

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 CO₂ / NH₃
- Fryseanlegg
 - CO₂/NH₃ kaskade
 - NH₃ med CO₂ som kuldebærer
- RSW-anlegg
 - NH₃ og CO₂
- Energiforbruk ulike systemløsninger
- Hovedkomponenter
- Investering
- Oppsummering

- Forskrifter for NH₃ og CO₂ (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 (NH₃)

3) Karbondioksid (CO₂)

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

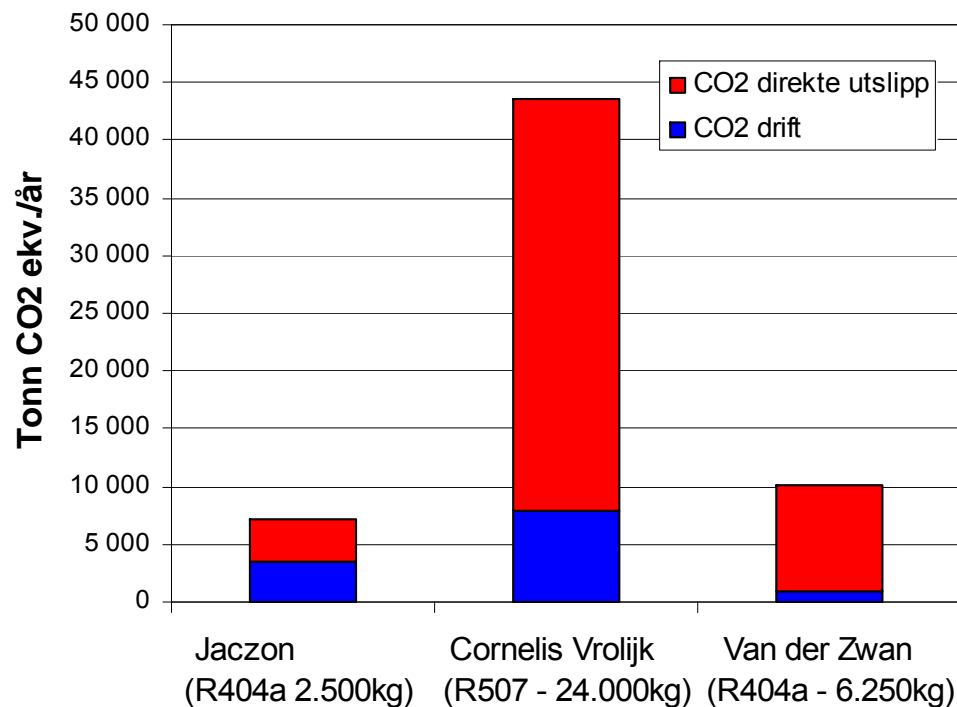
** ~ 0.19 NOK/kg CO₂ ekvivalent

Lekkasjer fra Fiskeflåten

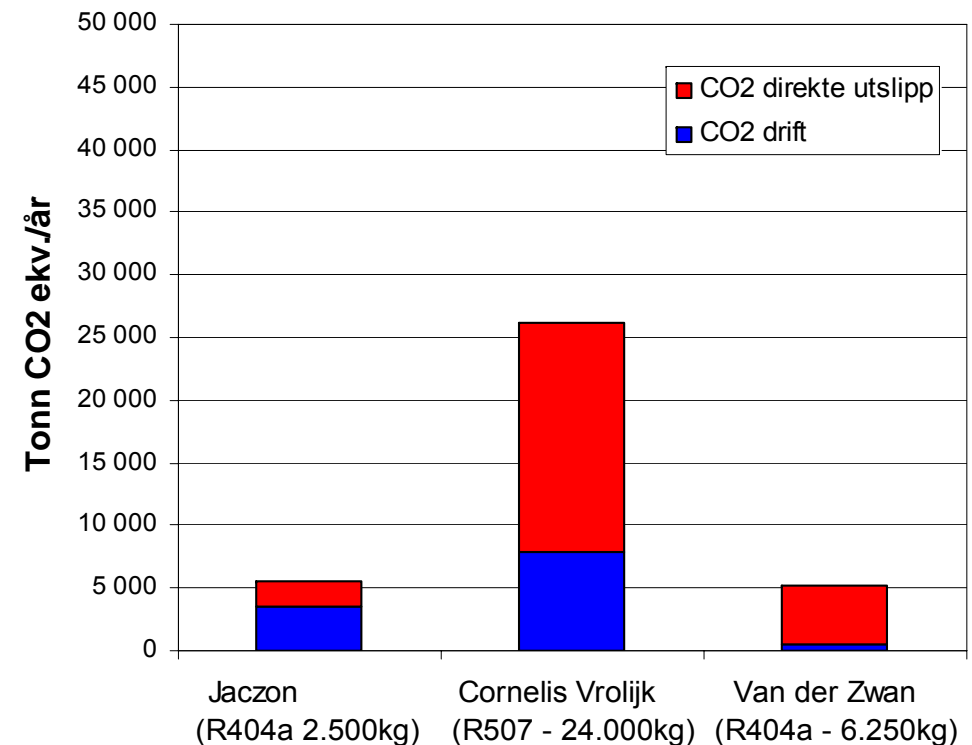
Utslippsstall varierer:

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

39% lekkasje av fylling per år



20% lekkasje av fylling per år



Egenskaper NH_3 og CO_2

NH₃ som kuldemedium

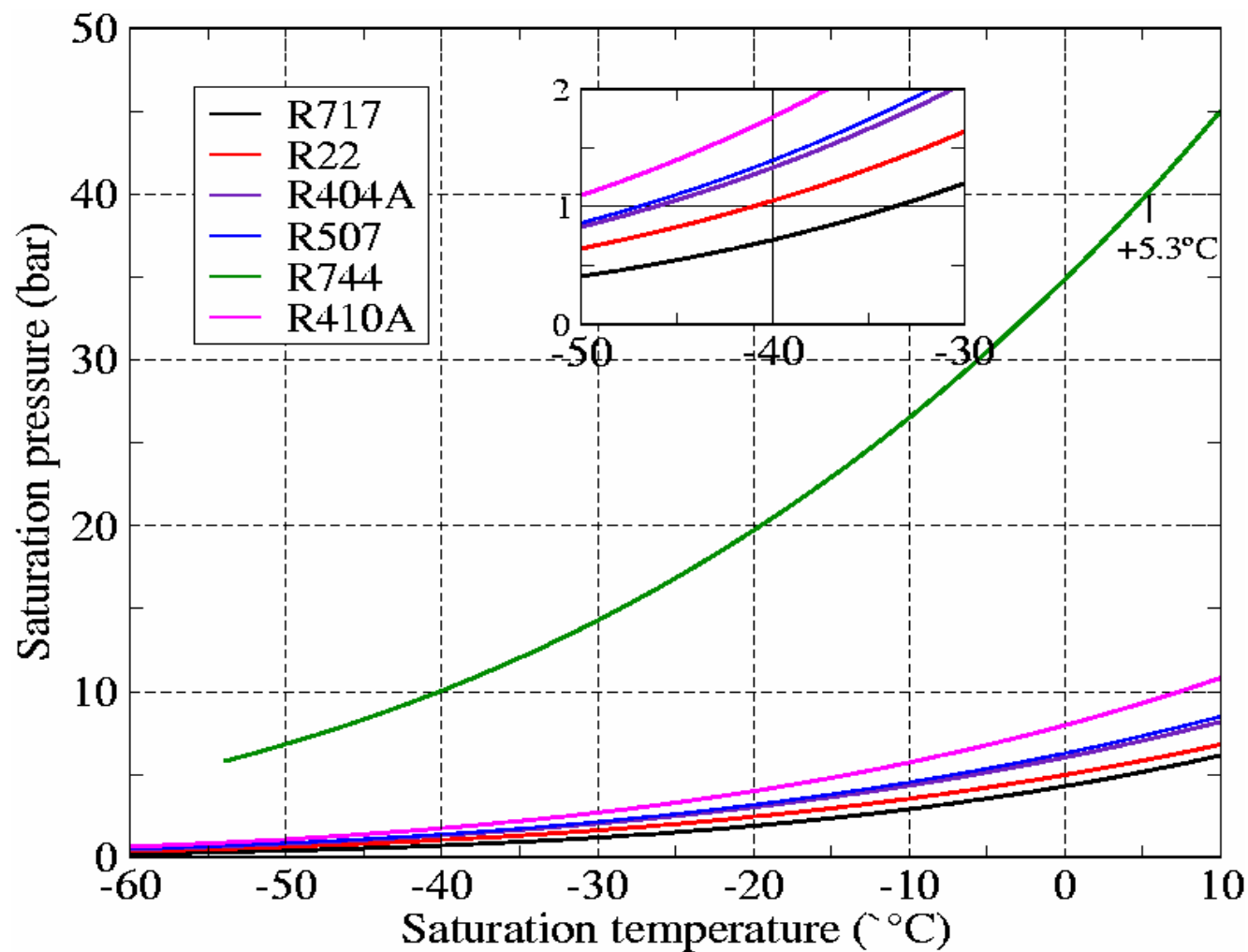
- Ikke ozonreduserende
 - GWP=0
 - Giftig (TLV 25 ppm, IDLH 500 ppm) – svært illeluktende (>5-25 ppm)
 - Brennbar (LEL/UEL 16 -26 vol%, AIT 651°C) – klasse L2/B2
 - Relativt billig
 - Fritatt for avgift
-
- Kjent og velprøvd teknologi
 - Krever ekstra sikkerhetsinstallasjoner om bord
 - Egen sikkerhetsklasse (Veritas)

CO₂ 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:

NH₃ -33.6 °C

R22: -41.0 °C

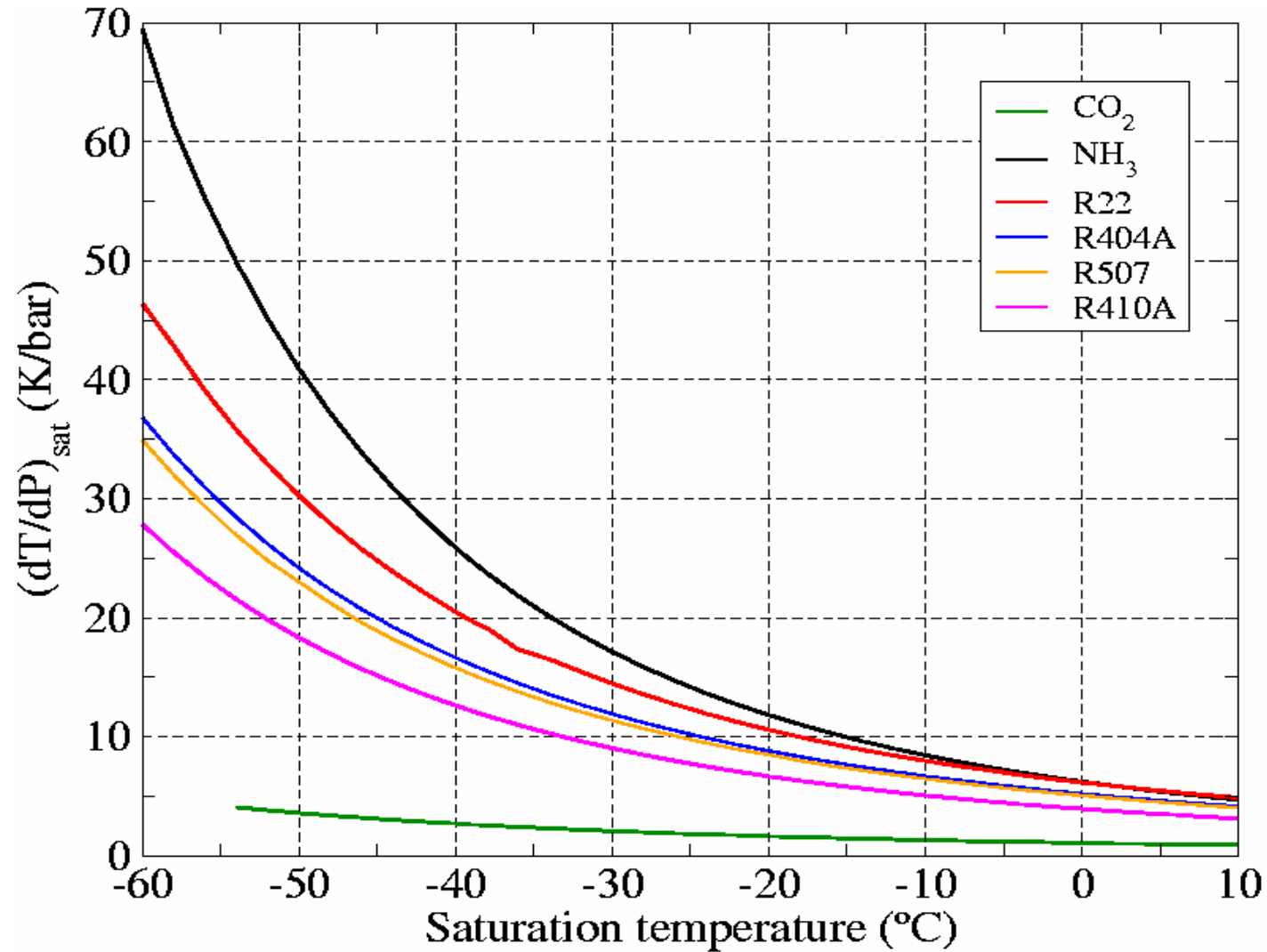
R404A: -46.1 °C

R507: -47.0 °C

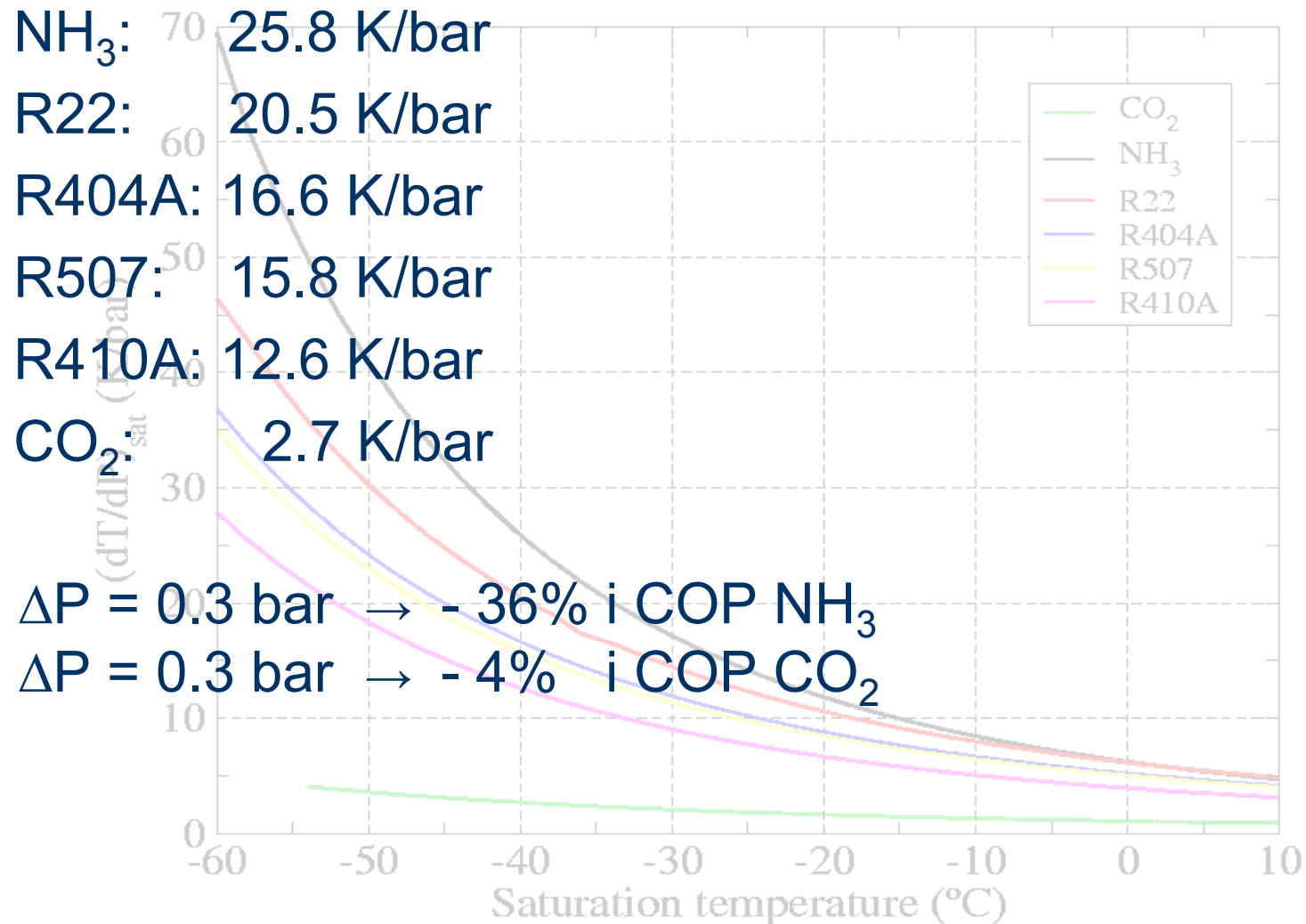
R410A: -51.8 °C

CO₂: 5.6 bar at
-55°C

Følsomhet for trykktap (K/bar)



