NTNU
Det skapende universitet

Varmepumpende systemer for produksjon av "slurry" med fokus på varmeovergang

Tore Hagen

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juli 2010
Hovedveileder: Trygve Magne Eikevik, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosessteknikk

Oppgavetekst

En viktig årsak til den omfattende bruk av is er at den latente varmen i isen raskt kan utnyttes til kjøling. Dette krever igjen at varmen i varene raskt overføres til isen ved kontakt eller gjennom det omliggende vann. For tradisjonell ising med knust is er kunnskap om varmetransporten avhengig av type is og produksjonsmetode, knusingsgrad, isingsmåte, mv. godt undersøkt. For issørpe er slike undersøkelser lite kjent og behovet for bedre kjennskap til hvordan isen kan benyttes er mangelfull.

SINTEF Energiforskning AS har investert i en issørpegenerator som gir muligheter for målinger av varmetransport til/fra produkter. Anlegget er plassert i laboratoriet, men kan også transporteres ut på anlegg med mulighet for forsøk i oppdrett-/fiskeindustri. Beregning av varmetransport og måling av effekten av kontakt vare - issørpe, bevegelse/turbulens i denne, drenering av væska, mv. er hovedfokus i oppgaven. Effekten av eventuell vektøkning eller vekttap av produkter under kjøling skal tas med i vurderingene. Videre vil bruk av kalorimetriske målinger av isinnhold, bearbeiding av resultat og data være viktig. Oppgaven vil gi innsikt i kuldetekniske prosesser for kjøling av fisk.

Oppgaven gitt: 15. februar 2010
Hovedveileder: Trygve Magne Eikevik, EPT

i Oppgavebeskrivelse

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for energi- og prosessteknikk

NTNU

EPT-M-2010-20

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Tore Hagen

Våren 2010

Varmepumpende systemer for produksjon av "slurry" med fokus på varmeovergang

Heat Pumping Systems for Production of Slurry with Focus on Heat Transfer

Bakgrunn

Effekten av temperatur på holdbarhet av mat er kjent fra tusener av år tilbake og bruk av is og snø for nedkjøling er like gammelt. Fra tidlige tider er isens store evne til magasinering av "kulde" i islager benyttet til rask nedkjøling. Siden isen også avgir den store latente varme ved 0 °C medfører dette at temperaturen er konstant så lenge isen er i kontakt med varene. Ising er derfor fortsatt en viktig faktor spesielt for fiskeri og akvakulturnæringen hvor lav temperatur og fuktighet er kritisk for holdbarheten. En viktig ulempe, med industriens høye arbeidskostnad, er at ising er noe arbeidskrevende, samt krevende å lagre, transportere og bruke. Det er i de senere år utviklet teknologi for fremstiling av små iskrystaller/isbiter i en løsning av vann med lavt saltinnhold (issørpe, "slurry") som kan lagres på tanker og pumpes til forbruksstedene. Saltinnholdet i vannet gjør at frysepunktet for blandingen senkes og dette tillater lagring ved produktenes frysepunkt. Bruk av slurry brukes også av kjøttindustrien der for eksempel kylling kjøles med slurry, hvor kjølingen gir en ønsket vektøkning.

Beskrivelse:

En viktig årsak til den omfattende bruk av is er at den latente varmen i isen raskt kan utnyttes til kjøling. Dette krever igjen at varmen i varene raskt overføres til isen ved kontakt eller gjennom det omliggende vann. For tradisjonell ising med knust is er kunnskap om varmetransporten avhengig av type is og produksjonsmetode, knusingsgrad, isingsmåte, mv. godt undersøkt. For issørpe er slike undersøkelser lite kjent og behovet for bedre kjennskap til hvordan isen kan benyttes er mangelfull.

SINTEF Energiforskning AS har investert i en issørpegenerator som gir muligheter for målinger av varmetransport til/fra produkter. Anlegget er plassert i laboratoriet, men kan også transporteres ut på anlegg med mulighet for forsøk i oppdrett-/fiskeindustri. Beregning av varmetransport og måling av effekten av kontakt vare – issørpe, bevegelse/turbulens i denne, drenering av væska, mv. er hovedfokus i oppgaven. Effekten av eventuell vektøkning eller vekttap av produkter under kjøling skal tas med i vurderingene. Videre vil bruk av kalorimetriske målinger av isinnhold, bearbeiding av resultat og data være viktig. Oppgaven vil gi innsikt i kuldetekniske prosesser for kjøling av fisk.

Mål

Målsetting med oppgaven er å utvikle ny kunnskap om varmetransport mellom issørpe og produkt.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Litteraturstudie om egenskaper med is-sørpe (slurry) og interaksjon med produkt
2. Utarbeide forslag til forsøksutstyr for måling av varmeovergang mellom produkt og slurry
3. Basert på målinger skal det modelleres og beregnes varmeovergang ved ulik nedkjøling av produkt
4. Foreslå tiltak, samt å verifisere tiltakene for å øke varmeovergangen ved bruk av slurry i forhold til normal ising
5. Utarbeide første utkast til "paper"
6. Utarbeide forslag til videre utvikling

" - "

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosessteknikk.

I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Ett -1 komplett eksemplar av originalbesvarelsen av oppgaven skal innleveres til samme adressat som den ble utlevert fra. Det skal medfølge et konsentrert sammendrag på maksimalt én maskin-

skrevet side med dobbel linjeavstand med forfatternavn og oppgavetittel for evt. referering i tidsskrifter).

Til Instituttet innleveres to - 2 komplette kopier av besvarelsen. Ytterligere kopier til eventuelle medveiledere/oppgavegivere skal avtales med, og eventuelt leveres direkte til de respektive. Til instituttet innleveres også en komplett kopi (inkl. konsentrerte sammendrag) på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende.

NTNU, Institutt for energi- og prosessteknikk, 12. januar 2010

Prof. Olav Bolland
Instituttleder

Prof. Trygve M. Eikevik
Faglig ansvarlig/veileder

Medveiledere:
Prof. Ola M. Magnussen, e-mail: ola.m.magnussen@sintef.no
Senior forsker Tom Ståle Nordtvedt, e-mail: tom.s.nordtvedt@sintef.no

ii Forord

Denne masteroppgaven er et resultat i forbindelse med avslutningen av studieprogrammet Energi og miljø – Varme –og energiprosesser ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Fakultetet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for energi –og prosessteknikk.

Energi og miljø er en sivilingeniørutdanning ved NTNU som kombinerer energi- og prosessteknikk med elkraftteknikk, og gjennom denne kombinasjonen gir grunnleggende kunnskaper innen begge felter. I mitt tilfelle bestod den tekniske fordypningen av studiet av emner inne kulde – og varmepumpeteknikk, industrielle prosesser og turbomaskineri.

I denne oppgaven ble det utviklet forsøksutstyr til undersøkelser av varmeovergangen i bruken av issørpe til kjøling av næringsmidler gjennom direkte kontakt mellom issørpe og produkt. Utviklingen av forsøksutstyret resulterte i et modellprodukt for temperaturmålinger og et system for undersøkelser med termisk kamera. Målet med prosjektet var å utvikle ny kunnskap om varmetransport mellom issørpe og produkt, samt utprøving av tiltak for å øke varmeovergangen.

Jeg vil gjerne takke veileder Trygve M. Eikevik for godt samarbeid og oppfølging gjennom arbeidet med oppgaven, Michael Bantle og Per Egil Gullsvåg for assistanse i forbindelse med den praktiske gjennomføringen, Kjell Kolsaker for sin verdifulle MATLAB-ekspertise, samt Martin Bustadmo og resten av de ansatte på labverkstedet for deres bidrag til konstruksjonen av forsøksutstyret.

Trondheim, 09.07.2010

Tore Hagen

iii Sammendrag

Helt fra 25 år tilbake har issørpe som ny teknologi for å bedre kjølebetingelsene for fisk fått mye oppmerksomhet. Etter nesten 30 år med kontinuerlig innsats fra forskere og produsenter, har issørpe etablert seg som en anerkjent og meget god kjøleteknologi på dette området, samt et egnet medium for konservering. Når det gjelder håndtering av issørpen ombord på fiskebåter, er det kjent at på de fleste fiskebåter benyttes issørpen til direkte kjøling av fisk og annen fangst. Issørpen blir da produsert av sjøvann ombord på båtene, og når fangsten tas inn blir den blandet med issørpe i beholdere.

Ulik håndtering av issørpen ble prøvd ut gjennom praktiske forsøk. Basert på målinger av kjernetemperatur i modellprodukt ble kjøleeffekten i fire ulike metoder for bruk av issørpe sammenlignet. De ulike metodene bestod av tre ulike tilfeller med hensyn til drenering av issørpen, hhv. uten drenering, kontinuerlig drenering og forhåndsdrenering (større iskonsentrasjon enn uten drenering). I tillegg ble en siste metode med luftinnsprøyting i bunn av issørpebeholderen prøvd ut som et tiltak for å bedre varmeovergangen. Issørpen ble også sammenlignet med tradisjonell kjøling med flak-is. Kjøleprosessene ble modellert i MATLAB og simuleringer kjørt i forsøk på å tallfeste kjøleeffekten i form av et varmeovergangstall.

Det ble ved siden av modellproduktene utviklet et system beregnet for studering av interaksjonen mellom issørpe og produkt ved hjelp av et termisk kamera.

Temperaturmålinger i modellprodukt bekreftet en langt større kjølekapasitet ved bruk av issørpe sammenlignet med tradisjonell flak-is. Issørpe ga raskere nedkjøling enn flak-is uansett håndtering, men sammenligning av temperaturmålinger og varmeovergangstall viste at hvordan issørpen benyttes er avgjørende. Lav iskonsentrasjon medførte temperaturstigning i beholderen og modellproduktene nådde ikke kjernetemperaturer under 0 °C. Høyere iskonsentrasjon ga raskere nedkjøling og lavere slutttemperatur.

Luftinnsprøyting i issørpen for å skape omrøring viste seg å gi en vesentlig økning i varmeovergangstallet. I tillegg opprettholdes issørpens lave temperatur også inne ved produktoverflaten, i motsetning til de øvrige kjøletilfellene hvor denne temperaturen opplevde en stigning etter forsøksoppstart, for så å etterhvert gå ned igjen. Konseptet for lufttilførsel i issørpen bør derfor jobbes videre med, ettersom det har en potensiell gevinst i produktkvalitet som følge av raskere nedkjøling og konstant lav overflatetemperatur hos produkt uten at frysing oppstår.

v Innhold

I OPPGAVEBESKRIVELSE I

II FORORD V

III SAMMENDRAG VII

V INNHOLD IX

VI FIGURLISTE XI

VII TABELLISTE XV

1 INTRODUKSJON 1

1.1 BAKGRUNN 1
1.2 EGENSKAPER VED ISSØRPE 3
1.3 KJØLINGENS BETYDNING FOR PRODUKTKVALITETEN 8
1.4 ISSØRPENS BRUKSOMRÅDER 12
1.5 UTFORDRINGER 17

2 SYSTEMER FOR MÅLING AV VARMEOVERGANG 19

2.1 UTVIKLING AV SYSTEM TIL FORSØK MED TERMISK KAMERA 19
2.2 UTVIKLING AV MODELLPRODUKT FOR TEMPERATURMÅLINGER 24
2.3 MODELLPRODUKTETS TERMISKE EGENSKAPER 28

3 EKSPERIMENTELL METODE 33

3.1 BRUK AV TERMOELEMENTER 33
3.2 KJØLEMETODER 36
3.2.1 TRADISJONELL KJØLING MED FLAK-IS 36
3.2.2 KJØLING MED ISSØRPE - UTEN DRENERING 38
3.2.3 KJØLING MED ISSØRPE – KONTINUERLIG DRENERING 40
3.2.4 KJØLING MED ISSØRPE – LUFTINNSPRØYTING FOR OMRØRING 42
3.3 ISSØRPESTUDIE MED TERMISK KAMERA 45

4 MODELLERING AV KJØLEPROSESSEN 47

4.1 TEORETISK PROBLEMSTILLING - VARMELEDNING 47
4.2 SIMULERINGSPROGRAMMET 50

5 RESULTATER 55

5.1 TEMPERATURMÅLINGER I MODELLPRODUKT 55
5.1.1 FLAK-IS 55
5.1.2 ISSØRPE – UTEN DRENERING 60

5.1.3 ISSØRPE – KONTINUERLIG DRENERING 61
5.1.4 ISSØRPE – FORHÅNDSDRENERING 63
5.1.5 ISSØRPE – LUFTINNSPRØYTING FOR OMRØRING 64
5.2 SIMULERINGER OG VARMEOVERGANGSTALL 67
5.2.1 FLAK-IS 68
5.2.2 ISSØRPE – UTEN DRENERING 70
5.2.3 ISSØRPE – KONTINUERLIG DRENERING 71
5.2.4 ISSØRPE - FORHÅNDSDRENERING 72
5.2.5 ISSØRPE – LUFTINNSPRØYTING FOR OMRØRING 73
5.3 TERMISKE BILDER 74

6 DISKUSJON 77

6.1 NEDKJØLINGEN AV MODELLPRODUKT 77
6.2 VARMEOVERGANGSTALL BESTEMT AV SIMULERING 79
6.3 TERMISKE BILDER 82

7 KONKLUSJON 83

8 VIDEREFØRING AV ARBEIDET 85

9 LITTERATUR 87

10 VEDLEGG 89

10.1 VEDLEGG 1 – FORSØK MED TERMISK KAMERA 89
10.2 VEDLEGG 2 – MODELLPRODUKTETS INNHOLD 90
10.3 VEDLEGG 3 – ISSØRPEAGGREGATET 92
10.4 VEDLEGG 4 – DRENERINGS –OG LUFTTILFØRSELSYSTEMENE 97
10.5 VEDLEGG 5 – ARTIKKELUTKAST 99

vi Figurliste

Figur 1-1: Mikroskopisk bilde (hentet fra (Egolf and Kauffeld, 2005)) av issørpepartikler med en midlere lengde lik 344 µm og en midlere bredde lik 234 µm 4
Figur 1-2: Issørpe generator av typen mekanisk skraper (basert på figur fra (Egolf and Kauffeld, 2005)) 4
Figur 1-3: Generelt frysepunktsdiagram (Melinder, 2005) 6
Figur 1-4: Iskonsentrasjonen som funksjon av temperaturen med saltkonsentrasjonen som parameter {Melinder, 2005 #20 7
Figur 1-5: Landbasert system for kjøling av fisk i direkte kontakt med issørpe (Kostadin Fikiin, 2005) 12
Figur 1-6: System for kjøling av fisk i direkte kontakt med issørpe ombord på fiskebåt (Kostadin Fikiin, 2005) 13
Figur 1-7: Prinsipiell systemskisse for issørpekjøling i bakeindustrien ... 14
Figur 1-8: Prinsipiell systemskisse for issørpekjøling i supermarked 15
Figur 2-1: Systemet for forsøk med termisk kamera 20
Figur 2-2: Detaljbeskrivelse av issørpebeholderens konstruksjon foran (venstre) og bak (høyre) 21
Figur 2-3: Detaljbeskrivelse av issørpebeholderens konstruksjon sett fra siden 22
Figur 2-4: Bildeserie som beskriver ferdigstillingen av karet brukt i forsøk med termisk kamera 23
Figur 2-5: Detaljbeskrivelse av modellproduktets konstruksjon 26
Figur 2-6: Bildeserie som beskriver ferdigstillingen av modellprodukt .. 27
Figur 2-7: Termisk konduktivitet vs. temperatur for modellproduktets innholdsmasse 29

Figur 2-8: Termisk konduktivitet vs. temperatur for torsk..... 29
Figur 2-9: Spesifikk varmekapasitet vs. temperatur for modellproduktets innholdsmasse 30
Figur 2-10: Spesifikk varmekapasitet vs. temperatur for torsk 30
Figur 2-11: Tetthet vs. temperatur for modellproduktets innholdsmasse 31
Figur 2-12: Tetthet vs. temperatur for torsk 31
Figur 3-1: Type T termoelement 34
Figur 3-2: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med flakis 37
Figur 3-3: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med issørpe uten drenering 39
Figur 3-4: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med issørpe med kontinuerlig drenering..... 41
Figur 3-5: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med forhåndsdrenert issørpe med luftinnsprøyting 44
Figur 3-6: Det termiske kameraets posisjoner sett gjennom et vanlig kamera 46
Figur 4-1: Geometrien i modelleringen – tverrsnittet av modellprodukt . 49
Figur 4-2: Utsnitt av modellprodukt - varmebalansen ved modellproduktets overflate..... 52
Figur 5-1: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med grovkornet flak-is 56
Figur 5-2: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik..... 57
Figur 5-3: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med finkornet flak-is 59

Figur 5-4: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik 59
Figur 5-5: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe uten drenering 60
Figur 5-6: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik 61
Figur 5-7: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med drenering 62
Figur 5-8: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik 62
Figur 5-9: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med forhåndsdrenering 63
Figur 5-10: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik 64
Figur 5-11: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med drenering og lufttilførsel 65
Figur 5-12: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med forhåndsdrenert issørpe med lufttilførsel 66
Figur 5-13: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik 67
Figur 5-14: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med grov flak-is 68

Figur 5-15: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med fin flak-is 69
Figur 5-16: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe uten drenering 70
Figur 5-17: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe med kontinuerlig drenering 71
Figur 5-18: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe med forhåndsdrenering 72
Figur 5-19: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe med forhåndsdrenering og lufttilførsel 73
Figur 5-20: Serie av termiske bilder i kameraposisjon 1 74
Figur 5-21: Serie av termiske bilder i kameraposisjon 2 75
Figur 6-1: Sammenligning av modellproduktenes gjennomsnittlige kjernetemperatur etter 75 minutters nedkjøling med de ulike kjølemetodene 78
Figur 6-2: Sammenligning av varmeovergangstall funnet gjennom tilpasning mellom simulert og målt kjernetemperatur 79
Figur 6-3: Sammenligning av det gjennomsnittlige avviket i tilpasningen mellom simulert og målt temperaturforløp for de ulike kjølemetodene .. 81
Figur 8-1: Forslag til ny rørkonstruksjon som forbedring av forsøksutstyr til bruk av termisk kamera 85

vii Tabelliste

Tabell 2-1: Stoffsammensetningen i modellproduktets innholdsmasse ... 28
Tabell 2-2: Gjennomsnittlige verdier av termiske egenskaper hos modellprodukt ... 32
Tabell 2-3: Termiske egenskaper hos PVC (materialet i plastrøret) ... 32
Tabell 3-1: Standardiserte egenskaper hos type T termoelementer ... 33
Tabell 3-2: Justeringsverdier for temperaturmålinger funnet gjennom kalibrering ... 35
Tabell 5-1: Oversikt over betingelser i forsøk med flak-is ... 55
Tabell 5-2: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe uten drenering ... 60
Tabell 5-3: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe med kontinuerlig drenering ... 61
Tabell 5-4: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe med forhåndsdrenering ... 63
Tabell 5-5: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe med forhåndsdrenering og luftinnsprøyting ... 66
Tabell 5-6: Betingelser for simulering av kjøling med flak-is ... 68
Tabell 5-7: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe uten drenering ... 70
Tabell 5-8: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe med kontinuerlig drenering ... 71
Tabell 5-9: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe med forhåndsdrenering ... 72

Tabell 5-10: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe med forhåndsdrenering og luftinnsprøyting 73

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Fokuset på bruk av sekundære kuldemedier (også kalt kuldebærere) til både industrielle -og komersielle kjøleformål er økende i samspill med fokuset på reduksjon i utslipp av klimagasser. Som kjent har mange av de tradisjonelle primære kuldemediene høye verdier for GWP (Global Warming Potential), og medfører derfor både en belastning for miljøet, og en kostnadsbelastning hos forbrukeren pga. klimaavgifter. Man oppnår en betydelig reduksjon i den primære kuldemediefyllingen ved bruk av et indirekte kjølesystem, og dermed også en reduksjon i bidraget til klimagassutslipp. Tradisjonelt sett er én-fase sekundære kuldemedier mest brukt, slik som væskeløsninger med salter, glykoler og alkoholer, tilsatt for å senke frysepunktet hos væsken. Ved og i stedet benytte flerfase-medier utnytter man den latente varmen som inngår i en faseendring, og oppnår langt større kjølekapasitet ved små temperaturdifferanser.

Et eksempel på et slikt medium er ”issørpe”, også kalt ”slurry ice”, ”flow ice”, ”fluid ice” eller ”slush ice”. I denne oppgaven blir mediet omtalt som issørpe. Issørpe er framstilt i form av mikroskopiske ispartikler omgitt av en stor nok andel vann til at mediet blir håndterlig i form av pumpbarhet. Som oftest vil det i tillegg være tilsatt et frysepunktsnedsettende stoff, f.eks. natriumklorid (vanlig bordsalt), som senker frysepunktet hos blandingen slik at issmeltingen kan foregå ved temperaturer under 0 °C (frysepunktet for rent vann).

Effekten av temperatur på holdbarhet av mat er kjent fra tusener av år tilbake og bruk av is og snø for nedkjøling er like gammelt. Helt fram til rundt midten av det 20. århundre stammet all is til kjøling fra naturlige kilder, enten lokal snø/is eller importert is fra arktiske strøk. Etter hvert som mekanisk kuldeproduksjon kom på markedet ble det mulig å produsere is med ulik utforming i egne maskiner, slik som

blokker/kuber/staver/flak av is (Egolf, 2005). Tilgangen på, og produksjonen av is er forenklet gjennom teknologisk utvikling, men isen må fremdeles transporteres manuelt s.a. bruken av is er arbeidskrevende, noe som er en stor ulempe med tanke på industriens høye arbeidskostnad. Kjøling av fisk ombord på fiskebåter er et godt eksempel på dette. Fersk fiskefangst har tradisjonelt blitt konservert ved hjelp av knust is laget av ferskvann, som krever at store mengder is lastes ombord og fraktes med på båtene så lenge fisket pågår (Wang and Wang, 2005).

Et mye brukt alternativ til isen er RSW (Refrigerated Sea Water) systemer, som benytter et kuldeanlegg til nedkjøling av sjøvann som deretter sirkuleres gjennom store tanker med innehold av sjøvann og fisk. Kuldeanlegget kan installeres ombord på båtene og man unngår dermed fraktingen av is (Wang and Wang, 2005). Men et slikt system har andre ulemper som stort volumopptak av kuldeanlegget, krevende arbeidsforhold og saltopptak hos mindre fiskearter (Kostadin Fikiin, 2005).

I senere tid har issørpe i økende grad etablert seg som en alternativ kjølemetode for kjøling av fisk, og den fører med seg mange fordeler i den sammenhengen. Tross dette, er mange av fordelene fortsatt i stor grad teoretiske, og det er fremdeles mangel på empiriske data relatert til bruken av issørpe i praksis (Piñeiro et al., 2004).

Målsettingen for denne oppgaven var å undersøke varmetransporten mellom produkt og issørpe basert på eksperimentelt arbeid, samt å foreslå tiltak for å øke varmeovergangen og verifisere forbedringen gjennom målinger. SINTEF Energiforskning AS investerte i fjor i en issørpegenerator som ga muligheter for målinger i eget laboratorium.

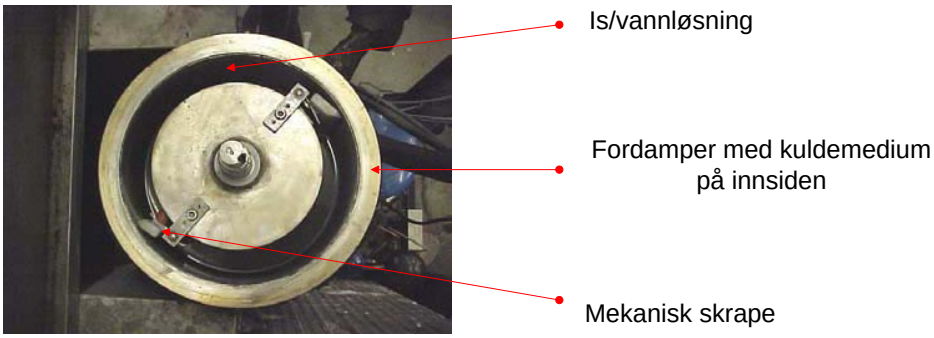
1.2 Egenskaper ved issørpe

Det er vanskelig å gi en eksakt definisjon på issørpe (”ice slurry”), men i (Egolf and Kauffeld, 2005) blir det gitt to ulike tilnærmelser til en definisjon på issørpe:

1) Issørpe består av et antall ispartikler i en væskeløsning
2) Finstruktur issørpe er en issørpe bestående av ispartikler med en midlere karakteristisk diameter lik eller mindre enn 1 mm

Issørper i form av finstruktur issørper er mest vanlig ettersom issørper stort sett produseres i issørpegeneratorer av typen mekanisk skraper, som leverer en midlere partikkelstørrelse rundt 200µm. I *Figur 1-1* og *Figur 1-2* ser man hhv. eksempel på slike finstruktur ispartikler (bildet har dimensjon 1061 µm X 762 µm) og en issørpe generator hvor ispartiklene produseres. Noe av det som karakteriserer issørpen er at dens ispartikler smelter under kjøleprosessen som medfører at nye ispartikler må tilføres ved produksjon i issørpegeneratoren. Ved lagring av issørpen, ofte i store tanker, vil isens lavere tetthet enn vannets føre til at is samler seg i toppen av tanken. Dette gjør at det kreves en form for blandingsenhet som sørger for at man bevarer en homogen blanding av vann og ispartikler, for å unngå oppsamling av is og påfølgende blokkeringer i rør (Egolf, 2005).

Figur 1-1: Mikroskopisk bilde (hentet fra (Egolf and Kauffeld, 2005)) av issørpepartikler med en midlere lengde lik 344 µm og en midlere bredde lik 234 µm

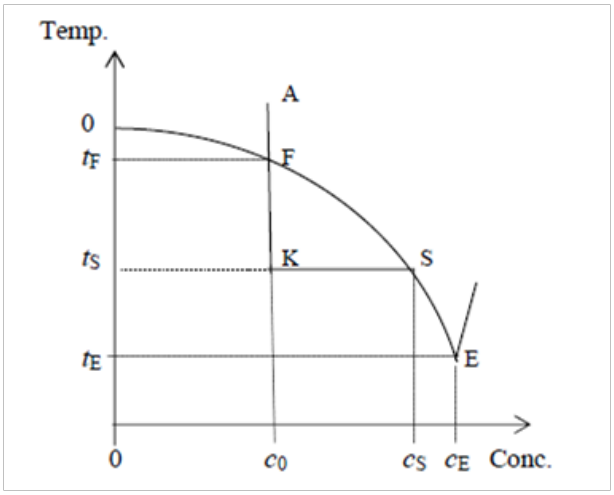


Figur 1-2: Issørpe generator av typen mekanisk skraper (basert på figur fra (Egolf and Kauffeld, 2005))

I enkelte tilfeller blir issørpen produsert med rent vann, men i tilfeller hvor det kreves temperaturer under 0 °C må det tilsettes et frysepunktnedsettende stoff, som glykoler, alkoholer eller salter. Binære væsker, slik som glykol-/vannløsninger har lenge blitt brukt som énfase kuldebærere i kuldeanlegg med indirekte kjølesystem. I et slikt system distribueres kulden ved hjelp av kuldebæreren fra primærmediets fordamper til de forskjellige kjøleenhetene (T. M. Eikevik, 2005). De samme væskeløsningene kan brukes til å produsere issørpe, hvor små

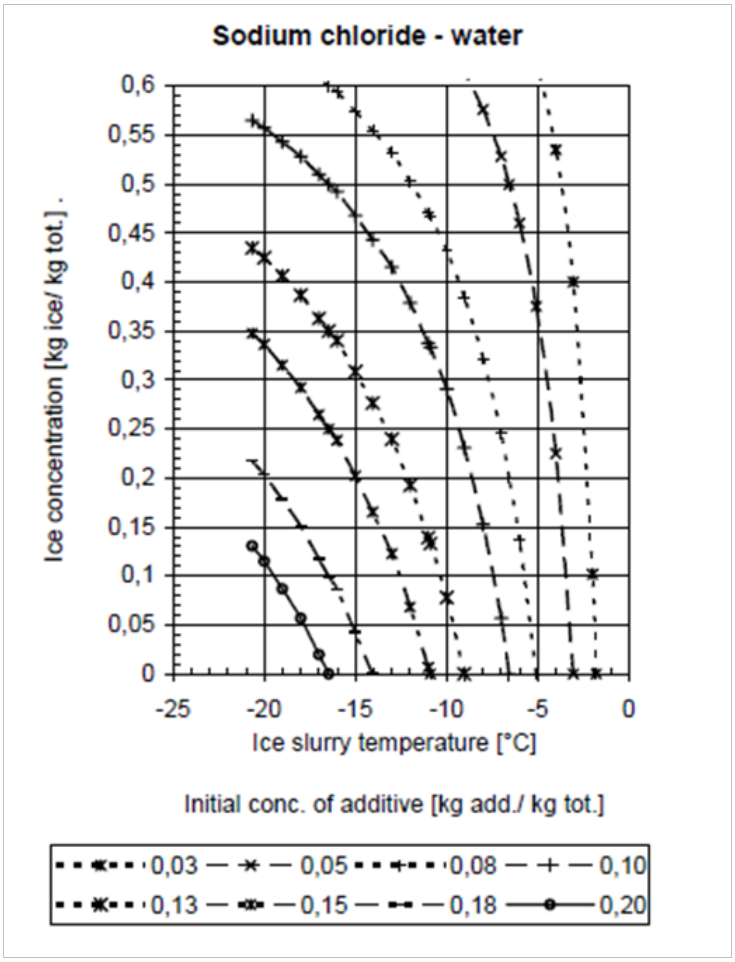
ispartikler produseres i fordamperen og smelter ved opptak av varme i kjøleenheten. En åpenbar fordel med issørpen er at den holder tilnærmet konstant lav temperatur under varmeopptaket og tillater dermed små temperaturdifferanser, som igjen gir god energieffektivitet i anlegget. På grunn av den latente varmen som inngår i smeltingen av isen sier man ofte at issørpen har en høy energilagringstetthet. Med det menes at issørpen kan ta opp store mengder energi i from av varme per volumenhet når isen smelter. Den store varmeovergangsflaten et høyt antall ispartikler danner bidrar også til høy kjøleeffekt (M.J. Wang, 2009). Alle de overnevnte egenskapene hos issørpen gjør den godt egnet på flere områder. Ulike anvendelser av issørpe er nærmere omtalt i delkapittel *1.4*.

I industrien er de fleste issørpesystemer basert på vann tilsatt enten ethanol (sprit), ethylen glykol, propylen glykol eller natriumklorid (NaCl, bordsalt) (M.J. Wang, 2009). Sjøvann er en naturlig vann/saltløsning og er derfor den åpenbare løsningen ombord på fiskebåter. Issørpe produsert av saltvann er også den type issørpe som ble benyttet i det eksperimentelle arbeidet i oppgaven. Frysepunktet hos en issørpe produsert av saltvann er avhengig av saltkonsentrasjonen. Etter hvert som rent vann fryser ut og danner iskrystaller øker saltkonsentrasjonen i det gjenværende vannet og frysepunktet senkes ytterligere. *Figur 1-3* gir en generell beskrivelse av hvordan dette utvikler seg for en hvilken som helst væskeløsning. Det tas utgangspunkt i en løsning med konsentrasjon c_0 som kjøles ned fra A til F, deretter ned til K osv. Løsningens initielle frysepunkt finner man ved temperatur t_F, som er den temperaturen hvor de første iskrystallene dannes. Disse krystallene består av rent vann og den gjenværende væsken får dermed en økt konsentrasjon. I K vil det da eksistere både iskrystaller med tilstand ($c = 0$, $t = t_S$) og løsning med tilstand ($c = c_S$, $t = t_S$). På denne måten fryser ikke løsningen til en fast masse når frysepunktet nås, men det oppstår derimot en issørpe (Melinder, 2005).



Figur 1-3: Generelt frysepunktsdiagram (Melinder, 2005)

Dette fenomenet kommer til syne i *Figur 1-4* som beskriver iskonsentrasjonens variasjon med temperaturen i issørpen for ulike saltkonsentrasjoner. Variasjonen er logisk nok sterkest for høye saltkonsentrasjoner. Kurven lengst til høyre gjelder for 3 % saltinnhold, ikke langt fra den gjennomsnittlige konsentrasjonen i sjøvann som er ca. 3,5 % (Enclopedia, 2010c).



Figur 1-4: Iskonsentrasjonen som funksjon av temperaturen med saltkonsentrasjonen som parameter {Melinder, 2005 #20

1.3 Kjølingens betydning for produktkvaliteten

Kjøleteknologiens hovedformål er konservering av næringsmidler, dvs. å hindre/begrense mikrobielle, fysiologiske og kjemiske endringer hos produktene {K. N. Bramadathan, 2006 #23}. Så mye som 50% av matvarene i utviklede land, med en total befolkning på ca. 1,2 milliard, blir oppbevart og omsatt under kjølte forhold. I 2001 nådde eksportverdien av sjømat mellom ulike land 55,9 milliarder amerikanske dollar. Dette gir et inntrykk av den økonomiske betydningen eksport av sjømat har, og dens økonomiske potensiale hvis man kan gjennom ny teknologi oppnå kvalitetsforbedringer hos produktene, med påfølgende økt markedsverdi (Piñeiro et al., 2004).

