

Mulighetsstudie for etablering av superkjølingslinje i slakteri

Bjørn Austbø

Master i energi og miljø

Oppgaven levert: Juni 2011

Hovedveileder: Trygve Magne Eikevik, EPT

Biveileder(e): Erlend Indergård, SINTEF Energi AS

EPT-M-2011-11

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Bjørn Austbø

Våren 2011

Mulighetsstudie for etablering av superkjølingslinje i slakteri*Feasibility study for establishing a super chilled production line in a slaughterhouse***Bakgrunn**

Prosjektet omhandler utvikling av optimal kuldekjede for næringsmidler fra produsent til konsument, der målet er å utvikle nye verktøy for å måle og dokumentere energibruk, miljøpåvirkning og matvaresikkerhet. Samtidig vil nye og innovative kjøleteknologier bli utviklet. Innen næringsmiddelindustrien trenger ca. 70 % av mengden en eller annen form for prosessering, der kjøling er en av de viktigste faktorene. I industrialiserte land kastes ca. 30 % av maten og i utviklingsland er denne raten på ca. 60 %. En stor del av årsaken til dette er på grunn av dårlig kjøling og håndtering. Det er registrert 3 mill dødsfall på verdensbasis relatert til sykdom ved næringsinntak. Andelen som blir syke pga næringsmidler og borte fra jobb er betydelig. Nær 8 % (1300 TWh) av all elektrisk kraft på verdensbasis blir i dag brukt til kjøleprosesser, noe som tilsvarer 2,5 % (0,7 Gt CO₂) av verdens totale utslipp av CO₂.

Oppgaven vil bli gjennomført i samarbeid med et stort norsk slakterikonsern og oppgaven vil bli direkte knyttet til reell industriell produksjon og distribusjon av svinekjøtt i Norge. Det er også en viss eksport av konkrete produkter til Europa.

Mål

Målet med oppgaven er å etablere underlag for etablering av superkjølingslinje i et slakteri

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Litteraturstudie for energibruk i slakterier og kuldekjede
2. Kartlegge slakterilinj i et gitt anlegg, inklusive ulike enhetsoperasjoner, med vekt på etablering av superkjølingslinje
3. Gjennomføre supplerende målinger av kuldeanlegg, temperaturer og fuktighet i produksjonslokaler, produkttemperaturer, samt energibruk
4. Skissere løsning for etablering av superkjølingslinje i produksjon og superkjølt distribusjon
5. Utarbeide et "Draft paper" fra arbeidet i masteroppgaven
6. Utarbeide forslag til videreføring

Prosjektoppgaven vil bli gjennomført i nært samarbeid med SINTEF, hvor det arbeides med et EU-finansiert prosjekt "Frisbee". Slakterikonsernet er partner i dette prosjektet.

" - "

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.

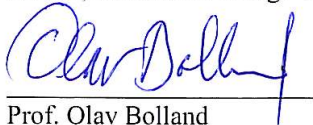
Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg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

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 maskinskrevet 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), samt alle relevante dokumenter og data som er brukt i oppgaven på en CD-ROM.

NTNU, Institutt for energi- og prosesseteknikk, 14. januar 2011



Prof. Olav Bolland
Instituttleder



Prof. Trygve M. Eikevik
Faglig ansvarlig/veileder
e-mail: trygve.m.eikevik@ntnu.no

Medveileder(e)
Erlend Indergård, SINTEF Energi AS. Erlend.indergard@sintef.no

Forord

Denne rapporten utgjør sluttproduktet av min masteroppgave i 10. semester ved masterprogrammet Energi og miljø ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Masteroppgaven er gjennomført ved Institutt for energi- og prosesseteknikk ved Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi ved NTNU, og er en fortsettelse av fordypningsprosjekt gjennomført høsten 2010.

Bakgrunnen for oppgaven er EU-prosjektet Frisbee som startet opp høsten 2010, med SINTEF Energi AS som en av partnerne. Frisbee har som mål å forbedre sikkerhet, energibruk og miljøpåvirkning ved produksjon og distribusjon av næringsmidler i Europa. Oppgaven har blitt gjennomført i samarbeid med SINTEF Energi AS. Hensikten har vært å kartlegge kuldekjeden i slaktelinjene for gris ved slakteriene Fatland Jæren AS og Fatland Ølen AS, og vurdere mulighetene for å installere en superkjølt produksjonslinje ved Fatland Ølen.

Jeg ønsker å takke hovedveileder Trygve Magne Eikevik ved NTNU og medveileder Erlend Indergård ved SINTEF Energi AS for god veiledning underveis i arbeidet. I tillegg ønsker jeg å takke Magne Hjelmtveit og Einar Eide for informasjon om kuldeanleggene på henholdsvis Fatland Jæren og Fatland Ølen. Jeg vil også takke Fatland Jæren og Fatland Ølen og de ansatte på slakteriene, for tilgang til slakteriene og informasjon om slakterilinjene.

Trondheim, 14.06.11



Bjørn Austbø

Sammendrag

Hensikten med denne studien har vært å kartlegge mulighetene for å etablere en superkjølt produksjonslinje for svinekjøtt på et slakteri. For å kunne vurdere mulighetene for å utnytte eksisterende kuldeanlegg, ble det gjennomført målinger i den eksisterende slakterilinja. Produkttemperaturer ble målt gjennom hele kuldekjeden, fra slakting til distribusjonslager. Energibruken i enkelte kuldeanlegg ble også målt. For superkjølingsprosessen ble det også vurdert å installere en skallfryser. Kjøletiden i skallfryseren ble estimert ved hjelp av FVM (finite volume method).

Temperaturmålingene viste at et eksisterende kjølerom kun kunne benyttes i en småskala superkjølingslinje. Rommet brukes i dag til kjøling av stykker av nakke og svinekam, slik at disse er delvis fryst når de blir hakket opp til koteletter. For å kunne senke temperaturen til superkjølingsnivå, må produktene oppbevares på kjølerommet over natten, og kapasiteten er derfor begrenset av hvor store mengder det er plass til i rommet. Siden den daglige produksjonen av koteletter er nok til å fylle rommet, vil en eventuell superkjølingslinje være begrenset til produktene som kjøles i dette rommet i dag, eller en tilsvarende mengde av andre produkter.

Med lang kjøletid kan man også forvente økt vekttap fra produktet. For å kunne superkjøle større mengder, og få kortere kjøletid, bør man installere en skallfryser. Denne kan plasseres i det eksisterende kjølerommet. Med skallfryser kan produktet kjøles ned til ønsket entalpinivå i løpet av kort tid, og den videre prosesseringen kan skje samme dag som nedskjæring.

Små endringer i produktstørrelse, innløpstemperatur, varmeovergangstall eller

lufttemperatur, gir betydelig utslag i den estimerte kjøletiden. Siden simuleringen ble gjennomført med estimater for disse verdiene, kan man ikke forvente å finne riktig kjøletiden med denne metoden. Den faktiske kjøletiden må bestemmes eksperimentelt for det konkrete tilfellet som gjelder på slakteriet.

Selv om estimatene ikke kan brukes til å bestemme den korrekte kjøletiden, gir de forståelse for forholdene som påvirker kjøletiden i skalfryseren. Siden produkttykkelsen varierer, både for det enkelte produkt og mellom produktene, vil samme kjøletid gi forskjellig isfraksjon for hvert enkelt stykke. Koteletter fra den samme nakken vil ha forskjellig isfraksjon før utligning. Konsekvensene dette har for kvaliteten til det enkelte produkt, og temperaturreguleringen under lagring, bør studeres nøyere.

Temperaturmålingene på kjølelageret for ferdige produkter viste for stor variasjon til å være egnet for superkjølt lagring. For å opprettholde holdbarhet og kvalitet, bør superkjølte produkter lagres ved stabil temperatur. Lagringstemperaturen for superkjølte produkter vil heller ikke passe med lagringstemperaturen for konvensjonelt kjølte produkter. Man bør derfor bygge et mindre lager for superkjølte produkter inne i det store kjølelageret. Det superkjølte lageret bør ha et eget kuldeanlegg, slik at det temperatur og ytelse kan reguleres uavhengig av det omgivende kjølelageret. Dersom man velger å installere en skalfryser, kan kuldeanlegget som i dag leverer kjøling til før hugging benyttes.

Størrelsen på det superkjølte lageret avhenger av mengden produkter tiltenkt superkjølt lagring. Siden de ulike produktene har forskjellig sammensetning, vil de også ha forskjellig isfraksjon ved den samme lagringstemperaturen. Temperaturen på det superkjølte lageret må derfor velges slik at holdbarheten og kvaliteten til alle produktene sikres. På bakgrunn av estimert isfraksjon ved ulike temperaturer anbefales en lagertemperatur på mellom $-1,15$ °C og $-1,10$ °C, avhengig av hvilke produkter man ønsker å lagre.

Abstract

The purpose of this study has been to investigate the opportunities for establishing a superchilled production line for pork in a slaughterhouse. To be able to consider the opportunity to utilize existing refrigeration systems, measurements was done in the existing slaughter line. Product temperatures were measured in the whole cold chain, from slaughter to distribution, together with temperature and humidity in the production facilities. The energy used in some of the refrigeration systems was also measured. For the superchilling process investments in an impingement freezer were considered. To do this the cooling times for cuts of Boston butt was estimated by FVM (finite volume method).

The temperature measurements indicated that an existing refrigeration room could be used only in a small scale superchilled production line. The room today is used to partially freeze cuts of Boston butt and loin before chopping. To be able to cool to superchilling temperatures the products must be stored in this room over night, thus the capacity is limited to the amount of meat the room can hold. As room is fully loaded with the daily production of pork chops, the super chilled line would be limited to pork chops.

A long chilling time also indicates that larger weight loss should be expected. For larger quantities of products and shorter cooling time, an impingement freezer should be considered. With an impingement freezer the enthalpy of the products can be brought down to superchilled levels in minutes, and the further processing can take place the same day as cutting.

When product dimensions, inlet temperature, heat transfer coefficient or air temperature was varied, a considerable change in estimated chilling time was

found. As all these parameters are estimated in the simulations, the appropriate chilling time can not be determined from these results. The actual cooling time should be measured experimentally, for the actual conditions in the impingement freezer.

Even though the estimates are unable to decide the correct chilling time, they are important to the behavior of the chilling system. As the thickness of the product varies, both in a given product and in between products, the ice fraction with the same chilling time will vary. Pork chops from the same cut will have a considerable difference in ice fraction before equalization. The consequences of varying ice fraction should be investigated, with view to both quality of the individual products and temperature regulation of the superchilled storage.

For superchilled storage the temperature variations measured in the cold storage for the packed products was found to be too large. To maintain shelf life and quality of superchilled products the storage temperature must be kept stable. Also the storage temperature for superchilled products must not agree with the storage conditions for conventionally chilled products. The proposed solution is to create a smaller storage for superchilled products inside, and independent of, the larger surrounding storage room.

The size of the superchilled storage must be decided from the amount of products intended for superchilling. If an impingement freezer is installed, the refrigeration system now used for partially freezing before chopping, can be used to chill the superchilled storage. Due to the different nutrient composition, the estimated ice fraction for different cuts of pork is different for the same storage temperature. Thus a common storage temperature must be compromised, to ensure satisfactory shelf life and quality of all the products. Based on the estimations a storage temperature between $-1,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-1,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ is suggested, depending on the products chosen.

Innhold

Oppgavetekst	i
Forord	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
Figurer	xv
Tabeller	xix
1 Innledning	1
2 Teori	3
2.1 Matsikkerhet	3
2.2 Bakterier	5
2.2.1 Campylobacter	5
2.2.2 Salmonella	8
2.2.3 Yersinia enterocolitica	9
2.2.4 Escheria coli	10
2.2.5 Listeriosis monocytogenes	12
2.3 Lovverk	13
2.4 Kjølemetoder	15

2.4.1	Konvensjonell kjøling	16
2.4.2	Ultrarapid kjøling	17
2.4.3	Alternative kjølemetoder	17
2.4.4	Vekttap	18
2.5	Kvalitet	20
2.5.1	Post mortem	20
2.6	Nedskjæring	22
2.7	Superkjøling	23
2.7.1	Is	24
2.7.2	Holdbarhet	25
2.7.3	Fordunsting	25
2.7.4	Drypptap	26
2.7.5	Nedkjøling	27
2.7.6	Lagring	29
2.7.7	Økonomi	30
2.8	Kjølekjede	31
2.8.1	Transport	31
2.8.2	Kommersiell kjøling	35
2.8.3	Hjemmekjølere	36
2.9	Energibruk	37
2.9.1	Prosessintegrasjon	37
2.10	Klima og miljø	38
2.10.1	Historikk	38
2.10.2	Ozonedbryting	39
2.10.3	Global oppvarming	40
2.10.4	Miljøpåvirkning i kjølekjeden	45
2.10.5	Valg av kjølemedium	45
3	Materialer og metode	47
3.1	Måleinstrumenter	47
3.1.1	Temperatur og relativ luftfuktighet	47
3.1.2	Elektrisk effekt	48

3.2	Målinger på slakteri	48
3.2.1	Produkter	49
3.2.2	Slaktelinje	50
3.2.3	Kuldeanlegg	51
3.3	Produktlast	53
3.3.1	Initialt frysepunkt	53
3.3.2	Isfraksjon	54
3.3.3	Massetetthet	55
3.3.4	Spesifikk varmekapasitet	55
3.3.5	Spesifikk entalpi	56
3.4	Kjølelast	57
3.4.1	Transmisjon	57
3.4.2	Infiltrasjon	58
3.4.3	Internlast	60
3.5	Numeriske beregninger	60
3.5.1	Betingelser	64
3.5.2	Temperatur og spesifikk entalpi	65
3.5.3	Nedkjøling	67
3.5.4	Utligning	67
4	Resultater	69
4.1	Slakteriliner	69
4.1.1	Slakterilinj Fatland Jæren	70
4.1.2	Transport av slakt	77
4.1.3	Slakterilinj Fatland Ølen	79
4.1.4	Vekttap	91
4.2	Superkjøling	91
4.2.1	Isfraksjon	91
4.2.2	Kjøletid	93
4.3	Etablering av superkjølingslinje	101
4.3.1	Nedkjøling	101
4.3.2	Skallfryser	101

4.3.3	Kjølelager	104
5	Diskusjon	107
5.1	Slakterilinjje	107
5.2	Skallfryser	107
5.3	Superkjølt produksjonslinje	108
5.3.1	Superkjølt distribusjon	108
5.4	Feilkilder	108
5.4.1	Målinger på slakteri	108
5.4.2	Estimering av kjøletid	109
5.5	Videre arbeid	109
5.5.1	Vekttap	109
5.5.2	Superkjølingslinje	110
6	Konklusjon	113
6.1	Slakterilinjje	113
6.2	Etablering av superkjølingslinje	113
6.3	Superkjølt lager	114
6.4	Nedkjølingstid	114
	Referanseliste	I
A	Draft paper	XI
B	Produktflyt slakterilinjjer	XXV
C	Planskisser	XXIX
C.1	Fatland Jæren	XXIX
C.1.1	Sjokk-kjøler	XXIX
C.2	Fatland Ølen	XXXI
C.2.1	Spesialfryser	XXXI
D	Grafer	XXXIII
D.1	Målinger i slaktelinje	XXXIII

D.1.1	Slaktelinje Fatland Jæren	XXXIII
D.1.2	Slaktelinje Fatland Ølen	XXXIX
E	Programmeringskode	XLVII
E.1	Fortran	XLIX
E.2	Matlab	LXXV
E.3	Excel VBA	LXXIX

