

TR A7486 - Åpen

# Rapport

## Kuldesystemer for pelagisk landindustri

Leveranse L4.1

### **Forfatter(e)**

Kristina Norne Widell

Ole Stavset

Tom Ståle Nordtvedt



SINTEF Energi AS

Postadresse:  
Postboks 4761 Sluppen  
7465 TrondheimSentralbord: 73597200  
Telefaks: 73597250energy.research@sintef.no  
www.sintef.no/energi  
Foretaksregister:  
NO 939 350 675 MVA

# Rapport

## Kuldesystemer for pelagisk landindustri

Leveranse L4.1

EMNEORD:  
Kuldeanlegg,  
Pelagisk fisk**VERSJON**

1

**DATO**

2015-05-20

**FORFATTER(E)**Kristina Norne Widell  
Ole Stavset  
Tom Ståle Nordtvedt**OPPDRAKSGIVER(E)**

FHF

**OPPDRAKSGIVERS REF.**

900915

**PROSJEKTNR**

502000326

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

11+ vedlegg

**SAMMENDRAG**

### Kuldesystemer

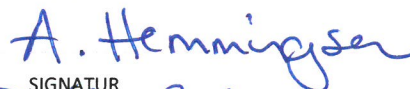
De fleste store industrielle kuldeanlegg benytter NH<sub>3</sub> som kuldemedium fordi dette er miljøvennlig og har gode termodynamiske egenskaper for varmeoverføring/transport. Imidlertid er normalkokepunktet (ved atmosfærisk trykk) relativt høyt (ca. -32 °C) og ved temperaturer som ofte kreves for å få tunnelene ferdig frosset for døgnsykluser, er mediet mindre effektivt. Anleggene er typisk driftet i relativt korte sesonger og da også ofte med varierende frysebehov avhengig av tilgangen på råstoff. Fokus ved bygging av anleggene har vært høy kapasitet og lave investeringer i energieffektivitet samt gode styre- og reguleringsløsninger. For videre effektivisering og tilpasning av frysetider vil en utvikling med bruk av CO<sub>2</sub> som kuldemedium være aktuelt. Dette gjelder spesielt hvor temperaturer under -40/-43 °C er krevd for å oppnå tilstrekkelig rask innfrysing. Samtidig vil eksisterende NH<sub>3</sub> anlegg kunne utnyttes for vanlige frysetemperaturer og som øverste medium i en kaskadeløsning (to trinns anlegg).

**UTARBEIDET AV**

Ole Stavset

**SIGNATUR****KONTROLLERT AV**

Anne Karin Hemmingsen

**SIGNATUR****GODKJENT AV**

Petter E. Røkke

**SIGNATUR****RAPPORTNR**

TR A7486

**ISBN**

978-82-594-3624-5

**GRADERING**

Åpen

**GRADERING DENNE SIDE**

Åpen

# Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1	2015-05-20	Første versjon

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Introduksjon.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Pålitelig energiovervåkingsopplegg .....</b>	<b>4</b>
	2.1 Hva bør man måle og hvorfor? .....	4
<b>3</b>	<b>Vurdere bruk av kaskadesystem.....</b>	<b>4</b>
	3.1 Modelica-simulering .....	6
<b>4</b>	<b>Kontaktfrysing Skaginn .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Diskusjon og konklusjon .....</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Videre arbeid .....</b>	<b>10</b>
	6.1 hXsim – muligheter .....	10
	6.2 Modelica .....	10
	6.3 SimFlow.....	10
	6.4 Målemetoder og -utstyr.....	11
	6.5 Avriming.....	11
<b>7</b>	<b>Referanser.....</b>	<b>12</b>

## BILAG/VEDLEGG

---

[Skriv inn ønsket bilag/vedlegg]

---

## 1 Introduksjon

Denne rapport er leveranse L4.1 i prosjektet "Teknologi for effektiv og bærekraftig innfrysing av pelagisk fisk".