Matvarer som har så liten holdbarhet at de ikke kan distribueres og omsettes med tilstrekkelig kvalitet uten en eller annen form for konservering, kalles lettfordervelige matvarer. Marine produkter slik som fisk er av de mest lettfordervelige matvarene. Fisken har lav kroppstemperatur, som betyr at også enzymer, kjemiske prosesser og mikroorganismer på fisk er tilpasset lave temperaturer. Dette gjør fisken svært sensitiv for temperaturøkning, som betyr at rask nedkjøling og lavest mulig temperatur (uten at frysing oppstår) under lagringen er meget viktig (Magnussen). Bakterieveksten er høyst temperaturavhengig, og hylletiden (holdbarheten) hos fisk sies og være omtrent doblet ved lagring ved 0 °C sammenlignet med lagring ved 5 °C (Kostadin Fikiin, 2005).

Den første lagringen av fisken forekommer ombord på fiskebåtene, og lagringsbetingelsene her vil derfor være avgjørende for kvaliteten hos de fremtidige produktene og deres markedsverdi. Kjøling er her nøkkelen til kvalitetsbevaring, og som nevnt under delkapittek *1.1* har ulike kjølemetoder blitt implementert, slik som tradisjonell flak-is og RSW. Ved bruk av flak-is har man vanligvis lagt is og produkt lagvis inne i bokser/kartonger, noe som tar lang tid og krever høy arbeidskraft. I så måte er RSW en enkel og tidsbesparende kjølemetode, men har andre negative sider. Systemene krever kompliserte pumpe –og filterinstallasjoner som gjør dem kostbare og romstore. I de senere år har

oppmerksomheten rundt issørpesystmer i fiskerinæringen økt, og det finnes allerede mange installasjoner ombord på fiskebåter. Issørpen tilbyr meget lovende egenskaper i forbindelse med kjøling av fisk, som i (Piñeiro et al., 2004) blir oppsummert på følgende måte:

- Varmetransporten ved produktoverflaten kan regnes å være rundt fire ganger høyere enn ved flak-is på grunn av den store entalpiforskjellen ved issmeltingen, som øker nedkjølings-hastigheten betydelig
- Issørpens lave temperatur, bestemt av det frysepunktnedsettende stoffets konsentrasjon (saltinnehold i sjøvannet ombord på båter), reduserer kjemiske –og enzymrelaterte reaksjoner som påfører en sterk nedbryting av produktet
- En fullstendig tildekking av produktoverflaten sørger for en mer effektiv kjøling samt at det hindrer oksygenrelaterte reaksjoner og dehydrering av produktet
- Den sfæriske geometrien (se *Figur 1-1*) hos iskrystallene i issørpen begrenser den fysiske påkjenningen på produktoverflaten i motsetningen til flak-isens skarpe kanter som ofte medfører til slitasjeskader
- Saltkonsentrasjoner i nærheten av sjøvannets saltinnehold har også en fordel gjennom at saltet er et naturlig konserveringsmiddel i seg selv

Det økende fokuset på issørpe som en ny og lovende teknologi til kjøling av marine produkter, har ført til at det i de senere år har blitt gjennomført en rekke biologiske/kjemiske analyser av ulike produkter etter lagring i issørpe. Samme type produkt har da blitt lagret i en tilsvarende lang periode i flak-is til sammenligning. Konklusjoner fra et utdrag av rapporter nevnes her for å gi et inntrykk av utslaget de teoretiske fordelene issørpen fører med seg gir i praksis. I alle rapportene nevnt under ble det tatt i utgangspunkt i en issørpe (sjøvannsbasert med 3,3% saltinnehold produsert av FLO-ICE, Kinarca S.A.U., Vigo, Spania) bestående av 40% is og 60% vann med en temperatur på -1,5 °C, og flak-is produsert i en Icematic F100 Compact ismaskin med temperatur 0 °C.

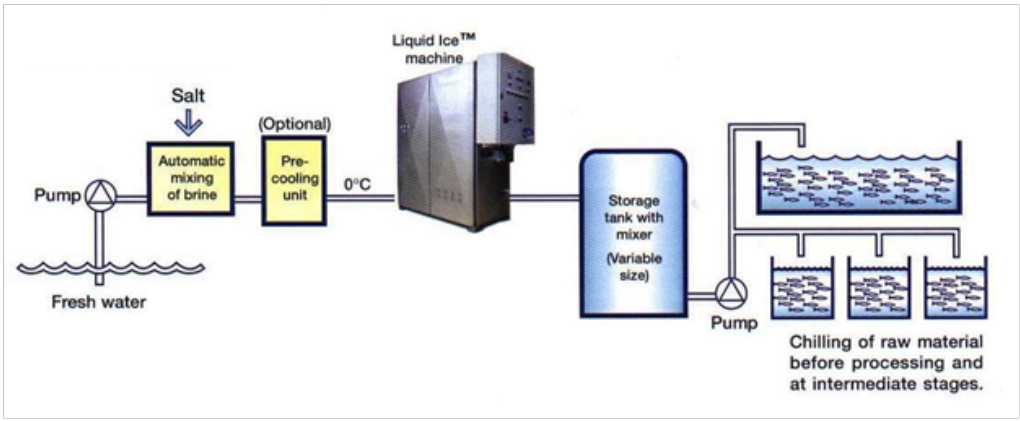
- (Múgica et al., 2008) rapporterer at ved lagring av piggskate (raja clavata) i issørpe oppnås en bedre produktkvalitet sammenlignet med flak-is i tidsrommet 3. og 6. lagringsdag. Mye tyder på at 1,5 °C temperaturforskjell har en betydelig effekt på kvaliteten og at issørpe kan bidra til å forlenge holdbarheten.
- I (Rodríguez et al., 2006) blir det rapportert at oppdrettsfisk av typen piggvar (psetta maxima) opplever en lavere degraderingsaktivitet ved lagring i issørpe. Issørpe blir anbefalt for bedring av produktkvaliteten hos denne typen fisk.
- Det samme gjelder norsk hummer som i (Aubourg et al., 2007) rapporteres å oppleve en betydelig reduksjon i mikrobiell nedbryting ved oppbevaring i issørpe sammenlignet med tradisjonell flak-is.
- I (KilInc et al., 2007) ble det i stedet for lagring i issørpe og flak-is eksperimentert med forhåndsbehandling av havabbor i to timer i hhv. issørpe og flak-is før lagring i kjølerom ved 4 °C. I dette tilfellet oppdaget man negative endringer av utseende hos fisken etter lagring i issørpen, samt et uønsket stort saltvannsopptak. Issørpen utvidet derimot hylletiden noe i forhold til flak-is, men bare med to dager.
- I (Barros-Velázquez et al., 2008) blir det rapportert for tre fiskesorter, hake, piggskate og anglefisk, gjennom mikrobielle, kjemiske og sensoriske analyser at lagring i issørpe kontra flak-is gir en kvalitetsforbedring og forlenget hylletid hos disse.

I tillegg til kvalitetsforbedringer i form av forlenget hylletid hos mange typer fisk, er det også registrert vektøkninger hos enkelte. Under forskning ved Norsk Institutt for Fiskeri –og Havbruksforskning ble det oppdaget at torsk lagret i issørpe i tre dager (maksimalt tillatte lagringstid under slike betingelser) opplevde en gjennomsnittlig vektøkning på 4% uten endring i kvalitet. Torsk lagret i flak-is under samme betingelser opplevde ingen vektøkning (M.J. Wang, 2009). Vektøkning uten tap av kvalitet hos produktet resulterer i en økning i fortjeneste.

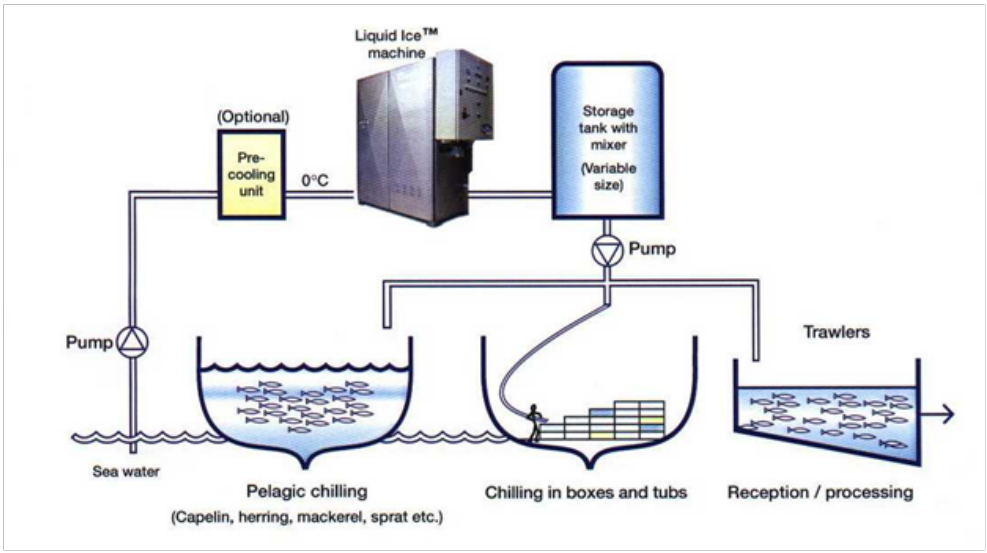
Slike studier demonstrerer at kvalitet/vektøkning ikke bare avhenger av behandlingen av, og lagringsbetingelsene for produktet, men også av fiskeartens natur og bestanddeler (Múgica et al., 2008). Utfordringene ligger i å identifisere de optimale kjøle –og lagringsbetingelser for det enkelte produkt, og ut i fra det utvikle et system som kan kontrollere issørpens temperatur og saltkonsentrasjon tilpasset produktet (M.J. Wang, 2009).

1.4 Issørpens bruksområder

Som allerede er blitt mye omtalt, og som er av størst relevanse for oppgaven, er fiskeindustrien det største bruksområdet for issørpe. Helt fra 25 år tilbake har issørpe som ny teknologi for å bedre kjølebetingelsene for fisk fått mye oppmerksomhet. Etter nesten 30 år med kontinuerlig innsats fra forskere og produsenter, har issørpe etablert seg som en anerkjent og meget god kjøleteknologi på dette området, samt et egnet medium for konservering. I dag finnes det over 700 installasjoner i fiskeindustrien. Island, Japan og Norge er de mest fremtredende landene. 75% av installasjonene finner man ombord på fiskebåtene og de resterende 25% er fordelt på oppdretts –og prosesseringsanleggene (M.J. Wang, 2009). I *Figur 1-5* og *Figur 1-6* presenteres prinsipielle systemskisser for kjøling av fisk i issørpe for hhv. landbasert anlegg og anlegg ombord på båt. Systemene skiller seg fra hverandre ved at det landbaserte systemet henter opp ferskvann som blandes med salt og pumpes videre inn i issørpeaggregatet, mens anlegget ombord i båten pumper sjøvann direkte inn i den issørpeproduserende enheten. Idet fangsten blir tatt ombord blandes den umiddelbart med issørpen, som i noen tilfeller også dreneres (Egolf, 2005).



Figur 1-5: Landbasert system for kjøling av fisk i direkte kontakt med issørpe (Kostadin Fikiin, 2005)



Figur 1-6: System for kjøling av fisk i direkte kontakt med issørpe ombord på fiskebåt (Kostadin Fikiin, 2005)

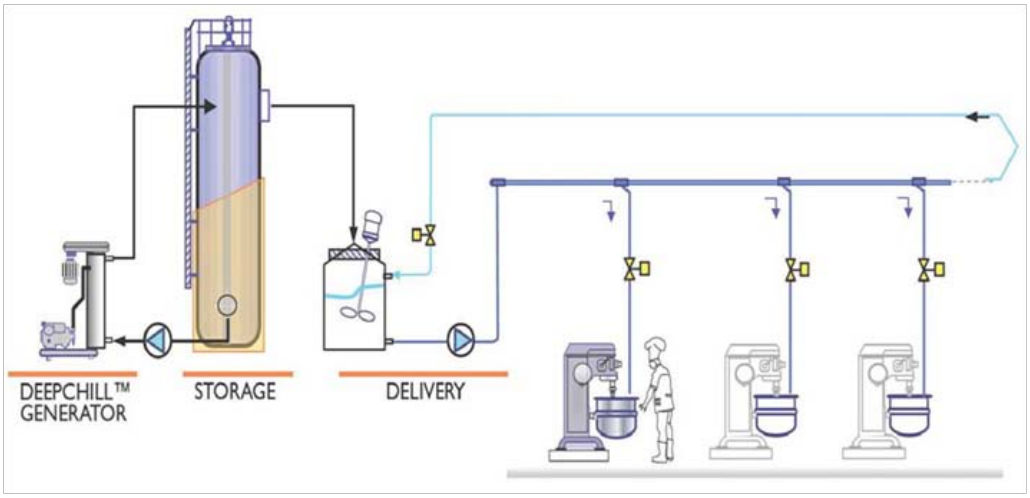
Mye av den nyeste teknologien innen anvendelse av issørpe finner man på områder hvor direkte kontakt mellom issørpe og produkt er tilfellet. I løpet av de siste fem årene har slike installasjoner for kjøling av diverse matprodukter funnet sted i over 40 land i følge (M.J. Wang, 2009), som tar for seg følgende eksempler:

Bakevareindustrien

I enhver bakevareproduksjon er det viktig å kontrollere temperaturen i deigen slik at den holder en optimal temperatur, rundt 25-28 °C. Tidligere har flak-is blitt blandet inn i deigen for å senke temperaturen, men denne metoden viser seg å være arbeidskrevende, og dermed en ulempe i en industri som ønsker automatisering. Tørr-is (CO2) har også forekommet, men har sine ulemper i høy driftskostnad og CO2'ens miljøpåvirkning. Issørpe har derfor kommet på banen som et alternativ, og allerede eksisterer det enkelte systemer i Nord, Mellom –og Sør-Amerika. For disse installasjonene har det blitt rapportert at issørpen er godt egnet ved

at den blander seg lett inn i deigen, oppretter en jevn temperaturfordeling og reduserer behovet for knaing av deigen.

Figur 1-7 gir en prinsipiell beskrivelse av et slikt system. Her produseres iskrystaller i en issørpegenerator (”Deepchill Generator”), pumpes videre inn i en stasjonær lagringstank (”storage”) hvor man lar oppdriftskreftene virke slik at isen skilles fra vannet. Is tas ut fra toppen av tanken og sendes inn i blandingsenheten hvor en homogen issørpe opprettholdes. Denne er koblet til en rørkrets hvor issørpen pumpes rundt og kan tappes ved deigblandingsstasjonene etter behov.



Figur 1-7: Prinsipiell systemskisse for issørpekjøling i bakeindustrien

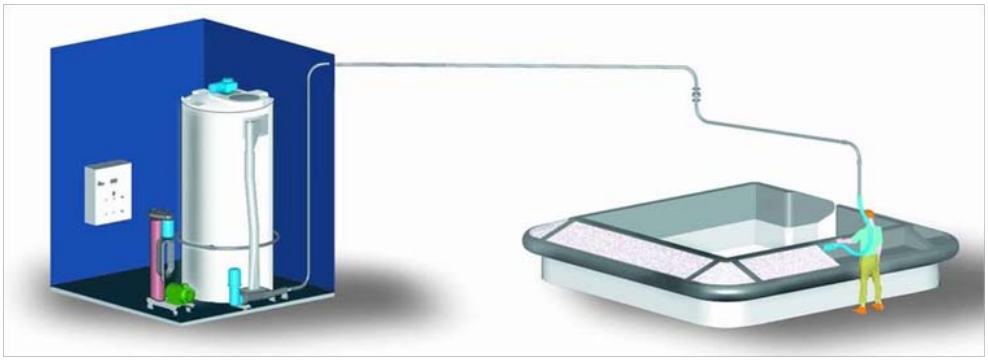
Kjøling av grønnsakspakninger

Mange ferske grønnsaker er som fisk og sjømat, avhengig av en rask og gjennomgående kjøling etter høsting for bl.a. å redusere enzymdegradering, respirasjon, bakterievekst og etylenproduksjon. Den lave temperaturen må bevares gjennom lagringen og prosesseringen. Issørpe er rapportert å være et godt egnet kjølemedium til dette formålet. Kjølemetoden går ut på å injisere issørpe inn i kartongene som de ferske

grønnsakene pakkes inn i etter høsting. Flere metoder for dette eksisterer, og utviklingen går i retning av automatisering.

Supermarkeder

Dagens supermarkeders strenge krav, både fra kunden som krever høy kvalitet hos ferskvarer, mattilsynets krav om at is skal produseres i relativt sterile forhold og HMS-restriksjoner i forhold til transportert av is rundt i butikken (isen fører til våte gulv), gjør det spesielt utfordrende med kjølingen i denne bransjen. Dette er faktorer som er med på å gjøre issørpe attraktivt for supermarkeder. Flere supermarkeder i Kanada har introdusert issørpe til kjøling av ferskvarer. Systemet er konstruert slik at issørpen pumpes direkte ut til kjøledisker, og man unngår dermed den manuelle transporten og fordelingen av is. En prinsipiell systemskisse er vist i *Figur 1-8*. Her foregår issørpeproduksjonen i et eget maskinrom. Issørpen pumpes via et rørsystem og ut til ferskvaredisker rundt i butikken, hvor ansatte fordeler issørpen ved hjelp av en slangetilkobling.



Figur 1-8: Prinsipiell systemskisse for issørpekjøling i supermarked

Issørpe har i senere tid også blitt introdusert på andre områder enn kjøling av matprodukter, og i (Egolf, 2005) blir følgende eksempler gitt:

- Kjøling av jernbanevogner i Kina og flere andre østlige land. Issørpe har i dette tilfellet erstattet isblokker, som har vært en kjølemetode til dette formålet siden flere hundre år tilbake.
- Kjøling av matvarer i passasjertog, så langt kun tatt i bruk i Sveits (utviklet i Tyskland).
- Luftkondisjonering i større bygninger (kontorbygninger særlig) i Japan, hvor issørpen tradisjonelt blir brukt som et medium for kuldemagasinering og ikke som et medium pumpet direkte ut til kjølestedet. Sistnevnte metode er under utvikling, men forskerne møter store utfordringer i å få pumpet issørpen rundt i rørsystem uten blokkeringer av rørene. Issørpen erstatter da kjølt vann og på grunn av issørpens høye smeltevarme (335 kJ/kg), oppnår man en betydelig reduksjon i rør, pumpe –og tankstørrelser (K. Kasza, 2009).

Det er blitt rapportert at for mange installasjoner er investeringskostnader høyere pga. utstyret for produksjon av issørpe, mens drifts-kostnader ofte er relativt likt som hos mer konvensjonelle kjølesystemer. Tross dette, kan man i noen tilfeller oppnå besparelser, f.eks i luftkondisjoneringssystemer i Japan ved at issørpe produseres i døgnperioder hvor strømprisen er lavest, for så å magasinere og ta i bruk issørpen etter behov. En oppnådd verdiøkning gjennom forbedret kvalitet hos produkter, som ved direkte kjøling av fisk (diskutert i delkapittel *1.3*), kan også betraktes som en besparelse.

En stor innsats er lagt i arbeidet med fremstillingen av en issørpe med høy iskonsentrasjon og som egner seg både for lagring og pumping, samt utviklingen av metoder for produksjon av issørpe med de ønskede egenskaper. Issørpe var i utgangspunktet først og fremst tiltenkt industrielle formål, men det kan nevnes at i løpet av de siste åtte årene har det blitt forsket mye på bruk av mediet til medisinske formål, til bl.a. direkte kjøling av organer (K. Kasza, 2009).

1.5 Utfordringer

Antallet ulike anvendelser av issørpe er økende i takt med teknologisk utvikling og utvidet kunnskap rundt de termodynamiske og fysiske egenskapene hos issørpen. Selv om forskning og utvikling har medført en utvidelse av denne teknologiens bruksområder, er høye investeringskostnader og stort energiforbruk i issørpegeneratorene faktorer som fortsatt holder teknologien noe tilbake (Savvas Tassou, 2005).

For at ny teknologi skal være attraktiv hos aktuelle forbrukere må den kunne vise til målbare fordeler i form av kostnadsbesparelser, forbedring i produksjon og kvalitet som vil gi økt fortjeneste (matprodukter) eller eventuelle klimagevinster. I denne oppgaven er bruk av issørpe til direkte kjøling av matprodukter (først og fremst fisk) hovedfokus, og issørpeteknologiens framtid på dette området er avhengig av hvordan følgende problemstillinger behandles (M.J. Wang, 2009):

- Videre utvikling av produksjonsutstyr, hovedsakelig issørpegeneratorer
- Maskineri med mindre behov for vedlikehold, høyere COP og lavere kostnader (hovedsakelig investeringskostnader) for at teknologien skal være konkurransedyktig
- Mer utfyllende eksperimenter og studier på anvendelse av issørpe til kjøling av ulike produkt. I dag eksisterer kun enkelte rapporterte studier av kjøling med issørpe hos enkelte fiskearter og brokkoli.
- Markedsføring

Punkt 3 ovenfor blir viktig i arbeidet med å utvide kunnskapen om hvor godt issørpens lovende teoretiske egenskaper kommer til nytte i praksis, og hvilke tiltak som eventuelt kan gjøres for å utnytte issørpen på en bedre måte. Å utvikle ny kunnskap rundt dette er hovedmålsettingen for denne oppgaven.

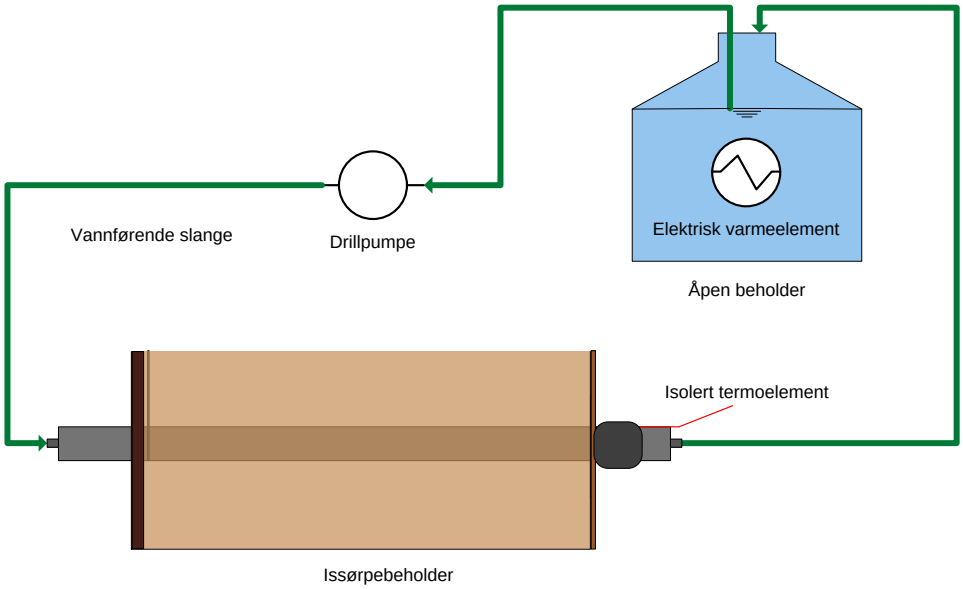
2 Systemer for måling av varmeovergang

Man ønsker i oppgaven å undersøke varmetransporten mellom issørpe og produkt. Dette krever at man kan måle temperaturer i et modellprodukt ved kjøling med issørpe, og ut ifra nedkjølingstiden kunne si noe om varmeovergangen i form av et estimert varmeovergangstall. Man er ikke bare ute etter hva som skjer med produktet i issørpen, men også interessert i eventuelle endringer i forholdene rundt produktet, dvs. temperaturforandringer og is-/væskefordeling. Det er derfor blitt utarbeidet utstyr til forsøk med et termisk kamera, i tillegg til modellproduktet for måling av temperaturer. Arbeidsprosessen bak dette er beskrevet i de to neste delkapitlene.

2.1 Utvikling av system til forsøk med termisk kamera

I utviklingen av et system som skal kunne gi informasjon om issmeltingen rundt et ”produkt” vha. bilder tatt med et IR-kamera, ligger det noen sentrale kriterier bak. Konstruksjonen må først og fremst bestå av en beholder som kan fylles med issørpe. I denne issørpen må det tilføres en varmelast som helst skal være regulerbar. Varmelasten skal her erstatte et tenkt produkt i form av f.eks. fisk. Viktigst av alt, må konstruksjonen tillate at det kan tas bilder med et termisk kamera av interaksjonen mellom issørpe og ”produkt”. Slike bilder vil forhåpentligvis kunne gi nyttig informasjon om hvordan forholdene rundt et produkt i issørpen utvikler seg over tid. Med forhold menes her issmeltingen og eventuelle temperaturvariasjoner. For at IR-kameraet skal få det innsynet som kreves må deler av beholderen bestå av et materiale som slipper IR-strålingen gjennom og ikke reflekterer den. Et reflekterende materiale vil føre til at kameraet kun registrerer temperaturer i selve materialoverflaten, og ikke temperaturer i issørpen på innsiden av beholderen som man er ute etter.

Det ble foretatt en diskusjon mellom student og veilder rundt mulige løsninger, og følgende løsning, representert ved *Figur 2-1* ble funnet å være den mest sannsynlig gjennomførbare:



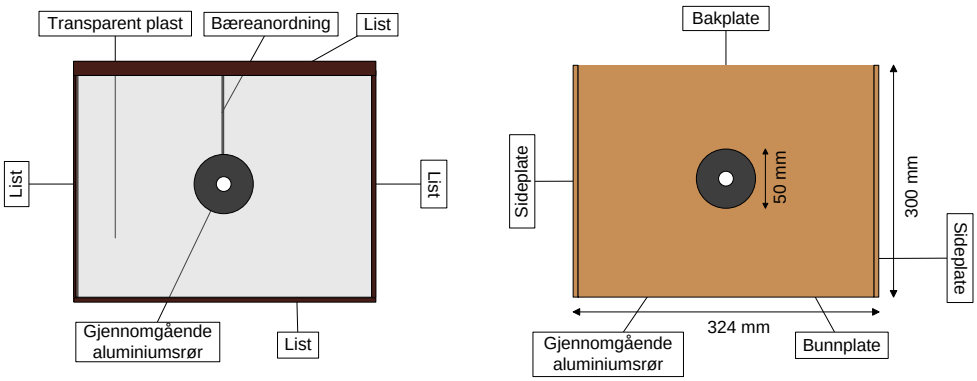
Figur 2-1: Systemet for forsøk med termisk kamera

Figur 2-1 gir en enkel beskrivelse av systemoppsettet, som i hovedsak består av en sirkulerende vannkrets gjennom issørpebeholderen. Denne beholderen har som figuren antyder et gjennomgående rør (av aluminium). Røret er tilkoblet en standard hageslange i begge ender som leder vannet hhv. fra og til den åpne beholderen. Her får vannet tilført nødvendig varme vha. et varmeelement for å opprettholde den ønskede temperaturen. Temperaturen kontrolleres vha. et termoelement plassert på røroverflaten ved karets bakende, som angitt i figuren. Det er nødvendig at termoelementet isoleres s.a. det ikke påvirkes av lufttemperaturen. Vannet sirkuleres vha. en enkel drillpumpe som drives elektrisk av en drillmaskin, eventuelt en liten el-motor. Tanken bak dette systemet er at vannet tilfører issørpen varme gjennom aluminiumsrøret og starter dermed smelting av isen rundt røret. Vannet fungerer derfor som en

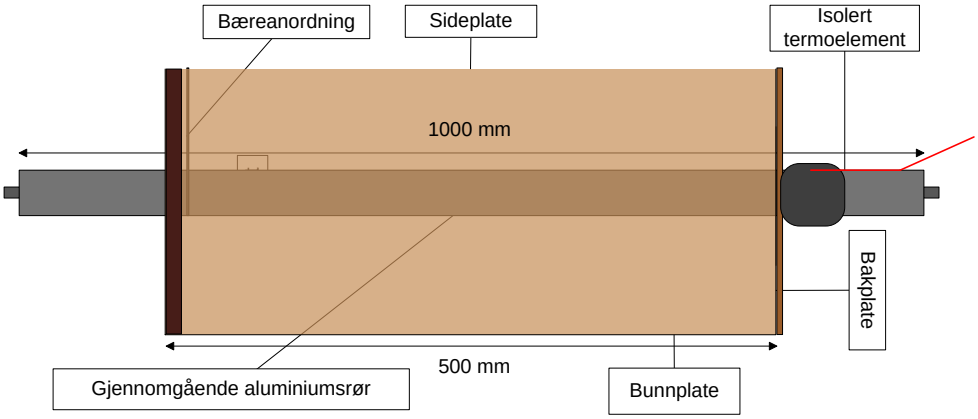
regulerbar varmelast ettersom det kan tilføres varme ved hjelp av varmeelementet i den åpne beholderen.

For å kunne studere smelteprosessen rundt aluminiumsrøret kreves det et IR-transparent materiale rundt røret i den enden hvor vannet entrer issørpebeholderen. Gjennom undersøkelse av mange ulike stive og gjennomsiktige materialer, som forskjellige typer glass og plexiglass, ble ingen funnet å være transparente med IR-strålingen. Alternativet er bruk av gjennomsiktig plast, selv om dette gir store utfordringer med tanke på at et rør skal gå gjennom plasten samtidig som plasten må tåle vekten av issørpen og fremdeles være tett. Plast vil gi etter for vekten av issørpen og dermed ikke gi en slett flate rundt røret, noe som kan påvirke kamerabildet. Men ettersom alle glasstyper reflekterer IR-strålingen, er plast det eneste gjenværende alternativet hvis forsøket skal ha hensikt.

Figur 2-2 beskriver i detalj karets front (til venstre) med plasten rundt røret og karets bakplate (til høyre) hvor røret går gjennom treplaten og ut av karet. En silikonfuge legges rundt røret i bakenden som tetning, mens plasten i front tres rundt røret og holdes fast med en slangeklemme. For at ikke røret skal ”hvile” på plasten henges det opp med en tilsatstråd (bæreanordningen). Lister skrues på for å feste plasten rundt fronten av karet. *Figur 2-3* viser issørpebeholderen med tilhørende komponenter og dimensjoner i detalj.

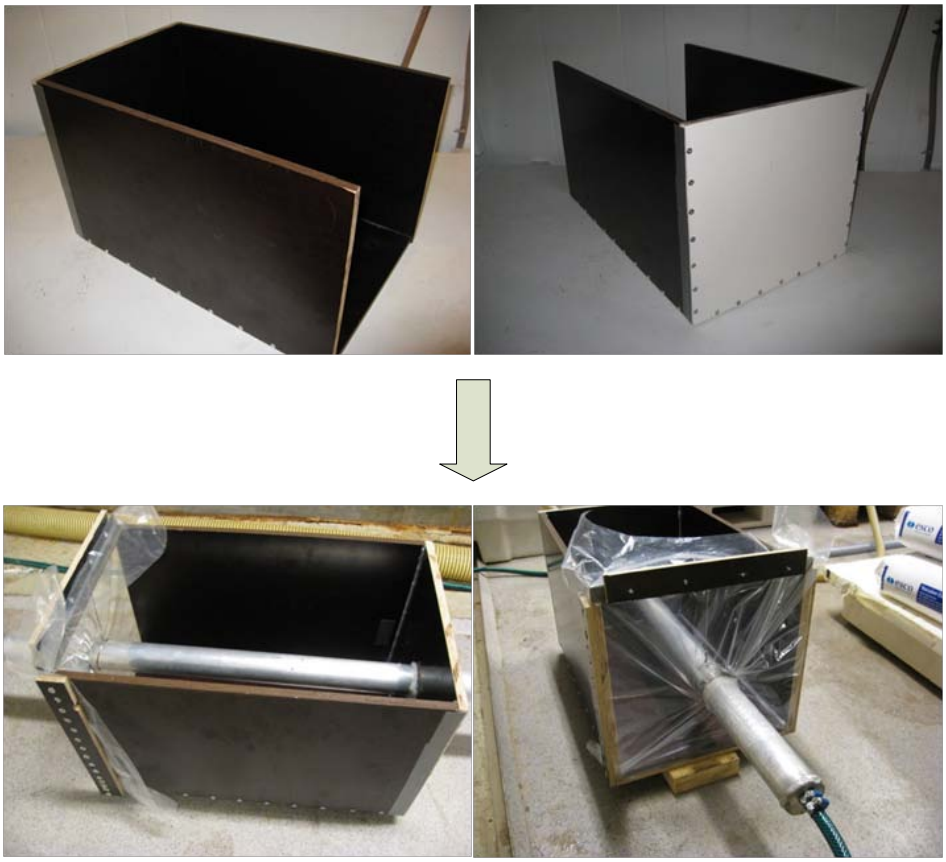


Figur 2-2: Detaljbeskrivelse av issørpebeholderens konstruksjon foran (venstre) og bak (høyre)



Figur 2-3: Detaljbeskrivelse av issørpebeholderens konstruksjon sett fra siden

Figur 2-4 viser hvordan karet ble satt sammen og seende ut, med gjennomgående aluminiumsrør og plast rundt røret i den ene enden. I bildet nederst til høyre ser man også slangen koblet inn på røret med dobbel slangeklemme. Denne løsningen ga ikke et fullstendig tett kar, men tett nok til at forsøkene er gjennomførbare. Den eneste holdbare måten å feste plasten på, var å tre den utenpå røret og feste den med en slangeklemme. Dette er noe ugunstig ettersom klemmen bygger ut fra røret, og kan medføre forstyrrelser i det termiske kameraets bilde. I *Vedlegg 1* finnes en bildeserie av systemet i helhet.