Figurer

2.1	Stykningsdeler fra gris	23
3.1	Tverrsnitt av kjøttstykke	61
3.2	Bilde av nakkekotelett	61
3.3	Rutenett for beregning av kjøletid i skallfryser	63
3.4	Celle i rutenett	64
4.1	Temperatur i sjokk-kjøler Jæren	71
4.2	Temperatur i griseslakt i sjokk-kjøler Fatland Jæren	72
4.3	Relativ luftfuktighet i sjokk-kjøler Jæren	73
4.4	Temperatur i utligningsrom Fatland Jæren	74
4.5	Relativ luftfuktighet i utligningsrom Fatland Jæren	75
4.6	Temperatur i griseslakt på utligningslager Fatland Jæren	76
4.7	Lufttemperatur under transport av griseslakt	78
4.8	Relativ luftfuktighet under transport av griseslakt	78
4.9	Temperatur i griseslakt under transport	79
4.10	Temperatur i kjølerom for gris Fatland Ølen	80
4.11	Relativ luftfuktighet i kjølerom for gris Fatland Ølen	81
4.12	Temperatur i griseslakt under nedkjøling Fatland Ølen	82
4.13	Temperatur i to kjølerom for gris Fatland Ølen	83
4.14	Temperatur i hengehall Fatland Ølen	84
4.15	Relativ luftfuktighet i hengehall Fatland Ølen	85
4.16	Temperatur i rom for grovstykkning Fatland Ølen	86

4.17	Temperatur i spesialfryser Fatland Ølen	86
4.18	Relativ luftfuktighet i spesialfryser Fatland Ølen	87
4.19	Temperatur i svinenakke spesialfryser Fatland Ølen	88
4.20	Gjennomsnittstemperatur per døgn på kjølelager Fatland Ølen	89
4.21	Temperatur kjølelager gjennom ett døgn Fatland Ølen	90
4.22	Isfraksjon i ulike stykningsdeler ved varierende temperatur	92
4.23	Estimert temperaturgradient i kjøttstykke	95
4.24	Estimert fordeling av is i kjøttstykke	95
4.25	Estimert isfraksjon i nakkestykker med ulik dimensjon	96
4.26	Estimert isfraksjon umiddelbart etter kjøling	99
B.1	Produktflyt Fatland Jæren	XXVI
B.2	Produktflyt Fatland Ølen	XXVII
C.1	Planskisse for sjokk-kjøler Fatland Jæren	XXX
C.2	Planskisse for spesialfryser Fatland Ølen	XXXI
D.1	Temperatur slaktehall Fatland Jæren	XXXIV
D.2	Relativ luftfuktighet slaktehall Fatland Jæren	XXXIV
D.3	Absolutt luftfuktighet i sjokk-kjøler Jæren	XXXV
D.4	Temperatur utligningsrom 1 Fatland Jæren	XXXVI
D.5	Relativ luftfuktighet utligningsrom 1 Fatland Jæren	XXXVI
D.6	Temperatur utligningsrom 2 Fatland Jæren	XXXVII
D.7	Relativ luftfuktighet utligningsrom 2 Fatland Jæren	XXXVII
D.8	Temperatur hengehall Fatland Jæren	XXXVIII
D.9	Relativ luftfuktighet hengehall Fatland Jæren	XXXVIII
D.10	Temperatur slaktehall Fatland Ølen	XXXIX
D.11	Relativ luftfuktighet slaktehall Fatland Ølen	XXXIX
D.12	Temperatur kjølelager grovstykket Fatland Ølen	XL
D.13	Relativ luftfuktighet kjølelager grovstykket Fatland Ølen	XL
D.14	Temperatur kjølegang Fatland Ølen	XLI
D.15	Relativ luftfuktighet kjølegang Fatland Ølen	XLI
D.16	Temperatur skjærehall Fatland Ølen	XLII

D.17 Relativ luftfuktighet skjærehall Fatland Ølen	XLII
D.18 Temperatur kjølemagasin Fatland Ølen	XLIII
D.19 Relativ luftfuktighet kjølemagasin Fatland Ølen	XLIII
D.20 Temperatur pakking Fatland Ølen	XLIV
D.21 Relativ luftfuktighet pakking Fatland Ølen	XLIV
D.22 Temperatur spesialfryser 1 Fatland Ølen	XLV
D.23 Relativ luftfuktighet spesialfryser 1 Fatland Ølen	XLV

Tabeller

2.1	Næringsmiddelbårne infeksjoner i Norge og Europa	5
2.2	Produktlast ved ulik temperatur	30
2.3	ODP- og GWP-verdier for utvalgte kjølemedier	39
2.4	Drivhusgassutslipp for elektrisitetsproduksjon	43
2.5	TEWI for ulike anleggskofigurasjoner	44
3.1	Måleinstrumenter effekt	49
3.2	Justering av utetemperatur	58
4.1	Slaktetall Jæren	70
4.2	Slaktetall Ølen	79
4.3	Isfraksjon i ulike stykningsdeler ved utvalgte utligningstemperaturer	94
4.4	Estimert kjøletid ved ulik innløpstemperatur	97
4.5	Estimert kjøletid ved ulikt varmeovergangstall	98
4.6	Estimert kjøletid ved ulik lufttemperatur	98
4.7	Lengde ADVANTEC® Impingement Freezer	102
4.8	Bredde ADVANTEC® Impingement Freezer	103
4.9	Beltefastighet ADVANTEC® Impingement Freezer	103
4.10	Kapasitet skalfrysing svinenakke	104

Kapittel 1

Innledning

Superkjøling er et alternativ til konvensjonell kjøling eller frysing av næringsmidler. Ved superkjøling lagres kjøtt ved en temperatur under det initiale frysepunktet, og en del av vannet i produktet er fryst. Konvensjonell kjøling av ved kjøtt ved 4 °C gir høy kvalitet, men begrenset holdbarhet. Fryst kjøtt har lang holdbarhet, men redusert kvalitet i forhold til kjølt kjøtt. Superkjøling er et kompromiss mellom holdbarhet og kvalitet, midt mellom kjøling og frysing.

Arbeidet har blitt gjennomført i samarbeid med SINTEF Energi AS. Bakgrunnen for oppgaven er EU-prosjektet FRISBEE som startet opp høsten 2010. SINTEF Energi deltar i dette prosjektet, som har som mål å redusere energibruken og miljøpåvirkningen i kjølekjedene for næringsmiddelindustrien i Europa, samtidig som sikkerheten forbedres. Et av tiltakene som kan bidra til dette er superkjøling.

I FRISBEE jobber man med kjølekjedene for alle de store matgruppene. Blant kjøttvarer har man valgt å fokusere på svinekjøtt. I den forbindelse er slakterikonsernet Fatland AS med som industriell partner i FRISBEE. Fatland har slakterier både i Oslo, på Jæren og på Ølen, i tillegg til en avdeling for videreforedling i Sandefjord.

Fokuset i denne oppgaven har vært slaktlinjene for gris på Fatland Jæren og Fatland Ølen. Målinger av produkttemperatur, romtemperatur og -fuktighet har

blitt gjort i hele kjeden fra slakting til distribusjon, for å kartlegge slakterilinjene. I tillegg har det blitt gjennomført målinger av temperaturer og energibruk i kuldeanlegg på de to slakteriene. Rapporten beskriver hvordan målingene ble gjennomført, og resultatene av målingene.

Målingene på slakteri kunne ikke gjennomføres før i begynnelsen av mai 2011. Derfor har det blitt mindre tid til analyse av resultatene enn ønskelig. På grunn av begrenset tid ble også måleperioden kort, ca. ett døgn på hvert slakteri. Målinger over en lengre periode hadde gitt et mer representativt datagrunnlag og bedre muligheter for å diskutere resultatene.

Noen av målingene kunne ikke gjennomføres som planlagt, på grunn av problemer med måleinstrumenter og begrenset tilgang til kjøleutstyr under produksjon. Det har også vært vanskelig og tidkrevende å innhente informasjon om slakterilinjene. Siden målingene ble utsatt, ble det lagt ned mer arbeid i beregningsmodeller for kjølelast og kjøletid i slakteriet, spesielt med tanke på superkjøling. På grunn av tiden tilgjengelig, og kvaliteten på målingene har målingene av energibruk ikke blitt prioritert i rapporten.

Noen av metodene beskrevet har ikke kunnet gjennomføres på grunn av for lite data, eller at dataene har blitt tilgjengelige for sent. Av denne grunn har det heller ikke vært tid til å vurdere resultatene opp imot de teoretiske betraktningene og informasjon funnet i litteraturstudiet.

Målet med datainnsamling, målinger og beregninger har vært å kartlegge mulighetene for å etablere en superkjølt produksjonslinje for svinekjøtt på Fatland Ølen.

Kapittel 2

Teori

Kjøling er en viktig konserveringsmetode for mat, for å bevare både kvalitet og matsikkerhet. Frukt og grønnsaker, meieriprodukter, kjøtt, fisk og sjømat utgjør nesten en tredjedel av all landbruks- og fiskeriproduksjon og trenger kjøling. Selv om halvparten av verdens kjøling går til mat, blir mindre enn 10 % av disse bederfelige matvarene kjølt. Det er en av grunnene til at ca. 30 % av all produsert mat blir ødelagt etter innhøsting. Mye av dette kan reduseres ved bruk av god kjøling (Coulomb, 2008), og kjøling er en teknologi av stor betydning med tanke på å kunne dekke matbehovet for en økende verdensbefolkning (McMullan, 2002). Kjøling er energikrevende og effektive kjølesystemer er viktig for redusert energibruk og miljøbelastning. Mange kjølemedier gir ozonnedbryting og økt drivhuseffekt.

2.1 Matsikkerhet

Smittsomme sykdommer som spres gjennom mat og vann er blant de viktigste årsakene til sykdom og død i verden. Selv om utviklingen av næringsmiddelhygiene på begynnelsen av 1900-tallet medførte store framskritt i kampen mot mat- og vannbårne infeksjonssykdommer, ble de mot slutten av 1970-tallet igjen aktualisert som et økende helseproblem i den industrialiserte delen av verden. Det har også blitt observert en økning i antallet næringsmiddelbårne intoksikasjoner,

men dette er mindre dokumentert (Granum, 1996).

De nye problemene med næringsmiddelbårne sykdommer er blant annet knyttet til oppblussing av infeksjonssykdommer som tidligere har vært under kontroll. Dette gjelder spesielt salmonellose. Et annet problem er framvekst av patogene (sykdomsfremkallende) organismer med nye kombinasjoner av virulensegenskaper, som for eksempel varianter av *E. coli*. Endrede metoder for oppbevaring og produksjon av matvarer har også ført til at nye bakteriestammer, med økt evne til å overleve og vokse i disse nye omgivelsene, har utviklet seg (Granum, 1996).

Selv om bedre rapportering og diagnostisering har bidratt til at flere sykdomstilfeller blir registrert, skyldes problemene med økt forekomst av matbårne sykdommer i hovedsak en reell økning i antallet sykdomsfremkallende mikroorganismer tilstede i næringsmidler, husdyr og dyrefôr. Forekomsten av bakterier har økt fordi mulighetene for overlevelse, vekst og spredning er bedre (Granum, 1996).

En av årsakene til at bakteriene har fått bedre levevilkår er økningen i internasjonal handel med både næringsmidler, husdyr og dyrefôr. Industrialisering, sentralisering og effektivisering av husdyrhold, slakting og næringsmiddelproduksjon er også med på å legge forholdene til rette for bakteriespredning (Granum, 1996).

Problemet har også blitt forsterket av endringer hos forbrukerne. Økt reisevirksomhet bidrar til spredning, mens kravet om ferske matvarer, med lite tilsetningsstoffer og konserveringsmidler kan bidra til å forbedre vekst- og overlevelsesvilkårene for uønskede bakterier. Mangel på kunnskap om landbruk, matproduksjon og hygiene kan også være en del av problemet (Granum, 1996).

Næringsmiddelbårne sykdommer skyldes inntak av mat- og/eller drikkevarer som inneholder patogene mikroorganismer, flercellede parasitter, toksiner eller kjemiske forbindelser som kan forårsake allergi- eller intoleransreaksjoner (Granum, 1996). For konsumering av kjøtt er det patogene bakterier som de mest aktuelle kildene til matbårne sykdommer. Bakterier kan både være kilde til intoksikasjoner og infeksjoner, og det finnes flere titalls arter som kan forårsake sykdom hos mennesker (Granum, 1996).

2.2 Bakterier

Patogene bakterier fra mat har hvert år skyld i sykdom og død for mange mennesker (Borch og Arinder, 2002). De fleste patogene bakterier som utgjør en trussel for mennesker har vært tilstede i flere tiår, men noen har også dukket opp de siste tiårene. Både mennesker og dyr er kilder til patogene bakterier. Levende dyr er bærere, mens prosesseringsfasilitetene fungerer som havn for patogene bakterier. Patogene bakterier fra mennesker skyldes som regel krysskontaminasjon. God matsikkerhet kan sikres ved å begrense kontaminasjon og ved inaktivering av tilstedeværende patogene bakterier (Borch og Arinder, 2002).

Den interne muskulaturen hos friske dyr er i all hovedsak steril etter slaktning. Men på kroppens overflate og i fordøyelseskanalen vil det alltid finnes et stort antall mikroorganismer. Noen av disse kan utgjøre en trussel for sikkerheten og kvaliteten til kjøttet dersom det kontamineres (James og James, 2002). Det kan finnes et lite antall mikroorganismer i innvoller og assosierte lymfekjertler. Disse er ofte patogene arter som Salmonella og clostridia-sporer (James og James, 2002). Tabell 2.1 viser antallet tilfeller av utvalgte matbårne infeksjoner for Norge (Nygård et al., 2010; ECDC, 2010) og Europa (ECDC, 2010) i 2008 og 2009.

Diagnose	Norge (2009)	Norge (2008)	Europa (2008)
Campylobacteriose	59,4	61,0	44,1
Salmonellose	25,7	41,0	29,8
Yersiniose	1,3	1,1	2,7
EHEC (E. coli)	2,3	0,5	0,7
Listeriose	0,6	0,7	0,3

Tabell 2.1: Antall infeksjoner per 100 000 innbyggere for et utvalg næringsmiddelbårne infeksjoner i Norge og Europa

2.2.1 Campylobacter

Den hyppigste årsaken til zoonose (sykdom som er felles for dyr og mennesker) hos mennesker både i Norge og Europa er Campylobacter (Nygård et al., 2010;

ECDC, 2010; Nørrung og Buncic, 2008; Nesbakken et al., 2003). Hos mennesker er det de to artene *Campylobacter jejuni* og *Campylobacter coli* som er de vanligste årsakene til campylobacteriose (Nørrung og Buncic, 2008). Forekomsten av campylobacteriose er langt høyere i utviklingsland enn i industriland (Granum, 1996). Flertallet av de smittede i Norge blir smittet i utlandet. 47 % av tilfellene registrert i 2009 hadde sin opprinnelse i utlandet, mens 44 % oppgis å ha blitt smittet i Norge (9 % med ukjent smittested) (Nygård et al., 2010).

Egenskaper

C. jejuni og *C. coli* er termotolerante bakterier og vokser kun ved temperaturer mellom 30 °C og 43 °C. Utbrudd av campylobacteriose er derfor vanligst i land med varmt klima, og de fleste tilfellene registreres i de varmeste månedene. Bakteriene er følsomme overfor frysing og tørking, men overlever godt ved kjøletemperatur (bedre enn ved romtemperatur). Både *C. jejuni* og *C. coli* er strengt mikroaerofile bakterier, og er avhengige av en atmosfære med redusert oksygeninnhold (5–10 %) for å kunne vokse (Granum, 1996; Nygård et al., 2010; Josephsen og Schøyen, 1997; Borch et al., 1996).

Sykdom

Symptomene ved campylobacteriose varierer fra kortvarig gastroenteritt (mage- og tarmbetennelse) til mer alvorlig enterokolitt (katarr eller betennelse i tynn- og tykktarmen) med magesmerter og blodig diaré (Granum, 1996). De vanligste symptomene omfatter diaré, magesmerter, feber, hodepine og kvalme (Nørrung og Buncic, 2008). *C. coli* gir vanligvis mildere symptomer enn *C. jejuni* (Granum, 1996). Sykdommen er selvbegrensende og varer vanligvis i 1–2 uker, med det er ikke uvanlig med tilbakefallende diaré. Komplikasjoner er sjeldne, men campylobacteriose kan forårsake reaktiv artritt (leddbetennelse) og postinfeksiøs polynevropati som fører til alvorlige lammelser (Granum, 1996; Nørrung og Buncic, 2008). Sykdommen er sjelden dødelig. Inkubasjonstiden er 1–10 dager, omvendt proporsjonal med dosen (Granum, 1996). Spesielt for *Campylobacter* er at den infektive dosen er svært lav og 1000 bakterier kan være tilstrekkelig til å

forårsake sykdom (Granum, 1996).

