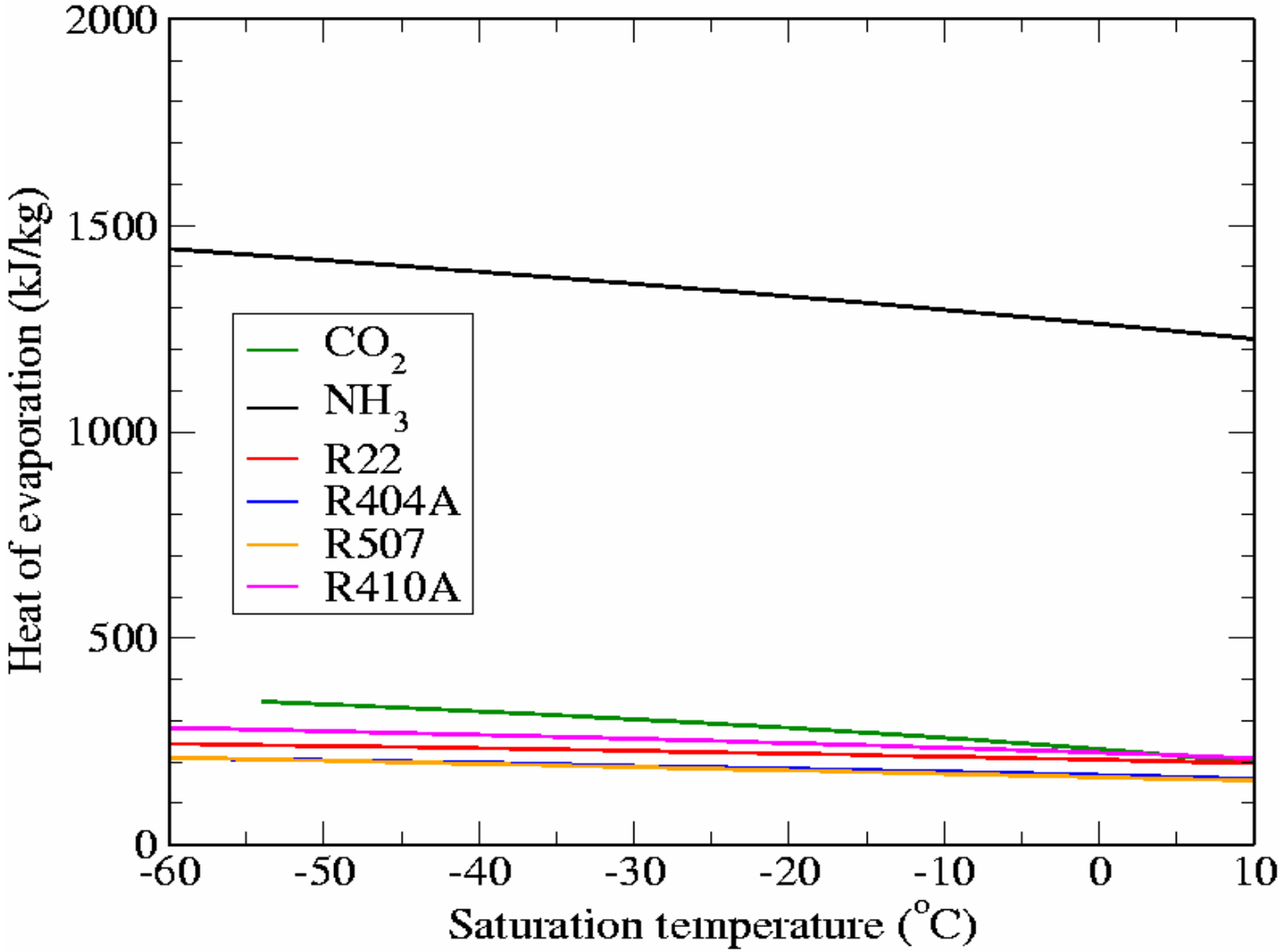
- Viktig ved fordamperdesign
  - Antall kretser/lengde rør
- Rørdimensjonering
  - Diameter, hastigheter

→ En kan tillate høyere trykktap for CO_2

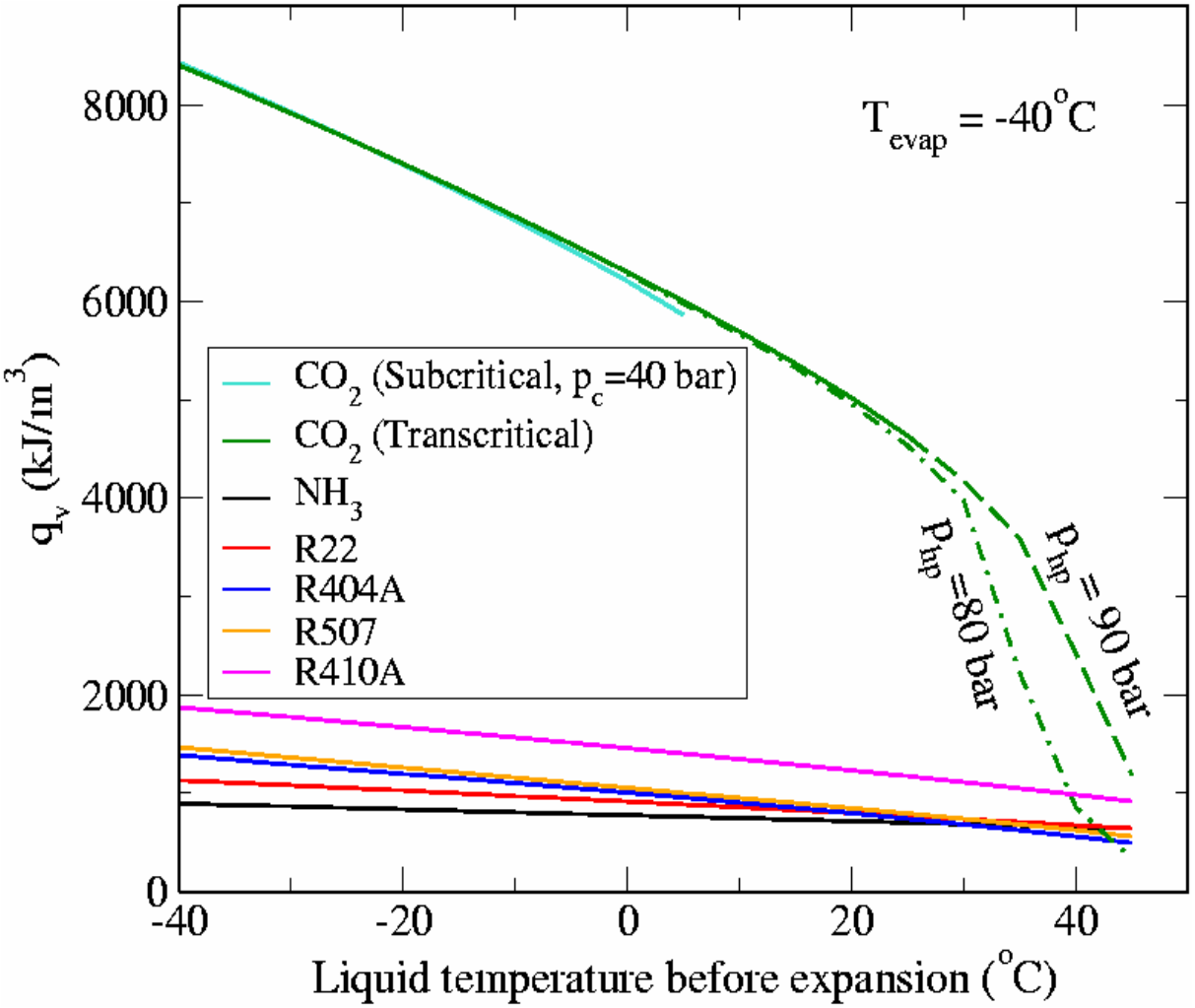
Tetthet


Liquid
Vapour
Density (kg/m³)
Density (kg/m³)
Saturation temperature (°C)
CO2
NH3
R22
R404A
R507
R410A
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
140
120
100
80
60
40
20
0
-60 -50 -40 -30 -20 -10 0 10