Figur 2-4: Bildeserie som beskriver ferdigstillingen av karet brukt i forsøk med termisk kamera

2.2 Utvikling av modellprodukt for temperaturmålinger

Det skal utvikles et modellprodukt til temperaturmålinger i en kjøleprosess med issørpe, som videre kan brukes til beregninger av et varmeovergangstall mellom produkt og issørpe. For å få mer hold i målinger og beregninger er det kommet fram til at det må produseres minst tre likedannete modeller. Dette er nødvendig for å se om beregningene holder seg innenfor rimelige svingninger, ettersom store forskjeller vil tyde på stor usikkerhet i forsøket. For å oppnå tre likedannete modeller og muliggjøre beregninger av varmeovergangen kreves en enkel geometri hos modellene, og at de består av et materiale med kjente termiske egenskaper. Det er ønskelig at modellene ligger forholdsvis nærme en fisk når det gjelder størrelse og innhold, s.a. at kjøleprosessen gjenspeiler til en viss grad hva man ville hatt for en fisk. Av den grunn er det naturlig at modellen består av en høy andel vann med en viss mengde salt for å senke frysepunktet, s.a. det ikke oppstår frysing under målingene. Det er flere årsaker til at man vil unngå frysing:

- kun kjøleprosessen ned til temperaturer i nærheten av frysepunktet er interessant, ettersom konservering av fersk fisk ombord på fiskebåtene aldri innebærer frysing
- beregningsmodellen som ble utarbeidet gjelder ikke for frysing
- modellenes innhold (blandingsmassen) endrer struktur ved frysing, s.a. en modell ikke vil kunne brukes i flere forsøk hvis den først har gjennomgått frysing.

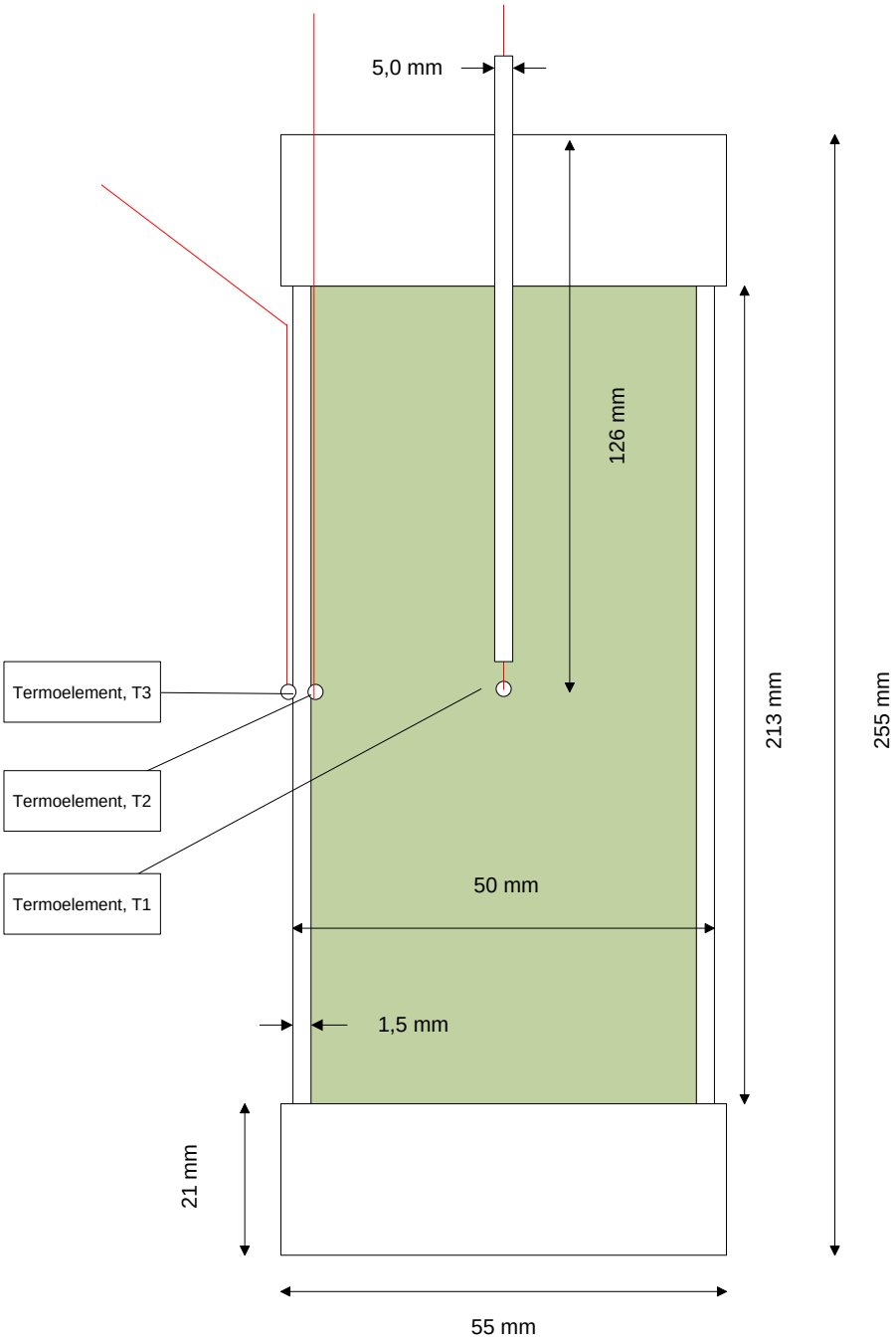
I tillegg til saltet må det tilsettes et stivelsesmiddel for å få en fast masse, gelatin i dette tilfellet. For at denne massen skal bevares under forsøkene tas det i bruk et rør av plast som fylles med blandingen av vann, salt (NaCl) og gelatin. Plastrøret fungerer dermed som ”skinnet” hos en fisk, selv om materialet og tykkelsen av dette er svært ulikt skinnet hos fisken. Sammensetningen i blandingen bestemmes ut i fra frysepunktet man ønsker, som kan bestemmes vha. to enkele regneark i Excel (gitt i *Vedkegg* 2). Ved å bruke et slikt plastrør som beskrevet, vil modellene få

en sylinderutforming med gitte dimensjoner, noe som forenkler beregningsmodellen. Det er nødvendig å kjenne de termiske egenskapene hos fyllmassen, og de kan måles vha. et eget multimeter bygd for kalorimetriske målinger. Dette vil være nøyaktig nok så lenge man sørger for at blandingen man tar målinger av og blandingen man fyller rørene med er av lik sammensetning, altså stammer fra den samme blandingen.

Figur 2-5 beskriver modellen slik den ble konstruert, med angitte dimensjoner og plassering av termoelementer. Som figuren viser ønsker man å plassere ett av termoelementene så sentralt som mulig for å få målt kjernetemperaturen, ett av termoelementene på innsiden av røroverflaten og ett av termoelementene på utsiden av røroverflaten. De tre målepunktene skal dermed optimalt sett ligge på linje fra sentrum og radielt utover. I *Figur* 2-5 finner man disse som hhv. T1, T2 og T3.

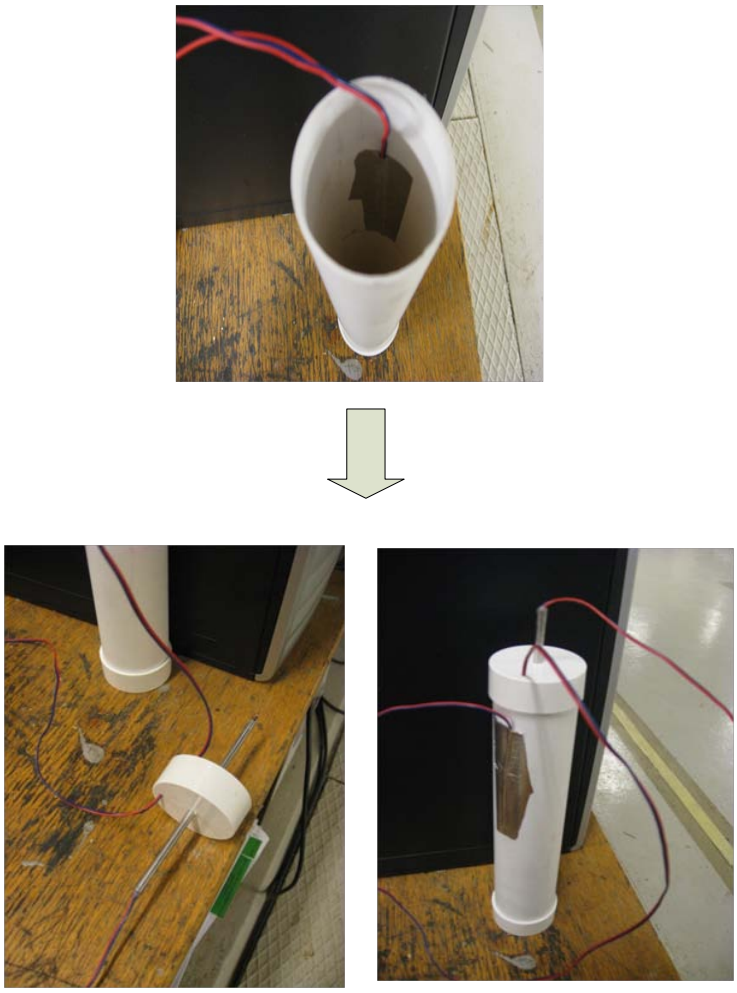
Beholderen består av et 25 cm langt rør i plast, som opprinnelig produseres av 'Foma' til bruk i rørsytemer for deres sentralstøvsugere. Røret lukkes i endene med tilhørende endekapper. I den ene enden lages et hull i sentrum av endekappen, hvor man trer igjennom et kanylerør halveis ned i røret. Termokabelen ligger da limt fast inne i kanylerøret s.a. selve termoelementet, T1 i *Figur* 2-5, stikker så vidt ut i enden. Dermed får man stivet av termokabelen s.a. man er sikker på termoelementets posisjon. De andre to termoelementene, T2 og T3, festes inntil røroverflaten vha. aluminiumsteip. Termokabelen til T2 tres gjennom et lite hull i endekappen.

Før beholderen lukkes i begge ender må røret fylles til randen med den ferdige blandingsmassen med vann, salt og gelatin. Etter at beholderen er fylt opp og lukket, settes den til avkjøling s.a. at innholdet stivner og inntar fast form. Blandingen forholder seg fast ved romtemperatur s.a. det ikke er nødvendig med oppbevaring i et avkjølt rom.



Figur 2-5: Detaljbeskrivelse av modellproduktets konstruksjon

Figur 2-6 fremstiller hvordan modellproduktene ble ferdigstilte. Modellene har noen faktorer ved seg som er unøyaktige og som vil variere litt modellene i mellom, slik som plassering av termoelementer og fyllmengde av blandingsmassen. Dette er unøyaktigheter av mindre betydning, men nevnes for ordens skyld.



Figur 2-6: Bildeserie som beskriver ferdigstillingen av modellprodukt

2.3 Modellproduktets termiske egenskaper

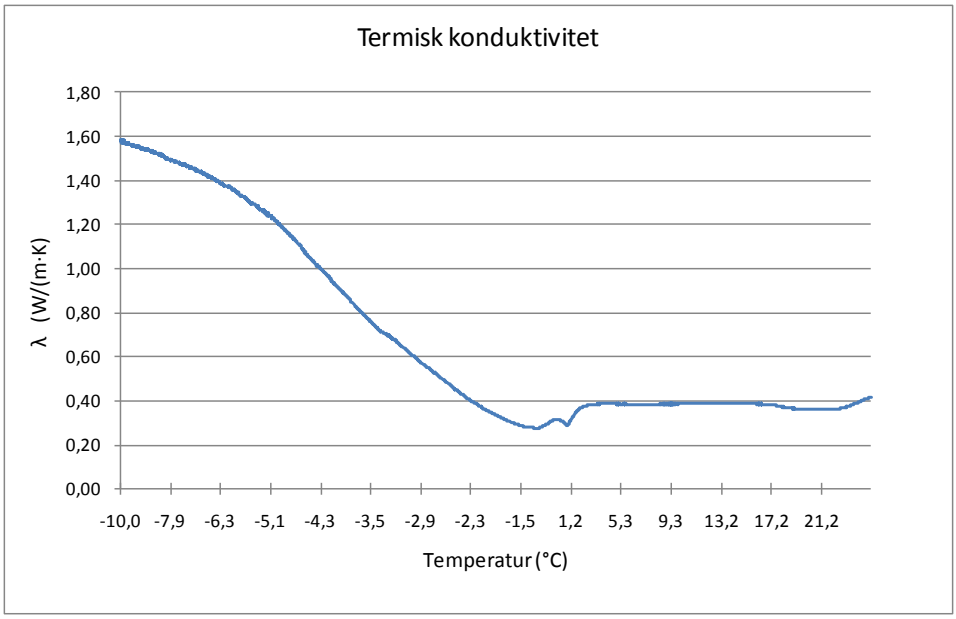
I dette avsnittet blir resultatene fra målingen av termiske egenskaper hos modellproduktets innhold presentert. Basert på målingsdataene i det aktuelle temperaturområdet, ble det regnet ut en gjennomsnittlig verdi for følgende egenskaper; termisk konduktivitet, spesifikk varmekapasitet og massetetthet. Egenskapenes variasjon med temperaturen presenteres her som kurver, Figur 2-7 – *Figur 2-12*, innenfor temperaturintervallet: -10 - +25 °C. Til sammenligning blir tilsvarende kurver for torsk presentert (Eikevik, 2009) for å se hvor nære modellproduktet ligger en saltvannsfisk i egenskaper, og dermed også hvor realistisk modellproduktet er i så måte.

I avsnitt *2.2* ble det poengtert at modellprodukts innhold og blandingen som man måler egenskapene hos bør være av lik sammensetning. Dette lot seg dessverre ikke gjøre da den blandingen som man først målte egenskaper hos ga et frysepunkt mellom -1 og -2 °C, selv om blandingen var tilsatt salt tilsvarende et frysepunkt på ca. -3 °C. Unøyaktighet i oppmåling av salt og unøyaktighet i målingene kan være årsaker til dette. Som diskutert i avsnitt *2.*2 er det viktig å forsikre seg om at det ikke oppstår frysing i modellproduktets innhold, og det ble derfor laget en ny blanding med en saltmengde tilsvarende et frysepunkt på ca. -5 °C. Som følge av at måleapparatet var utilgjengelig i denne perioden, fikk man ikke gjort målinger av denne blandingen, som bestod av sammensetningen gitt i *Tabell 2-1*. Dette medørte at man måtte benytte materialegenskapene funnet i den første målingen. Gjennomsnittlig verdi basert på målte verdier over frysepunktet ble regnet ut for hver egenskap, og brukt som konstant verdi i datamodelleringen. Selve modelleringen er nærmere beskrevet i kapittel *4*.

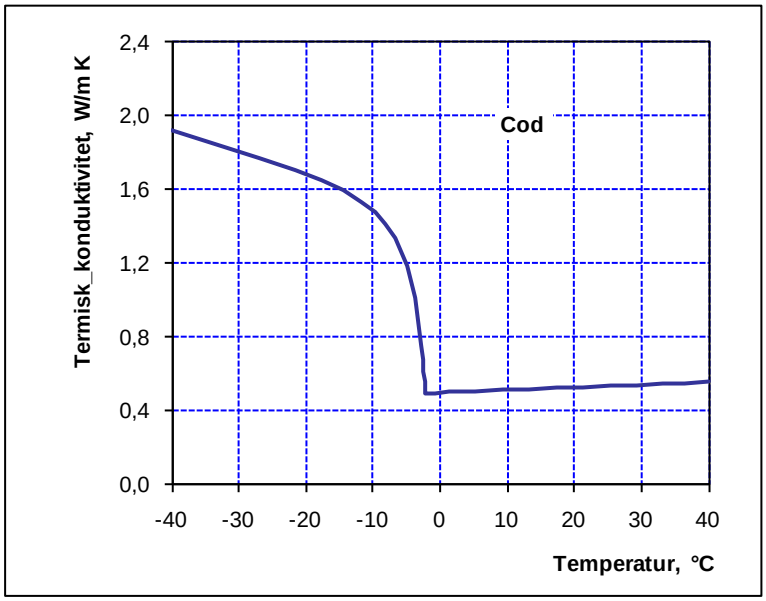
Tabell 2-1: Stoffsammensetningen i modellproduktets innholdsmasse

Stoff	Mengde	Andel
Vann	1775 g	0,88
Salt	139,78 g	0,07
Gelatin	100,78 g	0,05

TERMISK KONDUKTIVITET

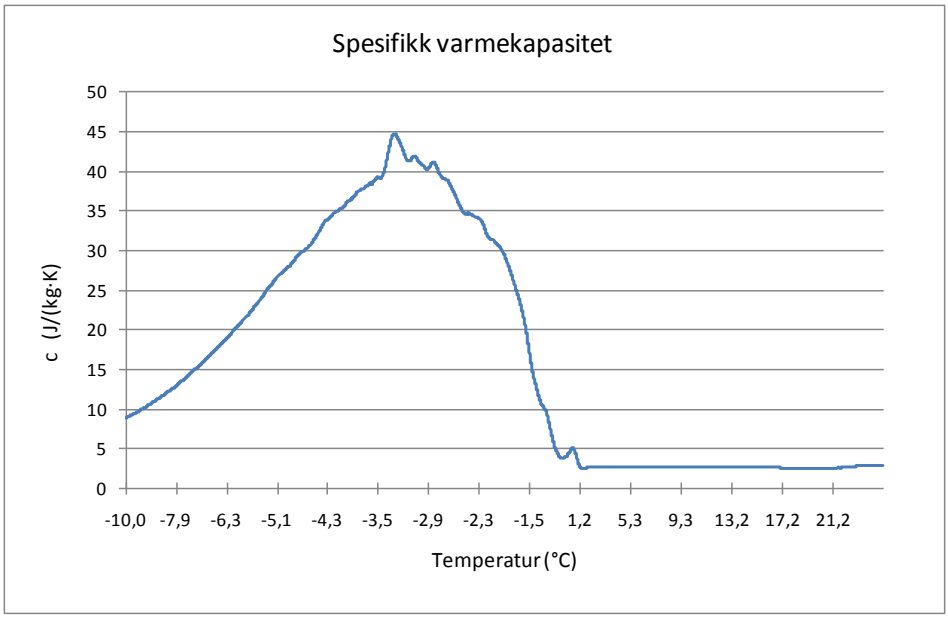


Figur 2-7: Termisk konduktivitet vs. temperatur for modellproduktets innholdsmasse

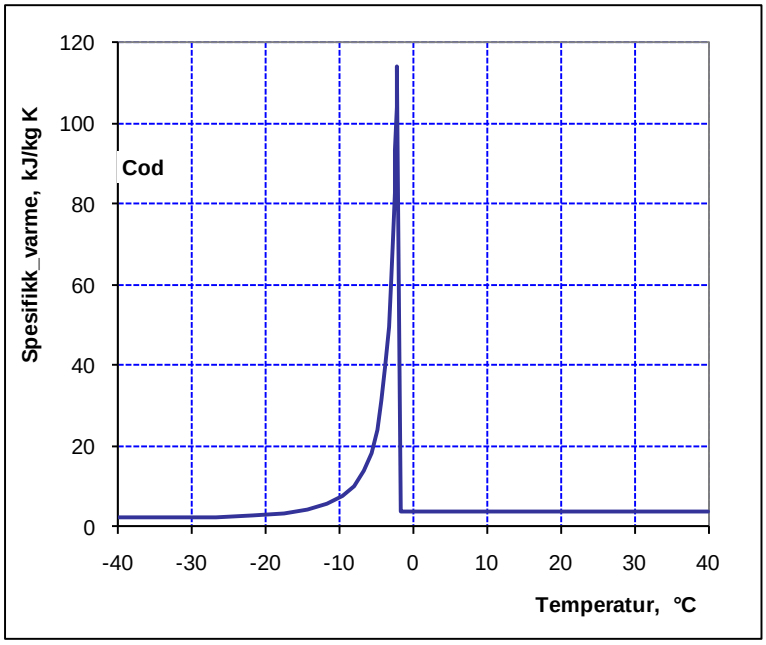


Figur 2-8: Termisk konduktivitet vs. temperatur for torsk

SPESIFIKK VARMEKAPASITET

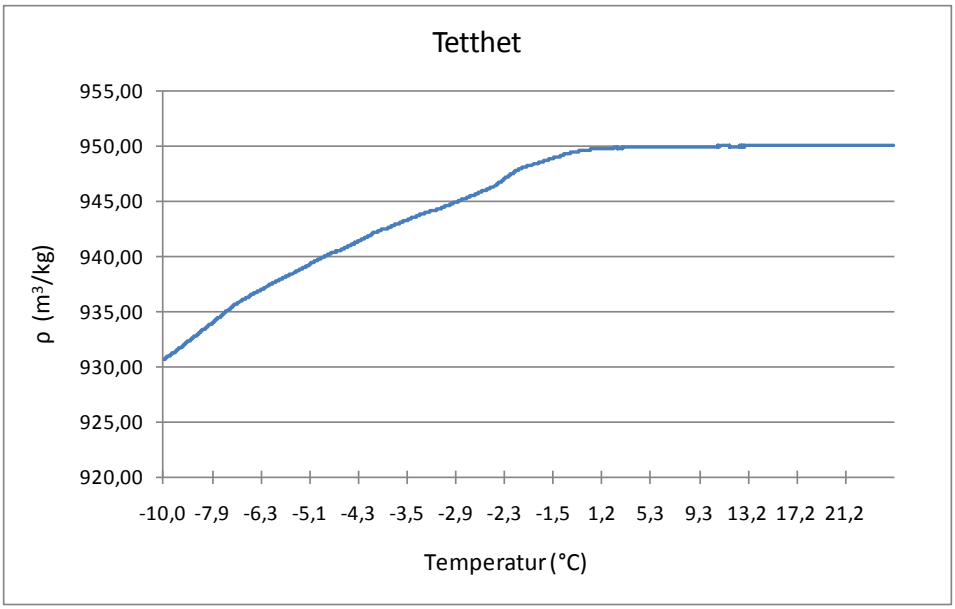


Figur 2-9: Spesifikk varmekapasitet vs. temperatur for modellproduktets innholdsmasse

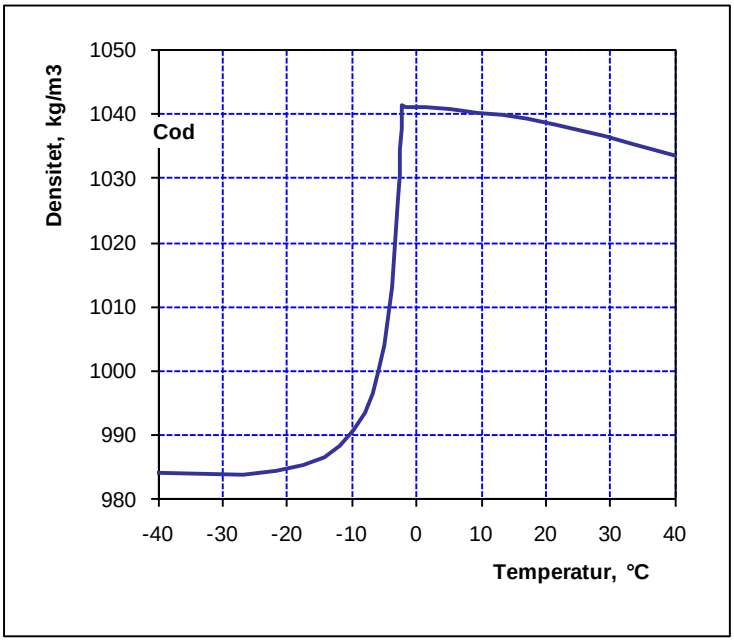


Figur 2-10: Spesifikk varmekapasitet vs. temperatur for torsk

MASSETETTHET



Figur 2-11: Tetthet vs. temperatur for modellproduktets innholdsmasse



Figur 2-12: Tetthet vs. temperatur for torsk

Tabell 2-2: Gjennomsnittlige verdier av termiske egenskaper hos modellprodukt

Egenskap	Temperaturinterv (°C)	Gj.snittsverdi	Standardavvik	Enhet
Konduktivitet, λ	[-1,5 , 25]	0,368	0,0330	W/(m·K)
Spesfikk varme, c	[1,1 , 25]	2,708	0,0840	kJ/(kg·°C)
Tetthet, ρ	[-1,5 , 25]	950,21	0,2247	kg/m^3

Tabell 2-2 gir de gjennomsnittlige verdiene med tilhørende standardavvik for hver av materialegenskapene. Verdiene ble beregnet ut i fra målinger innenfor det gitte temperaturintervallet i tabellen. Temperaturintervallet måtte legges litt høyere for spesifikk varmekapasitet for å utelate svingningen før frysepunktet, som mest sannsynlig skyldes støy/forstyrrelse i måleapparatet som følge av svingninger i omgivelsestemperatur. I *Tabell 2-3* er materialegenskapene for PVC, materialet i plastrøret som omringer modellproduktets innhold, gitt. Tallene er hentet fra (Enclopedia, 2010b).

Tabell 2-3: Termiske egenskaper hos PVC (materialet i plastrøret)

Egenskap	Verdi	Enhet
Konduktivitet, λ	0,16	W/(m·K)
Spesfikk varme, c	0,9	kJ/(kg·°C)
Tetthet, ρ	1390	kg/m^3

3 Eksperimentell metode

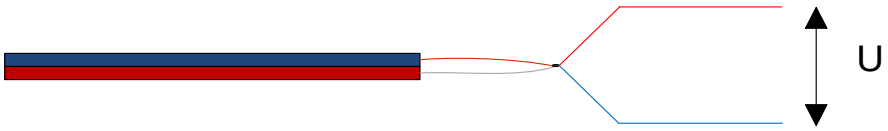
3.1 Bruk av termoelementer

I det eksperimentelle arbeidet ble det foretatt temperaturmålinger med såkalte termoelementer. Termoelementer benytter termospennings-prinsippet, som er basert på at når to ulike metaller kommer i kontakt med hverandre, oppstår en kontaktspenning i mikrovolt-området, angitt som ”U” i *Figur 3-1*. Størrelsen av denne spenningen avhenger av temperaturen, derav navnet termospenning. På den måten kan man måle temperaturen indirekte ved å måle et elektrisk signal (Davidsen, 2002).

Sammenhengen mellom den elektriske spenningen som oppstår og temperaturen må være kjent, og finnes gjennom kalibrering. På markedet finnes forskjellige typer standardiserte termokabler som man lager termoelementer av, og for disse er sammenhengen mellom spenning og temperatur kjent. I dette arbeidet har det blitt brukt termoelementer av type T. *Tabell 3-1* gir de standardiserte egenskapene hos type T termoelementer. α-verdien kalles termoelementets følsomhet og angir hvor mange μV termospenningenøker med når temperaturen øker med 1°C. (Davidsen, 2002) Som man ser er det snakk om mikrovolt, s.a. små signalforstyrrelser kan fort gi store utslag i temperaturmålingene. Ettersom mange av termoelemente ble utsatt for vann i forsøkene, var det viktig å legge en isolasjonshinne rundt metallene, s.a man unngikk krypstrømmer mellom dem. Slike krypstrømmer vil gi forstyrrelser i det elektriske signalet og dermed tilføre en usikkerhet i temperaturmålingene. Dette kan være et problem i vann, spesielt hvis vannet er urent. Metalltrådene ble isolert ved å lakkere dem med KONTAKT CHEMIE – Plastik 70 spraylakk.

Tabell 3-1: Standardiserte egenskaper hos type T termoelementer

Type	α(μV/°C)	Temperaturområde (°C)	Metaller (legeringer)
T	38	-200 - +350	Kobber / Konstantan



Figur 3-1: Type T termoelement

Når det opereres med termoelementer er det alltid nødvendig å gjennomføre en kalibrering. Kalibreringen foretas ved at man leser av temperaturen som termoelementet gir ved en kjent referansetemperatur, f.eks isvann (0 °C), og ser på avviket. Dette avviket kan enkelt tas høyde for ved å legge inn en konstant justeringsverdi i alle målinger gjort med termoelementet. Om en kalibrering gjort på denne måten er nøyaktig nok, avhenger av hvor stort temperaturområde man opererer innenfor. I denne sammenhengen vil temperaturene ligge innenfor et intervall på ca. 25 °C. Avvikene vil variere lite med temperaturen innenfor et såpass lite intervall, og en enkel justeringsverdi er derfor nøyaktig nok. Selv om justeringsverdien kun flytter temperaturkurvene opp eller ned i diagrammet uten å endre profilet, er det viktig at differansen mellom termoelementene i modellproduktet (*Figur* 2-5) er mest mulig korrekt. *Tabell 3-2* gir en oversikt over avviket det må tas høyde for hos alle termoelementene som ble brukt i eksperiment. Kalibreringen ble gjennomført på følgende måte:

- En bøtte ble tilsatt flakis produsert i en SCOTSMAN MF30 ICE FLAKER ismaskin og en mengde vann som ga en jevn blanding og holdt en temperatur på 0 °C, målt med TESTO 110 digitalt termometer
- Termoelementene ble etter tur senket ned i isvannet
- Temperaturene fikk stabilisere seg (temperaturen gitt av et termoelement vil aldri forholde seg konstant, men hele tiden ha små svingninger)
- Høyeste og laveste temperatur ble registrert over en ca. 10 sekunder lang periode, og et gjennomsnitt mellom de to verdiene ble funnet. Denne gjennomsnittsverdien blir deretter brukt som

justeringsverdi i alle måleserier (negativt avvikbetyr at det legges til en verdi, mens positivt avvik betyr at verdien må trekkes i fra).

Tabell 3-2: Justeringsverdier for temperaturmålinger funnet gjennom kalibrering

Termoelement #	Min. temperatur-avlesing (°C)	Max. temperatur-avlesing (°C)	Gjennomsnittlig temperaturavlesing (°C)	Referanse-temperatur (isvann) (°C)	**Justerings-verdi (°C)**
1	-0,15	-0,21	-0,18	0	**+0,18**
2	-0,37	-0,42	-0,395	0	**+0,395**
3	-0,32	-0,38	-0,35	0	**+0,35**
4	-0,41	-0,48	-0,445	0	**+0,445**
5	-0,35	-0,43	-0,39	0	**+0,39**
6	-0,25	-0,3	-0,275	0	**+0,275**
7	-0,42	-0,5	-0,46	0	**+0,46**
8	-0,16	-0,2	-0,18	0	**+0,18**
9	-0,12	-0,18	-0,15	0	**+0,15**
10	-0,12	-0,18	-0,15	0	**+0,15**

Selve systemet for logging av temperaturer bestod av en NATIONAL INSTRUMENTS NI cDAQ – 9172 dokkingstasjon for signalmoduler, med plass til 4 termoelementer i hver modul. Det ble totalt tatt i bruk 10 termoelementer, fordelt på 3 moduler. Dokkingstasjonen var koblet til en datamaskin, med LabVIEW 2009 versjon 9.0 installert. En egen .vi-fil (filtype i LabVIEW) designet for logging av temperaturer ble tatt i bruk. Systemet måler temperaturene kontinuerlig, og man velger selv hvor ofte man ønsker å logge temperaturene. Med logging menes at temperaturene i gitte tidspunkt (avhenging av loggeintervallet) blir lagret i et tekstdokument.

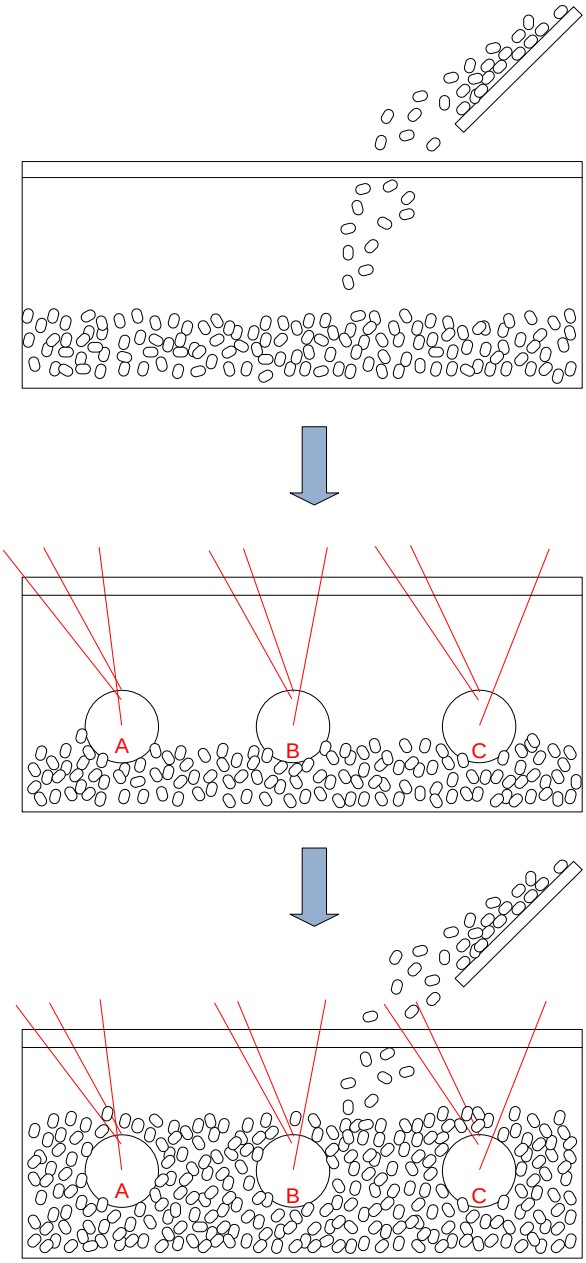
3.2 Kjølemetoder

Man ønsket gjennom eksperimentelt arbeid å undersøke varme-overgangen ved kjøling med issørpe, sammenligne denne med tradisjonell kjøling med flak-is, samt å verifisere tiltak for å bedre varmeovergangen i issørpen. Det ble derfor foretatt temperaturmålinger i de tre likedannete modellproduktene ved ulike kjølemetoder. I dette avsnittet beskrives den eksperimentelle prosedyren for hver metode. Issørpen brukt i forsøkene ble produsert av ferskvann tilsatt salt (mellom 3,5 - 4,5%, målt av en BRIX konsentrasjonsmåler) i et issørpeaggregat levert av Pam Refrigeration AS (Halden). Den samme vann/saltløsningen ble brukt til produksjonen av issørpe gjennom hele den eksperimentelle perioden. Dette medførte en viss variasjon i saltkonsentrasjonen pga. noe erstatning av ferskvann underveis, og dermed også en variasjon i issørpens temperatur. Temperaturen i issørpen er også avhengig av hvor lenge aggregatet går. Årsaken til dette er at etter hvert som isinnholdet øker, øker saltkonsentrasjonen i væsken og frysepunktet senkes noe før ny is dannes. Teorien bak dette ble gjennomgått i delkapittel *1.2*. Issørpeaggregatets virkemåte og tekniske spesifikasjoner er beskrevet i *Vedlegg 3*.