Forekomst

Campylobacter-bakterier er vanlige i tarminnholdet hos mange pattedyr og fugler, både ville og domestiserte, og finnes i fordøyelseskanalen hos svin, storfe og sau (Granum, 1996; Borch og Arinder, 2002). Dyrene er vanligvis friske bærere (Granum, 1996). Hos storfe og sau er *C. jejuni* den vanligste, mens *C. coli* er vanlig hos gris (Granum, 1996; Nørrung og Buncic, 2008). Granum (1996) viser til en undersøkelse hvor *C. coli* ble funnet hos samtlige slaktegriser, samtidig som ingen av dem hadde *C. jejuni*. Siden *C. jejuni* er en vanligere årsak til campylobacteriose enn *C. coli*, blir ikke gris regnet blant de viktigste smitekildene (Granum, 1996).

Den vanligste årsaken til utbrudd av campylobacteriose er kontaminert drikkevann. En annen mulig smittekilde er konsum eller tilberedning av fjærfeprodukter (Nygård et al., 2010). Selv om *Campylobacter* forekommer hyppig i tarminnholdet hos svin, storfe og sau, har rødt kjøtt til nå ikke blitt ansett som en viktig kilde til kontaminasjon til mennesker (Borch og Arinder, 2002; Nygård et al., 2010). I en dansk studie på gris, ble *Campylobacter* funnet isolert fra avføring hos 96 % av grisene, hos 66 % av griseslaktene før kjøling og hos 14 % etter ett døgn med kjøling (Borch et al., 1996). En viktig grunn er at *Campylobacter* ikke vokser ved temperaturer under 30 °C (Borch et al., 1996). En annen er at ved lagring av slakteskrotter tørker overflaten og *Campylobacter* overlever dårlig (Granum, 1996; Borch et al., 1996).

Nesbakken et al. (2008) gjorde målinger på griseslakt før og etter sjokk-kjøler. *Campylobacter* ble isolert fra 56,7 % av slaktene før kjøling, men kun 1,7 % av slaktene etter. Både Nesbakken et al. (2008) og Borch et al. (1996) konkluderer med at svinekjøtt i butikken utgjør liten risiko for campylobacteriose hos forbrukerne. Borch et al. (1996) hevder samtidig at en endring i kjølepraksis for svinekjøtt vil kunne endre situasjonen. Nygård et al. (2010) viser til kasuskontroll-undersøkelser som viser at grillmåltider og ufullstendig varmebehandlet svinekjøtt kan utgjøre en mulig risikofaktor. Dette kan ha sammenheng med at den infektive dosen er så lav.

2.2.2 Salmonella

I EU er salmonellose den zoonosen med nest flest rapporterte utbrudd hos mennesker (Nørrung og Buncic, 2008). Som vist i tabell 2.1 ble det i Europa registrert 44,1 infeksjoner per 100 000 innbyggere i 2008, mens det i Norge ble registrert 61,0 infeksjoner per 100 000 innbyggere. Av de registrerte tilfellene i Norge har hele 70–80 % blitt smittet i utlandet (Nygård et al., 2010).

I likhet med de fleste andre industrialiserte land, opplevde Norge en kraftig økning i forekomsten av salmonellose på begynnelsen av 1980-tallet (Nygård et al., 2010). Grunnen var økende effektivisering og industrialisering av husdyrhold, slakting og næringsmiddelproduksjon, økende internasjonal handel, økende reisevirksomhet og nye metoder for tilberedning og oppbevaring av næringsmidler (Granum, 1996).

Egenskaper

Som en fakultativt anaerob bakterie kan *Salmonella* vokse både anaerobt og aerobt mellom 5 og 48 °C (optimalt temperatur er 37 °C). Bakteriene kan drepes ved oppvarming til 55 °C i 1 time eller 60 °C i 15–20 minutter. Varmeresistens avtar med økende vanninnhold, men øker med økende sukker- og fettinnhold (Granum, 1996).

Salmonella kan vokse i næringsmidler dersom vannaktiviteten er over 0,93. Veksten kan reduseres ved å tilsette 3–4 % NaCl. *Salmonella*-bakteriene er svært motstandsdyktige overfor ekstreme situasjoner. De kan overleve flere måneder (opptil år) i fryste næringsmidler og månedvis i tørkede produkter (Granum, 1996).

Sykdom

Salmonellose opptrer vanligvis som selvbegrensende, lokal tarminfeksjon. Vanligste symptomer diaré, feber, magesmerter, kvalme og nedsatt allmenntilstand. Symptomene er som regel milde (Granum, 1996; Humphrey og Jørgensen, 2006). Sykdommen varer vanligvis i 2–7 dager. Inkubasjonstid varierer fra et halvt døgn til en uke (Granum, 1996). I enkelte alvorlige tilfeller kan infeksjonen føre til

dehydrering og død (Humphrey og Jørgensen, 2006). En dansk undersøkelse antyder at 3 % dør innen ett år (Humphrey og Jørgensen, 2006). Det ble ikke meldt om dødsfall på grunn av salmonellose i Norge i 2009 (Nygård et al., 2010).

Forekomst

Salmonella kan forekomme i tarmen og tilstøtende organer hos de fleste ville og domestiserte dyr. Antallet friske bærere langt større enn antallet syke individer (Granum, 1996). Forekomsten av Salmonella i næringsmidler og husdyr er veldig lav i Norge, sammenlignet med de fleste andre land (Nygård et al., 2010).

Bakterien kan kontaminere i alle stadier i produksjonskjeden for næringsmidler. De viktigste smitekildene for mennesker er fjærfekjøtt, egg og svinekjøtt (Granum, 1996). Smitte i Norge skyldes i hovedsak importerte næringsmidler (både animalske og vegetabiliske), forurenset drikkevann og direkte eller indirekte kontakt med viltlevende småfugler og pinnsvin (Nygård et al., 2010).

2.2.3 *Yersinia enterocolitica*

Yersinia enterocolitica er den vanligste årsaken til infeksjonen yersiniose hos mennesker (ECDC, 2010), og i Norge den fjerde hyppigste årsaken til bakterielt betinget bakteriesykdom (Nygård et al., 2010). Det registreres likevel få utbrudd både i Norge og Europa (Nygård et al., 2010). Som vist i tabell 2.1 ble det i 2008 per 100 000 innbyggere registrert 2,7 tilfeller av yersiniose i Europa og 1,1 tilfeller i Norge. Mellom 20 og 40 % av tilfellene i Norge er smittet utenlands (Nygård et al., 2010).

Egenskaper

Yersinia enterocolitica er en kuldeadaptert bakterie og kan formere seg ned mot 0 °C. Veksten begrenses likevel, siden den konkurrerer dårlig med andre psykrofile bakterier som finnes i matvarer. Bakterien overlever godt ved fryselagring, men den overlever ikke pasteurisering eller vanlig koking eller steking (Granum, 1996).

Siden bakterien trives best ved lave temperaturer er den mest vanlig i land med kjølig klima. *Yersinia enterocolitica* forekommer sjelden i tropiske land.

Sykdom

Den vanligste kliniske manifestasjonen ved yersiniose er selvbegrensende gastroenteritt. Sykdommen rammer hovedsaklig barn. Hos unge barn domineres symptomene av diaré, mens hos eldre barn kan magesmerter og feber være dominerende symptomer (kvalme og oppkast forekommer) (Nørrung og Buncic, 2008; Granum, 1996). Sykdommen varer som regel i 1–2 uker, men kan i enkelte tilfeller vare i flere måneder. Inkubasjonstiden er 1–11 dager (Granum, 1996). Yersiniose kan også forårsake til dels langvarige og alvorlige følgetilstander, særlig reaktiv artritt (Granum, 1996; Nygård et al., 2010). Reaktiv artritt er vanligere ved yersiniose enn ved campylobacteriose eller salmonellose (Nygård et al., 2010).

Forekomst

Grisen er det eneste dyret som regelmessig er bærer av patogene varianter av bakterien og humanpatogene stammer er kun unntaksvis funnet hos andre dyr (Nygård et al., 2010; Granum, 1996). Friske griser er ofte bærere av varianter som kan være sykdomsfremkallende hos mennesker (Granum, 1996; Nesbakken et al., 2003). Bakterien koloniserer tarmen og munnhulen hos grisen. Den kan derfor forekomme i store mengder på tunge og tonsiller (mandler), og i innvoller og avføring (Nesbakken et al., 2003; Granum, 1996). I enkelte undersøkelser har *Y. enterocolitica* blitt påvist i munnhulen hos 83 % av griseslaktene, og overflatekontaminert på 63 % av skrottene (Granum, 1996).

Rått eller underkøkt svinekjøtt er den viktigste årsaken til yersiniose hos mennesker (Nygård et al., 2010; Nesbakken et al., 2003; Granum, 1996). En annen viktig smittekilde er kontaminert drikkevann (Nygård et al., 2010).

2.2.4 *Escheria coli*

På verdensbasis er *Escheria coli* den viktigste årsaken til bakteriell gastroenteritt hos mennesker (Granum, 1996). *E. coli* er en art dannet av en rekke stammer med ulike genotypiske og fenotypiske egenskaper. Det er kun noen av *Escheria coli* bakteriene som er patogene. VTEC er en undergruppe av *E. coli* som kan produsere verotoksiner. Noen av bakteriene innenfor denne gruppen, enterohemorr-

hagiske *E. coli* (EHEC), kan produsere sykdomsfremkallende toksiner (Nørrung og Buncic, 2008; Nygård et al., 2010). Av disse er det serovarianten O157:H7 (hamburgerbakterien) som hyppigst rapporteres som årsak til menneskelige infeksjoner (Nørrung og Buncic, 2008; Nygård et al., 2010; Granum, 1996). Denne bakterien dukket opp på 1980-tallet (Borch og Arinder, 2002).

Egenskaper

Escheria coli vokser ved temperaturer mellom 7 °C og 48 °C, pH mellom 4,4 og 9,0 og ved vannaktivitet over 0,95 (Granum, 1996). Bakterien er ikke spesielt varmeresistent og overlever ikke pasteurisering eller koking. Den kan drepes ved oppvarming til 72 °C i 15 sekunder (Granum, 1996; Josephsen og Schøyen, 1997).

Sykdom

I utviklingsland er *E. coli*-diaré årsak til sykdom og død hos barn og unge. Det er også en fare for nyresvikt som følgetilstand (Granum, 1996). Infeksjonen kan også føre til ekstraintestinale sykdommer som meningitt, sepsis, sårinfeksjon og urinveisinfeksjon (Granum, 1996). Inkubasjonstiden varierer fra 10 timer til 2–3 dager (Granum, 1996). Antallet registrerte tilfeller i Norge er vist i tabell 2.1.

Forekomst

E. coli er en normal del av tarmfloraen hos alle varmblodige dyr, også hos mennesker (Granum, 1996). Bakterien finnes normalt i tarmen hos dyr og mennesker, uten å fremkalle sykdom. Men den kan være patogen når den får anledning til å kolonisere utenfor sine naturlige habitater (Granum, 1996). Drøvtyggere anses å fungere som reservoar for *E. coli* O157 (Granum, 1996). Smitte til mennesker kan skje ved overføring fra person til person, ved inntak av mat, eller kontakt med gårdsmiljø eller andre kontaminerte miljø (Borch og Arinder, 2002). Under slaktning kan slakteskrotter bli forurenset med bakterier fra avføring. Faren for kontaminasjon av produkter til humant konsum gjelder først og fremst deig- og farseprodukter (Granum, 1996).

Utbrudd av *E. coli* er som regel knyttet til områder med varmt klima, dårlig hygiene, dårlig drikkevannskvalitet, usanitær behandling av kloakk, stor befolkningstetthet og dårlig helsetilstand hos befolkningen (Granum, 1996).

2.2.5 *Listeriosis monocytogenes*

Listeriose er en sjelden bakterieinfeksjon, men likevel aktuell siden den er spesielt alvorlig (Nygård et al., 2010; Granum, 1996; Nesbakken og Skjerve, 1996). Som vist i tabell 2.1 var antallet infeksjoner per 100 000 innbyggere i 2008 0,3 i Europa og 0,7 i Norge.

Egenskaper

Listeriosis monocytogenes kan vokse ved temperaturer ned mot 0 °C, og ved pH mellom 6 og 9. Ved 4 °C krever den vanligvis at vannaktiviteten ligger over 0,92. Bakterien er fakultativt anaerob og mikroaerofil, derfor vokser den godt i vakuumpakninger og modifisert atmosfære. Frysing påvirker ikke bakterien vesentlig, men den overlever ikke pasteurisering eller varmebehandling. To minutter ved 70 °C er nok til å inaktivere bakterien i kjøttprodukter (Granum, 1996).

Sykdom

Listeriose rammer vanligvis risikogruppene gravide og deres fostre, nyfødte, eldre og personer med nedsatt immunforsvar (Granum, 1996; Nesbakken og Skjerve, 1996). Symptomene ved listeriose kan variere fra influensalignende symptomer og diaré, til livstruende septikemi (blodforgiftning) og meningitt (hjernehinnebetennelse) (Granum, 1996; Nesbakken og Skjerve, 1996). Ved ukomplisert meningitt varer sykdommen typisk et par uker, men for svekkede personer tar det gjerne mange uker før full restitusjon (Granum, 1996). For risikogrupper er dødeligheten ved listeriose omtrent 30 %. For de utenfor risikogruppen er dødeligheten 16 % (Nesbakken og Skjerve, 1996). Inkubasjonstiden er vanligvis 1–70 døgn (Granum, 1996). Den infektive dosen er svært høy (Nygård et al., 2010), men antas å være lavere for risikogruppene enn for personer uten underliggende risikotilstander (Granum, 1996).

Forekomst

Listeria monocytogenes er en svært vanlig bakterie og forekommer hos mange dyrearter. Den kan også finnes blant annet i jord, planterester, dyrefôr, vann og avløpsvann (Nygård et al., 2010). Siden smittedosen er høy kreves det en oppfreming av bakterien i næringsmiddelet, noe som er aktuelt ved kjøletemperatur (Nygård et al., 2010). På grunn av pH-verdien kan bakterien vokse godt i enkelte kjøtt- og fiskeproduktet (Granum, 1996).

2.3 Lovverk

Forskrift om særlige hygieneregler for næringsmidler av animalsk opprinnelse (animaliehygieneforskriften) (FOR-2008-12-22-1624) setter krav til slakteri og kuldekjede, for å sikre matvaretryggheten. Animaliehygieneforskriften er hjemlet i LOV 2003-12-19 nr.124: Lov om matproduksjon og mattrygghet mv. (matloven) og LOV 2009-06-19 nr.97: Lov om dyrevelferd. Vedlegg III i animaliehygieneforskriften angir særlige krav for kjøtt fra tamme hov- og kloddyr.

Etter at slaktet er undersøkt post mortem, skal kjøttet omgående kjøles ned, dersom ikke andre særlige bestemmelser angir noe annet. Under nedkjølingen skal det være tilstrekkelig ventilasjon til å unngå kondens på kjøttets overflate. Kjølningen skal skje med en kontinuerlig senking av temperaturen, inntil temperaturen gjennom hele kjøttet er høyst 3 °C for slaktebiprodukter og 7 °C for annet kjøtt. (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg III, avsnitt I, kapittel VIII, punkt 1)). Med kjøtt menes alle spiselige deler på dyret, herunder blod, og skrotten er kroppen til et dyr etter slakting og slaktebehandling. Slaktebiprodukter er kjøtt som ikke tilhører skrotten, blant annet indre organer og blod (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg I)).

Temperaturkravet skal oppnås føre eventuell transport og overholdes under transporten. Dersom vedkommende myndighet tillater det, kan transport foregå før kravet er innfridd. Da må transporten skje i samsvar med kravene fra vedkommende myndighet, omgående etter slakting eller skjæring, og transporttiden kan ikke være lenger enn to timer (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg III, avsnitt I,

kapittel VIII, punkt 3)). Temperaturen i slaktebiprodukter og annet kjøtt skal holdes under kravet på henholdsvis 3 °C og 7 °C også under lagring (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg III, avsnitt I, kapittel VIII, punkt 2)).