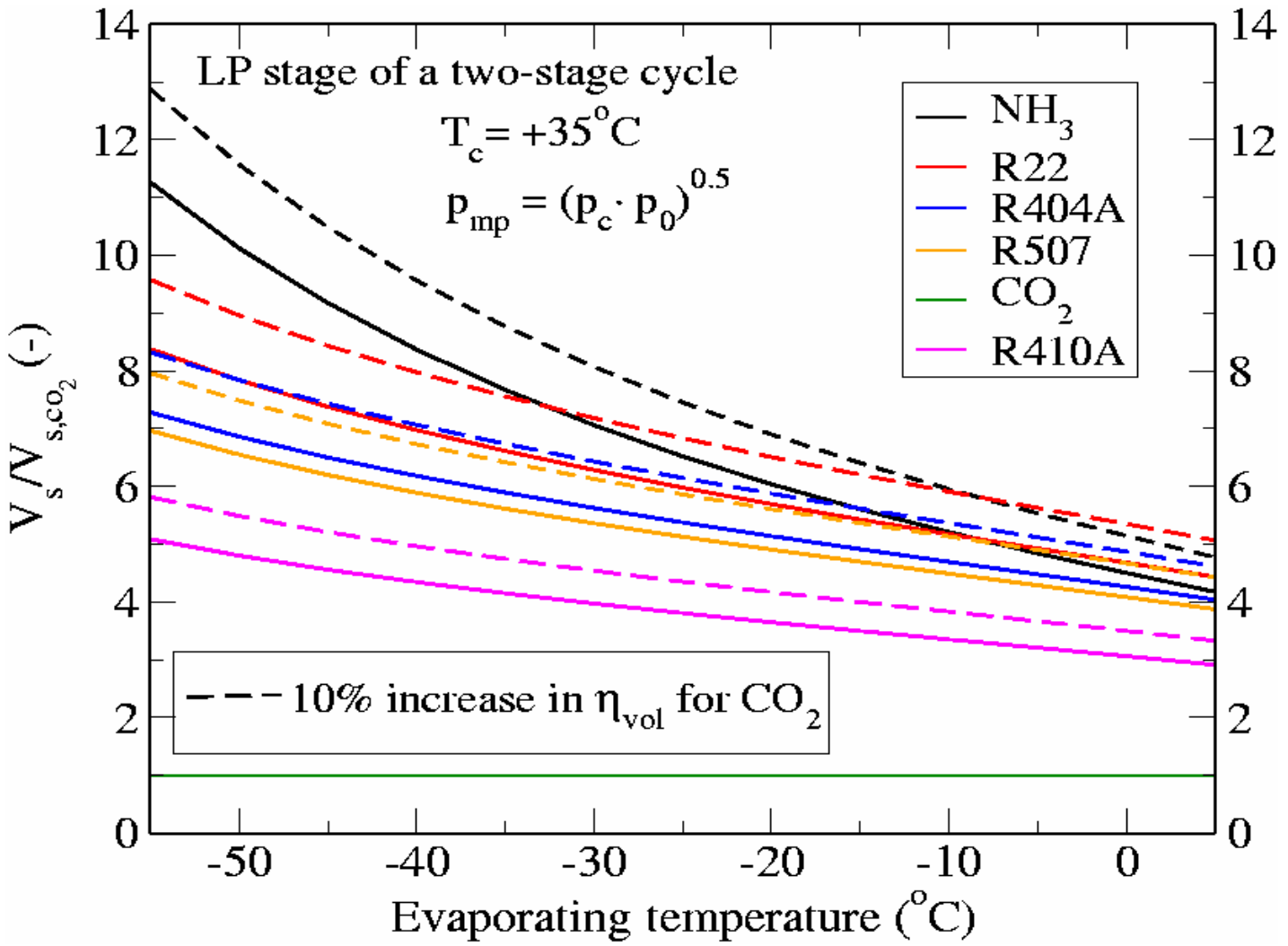
Fordampningsvarme



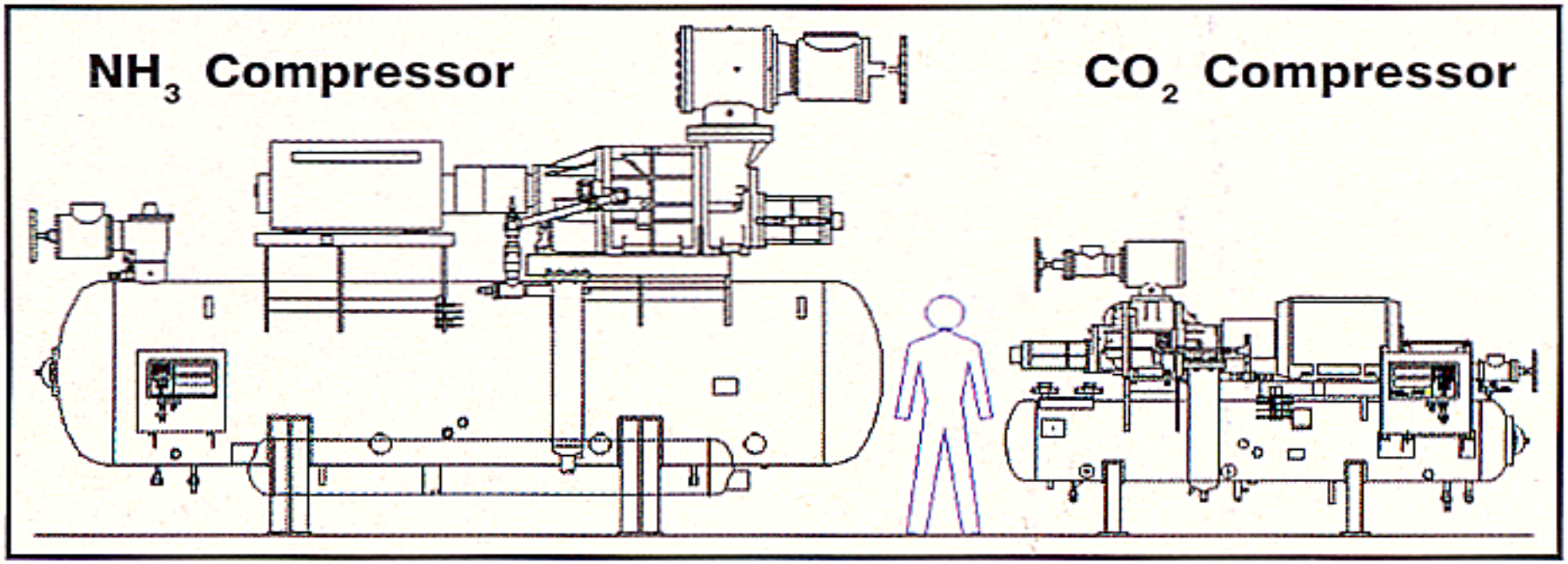
Volumetrisk kapasitet



Relativ kompressorstørrelse



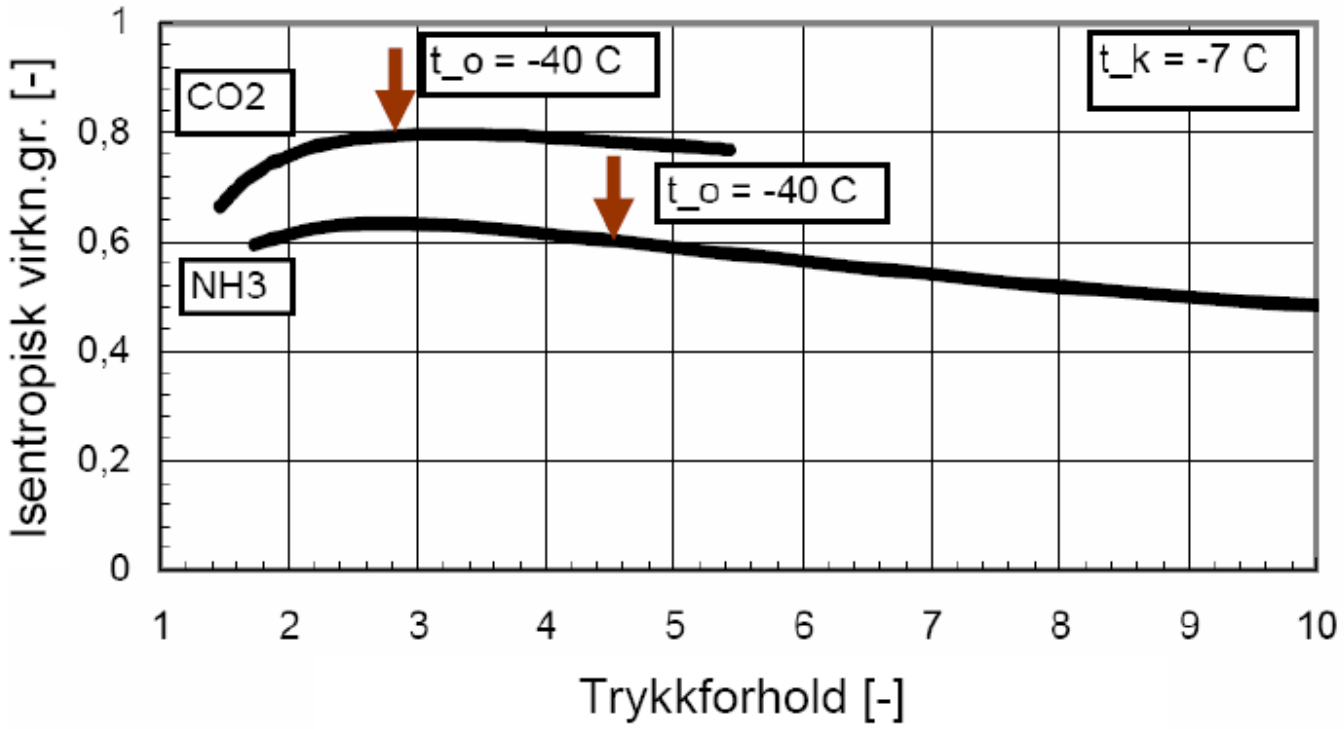
Kompressorstørrelse



ASHRAE Journal, September 2002

Kompressorvirkningsgrad

Eksempel – industrielle kompressor for CO_2 og ammoniakk



- Ca. 30% høyere isentropisk virkningsgrad (η_{is}) for CO_2-stempelkompressor

Sugeledninger ved T_0= -40°C

Indre diameter før isolering

ID (mm)	281	361	356	352	296	160	137
U (m/s)	20	10.1	9.2	9	9.4	7.4	10
dT (K)	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.3

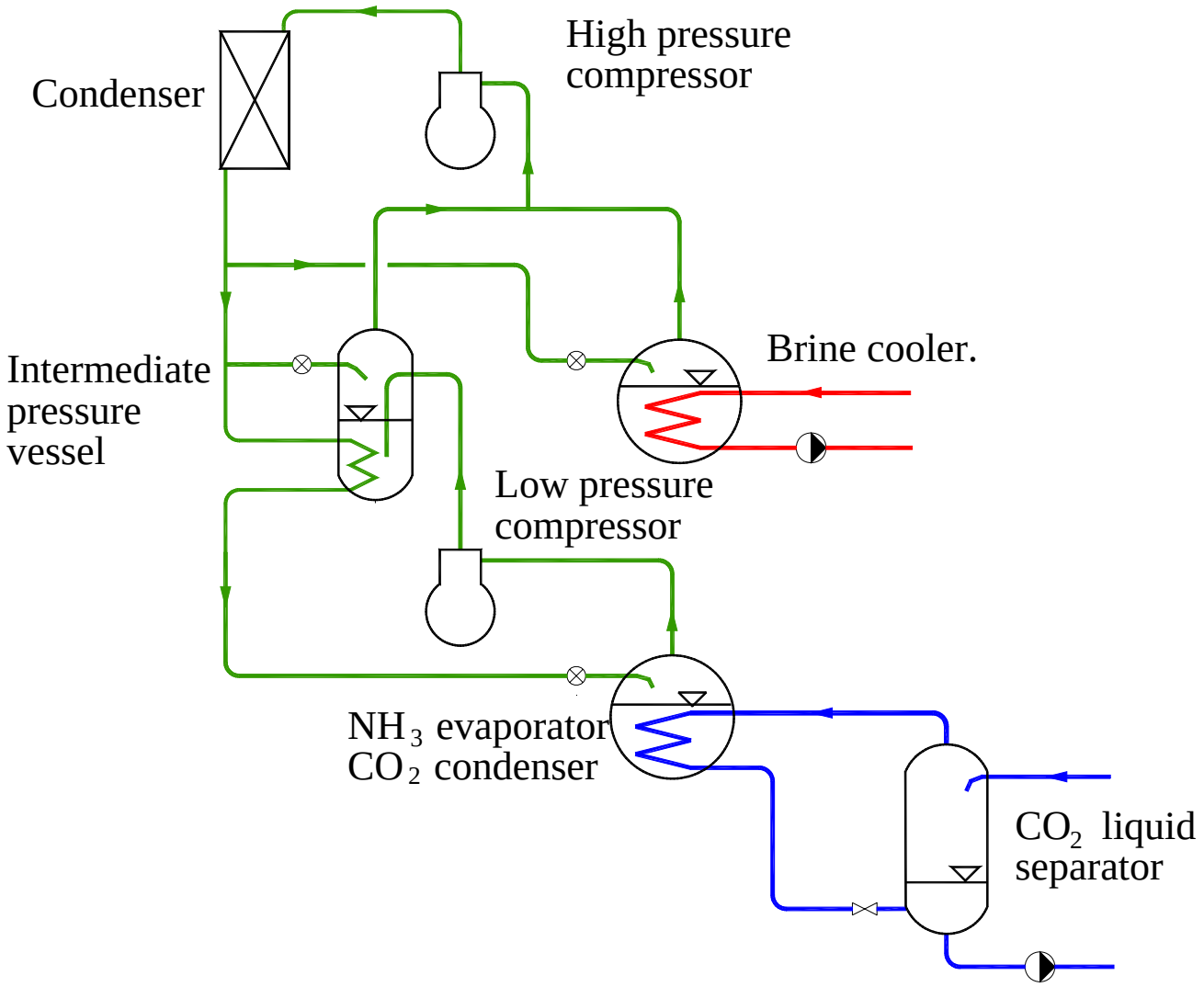
Equivalent length: 75 m
Cooling capacity: 1000 kW
Heat leakage constant along the tube: 25 W/m²