Følsomhet ved $T_0 = -40^\circ\text{C}$



Følsomhet for trykktap

- Viktig ved fordampersdesign

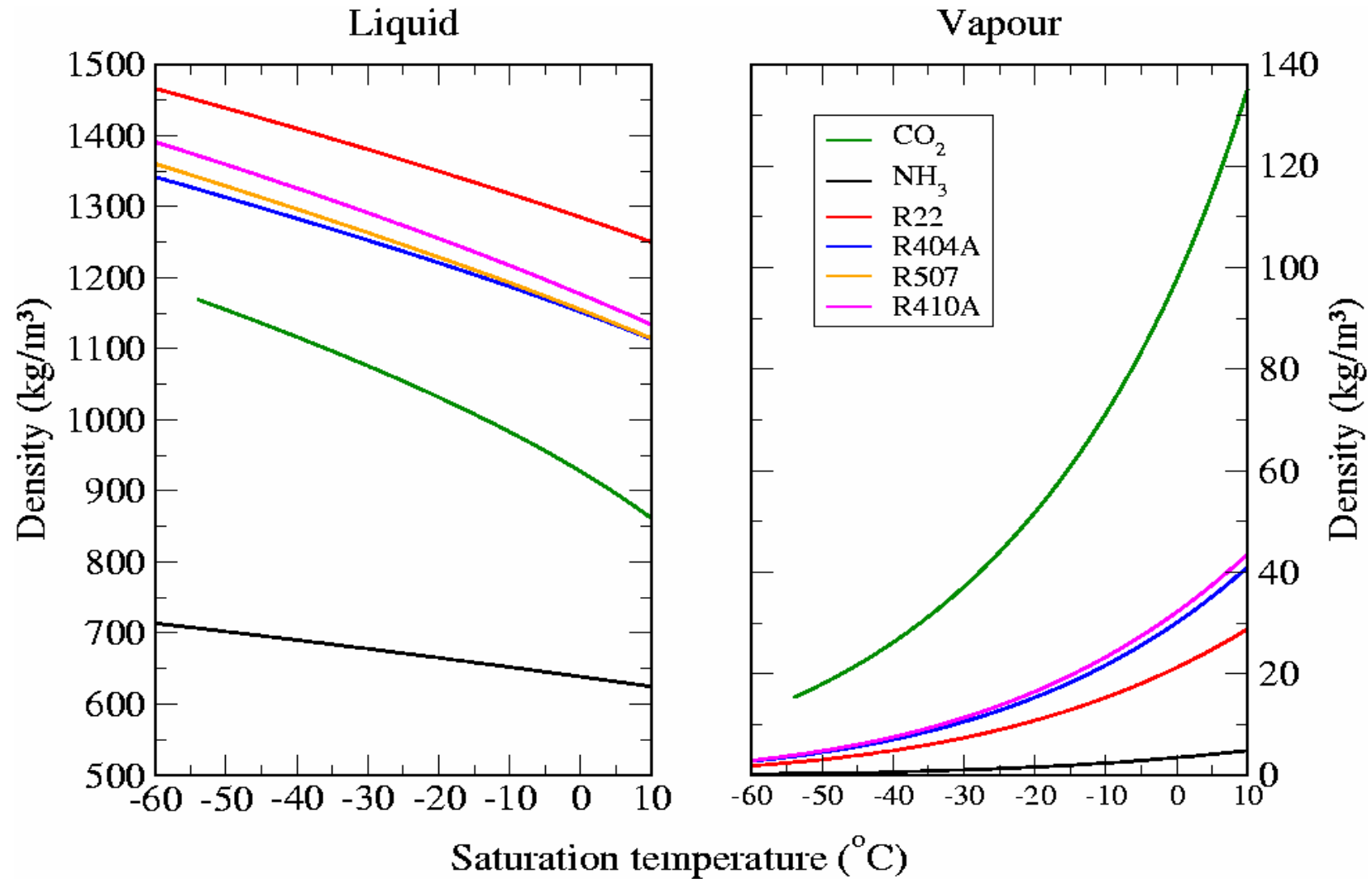
- Antall kretser/lengde rør

- Rørdimensjonering

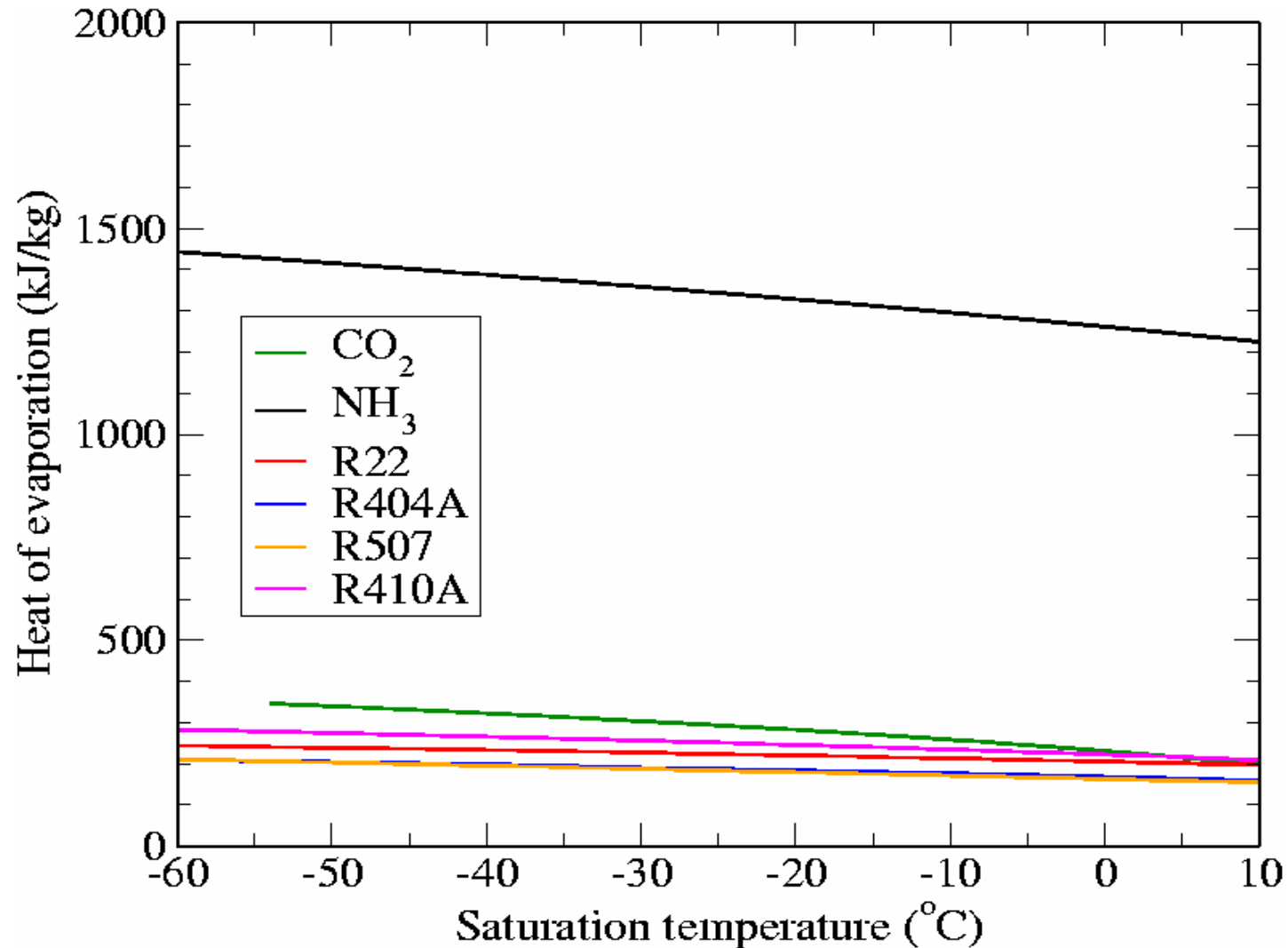
- Diameter, hastigheter

→ En kan tillate høyere trykktap for CO₂

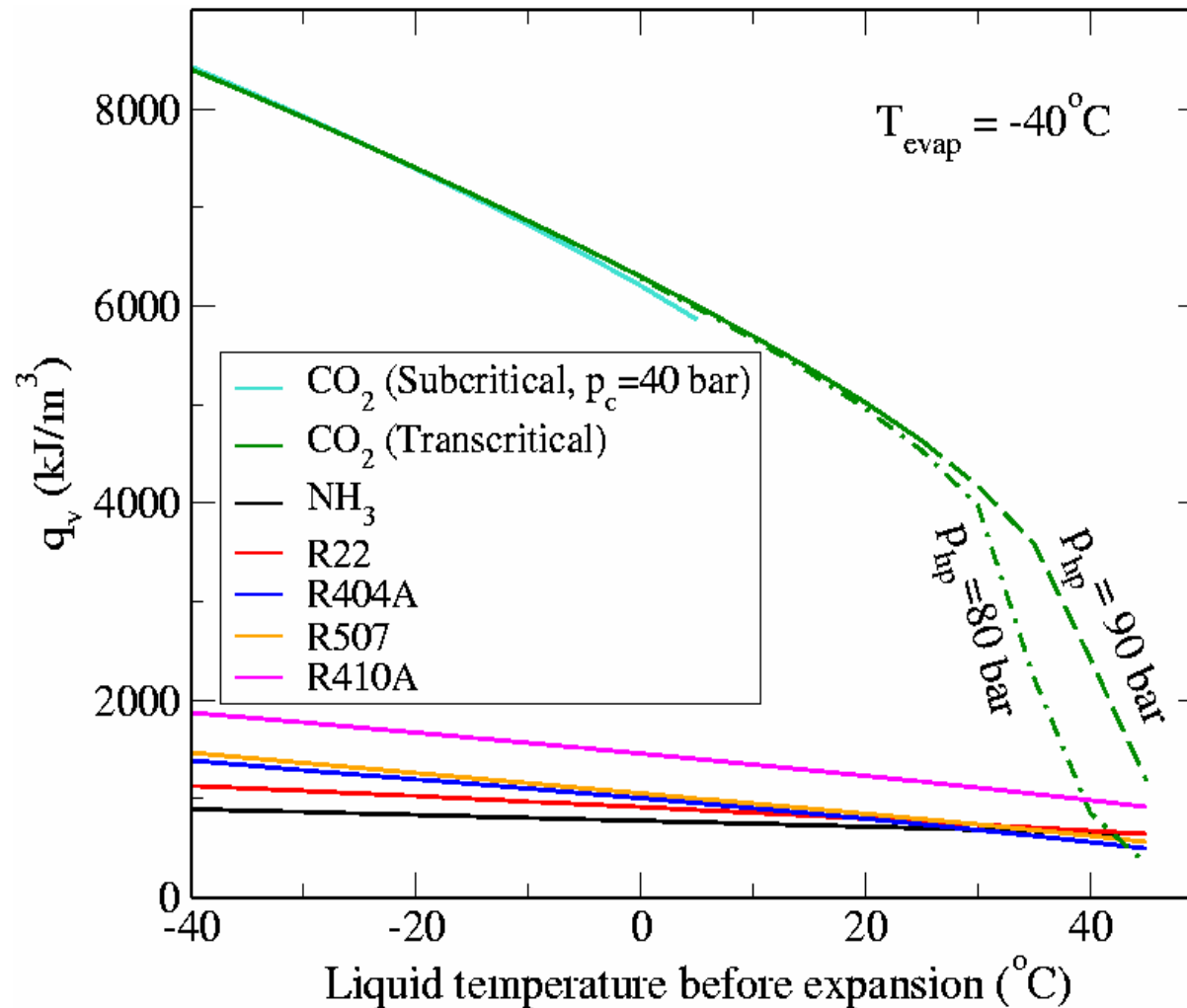
Tetthet



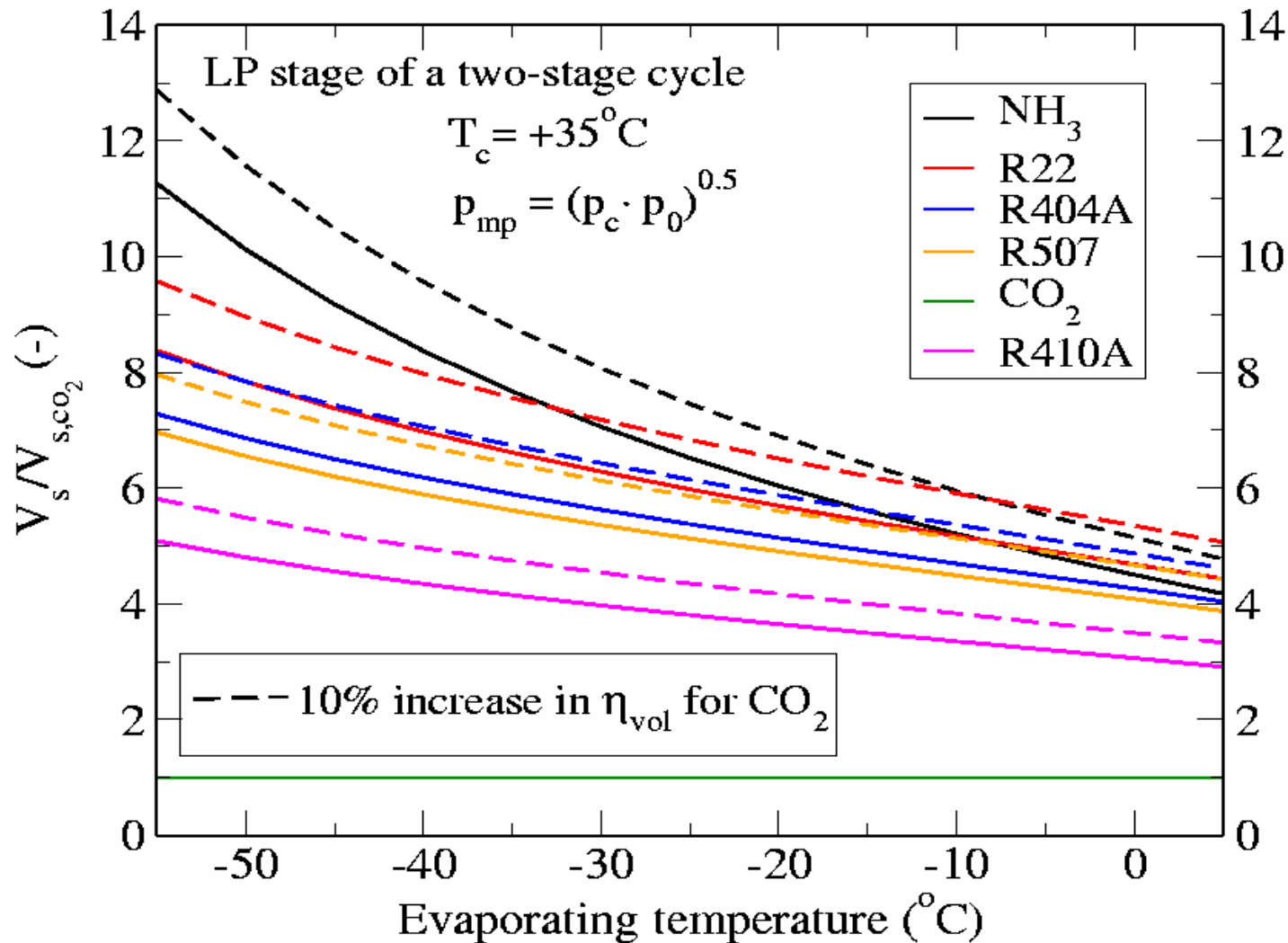
Fordampningsvarme



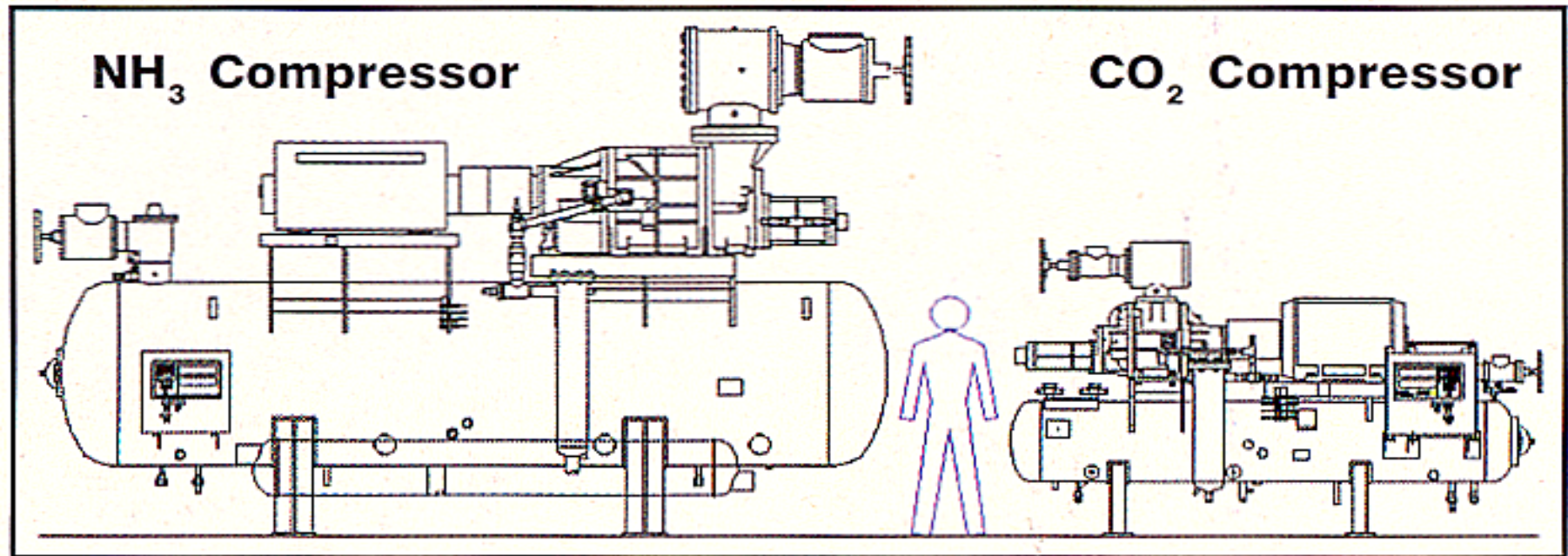
Volumetrisk kapasitet



Relativ kompressorstørrelse



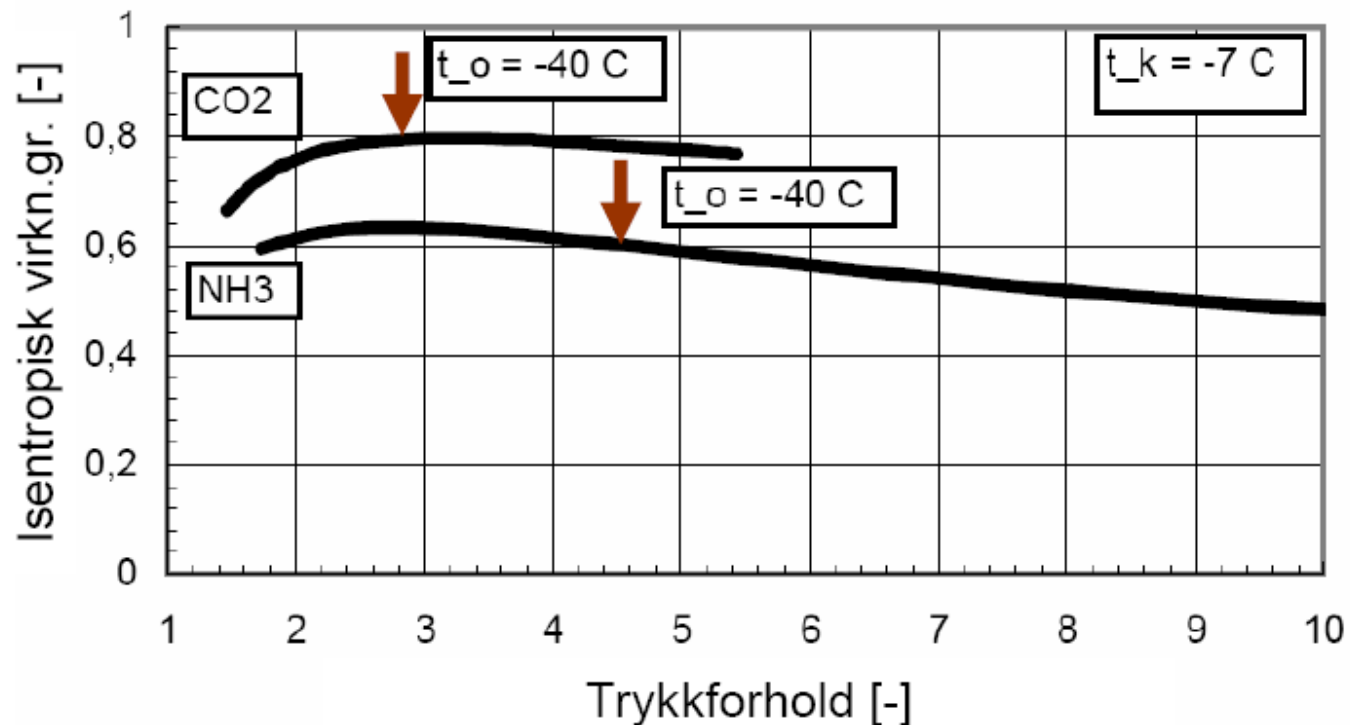
Kompressorstørrelse



ASHRAE Journal, September 2002

Kompressorvirkningsgrad

Eksempel – industrielle kompressor for CO₂ og ammoniakk



- Ca. 30% høyere isentropisk virkningsgrad (η_{is}) for CO₂-stempelkompressor

Sugeledninger ved $T_0 = -40^\circ\text{C}$

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

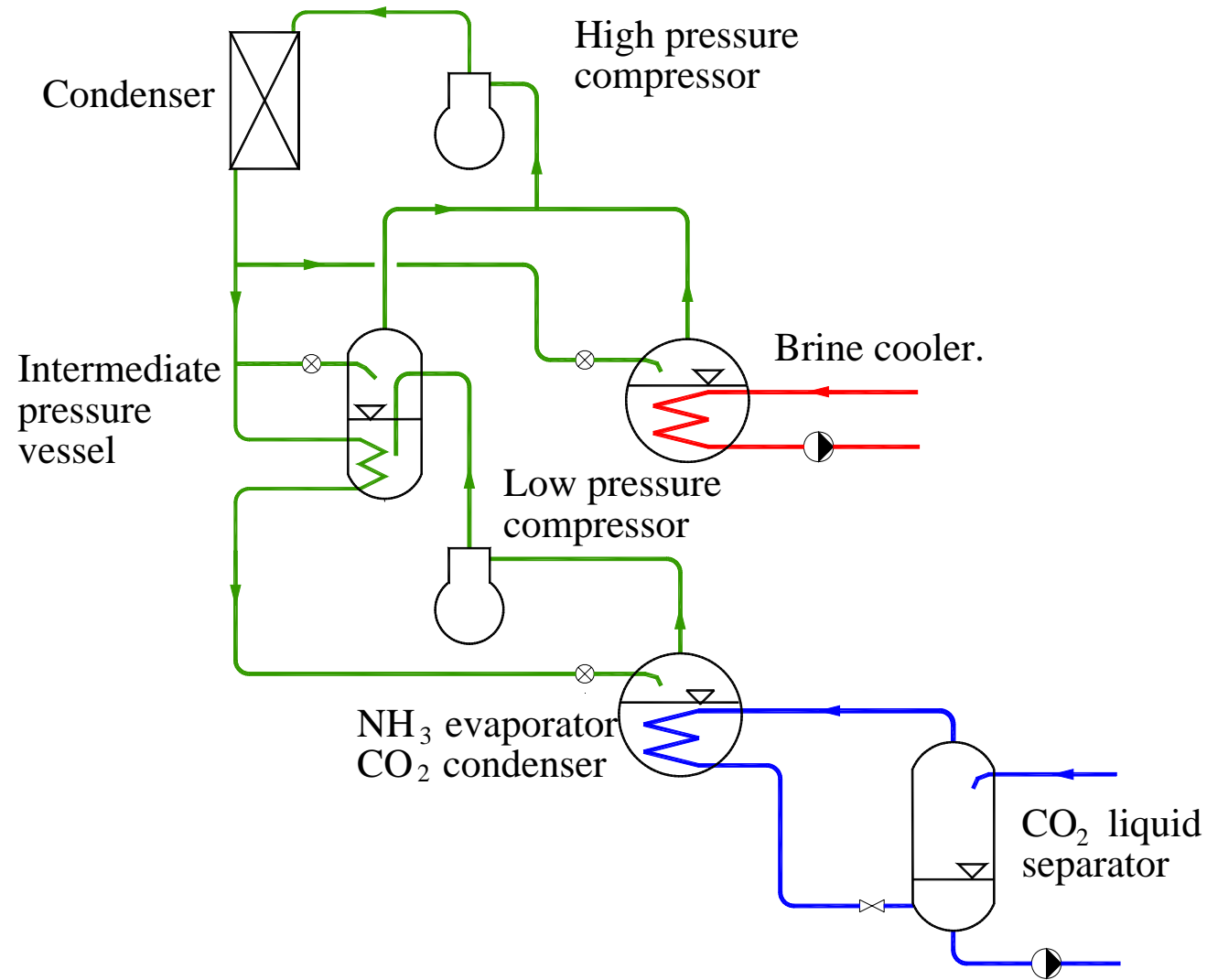
Kostnadsbesparelser på rørføring