Under nedskjæring og videre foredling skal temperaturen i kjøttet holdes på høyst 3 °C for slaktebiprodukter (indre organer og blod) og 7 °C for annet kjøtt. Temperaturkravet skal opprettholdes med en omgivelsestemperatur på høyst 12 °C eller med et alternativt system med tilsvarende virkning (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg III, avsnitt I, kapittel V, punkt 2)).

Dersom nedskjæringen skjer på samme sted som slakteriet kan kjøttet utbeines og nedskjæres før temperaturen er under dette kravet. Kjøttet må da overføres direkte til fra slakteriet til nedskjæringsrommet, eller plasseres i et kjøle- eller fryserom til det skal brukes. Så snart kjøttet er skåret, og eventuelt emballering, må det kjøles ned til temperaturkravet (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg III, avsnitt I, kapittel V, punkt 4)).

Uemballert kjøtt må lagres og transporteres atskilt fra emballert kjøtt, med mindre det lagres eller transporteres på forskjellige tidspunkter eller på en slik måte at emballasjematerialet og lagrings- eller transportmåten ikke utgjør en forurensningskilde for kjøttet. Kjøtt beregnet på frysing skal fryses så raskt som mulig, men kan ved behov stabiliseres i en tid før frysing (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg III, avsnitt I, kapittel VII, punkt 4-5)).

Forskrift om dypfryste næringsmidler (FOR-2008-12-19-1618) fastsetter betingelser for bruk av betegnelsen «dypfryste næringsmidler». Et «dypfryst næringsmiddel» er et næringsmiddel som har gjennomgått en nedfrysingsprosess der temperaturområdet for optimal krystallisering for det aktuelle produktet er nådd så raskt som mulig, og temperaturen i hele produktet er -18 °C eller lavere (FOR-2008-12-19-1618 (Kapittel I, § 3)).

Dypfrysing skal foregå så snart som mulig etter at nødvendige produksjonstrinn er gjennomført. Dersom det samme utstyret brukes til lagring av dypfryste næringsmidler, skal utstyret ha kapasitet til å dypfryse uten at allerede dypfryste produkter påvirkes i vesentlig grad. Luft, nitrogen og karbondioksid er de eneste frysemediene som kan komme i direkte kontakt med produktet (FOR-2008-12-19-1618 (Kapittel II, § 4)).

Dyppfryste varer skal merkes, lagres og omsettes som dyppfryste varer, og frysekjeden skal være opprettholdt gjennom samtlige omsetningsledd. Ved lokal transport og omsetning til sluttforbruker tillates et temperaturavvik på inntil 3 °C (FOR-2008-12-19-1618 (Kapittel II, § 4–5)).

I vedlegg III, avsnitt V i animaliehygieneforskriften (FOR-2008-12-22-1624) finnes krav til kvernet, tilberedt og mekanisk utbeinet kjøtt. Kvernet kjøtt er fragmentert utbeinet kjøtt som inneholder mindre enn 1 % salt. Mekanisk utbeinet kjøtt er et produkt framstilt ved mekanisk fjerning av kjøtt fra kjøttbein, slik at muskelfibrene mister eller endrer struktur. Tilberedt kjøtt er ferskt kjøtt tilsatt næringsmidler, smaksingredienser eller tilsetningsstoffer, eller ferskt kjøtt som har gjennomgått en foredling som ikke er tilstrekkelig til å endre den indre muskelstrukturen og fjerne egenskapene som kjennetegner ferskt kjøtt. Ferskt kjøtt er kjøtt som ikke er behandlet på noen annen måte enn ved kjøling, frysing eller hurtigfrysing for å sikre holdbarhet. Vakuumpakket kjøtt og kjøtt pakket i kontrollert atmosfære regnes som ferskt kjøtt (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg I)).

Kjøttet som brukes til produksjon av kvernet, bearbeidet eller mekanisk utbeinet kjøtt skal være høyst 4 °C for fjørfe, 3 °C for slaktebiprodukter og 7 °C for annet kjøtt. Kjøttet skal pakkes inn eller emballeres straks etter produksjon. Kjernetemperaturen i kvernet kjøtt skal straks kjøles til høyst 2 °C, mens tilberedt kjøtt skal kjøles til høyst 4 °C. Dersom produktet skal fryses skal kjernetemperaturen straks etter produksjon senkes til høyst -18 °C. Mekanisk utbeinet kjøtt skal kjøles til under 2 °C eller fryses til under -18 °C dersom det ikke brukes umiddelbart etter at det er produsert. Temperaturkravene skal overholde temperaturen under lagring og transport. Kvernet kjøtt, tilberedt kjøtt og mekanisk utbeinet kjøtt skal ikke fryses på nytt etter tining (FOR-2008-12-22-1624 (Vedlegg III, avsnitt V, kapittel III, punkt 1–5)).

2.4 Kjølemetoder

For å kunne innfri kravene beskrevet i kapittel 2.3, trenger slakteriet gode systemer for kjøling og frysing. I tillegg til å ivareta lovverk og matsikkeret, er det ønskelig at kjølingen gir begrenset tap av vekt og kvalitet. Kjølingen av griseslakt

gjennomføres på ulike måter, med variasjon i både temperatur, lufthastighet og tid.

2.4.1 Konvensjonell kjøling

Konvensjonelle kjøleanlegg for svin praktiserer ofte kjøling over natten. Etter slakting plasseres den halve griseskrotten på et kjølerom, som senker temperaturen, slik at slaktet er klart til skjæring eller transport neste morgen. I praksis betyr det ofte en temperaturreduksjon til 4 °C innen 14–16 timer (Brown og James, 1992). Sammenlignet med andre kjølesystemer skjer konvensjonell kjøling ved relativt høy temperatur og lav lufthastighet.

Brown og James (1992) gjennomførte en undersøkelse av fem griseslakterier i Storbritannia der alle hadde et konvensjonelt kjølesystem. Undersøkelsene viste at det var store forskjeller i prestasjonen til kjøleanleggene i de ulike slakteriene, og at det konvensjonelle kjøleanlegget i enkelte tilfeller ikke hadde tilstrekkelig kjøling. I et av disse anleggene ble det registrert en maksimal temperatur på 19 °C i kjølerommet. Denne temperaturen ble målt under påfylling av nyslaktede griser, da produktlasten er størst. Også mot slutten av kjøleprosessen var temperaturen i rommet relativt høy, mellom 1 og 6 °C. Majoriteten av griseslaktene hadde nådd en temperatur innenfor 1 °C av lufttemperaturen i rommet, men hos slakt plassert i deler av rommet med lav lufthastighet ble det registrert temperaturer opptil 10 °C midt inne i låret (Brown og James, 1992).

Dersom lufta i rommet ikke er veldig fuktig, vil langsom temperaturreduksjon kunne gi store fordunstingstap. I undersøkelsene til Brown og James (1992) var vekttapet på grunn av fordunsting under kjøleperioden betydelig, i gjennomsnitt 2,27 %. Kostnadene knyttet til vekttap var 15 ganger større enn kostnadene knyttet til drift av kjøleanlegget, og derfor av stor økonomisk betydning (Brown og James, 1992). En annen ulempe med konvensjonell kjøling, er at kjølerommet må ha plass til en hel dags slaktemengde (Brown og James, 1992).

2.4.2 Ultrarapid kjøling

En alternativ kjølemetode for gris, som gir raskere nedkjøling, er ultrarapid kjøling eller sjokk-kjøling. Slaktet sendes da gjennom en forkjøler med lav temperatur og høy lufthastighet, slik at overflatetemperaturen senkes raskt. Med lavere overflatetemperatur blir også fordunstingstapene mindre (Brown og James, 1992). Deretter plasseres slaktene på et kjølt lager, slik at temperaturen i slaktet jevnes ut til ønsket temperatur.

Forsøk av Van Moeseke et al. (2001) viste storfekjøtt utsatt for ultrarapid kjøling var mer utsatt for muskelforkorting enn storfekjøtt kjølt konvensjonelt. van der Wal et al. (1995) viste at vekttapet blir mindre med rapid kjøling enn konvensjonell kjøling av gris.

2.4.3 Alternative kjølemetoder

Immersjonskjøling

Neddukking i kaldt vann eller isvann er en vanlig kjølemetode for fjærkre som skal fryses. Nedkjølingen går da veldig raskt og fuglene kan øke vekten under prosessen. Hele slakt eller sider av gris er for store for denne kjølemetoden, men vakuumpakkede stykningsdeler kan kjøles ved immersjon i isvann eller lake (Brown og James, 1992).

Kryogenisk kjøling

Jones et al. (1991) fant at kryogenisk kjøling ga en signifikant reduksjon i fordunstingstap, sammenlignet med konvensjonell kjøling. Under forsøkene ble halve skrotter av svin forkjølt i 1–3 minutter i flytende nitrogen, før de ble plassert på et kjølelager med lufttemperatur 1 °C og lufthastighet 0,5 m/s. Den konvensjonelle kjølingen ble gjennomført på kjølelager med lufttemperatur 1 °C og lufthastighet 0,5 m/s og varte i 24 timer.

Reduksjonen i pH var signifikant raskere for konvensjonell kjøling enn kryogenisk kjøling. Drypptapet ble ikke påvirket av de to kjølemetodene (Jones et al., 1991). Heller ikke Jones et al. (1991) fant noen signifikant forskjell i bakterievekst

med ulike kjølemetoder.

Dusjkjøling

Jones et al. (1993) fant at dusjkjøling kunne gi redusert vekttap under kjøling av svineslakt. 1 minutt dusjkjøling hvert 15. minutt de 10 første timene med kjøling, ga 0,5–0,7 % vekttap i løpet av 24 timer. Slaktene ble kjølt ved 1 °C. Dusjkjøling kombinert med rask kjøling ga en gjennomsnittlig vektøkning på 0,4 % 24 timer etter slakting. Metoden gikk ut på å kjøle slaktene ved -20 °C i 1, 2 eller 3 timer, etterfulgt av 9, 8 eller 7 timer med dusjkjøling, på samme måte som i det andre forsøket. Etter dusjkjølingen ble slaktet holdt på kjølelager ved 1 °C.

2.4.4 Vekttap

Bustabad (1999) gjennomførte flere forsøk med frysing og lagring av halve svine-skrotter med vekt 30–35 kg, med og uten emballasje. I et av forsøkene ble de halve skrottene fryst i en frysetunnel med lufttemperatur mellom -20 °C og -30 °C, og lufthastighet mellom 0,8 m/s og 3 m/s. Deretter ble de lagret i 6 måneder ved temperatur -13 °C og lufthastighet 0,4 m/s. Frysetiden var ikke oppgitt. Gjennomsnittlig vekttap under frysing var 0,70 %, mens vekttapet under lagring var 7,36 % og 1,30 % for henholdsvis uemballerte produkter og produkter pakket med polyetylen (Bustabad, 1999).

Vekttapet under frysing var lavere for slakt av svin enn for storfe, på grunn av fett- og skinnlaget på svinet (Bustabad, 1999). Emballasje under frysing vil gi mindre vekttap, men også økt frysetid (Bustabad, 1999). Forsøkene viste også at høyere lufthastighet under lagring ga høyere vekttap for uemballerte produkter (Bustabad, 1999).

Bustabad (1999) fant også at vekttapet under lagring var avhengig av lagringstemperaturen. Vekttapet under lagringsforsøk av uemballerte produkter var signifikant større ved -13 °C enn ved -18 °C. Ved lagring med emballasje hadde temperaturen signifikant mindre betydning for vekttapet. Ved lavere lagringstemperatur blir differansen mellom damptrykket ved produktoverflaten og den omgivende lufta mindre, og vekttapet derfor også mindre (Bustabad, 1999).

Gigiél og James (1984) gjennomførte forsøk med konvensjonell kjøling og hurtig kjøling av halve griseskrotter. Den konvensjonelle kjølingen ble gjennomført med lufttemperatur 0 °C og lufthastighet 0,5 m/s i 24 timer. Rask nedkjøling foregikk med 80 minutter kjøling med lufttemperatur -40 °C og lufthastighet 1 m/s, etterfulgt av 130 minutter kjøling med lufttemperatur 0 °C og lufthastighet 0,5 m/s. Etter kjølingen ble slaktene kuttet i 5 hoveddeler (hode, bog, kam, side og skinke). Stykkene fra bog og skinke ble deretter kjølt ytterligere 20 timer, med samme betingelser som den konvensjonelle kjølingen, for å fjerne eventuell gjenværende varme.

Det tok tilsammen 10 timer fra slakting før kjernetemperaturen i bog og skinke fra de hurtigkjølte halvskrottene hadde sunket under 4 °C. Kjernetemperaturen i ryggstykket sank under 3 °C innen 4 timer, og det var ikke noe behov for ytterligere nedkjøling før lagring. Temperaturen rett under overflaten var aldri lavere enn 0,5 °C, og det var aldri is i produktet (Gigiél og James, 1984).

Gigiél og James (1984) fant ingen signifikant forskjell i vekttap på grunn av fordunsting mellom de to kjølemetodene, 24 timer etter slakting. Men det var en signifikant forskjell mellom fordunstingstapet fra hurtigkjølte slakt 4 timer etter slakting (1,04 % av slaktevekt) og konvensjonelt kjølte slakt 24 timer etter slakting (2,07 %) (Gigiél og James, 1984). Det betyr at vekttapet på grunn av fordunsting under kjøling kan reduseres med hurtig nedkjøling, dersom den videre behandlingen av slaktet startes tidligere enn man kan gjøre med konvensjonelt kjølte slakt.

I forsøkene til Gigiél og James (1984) var det ingen signifikant forskjell i pH mellom slakt kjølt hurtig og slakt kjølt konvensjonelt, verken 50 minutter etter slakting eller 4 timer etter slakting. Det var heller ikke signifikant forskjell i drypptap fra produkter i detaljsalg mellom hurtigkjølte og konvensjonelt kjølte sider av svin. Men produktene fra hurtigkjølte slakt var signifikant seigere enn produktene fra konvensjonelt kjølte slakt (Gigiél og James, 1984).

Også James et al. (1983) har gjennomført forsøk med hurtig og konvensjonell nedkjøling av svineslakt. Den hurtige kjølingen ble gjennomført med lufttemperatur -30 °C og lufthastighet 1 m/s i 4 timer, mens den konvensjonelle kjølingen ble gjennomført med lufttemperatur 0 °C og lufthastighet 0,5 m/s i 24 timer.

Kjølingen startet 50 minutter post mortem. Før det oppholdt slaktene seg ved romtemperatur 16 °C.

James et al. (1983) fant en signifikant forskjell i forunstingstap mellom de to metodene. De hurtigkjølte slaktene hadde et gjennomsnittlig vekttap på 1,1 % av vekten før kjøling, mens de konvensjonelt kjølte slaktene hadde et gjennomsnittlig vekttap på 2,05 %. Det var ingen signifikant forskjell mellom de to metodene på drypptapet under vakuumpakket lagring. Men drypptapet i forpakning i detaljsalg var signifikant større for kotelettkam fra de hurtigkjølte halvskrotenne enn de konvensjonelt kjølte.

Forsøkene viste at all nødvendig varme ble fjernet i løpet av den raske nedkjølingsprosessen. Men temperaturen i kam og side sank under det initiale frysepunktet. For mye kjøling av disse sykningsdelene kan gi problemer under videreforedlingen av produktet, og ytterligere temperering før skjæring kan være nødvendig (James et al., 1983). De lave temperaturene i kotelettkammen kan også være medvirkende til økte drypptap med hurtig kjøling.

2.5 Kvalitet

I tillegg til å bevare matsikkerheten er det viktig at behandlingen slakt og kjøtt sikrer at kvaliteten bevares.

2.5.1 Post mortem

De først 24 timene etter slakting skjer det mange biokjemiske og strukturelle endringer i kjøttet, og denne perioden er derfor svært viktig for kjøttets kvalitet. De biokjemiske og strukturelle endringene har stor innvirkning på kjøttets mørhet og farge, og er derfor av stor betydning for kjøttets sensoriske kvalitet. Prosessene varierer for de ulike artene og kravene til kjøleprosessen blir derfor ulike (Savell et al., 2005).