De fleste store industrielle kuldeanlegg benytter  $\text{NH}_3$  som kuldemedium fordi dette er miljøvennlig og har gode termodynamiske egenskaper for varmeoverføring/transport. Imidlertid er normalkokepunktet (ved atmosfærisk trykk) relativt høyt (ca.  $-32\text{ °C}$ ) og ved temperaturer som ofte kreves for å få tunnelene ferdig frosset for døgnsykluser, er mediet mindre effektivt. Dette skyldes at trykket blir lavt og vekten av volumet kompressorene leverer avtar mye slik at massen av medium og derved kuldeytelsen blir svært redusert. Energieffektiviteten for systemet avtar også ved at trykkforholdet økes mye og systemtapene økes. I tillegg vil det betydelige undertrykket i kuldesystemets lavtrykkside ofte gi inntrenging av luft. Dette vil øke trykket i kondensatorene og reduserer effektiviteten av disse. Metodene og systemene for fjerning av luft er oftest krevende å bruke, lite effektive og/eller lite driftet og ofte årsak til høyt energiforbruk.

Anleggene er typisk driftet i relativt korte sesonger og da også ofte med varierende frysebehov avhengig av tilgangen på råstoff. Fokus ved bygging av anleggene har vært høy kapasitet og lave investeringer i energieffektivitet samt gode styre- og reguleringsløsninger. For videre effektivisering og tilpasning av frysetider vil en utvikling med bruk av  $\text{CO}_2$  som kuldemedium være aktuelt. Dette gjelder spesielt hvor temperaturer under  $-40/-43\text{ °C}$  er krevd for å oppnå tilstrekkelig rask innfrysing. Samtidig vil eksisterende  $\text{NH}_3$  anlegg kunne utnyttes for vanlige frysetemperaturer og som øverste medium i en kaskadeløsning (to trinns anlegg).

## 2 Pålitelig energiovervåkingsopplegg

### 2.1 Hva bør man måle og hvorfor?

Hvor mye og hvilke data som logges varierer fra anlegg til anlegg. Generelt virker det å være lite overvåking av effekt- og energibruk. Det gjør at det kan være vanskelig å se "energisluk", men også utfordrende å se effekten av forskjellige energieffektiviserende tiltak. I eksisterende anlegg kan det være vanskelig å få plass i elskap for å installere målere, men for nye anlegg bør det være med.

Det finnes systemer for overvåking av energibruk, som i tillegg kan gi forbedringsforslag. Det er viktig å skille energibruk til kuldeanlegg og vifter fra resten av fabrikk. Da går det å få et mer nøyaktig tall på spesifikk energibruk per tonn produkt, hvilket kan sammenlignes.

Det er vanlig å ha måling av lufttemperatur i tunnelen og styre driften delvis av denne. Det kan i tillegg være bra å ha noen flere sensorer for måling av lufttemperaturer. Hvis sensorer plasseres på forskjellige høyder, før og etter produkt samt etter fordampere, kan det gi indikasjoner på skjevfordeling og rim og isdanning på fordamperne.

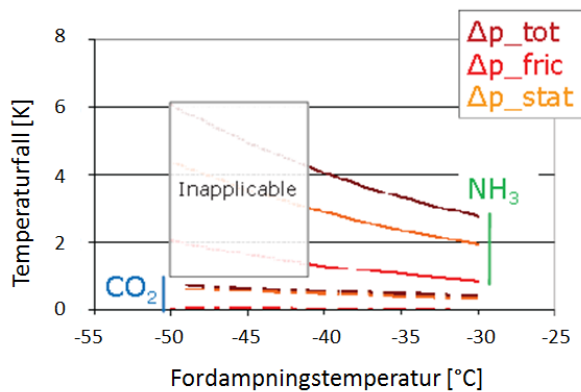
Innstikksmålinger på ferdigfrosne produkter gjøres også, men med varierende nøyaktighet. Målinger (kapittel 7.4 i leveranse 3.1 "Frysemetoder for pelagisk fisk") har vist at målinger fra siden av en pakke gir  $1,5-2,5\text{ °C}$  lavere temperatur enn senter av esken. Det er mest praktisk å måle fra siden, men da må dette tas hensyn til. I tillegg bør det heller ikke gjøres målinger i tilfeldige reoler, men kjente "problemprodukter". De er som oftest plassert høyt opp og nært fordamperne. For å finne riktig plass må man i første omgang gjøre mange målinger, og deretter velge ut noen plasser. Målinger har vist at med samme type produkt og samme driftsmønster blir temperaturforløpet for en gitt plassering nokså likt.