Kostnadsbesparelser på rørføring

- 50 % reduksjon i investeringskostnader for rør alene
- Billigere isolering
- Installasjonskostnadene lavere

Fryseanlegg

CO_2 AS SECONDARY REFRIGERANT



Totrinss NH_3

- Ikke vanlig med totrinns NH_3 på norske båter? Island (?)
- Sekundærkuldemedium for å redusere fylling og øke sikkerhet
- Laker:
  - Store volum
  - Seigere væske ved lave temperaturer
  - Stort pumpearbeid
  - Stor rørdimensjon
  - Dårligere varmeovergang
  - Temperaturglidning gir lavere fordampningstemperatur
  - Utfordringer mht korrosjon
- Energiforbruk økes med 10-20% (Ref.: Totrinns DX R22)
- Nødvendig kompressorkapasitet øker med 25-30%

CO_2 som sekundærkuldemedium

- Teknologien utprøvd
  - Relativt lang erfaring fra landbasert og delvis i fiskebåt
- Fordampingsvarmen utnyttes, stor varmetransportkapasitet
- Meget god varmeovergang
- Lavt temperaturtap i fordamperen (LMTD ≈ 3 K)
- Små rørdimensjoner
- Kapasitet på platefrysere går opp
- Trolig billigere en konvensjonell teknologi
- Høyere designtrykk for avriming
- Håndtering av stillstandstrykk (Kaldfinger, ekspansjonstank)
- Gir mulighet for mer effektive og billigere indirekte systemer

Energiforbruk

(Hansen & Haukås, 2000)

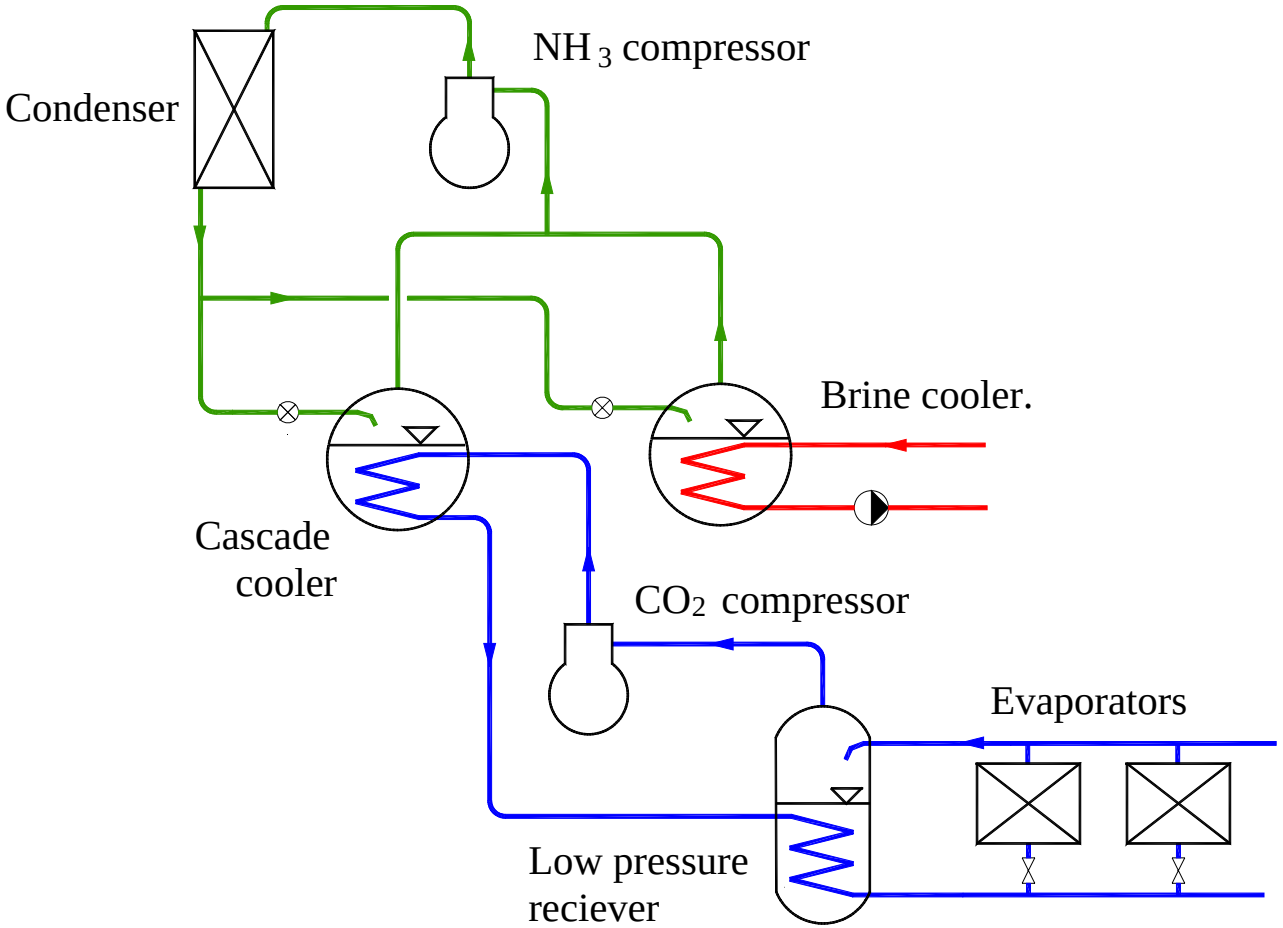
	Direct system, HCFC-22 (baseline)	Indirect system, HCFC-22	
		$CaCl_2$ brine	CO_2 as sec. Refrigerant
Sat. temp. at compressor inlet, °C	-44.7	-45.5	-42.5
Compressor COP[1], -	1.45	1.40	1.59
Compressor power demand[2], kW	375	409[3]	342
Pump power demand, kW	3	30	2
Total power demand, kW	378	439	344
Relative power demand, %	100	116	91

[1] - **Screw compressor**
[2] - **Incl. motor efficiency 92 %**
[3] - **27 kW pump heat included in cooling demand**

Hovedkomponenter

- NH_3
  - Kompressorer i alle størrelser (Stempel og skrue)
  - Varmevekslere (alle kapasitetsklasser)
  - Ventiler (alle kapasitetsklasser)
- CO_2
  - Platefrysere (52 bar for avriming)
  - Luftkjølere (52 bar for avriming)
  - Pumper (alle kapasitetsklasser)

CO_2 IN LOW TEMPERATURE CASCADE STAGE



Kaskadeanlegg NH_3 / CO_2

- Vanlig brukt i store landbaserte anlegg
- Installert på flere fiskebåter, bl.a. to i Norge
- Totalt kompressorvolum reduseres med ~70% (ref R22)
- Lav temperaturdifferanse i kaskadeveksler: ~ 3K
- Ved å redusere fordampningstemp fra - 40°C til -50°C, frysetiden reduseres med 20% og produksjonskapasiteten øker med 25% (1/0.8 = 1.25)
- Redusert volum av komponenter øker produksjonen per dekkareal
- Forbedret kvalitet som følge av raskere innfrysning og raskere avriming.

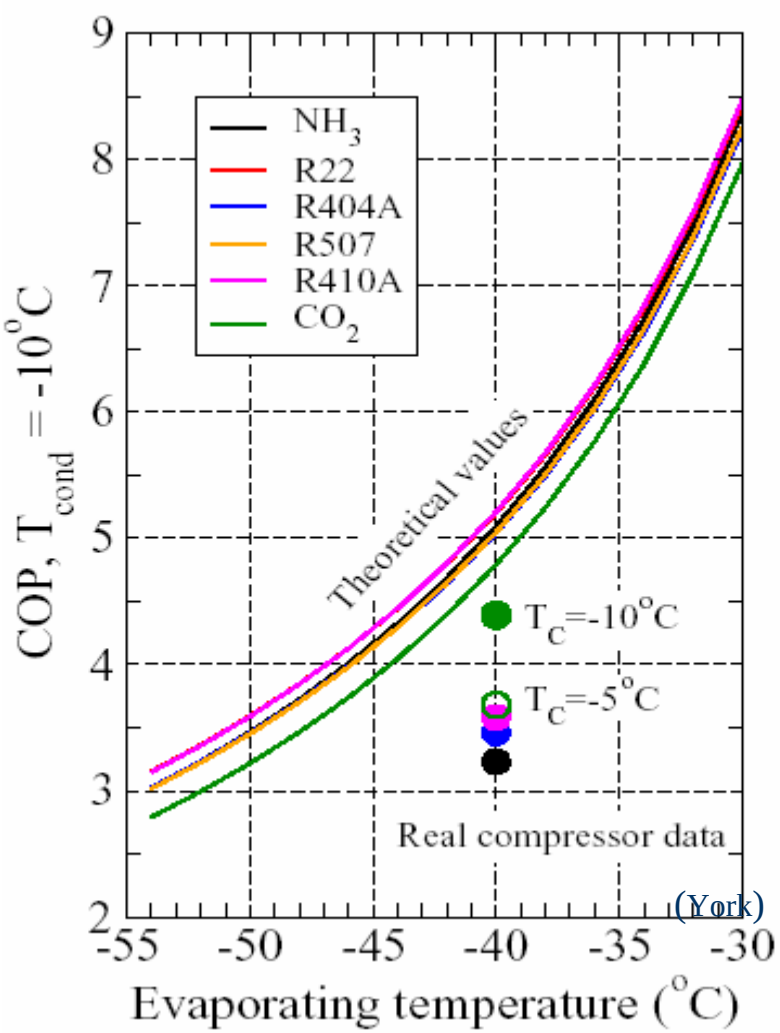
Kaskadeanlegg NH_3 / CO_2

- Trykktapet for CO_2 er lavt, varmeovergangen er god
- Ingen produkttap som følge av kuldemedielekkasje. (Lavere forsikring?)