Rigor mortis

Etter blodtømmingen fortsetter glykolysen (nedbryting av glukose) uten oksygen. Den anaerobe glykolysen produserer melkesyre, som igjen fører til at pH synker. Dødsstivheten begynner vanligvis når pH ligger mellom 5,7 og 5,8 (Savell et al., 2005). I kjøtt som fryses ned før rigor mortis oppstår stivheten under opptining (Savell et al., 2005).

Påvirkning pH

Normalt vil pH synke fra 7,0 før slakting til omtrent 5,3–5,8. Denne reduksjonen kan i ekstreme tilfeller skje i løpet av kun én time. For svin fullføres pH-nedgangen vanligvis i løpet av 6–12 timer, mens det for storfe vanligvis tar 18–40 timer. Når pH-verdien faller vil den nærme seg isoelektriske punkt. Ved dette punktet er de positive og negative sidekjedene til aminosyren i likevekt, og tiltrekningen mellom dem er maksimal. Denne tiltrekningen trekker fiberne i kjøttet tett sammen, slik at vann ikke slipper inn og kjøttets evne til å holde på vann reduseres kraftig (Savell et al., 2005).

Når svinekjøtt mister evnen til å holde på vann, mister det farge og fasthet. Kjøttet blir blekt, mykt og eksudativt (PSE). Med hurtig nedkjøling vil man kunne bremse de biokjemiske og strukturelle endringene i kjøttet, slik at pH-reduksjonen forsinkes. Problemet med blekt og mykt svinekjøtt kan reduseres ved å kjøle kjøttet til under 10 °C innen 12 timer, og under 2–4 °C innen 24 timer (Savell et al., 2005).

Mørhet

I løpet av de første 24 timene etter slakting reduseres kjøttets mørhet. Deretter vil mørheten øke igjen, på grunn av enzymatisk degradering av muskelfibre. Den enzymatiske degraderingen avhenger av temperatur, pH, typen muskelfiber og dyreart. Modningsfasen tar 3–6 dager for svin og 10–20 dager for storfe (Savell et al., 2005).

Kuldeforkorting

Dersom slakt kjøles ned raskt kan det oppstå kuldeforkorting eller toughening. Cold shortening oppstår dersom temperaturen reduseres til under 14–19 °C før rigor mortis begynner. Røde muskelfibre er mer følsomme for cold shortening enn hvite muskelfibre. Svinekjøtt består for det meste av hvite muskelfibre og er derfor ikke like utsatt for kuldeforkorting som storfe- og lammekjøtt (Savell et al., 2005).

For gris vil rask kjøling kunne gi kuldeforkorting dersom temperaturen faller under 10 °C innen 3 timer etter slakting, og pH er høyere enn 6,0 (Jones et al., 1993). Kuldeforkorting er mest sannsynlig i slakt med høy pH i utgangspunktet, før kjølingen starter (Jones et al., 1993).

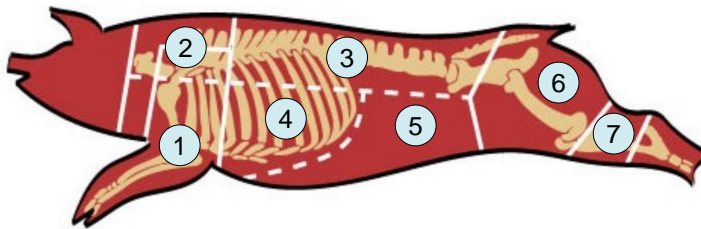
James et al. (1983) fant ingen tegn til kuldeforkorting i forsøk med rask nedkjøling, men kunne ikke utelukke muligheten for kuldeforkorting i enkelte deler av slaktet. På grunn av rask glykolyse post mortem og isolasjon på grunn av underhudsfett, er ikke kuldeforkorting antatt å være et problem ved rask nedkjøling av svin (James et al., 1983).

2.6 Nedskjæring

Etter fullført kjøling blir de halve griseskrottene delt opp i mindre stykker. Ved norske slakterier er det vanlig med fem grovstykker fra grisen, som vist i figur 2.1. Stykkene kan deretter deles opp og tilberedes som flere ulike produkter.

Ifølge Animalia (2009) var gjennomsnittlig slaktevekt for gris slaktet i Norge 79,3 kg i 2008 og 77,5 kg i 2007. Slaktevekten gjelder hel slaktekropp uten hale for et ferdig kjølt slakt, i henhold til EUs definisjon. Slaktevekten inkluderer vekten av hode med ører og alle labber. Innvendig i slaktet skal mellomgolvet og all ister være fjernet (Animalia, 2009).

Bogen kan blant annet anvendes som stek, kokekjøtt og grytekjøtt. En del svinebøgger går til produksjon av bogskinke. Stykket egner seg også til oppdeling i skiver for grilling. Nakkestykket kan brukes til koteletter, med eller uten bein, eller brukes hel som stek. Kjøtt fra nakken brukes også til kjøttdeig



Figur 2.1: Vanlige stykningsdeler fra gris. Skisse henter fra Opplysningskontoret for egg og kjøtt (2011). Nummerering: 1 Bog, 2 Nakke, 3 Kam, 4 Flatribbe, 5 Sideflesk, 6 Skinke, 7 Knoke.

(Opplysningskontoret for egg og kjøtt, 2011).

Svinekammen kan blant annet hugges som koteletter eller brukes som stek, med eller uten bein. Man kan også ta ut indre- og ytrefileten fra dette stykket, og bruke dem hele eller i stykker. Bakerst på kammen kan man også hente ut mørbrad. Fra siden kan man lage både ribbe og bacon. Tynnribbe er kun flatribba, mens familieribbe også har med en del av sideflesket og kotelettkammen. Side egner seg også som grillskiver (Opplysningskontoret for egg og kjøtt, 2011).

Skinka har mange mulige anvendelse. Den kan blant annet brukes hel som spekeskinke, eller som skinkestek. Kjøtt fra skinka blir også brukt til flatbiff, schnitzel og grytekjøtt. Knokene blir som regel brukt som kokekjøtt (Opplysningskontoret for egg og kjøtt, 2011).

2.7 Superkjøling

Ferdige produkter blir som regel enten lagret kjølt ved temperatur 2–7 °C eller fryst ved temperatur under -18 °C. Med kjølt lagring kan man forvente god kvalitet og lite drypptap, men begrenset holdbarhet. Frysing gir lenger holdbarhet, men med en mulig redusert kvalitet og økte drypptap. Superkjøling er et kompromiss mellom de to lagringsmetodene, der produktet er delvis fryst. Formålet med superkjøling er derfor å øke holdbarheten i forhold til kjøling, samtidig som man bevarer mest mulig kvalitet og mister minst mulig vekt. Ved superkjøling

lagres produktet med en liten andel frosset vann. Under superkjøling reduseres produkttemperaturen under det initielle frysepunktet, ofte med 1–2 °C (Zhou et al., 2010; Magnussen et al., 2008).

2.7.1 Is

Ved det initielle frysepunktet er temperaturen så lav at den første isen i produktet dannes. Forskjellige typer kjøtt har forskjellig sammensetning, og derfor skjer den første faseovergangen mellom vann og is ved forskjellig temperatur for forskjellige produkter. Den initielle frysepunktstemperaturen avhenger av hvor mye som er oppløst i vannet i produktet, og ligger i området -2,8 °C–0,5 °C for de fleste matprodukter (Duun et al., 2008).

Når temperaturen i produktet senkes til det initielle frysepunktet og den første isen dannes, øker konsentrasjonen av løste stoffer i den resterende vannfraksjonen. Derfor synker frysepunktet for vannet etter hvert som is dannes i produktet. Utfrysingen av vann skjer ikke ved én temperatur, men over et temperaturintervall. Ved superkjøling lagres produktet ved en temperatur inne i dette intervallet.

Iskrystaller

Grujić et al. (1993) fant under frysing av *M. longissimus dorsi* fra storfe at langsom frysing ga større, og mer uregelmessige, iskrystaller enn rask frysing. Ved langsom frysing ble iskrystallene kun dannet mellom cellene i muskelfiberne, mens det ved rask frysing også ble dannet iskrystaller inne i cellene. Frysing med høy hastighet gjorde mindre skade på fiberne i kjøttet enn frysing med lav hastighet.

Saltkonsentrasjonen er mindre mellom cellene enn i cellene, og frysepunktet er derfor også høyere. De første iskrystallene blir derfor dannet mellom cellene. Etter hvert som vannet mellom cellene fryser øker saltkonsentrasjonen i det gjenværende vannet. For å utjevne saltkonsentrasjonen trenger vann fra cellene ut mellom cellene på grunn av diffusjon. Iskrystallene vokser ved at dette vannet fryser sammen med de eksisterende iskrystallene, og iskrystallene vokser. Under hurtig frysing rekker man å fryse ut krystaller inne i cellene, før vannet rekker å forlate cellene (Grujić et al., 1993).

Når iskrystaller dannes i en løsning forsterkes løsningen området rundt iskrystallen. Før konsentrasjonen igjen utjevner seg i den resterende løsningen, vil frysepunktet rundt iskrystallen være lavere enn frysepunktet være lavere enn ellers i løsningen. Den situasjonen kalles konstitusjonell superkjøling. Eventuelle utvekster på iskrystallen vil komme i kontakt med en del av løsningen med høyere frysepunkt enn resten av krystallen. Av den grunn vil iskrystallen vokse raskere ved eventuelle utvekster, og isen vil fryse som armer ut fra den opprinnelige iskrystallen (Pham, 1989).

2.7.2 Holdbarhet

Temperatur er den viktigste faktoren for holdbarheten til ferskt kjøtt (Duun et al., 2008; Magnussen et al., 2008). Temperaturen reduseres så mye som mulig, uten at det går ut over produktets kvalitet. Kvaliteten er også avhengig av lagringstemperaturen, i tillegg til sesongvariasjoner, behandling og pakking (Magnussen et al., 2008).

Det meste av mikrobiell aktivitet opphører ved temperaturnivået for superkjøling (Haugland et al., 2005; Duun et al., 2008). Veksten og toksinproduksjonen vil også bli kraftig redusert for de bakteriene som tåler lavere temperaturer (Duun et al., 2008). Men fysiske og kjemiske endringer kan fortsatt finne sted, og i enkelte tilfeller kan de også akselerere (Haugland et al., 2005).

Holdbarheten til vakuumpakket skinkestek lagret ved 2–4 °C er 14 dager (Duun et al., 2008). Haugland et al. (2005) viste at holdbarheten for skinkestek med superkjøling kunne økes til mer enn 35 dager, men også at lufttett pakking var avgjørende for sluttproduktet. I et annet forsøk med superkjølt lagring oppnådde Duun et al. (2008) en holdbarhet på ca. 16 uker. Etter 111 dager med superkjølt lagring var antallet bakterier signifikant lavere enn for konvensjonelt kjølte produkter etter 19 dagers lagring.

2.7.3 Fordunsting

Også de ferdigkuttete produktene kan oppleve vektap under kjøling og frysing. På grunn av sublimasjon av is på overflaten, vil produkter uten emballasje ha et

vektttap under frysing eller lagring i frossen tilstand. I tillegg til vektttap, vil overflaten kunne endre utseende og tekstur, på grunn av dehydreringen (Campañone et al., 2001). Under frysing er årsaken til vektttapet at overflatetemperaturen til produktet er høyere enn den omgivende lufttemperaturen. Derfor blir også damptrykket ved overflaten høyere enn i den omgivende lufta (Campañone et al., 2001).

Vektttapet under frysing begrenses ved å øke frysehastigheten. Med økt frysehastighet vil overflatetemperaturen synke raskere, slik at forskjellen i damptrykk blir mindre, og de drivende kreftene for vektttapet redusert. Vektttapet vil også bli redusert fordi frysetiden blir kortere (Campañone et al., 2001).

Dersom lufttemperaturen varierer, vil også produkter på fryselager kunne oppleve et vektttap. Variasjonen i lufttemperatur vil gi variasjon i produkttemperaturen, men med en forsinkelse. På grunn av denne forsinkelsen vil produkttemperaturen i perioder være lavere enn den omgivende lufttemperaturen, og i perioder høyere. Når produkttemperaturen er høyere enn lufttemperaturen, vil is sublimerer på produktoverflaten (Campañone et al., 2001). Overflatetemperaturen vil ha en mindre forsinkelse fra lufttemperaturen enn kjernetemperaturen.

Vektttapet under lagring er mindre enn vektttapet under frysing, siden temperaturdifferansen mellom produkttemperaturen og lufta er mindre enn under frysing. Temperaturvariasjonen på fryselageret antas å være mindre enn temperaturdifferansen under fryseprosessen. Men siden oppholdstiden på fryselageret er mye lenger enn fryseprosessen, kan det totale vektttapet under lagring være av større betydning enn vektttapet under frysing (Campañone et al., 2001). Vektttapet under lagring kan begrenses med tett emballasje.

2.7.4 Drypptap

I tillegg til vektttap på grunn av fordamning kan produktet miste vekt på grunn av skader under fryseprosessen. IskrySTALLene som dannes under frysing av kjøtt kan gi endringer i kjøttstrukturen. Disse endringene kan gi dehydrering av cellene, drypptap og sammentrekning av muskulaturen under tining. En mulig ulempe ved superkjøling er derfor økt drypptap (Magnussen et al., 2008). For å unngå for store kvalitetstap er det derfor viktig at isfraksjonen i produktet ikke blir for

stor.

Mengden utfrosset vann begrenses for å sikre kvaliteten av produktet. Økt konsentrasjon av oppløsning kan føre til denaturering muskelproteiner og strukturelle skader på membraner. Konsekvensen av dette er økt drypptap, og endring av muskelstruktur (Duun et al., 2008).

Duun et al. (2008) fant i superkjølingsforsøk med skinkestek, at superkjøling ga mindre drypptap enn konvensjonell kjøling av skinkestek under lagring. Ifølge Briley (1980) vil superkjøling kunne gi 1–2 % reduksjon i drypptap (Briley, 1980).

Langsom frysing vil kunne gi økte drypptap. Ved frysing av *M. longissimus dorsi* fra storfe fant Petrović et al. (1993) at langsom frysing ga større drypptap enn rask frysing, på grunn de strukturelle endringene i muskelfiberne.

For rask nedkjøling vil også kunne gi økte drypptap. Overdreven frysing av overflaten, på grunn av for stor varmeovergang, kan strukturelle endringer (Magnussen et al., 2008). For å unngå økte drypptap er det derfor viktig at nedkjølingen hverken skjer for raskt eller for langsomt.

2.7.5 Nedkjøling

Bustabad (1999) gjennomførte flere forsøk med frysing og lagring av halve svine-skrotter med vekt 30–35 kg, med og uten emballasje. I et av forsøkene ble de halve skrottene fryst i en frysetunnel med lufttemperatur mellom $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, og lufthastighet mellom 0,8 m/s og 3 m/s. Deretter ble de lagret i 6 måneder ved temperatur $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ og lufthastighet 0,4 m/s. Frysetiden var ikke oppgitt. Gjennomsnittlig vekttap under frysing var 0,70 %, mens vekttapet under lagring var 7,36 % og 1,30 % for henholdsvis uemballerte produkter og produkter pakket med polyetylen (Bustabad, 1999).

Vekttapet under frysing var lavere for slakt av svin enn for storfe, på grunn av fett- og skinnlaget på svinet (Bustabad, 1999). Emballasje under frysing vil gi mindre vekttap, men også økt frysetid (Bustabad, 1999). Forsøkene viste også at høyere lufthastighet under lagring ga høyere vekttap for uemballerte produkter (Bustabad, 1999).

Skallfryser

En mulig måte å oppnå rask kjøling er bruk av en skallfryser (impingement freezer). I skallfryseren blåses luft mot produktet fra én eller flere sider, med høy hastighet og lav temperatur. Enkelte kutteprosesserer for kjøtt er avhengig av at overflaten er delvis fryst for å oppnå rene kutt. Med isfordelingen som oppnås etter superkjøling i skallfryser er dette mulig (Haugland et al., 2005).