3.2.1 Tradisjonell kjøling med flak-is

Flak-is ble produsert i en SCOTSMAN MF30 ICE FLAKER ismaskin. (Scotsman, 2006) oppgir at isen holder en temperatur på 0 – -0,5 °C. Ordinært produserer maskinen isflak med en gjennomsnittlig karakteristisk diameter på ca. 12 mm. I laboratoriet finnes en egen isknusingsenhet, som ga muligheten for produsere finere is med en gjennomsnittlig karakteristisk diameter på ca. 4 mm. Prosedyren beskrevet i *Figur 3-2* ble gjennomført med flak-is av både grov (~12 mm) og fin (~4 mm) struktur til sammenligning. En beholder ble først halveis fylt med flak-is. Modellproduktene ble så plassert ned i isen, og deretter tildekket med is på den måten som *Figur 3-2* beskriver. Modellproduktene ble markert med A, B og C for å kunne gjenskape lik

plassering i hvert forsøk. Logging av temperaturer ble startet opp umiddelbart etter at den siste isen var tømt opp i beholderen.

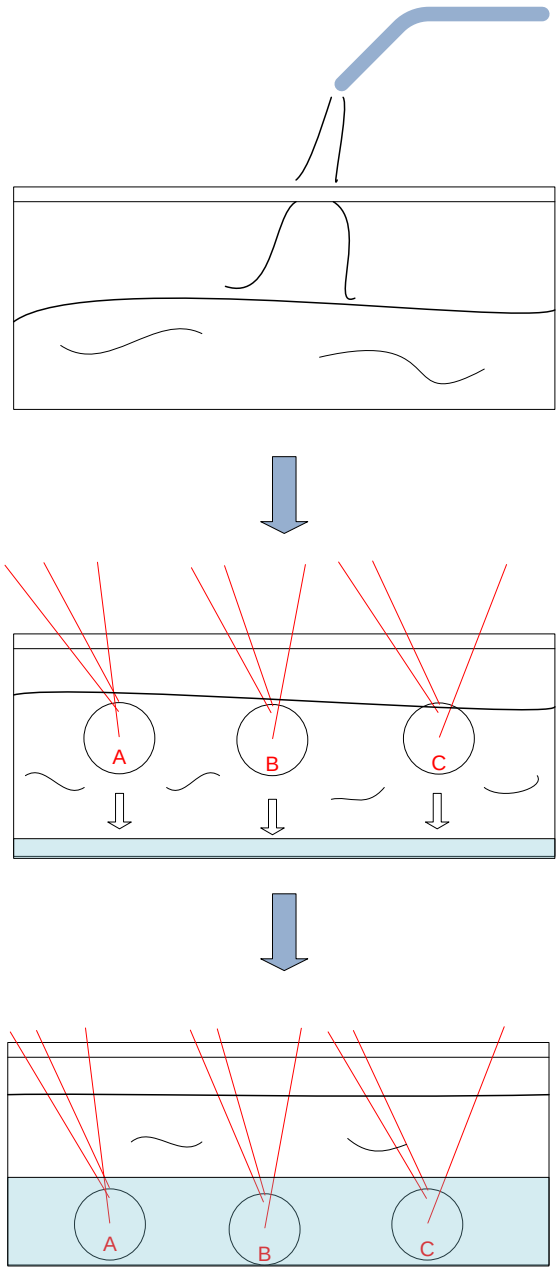


Figur 3-2: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med flakis

3.2.2 Kjøling med issørpe - uten drenering

Når det gjelder håndtering av issørpen ombord på fiskebåter, finnes det få opplysninger i litteraturen. I (Egolf, 2005) blir det bekreftet at chilenske, nederlandske og islandske fiskere benytter issørpe til direkte kjøling av fisk og annen fangst. Issørpen blir her produsert av sjøvann ombord på båtene, og når fangsten tas inn blir den blandet med issørpe i beholdere. Det sies at issørpen i noen tilfeller blir drenert, uten at det blir gitt en nærmere beskrivelse av hvordan dreneringen foregår. Drenering betyr uansett at væskeandelen i issørpen reduseres, noe som gir en større iskonsentrasjon. Effekten av drenering var noe av det man ønsket å undersøke nærmere i det eksperimentelle arbeidet. Det ble derfor foretatt temperaturmålinger i modellprodukt ved kjøling i tre ulike tilfeller angående drenering; uten drenering, forhåndsdrenering og kontinuerlig drenering.

Figur 3-2 beskriver forsøksprosedyren i tilfellet uten drenering av issørpen. Som figuren viser ble issørpe tappet direkte opp i en beholder. Da beholderen var fylt opp ble de tre modellproduktene (markert med A, B og C) sluppet ned i issørpen, hvor de så sank til bunnen av beholderen ettersom de ikke flyter, som figuren antyder. Isen skiller seg fra saltvannet på grunn av isens oppdrift, og skillet mellom is og vann er markert ved overgangen fra hvitt til blått i beholderen. Det ble registrert at modellproduktene ble liggende på bunnen, kun omgitt av væske uten kontakt med isen.



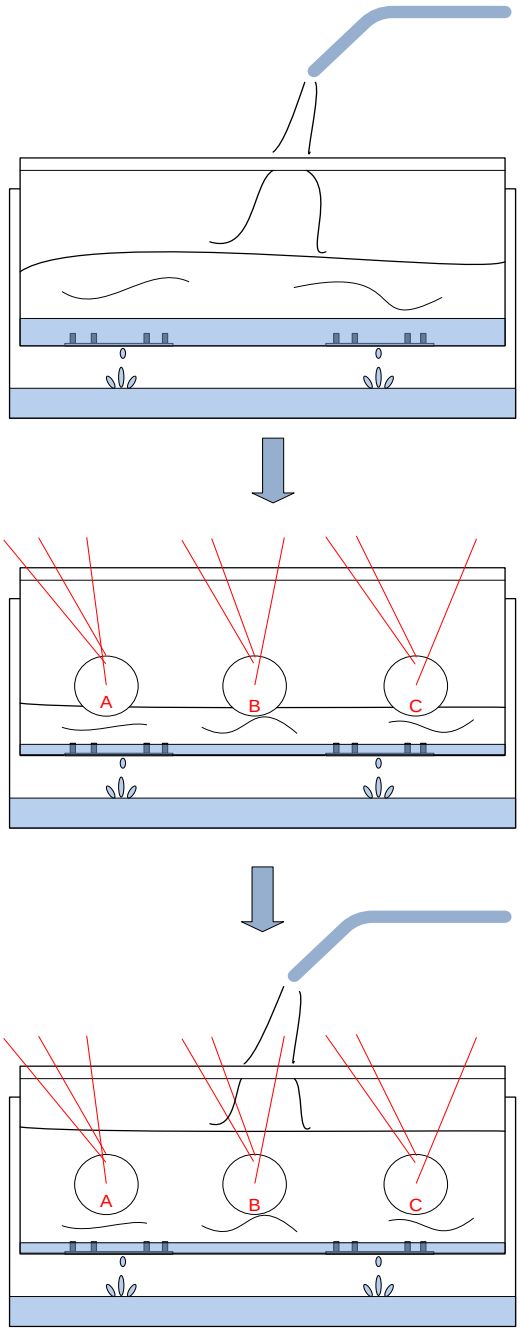
Figur 3-3: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med issørpe uten drenering

3.2.3 Kjøling med issørpe – kontinuerlig drenering

Som nevnt i forrige avsnitt ble drenering av issørpen håndtert på to forskjellige måter, hhv. forhåndsdrenering og kontinuerlig drenering. Prosedyren for den kontinuerlige dreneringen er beskrevet i *Figur 3-4*. Systemet for dreneringen ble laget på enkelt vis ved å gjøre to hull med ca. 4 cm diameter i bunnen av plastbeholderen, legge på en metallnetting og feste den med skruer og muttere. Denne beholderen ble hengt på kantene av en større beholder, som dermed samlet opp den drenerte væsken. På den måten fikk man issørpebeholderen opp fra gulvet i tillegg til at all is og væske ble bevart til neste forsøk. Issørpe ble tappet direkte opp i beholderen med innlaget drenering, hvor væsken fikk renne av til det var stor nok iskonsentrasjon til at isen klarte å bære modell-produktene, som antydet i *Figur 3-4*. Beholderen ble så fylt opp med issørpe slik at modellproduktene var fullstendig tildekket. Bilder av dreneringskonstruksjonen finnes i *Vedlegg 4*.

I tilfellet hvor issørpen istedet ble forhåndsdrenert, ble issørpe tappet opp i beholderen med innlagt drenering, væske fikk renne av til issørpen ikke lengre hadde et tydelig skille mellom is og væske, for så å bli tømt over i en annen beholder. Modellproduktene ble plassert i issørpen på samme måte som i tilfellet med kontinuerlig drenering.

Målet med å undersøke de ulike håndteringene av issørpen var å se væskeinneholdets (iskonsentrasjonen) betydning for kjøleeffekten.



Figur 3-4: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med issørpe med kontinuerlig drenering

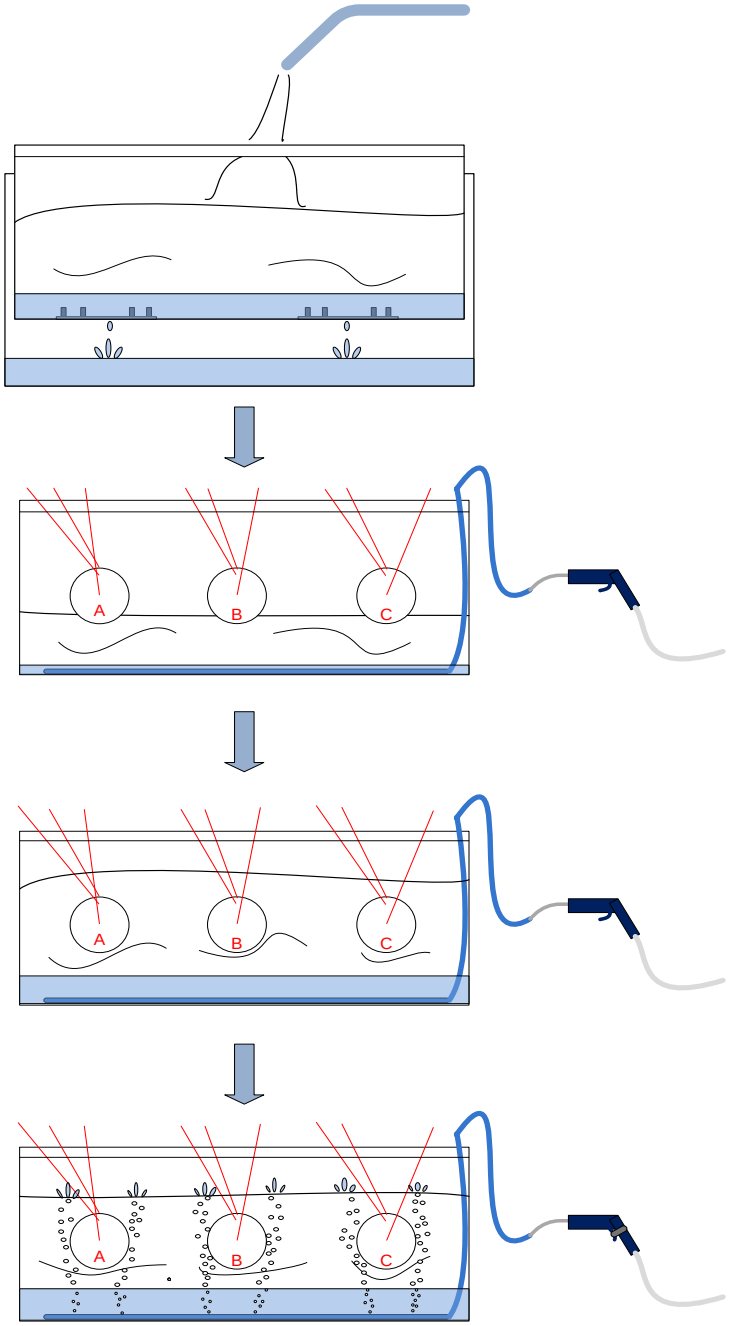
3.2.4 Kjøling med issørpe – luftinnsprøyting for omrøring

Det er ingen tvil om at en fisk omgitt av issørpe i første omgang vil oppleve en meget høy kjøleeffekt gjennom den gode kontakten mellom is og produkt, men hva skjer etter hvert som isen smelter? Man ser for seg at fisken i økende grad vil være omgitt av væske, som vil føre til at man mister mye av kjøleeffekten fra issmeltingen, og dermed mye av hensikten med issørpen. Selv om isens tilstedeværelse sørger for å holde en tilnærmet konstant lav temperatur, vil en væskefilm rundt produktet gi varmetransport i form av varmeledning i vannet, istedet for smelting av is på produktoverflaten. Det er derfor ønskelig å skape en bevegelse i issørpen, slik at det vannsjiktet man tror dannes etter hvert som isen smelter, vil brytes opp og kontakten mellom is og produkt bedres. I tillegg skaper en væske i bevegelse som kjent et økt konvektivt varmeovergangstall i fohold til en væske fullstendig uten bevegelse hvor all varmetransport foregår ved varmeledning (Cengel, 2006b). Man får altså en tvungen (”forced”) konveksjon som øker varmeovergangen i forhold til den naturlige konveksjonen i et fluid.

Et forslag til tiltak for å skape omrøring i issørpen, er injisering av luftbobler. Ved å tilføre trykkluft i bunn av beholderen vil luftbobler stige opp gjennom issørpen, og på den måten sette issørpen i bevegelse. Luft vil heller ikke skade produktene slik som omdreining av noe mekanisk i beholderen vil gjøre.

I det samme laboratoriet som issørpeaggregatet står, finnes et trykkluftsuttak. Det ble koblet en slange til uttaket med en ”luftpistol” i enden. En annen slange tilpasset luftpistolens trut ble koblet til luftpistolen, som har som funksjon å regulere lufttilførselen. Slangen ble påført små hull, til sammen åtte hull med avstand 6-8 cm og diameter i størrelsesorden 1-2 mm. Deretter ble slangen lagt som en ”U” i bunnen av karet hvor den ble festet med teip. Løsningen finnes som bilde i *Vedlegg*

4. Prosedyren i forsøket med luftinnsprøyting er beskrevet i *Figur 3-5*. Issørpen ble her forhåndsdrenert som beskrevet i forrige avsnitt, deretter tømt over i beholderen med innlagt luftslange. Modellproduktene ble plassert ned i issørpen på samme måte som i forsøkene med drenering, og lufttilførsel ble satt i gang samtidig som temperaturmålinger ble startet. Luftpistolens ”avtrekker” ble festet med teip slik at den holdt en fast posisjon og dermed tilførte et konstant og kontinuerlig lufttrykk under hele kjøleprosessen.



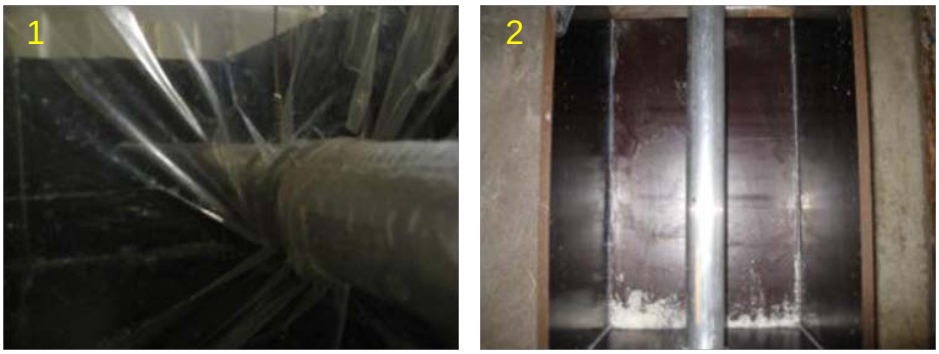
Figur 3-5: Enkel beskrivelse av prosedyren for temperaturmålinger ved kjøling med forhåndsdrenert issørpe med luftinnsprøyting

3.3 Issørpestudie med termisk kamera

I avsnitt *3.2.4* ble dannelsen av væskesjikt under interaksjonen mellom issørpe og produkt diskutert. I forsøk på å bekrefte/avkrefte dette ble et system tilpasset forsøk med termisk kamera utviklet, beskrevet i avsnitt *2.1*. Det ble gjennomført to ulike forsøk hvor forskjellen var plasseringen av det termiske kameraet, som er av typen ”FLIR i-Series Infrared Cameras”. Posisjonene er fremstilt i *Figur 3-6*, hvor bildene tatt med et vanlig kamera viser det samme området som ble sett av det termiske kameraet. Det hadde vært å foretrekke at kameraet ble plassert normalt på røret, slik at hele området rundt røret hadde blitt med i kamerabildet. Dette lot seg ikke gjøre ettersom røret stikker såpass langt ut fra karet, i tillegg til at slangeklemmen bygger mye på den ene siden av røret, noe som skaper forstyrrelser i kamerabildet. Kameraet ble derfor plassert på motsatt side, som *Figur 3-6* antyder. Prosedyren i forsøkene var som følgende (henviser til *Figur 2-1* for systemoppsett):

Posisjon 1: Issørpebeholderen ble fylt med forhåndsdrenert issørpe slik at aluminiumsrøret var fullstendig tildekket. Det ble tatt bilder med det termiske kameraet med jevne mellomrom, ca. 1 – 6 min mellom hvert bilde.

Posisjon 2: I dette tilfellet ble forhåndsdrenert issørpe fylt opp slik at bare nedre halvdel av aluminiumsrøret var i kontakt med issørpen. Issørpen ble jevnet til slik at hele røret hadde god kontakt med isen ved oppstart. På denne måten fikk man bedre innsyn til røret enn i posisjon 1, hvor den ujevne plasten skapte vanskeligheter med å tyde kamerabildet. Bilder ble tatt med jevne mellomrom, ca. 1 – 6 min mellom hvert bilde.



Figur 3-6: Det termiske kameraets posisjoner sett gjennom et vanlig kamera

4 Modellering av kjøleprosessen

Temperaturmålinger tatt under nedkjøling av modellproduktene gir temperaturenes variasjon med tiden, og derav temperaturkurver som representerer nedkjølingshastigheten. Ved å sammenligne temperaturkurvene for hver av kjølemetodene kan man enkelt se hvilke metoder som gir størst kjøleeffekt. Basert på temperaturmålingene ønsker man å tallfeste kjøleeffekten i form av et varmeovergangstall mellom modellprodukt og omgivelser. Ettersom modellproduktene har en enkel geometri (sylinder) og kjente termiske egenskaper, i tillegg til at omgivelsestemperaturen forholder seg tilnærmet konstant (så lenge det er rikelig med is tilstede), ga det mulighet for datamodellering av kjøleprosessen. Modelleringen ble utført i dataprogrammet MATLAB R2010a.

4.1 Teoretisk problemstilling - Varmeledning

Det fysiske problemet er kort fortalt varmeledning i en sylinder med en uniform starttemperatur og konstant omgivelsestemperatur. Antakelsen om konstant omgivelsestemperatur er nødvendig ettersom man ikke har noe kjennskap til variasjoner i denne. Antakelsen er også rimelig idet man har stor mengde is tilstede under hele kjøleprosessen, bortsett fra tilfellet med issørpe uten drenering, hvor modellproduktene var omgitt av kun væske med isen flytende over. En annen antakelse som ble gjort, var å anta at all varmetransport foregår i radiell retning sett fra sentrum av sylinderen. Dette reduserer problemet til et éndimensjonalt problem, noe som forenkler modelleringen betraktelig. Med éndimensjonalt menes at temperaturen er avhengig av kun én romvariabel. Man ser kun på det som skjer i tverrsnittet av sylinderen, og modellerer på den måten en disk, vist i *Figur 4-1* istedet for en sylinder. Antakelsen gjelder for en uendelig lang sylinder, men er rimelig så lenge sylinderens diameter er liten i forhold til lengden. I dette tilfellet tilsvarer sylinderens lengde ca. 5 diametere (se

Figur 2-5), og antakelsen er derfor rimelig. Punkt 1, 2, 3 og 4 i *Figur 4-1* representerer hhv. kjernetemperatur, temperatur på innside av røroverflate, temperatur på utside av røroverflate og omgivelsestemperatur. Den ytre ringen markerer plastrøret, mens det grønne feltet markerer modellproduktets innhold.

Varmeledningsproblemet modelleres som éndimensjonalt, slik at temperaturen avhenger av kun én romkoordinat, avstanden 'r' fra sentrum. Avstanden fra sentrum til hhv. innsiden og utsiden av plastrøret er markert som 'R_i' og 'R_y' i figuren. Varmeledningsproblemet har et transient temperaturforløp, dvs. at temperaturen T også varierer med tiden → T = T(r,t). Den generelle ligningen som beskriver det transiente temperaturforløpet i et sylindertverrsnitt, er i (Cengel, 2006a) gitt som:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \dot{e}_{gen} = \rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.1}$$

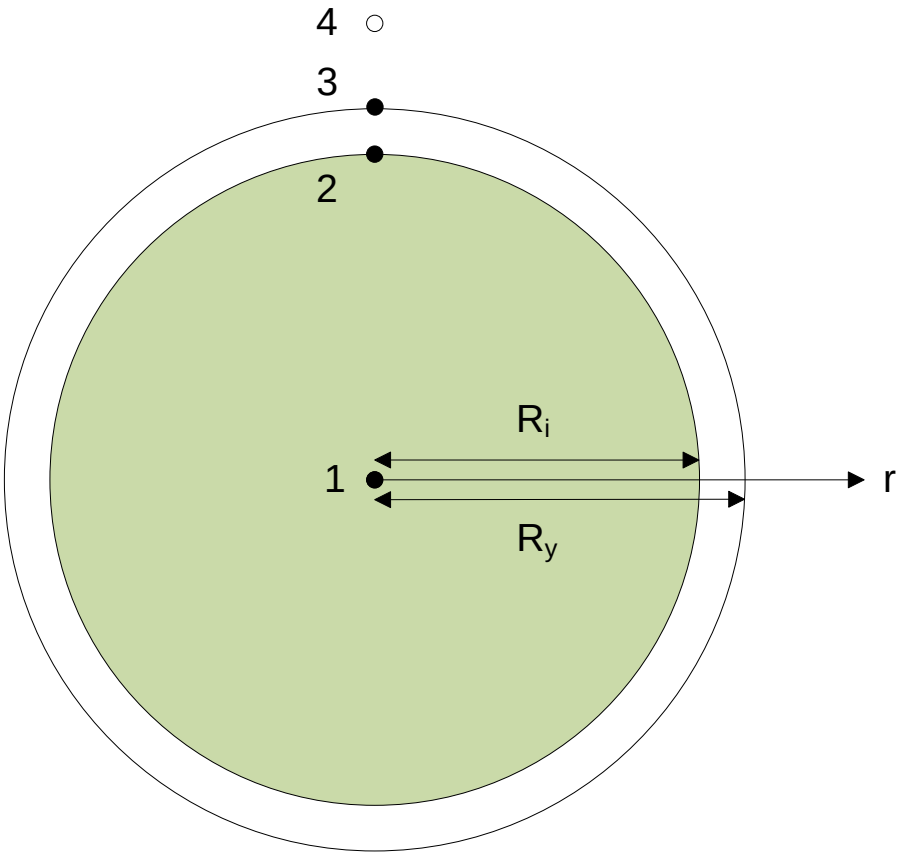
hvor λ, ρ og c er hhv. materialets konduktivitet, massetetthet og varmekapasitet, mens e_{gen} er intern varmegenerering som i dette tilfellet er lik null. Materialegenskapene kan i det aktuelle temperaturområdet med god tilnærmelse antas å være konstante (henviser til delkapittel *2.3*). Med utgangspunkt i dette, kan (4.1) forenkles til følgende uttrykk:

$$\frac{\lambda}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.2}$$

Ved å dividere begge sider av (4.2) med λ og innføre den termiske diffusiviteten $a = \lambda/\rho c$ (Cengel, 2006b), står man igjen med:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (4.3$$

(4.3) er den partielle differensiallignigen som beskriver det transiente varmeledningsproblemet.



Figur 4-1: Geometrien i modelleringen – tverrsnittet av modellprodukt

4.2 Simuleringsprogrammet

Målet med modelleringen er å konstruere et program i MATLAB som er i stand til å simulere kjøleprosessen med varmeovergangstallet som styrende parameter. Videre skal programmet kunne laste inn data fra tempereturmålingene, for å kunne sammenligne det simulerte temperaturforløpet med det reelle. For å finne den beste tilpasningen mellom simulering og målinger, skal programmet være i stand til å beregne det gjennomsnittlige avviket mellom disse to. Gjennom å variere varmeovergangstallet i simuleringen til man oppnår et minimalisert avvik, vil man forhåpentligvis finne en god tilnærming på det virkelige varmeovergangstallet.

Med simulering menes et program som løser de ligninger som beskriver et fysisk problem, i dette tilfellet en partiell differensialligning ((4.3)). Programmeringsverktøyet MATLAB har mange innebygde programmer og funksjoner, deriblant et verktøy kalt 'pdepe', som er MATLAB's innebygde program for løsing av partielle differensialligninger. Denne løser start-/grenseverdiproblemer for systemer bestående av parabolske og elliptiske partielle differensialligninger, med én romkoordinat og tiden som variabler. Det kreves minst én parabolsk ligning i systemet (The Mathworks, 2010). En parabolsk partiell differensialligning er en type andregrads part. diff.ligning som beskriver en rekke kjente vitenskapelige problemer, inkludert varmeledningsproblem (Enclopedia, 2010a). (4.3) er derfor av typen parabolsk par. diff. ligning, med romkoordinaten 'r' og tiden 't' som variable, og kan dermed løses med 'pdepe'. 'pdepe' tar inn og løser ligninger på formen

$$c\left(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x}\right)\frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m}\frac{\partial}{\partial x}\left[x^m f\left(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right] + s\left(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x}\right) \qquad (4.4)$$

Ligningene skal gjelde for $t_0 \leq t \leq t_f$ og $x_1 \leq x \leq x_2$. Intervallet $[x_1, x_2]$ må være endelig. m bestemmer geometrien i problemet, og kan være 0, 1 eller 2, som hhv. representerer flate, –sylindrisk, -og sfærisk symmetri. Hvis $m > 0$, så må $x_1 \geq 0$ gjelde. I (4.4) er $f(x, t, u, \partial u/\partial x)$ et uttrykk for en fluks, og $s(x, t, u, \partial u/\partial x)$ et uttrykk for en kilde (The Mathworks, 2010). Hvis man omskriver (4.3) på formen i (4.4), får man

$$\frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} = r^{-1}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{4.5}$$

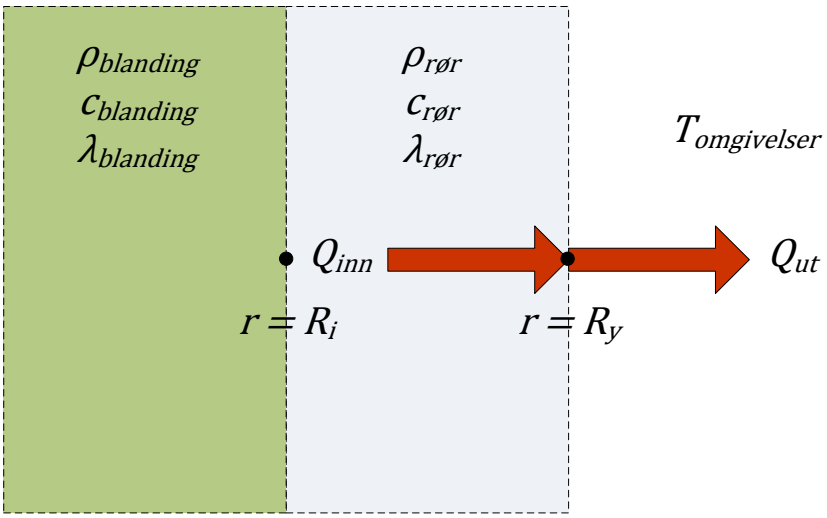
,og ser dermed at (4.4) og (4.5) er koblet på følgende måte:

$$\left.\begin{array}{ll} x = r & (romvariabel) \\ t = t & (tiden) \\ u = T & (temperatur) \\ \dfrac{\partial u}{\partial x} = \dfrac{\partial T}{\partial r} & (romderiverte\ av\ temperaturen) \\ \dfrac{\partial u}{\partial t} = \dfrac{\partial T}{\partial t} & (tidsderiverte\ av\ temperaturen) \end{array}\right\} \tag{4.6}$$

For sylindertverrsnittet (*Figur 4-1*) har man; $m = 1$, $t_o = 0 \leq t \leq t_f$ og $0 \leq r \leq R_y$. Kildeleddet $s(x, t, u, \partial u/\partial x)$ faller i dette tilfellet bort, mens $c(x, t, u, \partial u/\partial x) = 1/a$ og fluksleddet $f(x, t, u, \partial u/\partial x) = \partial T/\partial r$. Dette er den logiske implementeringen av (4.3) i MATLABs 'pdepe' ((4.4)), men under testing av modellen viste det seg at den ikke responderte riktig på endring av materialegenskaper hos modellproduktet. Etter bearbeiding av modellen ble det funnet at den termiske diffusiviteten, a, måtte trekkes inn i fluksleddet, f. Funksjonsleddene i (4.4) ble dermed endret til; $c(x, t, u, \partial u/\partial x) = 1$ og $f(x, t, u, \partial u/\partial x) = a * \partial T/\partial r$. Diffusiviteten a

antas å være konstant gjennom likt materiale, men vil endres ved overgangen innholdsmasse og rør, markert som punktet $r = R_i$ i *Figur 4-2*. 'pdepe' beregner temperaturene numerisk fra $r = 0$ og punktvis utover til $r = R_y$. Antall punkter i beregningen defineres utenfor modellen, og kalles oppløsningen. For å implementere endringen i materialegenskapene, legger man inn et sprang hos disse ved $r = R_i$. Dette kodes enkelt i modellen vha en if-formulering.

For at (4.5) skal kunne løses, må det defineres en startbetingelse og en grensebetingelse. Startbetingelsen er enkel, og defineres som at modellproduktet har uniform temperatur ved $t = 0 \rightarrow T(r, t = 0) = konstant$. Grensebetingelsen defineres som en varmebalanse ved modellproduktets overflate, $r = R_y$. Modellproduktets overflate kan betraktes som en uendelig tynn flate. I en uendelig tynn flate kan det ikke akkumuleres varme, slik at all varme inn i flaten må gå ut av flaten ($Q_{inn} = Q_{ut}$). Dette er beskrevet i *Figur 4-2* som varmestrømmen Q, som transporteres ut av modellproduktet gjennom PVC-røret, og overføres til omgivelsene som enten er flak-is eller issørpe med temperaturen $T_{omgivelser}$.



Figur 4-2: Utsnitt av modellprodukt - varmebalansen ved modellproduktets overflate

Når varmestrømmen Q transporteres ved varmeledning, uttrykkes den av Fourier's lov om varmeledning (Cengel, 2006b) som

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \qquad (W) \tag{4.7}$$

I denne sammenhengen må (4.7) omskrives til

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial r} \qquad (W) \tag{4.8}$$

Når varmestrømmen Q transporteres ved konveksjon til omgivelsene, uttrykkes den av Newton's lov om kjøling (Cengel, 2006b) som

$$\dot{Q} = \alpha A (T_{overflate} - T_{omgivelser}) \qquad (W) \tag{4.8}$$

Varmebalansen ved modellproduktets overflate ($r = R_y$) blir dermed:

$$-\lambda \frac{\partial T(r = R_y, t)}{\partial r} = \alpha\big(T\big(r = R_y, t\big) - T_{omgivelser}\big) \tag{4.9}$$

,hvor A elimineres ettersom man finner den på begge sider av ligningen. Grensebetingelsen implementeres i modellen ved å omskrive (4.9) på formen

$$p(x,t,u) + q(x,t) f\left(x,t,u,\frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0 \tag{4.10}$$

,som er nødvendig for at 'pdepe' skal tolke grensebetingelsen riktig. $f(x,t,u,\partial u/\partial x)$ er som kjent lik $a * \partial T/\partial r$, hvor $a = \lambda/\rho c$ er materialets termiske diffusivitet. Ved å flytte venstresiden over på høyre side i (4.9), og dividere ligningen med $\rho * c$, får man

$$\frac{\alpha}{\rho c}\big(T\big(r = R_y, t\big) - T_{omgivelser}\big) + \frac{\lambda}{\rho c}\frac{\partial T(r = R_y, t)}{\partial r} = 0 \tag{4.11}$$

Det andre leddet i (4.11) gjenkjennes som $a * \partial T(r = R_y, t)/\partial r = f(x,t,u,\partial u/\partial x)$, og (4.10) får dermed følgende koeffisienter:

$$\left.\begin{aligned} p(x,t,u) = p(r,t,T) = \frac{\alpha}{\rho c}\left(T\left(r = R_y, t\right) - T_{omgivelser}\right) \\ q(x,t) = q(r,t) = 1 \end{aligned}\right\} \quad (4.12)$$

De nøvendige betingelsene i problemet er dermed bestemt og kan implementeres i modellen. Modellen ble kodet i MATLAB med utgangspunkt i eksempelkoden ’Single PDE’, som ligger under MATLABs beskrivelse av ’pdepe’ (The Mathworks, 2010).