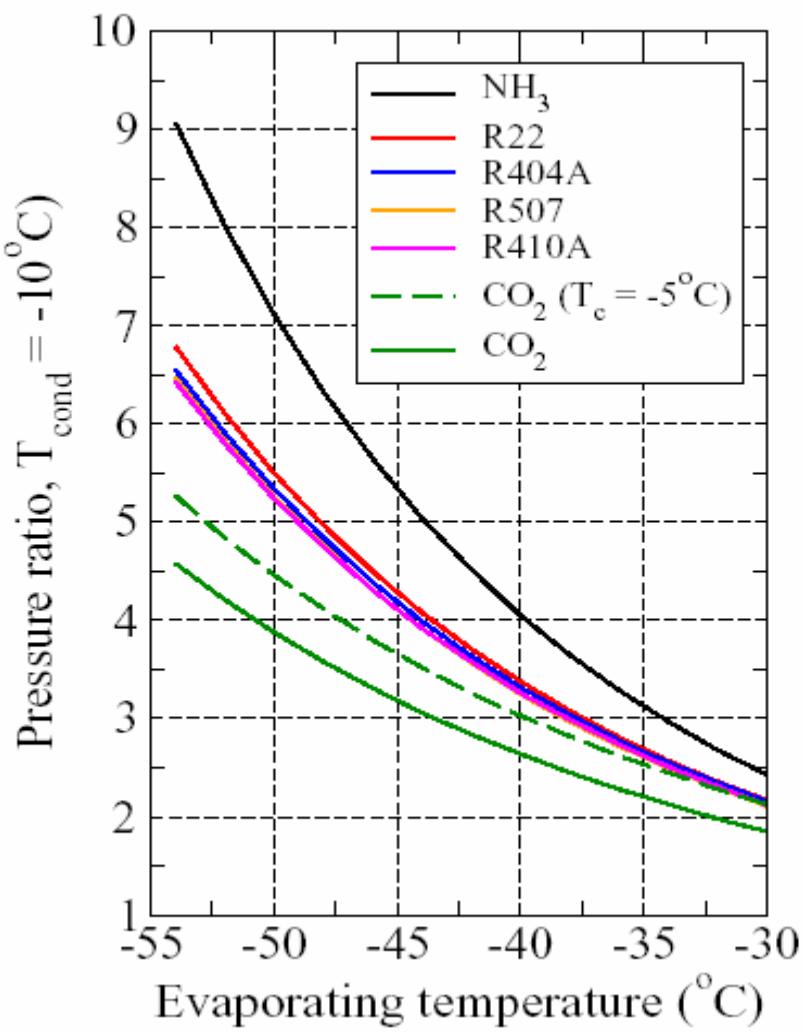
- Varmgassavriming
  - Forskjellige metoder brukes
    - Høytrykkskompressor
    - Varmedrevet
  - Nødvendig arbeidstrykk ~ 40 bar
- Håndtering av stillstandstrykk
  - Kontrollert avblåsning (nytt medium er billig)
  - Kaldfinger (Eksternt kuldeanlegg holder anlegget nedkjølt)
  - Trykksterk samletank

Energieffektivitet på laveste trinn

COP



Pressure ratio

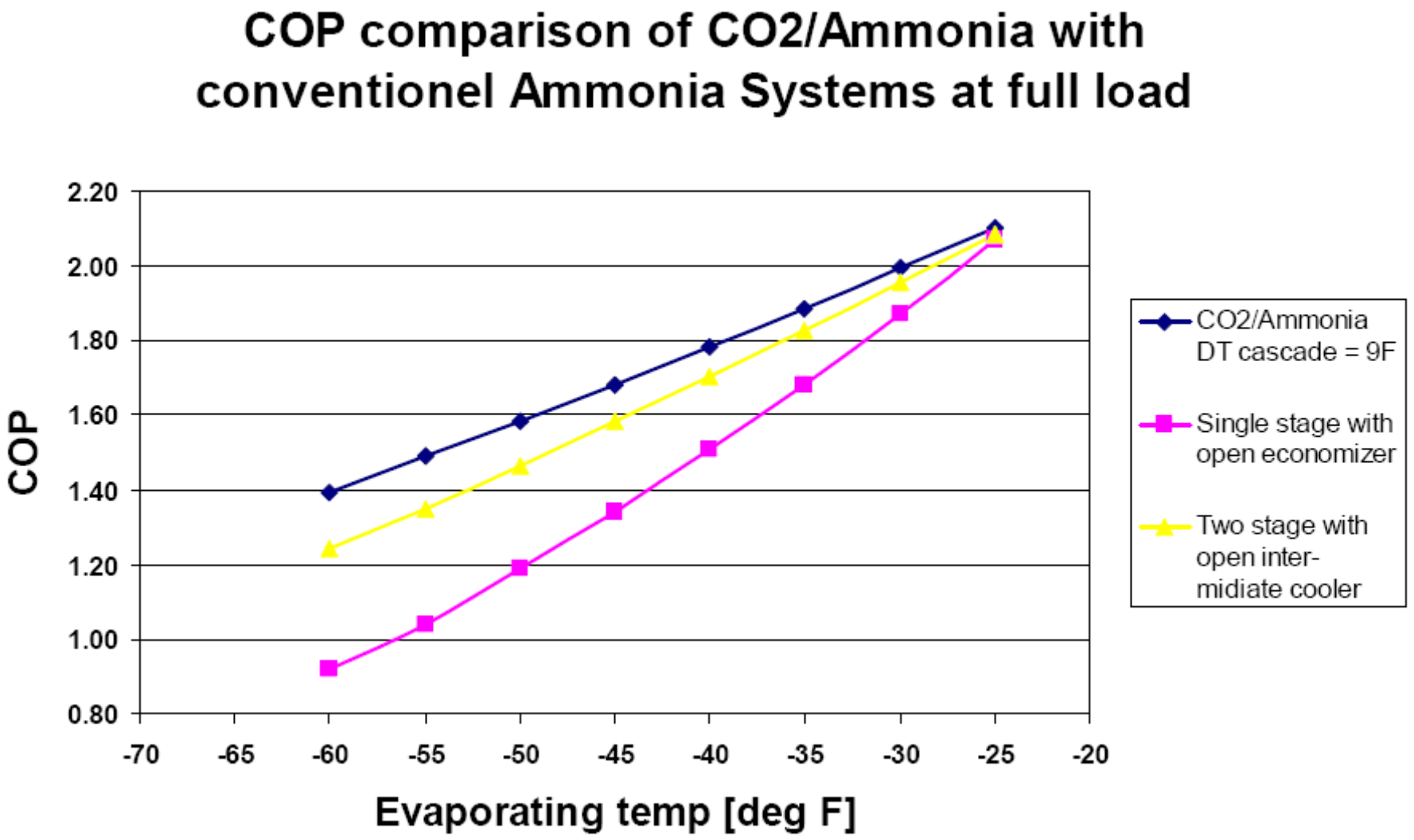


Hovedkomponenter kaskadesystem NH_3 / CO_2

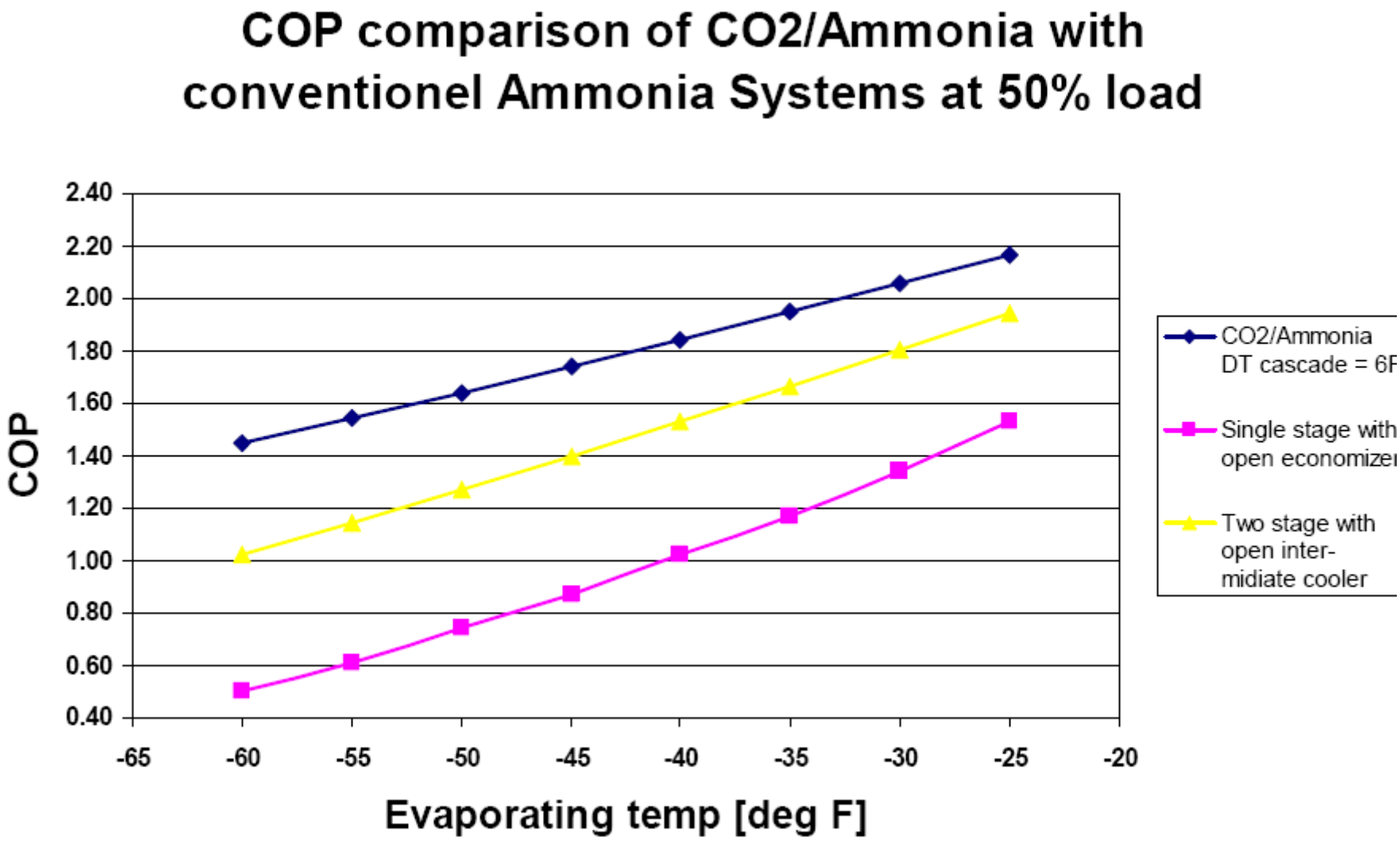
- Kaskadevekslere tilgjengelig (alle kapasitetsklasser)
  - Rørkjel
  - Plate in shell
- NH_3
  - Kompressorer i alle størrelser (Stempel og skrue)
  - Varmevekslere (alle kapasitetsklasser)
  - Ventiler (alle kapasitetsklasser)
- CO_2
  - Kompressorer (40bar) tilgjengelig alle kapasitetsklasser (skrue og stempel)
  - Platefrysere (52 bar for avriming)
  - Luftkjølere (52 bar for avriming)
  - Pumper (alle kapasitetsklasser)
  - 52 bars avrimingskompressor (York)
  - Semi-hermetiske 120 bars kompressorer tilgjengelig fra flere leverandører

Eksempel fra fryselager USA

(Toogood & Christensen, c-dig Purdue USA 2006)