Prosesskontroll

På grunn av den latente varmen ved faseovergang mellom vann og is endrer den spesifikke varmekapasiteten seg mye i temperaturområdet for superkjøling. Det gjør det vanskelig å beregne nedkjølingsprosessen. Planks ligning for beregning av frysetid vil ikke kunne brukes for beregning av oppholdstiden i skallfryseren (Haugland et al., 2005). Målinger av temperatur under prosessering under den transiente nedkjølingsprosessen i området rundt det initielle frysepunktet vil ikke kunne gi nøyaktige svar. Haugland et al. (2005) hevder at ismengde og -fordeling er bedre parametre for å kontrollere prosessen enn temperaturen, og at isfraksjonen sannsynligvis er det beste målet på når produktet er superkjølt.

Variasjon i form og størrelse, gir forskjellig isfraksjon med samme nedkjølingsbetingelser. Superkjøling med skallfryser krever derfor nøyaktig informasjon om produktflyt og produktvariasjon (Haugland et al., 2005). Superkjøling av store pakker med kjøtt gir ujevn fordeling av isen, men under lagring utjevnes isen i produktene (Haugland et al., 2005). For å sikre at alle produktene får den samme isfraksjonen etter utligning, kan derfor produktene først skilles etter utjevning. I pakker med ni skinkestek à 1000 gram, fant Haugland et al. (2005) at utligningstiden tok opptil 36 timer. Utligningen tar lang tid på grunn av liten temperaturforskjell i produktet, mellom produktene og mellom produktene og omgivelsene.

Måling av isfraksjon

Den mest presise metoden for beregning av isfraksjon er med kalorimetri, men denne metoden tar for lang tid til å kunne brukes under prosessering. Kjerne-

magnetisk resonans kan også benyttes, men løsningen er teknisk kompleks og dyr for anvendelser innen matprosessering (Aparicio et al., 2008).

En metode som allerede brukes for å evaluere egenskaper i mat, er ultralyd. Fordelen med ultralyd er at metoden kan benyttes direkte under prosesseringen, uten inngrep i matvaren. Det gir mulighet for sikker, hygienisk og økonomisk måling (Aparicio et al., 2008). Ultralyd er, ifølge Aparicio et al. (2008), også egnet til å bestemme isfraksjon i matvarer. Da utnytter man det faktum at lyd hastigheten i faste stoff er raskere enn lyd hastigheten i væske.

Stevik et al. (2010) har vurdert nær infrarød spektroskopi (NIR) som en mulig metode for beregning av isfraksjon under prosessering. NIR er elektromagnetisk stråling med bølglengde 800–2500 nm. I likhet med ultralyd brukes også NIR til analyse av kjemiske og fysiske egenskaper i mat. For analyse av isfraksjon utnytter man at NIR påvirkes av temperatur. Forsøk med superkjøling av laks har vist at isfraksjonen kan bestemmes med NIR (Stevik et al., 2010).

2.7.6 Lagring

Isfraksjonen i produktet er under superkjølingsforhold sterkt avhengig av temperaturen. En liten endring i temperaturen gir endring i isfraksjonen ved utligning. Derfor er det viktig at superkjølte varer lagres ved relativt konstant temperatur, for å opprettholde holdbarhet og kvalitet. Konstant temperatur under lagring kan gi forlenget holdbarhet (Duun et al., 2008).

Relativt små svingninger i temperaturen har mindre betydning for holdbarhet og drypptap. Duun et al. (2008) fant at superkjølt svinestek tålte at temperaturen varierte mellom $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ under lagring. Kulde lagres som is i det superkjølte produktet. Isen fungerer som et reservoar, og produktet kan ta opp en viss mengde varme fra omgivelsene uten at temperaturen stiger for mye (Magnussen et al., 2008).

Duun et al. (2008) viste at god temperaturkontroll under lagring er viktig for holdbarheten til produktet. I en test hvor den superkjølte lagringen ble forstyrret i 4 dager med temperaturer opp mot $3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, var veksten av mikroorganismer og drypptap like stor som i en konvensjonelt kjølt referanse (Duun et al., 2008).

For fryste produkter fant Bustabad (1999) at vekttapet under lagring var avhengig av lagringstemperaturen. Vekttapet under lagringsforsøk av uemballerte produkter var signifikant større ved $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ enn ved $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ved lavere lagringstemperatur blir differansen mellom damptrykket ved produktoverflaten og den omgivende lufta mindre, og vekttapet derfor også mindre. Under lagring med emballasje hadde temperaturen signifikant mindre betydning for vekttapet (Bustabad, 1999).

2.7.7 Økonomi

Kostnadene ved frysing er høyere enn kostnadene ved kjølingen. Det kreves mer energi for å senke temperaturen og fryse vannet i produktet, og det kreves mer energi å holde temperaturen under lagring på frysetemperatur, fremfor på kjøletemperatur. I tillegg kommer økonomiske tap på grunn av drypptap og redusert kvalitet på sluttproduktet. Totalt koster det ca. 10 NOK/kg mer å fryse enn å kjøle kjøtt (Duun et al., 2008).

Superkjøling er billigere enn frysing, fordi varmen som må fjernes fra kjøttet er mye mindre. Tabell 2.2 viser produktlasten ved kjøling av kjøtt fra svinenakke fra $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, til $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kjølelasten er regnet ut med komposisjon hentet fra ASHRAE (2006) og verdier for spesifikk varmekapasitet Choi og Okos (1986). Ved $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ er isfraksjonen ca. 16 %, beregnet med Tchigeovs metode i ligning (3.8) Den totale produktlasten for superkjøling er da omtrent halvparten av produktlasten som kreves for å nå temperaturkravet for dypfryste produkter.

Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Produktlast (kJ/kg)
4	128
-1,1	200
-18	396

Tabell 2.2: Energien som må fjernes for å senke temperaturen i kjøtt fra nakke hos gris fra $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ramírez et al. (2006) viser til en undersøkelse i dansk kjøttindustri, som viser at frosne produkter krever 115 kWh mer per tonn svinekjøtt og 80 kWh mer per tonn storfekjøtt, enn kjølte produkter. Ifølge Briley (1980) er kostnadene ved frysing er 2–3 ganger større enn kostnadene ved superkjøling. Superkjøling kan redusere bruken av frysing/tining som buffer for produksjonen, og på den måten redusere energibruken (Magnussen et al., 2008).

2.8 Kjølekjede

For å opprettholde matsikkerhet, holdbarhet og kvalitet er det viktig at kjølekjeden opprettholdes også etter slakteriet, helt fram til forbrukeren.

2.8.1 Transport

Kjøling under transport er en viktig forutsetning for en uavbrutt kjølelinje mellom produsent og forbruker. Tall fra 2002 konkludere med at det globalt finnes mer enn én million kjøretøy med kjøling, og 400 000 kjølte containere for marin transport i verden (IIR, 2002; James et al., 2006). I dag er det omtrent 1300 lasteskip med kjøleanlegg, 80 000 kjølte motorvogner, 650 000 kjølte containere og 1,2 millioner kjølte lastebiler i bruk over hele verden. Kjøling står for ca. 40 % av energibruken ved transport (James og James, 2010). For å kunne distribuere kjølt og frossen mat, samtidig som man opprettholder sikkerheten og holdbarheten til maten, er man avhengig av kjøle- eller frysetransport med god temperaturkontroll.

Konvensjonelt system

Veitransport av mat foregår stort sett med trekkvogn og semitrailer, isolert med ekspandert skum. Dette skummet er ofte ekspandert polyuretan eller ekstrudert polystyren (Tassou et al., 2009). De fleste kjøleanlegg for transport har mekanisk kjøling med dampfortetningssystem. For større kjøretøy er det vanlig at kompressoren(e) i kuldeanlegget drives av en egen dieselmotor. Disse dieselmotorene har ofte en termisk virkningsgrad på 40 % (Tassou et al., 2009). I mindre anlegg drives kompressorene vanligvis av kjøretøyets motor, enten direkte med remdrift

eller indirekte med strøm generert av motoren (Tassou et al., 2009). De fleste transportkjølesystemer er ikke designet for å fjerne varme fra produktene, men kun opprettholde produkttemperaturen (James et al., 2006). Derfor er det viktig at produktet (og emballasjen) har riktig temperatur før det lastes.

Kjøleanlegg for transport må operere med store variasjoner i driftsbetingelsene, og har begrensninger i volum og vekt. Det betyr at det er begrenset plass både for kuldeanlegget og for isolasjon av kjølerommet. Derfor har kuldeanlegg i transportkjeden vanligvis lavere virkningsgrad enn systemer som opererer under stasjonære betingelser (Tassou et al., 2009). Den varierende lasten avpasses enten ved av/på-regulering, eller ved kapasitetsregulering, med redusert virkningsgrad som bieffekt (Tassou et al., 2009). Tassou et al. (2009) hevder at effektfaktoren for et slikt anlegg vanligvis ligger mellom 0,5 og 1,5. I store containere brukt til langtransport, kan temperaturen holdes innenfor $\pm 0,5$ °C (James et al., 2006).

Drivstoffeffektivitet er ikke nødvendigvis noe gått mål for energieffektiviteten ved kjølt transport, siden det ikke sier noe om utnyttelsen av kjøretøyets kapasitet. Et bedre mål på effektiviteten er derfor energiintensitet, som uttrykker drivstofforbruk per palle-kilometer istedet for per kilometer (Tassou et al., 2009). Drivstofforbruk per kilometer vil generelt øke når lasten økes, men forbruket per kilogram produkt vil minke.

Dersom ulike produkter skal transporteres sammen, for eksempel ved distribusjon i butikkjeder, kan det være aktuelt å dele opp det kjølte arealet i flere små rom. Temperaturen i de ulike rommene kan da justeres individuelt, slik at de ulike produktgruppene får optimale lagringsforhold. Avlukkene har hver sin fordemper, men felles kodensator. Selv om alle konfigurasjoner er mulige, er det mest vanlig å plassere de kaldeste rommene lengst frem, og de varmeste bakerst (Tassou et al., 2009).

Tassou et al. (2009) viser til en underøkelse av indikatorer for nøkkelytelse (KPI) i Storbritannia 2002. Den viser at spesifikk energibruk øker utover i transportkjeden. Repice og Stumpf (2007) viste (ifølge Tassou et al. (2009)) i en analyse at drivstofforbruket ved distribusjon i bymiljø var 16 % større enn forbruket ved langdistansetransport. Langdistansetransport er sannsynligvis mer effektiv fordi kjøretøyene som regel er større, men først og fremst fordi det er

færre stopp per kjørekilometer og dermed også mindre infiltrasjonstap.

Det kan være vanskelig å holde riktig temperatur i små kjøretøy som brukes til distribusjon til detaljister og restaurantvirksomhet. Under slik transport kan produktene bli utsatt for opptil 50 døråpninger før det er fremme ved endelig destinasjon. Hver gang dørene åpnes øker temperaturen betraktelig, på grunn av infiltrasjon og varme fra personale som henter produkter fra lageret (James et al., 2006).

Eutektiske systemer

En alternativ metode for transportkjøling er eutektiske systemer. Metoden går ut på å fylle rør eller platekonstruksjoner med en eutektisk løsning, som ved faseskifte tar opp varme og på den måten opprettholder riktig temperatur i kontaineren. Avhengig av mengden løsning, kan systemet levere pålitelig, hurtig kjøling over en bestemt periode. Den eutektiske løsningen fryses om natten, med strøm fra nettet, slik at den kan brukes til kjøling igjen neste dag (Tassou et al., 2009).

Fordelene med et slikt anlegg er at kuldeanlegget ikke trenger å være en del av kjøretøyet. Avhengig av mengden eutektisk løsning som kreves for ønsket kjølekapasitet, kan man spare både vekt og plass ved å benytte et stasjonært kjøleanlegg. Et slikt kjøleanlegg har mindre begrensninger i størrelse og vekt, slik at det sannsynligvis kan lages med en bedre virkningsgrad. Ulempen med et separat kjøleanlegg er at man må ha tilgang til et slikt hver gang man har behov for å fryse den eutektiske løsningen. Derfor er denne løsningen mest aktuelle dersom transportruter med faste stoppesteder og tilstrekkelig tid til lading av det eutektiske systemet.

Energieffektiviteten for et eutektisk system med kuldeanlegget plassert på kjøretøyet vil også kunne forventes å være høyere enn mekanisk kjøling drevet av kjøretøyets motor eller en egen dieselmotor, siden elektrisiteten levert fra nettet blir produsert med høyere virkningsgrad. Man kan også forvente en noe høyere virkningsgrad, siden kjøleanlegget drives kun når kjøretøyet er parkert, og kuldeanleggets omgivelser derfor varierer mindre enn under transport.

Kryogenisk kjøling

Det er også mulig å med kryogenisk kjøling under transport. Kryogene fluider som for eksempel flytende nitrogen eller karbondioksid lagret på tanker, kjøler ned avlukket når det sprayeres inn og fordamper. Fordelene med et slikt kjølesystem er at det gir rask nedkjøling og veldig lite støy. For lange transportdistanser blir systemet kostbart i drift, og et kombinert system er mer aktuelt. Kryogenisk kjøling kan da brukes for rask reduksjon av temperaturen, mens mekanisk kjøling sørger for å opprettholde kjøletemperatur i stasjonær tilstand (Tassou et al., 2009). Et slikt system kan derfor være aktuelt dersom det ikke er mulig å få riktig temperatur på produktene før transport.

Alternative kjølemetoder

Kjølesystemer drevet av termisk energi er et alternativ til konvensjonell mekanisk kjøling. Kompresjonen i dampfortetningssystemet erstattes da med en «termisk kompressor» og en sorbent. I et absorpsjonssystem er sorbenten en væske og i et adsorpsjonssystem er sorbenten faststoff (Tassou et al., 2009). Den «termiske kompressoren» henter kuldemedium i dampfase ved lavt trykk ved utløpet av fordamperen og leverer kuldemedium i dampfase ved innløpet til kondensatoren. Sorbenten kan ta opp gass ved lavt trykk fra fordamperen når den kjøles ned, og avgi gass ved høyt trykk til kondensatoren når den varmes opp (Tassou et al., 2009). I et transportkjølesystem kan varme fra eksosgass utnyttes til å drive en slik prosess. Forbrenningsmotorer har typisk en virkningsgrad på 40 %, mens resten av energien avgis til atmosfæren gjennom eksos eller konvektiv varmeoverføring fra radiatoren og motoren (Koehler et al., 1997).

Koehler et al. (1997) testet en prototype av et absorpsjonssystem med ammoniakk som kuldemedium og vann som absorbent. Systemet leverte kjøling til et vogntog og ble drevet av eksosgassen fra vogntoget. Prototypen ble testet med kjøletemperaturer mellom $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ og omgivelsestemperaturer $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eksostemperaturen inn på generatoren lå mellom $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $490\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens eksostemperaturen ut fra generatoren var $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Massestrømmen til eksosen var 360 kg/h .

Ved utetemperatur 20 °C lå kjølekapasiteten til anlegget mellom 8 og 10 kW, avhengig av romtemperaturen. For utetemperatur 30 °C var anleggets kjølekapasitet mellom 6 og 7 kW. Tilsvarende lå COP for kuldeanlegget mellom 0,23 og 0,30 (Koehler et al., 1997). Til tross for lav COP er kuldeytelsen ifølge Koehler et al. (1997) allerede nok til å dekke kjølebehovet til en trailer på 30 tonn. Simuleringer viser at COP kan forbedres med mer enn 25 % (Koehler et al., 1997).

Potensialet til absorpsjonssystemet avhenger av den tilgjengelige varmen fra eksosgassen. Ifølge Koehler et al. (1997) vil absorpsjonssystemet egne seg best for langdistansetransport på flat vei. På fjellveier og i bymiljø vil eksostemperaturen store deler av tiden kunne bli for lav til å drive prosessen. I praksis vil det kreves en brenner som kan varme opp generator i perioder med for lav eksostemperatur og en mulighet for bypass slik at oppvarmingen av generatoren begrenses i perioder med overskudd av varme (Koehler et al., 1997). En annen ulempe med absorpsjonssystemet drevet med eksosgass er at potensialet vil bli redusert etter hvert som forbrenningsmotorene forbedres.