5 Resultater

5.1 Temperaturmålinger i modellprodukt

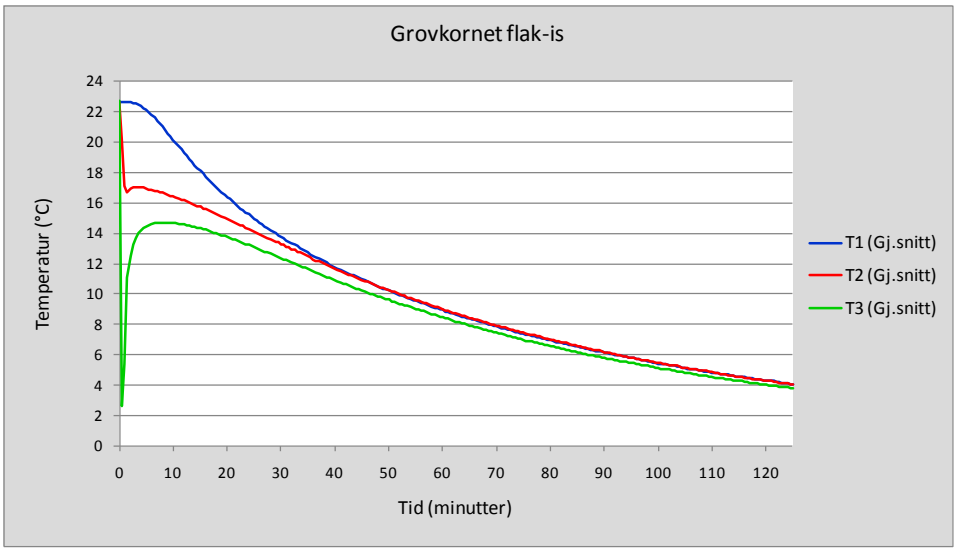
I dette avsnittet presenteres resultatene fra temperaturmålinger i tre likedannete modellprodukt, for hver av de ulike kjølemetodene beskrevet i delkapittel *3.2*. Resultatene presenteres i form av temperaturkurver, hvor temperaturene er gjennomsnittlige verdier basert på målingene fra alle tre modellproduktene. Det ble gjort to måleserier for hver kjølemetode, men her blir kun den av de to som ga raskeste nedkjøling gitt. Måleseriene varierer noe i varighet, som skyldes at ikke alle forsøk lot seg gjennomføre over like stort tidsrom. I alle figurer er kurvene bemerket med T1 (blå), T2 (rød) og T3 (grønn), som her representerer hhv. termoelement T1 (kjernetemperatur), T2 (temperatur på innsiden av røroverflaten) og T3 (temperatur på utsiden av røroverflaten) i *Figur 2-5*. Foran temperaturkurvene blir det for hver kjølemetode gitt en tabell med oversikt over starttemperaturer, varighet og loggeintervall. Med loggeintervall menes tiden som går mellom hver noterte temperaturmåling. Starttemperaturene er gjennomsnittet av ti målinger notert over tjue sekunder før forsøkene ble startet.

5.1.1 Flak-is

Tabell 5-1: Oversikt over betingelser i forsøk med flak-is

Type	ModellInr. #	Tstart_is (°C)	Tstart_modell (°C)	Varighet (min)	Intervall (s)
Grov flak-is	A	0	21,28	126,5	30
	B	0	21,24	126,5	30
	C	0	21,34	126,5	30
Fin flak-is	A	0	20,72	129,5	30
	B	0	20,58	129,5	30
	C	0	20,56	129,5	30

GROV – KARAKTERISTISK DIAMETER ~ 12 mm



Figur 5-1: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med grovkornet flak-is

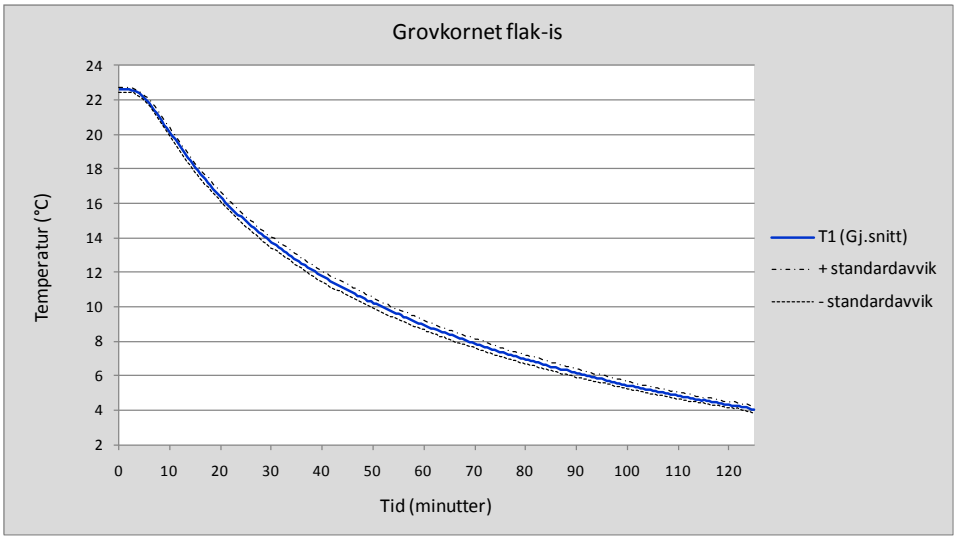
Fra *Figur 5-1* ser man at overflatetemperaturen på innsiden og utsiden av PVC-røret får en voldsom svingning i starten. Et termoelement teipet fast til en overflate vil ikke være i stand til å gi den eksakte overflatetemperaturen, men temperaturen like utenfor. Denne temperaturen er derfor ikke pålitelig og utelates ved sammenligning av simulering og målte verdier, som blir presentert senere i dette kapittelet. Den mest pålitelige målingen er kjernetemperaturen, som også er den temperaturen som ble brukt som sammenligningskriterie ved tilpasning mellom simulering og målte verdier. Kurven for den gjennomsnittlige kjernetemperaturen for de tre likedannete modellproduktene presenteres derfor i eget diagram, sammen med standardavviket for denne. Standardavviket ble funnet ved å benytte følgende formel (Enclopedia, 2010d):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \tag{5.1}$$

,hvor σ er standardavviket (i dette tilfellet ved et gitt måletidspunkt), x_i er verdi nr. i i utvalget (i dette tilfellet målt kjernetemperatur hos modellprodukt i for det gitte måletidspunktet) og $\bar{x}$ den gjennomsnittlige verdien for utvalget (i dette tilfellet den gjennomsnittlige målte verdien for de tre modellproduktene ved det gitte måletidspunktet). (5.1) er det generelle uttrykket for standardavviket, som i denne sammenhengen kan skrives som

$$\sigma_{T_{kjerne}} = \sqrt{\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(T_i - \bar{T})^2} \tag{5.2}$$

,hvor T_i er kjernetemperaturen i modellprodukt i og $\bar{T}$ er den gjennomsnittlige kjernetemperaturen for de tre modellene.

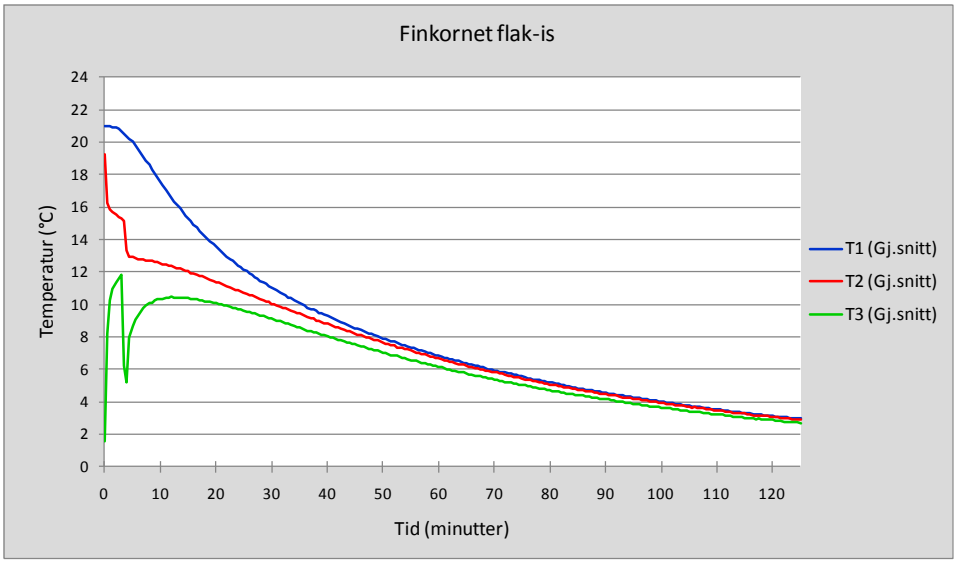


Figur 5-2: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik

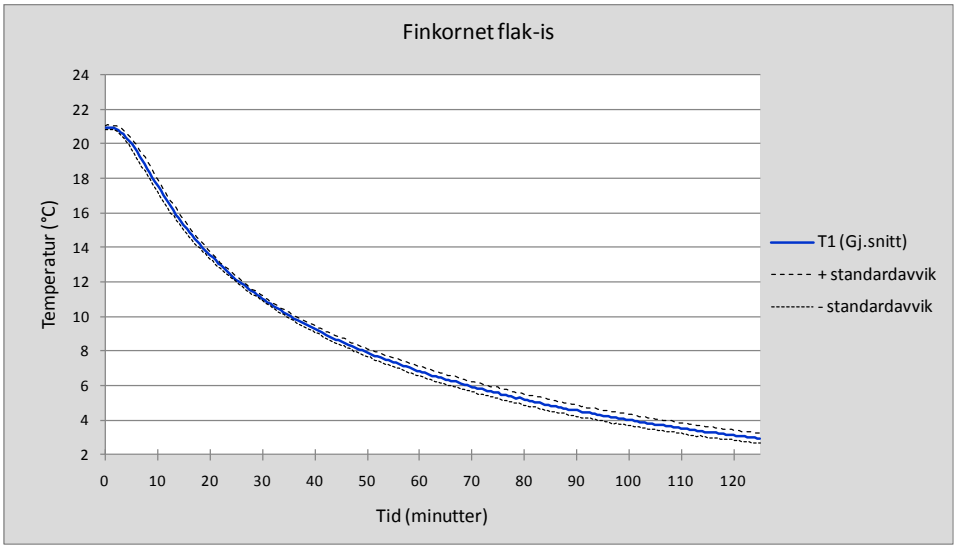
I *Figur 5-2* er den gjennomsnittlige kjernetemperaturen basert på målinger i de tre likedannete modellproduktene gitt, sammen med tilhørende ± standardavvik. Et slikt diagram gir et bilde på spredningen i

målte verdier mellom de tre modellproduktene. For kjernetemperaturen i *Figur 5-2* ble det største standardavviket funnet å være 0,335 °C, som betyr at de tre modellproduktene viser god overensstemmelse.

FIN – KARAKTERISTISK DIAMETER ~ 4 mm



Figur 5-3: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med finkornet flak-is



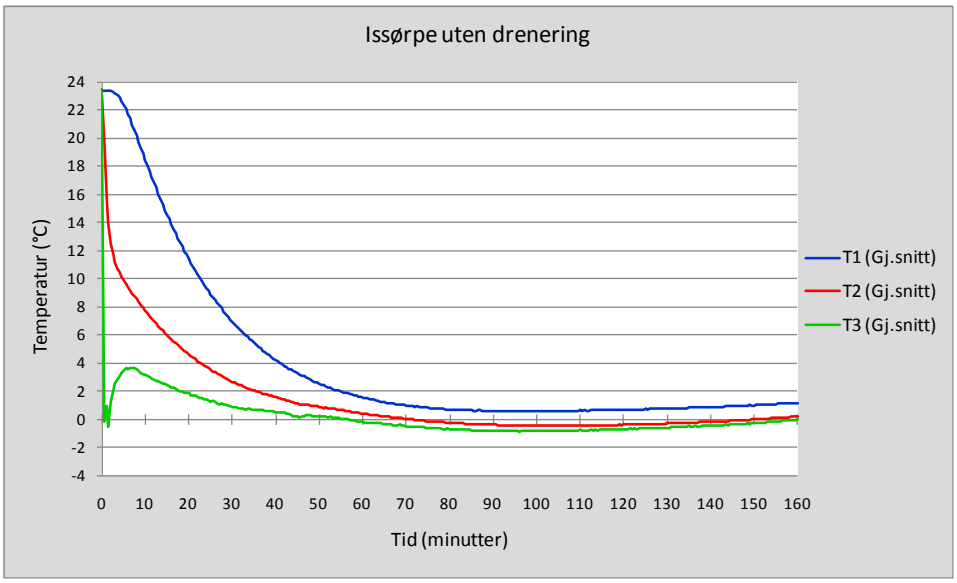
Figur 5-4: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik

Det største standardavviket for den gjennomsnittlige kjernetemperaturen i *Figur 5-4* er 0,398 °C, og modellproduktene viser dermed god overensstemmelse.

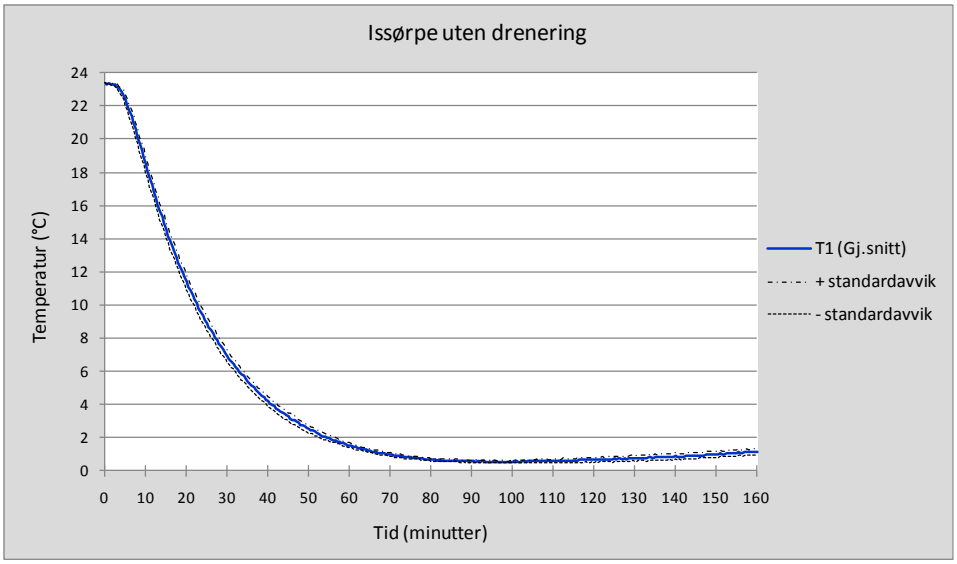
5.1.2 Issørpe – uten drenering

Tabell 5-2: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe uten drenering

Type	Modellnr. #	Tstart_issørpe (°C)	Tstart_modell (°C)	Varighet (min)	Intervall (s)
Udrenert issørpe	A	-3	23,00	218	30
	B	-3	23,10	218	30
	C	-3	23,20	218	30



Figur 5-5: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe uten drenering



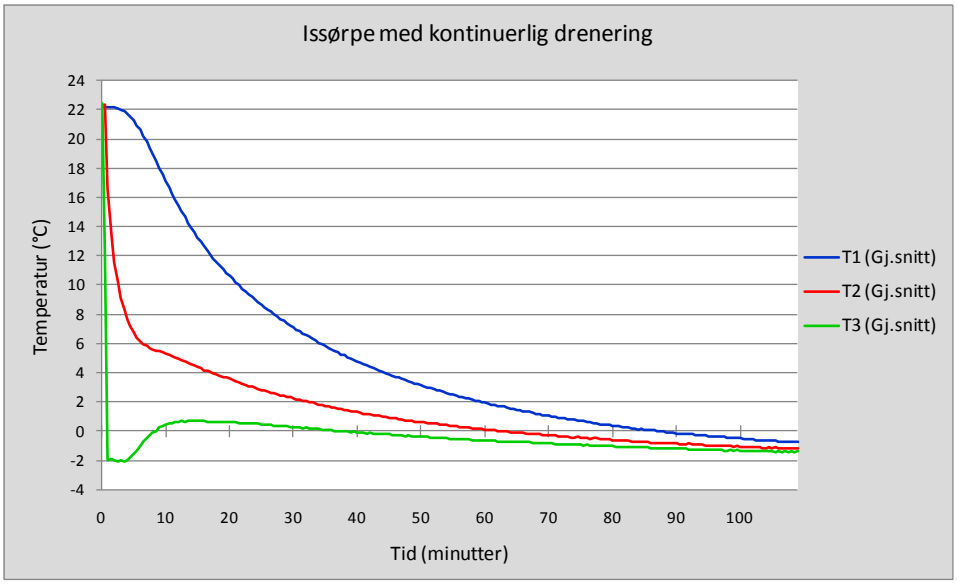
Figur 5-6: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik

Det største standardavviket i *Figur 5-6* er 0,513 °C, og modellproduktene viser dermed en forholdsvis god overensstemmelse.

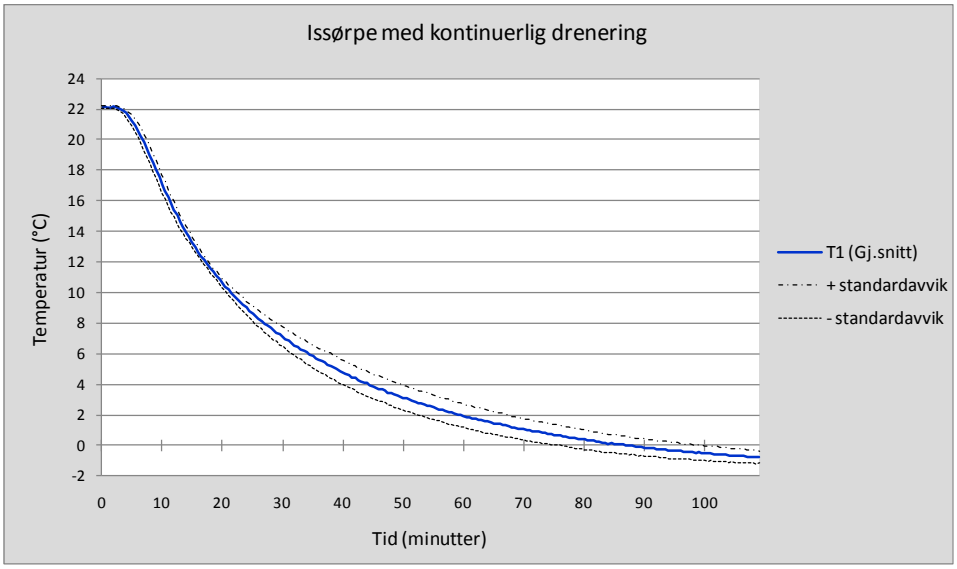
5.1.3 Issørpe – kontinuerlig drenering

Tabell 5-3: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe med kontinuerlig drenering

Type	Modellnr. #	Tstart_issørpe (°C)	Tstart_modell (°C)	Varighet (min)	Intervall (s)
Drenert	A	-2,7	21,93	109	30
issørpe	B	-2,7	21,83	109	30
	C	-2,7	21,97	109	30



Figur 5-7: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med drenering



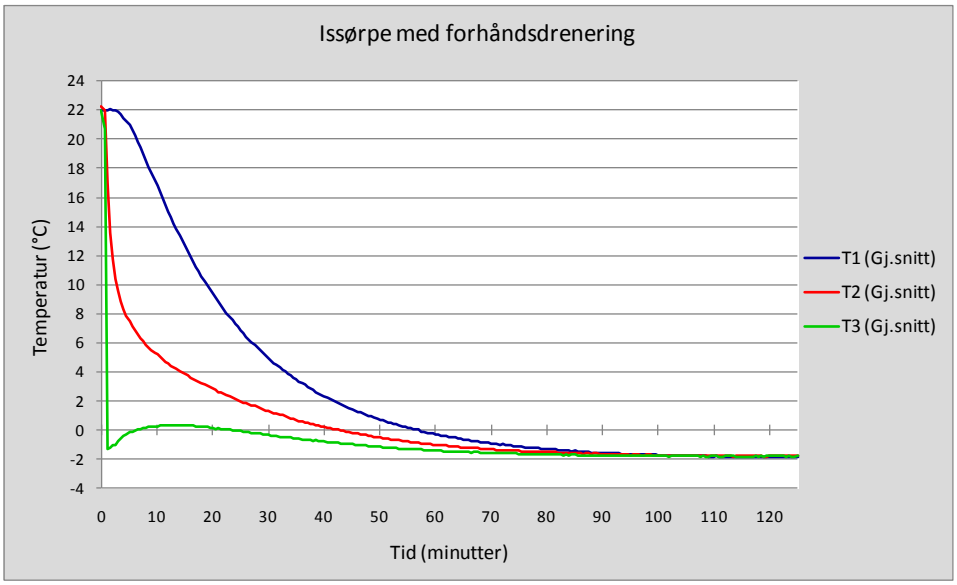
Figur 5-8: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik

Figur 5-8 viser en tydelig økning i standardavvikene utover i kjøleprosessen. Det største avviket er 0,84 °C, slik at modellproduktene fremdeles viser en nokså god overrensstemmelse.

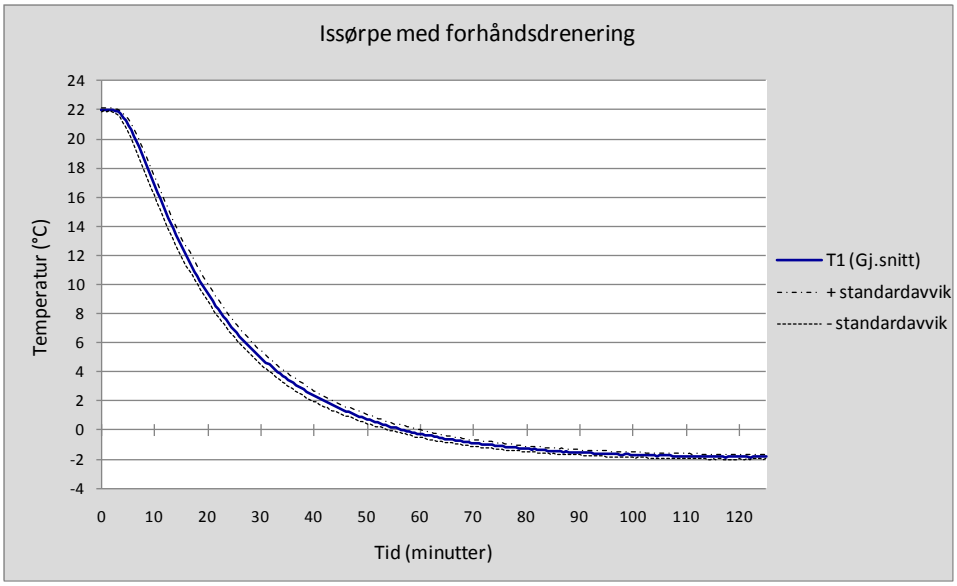
5.1.4 Issørpe – forhåndsdrenering

Tabell 5-4: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe med forhåndsdrenering

Type	Modellnr. #	Tstart_issørpe (°C)	Tstart_modell (°C)	Varighet (min)	Intervall (s)
Forhånds-	A	-2,6	21,78	127	30
drenert	B	-2,6	21,57	127	30
issørpe	C	-2,6	21,55	127	30



Figur 5-9: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med forhåndsdrenering



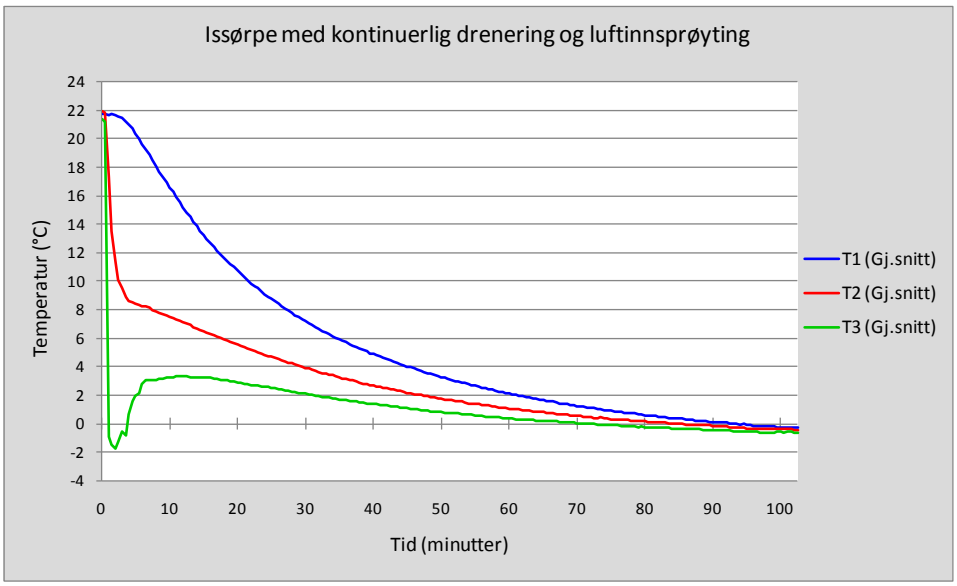
Figur 5-10: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik

Som man ser av *Figur 5-10* forholder standardavvikene seg rimelig lave gjennom hele kjølingen, hvor det største avviket er 0,7 °C. Modellproduktene viser dermed igjen en god overrensstemmelse i kjernetemperatur.

5.1.5 Issørpe – luftinnsprøyting for omrøring

I forsøkene med lufttilførsel i issørpen ble to ulike oppsett utprøvd. I tillegg til luftinjisering i forhåndsdrenert issørpe, hvor prosedyren for dette er beskrevet i avsnitt *3.2.4*, ble det gjort forsøk med en kombinasjon av kontinuerlig drenering og lufttilførsel. Som forventet har lufttilførsel i dette tilfellet ingen hensikt, da den kontinuerlige dreneringen fjerner det meste av væsken i issørpen og gjør den porøs. Luften som blir tilført i bunn av issørpebeholderen passerer dermed gjennom porene, i stedet for å boble gjennom væsken i issørpen og på den måten skape omrøringen man er ute etter. For å bekrefte dette er de gjennomsnittlige temperaturkurvene

fra forsøket presentert i *Figur 5-11*, til sammenligning med kontinuerlig drenering uten luft i *Figur 5-7*.

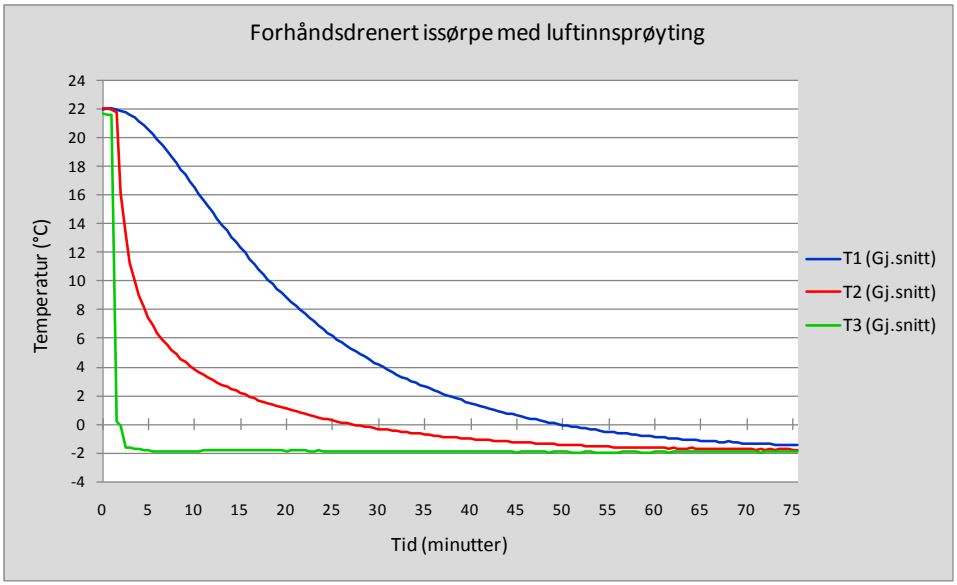


Figur 5-11: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med drenering og lufttilførsel

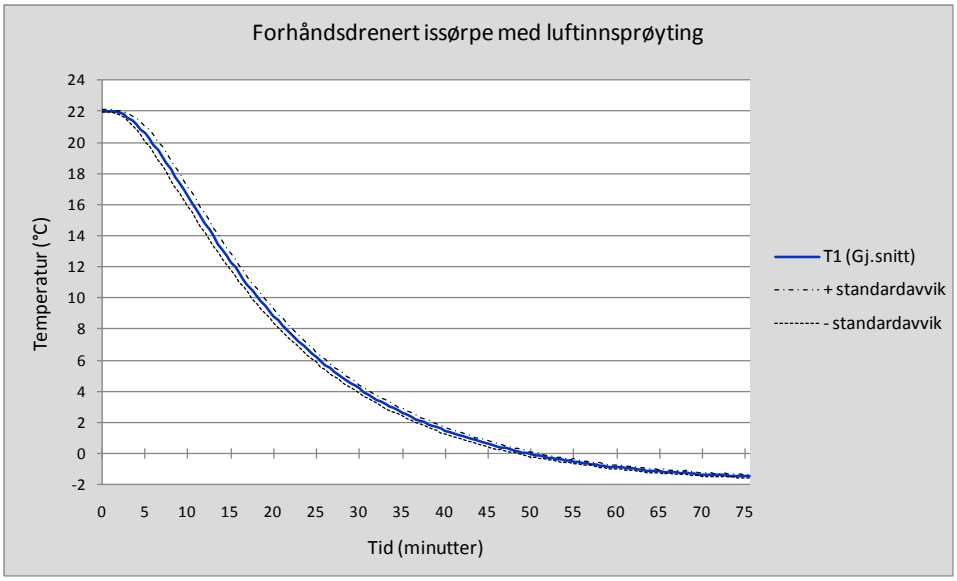
Væske tilstede i issørpen er som sagt nødvendig for at luftinjiseringen skal ha noen hensikt. Issørpe ble derfor delvis drenert før den ble tømt over i beholderen med lufttilførsel. Det er denne delvise dreneringen som her blir kalt forhåndsdrenering. Væske dreneres bort til det ikke lengre oppstår et splittet væske –og issjikt i beholderen, med hhv. væske på bunn og isen flytende på toppen, noe som vil føre til at modellproduktene synker til bunns hvor de blir liggende, kun omgitt av væske (slik som i forsøket uten noen form for drenering, beskrevet i avsnitt *3.2.2*). Nok væske fjernes altså til issørpen kan bære modellproduktene, men fremdeles med tilstrekkelig væskemengde til at luftinnsprøytingen skaper bobler og omrøring i issørpen. Forsøket med forhåndsdrenert issørpe med lufttilførsel er derfor av størst interesse.

Tabell 5-5: Oversikt over betingelser i forsøk med issørpe med forhåndsdrenering og luftinnsprøyting

Type	Modellnr. #	Tstart_issørpe (°C)	Tstart_modell (°C)	Varighet (min)	Intervall (s)
Forhånds-	A	-2,4	21,80	75,5	30
drenert issørpe	B	-2,4	21,77	75,5	30
med luftinnspr.	C	-2,4	21,96	75,5	30



Figur 5-12: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med forhåndsdrenert issørpe med lufttilførsel



Figur 5-13: Gjennomsnittlig kjernetemperatur for tre likedannete modellprodukt med tilhørende ±standardavvik

Det største standardavviket her er 0,647 °C, som viser at modellproduktene gir god overrensstemmelse.

5.2 Simuleringer og varmeovergangstall

Med betingelser likt som hos de presenterte måleseriene i avsnitt *5.1.1 – 5.1.5* ble det for alle kjølemetoder kjørt simuleringer i MATLAB med varmeovergangstallet som styrende parameter, til man fant den beste tilpasningen mellom simulert og gjennomsnittlig målt kjernetemperatur for de tre modellproduktene. Den beste tilpasningen ble bestemt ut i fra det minste gjennomsnittlige avviket man oppnådde ved å variere varmeovergangstallet med én desimal nøyaktighet. For hver kjølemetode presenteres kurvene for simulert kjernetemperatur som ga best tilpasning, og gjennomsnittlig målt kjernetemperatur i samme diagram. I tillegg blir det gjennomsnittlige avviket mellom kurvene, standardavviket for dette, samt varmeovergangstallet som ga den beste tilpasningen gitt.