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

Fryseanlegg



CO₂ AS SECONDARY REFRIGERANT



Totrinns NH₃

- Ikke vanlig med totrinns NH₃ 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%

CO₂ 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 \approx 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

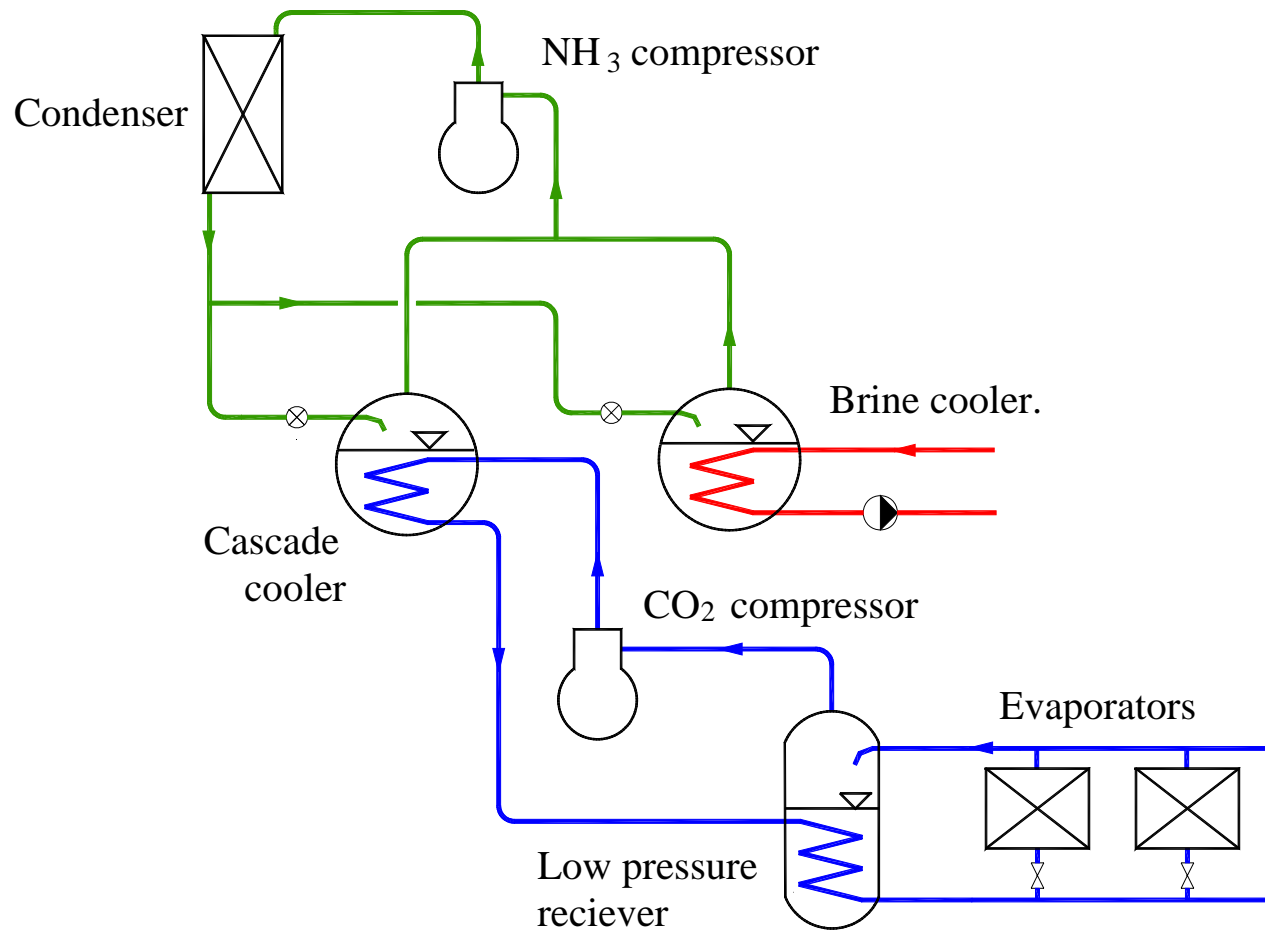
2 - Incl. motor efficiency 92 %

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)

CO₂ IN LOW TEMPERATURE CASCADE STAGE



Kaskadeanlegg NH₃ / CO₂



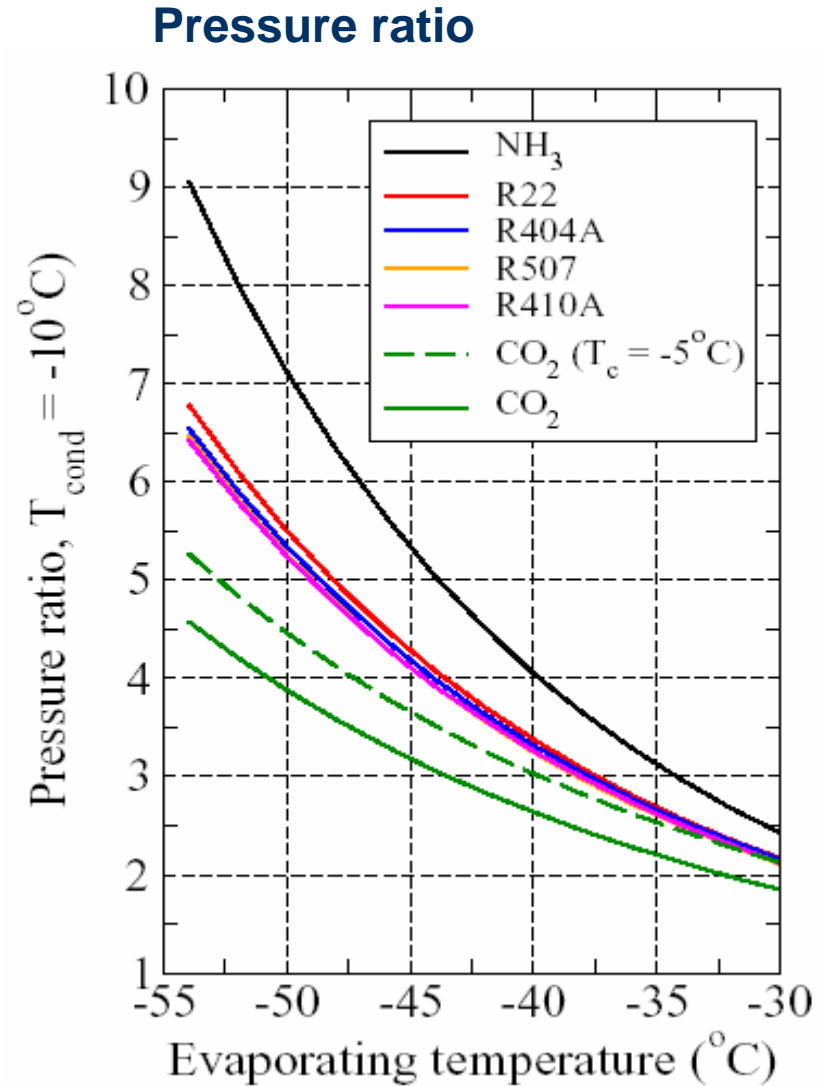
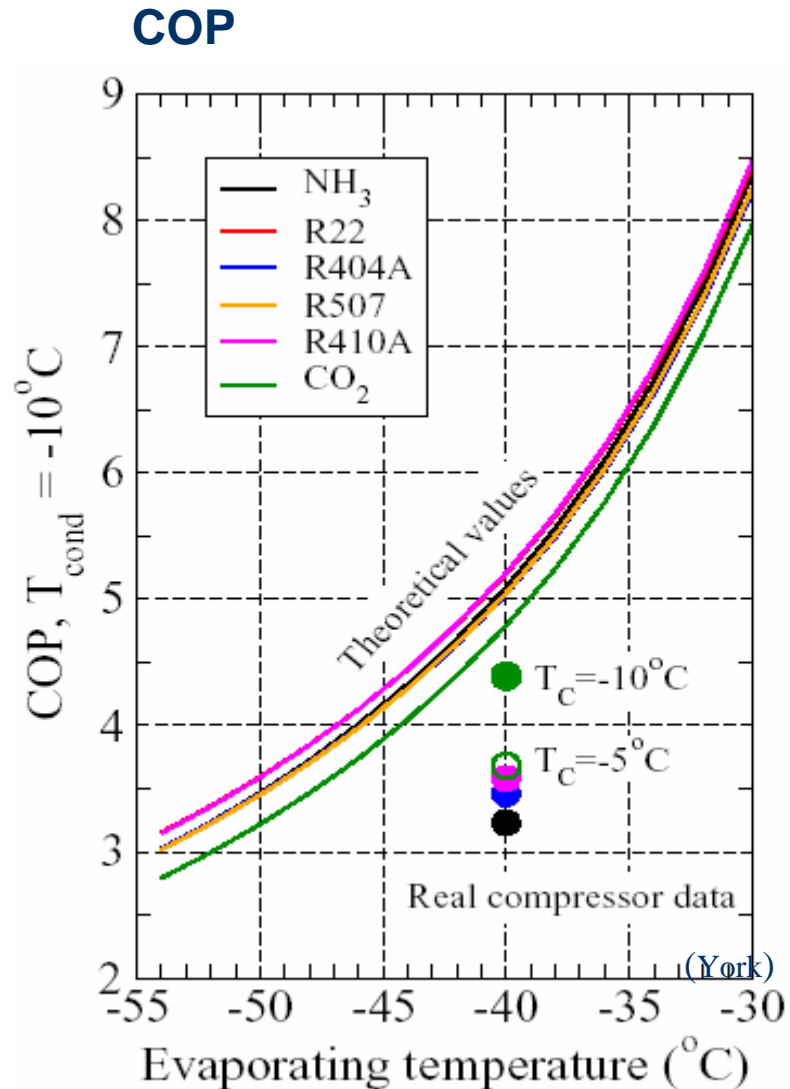
- Vanlig brukt i store landbaserte anlegg
- Installert på flere fiskebåter, bl.a. to i Norge
- Totalt kompressorvolum reduseres med ~70% (ref R22)
- Lav temperaturdifferanse i kaskadeveksler: ~ 3K
- Ved å redusere fordampningstemp fra - 40°C til -50°C, frysetiden reduseres med 20% og produksjonskapasiteten 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 NH₃ / CO₂