2.8.2 Kommersiell kjøling

Kjøling i butikk er ofte det svakeste leddet i den kommersielle kjølekjeden (Likar og Jevšnik, 2006; Greer et al., 1994). Utilstrekkelig temperatur i butikkkjøler har som ellers i kuldekjeden stor effekt på produktets holdbarhet. 55 % av tapene p.g.a. ødelagt og fordervet kjøtt skyldes denne delen av kjølekjeden (Greer et al., 1994).

James og James (2010) viser til en underøkelse fra 2002, som estimerer at det finnes 322 000 supermarked og 18 000 stormarked i verden. I et gjennomsnittlig supermarked går 35–50 % av energibruken til kjøling (James og James, 2010; Billiard, 2005). Karakteristisk for kommersiell kjøling er lange rørføringer, høye trykktap og store lekkasjetap. Lekkasjetapene har blitt kraftig redusert de siste årene (Billiard, 2005).

Butikkjøler

For å opprettholde kvaliteten er det viktig at temperaturen i kjøledisken er riktig. Ukvernet, rått kjøtt har bakterier kun på overflaten. Greer et al. (1994) hevder derfor at temperaturen på overflaten har størst betydning for kvaliteten til kjøttet, og at temperaturkravene i kjøledisken derfor bør gjelde for overflaten eller temperaturer som samsvarer godt med overflatetemperaturen.

Så fremt det ikke er kvernet, er det kun bakterier på kjøttets overflate. Maksimal oppbevaringstemperatur refererer derfor til den høyeste overflatetemperaturen kjøttet kan ha. Anbefalte temperaturnivå i retail display referer til gjennomsnittstemperatur. Lufttemperaturen har stor effekt på overflatetemperaturen. Lufttemperaturen kan svinge mye p.g.a. avriming (Greer et al., 1994).

I denne delen av kjølekjeden er det uunngåelig at det skjer en sammenblanding av rått kjøtt og patogener fra mennesker. Bakteriene formerer seg raskt i perioder med feil temperatur (Greer et al., 1994). God holdbarhet sikres med god kontroll på temperaturen. Mange gjør feil når de definerer hvilke temperaturer de vil kontrollere (Greer et al., 1994).

Et indirekte system kan redusere mengden kjølemedium med 50–70 % sammenlignet med et direkte system (Billiard, 2005). Indirekte system gjør det også mulig å bruke giftige eller brannfarlige kjølemedier, som lokaliseres i maskinrom avskjermet fra butikkområdet (Billiard, 2005)

2.8.3 Hjemmekjølere

Kjølekjeden fortsetter fra butikk hjem til forbrukerne. Det finnes i dag omtrent én milliard kjøleskap og fryserer i verden. De fleste av hjemmekjølerne finnes i industrialiserte land, men også i utviklingsland øker produksjonen (Coulomb, 2008). Carlsson-Kanyama og Faist (2000) fant (ifølge James og James (2010)) i 2000 at 10 år gamle kjøleskap brukte 2,7 ganger mer energi per liter utnyttbart volum, i forhold til et nytt kjøleskap klasse A.

For forbedring av energieffektiviteten hjemmekjølere foreslår James og James (2010) tvungen konveksjon for fordampere og kompressorer, olje med lavere viskositet, redusert temperaturnivå i kompressorhus, regulerbart motorturtall,

lineære kompressorer og forbedret isolasjon.

2.9 Energibruk

Kjøling er energikrevende og hele 15 % av verdens elektrisitetsforbruk skyldes kjøling (James og James, 2010). Halvparten av denne kjøling går til mat (Coulomb, 2008). Matindustrien kan derfor være en viktig bidragsyter for redusert energibruk.

2.9.1 Prosessintegrasjon

Slakterier har store behov for både oppvarming og nedkjøling. Man kan spare mye energibruk dersom prosesser kan integreres for å dekke disse behovene. Muligheten for en slik integrasjon av oppvarmings- og kjølebehov kan gjøres med en pinch point-analyse. For å kunne gjennomføre en slik analyse er man avhengig av gode data, noe som er utfordrende i matindustrien. Produksjonsvolum og produkter varierer mye med tid og etterspørsel. Ofte gjøres det få eller ingen målinger av ressursforbruk i prosessen. I en detaljert studie er man avhengig av å vite når de ulike behovene er tilstede og størrelsen (Fritzson og Berntsson, 2006).

Det vil for de fleste anlegg kreve mye tid og ressurser å fremskaffe gode nok data for en detaljstudie. Derfor bør man først gjennomføre en enkel studie med de data man har tilgjengelige, før man begynner å samle inn mer detaljerte data. Man kan da fordele kjøle- og varmebehovene utover brukstiden, slik at man finner det gjennomsnittlige behovet. Siden lastene varierer mye og sjelden er gjeldene på samme tid, ville en slik forenklet studie som regel overestimere mulighetene for integrasjon. Dersom mulighetsstudiet viser at det er ingen eller små muligheter for prosessintegrasjon er det ikke nødvendig med en grundigere analyse (Fritzson og Berntsson, 2006).

En eksempelstudie i Sverige viser at det i moderne anlegg er lite potensial for mer varmegjenvinning ved intern varmeveksling. I eldre anlegg derimot, er det mulig å spare inntil 30 % ekstern varmetilførsel ved hjelp av enkel varmegjenvinning (Fritzson og Berntsson, 2006).

2.10 Klima og miljø

I tillegg til høyt elektrisitetsforbruk, har kjøling i matindustrien også en betydelig effekt på miljøet. Mekaniske kjøleprosesser kan ha uønskede effekter på klima og miljø, både direkte gjennom utslipp av kuldemedium og indirekte på grunn av energien som brukes til å drive prosessen. På 1970-tallet ble det bekreftet at klorerte kjemikalier bidrar til nedbryting av ozon (Molina og Rowland, 1974), og bruk av potensielt ozonnedbrytende kjemikalier har vært regulert siden Montreal-protokollen ble utarbeidet i 1987. Det er også kjent at enkelte medier kan ha uønsket effekt på global oppvarming. Av den grunn ble Kyoto-protokollen, som regulerer utslipp av drivhusgasser, undertegnet i 1997. Klima- og miljøpåvirkning har derfor blitt et viktig kriterium ved valg av kuldemedium og kjølesystem.

2.10.1 Historikk

I de første mekaniske kuldeanleggene ble stort sett alle tilgjengelig og anvendbare løsemidler og flyktige fluider brukt som arbeidsmedium. Problemet med mange av disse arbeidsmediene var de var brannfarlige og/eller giftige, og ulykker var vanlig (Calm, 2008). Økt sikkerhet og stabilitet var derfor de viktigste årsakene til en overgang til fluorkjemikalier da disse ble lansert på begynnelsen av 1930-tallet. Kommersiell produksjon av R12 startet i 1931 og året etter startet produksjonen av R11 (Calm, 2008).

Klorfluorkarboner (KFK) ble mye brukt som arbeidsmedium i kjøle- og fryseprosesser opp mot 1980-tallet. Fordelen med KFK-gassene var at de var enkle å bruke, samtidig som de ga god virkningsgrad for kjølesystemet. Ulempen var at de bidro sterkt til nedbryting av ozon i stratosfæren, i tillegg til at de hadde en effekt på global oppvarming (Coulomb, 2008). Etterhvert ble klorfluorkarbonene gradvis erstattet med hydroklorfluorkarboner (HKFK), som har mindre innvirkning på global oppvarming og ozon-nedbryting (Coulomb, 2008). Alternative arbeidsmedier er hydrofluorkarboner (HFK) og naturlige medier som ammoniakk (NH_3), karbondioksid (CO_2) og hydrokarboner. HFK-gassene bidrar ikke til nedbryting av ozon, men har en effekt på global oppvarming. De nevnte naturlige arbeidsmediene har liten eller ingen effekt på global oppvarming (Coulomb, 2008).

2.10.2 Ozonnedbryting

Menneskeskapt kjemikalier som slippes ut i atmosfæren kan ha negative effekter. Siden 1974 har det vært kjent at klorerte kjemikalier bidrar til nedbryting av ozon (O_3) i stratosfæren. Klorfluorkarboner er svært stabile og kan forbli i atmosfæren i 40–150 år. Fotolyse av KFK-gasser frigjør kloratomer, som kan ødelegge ozonmolekyler (Molina og Rowland, 1974). De klorbaserte kjølemediene er så stabile at de kan nå helt opp til stratosfæren. Der fungerer klor-atomene som katalysatorer for nedbryting av ozon (Mohanraj et al., 2009). Klor reagerer med O_3 og danner ClO og O_2 . ClO reagerer med et fritt oksygenatom og danner Cl og O_2 . Denne prosessen fortsetter helt til klor-atomet reagerer med CH_4 eller NO_2 , og kan ødelegge opptil 1000 ozon-molekyler (Halimic et al., 2003).

På grunn av disse uønskede effektene ble Montreal-protokollen utarbeidet i 1987. Den formulerte en internasjonal avtale for utfasing av ozonnedbrytende kjemikalier (Mohanraj et al., 2009; McMullan, 2002). Haloner og klorfluorkarboner (KFK) er allerede faset ut, mens utfasingen av hydroklorfluorkarboner (HKFK) pågår. HKFK skal være ferdig utfaset innen 2030 i industriland, og innen 2040 i utviklingsland (McMullan, 2002). Den ozonnedbrytende effekten for ulike kjemiske stoffer er indikert ved ODP-verdien (ozone depletion potential). ODP-skalaen er laget med R11 som referanse (ODP-verdi 1) og ozonreduksjonspotensialet for andre kjemikalier måles i forhold til denne referansen. I tabell 2.3 er ozonnedbrytingspotensialet for noen aktuelle arbeidsmedier oppgitt.

Kjølemedium	Atmosfærisk levetid (år)	ODP-verdi	GWP ₁₀₀ -verdi
R-11	45	1,0	4750
R-22	12	0,055	1810
R-134a	14	0	1430
R-404A	-	0	3900
R-407C	-	0	1800
R-717	0,01	0	<1
R-744	Varierer	0	0(1)

Tabell 2.3: ODP- og GWP-verdier for utvalgte kjølemedier (Owen, 2009)

2.10.3 Global oppvarming

Global oppvarming kommer som følge av drivhuseffekten. I utgangspunktet er dette en ønsket effekt, som er nødvendig for liv på jorden. Men det kan være et problem hvis menneskelig aktivitet øker denne effekten, Omtrent 70 % av solstrålingen som treffer jorda slipper gjennom atmosfæren og treffer jordskorpa, og bidrar til å varme den opp. Jorda virker omtrent som et svart legeme, og sender ut stråling med størst intensitet i det infrarøde spekteret. Deler av den infrarøde strålingen slipper ikke gjennom atmosfæren, men absorberes av vanndamp, karbondioksid eller andre drivhusgasser. På denne måten blir energien fanget innenfor jordas atmosfære, og temperaturen blir høyere enn den ville vært uten denne absorpsjonen. Det er dette som utgjør drivhuseffekten (McMullan, 2002).

Dersom konsentrasjonen av karbondioksid eller andre drivhusgasser i atmosfæren øker, kan andelen absorbert infrarød stråling øke, slik at temperaturen i atmosfæren øker og klimaet over lang tid endres (McMullan, 2002). Det er vanskelig å beregne effekten drivhusgassene har, siden utregningene er komplekse og avanserte (McMullan, 2002). Siden mange av aspektene ved drivhuseffekten og global oppvarming fortsatt er usikker, eksisterer det blant enkelte kritikere tvil om de menneskeskapte klimaendringene. Kritikerne er blant annet uenige i metodene for måling av både temperatur og CO₂-konsentrasjon. Enkelte mener også at eventuelle temperaturvariasjoner kan skyldes andre faktorer enn drivhusgasser, som sol-flekker eller økt solaktivitet. Det er også vanskelig å vite om økt CO₂-konsentrasjon i atmosfæren gir økt temperatur, eller om økt temperatur gir økt CO₂-konsentrasjon (McMullan, 2002).

Til tross for de kritiske røstene i den vitenskapelige debatten, regjerer det en allmenn overensstemmelse om å begrense utslippene av drivhusgasser (McMullan, 2002). Dette stemmer også godt overens med føre-var-prinsippet. I førsteomgang har fokuset vært å redusere utslippene av CO₂ fra forbrenningsprosesser, men i dag fokuseres det også på utslipp av metan og kjølemedier (McMullan, 2002).

For å beregne industrielle prosessers effekt på global oppvarming er det vanlig å benytte GWP-verdier (global warming potential). GWP er en indeks som beskriver potensialet for global oppvarming, sammenlignet med CO₂ fra forbren-

ningsprosesser (Owen, 2009), som har GWP-verdi 1. CO₂ brukt i kuldeprosesser eller varmepumper antas å ha GWP-verdi 0, siden den er gjenbruk av et avfallsstoff fra en annen industriell prosess. GWP kan regnes ut for ønsket tidsperiode, men det er mest vanlig å bruke verdier for 100 års tidshorisont (Owen, 2009). Atmosfærisk levetid og potensial for global oppvarming for ulike aktuelle arbeidsmedier er vist i tabell 2.3.

Ifølge Sekiya (2007) er man avhengig av variasjonene over tid for å kunne bestemme den stabiliserte konsentrasjonen av drivhusgassene i atmosfæren. Siden GWP bruker en fiksert verdi for en bestemt tidsperiode kan ikke en slik analyse gjennomføres med GWP. Sekiya (2007) mener også at perioden på 100 år virker å være for kort, siden den atmosfæriske levetiden ofte er mye lengre. For å beregne tidsvariasjoner i global oppvarming introduserer Sekiya (2007) TWPA (total warming prediction analysis) og CWP (composite warming potential), siden disse tar hensyn til variasjoner i tid. Metodene er beskrevet i artikkelen til Sekiya (2007).

Kjøling kan bidra til global oppvarming både direkte ved utslipp av kjølemedium, eller indirekte gjennom utslipp knyttet til energibruk. Det indirekte bidraget er vanligvis større enn det direkte bidraget, og for enkelte anlegg kan over 99 % skyldes energibruk (Calm, 2006).

Direkte påvirkning

Utslipp av kjølemedium til omgivelsene kan skje gjennom hele kuldemediets levetid, fra produksjon til kassering. Mesteparten av utslippene forekommer under drift. Disse utslippene skyldes stort sett lekkasje eller utblåsing, men utslipp kan også forekomme under vedlikehold av systemet, eller ved ulykker eller feil (Calm, 2002; Calm, 2006).

Tidligere var det ikke uvanlig at kjøleanlegg kunne ha lekkasje av over 30 % av det påfylte arbeidsmediet årlig. De beste kjølerne i dag begrenser de årlige lekkasjene til mindre enn 0,5 % (Calm, 2006). Lekkasje på opptil 15 % årlig er ikke uvanlig i kommersielle kjøleanlegg (Coulomb, 2008)

Lekkasje av kjølemedium drives av trykkforskjellen mellom kjølekretsen og omgivelsene. Dersom trykket i komponentene ligger høyere enn atmosfæretryk-

ket, kan kjølemedium lekke ut til omgivelsene. Hvis trykket er lavere enn atmosfæretrykket kan luft lekke inn i kjøleanlegget. I et kuldeanlegg som opererer ved relativt lave trykknivå kan man derfor regne med mindre lekkasje (Calm, 2006). Når en lekkasje først oppstår kan man i høytrykksanlegg miste store mengder arbeidsmedium i løpet av relativt kort tid (Calm, 2006). Selv om et undertrykk i systemet reduserer lekkasjemengden, er det lite ønskelig med luftlekkasje inn i systemet.

Utslippsreduksjon

Det finnes flere aktuelle metoder for å redusere utslippene av kjølemedium. Lekkasjemengden kan blant annet reduseres ved å forbedre forseglinger og skjøter. Det kan man oppnå blant annet ved å redusere antall skjøter, erstatte mekaniske koblinger med sveisede koblinger og med nye, tettere pakningsmaterialer og fugemasse (Calm, 2002). Gode vedlikeholdsrutiner kan også redusere utslippene. Med bedre varmeoverføring kan størrelsen til varmevekslere reduseres, og dermed også lekkasjetapene (Calm, 2002). Flere mulige mulige tiltak for utslippsreduksjon fra kjøleanlegg er beskrevet av Calm (2002).