For å få lave nok produkttemperaturer og lavt energibruk er det viktig å tilpasse driften til type og mengde produkt, men for å få det til må man ha oversikt over hva som skjer under innfrysingen.

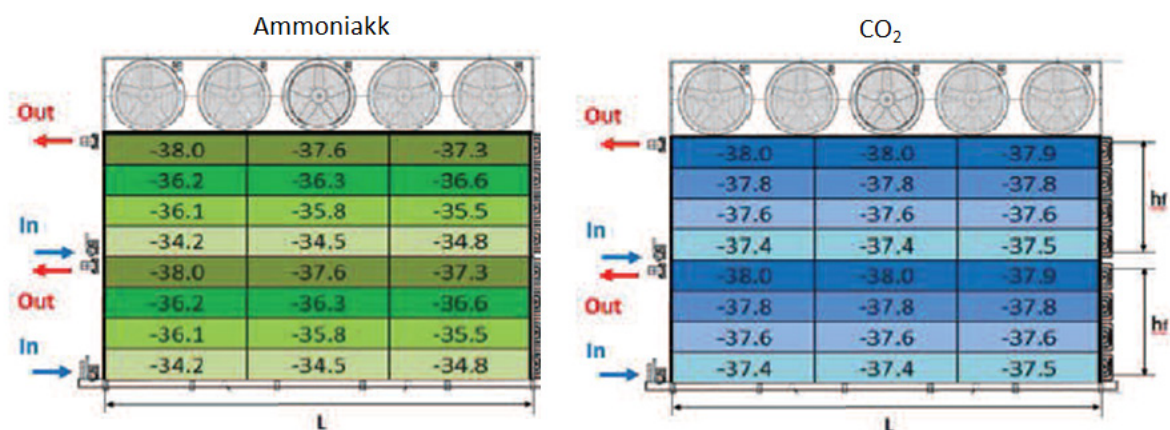
## 3 Vurdere bruk av kaskadesystem

Ammoniakk har relativt høy normalkokepunkt ( $-33,3\text{ °C}$ ), det vil si den temperaturen hvor ammoniakken fordampes ved atmosfærisk trykk. Dette begrenser hvor lav temperatur man kan ha i kuldeanlegget og frysetunnelene. Ved lavere fordampningstemperatur enn normalkokepunktet vil det være undertrykk på fordampersiden, og luft/fuktighet vil kunne trenge inn i anlegget og forårsake driftsproblemer. En annen

ulempe er at temperaturene i fordamperne kan bli ujevn i ammoniakkanlegg. Årsaken til dette er at et trykktap i fordamperne gir større utslag på temperaturen for ammoniakk enn for CO<sub>2</sub>. 0,5 bar i trykktap gir ca. 1 K temperaturforskjell for CO<sub>2</sub>, men ca. 8 K for ammoniakk. Desto lavere fordampningstemperatur man har, desto større blir temperaturfallet på grunn av trykktapet, se Figur 3.1. På grunn av temperaturfallet vil temperaturen ved innløpet til fordamperen være høyere enn sugegasstemperaturen ved kompressorene. Gukelberger (2014) beregnet temperaturfallet i en todelt fordamper til 3,8 K ved bruk av ammoniakk, mens temperaturfallet ved bruk av CO<sub>2</sub> kun var på 0,6 K, se Figur 3.2. Målinger gjennomført ved et anlegg viste også betydelig temperaturforskjell mellom øvre og nedre del av en fordamper. Figur 3.3 viser at det er omtrent 3 K høyere temperatur i den nederste seksjonen til fordamperen. I tillegg vil trykktap mellom fordamperen og væskeutskilleren føre til høyere temperaturer i ammoniakkfordamperen. Ved målingene som vises i Figur 3.3 var temperaturen i væskeutskilleren -39 °C. Ved å benytte CO<sub>2</sub> ville forskjellen mellom sugegasstemperatur til kompressorene og temperaturen i fordamperen vært mindre. Økte temperaturer i fordamperen fører videre til høyere lufttemperaturer i tunnelen og lengre frysetid.