- Trykktapet for CO₂ 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



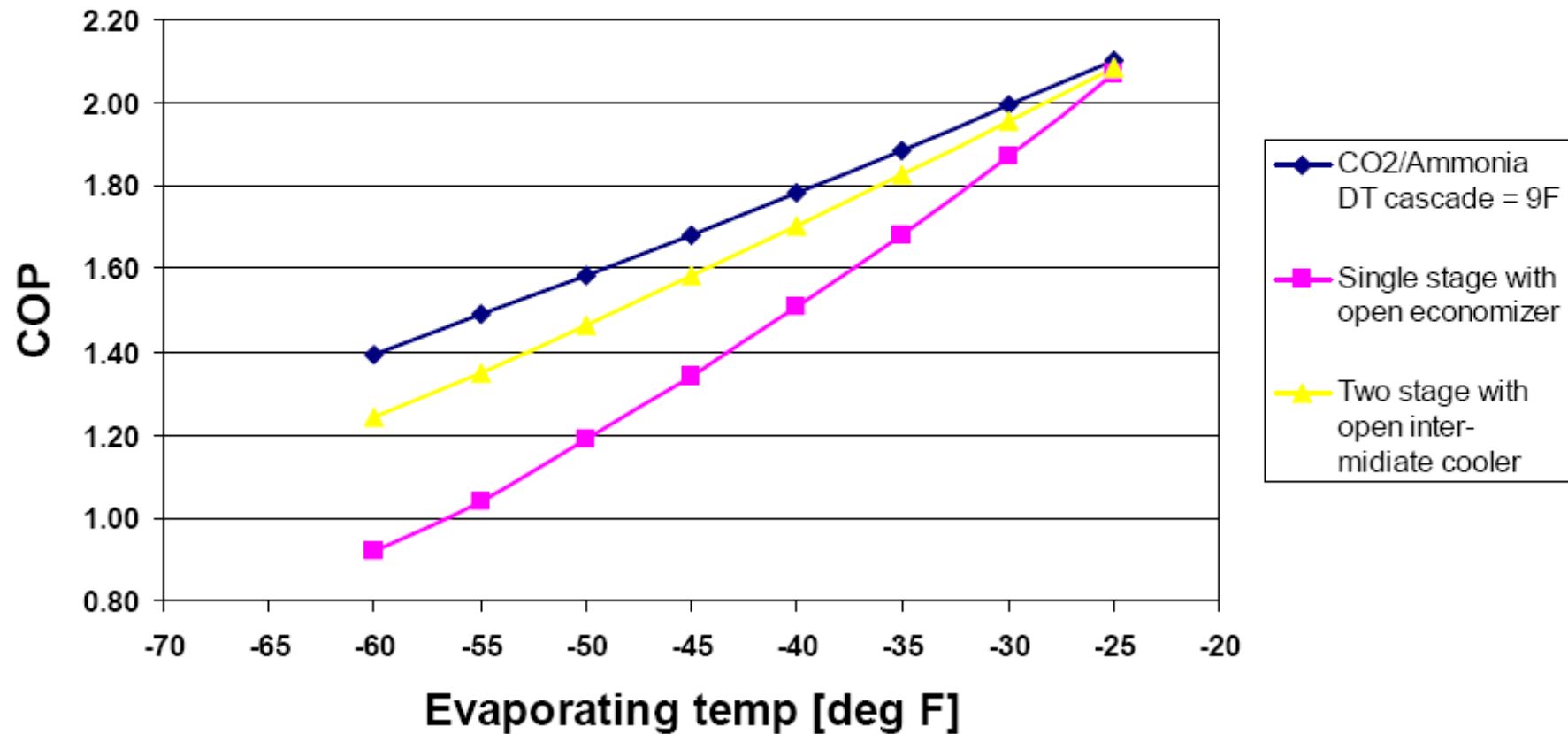
Hovedkomponenter kaskadesystem NH₃ / CO₂

- Kaskadevekslere tilgjengelig (alle kapasitetsklasser)
 - Rørkjel
 - Plate in shell
- NH₃
 - Kompressorer i alle størrelser (Stempel og skrue)
 - Varmevekslere (alle kapasitetsklasser)
 - Ventiler (alle kapasitetsklasser)
- CO₂
 - 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

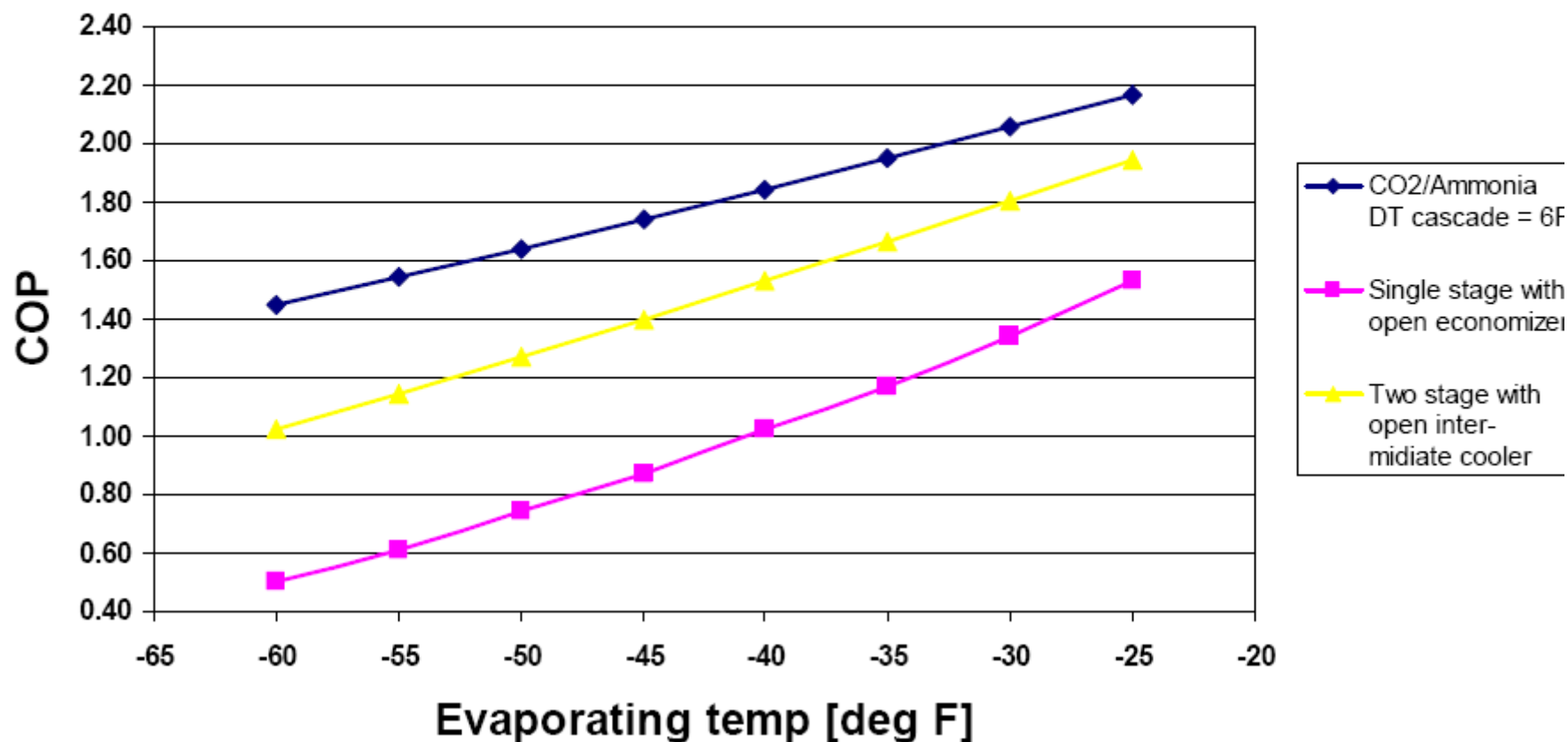
(Toogood & Christensen, c-dig Purdue USA 2006)

COP comparison of CO₂/Ammonia with conventional Ammonia Systems at full load



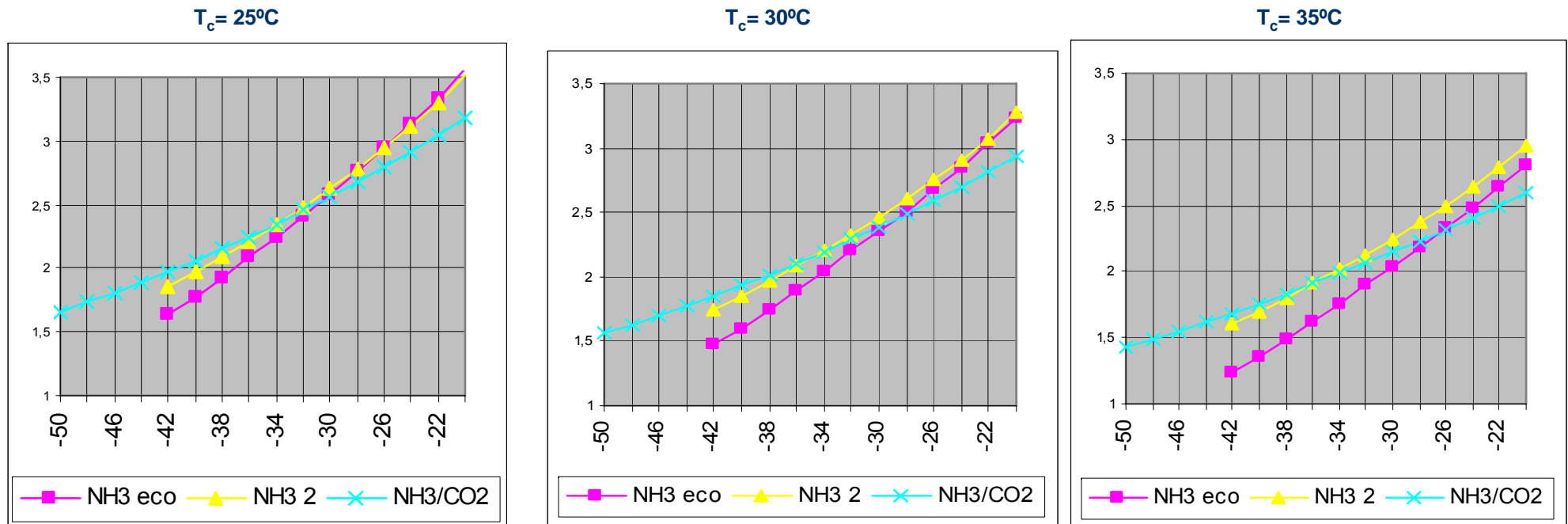
Eksempel fra fryselager USA - dellast

COP comparison of CO₂/Ammonia with conventional Ammonia Systems at 50% load



COP – Erfaring fra GTI Nederland

(Hoogendoorn, c-dig Hoofdorp, Nederland 2006)