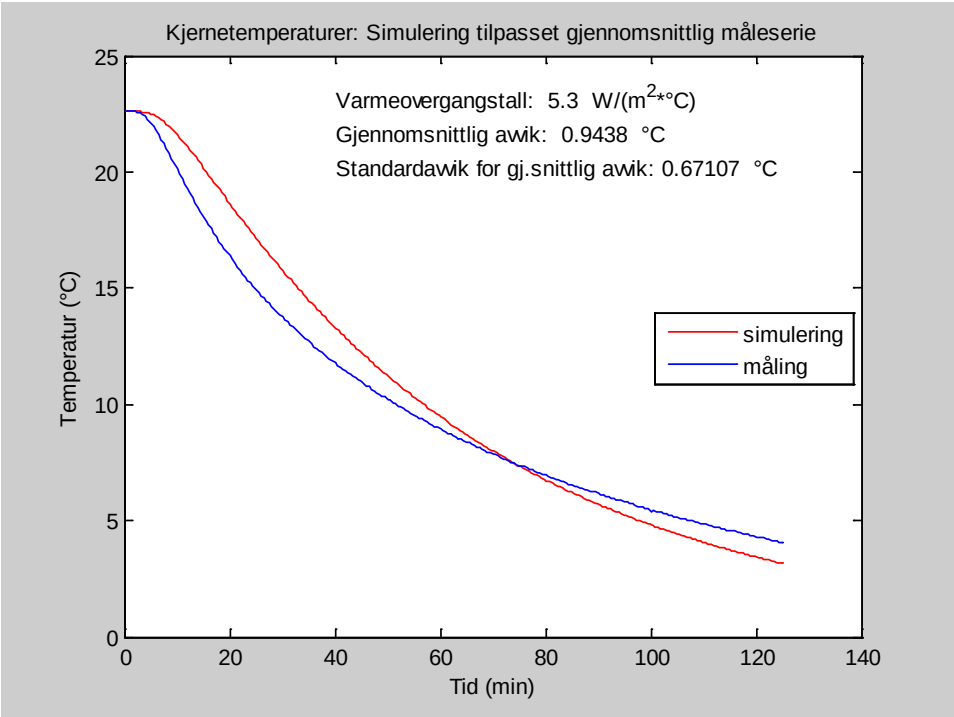
5.2.1 Flak-is

Tabell 5-6: Betingelser for simulering av kjøling med flak-is

Type	Tstart_is (°C)	Tstart_sylinder (°C)	Lengde (min)	Oppløsning_x (m)	Oppløsning_t (s)
Grov flak-is	0	22,6	125	[0, 0,025, 0,0005]	[0, 7500, 30]
Fin flak-is	0	20,94	125	[0, 0,025, 0,0005]	[0, 7500, 30]

Oppløsningene i *Tabell 5-6* for romvariabel x = r og tiden t er gitt som [startpunkt, sluttpunkt, skrittlengde].

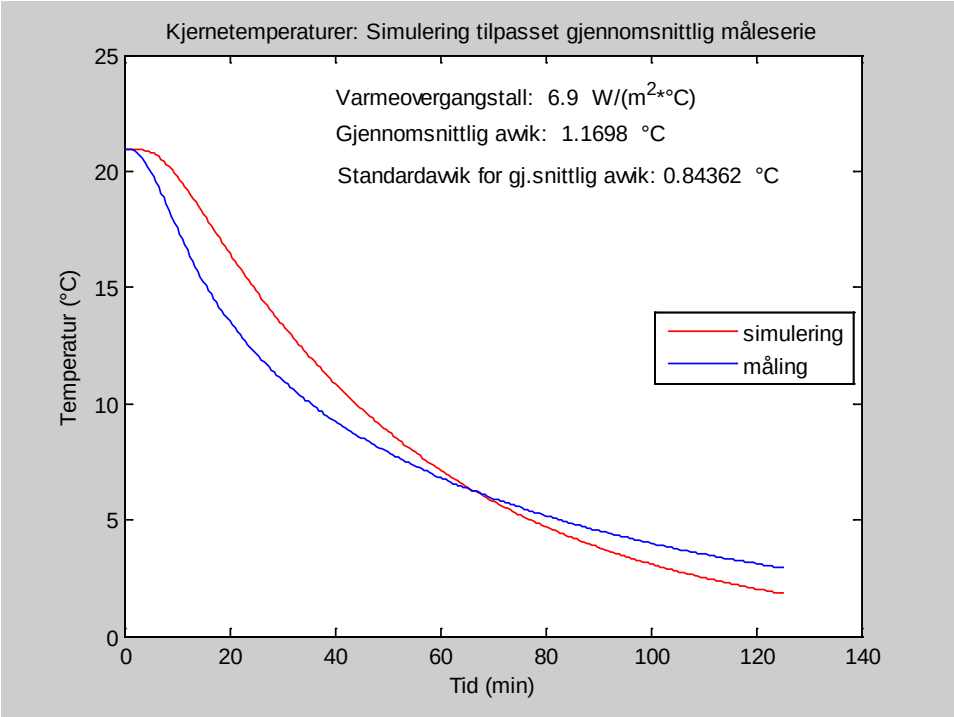
GROV – KARAKTERISTISK DIAMETER ~ 12 mm



Figur 5-14: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med grov flak-is

Kurvene får et forholdsvis høyt gjennomsnittlig avvik og en dårlig tilpasning, da målingskurven begynner og flate ut på et tidlig tidspunkt. Dette må simuleringen kompensere for ved å ha en tregere nedkjøling i starten enn det målingene gir.

FIN – KARAKTERISTISK DIAMETER ~ 4 mm



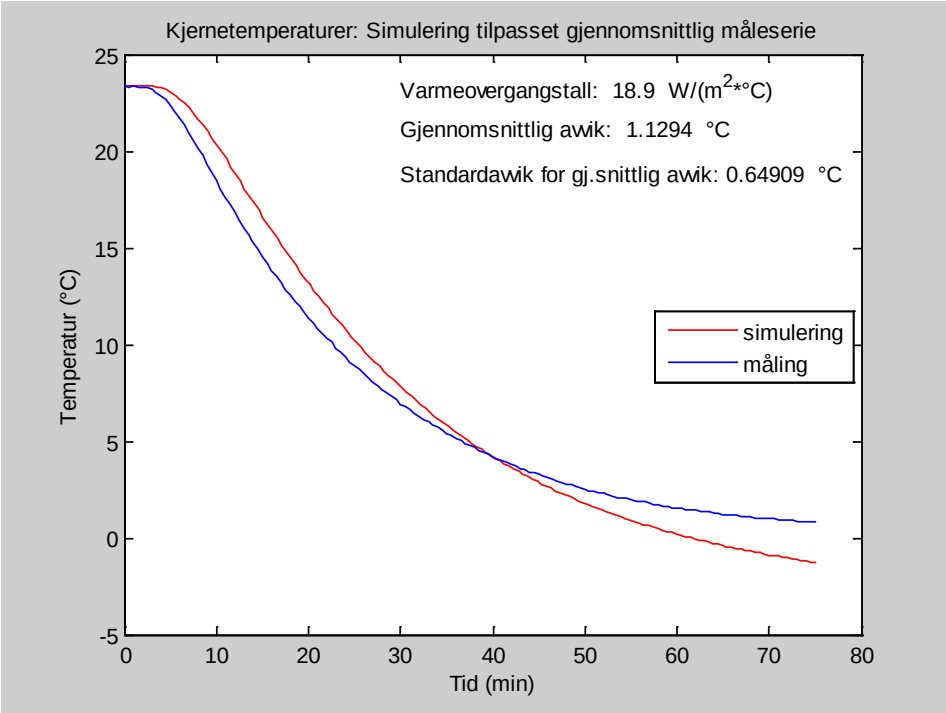
Figur 5-15: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med fin flak-is

Igjen får kurvene et høyt gjennomsnittlig avvik og en dårlig tilpasning på grunn av den tidlige utflatingen av målingskurven. Simuleringen må dermed kompensere for dette ved å ha en tregere nedkjøling enn den virkelige i startfasen.

5.2.2 Issørpe – uten drenering

Tabell 5-7: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe uten drenering

Type	Tstart_issørpe (°C)	Tstart_sylinder (°C)	Lengde (min)	Oppløsning_x (m)	Oppløsning_t (s)
Issørpe uten drenering	-3	23,38	75	[0, 0,025, 0,0005]	[0, 4500, 30]



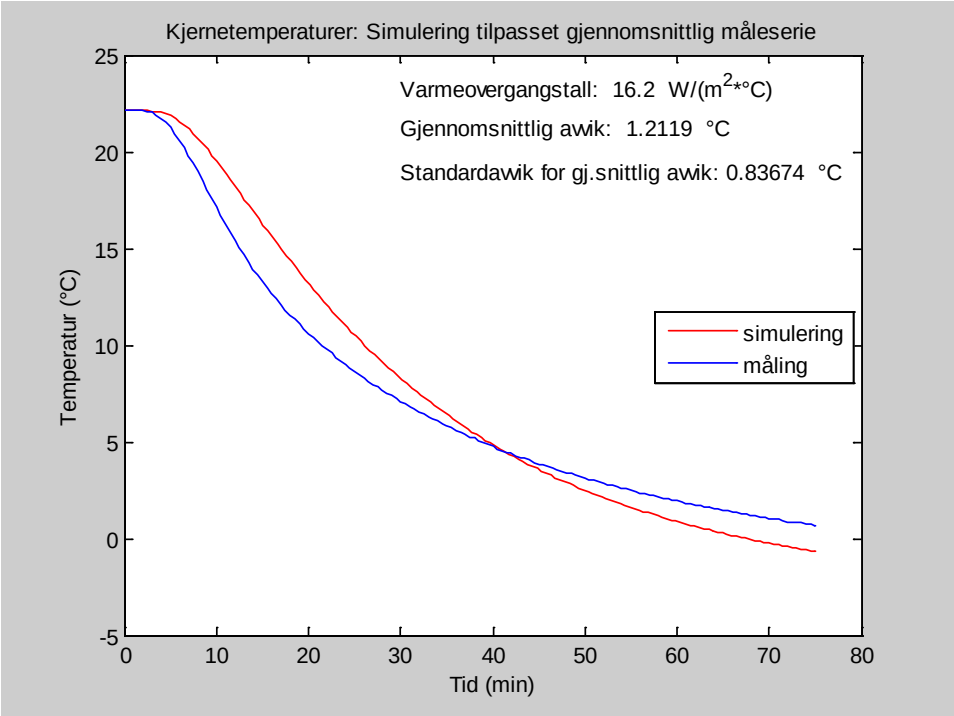
Figur 5-16: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe uten drenering

Kurvene gir et forholdsvis høyt gjennomsnittlig avvik da målingskurven flater ut på et tidlig tidspunkt. Tilpasningen er forholdsvis god i starten, men avviker mye etter hvert som målingskurven flater ut. Varmeovergangstallet øker betydelig fra tilfellene med flak-is.

5.2.3 Issørpe – kontinuerlig drenering

Tabell 5-8: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe med kontinuerlig drenering

Type	Tstart_issørpe (°C)	Tstart_sylinder (°C)	Lengde (min)	Oppløsning_x (m)	Oppløsning_t (s)
Issørpe med kontinuerlig drenering	-2,7	22,12	75	[0, 0,025, 0,0005]	[0, 4500, 30]



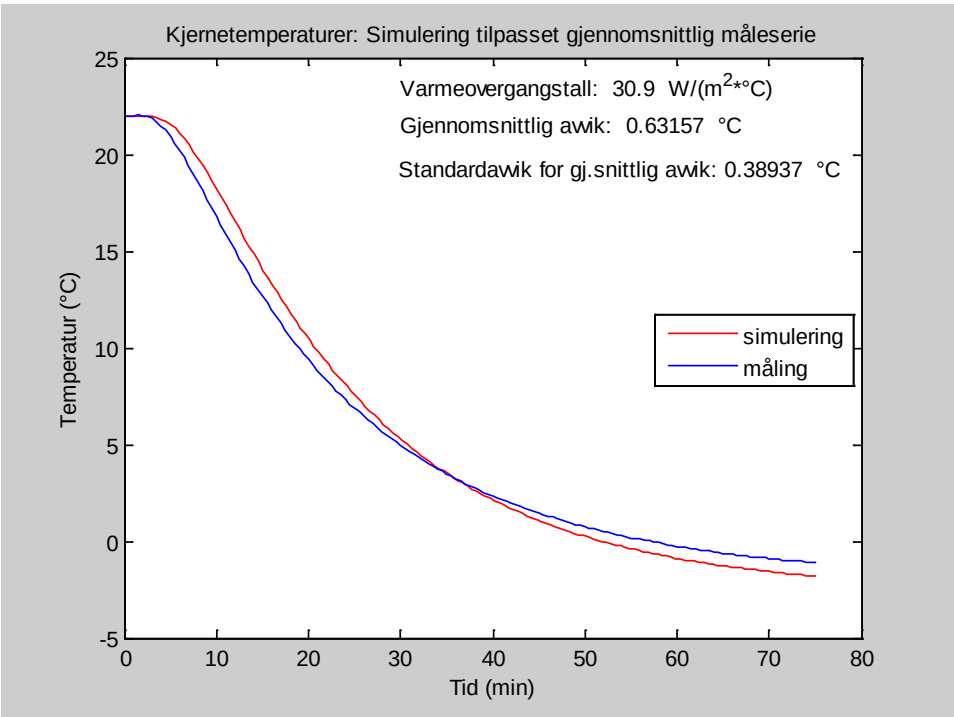
Figur 5-17: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe med kontinuerlig drenering

Som for de øvrige kjølemetodene får man også her et nokså høyt avvik på grunn av den tidlige utflatingen av målingskurven, og simuleringen må igjen kompensere ved å ha tregere kjølehastighet → lavere varmeovergangstall enn målingen i starten. Varmeovergangstallet går for øvrig litt ned i forhold til den udrenerte issørpen.

5.2.4 Issørpe - forhåndsdrenering

Tabell 5-9: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe med forhåndsdrenering

Type	Tstart_issørpe (°C)	Tstart_sylinder (°C)	Lengde (min)	Oppløsning_x (m	Oppløsning_t (s)
Issørpe med forhånds-drenering	-2,6	21,97	75	[0, 0,025, 0,0005]	[0, 4500, 30]



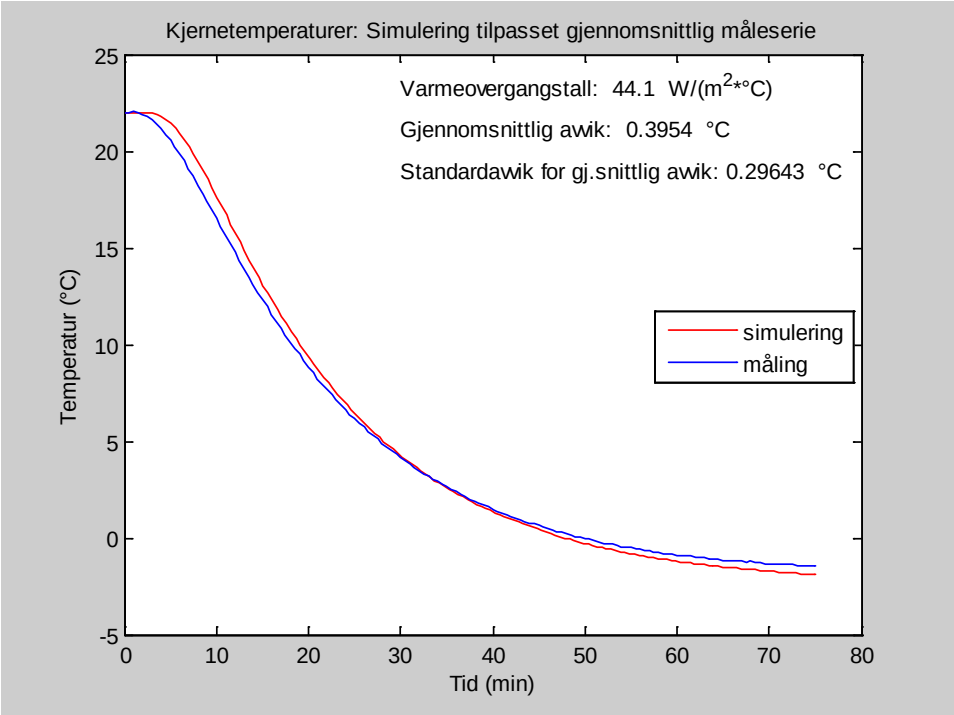
Figur 5-18: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe med forhåndsdrenering

Her gir kurvene et lavere gjennomsnittlig avvik, altså en bedre tilpasning, og i tillegg et betydelig høyere varmeovergangstall enn de foregående tilfellene.

5.2.5 Issørpe – luftinnsprøyting for omrøring

Tabell 5-10: Betingelser for simulering av kjøling med issørpe med forhåndsdrenering og luftinnsprøyting

Type	Tstart_issørpe	Tstart_sylinder (°C)	Lengde (min)	Oppløsning_x (m)	Oppløsning_t (s)
Forhåndsdrenert issørpe med lufttilførsel	-2,4	22	75	[0, 0,025, 0,0005]	[0, 4500, 30]



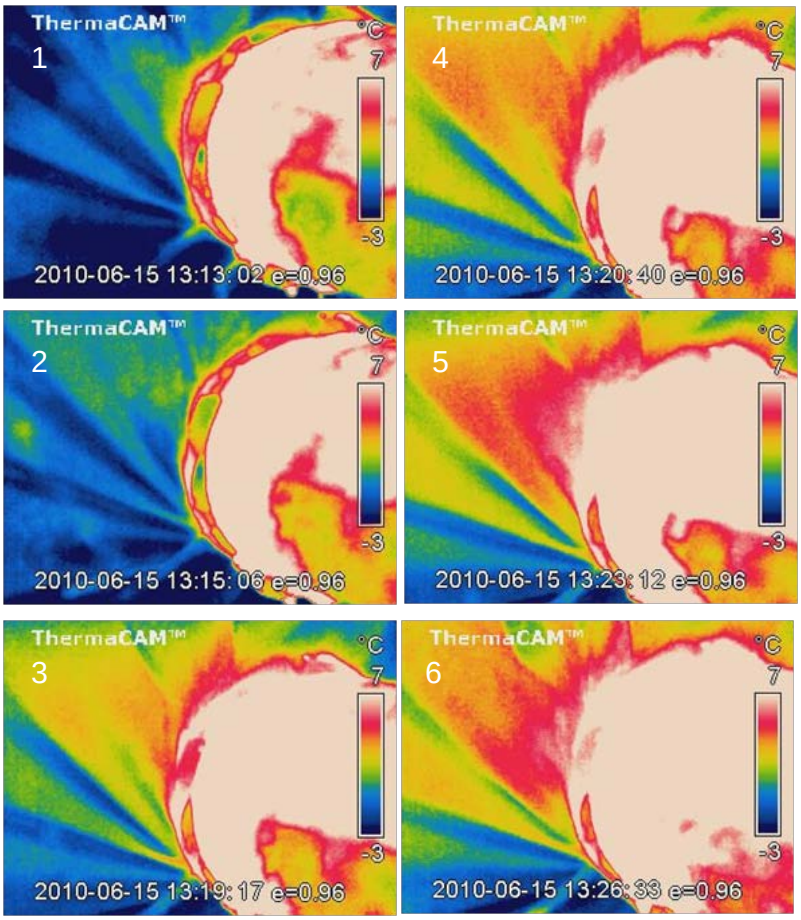
Figur 5-19: Bestemt varmeovergangstall basert på minste gjennomsnittlige avvik mellom simulering og måling for kjøling med issørpe med forhåndsdrenering og lufttilførsel

I dette tilfellet oppnås den klart beste tilpasningen mellom kurvene, og det suverent høyeste varmeovergangstallet sammenlignet med de øvrige.

5.3 Termiske bilder

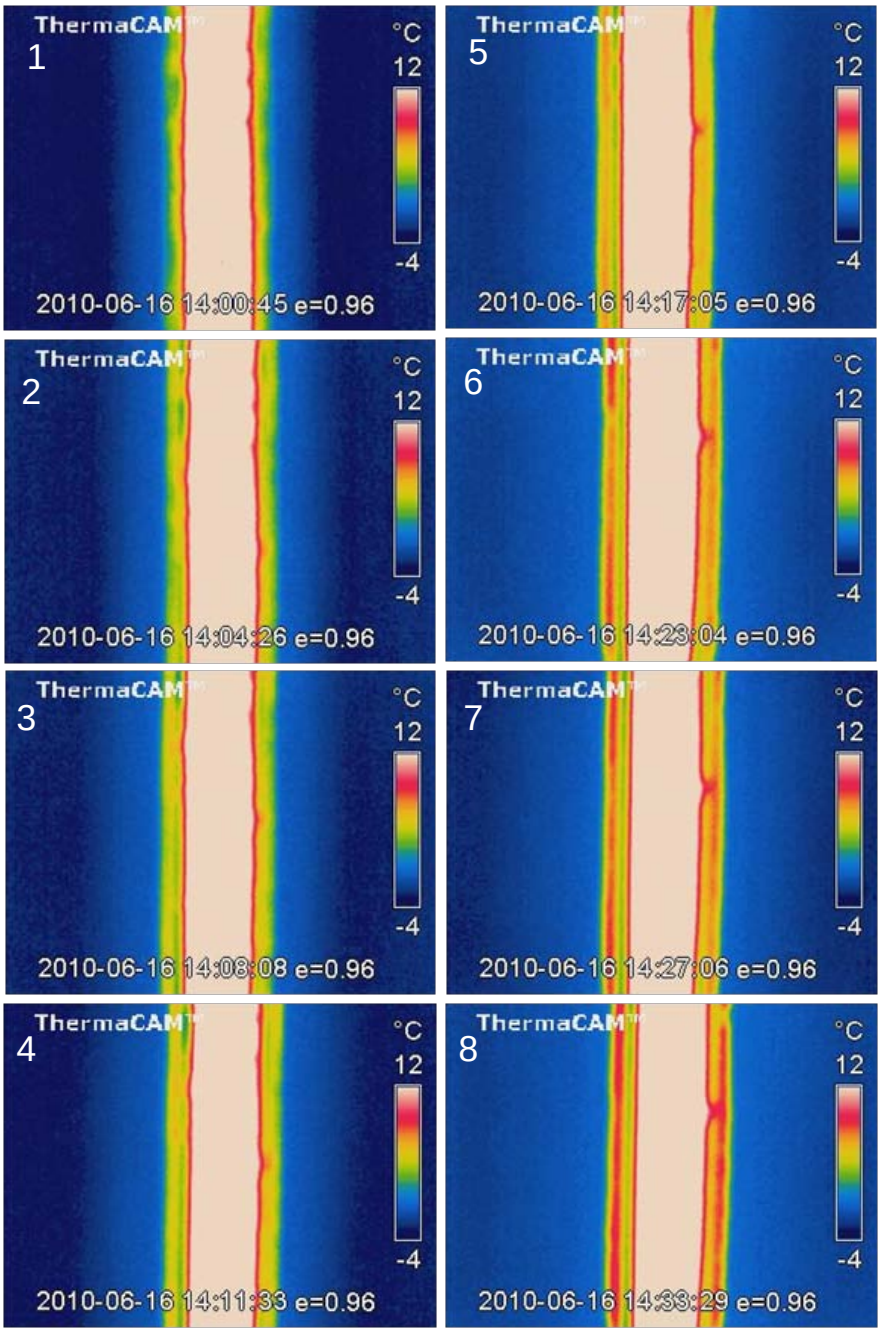
Bilder ble tatt med det termiske kameraet i to ulike posisjoner (beskrevet under delkapittel *3.3*, *Figur 3-6*). Her presenteres en bildeserie for hver av posisjonene i kronologisk rekkefølge. Bildene er nummererte, slik at 1 er første bilde tatt, 2 er neste bilde tatt osv. Tidspunktet er angitt på bildene, slik at tidsforskjellen gir tiden mellom hvert bilde. Det søkes etter informasjon om issmeltingen basert på utviklingen i bildeseriene, dvs. endringer i temperaturfordelingen.

Posisjon 1



Figur 5-20: Serie av termiske bilder i kameraposisjon 1

Posisjon 2



Figur 5-21: Serie av termiske bilder i kameraposisjon 2

Til høyre i bildene er temperaturskalaen i °C gitt. Denne stilles inn enten manuelt eller automatisk på kameraet, og setter en øvre og nedre grense for det temperaturområdet hvor kameraet registrer temperaturforskjeller. Dette betyr at dess mørkere blåfarge et område har, dess nærmere ligger temperaturen den nedre grensen, og dess lysere farge et område har, dess nærmere ligger temperaturen den øvre grensen. Hvis temperaturen befinner seg utenfor det avgrensede temperaturområdet, vil ikke dette komme til syne i det termiske bildet, men vil ha samme farge som grensetemperaturen, hhv. hvitt og mørk blå for øvre og nedre grense. Hos bildene i *Figur 5-20* og *Figur 5-21*, ligger dette temperaturområdet hhv. innenfor [-3 , 7 °C] og [-4 , 12 °C].

Aluminiumsrøret reflekterer strålingsvarme, noe som medfører stor usikkerhet i den reelle temperaturen på røret. I dette tilfellet er temperaturene *rundt* røret av størst interesse, og ikke selve rørtemperaturen. Unøyaktigheten i rørets temperatur kan derfor sees bort i fra.

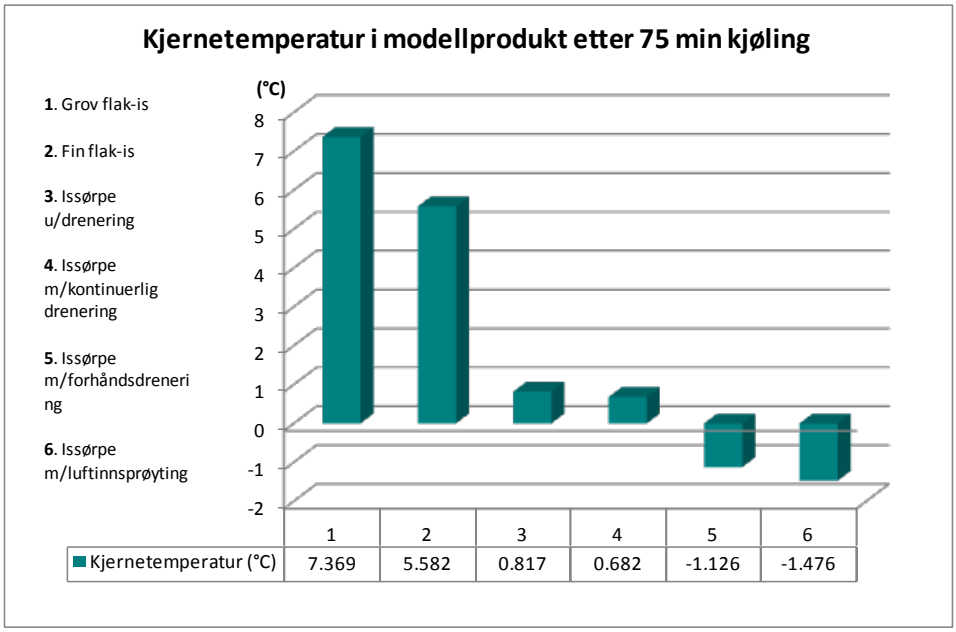
6 Diskusjon

6.1 Nedkjølingen av modellprodukt

I delkapittel *5.1* ble modellproduktenes gjennomsittlige temperaturforløp fra alle de ulike kjølemetodene gitt. Ettersom temperaturforløpet var basert på gjennomsnittlige verdier for målingene, presenterte man standardavvikene i hvert målepunkt som kurver ved siden av kurven for kjernetemperaturen. Standardavvikene lå innenfor intervallet 0,335 – 0,84 °C, hhv. laveste og høyeste verdi sett over alle kjølemetodene. Modellproduktene viser seg derfor å være konsekvente seg i mellom, som tilsier at likheten i konstruksjonen av de er god, og at de er godt egnet for bruk i repeterende forsøk.

Termoelementene som ble teipet fast inntil modellproduktenes overflate er som diskutert under *5.1.1* ikke i stand til å gi den eksakte temperaturen i selve overflaten, men gir temperaturen like utenfor. Denne temperaturen faller derfor umiddelbart idet modellproduktene kommer i kontakt med isen/issørpen, før den begynner og stige etter hvert som varme transporteres ut av modellen og varmer opp omgivelsene inne ved modellens overflate. Hvor mye temperaturen stiger varierer mellom kjølemetodene, høyest ved grov flak-is (Figur 5-1) og lavest ved forhåndsdrenert issørpe med luftinjisering (Figur 5-12), hvor den ikke stiger men forholder seg konstant lav (tilnærmet issørpetemperaturen). Dette gir mening med tanke på at den grove flak-isen gir dårlig kontakt med produktet, i motsetning til issørpen som vil dekke hele produktet takket være dens væskekonsistens. Ligger produktet stille uten bevegelse i issørpen, tyder temperaturmålingene på at issørpen inne ved produktoveflaten varmes opp. I hvor stor grad ser ut til å avhenge av ismengden, ettersom overflatetemperaturen stiger mer i tilfellet med udrenert issørpe sammenlignet med den forhåndsdrenerte issørpen. I tilfellet med lufttilførsel stiger ikke overflatetemperaturen. Her setter luftboblene issørpen i bevegelse, og denne omrøringen ser ut til å bryte opp et varmeledningssjikt inne ved produktoverflaten, og dermed sørge

for at omgivelsestemperaturen her hele tiden tilsvarer temperaturen lengre ute i issørpen.

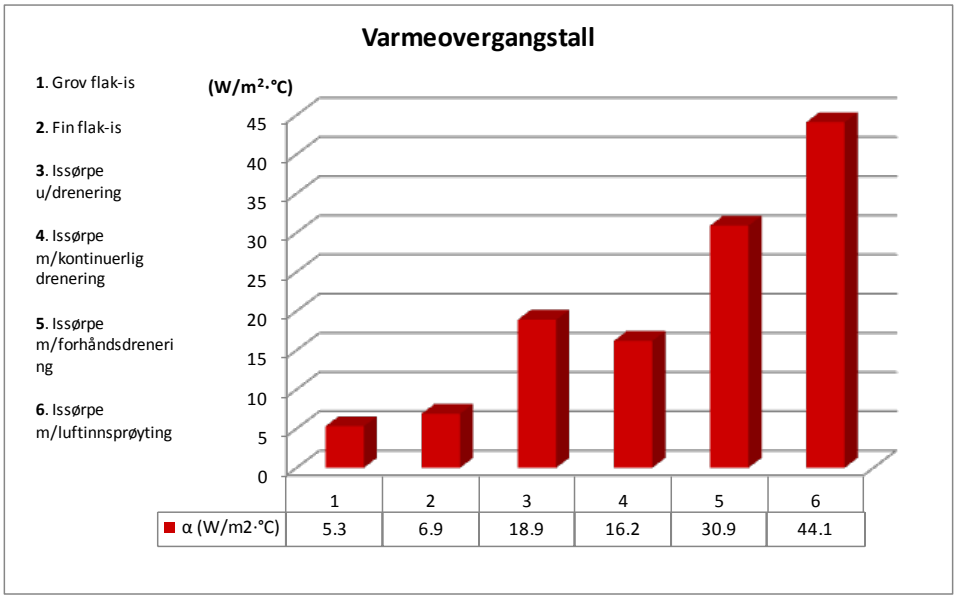


Figur 6-1: Sammenligning av modellproduktenes gjennomsnittlige kjernetemperatur etter 75 minutters nedkjøling med de ulike kjølemetodene

Stolpediagrammet i *Figur 6-1* forteller at etter 75 minutters nedkjøling har man oppnådd en temperaturforskjell på 8,845 °C i kjernetemperatur mellom minst effektive (grov flak-is) og mest effektive (forhåndsdrenert issørpe med lufttilførsel) kjølemetode. Den forhåndsdrenerte issørpen ligger kun 0,35 °C høyere enn tilfellet med luftinnsprøyting. Tilfellene med udrenert issørpe og issørpe med kontinuerlig drenering gir relativt like kjernetemperatur etter 75 min, men skiller seg ved lavest oppnådde kjernetemperatur i forsøket, hhv. 0,537 °C og -0,766 °C. Selv om den udrenerte issørpens starttemperatur er -3 °C, når ikke kjernetemperaturen engang 0,5 °C, men begynner i stedet å stige etter ca. 100 minutter. Dette hentyder at den udrenerte issørpen ikke har tilstrekkelig ismengde til å bevare en konstant temperatur i beholderen. Væsken i bunn av beholderen

varmes opp av produkt og omgivelser, og leder varmen oppover til den smeltende isen i toppen av beholderen.