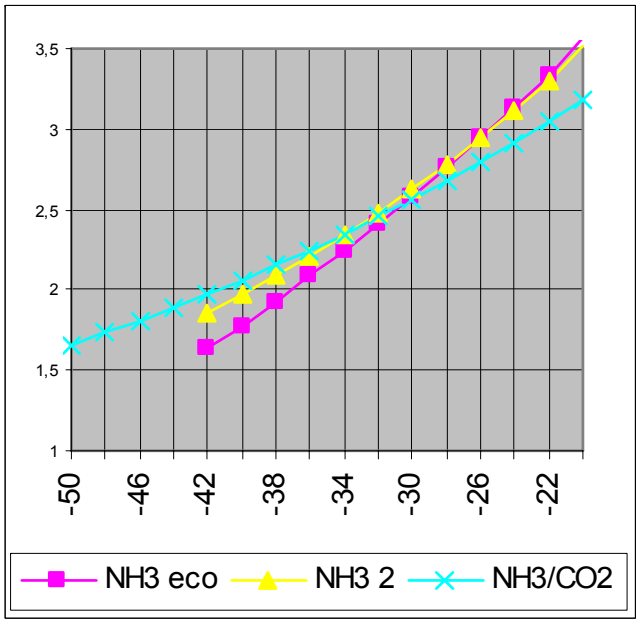
Eksempel fra fryselager USA - dellast



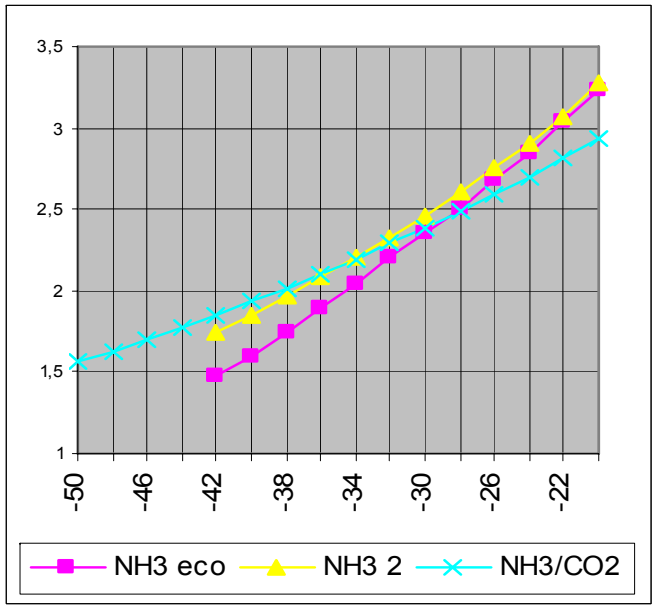
COP – Erfaring fra GTI Nederland

(Hoogendoorn, c-dig Hoofdorp, Nederland 2006)

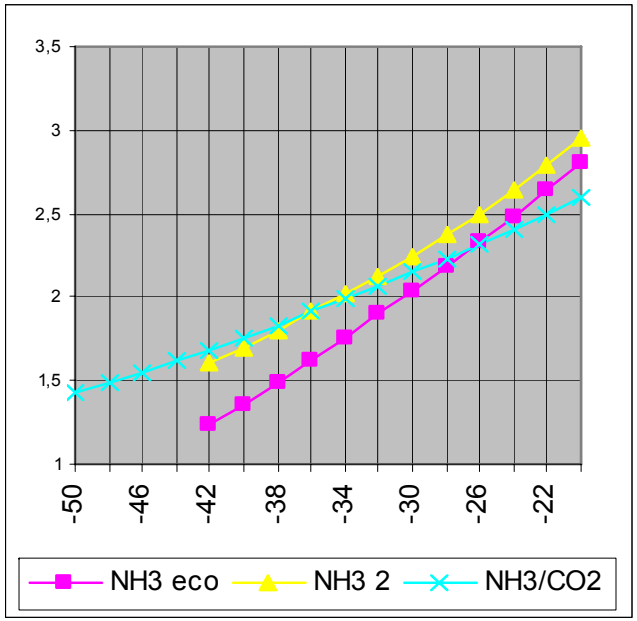
T_c= 25ºC



T_c= 30ºC



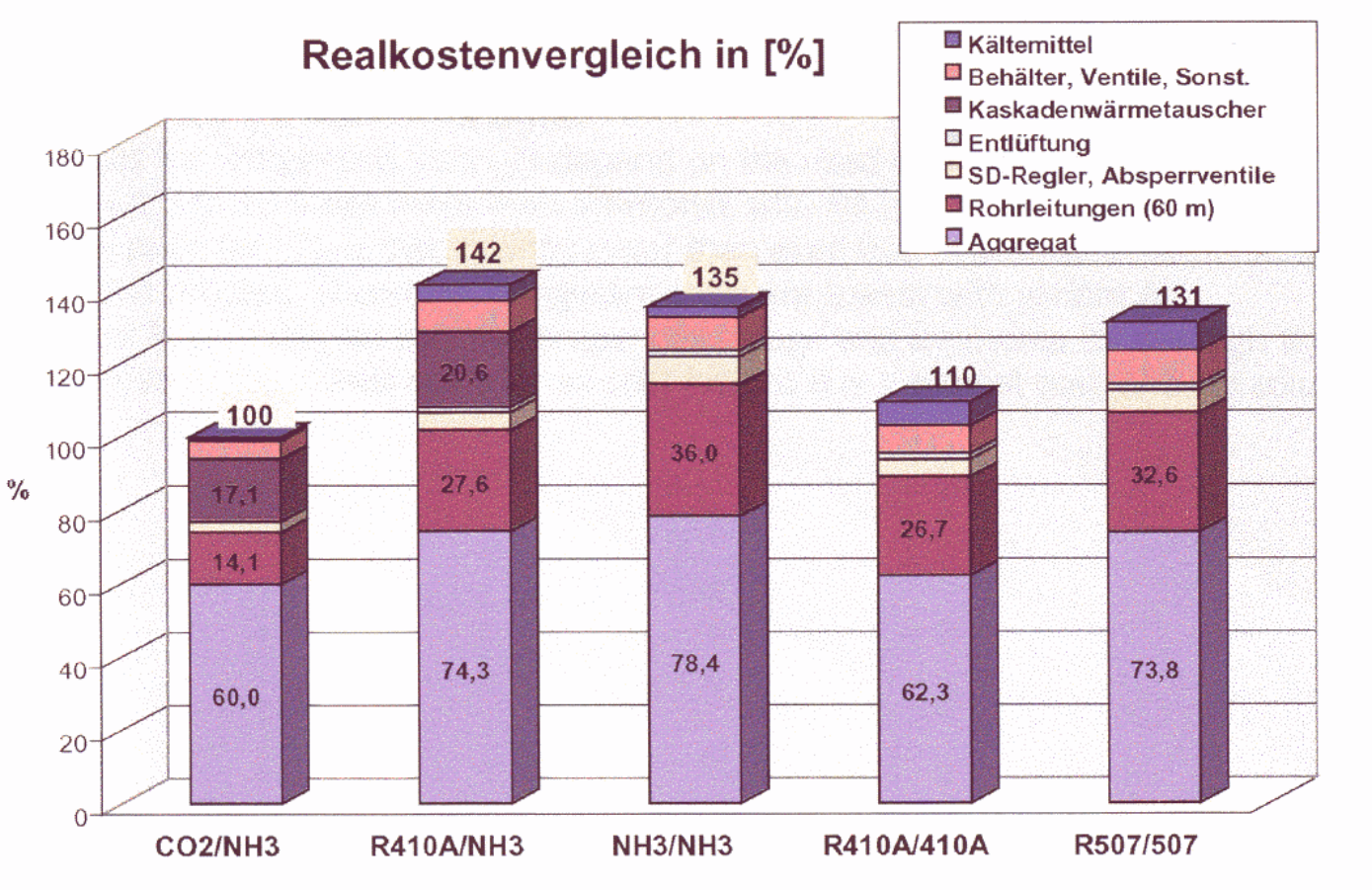
T_c= 35ºC



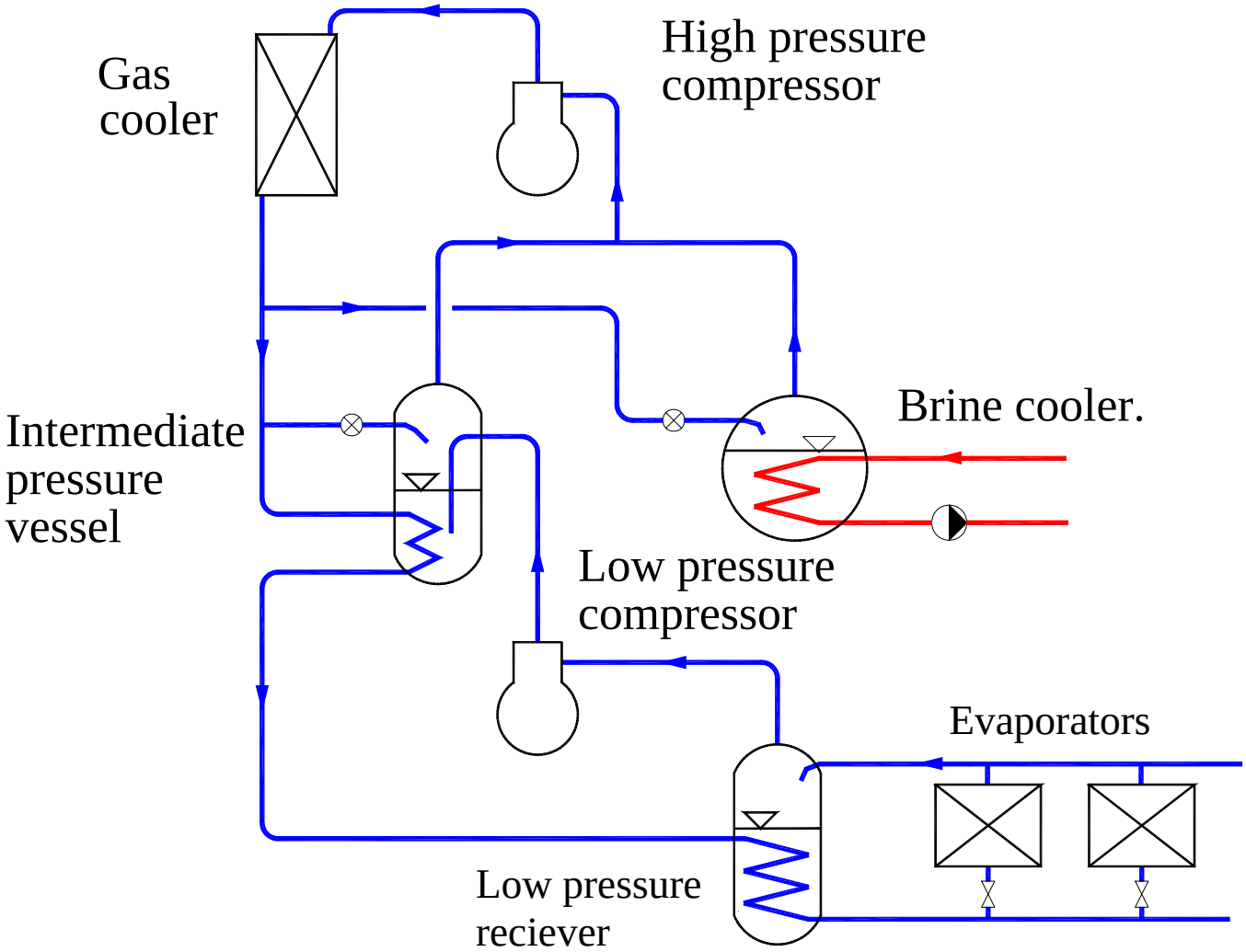
COP as a function of the evaporation temperature at different condensing temperatures

Eksempel på investeringskostnad

Kaskadesystem



TWO STAGE CO_2 SYSTEM.