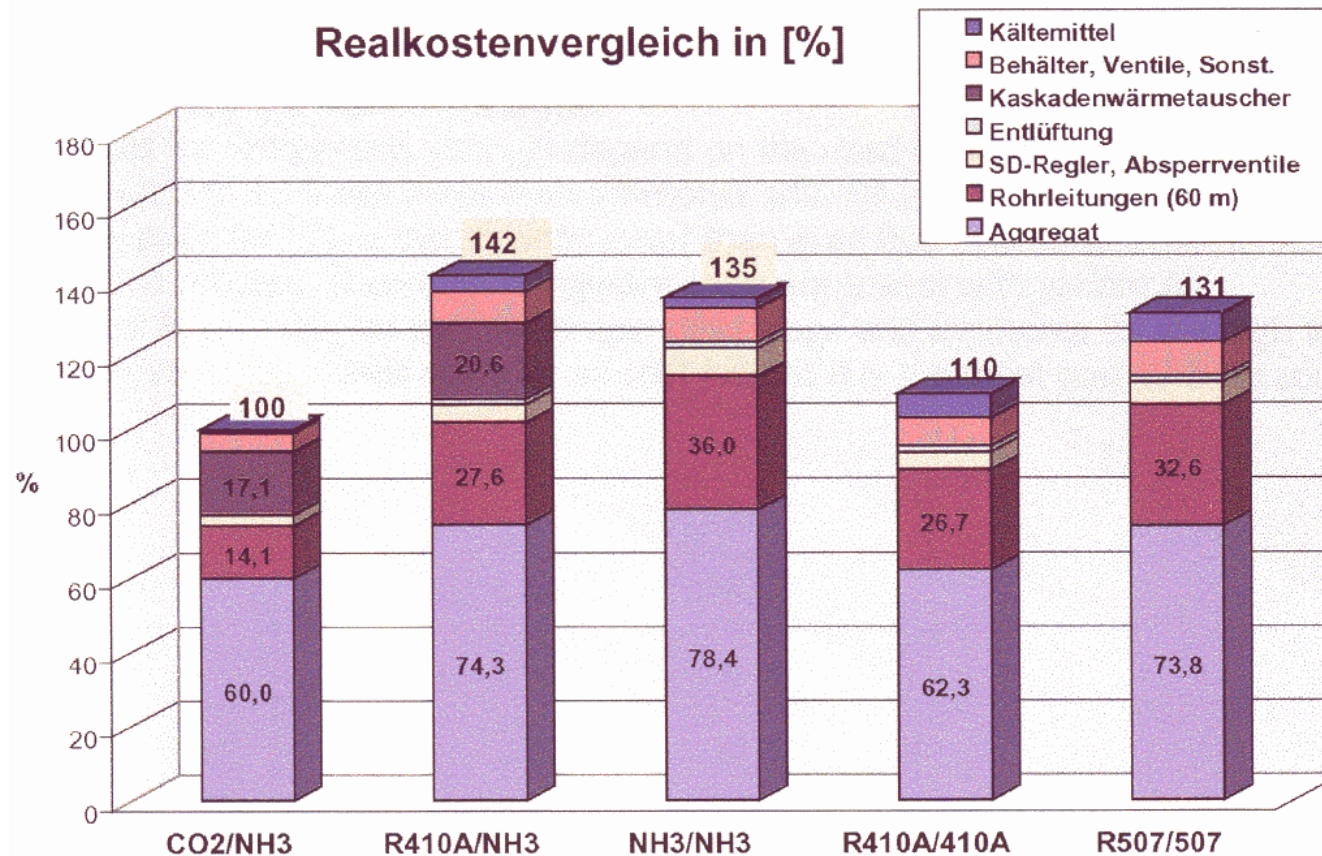


COP as a function of the evaporation temperature at different condensing temperatures

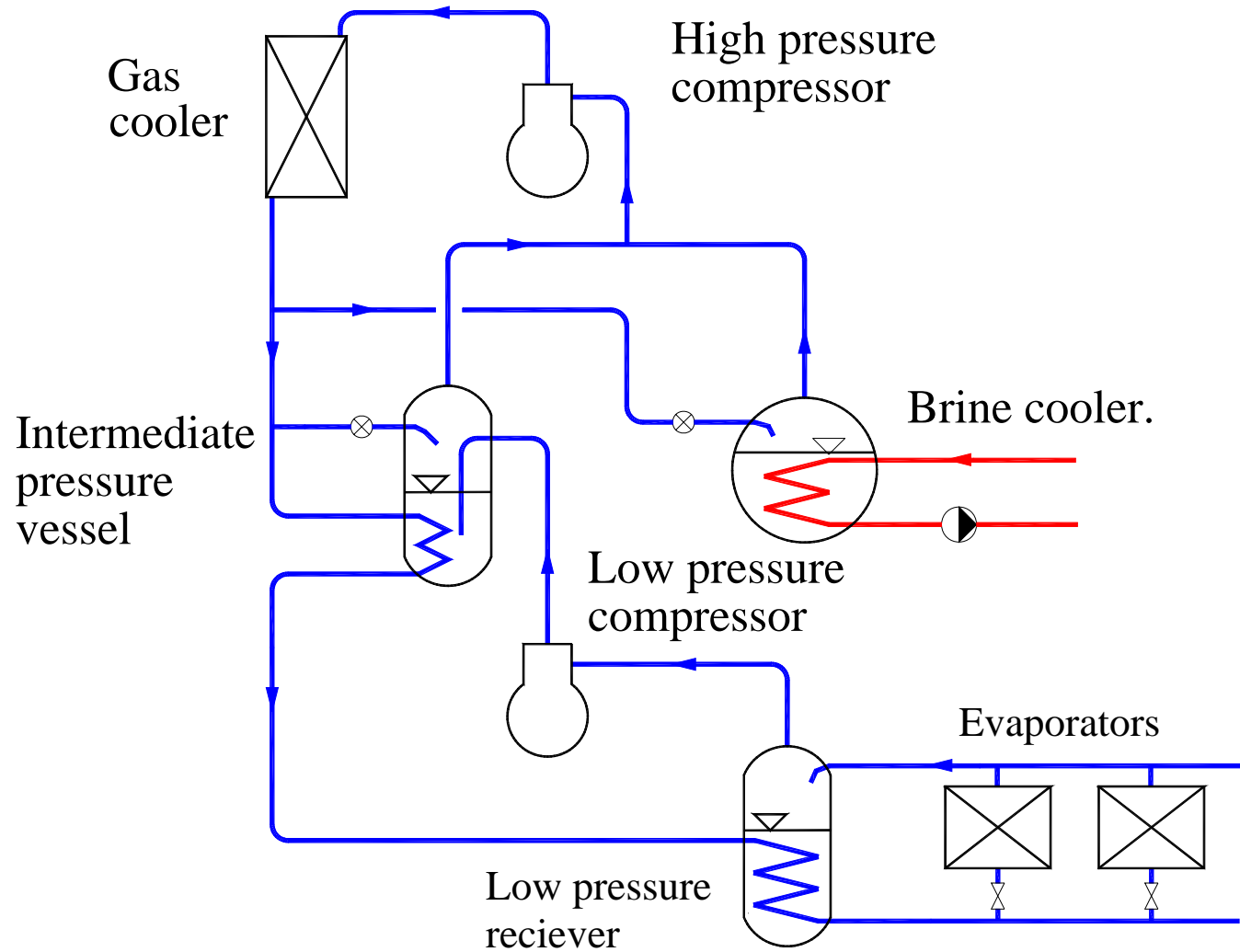


Eksempel på investeringskostnad

Kaskadesystem



TWO STAGE CO₂ SYSTEM.



CO₂ 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 NH₃)

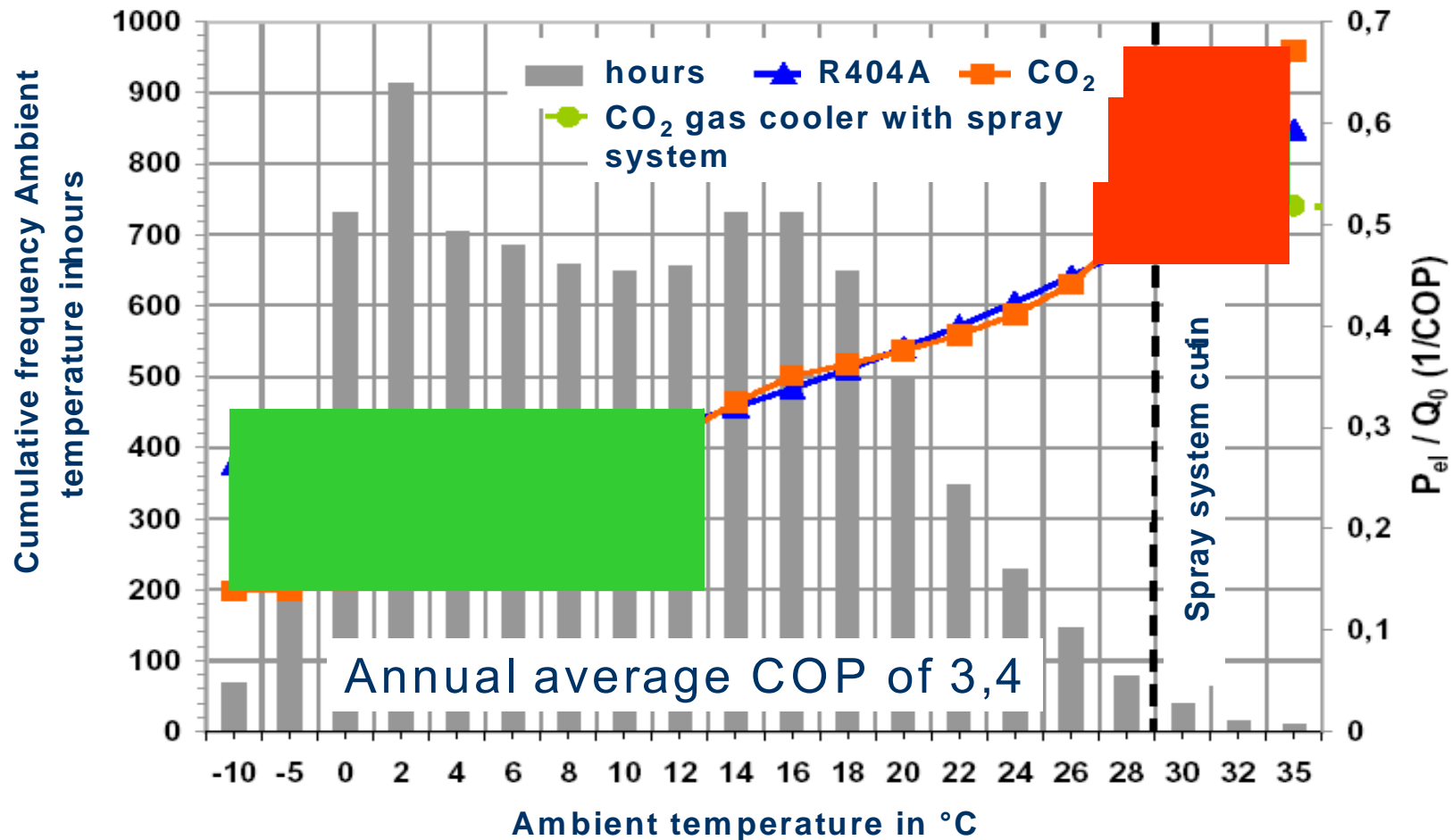
Utfordringer:

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

Energieeffektivitet for R404A/CO₂ DX

Linde – kommersiell kjøling

— CO₂ better than R404A — R404A better than CO₂



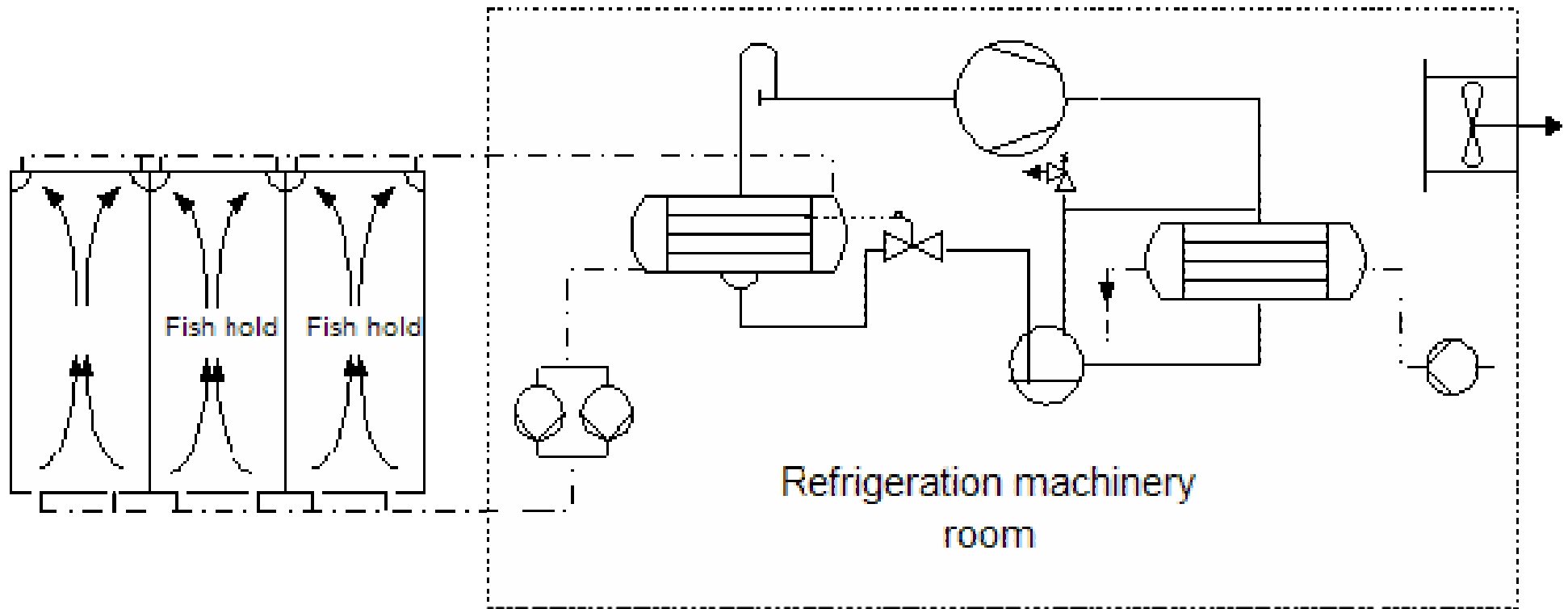
Ref: Bernd Heinbokel / Dr. Andreas Gernemann; C-dig Sept.05, Zürich

Hovedkomponenter CO₂

- 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 NH₃

RSW systemer med NH₃



RSW systemer med NH₃

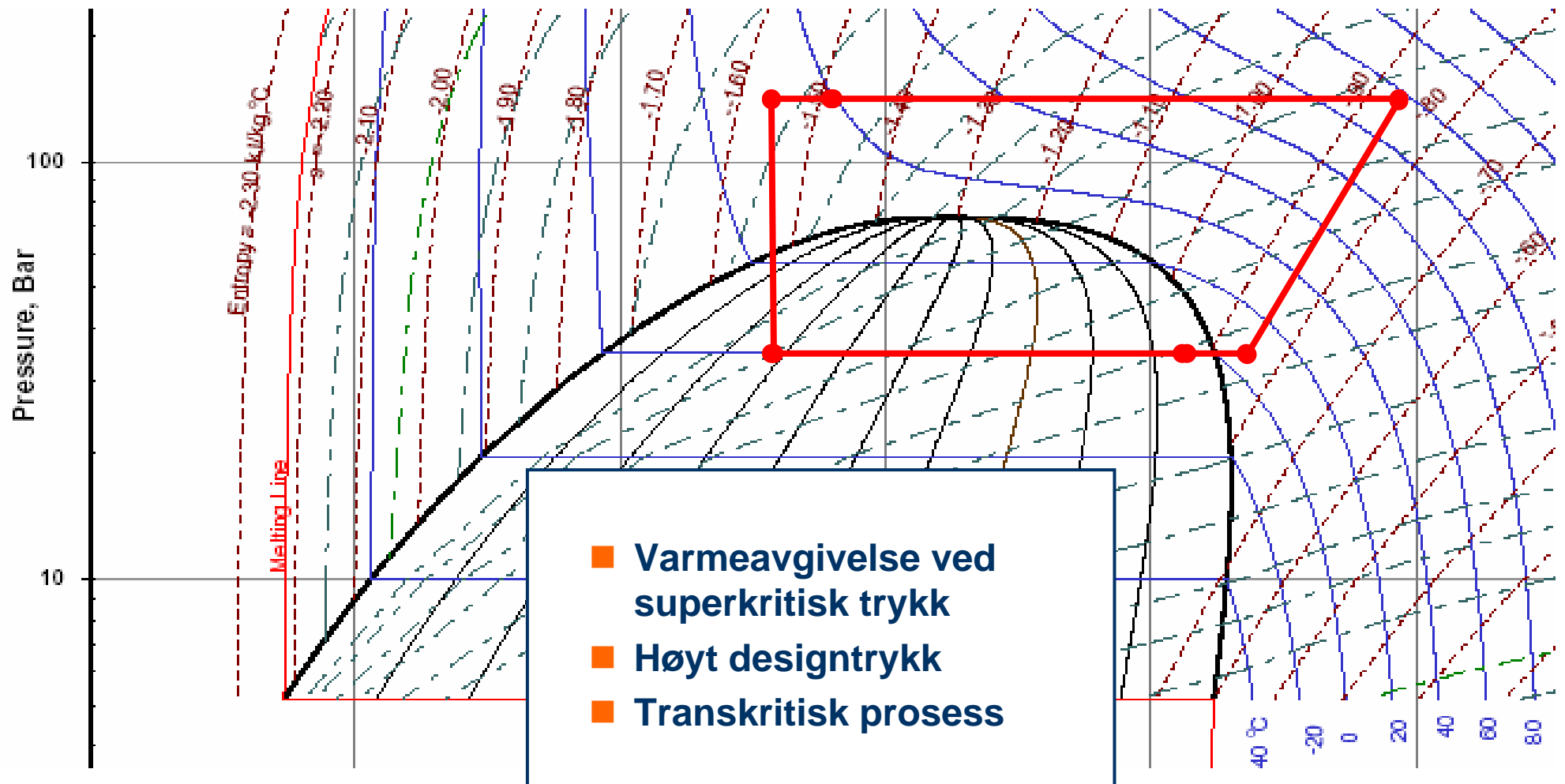
- "Hyllevare"
- Lang praktisk erfaring
- Redusert fylling (Spray, in tube,
- De fleste nye anlegg i norske båter bruker NH₃
- Komponenter er tilgjengelig i alle aktuelle kapasitetsklasser
- Energieffektivitet i praksis ca. 5-10% bedre enn R22
 - Teoretisk 2% bedre (-6°C/26°C)
 - Bedre kompressorvirkningsgrad og varmeoverføringsegenskaper
- Investeringskostnader 10-15% høyere enn for R22
 - Noe høyere kostnader for sikkerhetsutstyr
 - Gasstett maskinrom