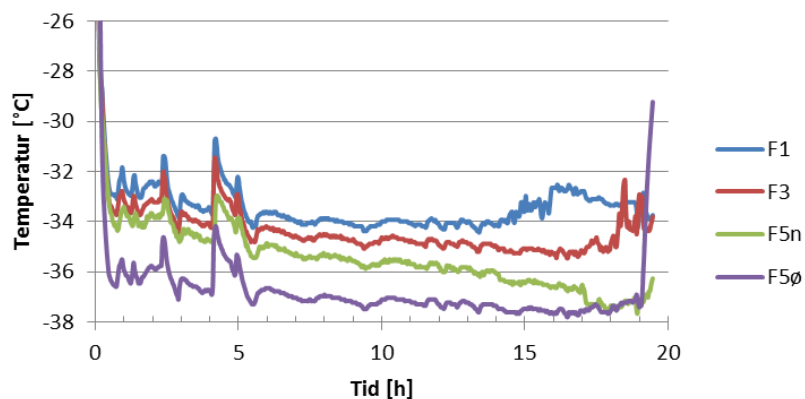


**Figur 3.1** Temperaturfall som følge av trykktap i fordamperen (Gukelberger 2014).



**Figur 3.2** Temperaturfordeling i en todelt fordamper med henholdsvis ammoniakk og CO<sub>2</sub> som kuldemedium (Gukelberger 2014).

## Fordampertemperaturer



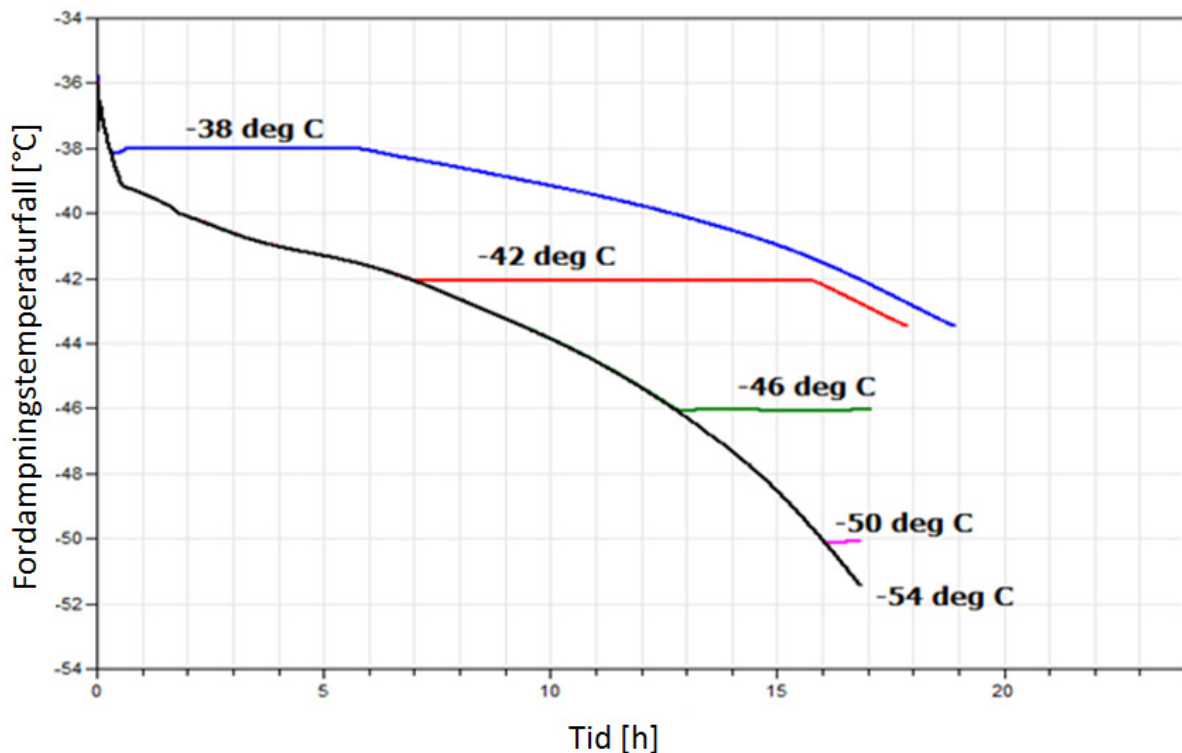
**Figur 3.3** Målte temperaturer på fordamperrørene ved en innfrysning i en frysetunnel. F1 er nederste seksjon på fordamperen, F5n er nederste del av den øverste seksjonen og F5ø er øvre del av den øverste seksjonen.