CO_2 som primærkuldemedium

Fordeler:

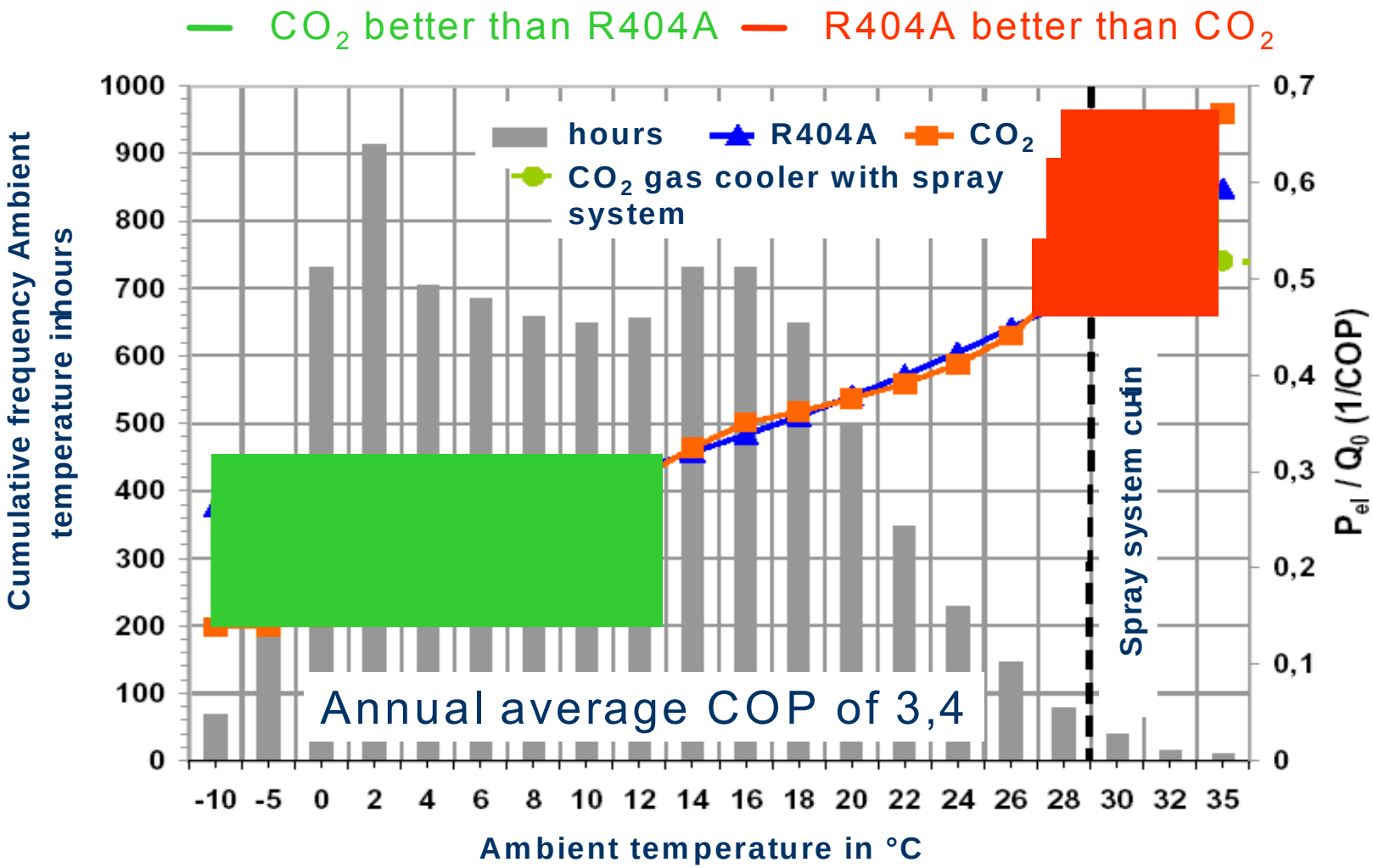
- Håndterer bare et kuldemedium
- Færre sikkerhetsforanstaltninger
- Små kompressor- og rørdimensjoner i forhold til ytelse
- Kuldemedium billig
- Ikke giftig eller brennbart
- Enklere håndtering ved lekkasje (ref NH_3)

Utfordringer:

- Høyere trykk (80 – 120bar)
- Investeringskostnad?

Energieffektivitet for R404A/CO_2 DX

Linde – kommersiell kjøling



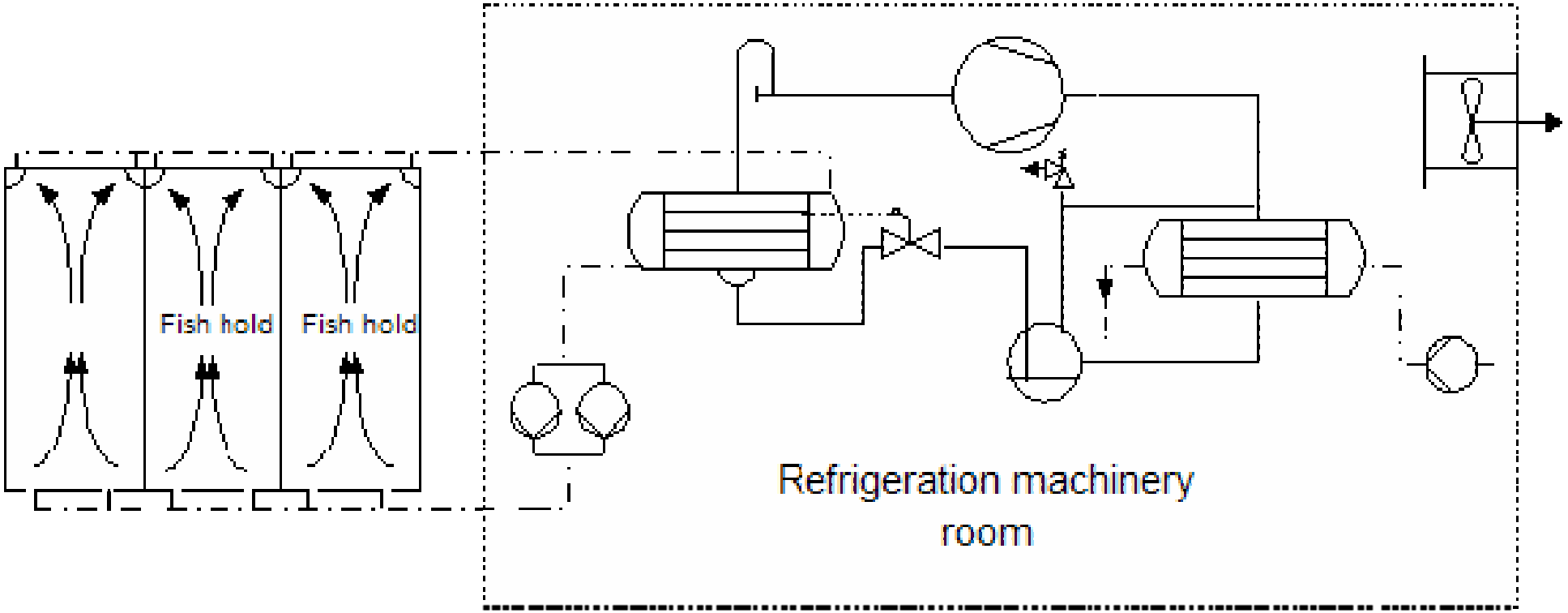
Ref: Bernd Heinbokel / Dr. Andreas Gernemann; C-dig Sept.05, Zürich

Hovedkomponenter CO_2

- Lavtrykk: Som for kaskadesystemer
- Kompressorer
  - 120 bar. Semi-hermetiske fra flere leverandører. Maksimal kuldeytelse ~ 80kW per kompressor
  - 100bar: Skrue(r) fra MYCOM. Maksimal kuldeytelse 750kW per komp.
- Varmevekslere
  - Kondensator / gasskjøler: Kan lages etter spesifikasjon. Ikke hyllevare. Muligens noe utvikling. Pris?
- Ventiler
  - Industriventiler tilgjengelig i alle kapasitetsklasser. Pris?

RSW – anlegg med NH_3

RSW systemer med NH_3



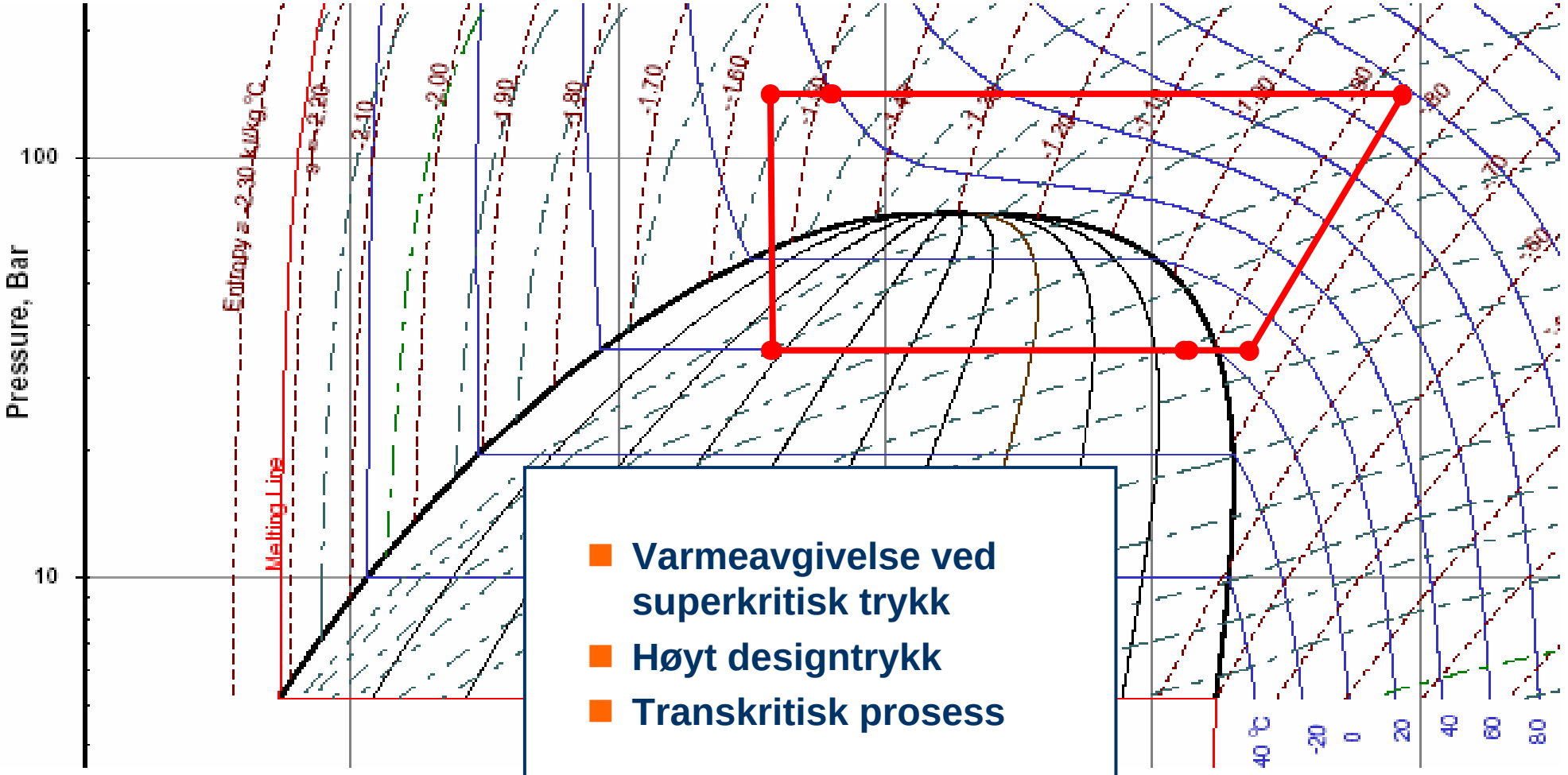
RSW systemer med NH_3

- ”Hyllevare”
- Lang praktisk erfaring
- Redusert fylling (Spray, in tube,
- De fleste nye anlegg i norske båter bruker NH_3
- Komponenter er tilgjengelig i alle aktuelle kapasitetsklasser
- Energieffektivitet i praksis ca. 5-10% bedre enn R22
  - Teoretisk 2% bedre (-6°C/26°C)
  - Bedre kompressorvirkningsgrad og varmeoverføringsegenskaper
- Investeringskostnader 10-15% høyere enn for R22
  - Noe høyere kostnader for sikkerhetsutstyr
  - Gasstett maskinrom