→ Mer i senere foredrag

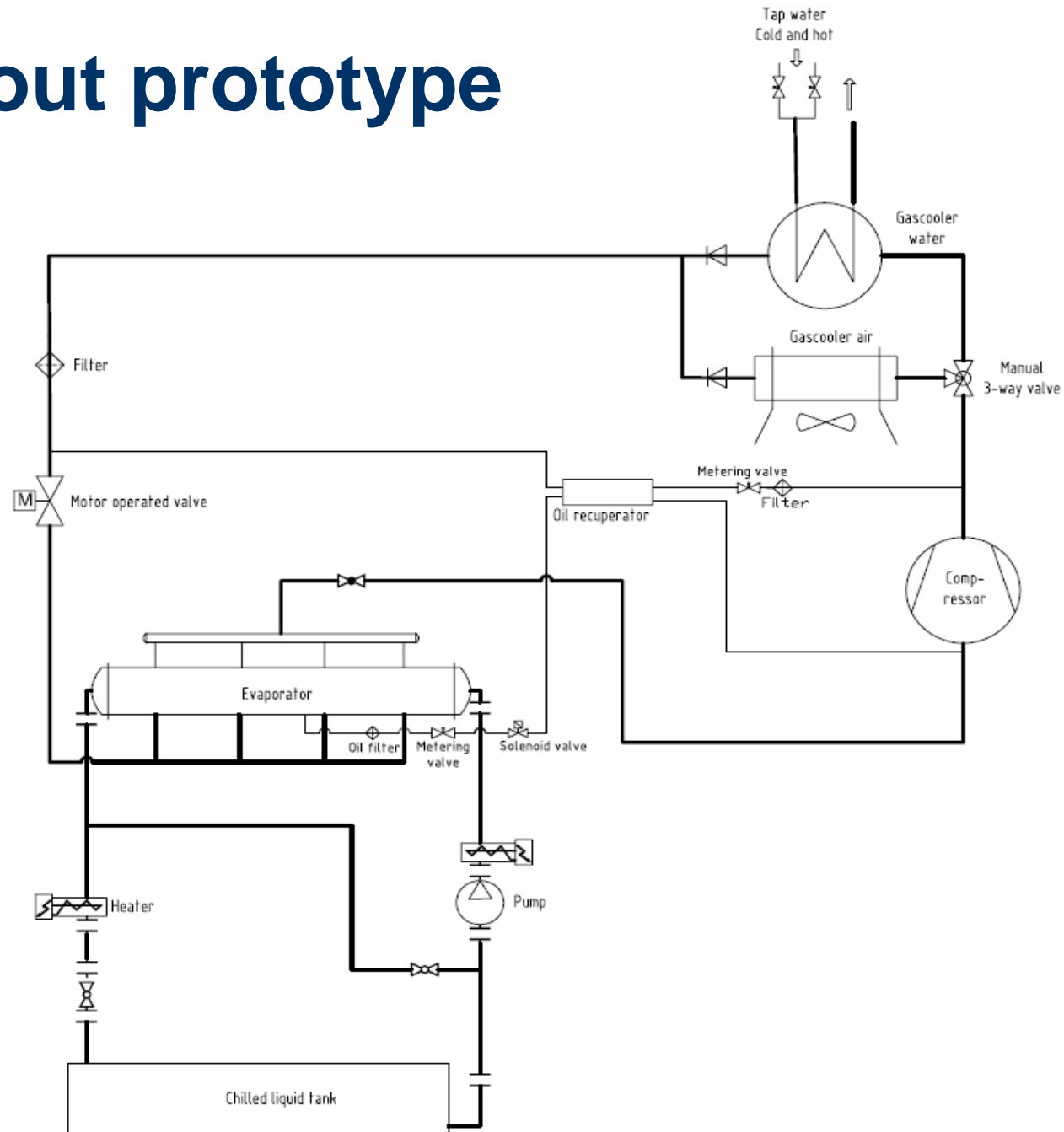
Prototyp CO₂ RSW



Trans-kritisk prosess med intern varmeveksling

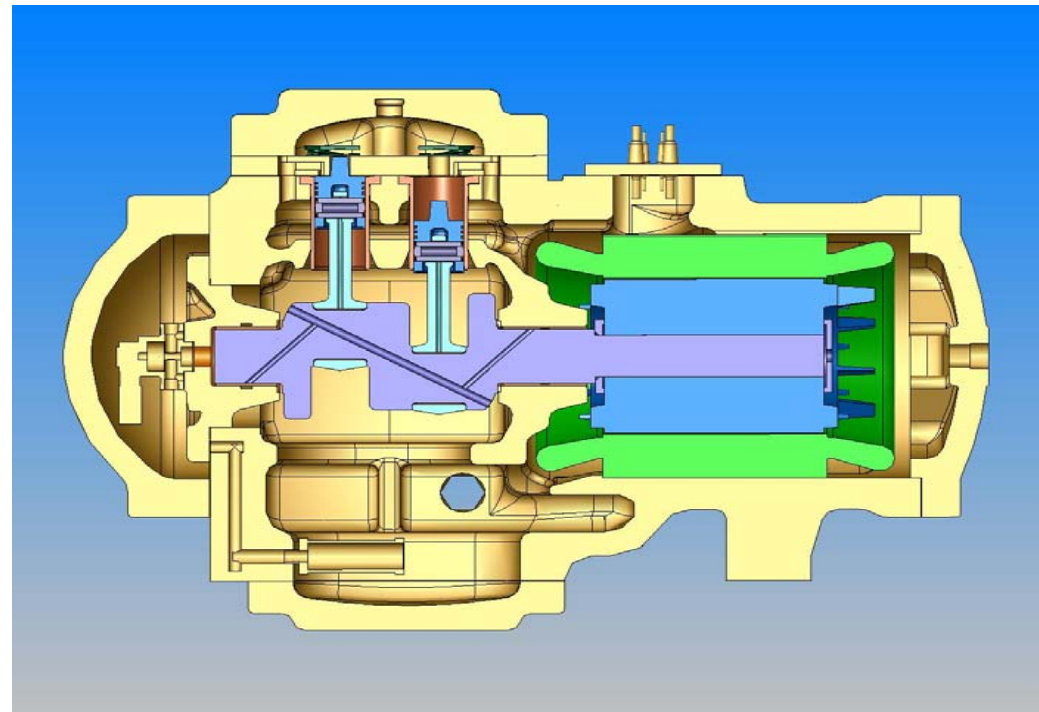


Layout prototype

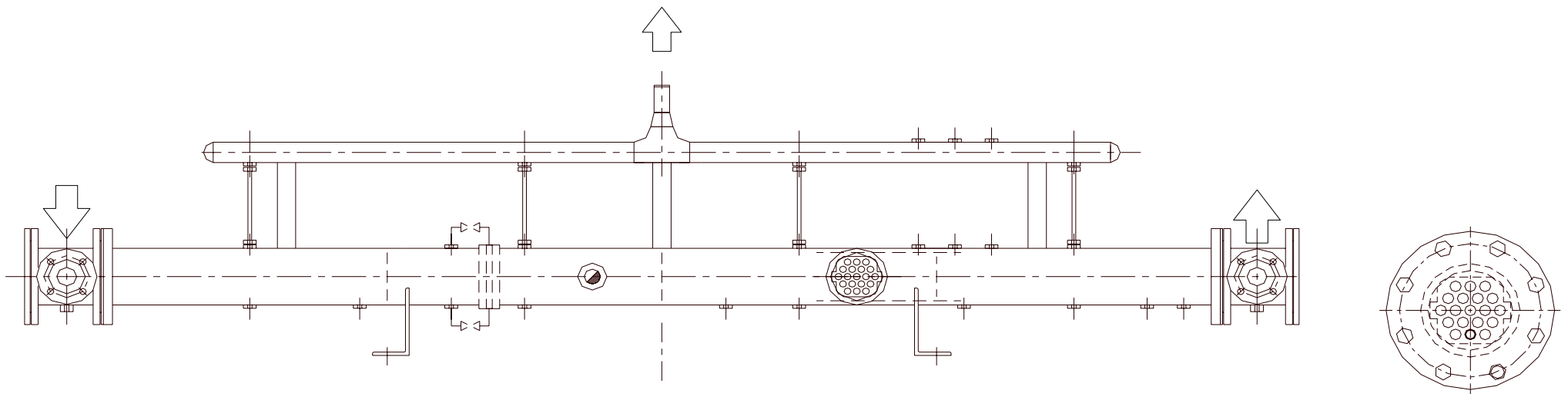


MYCOM Stempelkompressor

- Swept Volume: 12.5m³/hr-50Hz
15.0m³/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



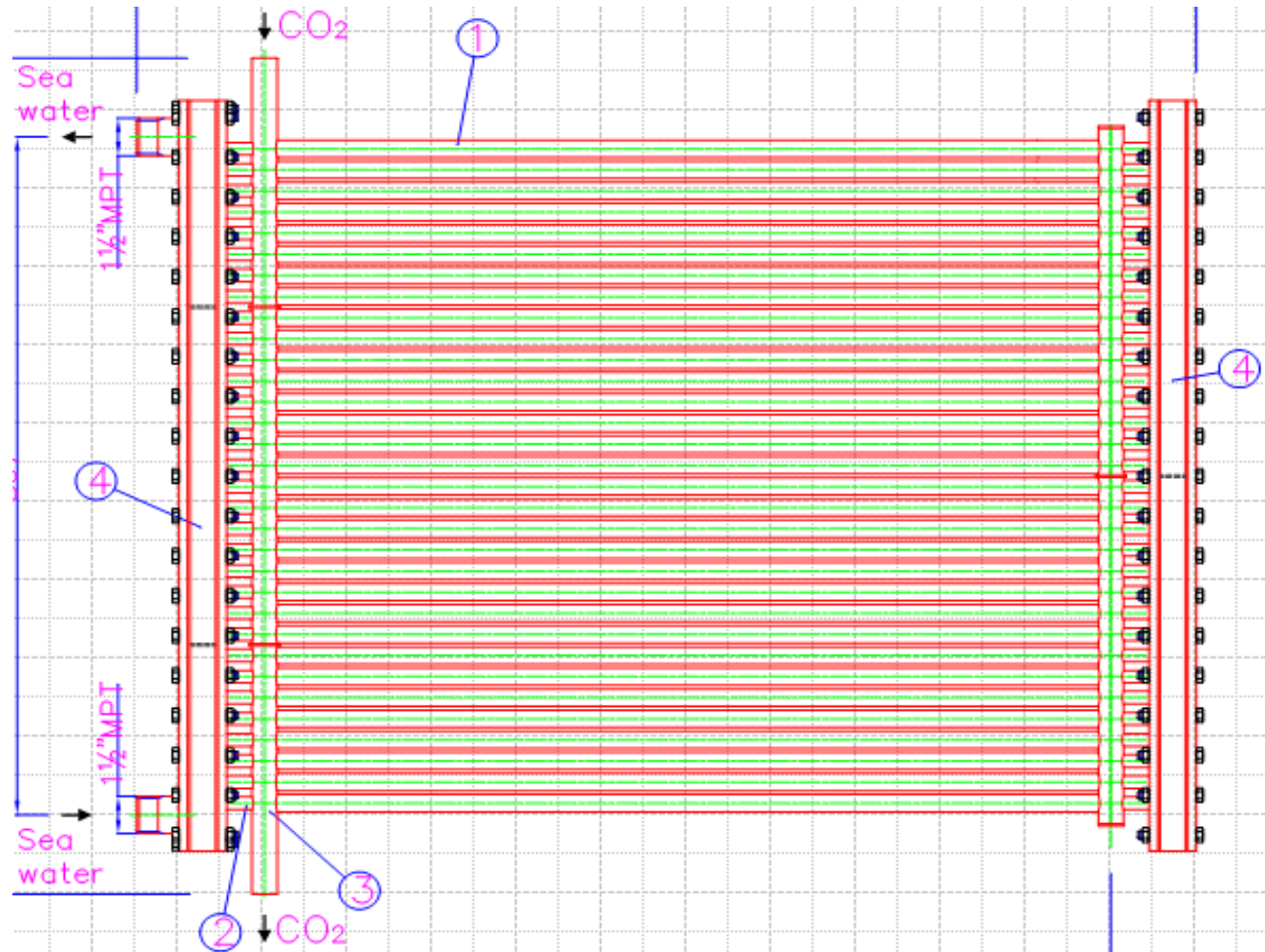
RSW - kjøler



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

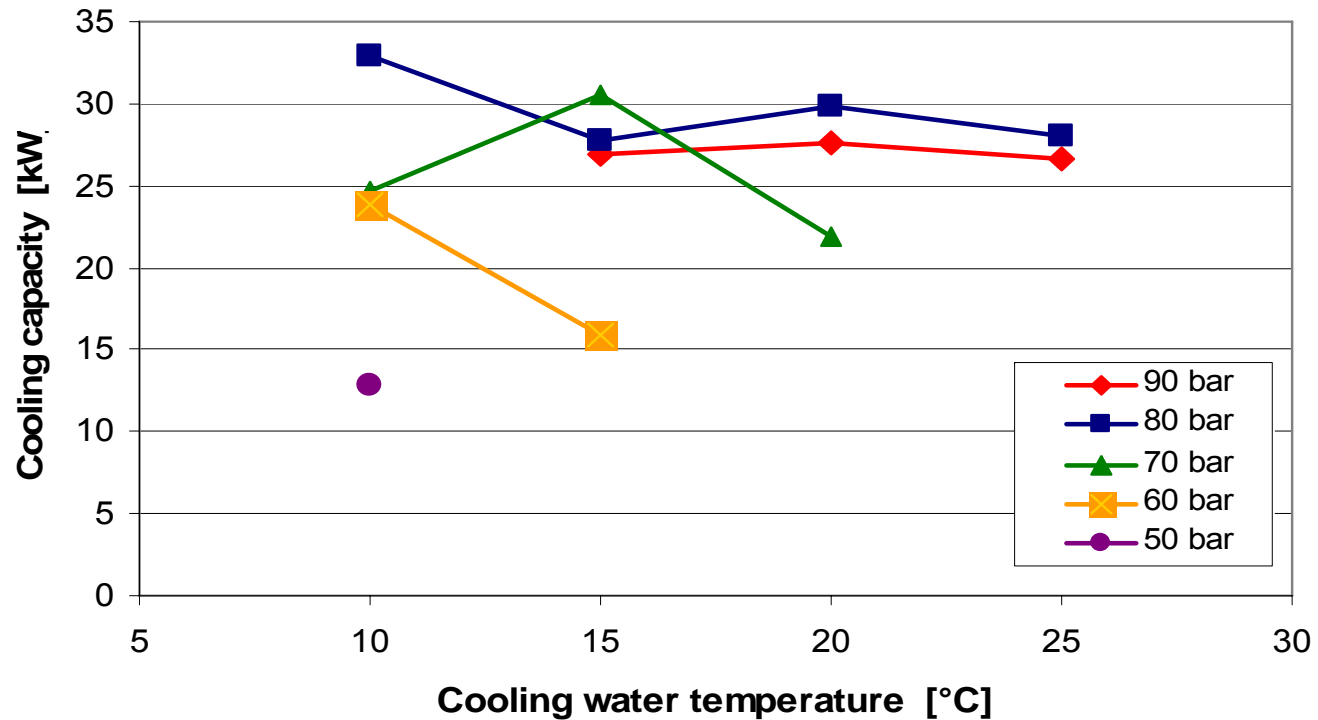


Vannkjølt gasskjøler





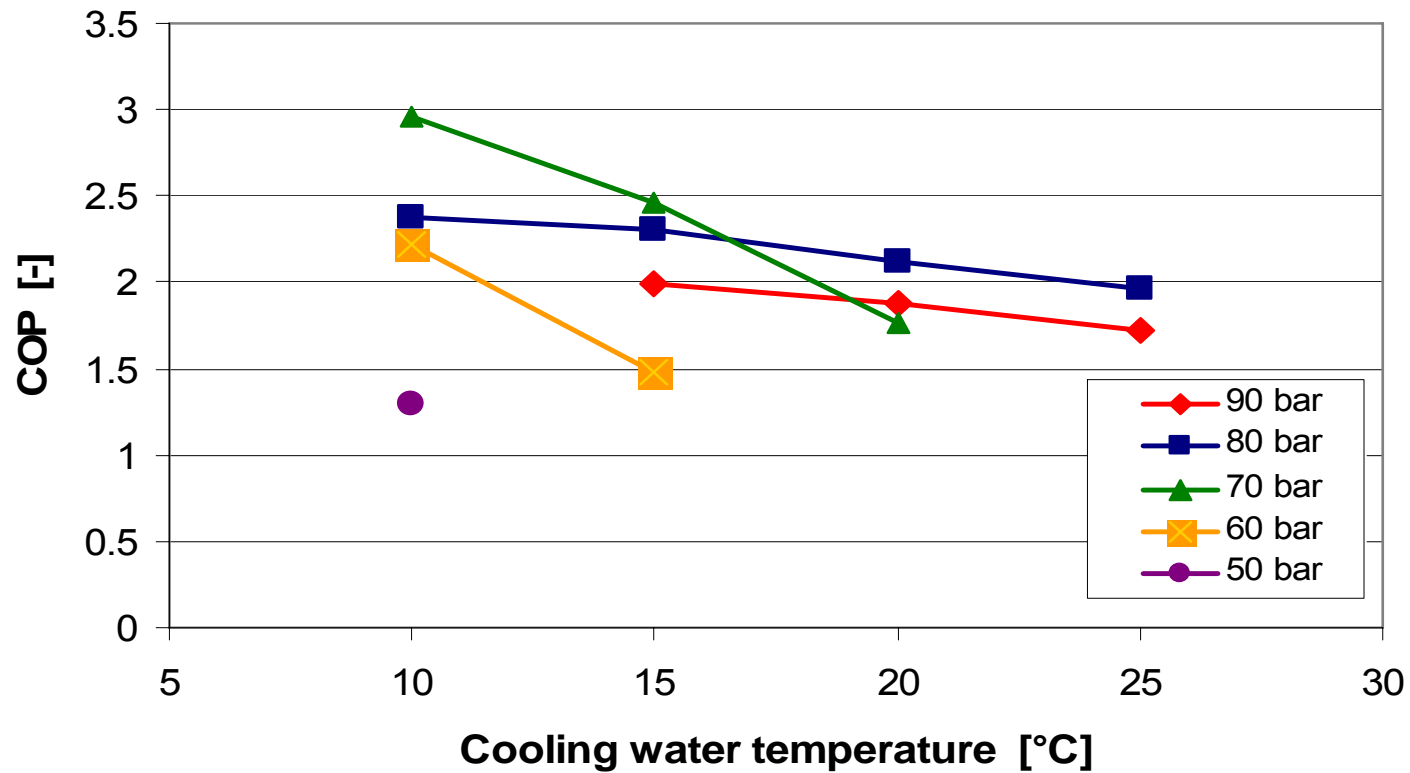
Kjølekapasitet - stasjonær drift



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 CO₂ 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