Et alternativ til vanlig to-trinns ammoniakkanlegg kan derfor være et kaskadesystem bestående av en CO<sub>2</sub>-syklus i bunn og en ammoniakksyklus på toppen. På den måten kan man utnytte de gode egenskapene til ammoniakk og samtidig utnytte de gode egenskapene til CO<sub>2</sub> ved lave temperaturer.

### 3.1 Modelica-simulering

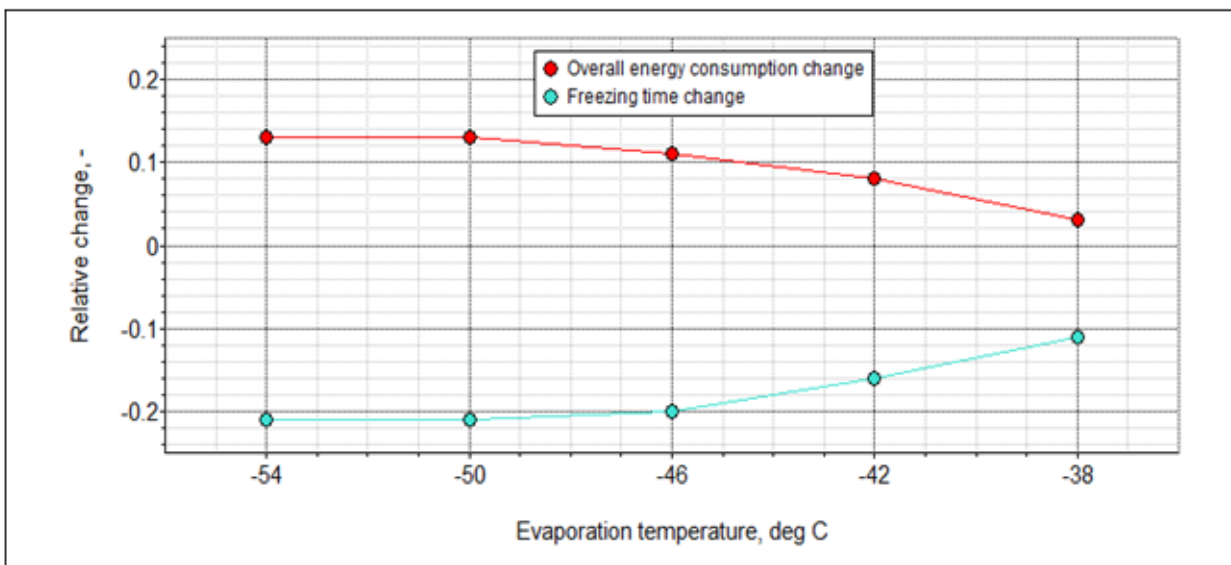
I forbindelse med dette prosjektet ble det gjennomført Modelica-simuleringer for å sammenligne energibruk og frysetid ved bruk av et kaskadeanlegg med ammoniakk og CO<sub>2</sub> med et tradisjonelt to-trinns ammoniakkanlegg. Simuleringer av de to modellene med samme parametere (fordampningstemperatur, volumetrisk luftstrøm, massestrøm av kjølemedium i kondensatoren, etc.) viste at kaskadeanlegget oppnådde 10 % reduksjon i frysetid, mot en økning i energibruk på 4,3 %.

I tillegg gjør bruken av et kaskadeanlegg det mulig å redusere fordampningstemperaturen slik at innfrysningstiden går ytterligere ned. Dersom man ønsker å opprettholde ideelt trykkforhold i anlegget, og dermed tillater at fordampningstemperaturen går ned i løpet av innfrysningstiden, reduseres innfrysningstiden ytterligere slik at den er 11,3 % kortere enn referanseverdien til ammoniakkanlegget. Dette fører også til en reduksjon i energibruken slik at den kun er 2,7 % høyere enn referanseverdien. Figur 3.4 viser hvordan innfrysningstiden reduseres dersom man senker setpunkt temperaturen i fordamperen. Modellen er imidlertid dimensjonert for en fordampningstemperatur på -38 °C, noe som gjør at det går relativt lang tid før fordampningstemperaturen kommer ned i ønsket verdi. Dersom man i tillegg hadde økt kompressorkapasiteten, ville innfrysningstiden blitt ytterligere redusert.