→ Mer i senere foredrag

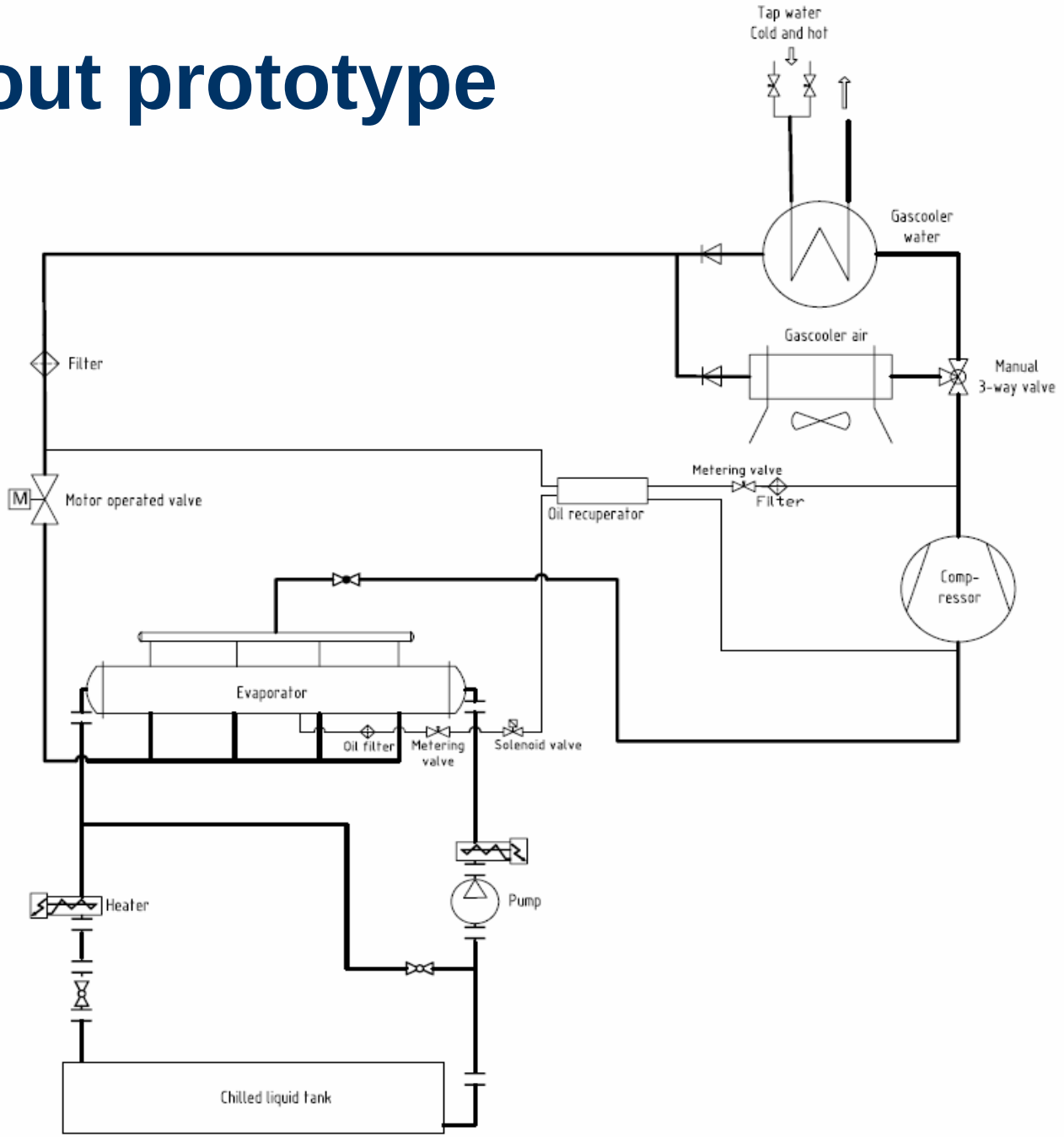
Prototyp CO_2 RSW

Trans-kritisk prosess med intern varmeveksling



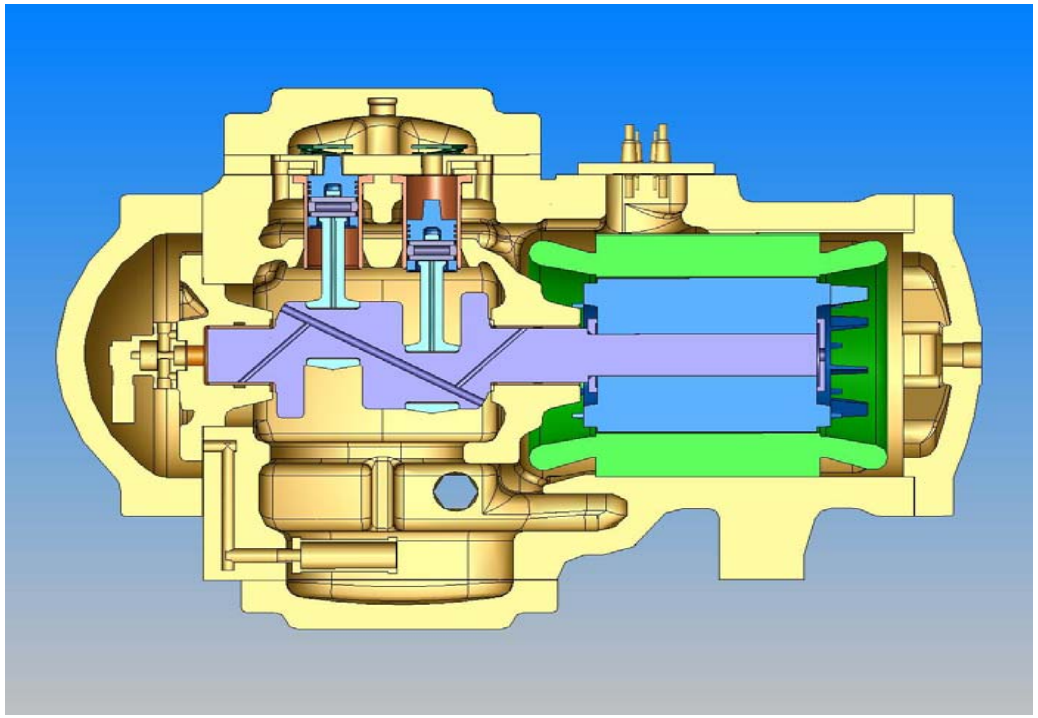
- Varmeavgivelse ved superkritisk trykk
- Høyt designtrykk
- Transkritisk prosess

Layout prototype

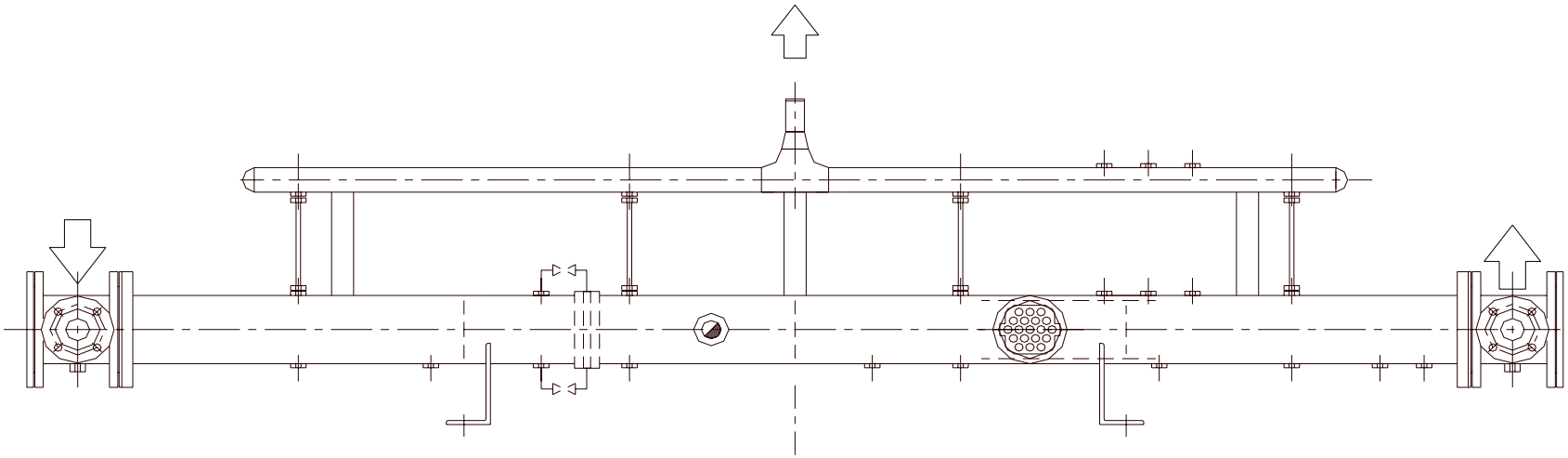


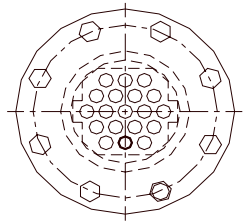
MYCOM Stempelkompressor

- Swept Volume: 12.5m^3/hr-50Hz
  15.0m^3/hr-60Hz
- Brake Horse Power: 25kW
- No.of Cylinders: 2
- Bore-Stroke: 45mm×45mm
- Drive Method: Hermetic Motor Drive
- Motor Cooling Method: Suction Gas Cooling
- Maximum Discharge Pressure: 15MPa
- Maximum Suction Pressure: 7MPa