6.2 Varmeovergangstall bestemt av simulering

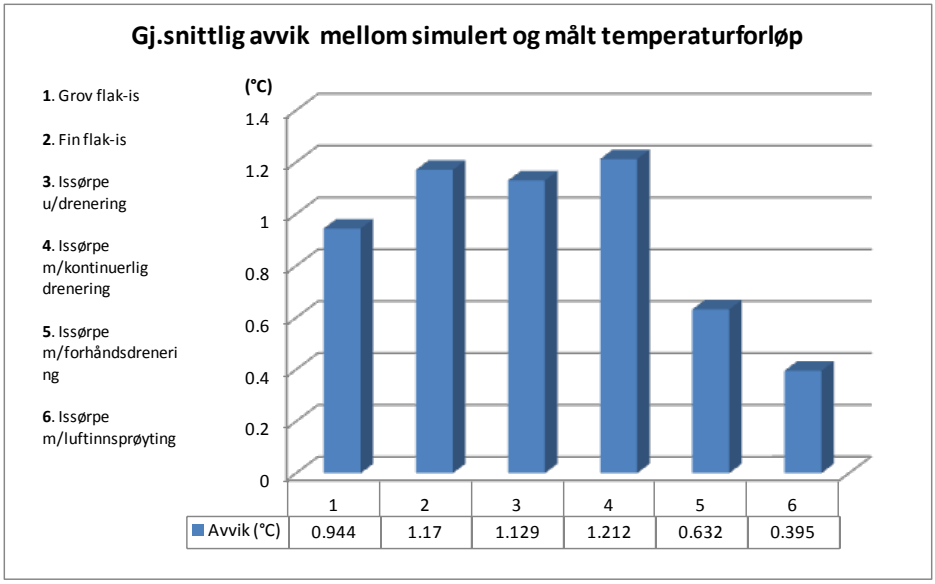


Figur 6-2: Sammenligning av varmeovergangstall funnet gjennom tilpasning mellom simulert og målt kjernetemperatur

Varmeovergangstallene i *Figur 6-2* synes jevnt over å være svært lave i forhold til hva man kan forvente. Lignende eksperiment har blitt gjort tidligere. I (Kostadin Fikiin, 2005) presenteres resultatene fra et eksperiment med måling av kjernetemperatur i et modellprodukt (kunstig fisk) bestående av metylcellulose, salt og vann, ikke ulikt modellproduktene benyttet i dette tilfellet. Likt som her, presenteres temperaturmålinger og modellering av kjøleprosessen i samme diagram. I simuleringen i (Kostadin Fikiin, 2005) ble et varmeovergangstall mellom produkt og issørpe estimert til å være hele 750 W/(m^2·°C). Dette varmeovergangstallet ga en forholdsvis god tilpasning mellom simulering og måling, og bekrefter at varmeovergangstallene funnet her ligger svært

langt under det området de bør ligge. Årsaker til dette er vanskelig å påpeke. Man undret et øyeblikk på om det kunne ha oppstått en lufthinne mellom plastrør og innhold, som ville ha ført en svært høy varmeledningsmotstand inne ved plastveggen. Dette ble avkreftet da man åpnet modellproduktene og fant at innholdet ikke hadde stivnet, men fortsatt var en væskeblanding. Luft på innsiden av modellen ville i så fall lagt seg som et lite lag i toppen og ikke påvirket fallet i kjernetemperatur nevneverdig. Datamodellen ble gransket av flere, forsøkt bygd opp på ny fra bunn av, men uten at dette endret varmeovergangstallene.

Det at verdiene er lave i alle tilfeller viser at simuleringsmodellen i det minste er konsekvent, slik at grunnlaget for å sammenligne kjølemetodene ut i fra forskjellene i varmeovergangstall synes å være rimelig, selv om verdiene i seg selv virker lite reelle. Når luft tilføres i bunn av issørpebeholderen skapes stor bevegelse i issørpen og varmeovergangen bedres betraktelig. Sammenlignet med forhåndsdrenert issørpe uten luft som gir nest beste varmeovergang, øker varmeovergangstallet med nesten 50 %. Sammenlignet med udrenert og kontinuerlig drenering økes varmeovergangen med hhv. 133 % og 165 %. Issørpe gir generelt langt bedre varmeovergang enn flak-is, hvor issørpen med lufttilførsel har et varmeovergangstall over 8 ganger større enn for den grove flak-isen. Stillestående issørpe gir varmeovergangstall 4-5 ganger høyere enn flak-is. Dette stemmer bra med det som ble anslått i (Piñeiro et al., 2004), hvor det ble sagt at varmetransporten inne ved produktoverflaten kan regnes å være rundt 4 ganger høyere ved issørpe sammenlignet med flak-is.



Figur 6-3: Sammenligning av det gjennomsnittlige avviket i tilpasningen mellom simulert og målt temperaturforløp for de ulike kjølemetodene

De ulike kjølemetodene viste stor spredning i hvor godt det simulerte temperaturforløpet lot seg tilpasse temperaturforløpet gitt av målingene. Tilpasningen måles i gjennomsnittlig avvik mellom simulering og måling, og sammenlignes for de ulike kjølemetodene i *Figur 6-3*. Tilpasningen observeres å være bedre for de tilfellene med høyere varmeovergangstall. I simuleringen ble omgivelsestemperaturen definert som en konstant temperatur, noe som ikke gjelder i praksis, spesielt i tilfelle med den udrenerte issørpen. Kurvetilpasningen påvirkes av dette ved at nedkjølingshastigheten reduseres i større grad i praksis etter hvert som temperaturen rundt modellproduktet øker, i motsetning til simuleringen hvor omgivelsestemperaturen er konstant. Kurvene klarer dermed ikke å følge hverandre gjennom kjøleprosessen, men krysses ved et tidspunkt, i noen tilfeller tidligere enn andre. Da den beste tilpasningen baseres på det gjennomsnittlige avviket, må varmeovergangstallet settes lavere enn det virkelige i starten for å kompensere for målingens reduksjon i kjølehastighet mot slutten. Tilfellet med issørpe tilsatt luft får derfor den beste tilpasningen ettersom temperaturen rundt produktet her forholder seg tilnærmet konstant takket være omrøringen. Antakelsen om konstant

omgivelsestemperatur er en svakhet i MATLAB-modellen som går utover nøyaktigheten i varmeovergangstallet.

6.3 Termiske bilder

De termiske bildene presentert i avsnitt *5.2* viser at bildene tatt med gjeldende forsøksutstyr ikke resulterte i hva man hadde håpet på. Målet var å få tatt bilder i front av røret og tett inntil plastveggen for å få et helhetlig bilde av issmeltingen rundt aluminiumsrøret. Dette lot seg ikke gjennomføre med denne systemløsningen, og bildene tatt skrått inn på den ene siden av røret (posisjon 1 i *Figur 3-6*) er vanskelig å tyde. Plastveggen er svært ujevn og skaper stor unøyaktighet og forstyrrelser i bildene. Man observerer en temperaturøkning, men det er vanskelig å skille mellom plast, rør og issørpe. Refleksjoner skaper også en ekstra forstyrrelse i temperaturbildet. Temperaturøkningen ovenfor røret er mest sannsynlig en oppvarming av vannet som ligger inntil plasten. Bildene gir ingen ytterligere informasjon om issmeltingen rundt et produkt.

Bildene tatt i posisjon 2 (*Figur 3-6*) er mye tydeligere og gir god oversikt over issørpe og aluminiumsrør. I dette tilfellet er ikke røret nedsenket i issørpen, men ligger på en måte halveis i overflaten. Bildene viser et tydelig voksende temperatursjikt etter hvert som tiden går og isen inntil røret smelter. Den røde stripen i det gule feltet indikerer at etter hvert som is smelter, renner væsken nedover og etterlater et luftrom inne ved røret. I praksis vil produktene være fullstendig tildekket av issørpe, slik at disse bildene gir heller ingen verdifull informasjon om interaksjonen mellom issørpe og produkt.

7 Konklusjon

Temperaturmålinger i modellprodukt bekrefter en langt større kjølekapasitet ved bruk av issørpe sammenlignet med tradisjonell flak-is. Dette er takket være issørpens lavere temperatur og bedre kontakt med produktet. Nedkjølingshastigheten flak-isen gir avhenger av isflakenes grovhet, hvor flak-is med mindre karakteristisk diameter gir et høyere varmeovergangstall gjennom bedre kontakt med produktet.

Issørpe gir raskere nedkjøling enn flak-is uansett håndtering, men sammenligning av temperaturmålinger og varmeovergangstall forteller at hvordan issørpen håndteres er avgjørende. Tilstrekkelig ismengde til at isen kan bære produktene og dermed en høy iskonsentrasjon inne ved produktoverflaten er vesentlig for at produktene skal nå lave temperaturer. Iskonsentrasjonen kan reguleres ved væskedrenering. Kontinuerlig drenering er ikke å anbefale ettersom dette fjerner det meste av væsken, som fører til at issørpen får en porøs snøkonsistens og derav en dårligere kontakt med produktet. I lagringsbeholdere for fersk fisk tildekket av issørpe bør beholderen ha en form for dreneringsregulering i bunn for å fjerne væske etter hvert som isen smelter. Issørpe må da etterfylles for å erstatte tapt væskevolum.

Luftinnsprøyting i issørpen for å skape omrøring viser seg å gi en vesentlig økning i varmeovergangstallet. I tillegg opprettholdes issørpens lave temperatur også inne ved produktoverflaten, i motsetning til de øvrige kjøletilfellene hvor denne temperaturen opplevde en stigning etter forsøksoppstart, til den etterhvert gikk ned igjen. Konseptet for lufttilførsel i issørpen bør derfor jobbes videre med, ettersom det har en potensiell gevinst i produktkvalitet som følge av raskere nedkjøling og konstant lav overflatetemperatur hos produkt uten at frysing oppstår.

Systemløsningen for forsøk med termisk kamera var ikke god nok til at det resulterte i bilder som kunne gi ytterligere informasjon om issmeltingen rundt et produkt.

8 Videreføring av arbeidet

Gjennom arbeidet med denne oppgaven har man kommet et godt stykke på vei i studie av varmeovergangen og interaksjonen mellom et produkt og issørpe. Modellproduktene viste seg å fungere godt til den type forsøk som ble utført. De var konsekvente i målingene sammenlignet med hverandre, og godt egnet for gjentakende forsøk på grunn av sin solide konstruksjon.

Tanken bak tilpasning av simulering og måling for å bestemme varmeovergangstallet var i utgangspunktet god, men av ukjente årsaker ga det svært lave verdier for varmeovergangstallet. Datamodelleringen bør derfor jobbes videre med i forsøk på å oppnå mer realistiske verdier.

I dette arbeidet manglet man kjennskap til en tallfestet iskonsentrasjon i issørpen, og hvordan den varierte mellom forsøkene. Dette bør tas med i vurderingene i en eventuell videreføring av arbeidet, for å kunne si noe om hvilke iskonsentrasjoner som gir mest effektiv kjøling. Da vil man også kunne avgjøre hva som er den optimale mengde drenering av issørpen.

Systemet som ble laget med tanke på å ta i bruk termisk kamera fungerte ikke like godt i praksis som man så for seg. Det er derfor rom for videreutvikling av et slikt system. Én idé kan være å konstruere to konsentriske rør, slik at vannet strømmer i et indre rør før det snur i enden av røret og strømmer i motsatt retning ut av det ytre røret, slik som vist i *Figur 8-1*. På den måten unngår man å legge røret gjennom plastveggen, som da vil være slett, og man kan få tatt bilder normalt på veggen og få hele området rundt røret med i bildet.

Figur 8-1: Forslag til ny rørkonstruksjon som forbedring av forsøksutstyr til bruk av termisk kamera

9 Litteratur

AUBOURG, S. P., LOSADA, V., PRADO, M., MIRANDA, J. M. & BARROS-VELÁZQUEZ, J. 2007. Improvement of the commercial quality of chilled Norway lobster (Nephrops norvegicus) stored in slurry ice: Effects of a preliminary treatment with an antimelanosic agent on enzymatic browning. *Food Chemistry,* 103**,** 741-748.

BARROS-VELÁZQUEZ, J., GALLARDO, J. M., CALO, P. & AUBOURG, S. P. 2008. Enhanced quality and safety during on-board chilled storage of fish species captured in the Grand Sole North Atlantic fishing bank. *Food Chemistry,* 106**,** 493-500.

CENGEL, Y. A. 2006a. Heat Conduction Equation. *Heat and Mass Transfer.* Reno, Nevada: McGraw-Hill.

CENGEL, Y. A. 2006b. Introduction and Basic Concepts. *Heat and Mass Transfer.* Reno, Nevada: McGraw-Hill.

DAVIDSEN, B. 2002. Temperaturmålinger. *Forelesningsnotater i instrumentering***,** 14.

EGOLF, M. K. A. P. W. 2005. Summary of Ice Slurry Technology. *Handbook of the IIR on Ice Slurries - Fundamentals and engineering.*

EGOLF, P. W. & KAUFFELD, M. 2005. From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications. *International Journal of Refrigeration,* 28**,** 4-12.

EIKEVIK, T. M. 2009. Food Properties. Trondheim.

ENCLOPEDIA, W.-T. F. 2010a. *Parabolic partial differential equation* [Online]. Wikipedia. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_partial_differential_equation [Accessed].

ENCLOPEDIA, W.-T. F. 2010b. *Polyvinyl chloride* [Online]. Wikipedia. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride [Accessed].

ENCLOPEDIA, W.-T. F. 2010c. *Seawater* [Online]. Wikipedia. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Seawater [Accessed].

ENCLOPEDIA, W.-T. F. 2010d. *Standardavvik* [Online]. Wikipedia. Available: http://no.wikipedia.org/wiki/Standardavvik [Accessed].

K. KASZA, Y. W., J. HEINE, D. SHERANDON & S. LAKE 2009. Development of ice slurry phase-change coolants for industrial and medical applications. *8th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Karlsruhe*.

KILINC, B., CAKLI, S., CADUN, A., DINCER, T. & TOLASA, S. 2007. Comparison of effects of slurry ice and flake ice pretreatments

on the quality of aquacultured sea bream (Sparus aurata) and sea bass (Dicentrarchus labrax) stored at 4 °C. *Food Chemistry,* 104**,** 1611-1617.

KOSTADIN FIKIIN, M.-J. W., MICHAEL KAUFFELD AND TORBEN M. HANSEN 2005. Direct Contact Chilling and Freezing of Foods in Ice Slurries. *Handbook of the IIR on Ice Slurries - Fundamentals and Engineering.*

M.J. WANG, S. S., V. GOLDSTEIN 2009. Latest development of ice slurry applications. *8th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Karlsruhe*.

MAGNUSSEN, O. M. Holdbarhet - Lagringsbetingelser. *Kuldekonservering*.

MELINDER, Å. 2005. Properties of Aqueous Solutions and Ice. *Handbook of the IIR on Ice Slurries - Fundamentals and Engineering.*

MÚGICA, B., BARROS-VELÁZQUEZ, J., MIRANDA, J. M. & AUBOURG, S. P. 2008. Evaluation of a slurry ice system for the commercialization of ray (Raja clavata): Effects on spoilage mechanisms directly affecting quality loss and shelf-life. *LWT - Food Science and Technology,* 41**,** 974-981.

PIÑEIRO, C., BARROS-VELÁZQUEZ, J. & AUBOURG, S. P. 2004. Effects of newer slurry ice systems on the quality of aquatic food products: a comparative review versus flake-ice chilling methods. *Trends in Food Science & Technology,* 15**,** 575-582.

RODRÍGUEZ, Ó., BARROS-VELÁZQUEZ, J., PIÑEIRO, C., GALLARDO, J. M. & AUBOURG, S. P. 2006. Effects of storage in slurry ice on the microbial, chemical and sensory quality and on the shelf life of farmed turbot (Psetta maxima). *Food Chemistry,* 95**,** 270-278.

SAVVAS TASSOU, J. B., ISSA CHAER, THOMAS DAVIES, THORSTEN BEHNERT, MING-JIAN WANG, VLADIMIR GOLDSTEIN 2005. Present and Future Applications. *Handbook of the IIR on Ice Slurries - Fundamentals and Engineering.*

SCOTSMAN. 2006. *MF 30 Ice Flaker* [Online]. Available: http://www.scotsman-ice.it/SiteDocs/MF%2030,%2003%202006.pdf [Accessed].

T. M. EIKEVIK, O. M. M., K. AFLEKT, E. BRENDENG 2005. Systemløsninger for kalddampanlegg. *Fag: TEP 4255 - Varmepumpende prosesser og systemer.* Trondheim: NTNU.

THE MATHWORKS, I. 2010. MATLAB R2010a. 7.10.0.499 (R2010a) ed.

WANG, S. G. & WANG, R. Z. 2005. Recent developments of refrigeration technology in fishing vessels. *Renewable Energy,* 30**,** 589-600.

10 Vedlegg

10.1 Vedlegg 1 – Forsøk med termisk kamera

1. Issørpebeholderen

2. Pumpesystemet

3. Systemet i helhet

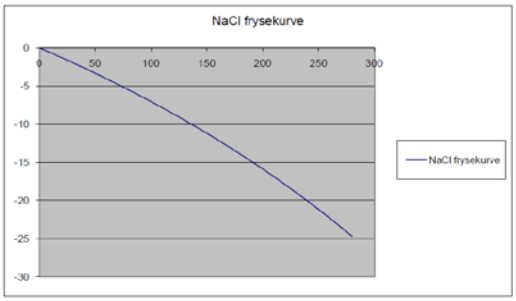
4. Vannebeholderen med varmeelement

5. Under forsøk med termisk kamera

6. Under forsøk med termisk kamera

10.2 Vedlegg 2 – Modellproduktets innhold

Masse (g salt pr. kg vann)	0	23	33.5	50	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
Frysepunk (°C)	0	-1.497	-2.204	-3.347	-5.529	-7.065	-8.671	-10.351	-12.112	-13.958	-15.897	-17.935	-20.080	-22.341	-24.728



Blandingsforhold vann/salt

NaCl	0.05
Vann	0.95
Total	**1**

Frysepunkt (°C)	**-3.3467**

Blandingsforhold masse

Vann/salt blanding	0.95
Gelatin	**0.05**
Total	**1**

Vann	**0.9025**
NaCl	**0.0475**
Total	**0.95**

Mengde (masse) av hvert stoff

Vann	1	kg	i gram:	1000
Salt	**0.0526**	**kg**	**i gram:**	**52.63**
Vann/salt blanding	**1.0526**	**kg**	**i gram:**	**1052.63**
Gelatin	**0.0554**	**kg**	**i gram:**	**55.40**
Total	**1.1080**	**kg**	**i gram:**	**1108.03**

I beregningene ovenfor bestemmer man først blandingsforholdet mellom vann og salt, som ved hjelp av frysekurven for NaCl gir frysepunktet for det gitte blandingsforholdet. Deretter bestemmes blandingsforholdet mellom saltvannsløsning og gelatin (man kjenner ikke lenger frysepunktet for blandingen etter at gelatinet er tilsatt, men det antas at frysepunktet vil senkes ytterligere pga. økt mengde løste stoffer). Videre tas det utgangspunkt i en gitt mengde vann (i vekt), og ut i fra denne og blandingsforholdene finner man den mengden salt og gelatin (i vekt) som må tilsettes. I dette eksempelet er det tatt utgangspunkt i følgende verdier: 5% salt og 95% vann i saltvannsløsningen, 5% gelatin og 95% saltvann i den ferdige blandingen, og 1kg (= 1 L) vann.

10.3 Vedlegg 3 – Issørpeaggregatet

I forbindelse med det eksperimentelle arbeidet ble issørpe produsert i et eget issørpe aggregat, levert av Pam Refrigeration AS. En kortfattet generell beskrivelse av anleggets oppbygging og virkemåte foretas, men for en mer detaljert beskrivelse med detaljerte tekniske spesifikasjoner henvises det til ”Instruksjonsbok med instruksjoner og dokumentasjon – Pam Flow-Ice / Is Sørpe Aggregat – 2009”.

Systemet opererer med ammoniakk (NH3) som kuldemedium og er basert på en direkte ekspansjon med en SV3 Danfoss float valve, egnet for mindre ammoniakkfordampere. Ammoniakk er klassifisert som et miljøvennlig medium, men involverer en del sikkerhetshensyn ettersom det har en panikkskapende effekt ved lekkasje (svært intens og stikkende lukt) og er giftig ved større mengder.

Anlegget drives av en åpen kompressor og direkte koblet 4 kW motor. Kompressoren leverer komprimert, varm (relativt) gass til en luftkjølt kondensator hvor gassen kondenserer til væskeform. Lufttilførselen i kondensatoren reguleres vha. en hastighetsstyrt vifte for å optimalisere kondensasjonstrykket, ettersom det er ønskelig å operere med minst mulig kondensatortrykk for å minimalisere kompressorarbeidet (energiforbruket). Fra kondensatoren strømmer væsken gjennom ekspansjonsventilen, som nevnt ovenfor. Ekspansjonsventilen leverer ammoniakken til varmeveksleren hvor ammoniakken tar opp varme fra laken (i utgangspunktet sjøvann) ved fordamping. Laken underkjøles først, før det etter hvert begynner og danne seg iskrystaller langs overflaten i varmeveksleren. Mekanisk skraping utført av en roterende enhet sørger for at iskrystallene blir med laken inn i lagringstanken, hvor isen akkumuleres. Systemet er konstruert slik at det kan operere med to forskjellige driftsalternativer, som beskrevet under.

Alternativ 1:

Sjøvann tas opp vha. en flerstegs vertikal pumpe, og leverer en volumstrøm ikke større enn at man oppnår den ønskede iskonsentrasjonen

selv om sjøvannet passerer varmeveksleren kun én gang. Hastigheten i pumpen reguleres etter dette. Når aggregatet operer slik må det sørges for at ventiler er stilt inn slik at ikke noe sjøvann sirkulerer tilbake fra tanken.

Alternativ 2:

Det andre alternativet går ut på å først fylle tanken med vann, for så å produsere issørpe gjennom en sirkulering av vannet via varmeveksleren, inn i lagringstanken med blandingsfunksjon og tilbake til varmeveksleren. Slik fortsetter en kontinuerlig sirkulasjon til den ønskede iskonsentrasjonen i vannet er nådd.

Bilder av anlegget med piler og nummerering for å markere de forskjellige komponentene er vist på neste side. Til slutt i vedlegget ligger en systemskisse av aggregatet.

5. Main components

1. Compressor
2. Oil separator
3. Stop Check valve
4. Air cooled condenser
5. Stop valve + Charging valve
6. Oil / liquid return stop valve (1 turn open from closed position)
7. Circulation pump
8. Sight glass low pressure side – charge system to this level maximum.
9. SV 3 float valve (expansion devise)
10. Water pressure regulator (only used when High press. Pump deliver single pass.
11. Temperature in
12. Multistage pump to deliver through water pressure regulator (not for circulation)
13. Harvest pump to deliver ice to fish/product.
14. Flow-Ice generator
15. Agitated storage tank (1000 Liter)
16. Control panel with all controls and starting gear.

6. Technical specification

6.1 Compressor model : **BOCK F3 (NH3)**

Approval:	: EC Machine directive 98/37/EG, Annex II B
	: PED 97 /23 CE
Saturated suction	: -10°C
Saturated discharge	: +35°C
Refrigeration capacity	: 10kW
Absorbed power	: 3kW
Compressor speed	: 1000 rpm Direct drive (maximum 1450rpm)

Included:
Complete package with oil separator, safety switches and electrical motor 4kW.

6.2 Air cooled condenser:

Model	:
Approval	: Lloyds Register of shipping, Bureau Veritas,
Water temperature in	: +30°C
Water supply required	: 23m3/h
No. passes	: 2 pass with total heat rejection of 100kW

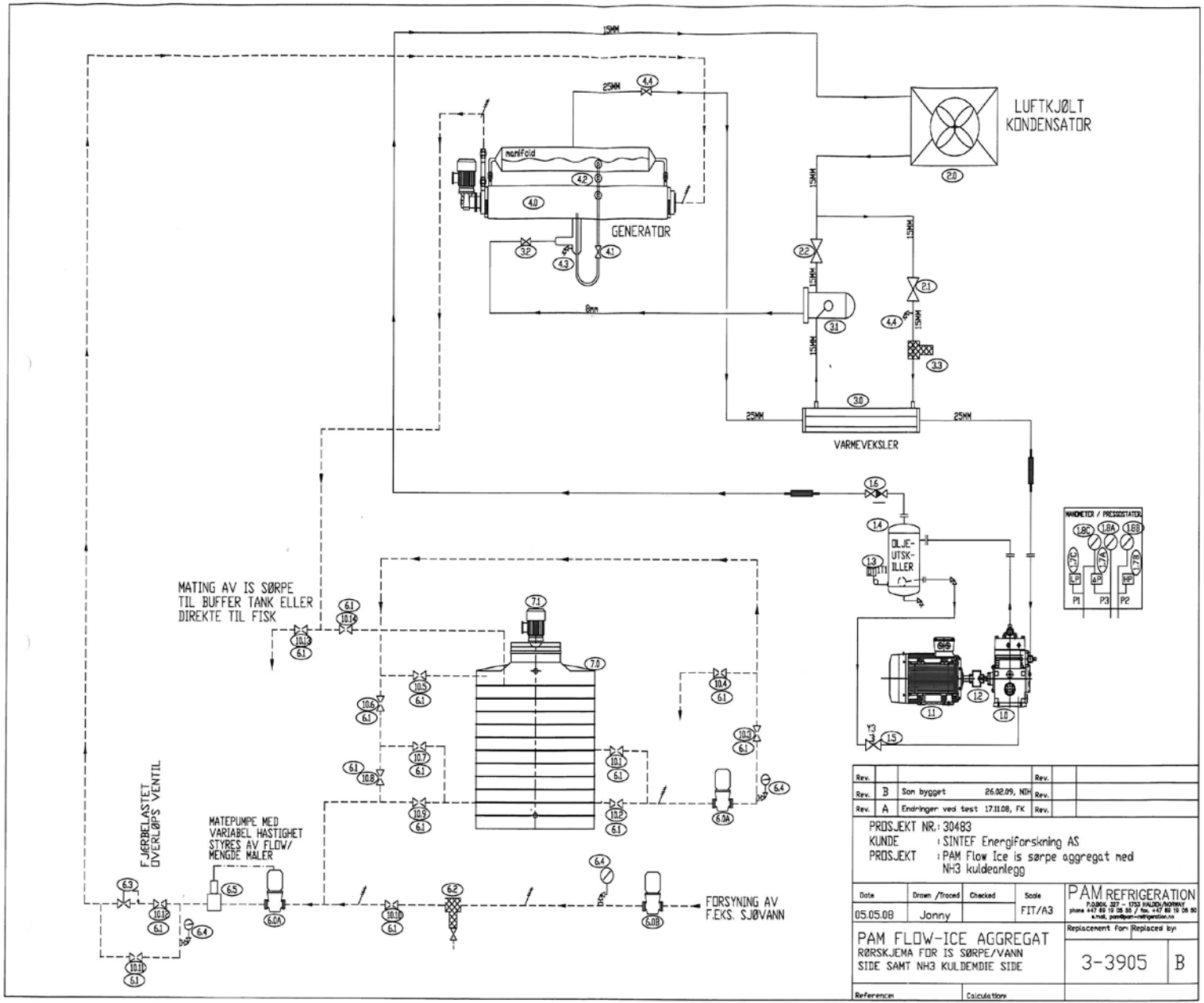
6.3 Flow-Ice generator (evaporator):

Model:	: MIF 400
PED Category	: III (CE certified)
Refrigeration capacity	: 10kW (max. 20kW)
Material	: stainless steel 316L

6.4 Electrical system:

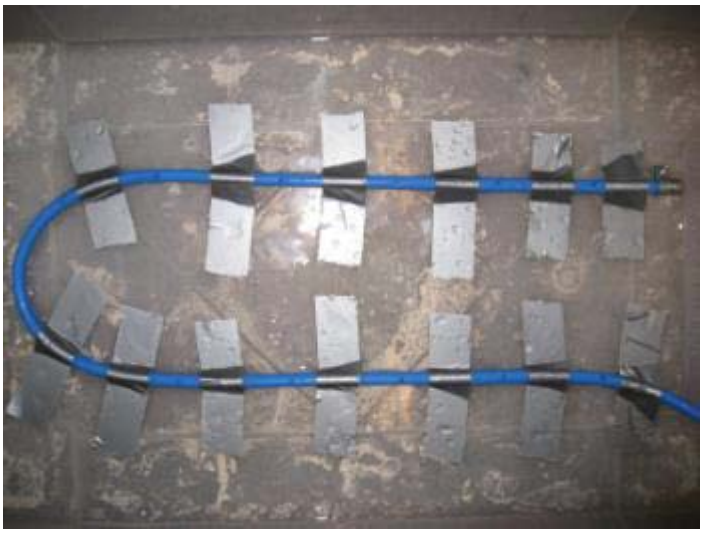
Siemens switch gear and controls and starting gear for two systems.

Total approx electrical power supply required	:
System power supply	: 220V 50Hz 3 phase.


LUFTKJØLT KONDENSATOR
GENERATOR
manifold
VARMEVEKSLER
OLJE-UTSKILLER
MANOMETER / PRESSOSTATER
MATING AV IS SØRPE TIL BUFFER TANK ELLER DIREKTE TIL FISK
FJÆRBELASTET OVERLØPS VENTIL
MATEPUMPE MED VARIABEL HASTIGHET STYRES AV FLOW/ MENGDE MÅLER
FORSYNING AV F.EKS. SJØVANN
Rev. B Som bygget 26.02.09, NH
Rev. A Endringer ved test 17.11.08, FK
PROSJEKT NR.: 30483
KUNDE : SINTEF Energiforskning AS
PROSJEKT : PAM Flow Ice is sørpe aggregat med NH3 kuldeanlegg
Date 05.05.08
Drawn /Traced Jonny
Checked
Scale FIT/A3
PAM REFRIGERATION
PAM FLOW-ICE AGGREGAT
RØRSKJEMA FOR IS SØRPE/VANN SIDE SAMT NH3 KULDEMDIE SIDE
Replacement For
Replaced by
3-3905
B
References
Calculations

10.4 Vedlegg 4 – Drenerings –og lufttilførselsystemene

Dreneringsanordningen i bunn av issørpebeholder



Luftinnsprøytingsanordningen i bunn av issørpebeholder

10.5 Vedlegg 5 – Artikkelutkast

Issørpe til kjøling av produkt ved direkte kontakt med fokus på varmeovergang

T. Hagen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for varme –og energiprosesser N-7491 Trondheim, Norge

Stikkord: Issørpe , kjøling av fisk, varmeovergang

Sammendrag: Helt fra 25 år tilbake har issørpe som ny teknologi for å bedre kjølebetingelsene for fisk fått mye oppmerksomhet. Etter nesten 30 år med kontinuerlig innsats fra forskere og produsenter, har issørpe etablert seg som en anerkjent og meget god kjøleteknologi på dette området, samt et egnet medium for konservering. Når det gjelder håndtering av issørpen ombord på fiskebåter, er det kjent at på de fleste fiskebåter benyttes issørpen til direkte kjøling av fisk og annen fangst. Issørpen blir da produsert av sjøvann ombord på båtene, og når fangsten tas inn blir den blandet med issørpe i beholdere.

Ulik håndtering av issørpen ble prøvd ut gjennom praktiske forsøk. Basert på målinger av kjernetemperatur i modellprodukt ble kjøleeffekten i fire ulike metoder for bruk av issørpe sammenlignet. De ulike metodene bestod av tre ulike tilfeller med hensyn til drenering av issørpen, hhv. uten drenering, kontinuerlig drenering og forhåndsdrenering (større iskonsentrasjo enn uten drenering). I tillegg ble en siste metode med luftinnsprøyting i bunn av beholderen prøvd ut som et tiltakt på å bedre varmeovergangen. Issørpen ble også sammenlignet med tradisjonell kjøling med flak-is. Kjøleprosessene ble modellert i MATLAB og simuleringer kjørt i forsøk på å tallfeste kjøleeffekten i form av et varmeovergangstall.

Det ble ved siden av modellproduktene utviklet et system beregnet for studering av interaksjonen mellom issørpe og produkt ved hjelp av et termisk kamera.

Temperaturmålinger i modellprodukt bekreftet en langt større kjølekapasitet ved bruk av issørpe sammenlignet med tradisjonell flak-is. Issørpe ga raskere nedkjøling enn flak-is uansett håndtering, men sammenligning av temperaturmålinger og varmeovergangstall viste at hvordan issørpen håndteres er avgjørende. Lav iskonsentrasjon medførte temperaturstigning i beholderen og modellproduktene nådde ikke kjernetemperaturer under 0 °C. Høyere iskonsentrasjon ga raskere nedkjøling og lavere slutttemperatur.Luftinnsprøyting i issørpen for å skape omrøring viser seg å gi en vesentlig økning i varmeovergangstallet. I tillegg opprettholdes issørpens lave temperatur også inne ved produktoverflaten, i motsetning til de øvrige kjøletilfellene hvor denne temperaturen opplevde en stigning etter forsøksoppstart, til den etterhvert gikk ned igjen. Konseptet for lufttilførsel i issørpen bør derfor jobbes videre med, ettersom det har en potensiell gevinst i produktkvalitet som følge av raskere nedkjøling og konstant lav overflatetemperatur hos produkt uten at frysing oppstår.

---

1. Introduksjon

Effekten av temperatur på holdbarhet av mat er kjent fra tusener av år tilbake og bruk av is og snø for nedkjøling er like gammelt. Helt fram til rundt midten av det 20. århundre stammet all is til kjøling fra naturlige kilder, enten lokal snø/is eller importert is fra arktiske strøk. Etter hvert som mekanisk kuldeproduksjon kom på markedet ble det mulig å produsere is med ulik utforming i egne maskiner, slik som isblokker/kuber/staver/flak (Egolf, 2005). Tilgangen på, og produksjonen av is er forenklet gjennom teknologisk utvikling, men isen må fremdeles transporteres manuelt s.a. bruken av is er arbeidskrevende, noe som er en stor ulempe med tanke på industriens høye arbeidskostnad. Kjøling av fisk ombord på fiskebåter er et godt eksempel på dette. Fersk fiskefangst har tradisjonelt blitt konservert ved hjelp av knust is laget av ferskvann, som krever at store mengder is lastes ombord og fraktes med på båtene så lenge fisket pågår (Wang and Wang, 2005).

Et mye brukt alternativ til isen er RSW (Refrigerated Sea Water) systemer, som benytter et kuldeanlegg til nedkjøling av sjøvann som deretter sirkuleres gjennom store tanker med innehold av sjøvann og fisk. Kuldeanlegget kan installeres ombord på båtene og man unngår dermed fraktingen av is (Wang and Wang, 2005). Men et slikt system har andre ulemper som stort volumopptak av kuldeanlegget, krevende arbeidsforhold og saltopptak hos mindre fiskearter (Kostadin Fikiin, 2005).

I senere tid har issørpe i økende grad etablert seg som en alternativ kjølemetode for kjøling av fisk, og den fører med seg mange fordeler i den sammenhengen. Men mange av fordelene er fortsatt i stor grad teoretiske, og det er fremdeles mangel på empiriske data relatert til bruken av issørpe i praksis (Piñeiro et al., 2004).