**Figur 3.4 Fordampningstemperaturen som funksjon av tid ved ulike setpunkt for kaskadeanlegget designet for -38 °C. Lavere fordampningstemperatur gir kortere innfrysningstid.**

Figur 3.5 viser hvordan fordampningstemperaturen i kaskadeanlegget påvirker energibruken og frysetiden. Man kan for eksempel lese av figuren at dersom fordampningstemperaturen senkes til -46 °C, vil innfrysningstiden reduseres med 20 %, mens energibruken kun øker med 11 %. Figur 3.4 viser imidlertid at det tar omtrent 13 timer før fordampningstemperaturen kommer ned til -46 °C. Mer installert kompressoreffekt ville dermed kunne føre til en ytterligere reduksjon i innfrysningstiden.



**Figur 3.5 Innflytelsen fordampningstemperaturen i kaskadeanlegget har på totalt energiforbruk og frysetid sammenlignet med et to-trinns ammoniakkanlegg.**



Simuleringene viser at bruken av et kaskadeanlegg kan føre til signifikant reduksjon i innfrysningstiden med omtrent samme energiforbruk. I tillegg kan bruken av et kaskadeanlegg gi flere andre tekniske og økonomiske fordeler:

- Jevnere temperaturprofil over fordamperen
- Muligheter for å øke innfrysningsskapasiteten ved å senke fordampningstemperaturen
- Bedre kvalitet på produktene på grunn av kortere innfrysningstid
- Minimerer risikoen for skade av produkt og personell på grunn av lekkasjer av kuldemedium
- Redusert størrelse på bunnsykluskompressoren

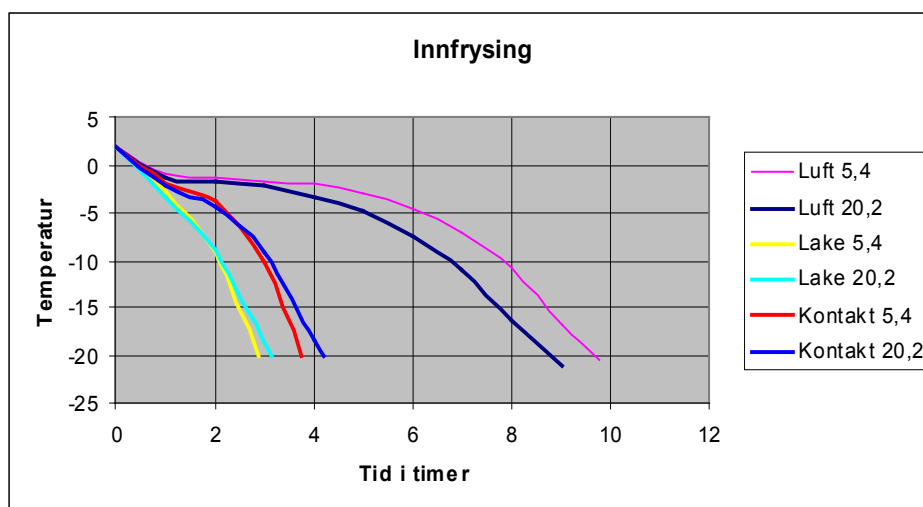
Det vil imidlertid være en del viktige punkt man må ta hensyn til for at et kaskadeanlegg skal utfordre effektiviteten til et ammoniakkanlegg:

- CO<sub>2</sub>-kompressorer med høy effektivitet må benyttes (isentropisk virkningsgrad på 80 % eller høyere for store deler av driftsforholdene)
- Fordamperen må tilpasses forholdene for CO<sub>2</sub>, for eksempel benytte rør med mindre diameter
- Gode kontrollrutiner må benyttes for å minimalisere energiforbruket ved ønsket frysetid
- For å kunne utnytte fordelene med frysing ved lave temperaturer bør kaskadeanlegget bli designet for det ønskede temperaturområdet, slik at man unngår å drifte anlegget utenfor bruksbetingelsene

## 4 Kontaktfrysing Skaginn

I tidligere arbeider (SINTEF Rapport STF80 F045009 Fremtidens pelagisk innfrysingsbedrift, 2004) ble det gjennomført noen enkle simuleringer for å avklare hvor raskt man teoretisk kunne klare å fryse fisken.