RSW - kjøler

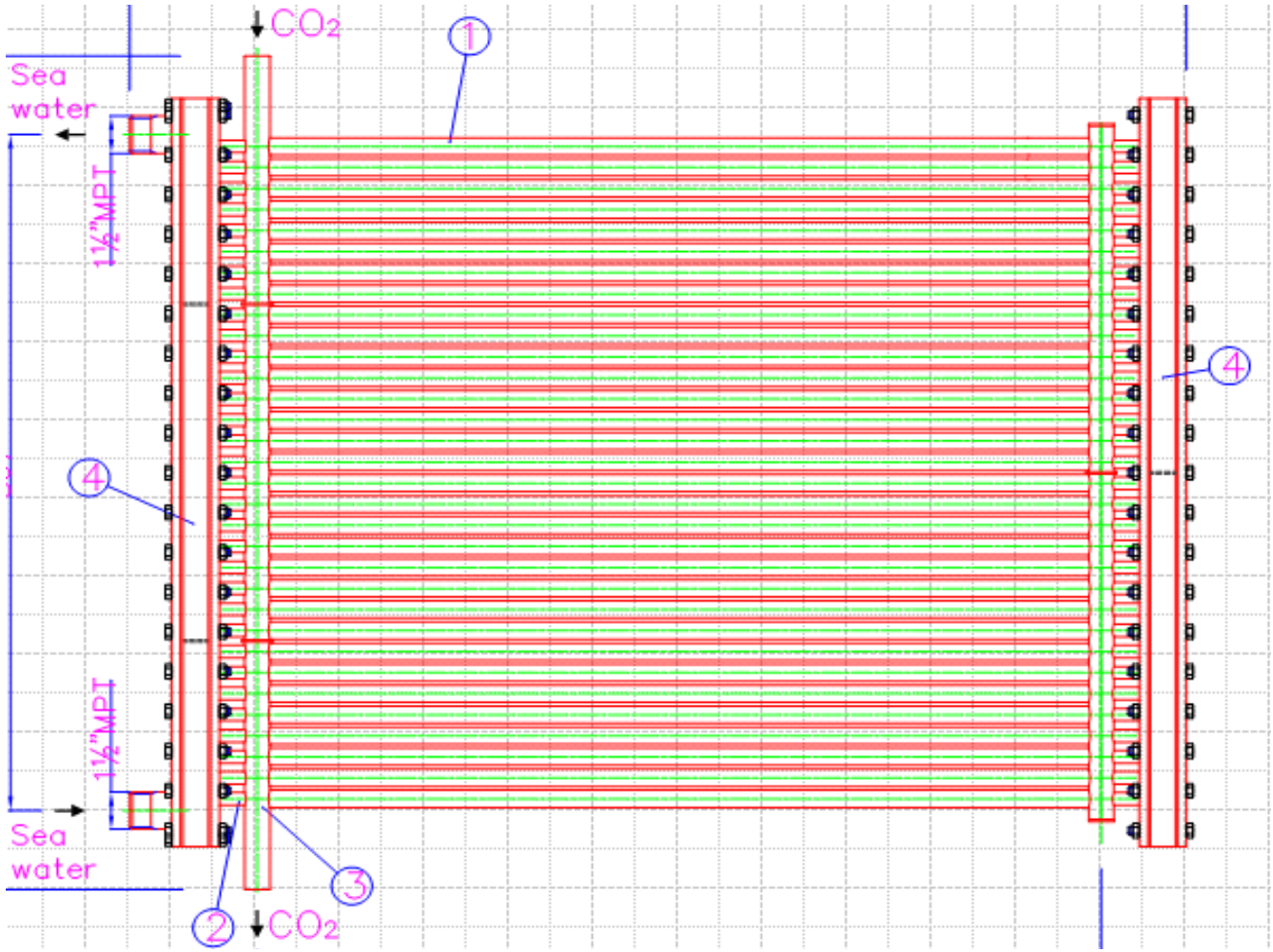




TEKNOTHERM
MARINE AND INDUSTRIAL REFRIGERATION
- 80 years of experience - 1926 - 2006

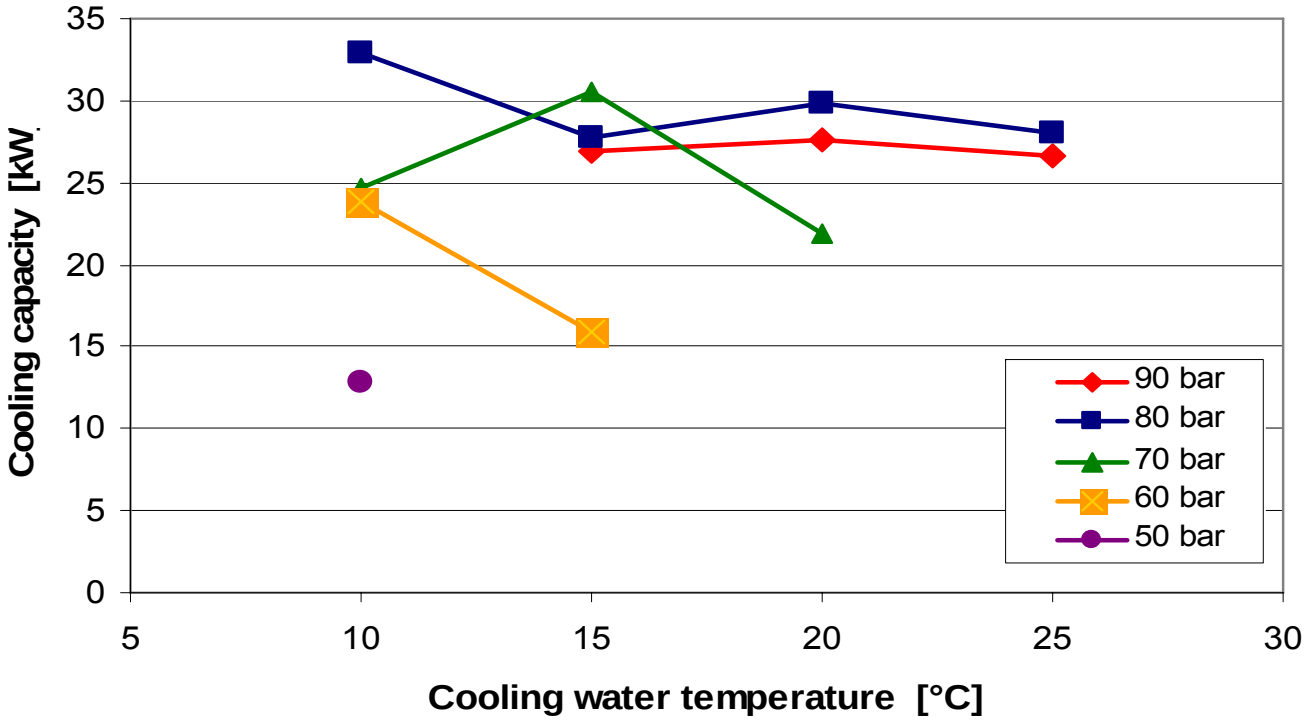
80 years anniversary 1926 - 2006

Vannkjølt gasskjøler



GASS
UNDER TRYKK

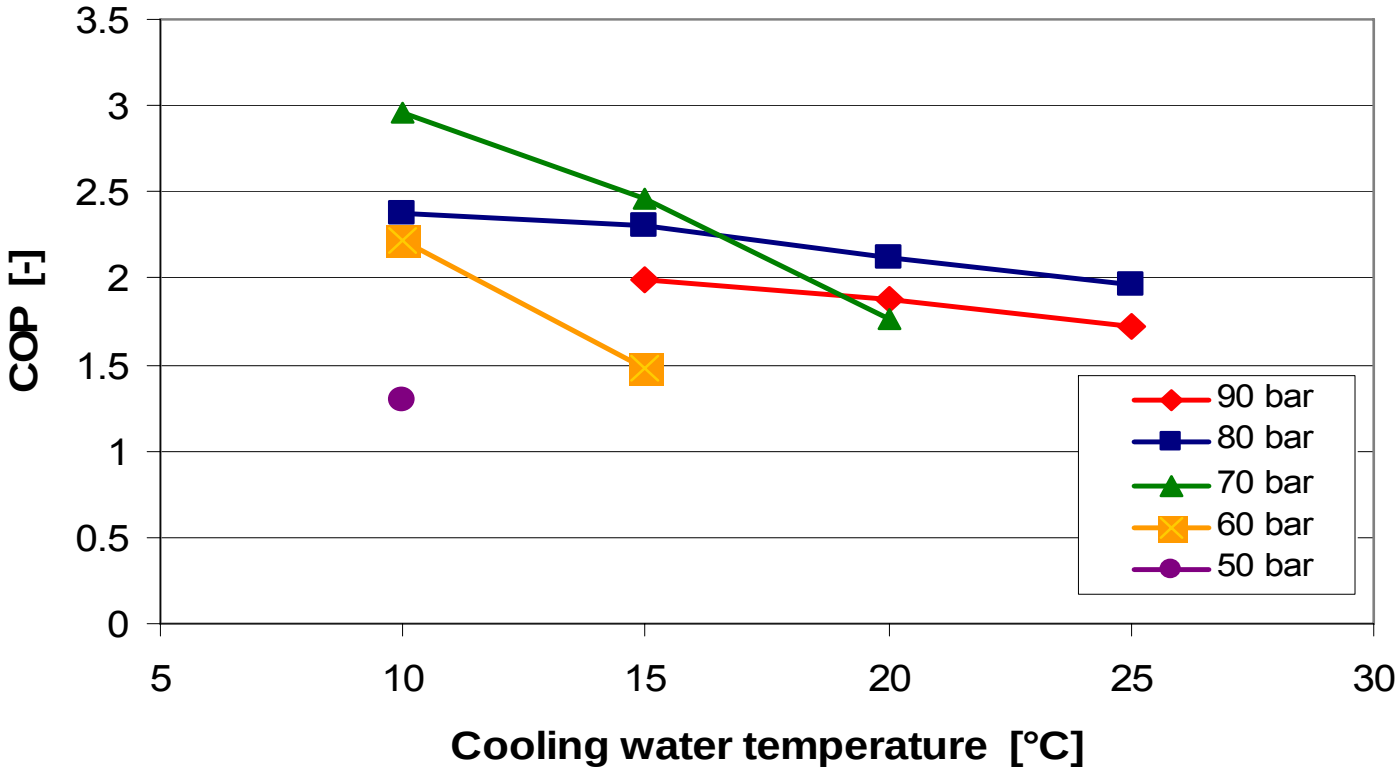
Kjølekapasitet - stasjonær drift



Kompressorturtall:

High pressure	Sea water temperature			
	10°C	15°C	20°C	25°C
90bar		1320	1410	1451
80bar	1451	1320	1451	1451
70bar	1020	1451	1451	
60bar	1451	1451		
50bar	1451			

COP - stasjonær drift



Komponenttilgang industrielt CO_2 RSW system

- Som for høytrykk fryseanlegg
- Unntak: RSW-kjøler. Konsepter utviklet. Grunnlaget klart for pilotinstallasjon

Konklusjon

- Bruk av NH_3 og CO_2 reduserer miljøbelastningen betydelig
- Sikkerhet med NH_3 håndterbart på båt
- Frys: Kaskadeanlegg med NH_3 / CO_2 er på vei inn
  - Energieffektive
  - Øker produksjonskapasiteten
- RSW: NH_3 vanlig brukt i nye båter i dag
  - Energieffektive
  - Noe dyrere enn R22
- RSW med CO_2, potensielt nytt produkt
  - Gir muligheter for norsk leverandørindustri