Matvarer som har så liten holdbarhet at de ikke kan distribueres og omsettes med tilstrekkelig kvalitet uten en eller annen form for konservering, kalles lettfordervelige matvarer. Marine produkter slik som fisk er av de mest lettfordervelige matvarene. Fisken har lav kroppstemperatur, og dermed er også enzymer, kjemiske prosesser og mikroorganismer på fisk tilpasset lave temperaturer. Dette gjør fisken svært sensitiv for temperaturøkning, som betyr at rask nedkjøling og lavest mulig temperatur (uten at frysing oppstår) under lagringen er meget viktig (Magnussen). Bakterieveksten er høyst temperaturavhengig, og hylletiden (holdbarheten) hos fisk sies og være omtrent doblet ved lagring ved 0 °C sammenlignet med lagring ved 5 °C (Kostadin Fikiin, 2005).

Den første lagringen av fisken forekommer ombord på fiskebåtene, og lagringsbetingelsene her vil derfor være avgjørende for kvaliteten hos de fremtidige produktene og deres markedsverdi. Kjøling er her nøkkelen til kvalitetsbevaring, og ulike kjølemetoder har blitt implementert, slik som tradisjonell flak-is og RSW. Ved bruk av flak-is har man vanligvis lagt is og produkt lagvis inne i bokser/kartonger, noe

som tar lang tid og krever høy arbeidskraft. I så måte er RSW er en enkel og tidsbesparende kjølemetode, men har andre negative sider. Systemene krever kompliserte pumpe –og filterinstallasjoner som gjør dem kostbare og romstore. I de senere år har oppmerksomheten rundt issørpesystmer i fiskerinæringen økt, og det finnes allerede mange installasjoner ombord på fiskebåter. Issørpen tilbyr meget lovende egenskaper i forbindelse med kjøling av fisk, som i (Piñeiro et al., 2004) blir oppsummert på følgende måte:

- Varmetransporten ved produktoverflaten kan regnes å være rundt fire ganger høyere enn ved flak-is på grunn av den store entalpiforskjellen ved issmeltingen, som øker nedkjølings-hastigheten betydelig.
- Issørpens lave temperatur, bestemt av det frysepunktnedsettende stoffets konsentrasjon (saltinnehold i sjøvannet ombrod på båter), reduserer kjemiske – og enzymrelaterte reaksjoner som påfører nedbryting av produktet betydelig.
- En fullstendig tildekking av produktoverflaten sørger for en mer effektiv kjøling samt at det hindrer oksygenrelaterte reaksjoner og dehydrering av produktet.
- Den sfæriske geometrien (se Figur 1-1) hos iskrystallene i issørpen begrenser den fysiske påkjenningen på produktoverflaten i motsetningen til flak-isens skarpe kanter som ofte påfører slitasjeskader.
- Saltkonsentrasjoner i nærheten av sjøvannets saltinnehold har også en fordel gjennom at saltet er et naturlig konserverings-middel i seg selv

Issørpeteknologiens framtid innen produktkjøling er avhengig av hvordan følgende problemstillinger behandles (M.J. Wang, 2009):

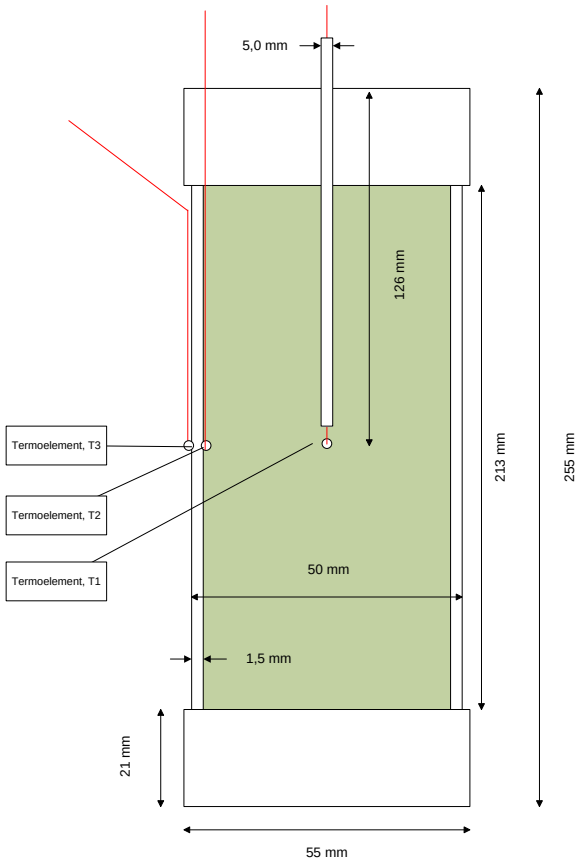
- Videre utvikling av produksjonsutstyr, hovedsakelig issørpe-generatorer
- Maskineri med mindre behov for vedlikehold, høyere COP og lavere kostnader (hovedsakelig investeringskostnader) for at teknologien skal være konkurransedyktig
- Mer utfyllende eksperimenter og studier på anvendelse av issørpe på ulike produkt. I dag eksisterer kun enkelte rapporterte studier av kjøling med issørpe hos enkelte fiskearter og brokkoli.
- Markedsføring

Punkt 3 ovenfor blir viktig i arbeidet med å utvide kunnskapen om hvor godt issørpens gode teoretiske egenskaper kommer til nytte i praksis, og hvilke tiltak som eventuelt kan gjøres for å utnytte issørpen på en bedre måte. Å utvikle ny kunnskap rundt dette gjennom eksperiment var målet med dette arbeidet.

2. Materialer og metode

2.1 Modellprodukt – måling og simulering

Tre likedannete modellprodukt ble konstruert for å måle temperaturer i disse ved nedkjøling i ulike kjøleprosesser. Med kjøleprosesser menes kjøling med flak-is av ulik grovhet, og kjøling med issørpe med ulik håndtering. Modellproduktene bestod av et plastrør (PVC) fylt med en blanding av gelatin, salt (NaCl) og vann. En slik blanding gir termiske egenskaper ikke ulik de hos en saltvannsfisk. Saltet sørger for å senke frysepunktet nok til at det ikke oppstår frysing av innholdet. Røret ga modellene form som et sylinder, med lengde lik 25 cm og diameter lik 5 cm. Det ferdigstilte modellproduktet er beskrevet i detalj i *Figur 2-1*.



Figur 2-1: Detaljbeskrivelse av modellproduktets konstruksjon

Temperaturmålinger tatt under nedkjøling av modellproduktene gir temperaturenes variasjon med tiden, og derav temperaturkurver som representerer nedkjølingshastigheten. Ved å sammenligne temperaturkurvene for hver av kjølemetodene kan man enkelt se hvilke metoder som gir størst kjøleeffekt. Basert på temperaturmålingene ønsket man å tallfeste kjøleeffekten i form av et varmeovergangstall mellom modellprodukt og omgivelser. Ettersom modellproduktene har en enkel geometri (sylinder) og kjente termiske egenskaper, i tillegg til at omgivelsestemperaturen forholder seg tilnærmet konstant (så lenge det er rikelig med is tilstede), ga det mulighet for datamodellering av kjøleprosessen. Modelleringen ble utført i dataprogrammet MATLAB R2010a.

Betingelsen for simuleringene ble definert likt som hos de praktiske forsøkene. Modellproduktenes termiske egenskaper, funnet gjennom kalorimetriske målinger, og geometri ble implementert som konstante verdier i modellen. Omgivelsestemperaturen (temperaturen i flak-is/issørpe) ble i simuleringen satt som en konstant verdi, lik den som ble målt i flak-is/issørpe ved forsøkets oppstart.

2.1 Kjølemetoder

Man ønsket gjennom eksperimentelt arbeid å undersøke varmeovergangen ved kjøling med issørpe, sammenligne denne med tradisjonell kjøling med flak-is, samt å verifisere tiltak for å bedre varmeovergangen i issørpen. Det ble derfor foretatt temperaturmålinger i de tre likedannete modellproduktene ved ulike kjølemetoder. Issørpen brukt i forsøkene ble produsert av ferskvann tilsatt salt (mellom 3,5 - 4,5%, målt av en BRIX konsentrasjonsmåler) i et issørpeaggregat levert av Pam Refrigeration AS (Halden). Den samme vann/saltløsningen ble brukt til produksjonen av issørpe gjennom hele den eksperimentelle perioden. Dette medførte en viss variasjon i saltkonsentrasjonen pga. noe erstatning av ferskvann underveis, og dermed også en variasjon i issørpens temperatur. Temperaturen i issørpen er også avhengig av hvor lenge aggregatet går. Årsaken til dette er at etter hvert som isinnholdet øker, øker saltkonsentrasjonen i væsken og frysepunktet senkes noe før ny is dannes.

Flak-is ble produsert i en SCOTSMAN MF30 ICE FLAKER ismaskin. (Scotsman, 2006) oppgir at isen holder en temperatur på 0 – -0,5 °C. Ordinært produserer maskinen isflak med en gjennomsnittlig karakteristisk diameter på ca. 12 mm. Ved hjelp av en egen isknusingsenhet, ble det i tillegg til den ordinære flak-isen produsert finere is med en gjennomsnittlig karakteristisk diameter på ca. 4 mm.

Når det gjelder håndtering av issørpen ombord på fiskebåter, finnes det få opplysninger i litteraturen. I (Egolf, 2005) blir det bekreftet at chilenske, nederlandske og islandske fiskere benytter issørpe til direkte kjøling av fisk og annen fangst. Issørpen blir her produsert av sjøvann ombord på båtene, og når fangsten tas inn blir den blandet med issørpe i beholdere. Det sies at issørpen i noen tilfeller blir drenert, uten at det blir gitt en nærmere beskrivelse av hvordan dreneringen foregår. Drenering betyr uansett at

væskeandelen i issørpen reduseres, noe som gir en større iskonsentrasjon. For å undersøke effekten av drenering nærmere ble det foretatt temperaturmålinger i modellprodukt ved kjøling i tre ulike tilfeller angående drenering; uten drenering, forhåndsdrenering og kontinuerlig drenering.

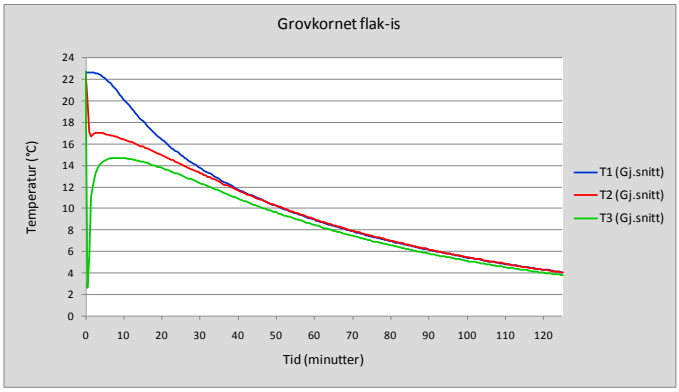
Det er ingen tvil om at en fisk omgitt av issørpe i første omgang vil oppleve en meget høy kjøleeffekt gjennom den gode kontakten mellom is og produkt, men hva skjer etter hvert som isen smelter? Man ser for seg at fisken i økende grad vil være omgitt av væske, som vil føre til at man mister mye av kjøleeffekten fra issmeltingen, og dermed mye av hensikten med issørpen. Selv om isens tilstedeværelse sørger for å holde en tilnærmet konstant lav temperatur, vil en væskefilm rundt produktet gi varmetransport i form av varmeledning i vannet, istedet for smelting av is på produktoverflaten. Det er derfor ønskelig å skape en bevegelse i issørpen, slik at det vannsjiktet man tror dannes etter hvert som isen smelter, vil brytes opp og kontakten mellom is og produkt bedres. I tillegg skaper en væske i bevegelse som kjent et økt konvektivt varmeovergangstall i fohold til en væske fullstendig uten bevegelse hvor all varmetransport foregår ved varmeledning (Cengel, 2006). Man får altså en tvungen (”forced”) konveksjon som øker varmeovergangen i forhold til den naturlige konveksjonen i et fluid.

Et forslag til tiltak for å skape omrøring i issørpen, er injisering av luftbobler. Ved å tilføre trykkluft i bunn av beholderen vil luftbobler stige opp gjennom issørpen, og på den måten sette issørpen i bevegelse. Luft vil heller ikke skade produktene slik som omdreining av noe mekanisk vil gjøre. Dette ble utprøvd ved å legge inn en trykkluftsslange med små hull i bunnen av issørpebeholderen.

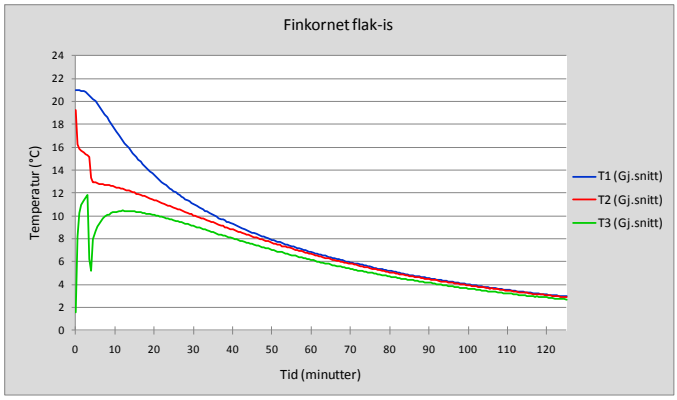
3. Resultater og diskusjon

3.1 Nedkjøling av modellprodukt

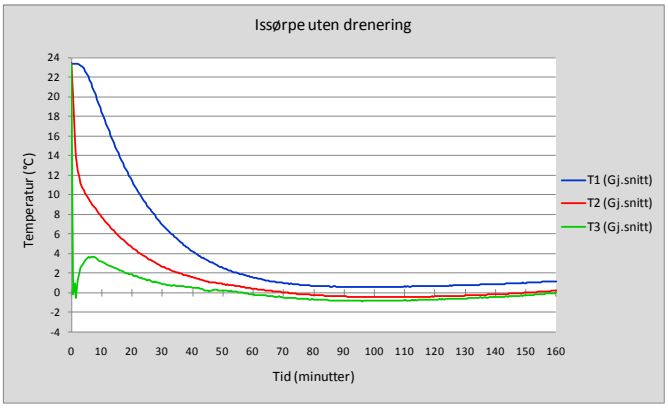
I dette avsnittet presenteres måleresultatene for temperaturmålinger i tre likedannete modellprodukt, for hver av de ulike kjølemetodene beskrevet i *2.2*. Resultatene presenteres i form av temperaturkurver, hvor temperaturene er gjennomsnittlige verdier basert på målingene fra alle tre modellproduktene. Det ble gjort to måleserier for hver kjølemetode, men her blir kun den av de to som ga raskeste nedkjøling gitt. Måleseriene varierer noe i varighet, som skyldes at ikke alle forsøk lot seg gjennomføre over like stort tidsrom. I alle figurer er kurvene bemerket med T1 (blå), T2 (rød) og T3 (grønn), som her representerer hhv. termoelement T1 (kjernetemperatur), T2 (temperatur på innsiden av røroverflaten) og T3 (temperatur på utsiden av røroverflaten) i *Figur 2-1*.



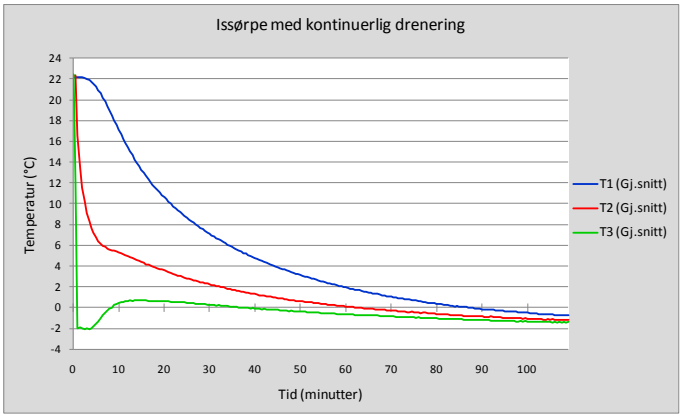
Figur 3-1: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med grovkornet flak-is



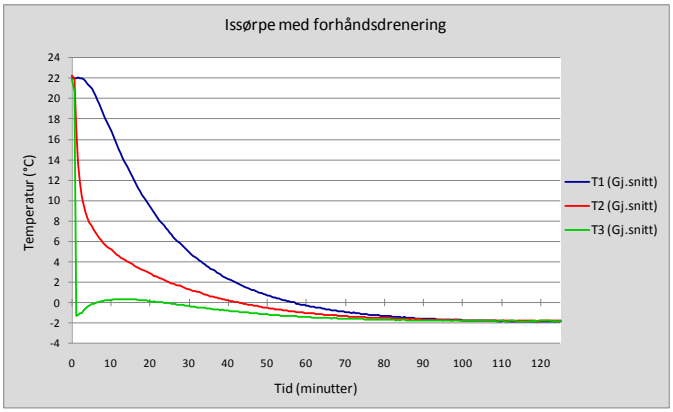
Figur 3-2: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med finkornet flak-is



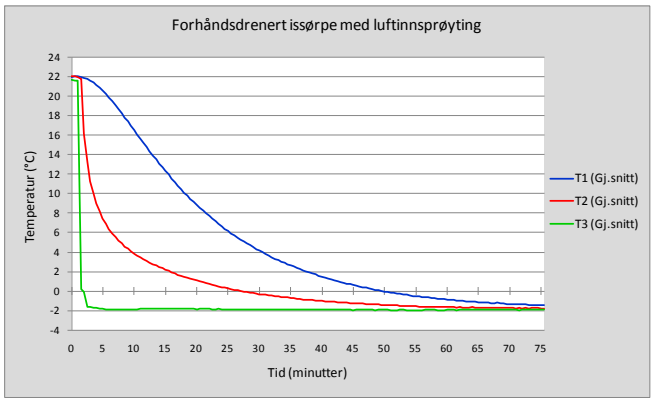
Figur 3-3: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe uten drenering



Figur 3-4: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med drenering



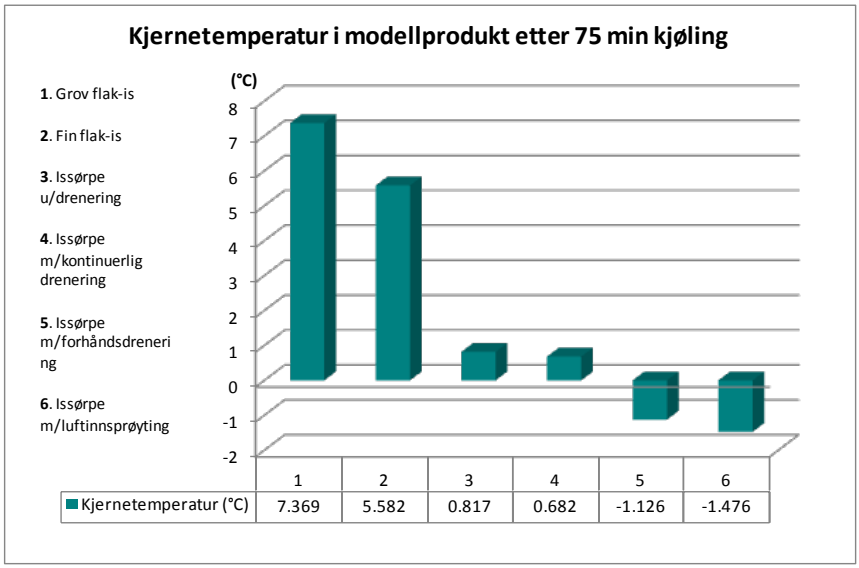
Figur 3-5: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med issørpe med forhåndsdrenering



Figur 3-6: Gjennomsnittlige temperaturkurver basert på målinger i tre likedannete modellprodukt for kjøling med forhåndsdrenert issørpe med lufttilførsel

I *Figur* er det gjennomsittlige temperaturforløpet over de tre modellproduktene, fra alle de ulike kjølemetodene gitt. Ettersom temperaturforløpet var basert på gjennomsnittlige verdier for målinger fra tre modellprodukt, ble standardavviket i hvert målepunkt beregnet. Standardavvikene lå innenfor intervallet 0,335 – 0,84 °C, hhv. laveste og høyeste verdi sett over alle kjølemetodene. Modellproduktene viser seg derfor å være konsekvente seg i mellom, som tilsier at likheten i konstruksjonen av de er god, og at de er godt egnet for bruk i repeterende forsøk.

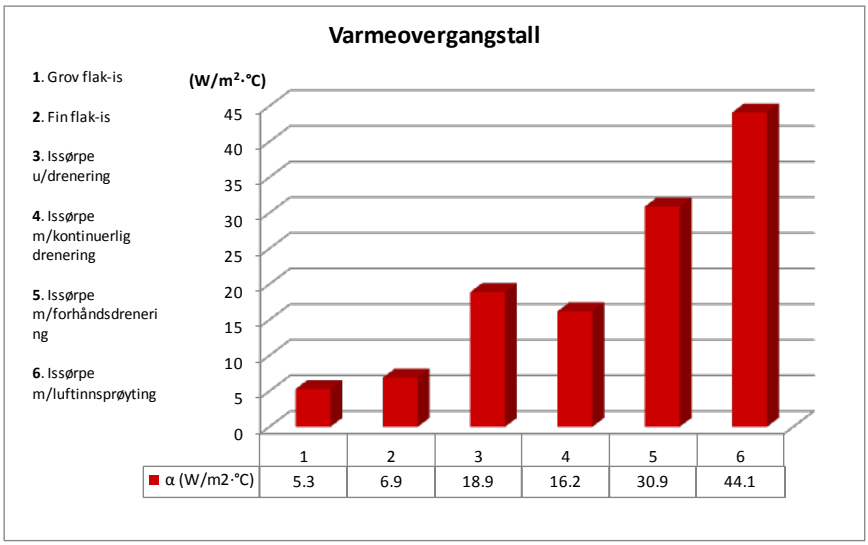
Termoelementene som ble teipet fast inntil modellproduktenes overflate er ikke i stand til å gi den eksakte temperaturen i selve overflaten, men gir temperaturen like utenfor. Denne temperaturen faller derfor umiddelbart idet modellproduktene kommer i kontakt med isen/issørpen, før den begynner og stige etter hvert som varme transporteres ut av modellen og varmer opp omgivelsene inne ved modellens overflate. Hvor mye temperaturen stiger varierer mellom kjølemetodene, høyest ved grov flak-is og lavest ved forhåndsdrenert issørpe med luftinjisering, hvor den ikke stiger men forholder seg konstant lav (tilnærmet issørpetemperaturen). Dette gir mening med tanke på at den grove flak-isen gir dårlig kontakt med produktet, i motsetning til issørpen som vil dekke hele produktet takket være dens væskekonsistens. Ligger produktet stille uten bevegelse i issørpen, tyder temperaturmålingene på at issørpen inne ved produktoveflaten varmes opp. I hvor stor grad ser ut til å avhenge av ismengden, ettersom overflatetemperaturen stiger mer i tilfellet med udrenert issørpe sammenlignet med den forhåndsdrenerte issørpen. I tilfellet med lufttilførsel stiger ikke overflatetemperaturen. Her setter luftboblene issørpen i bevegelse, og denne omrøringen ser ut til å bryte opp et varmeledningssjikt inne ved produktoverflaten, og dermed sørge for at omgivelsestemperaturen her hele tiden tilsvarer temperaturen lengre ute i issørpen.



Figur 3-6: Sammenligning av modellproduktenes gjennomsnittlige kjernetemperatur etter 75 minutters nedkjøling med de ulike kjølemetodene

Stolpediagrammet i *Figur 3-6* forteller at etter 75 minutters nedkjøling har man oppnådd en temperaturforskjell på 8,845 °C i kjernetemperatur mellom minst effektive (grov flak-is) og mest effektive (forhåndsdrenert issørpe med lufttilførsel) kjølemetode. Den forhåndsdrenerte issørpen ligger kun 0,35 °C høyere enn tilfellet med luftinnsprøyting. Tilfellene med udrenert issørpe og issørpe med kontinuerlig drenering gir relativt like kjernetemperatur etter 75 min, men skiller seg ved lavest oppnådde kjernetemperatur i forsøket, hhv. 0,537 °C og -0,766 °C. Selv om den udrenerte issørpens starttemperatur er -3 °C, når ikke kjernetemperaturen engang 0,5 °C, men begynner i stedet å stige etter ca. 100 minutter. Dette hentyder at den udrenerte issørpen ikke har tilstrekkelig ismengde til å bevare en konstant temperatur i beholderen. Væsken i bunn av beholderen varmes opp av produkt og omgivelser, og leder varmen oppover til den smeltende isen i toppen av beholderen.

3.2 Varmeovergangstall bestemt av simulering

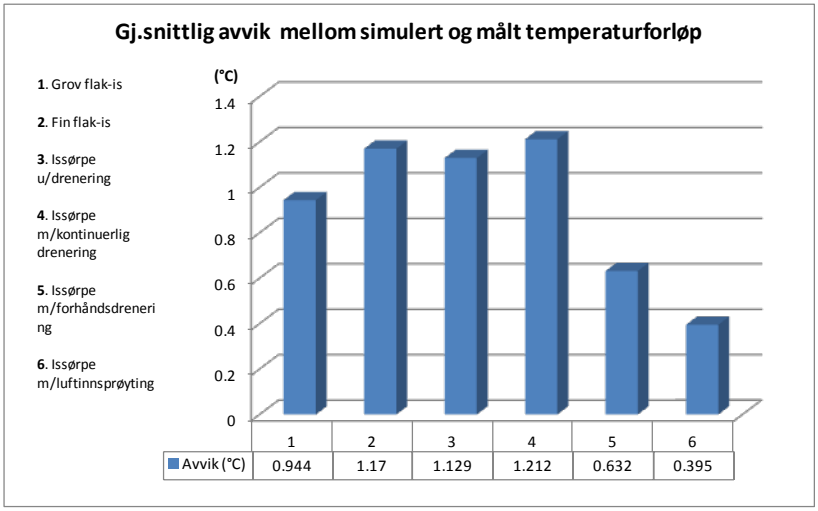


Figur 3-7: Sammenligning av varmeovergangstall funnet gjennom tilpasning mellom simulert og målt kjernetemperatur

Varmeovergangstallene bestemt av tilpasningen mellom simulering og målinger synes jevnt over å være svært lave i forhold til hva man kan forvente. Lignende eksperiment har blitt gjort tidligere. I (Kostadin Fikiin, 2005) presenteres resultatene fra et eksperiment med måling av kjernetemperatur i et modellprodukt (kunstig fisk) bestående av metylcellulose, salt og vann, ikke ulikt modellproduktene benyttet i dette tilfellet. Tilsvarende både temperaturmålinger og modellering av kjøleprosessen. I simuleringen i (Kostadin Fikiin, 2005) ble et varmeovergangstall mellom produkt og issørpe estimert til å være hele 750 W/(m^2·°C). Dette varmeovergangstallet ga en forholdsvis god tilpasning mellom simulering og måling, og bekrefter at varmeovergangstallene funnet her ligger langt utenfor det området de bør ligge. Årsaker til dette er vanskelig å påpeke. Man undret et øyeblikk på om det kunne ha oppstått len lufthinne mellom plastrør og innhold, og dermed gi en svært høy varmeledningsmotstand inne ved plastveggen. Dette ble avkreftet da man åpnet modellproduktene og fant at innholdet ikke hadde stivnet, men fortsatt var en væskeblanding. Luft på innsiden av modellen ville i så fall lagt seg som et lite lag i toppen og ikke påvirket fallet i kjernetemperatur nevneverdig. Datamodellen ble gransket av flere, forsøkt bygd opp på ny fra bunn av, men uten at dette endret varmeovergangstallene.

Det at verdiene er lave i alle tilfeller viser at simuleringsmodellen i det minste er konsekvent, slik at grunnlaget for å sammenligne kjølemetodene ut i fra forskjellene i varmeovergangstall synes å være rimelig, selv om verdiene i seg selv virker lite reelle. Når luft tilføres i bunn av issørpebeholderen skapes stor bevegelse i issørpen og

varmeovergangen bedres betraktelig. Sammenlignet med forhåndsdrenert issørpe uten luft som gir nest beste varmeovergang, øker varmeovergangstallet med nesten 50 %. Sammenlignet med udrenert og kontinuerlig drenering økes varmeovergangen med hhv. 133 % og 165 %. Issørpe gir generelt langt bedre varmeovergang enn flak-is, hvor issørpen med lufttilførsel har et varmeovergangstall over 8 ganger større enn for den grove flak-isen. Stillestående issørpe gir varmeovergangstall 4-5 ganger høyere enn flak-is. Dette stemmer bra med det som ble anslått i (Piñeiro et al., 2004), hvor det ble sagt at varmetransporten inne ved produktoverflaten kan regnes å være rundt 4 ganger høyere ved issørpe sammenlignet med flak-is.



Figur 3-8: Sammenligning av det gjennomsnittlige avviket i tilpasningen mellom simulert og målt temperaturforløp for de ulike kjølemetodene

De ulike kjølemetodene viste stor spredning i hvor godt det simulerte temperaturforløpet lot seg tilpasse temperaturforløpet gitt av målingene. Tilpasningen måles i gjennomsnittlig avvik mellom simulering og måling, og sammenlignes for de ulike kjølemetodene i *Figur 3-8.* Tilpasningen observeres å være bedre for de tilfellene med høyere varmeovergangstall. I simuleringen ble omgivelses-temperaturen definert som en konstant temperatur, noe som ikke gjelder i praksis, spesielt i tilfelle med den udrenerte issørpen. Kurvetilpasningen påvirkes av dette ved at nedkjølings-hastigheten reduseres i større grad i praksis etter hvert som temperaturen rundt modellproduktet øker, i motsetning til simuleringen hvor omgivelsestemperaturen er konstant. Kurvene klarer dermed ikke å følge hverandre gjennom kjøleprosessen, men krysses ved et tidspunkt, i noen tilfeller tidligere enn andre. Da den beste tilpasningen baseres på det gjennomsnittlige avviket, må varmeovergangstallet settes lavere enn det virkelige i starten for å kompensere for målingens reduksjon i kjølehastighet mot slutten. Tilfellet med issørpe tilsatt luft får derfor den beste tilpasningen ettersom temperaturen rundt produktet her forholder seg tilnærmet konstant takket være omrøringen. Den konstante

omgivelsestemperaturen er en svakhet i MATLAB-modellen som går utover nøyaktigheten i varmeovergangstallet.

4. Konklusjon

Temperaturmålinger i modellprodukt bekrefter en langt større kjølekapasitet ved bruk av issørpe sammenlignet med tradisjonell flak-is. Dette er takket være issørpens lavere temperatur og bedre kontakt med produktet. Nedkjølingshastigheten flak-isen gir avhenger av isflakenes grovhet, hvor flak-is med mindre karakteristisk diameter gir et høyere varmeovergangstall gjennom bedre kontakt med produktet.

Issørpe gir raskere nedkjøling enn flak-is uansett håndtering, men sammenligning av temperaturmålinger og varmeovergangstall forteller at hvordan issørpen håndteres er avgjørende. Tilstrekkelig ismengde til at isen kan bære produktene og dermed en høy iskonsentrasjon inne ved produktoverflaten er vesentlig for at produktene skal nå lave temperaturer. Iskonsentrasjonen kan reguleres ved væskedrenering. Kontinuerlig drenering er ikke å anbefale ettersom dette fjerner det meste av væsken, som fører til at issørpen får en porøs snøkonsistens og derav en dårligere kontakt med produktet. I lagringsbeholdere for fersk fisk tildekket av issørpe bør beholderen ha en form for dreneringsregulering i bunn for å fjerne væske etter hvert som isen smelter. Issørpe må da etterfylles for å erstatte tapt væskevolum.

Luftinnsprøyting i issørpen for å skape omrøring viser seg å gi en vesentlig økning i varmeovergangstallet. I tillegg opprettholdes issørpens lave temperatur også inne ved produktoverflaten, i motsetning til de øvrige kjøletilfellene hvor denne temperaturen opplevde en stigning. Konseptet for lufttilførsel i issørpen bør derfor jobbes videre med, ettersom det har en potensiell gevinst i produktkvalitet som følge av raskere nedkjøling og lav overflatetemperatur hos produkt uten at frysing oppstår.

Referanser

CENGEL, Y. A. 2006. Introduction and Basic Concepts. *Heat and Mass Transfer.* Reno, Nevada: McGraw-Hill.

EGOLF, M. K. A. P. W. 2005. Summary of Ice Slurry Technology. *Handbook of the IIR on Ice Slurries - Fundamentals and engineering.*

KOSTADIN FIKIIN, M.-J. W., MICHAEL KAUFFELD AND TORBEN M. HANSEN 2005. Direct Contact Chilling and Freezing of Foods in Ice Slurries. *Handbook of the IIR on Ice Slurries - Fundamentals and Engineering.*

M.J. WANG, S. S., V. GOLDSTEIN 2009. Latest development of ice slurry applications. *8th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Karlsruhe*.

MAGNUSSEN, O. M. Holdbarhet - Lagringsbetingelser. *Kuldekonservering*.

PIÑEIRO, C., BARROS-VELÁZQUEZ, J. & AUBOURG, S. P. 2004. Effects of newer slurry ice systems on the quality of aquatic food products: a comparative review versus flake-ice chilling methods. *Trends in Food Science & Technology,* 15**,** 575-582.

SCOTSMAN. 2006. *MF 30 Ice Flaker* [Online]. Available: http://www.scotsman-ice.it/SiteDocs/MF%2030,%2003%202006.pdf [Accessed].

WANG, S. G. & WANG, R. Z. 2005. Recent developments of refrigeration technology in fishing vessels. *Renewable Energy,* 30**,** 589-600.