Figur 4.1 viser tidsforskjellen mellom lake, luft og kontakt frysing av en 20 kilos pakke med sild uten emballasje. Tallene 5,4 og 20,2 angir fettprosenten til fisken. Som man kan se er lake frysing den innfrysingsmetoden som gir raskest innfrysing. Dessverre gir det en del utfordringer på emballasjesiden da de aktuelle lakene ikke kan være i kontakt med fisken. Kontaktfrysing er også en rask metode, men det kan gi trykkskader på fisken som i mange markeder er uønsket.



**Figur 4.1: Simulering av ulike frysemetoder**

Den gangen ble det konkludert med at kontaktfrysing ikke var veien å gå på grunn av faren for klemskader.

Det islandske firmaet Skaginn har imidlertid jobbet videre med dette og de tilbyr idag løsninger basert på bruk av platefrysere som de hevder ikke gir skader på fisken under frysing. Fra deres websider oppgir de en innfrysningstid på 3-4 timer, noe som er i overensstemmelse med simulert verdier (se figur 4.1). Videre hevder de at energiforbruket til innfrysing alene er på 60 kWh/tonn produkt. Dette er i samsvar med beregninger gjort i L2.2 "Nøkkeltall for kuldeanlegg i pelagisk industri".

## 5 Diskusjon og konklusjon

Bruken av et CO<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> kaskadeanlegg kan føre til signifikant reduksjon i innfrysningstiden med omtrent samme energiforbruk. I tillegg kan det gi flere andre tekniske og økonomiske fordeler:

- Jevnere temperaturprofil over fordamperen
- Muligheter for å øke innfrysningskapasiteten ved å senke fordampningstemperaturen
- Bedre kvalitet på produktene på grunn av kortere innfrysningstid
- Minimerer risikoen for skade av produkt og personell på grunn av lekkasjer av kuldemedium
- Redusert størrelse på bunnsykluskompressoren

Det vil imidlertid være en del viktige punkt man må ta hensyn til for at et kaskadeanlegg skal utfordre effektiviteten til et ammoniakkanlegg:

- CO<sub>2</sub>-kompressorer med høy effektivitet må benyttes (isentropisk virkningsgrad på 80 % eller høyere for store deler av driftsforholdene)
- Fordamperen må tilpasses forholdene for CO<sub>2</sub>, for eksempel benytte rør med mindre diameter
- Gode kontrollrutiner må benyttes for å minimalisere energiforbruket ved ønsket frysetid
- For å kunne utnytte fordelene med frysing ved lave temperaturer bør kaskadeanlegget bli designet for det ønskede temperaturområdet, slik at man unngår å drifte anlegget utenfor bruksbetingelsene

Bruk av kontaktfrysere vil gi en vesentlig raskere innfrysningstid og lavere energiforbruk. Ulempen kan være fare for klemskader, noe leverandørene hevder de har løst.

## 6 Videre arbeid

Det finnes mange mulige retninger å gå videre med forskning og utvikling innenfor temaet næringsmiddelindustri, og da med fokus på pelagisk industri. Her følger noen forslag.

### 6.1 hXsim – muligheter

SINTEF Energi har utviklet et simuleringsverktøy, hXsim, for simulering av varmevekslere. Programmet håndterer både én- og to-fase fluider, slik at det kan brukes til å simulere både fordampere og kondensatorer. Verktøyet har blitt verifisert i flere omganger ved at simuleringsresultater har blitt sammenlignet med målte verdier med godt samsvar.

I motsetning til en del andre simuleringsverktøy tar hXsim hensyn til fuktigheten i luften, noe som er svært viktig ved simuleringer av prosesser som inneholder fuktig luft. Programmet vil derfor være godt egnet til simulering av fordampere i innfrysningstunneler.

I programmet kan ulike varmevekslermodeller velges, blant annet en rør-og-finne-varmeveksler. Man kan videre spesifisere hvilken rørtype det skal være, for eksempel runde eller ovale rør. Finnene spesifiseres etter blant annet størrelse og avstand. I programmet kan også ulike materialer for rør og finner velges, eller man kan spesifisere selv hvilken tetthet og varmeledningsevne materialet skal ha. Flere forskjellige kuldemedier kan også velges.

Programmet lager en detaljert modell av varmeveksleren basert på inputdata som rørdiameter og -tykkelse, antall rør i vertikal og horisontal retning, avstand mellom rør og størrelse på og antall finner. Simuleringen er steady-state, og baseres på gitte verdier for massestrøm, inngående temperatur og trykk for kuldemedium og luft samt luftfuktighet. Resultatene fra simuleringen gir en detaljert beskrivelse av varmeveksleren, med blant annet ytelse, vekt og trykkfall på luftsiden og kuldemediesiden som viktige parametere.

Under gitte betingelser, for eksempel ytre størrelsesbegrensninger, akseptabelt trykkfall og ønsket ytelse, kan ulike utforminger sammenlignes. Programmet er ikke laget for optimalisering, men ut i fra ulike kriterier kan man sammenligne og anbefale enkelte utforminger foran andre.

Ved å bruke hXsim kan SINTEF Energi hjelpe bransjen med å velge riktig fordamper- og kondensatorløsninger, basert på noen viktige parametere.

### 6.2 Modelica

Modelica er et modelleringsspråk som egner seg godt til simuleringer av dynamiske system. I dette prosjektet er en eksisterende modell av en frysetunnel blitt videreutviklet og verifisert mot målte verdier. Modellen er blant annet brukt til å analysere hvordan frysetiden og energibruken påvirkes ved frysing av ulike produkt. Det er også utviklet modeller for et kaskadeanlegg med CO<sub>2</sub> og ammoniakk som er brukt til å sammenligne ammoniakkanlegget med kaskadeanlegget. Modelica kan også brukes for å sammenligne de tradisjonelle ammoniakkanleggene med rene CO<sub>2</sub>-anlegg. Modellene kan videreutvikles for å se nærmere på effekten av ulike fordampningstemperaturer, og se på hvordan tunnelene bør driftes ved frysing av ulike typer produkt.

### 6.3 SimFlow

SimFlow er en programvare som har blitt brukt i dette prosjektet i begrenset omfang, men som har potensiale for utvikling og videre bruk i fremtidige prosjekter. Et forslag er å bruke det i en masteroppgave, hvor både generelle og spesifikke tunneldesign analyseres. I tillegg bør modellene som finnes for varmeoverføring brukes og analyseres opp mot Modelica-modeller.

## 6.4 Målemetoder og -utstyr

For å få et mer tydelig bilde av hvordan fisken fryses og hvor stort energibehovet er, bør det gjøres mer målinger på anlegg. Et forslag er å utvikle en produkteske-modell, med intern temperaturlogging og trådløs overføring av data for bedre å tilpasse drift og utlasting av varer. I tillegg bør næringsmiddelbedrifter ha bedre logging og registrering av energi- og effektbruk til kompressorer, vifter etc. Hvordan dette gjøres bør utredes videre.

## 6.5 Avriming

Avriming har vist seg å være et viktigere tema enn tidligere antatt. Is på fordamperne gir dårlig varmeovergang og hindrer gjennomstrømning av luft. Avriming bør gjøres oftere en hva som er vanlig i dag. Hvis avrimingen ikke er fullstendig, eller om kondensatet ikke blir korrekt drenert ut gir dette redusert fordamperytelse. Hvor ofte og hvordan en optimal avriming gjøres bør analyseres for å redusere den totale energibruken. For nye anlegg bør man se på alternativer til varmgassavriming, som for eksempel elektrisk avriming. En annen metode er å installere en varmeveksler med phase change material (PCM) mellom kondensator og fordamper. Denne vil også gi underkjøling av kondensatet ved normal drift, hvilket er energiøkonomisk.

## 7 Referanser

Gukelberger, E. (2014). Energy efficiency improvement of industrial refrigeration systems within the pelagic fish industry. Department of Energy and Process Engineering. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology.



Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)