Indirekte påvirkning

Et problem med GWP er at verdiene kun tar hensyn til utslipp av kuldemedium. Siden store deler av drivhusgassutslippene er knyttet til energibruken, kan GWP gi feilaktig informasjon om de totale utlippene ved sammenligning av ulike arbeidsmedier. Et annet mål for global oppvarming er derfor TEWI (total equivalent warming impact) som i tillegg til GWP også forsøker å ta hensyn til blant annet lekkasjemengder og energien som driver prosessen (McMullan, 2002). De energirelaterte utslippene avhenger av virkningsgraden, og varierer derfor for ulike kuldemedium (Calm, 2006).

På grunn av Norges spesielle energisituasjon er forholdet mellom direkte og indirekte innvirkning på global oppvarming forskjellig fra mange andre land. Utslippene av drivhusgasser er mye lavere ved produksjon av elektrisitet fra vannkraft enn fra fossile brensler. Siden det meste av Norges elektrisitetsforbruk dekkes av

vannkraft vil klimagassutslippene knyttet til elektrisitet være mindre enn i land som produserer elektrisitet fra fossile brensler (McMullan, 2002). Kuldeanleggenes direkte effekt vil derfor være av større relativ betydning i Norge.

Utslipp av drivhusgasser for forskjellige energiteknologier i livsløpsperspektiv (Sovacool, 2008) er vist i tabell 2.4. Den viser at energiteknologiene vindkraft, vannkraft, termisk solenergi og bioenergi har de laveste utslippene, men de er ikke utslippsfrie i livsløpsperspektiv. Utslippene knyttet til elektrisitetsproduksjon fra solceller, geotermisk energi og kjernekraft er noe høyere. Elektrisitetsproduksjon fra fossile brensler har de største drivhusgassutslippene (Sovacool, 2008). Tabellen viser at alle energiteknologier har utslipp knyttet ved seg i løpet av teknologiens livsløp. Størrelsen på det beregnede bidraget vil variere antagelsene til grunn for analysen. Man kan også forvente at det er store variasjoner blant ulike anlegg med samme teknologi.

Teknologi	Estimert utslipp (gCO ₂ /kWh)
Vindkraft	9–10
Vannkraft	10–13
Biogass	11
Termisk solenergi	13
Biomasse	14–41
Solcelle	32
Geotermisk energi	38
Kjernekraft	66
Naturgass	443
Brenselcelle (gassreforming)	664
Diesel	778
Tungolje	778
Kull	960–1050

Tabell 2.4: Drivhusgassutslipp for elektrisitetsproduksjon fra ulike energiteknologier (Sovacool, 2008)

I en forenklet studie viser McMullan (2002) TEWI for kuldeanlegg med R134a

og R744 (CO₂) plassert i Norge og USA. Resultatene er oppsummert i tabell 2.5. Dersom virkningsgrad og lekkasjemengde antas å være lik, vil R134a og R744 ha omtrent samme TEWI i USA. Det direkte bidraget vil for R134a-anlegget være kun 1 % av det indirekte bidraget fra elektrisitetsproduksjon, og enda mindre for R744-anlegget. I et R134a-anlegg med 10 ganger så stor lekkasje eller et CO₂-anlegg med 10 % reduksjon i virkningsgrad vil TEWI være den samme, ca. 10 % høyere enn de originale anleggene (McMullan, 2002).

Studien viser at forskjellen mellom TEWI for de to kuldemediene ville vært større i Norge. Det indirekte bidraget er negligjert siden McMullan antar at drivhusgassutslippene ved elektrisitetsproduksjon i Norge er lik 0. Siden det kun er direkte bidrag vil TEWI for R134a-anlegget være 1 % av verdien for USA, og ca. 1000 ganger større enn TEWI for R744-anlegget. I Norge vil 10 ganger høyere lekkasje av R134a gi 10 ganger høyere TEWI, mens redusert virkningsgrad for R744-anlegget ikke påvirker TEWI (McMullan, 2002). Studien er veldig forenklet, men viser likevel at direkte utslipp har større relativ betydning i Norge.

	R134a	CO ₂	R134a	CO ₂
	Liten lekkasje	Høy COP	Stor lekkasje	Lav COP
USA				
TEWI	393,9	390,003	429	429,003
Norge				
TEWI	3,9	0,003	39	0,003

Tabell 2.5: TEWI (kg CO₂ per år) for ulike anleggskonfigurasjoner (McMullan, 2002)

Siden den atmosfæriske levetiden til de ozonnedbrytende kjemikaliene som allerede er sluppet ut er så lang, vil det ta lang tid fra utslippene opphører til ozon-laget er fullstendig gjenopprettet. Det er også få muligheter for å akselerere gjenopprettningen av ozon-laget (Calm, 2008). Siden det er uklart hvilke mulige negative effekter dagens menneskeskapt kjemikalier kan ha i fremtiden, mener Calm (2008) at man bør unngå kjølemedier med lang atmosfærisk levetid. Da kan

man unngå at det har bygget seg opp store mengder av stoffene i atmosfæren når eventuelle bekymringer oppstår fremtiden. Det er i utgangspunktet ønskelig med så lav atmosfærisk levetid som mulig, men dersom den blir for kort (dager eller uker) og kjemikaliene brytes ned allerede før de når atmosfæren, kan resultatet bli smog eller annen lokal luftforurensing (Calm, 2008).

2.10.4 Miljøpåvirkning i kjølekjeden

For kjøleskap med R-134a som arbeidsmedium representerer utslipp av arbeidsmedium kun 1–2 % av det totale bidraget til global oppvarming, mens indirekte utslipp gjennom energibruk representerer hele 98–99 % (Billiard, 2005). Coulomb (2008) hevder at 98 % av klimagassutslippene fra kjøleskap er knyttet til energibruken. I Norge vil fordelingen sannsynligvis være noe annerledes siden det meste av elektrisiteten kommer fra fornybare energikilder med begrensede klimagassutslipp.

Selv om GWP er høyt, utgjør de direkte effektene kun 3–5 % av de totale drivhusgassutslippene i kjølere med R22 som arbeidsmedium. I anlegg med R134a er andelen omtrent 3 % (Calm, 2002).

2.10.5 Valg av kjølemedium

Det ideelle kjølemediet har ingen ozonnedbrytende effekt og bidrar ikke til global oppvarming, har høy virkningsgrad og er verken giftig eller brannfarlig. Det er også ønskelig at kuldemediet er billig, og at det har høy kjemisk og termisk stabilitet (Calm, 2002). Siden det ideelle kuldemediet ikke er funnet, må man ved valg av kjølemedium gjøre en avveining av de ulike kriteriene. Et arbeidsmedium med lavere ODP kan ha høyere GWP. Med mindre utslipp blir betydningen av GWP og ODP mindre for valg av kjølemedium (Calm, 2002).

Erstatninger for KFK og HKFK

Det finnes flere alternativer for erstatning av de tradisjonelle KFK- og HKFK-gassene, blant annet hydrofluorkarboner (HFK), perfluorkarboner (PFK), hydrokarboner (HK), i tillegg til karbondioksid, ammoniakk, luft og vann (McMullan,

2002). Hydrofluorkarbonene har ingen ozonnedbrytende effekt, kun drivhuseffekt. De naturlige kjølemediene (ammoniakk, CO_2 og hydrokarboner) har liten eller ingen drivhuseffekt. Usikkerhet omkring fremtidige problemer med menneskeskapte kjølemedier, taler for å velge naturlige kjølemedier i fremtidige anlegg.

Ammoniakk er et attraktivt kuldemedium i nye anlegg. Ammoniakk har ingen ozonnedbrytende effekt og bidrar ikke til drivhuseffekten, tabell 2.3. Ammoniakk er riktignok både brannfarlig og giftig, men med over 100 års utvikling av kjøleteknologi, er ammoniakk-systemer i både effektive, pålitelige og sikre (Pearson, 2008). En av fordelene med ammoniakk som kuldemedium er høy spesifikk fordampningsvarme. Dette gir høy volumetrisk kuldeytelse til tross for lav molekylvekt. Ammoniakk har høyt kritisk trykk (Pearson, 2008). På grunn av giftigheten er det begrenset hvilke områder ammoniakk kan betjene med direkte kjøling. Ammoniakk kan brukes i prosesser med indirekte kjøling, med vann, lake eller glykol som sekundærmedium. Ulempen med slik anlegg er at energibruken kan være opptil 10 % høyere enn for systemer med direkte kjøling (James og James, 2010).

Kapittel 3

Materialer og metode

For å kartlegge slakterilinjene for gris og muligheten for superkjølt produksjonslinje ble det gjennomført målinger på slakteriene Fatland Jæren AS og Fatland Ølen AS. Det ble det gjennomført målinger av produkttemperaturer, temperatur og relativ luftfuktighet i rom, og temperaturer og energibruk i kuldeanlegg. I tillegg til målinger på slakteri ble det gjennomført teoretiske beregninger av kjøletid i superkjølingslinje.

3.1 Måleinstrumenter

3.1.1 Temperatur og relativ luftfuktighet

Gul-logger

Målinger av temperatur og relativ luftfuktighet ble gjennomført med Tiny Tag PLUS 2 TGP-4500 (Gemini Data Loggers), videre kalt gul-loggere. Disse loggerne har en kapasitet på 32 000 målinger. Driftsområde for TGP-4500 er fra -40 °C til $+85\text{ °C}$, mens måleområdet ligger mellom -25 °C og $+85\text{ °C}$. For målingene av temperatur er nøyaktigheten $\pm 0,4\text{ °C}$ ved $+25\text{ °C}$, $\pm 0,8\text{ °C}$ ved -25 °C og $\pm 0,9\text{ °C}$ ved $+85\text{ °C}$.

For temperaturer mellom -25 °C og $+55\text{ °C}$ ligger arbeidsområdet mellom 0

og 100 % relativ luftfuktighet. Nøyaktigheten i målingene av relativ luftfuktighet er $\pm 3,0$ % ved $+25$ °C. Avlesing av loggedata ble gjennomført med EasyView 5 (Intab Interface-teknik AB), før dataene ble overført til Excel 2007 (Microsoft). Det ble benyttet 14 gul-loggere under målingene. Målingene ble logget med 2 minutter intervall.

Knappelogger

Målinger av temperatur ble gjennomført med iButton® DS1992L (Maxim Integrated Products, Inc.). Kapasiteten til disse loggerne er 8192 målinger. Driftsområdet ligger mellom -40 °C og $+85$ °C, med en målenøyakighet på $\pm 0,5$ °C i området (-10) – 65 °C. Avlesning av loggedata ble gjennomført med OneWireViewer (Maxim Integrated Products, Inc.), før dataene ble overført til Excel 2007.

Målingene ble gjort med 143 knappeloggere. Målingene ble logget med 2 minutter intervall. Knappeloggerne har begrenset levetid, og for redusere muligheten for å miste måleverdier dersom noen av loggerne stoppet eller ble borte, ble det så langt det var mulig brukt to loggere på hvert målepunkt.

3.1.2 Elektrisk effekt

Elektrisitetsforbruket i kompressorer i kuldeanleggene ble målt med fire Clamp On Power HiTester 3169-20 (HIOKI). For å koble effektmåleren til det elektriske anlegget ble klemmene 9667 Flexible Clamp On Sensor (HIOKI) brukt. Tabell 3.1 viser serienumrene til måleinstrumentene. Målingene ble brukt til å finne levert effekt og total energibruk. Etter gjennomført måling ble resultatene hentet ut fra effektmålerne og overført til Excel 2007. Målingene ble logget med 2 minutter intervall. Utstyret ble koblet til det elektriske anlegget av elektrikere på slakteriene.

3.2 Målinger på slakteri

Målinger på slakteriene Fatland Jæren og Fatland Ølen ble gjennomført i uke 18 2011. 3.–4. mai ble det gjort målinger på Fatland Jæren og 5.–6. mai ble det gjort

Kjennetegn	Serienummer
NM1	090408043
NM2	090417299
NM3	081008014
NM4	080711695

Tabell 3.1: Måleinstrumenter for måling av effekt. Clamp On Power HiTester 3169-20 (HIOKI).

målinger på Fatland Ølen. Målinger i transport fra Fatland Jæren til Fatland Ølen ble gjennomført 4.–5. mai. Det ble også gjennomført målinger i transport fra Fatland Ølen til Coop Norge AS Lager Trondheim 5.–6. mai. I tillegg til målingene i uke 18 2011 ble det gjennomført målinger på Fatland Ølen i oktober til november 2010. Målingene gjennomført i 2010 ble logget med tre minutter intervall.

3.2.1 Produkter

Produkttemperaturer i seks halve griseskrotter slaktet på Fatland Jæren og seks halve griseskrotter slaktet på Fatland Ølen, ble målt fra slakting til grovskjæring. I tillegg ble det gjennomført målinger i nakkestykkene, og noen av skinkestykkene, fra de seks halve griseskrottene fra Fatland Jæren, fra grovskjæring til distribusjonslager i Trondheim. Produkttemperaturene ble målt i overflate og i kjernen.

Overflatetemperaturen ble målt ved å stikke temperaturloggeren rett under huden på grisen, med siden som måler temperatur vendt utover. Målingen av overflatetemperatur ble foretatt i i overflaten på skinka. Slaktets kjernetemperatur ble målt i skinka. Loggeren ble plassert midt inne i den tykkeste delen av skinka, stukket ned i et hull laget med en kniv.

Det ble også plassert loggere midt i den tykkeste delen av nakken, for å finne kjernetemperaturen i nakken. Til målingene av kjernetemperatur ble det benyttet to temperaturloggere, mens det i overflatemålingen ble benyttet én logger. Måling

av kjernetemperatur ble vurdert som den viktigste målingen, og derfor ble to målere benyttet. Temperaturmålerene ble fjernet fra slaktene like før skjæring.

Svinenakke

Slaktene fra Fatland Jæren ble fulgt også etter skjæring. Temperaturloggerne plassert tilbake i nakke-stykkene, én logger i kjernen og én logger i overflaten. Etter skjæring har nakke-stykket et annet termisk midtpunkt, så temperaturloggeren i kjernen hadde en annen plassering enn før skjæring. Det ble også plassert loggere i tre av skinkene.

Temperaturloggerne satt i mens nakkene ble kjølt i et kjølerom kalt spesialfryser, og ble fjernet igjen like før de delvis fryste nakkene skulle hogges til koteletter. Temperaturloggerne ble så plassert i henholdsvis kjernen og overflaten til en kotelett, før kotelettene ble presset sammen til et stykke igjen og vakuumpakket i denne formen. Temperaturloggerne fulgte med nakkene inn på et kjølelager og med transport fra Ølen til Trondheim. Nakkene ble deretter brukt i superkjølingsforsøk og lagringsforsøk hos SINTEF Energi AS.

Gjennom hele slaktelinja ble slaktene og kjøttet med temperaturmålere fulgt av gul-loggere for måling av omgivelsestemperatur og relativ luftfuktighet. To loggere fulgte slakt fra Fatland Jæren, mens to loggere fulgte slakt fra Fatland Ølen. Gul-loggerne ble hengt rundt beinet på slakteskrottene.

Én gul-logger fulgte nakkestykkene under nedkjøling før hugging, og fire loggere fulgte nakkekotelettene under transporten til Trondheim. De øvrige gul-loggerne ble benyttet til måling av temperatur og relativ luftfuktighet i slakterilinjene.

3.2.2 Slaktelinje

Loggerne ble plassert i rom tilknyttet slaktelinjene for gris på Fatland Jæren og Fatland Ølen. Gul-loggerne ble prioritert brukt i de delene av slaktelinja hvor kjøttet oppholdt seg uemballert. Grunnen til dette var at mulighetene for vektta på grunn av fordunsting var størst i disse leddene i slaktelinja. Knappeloggere ble plassert i rom med emballert kjøtt og i omliggende rom for enkelte deler av

slaktelinjene.

3.2.3 Kuldeanlegg

Hverken Fatland Jæren eller Fatland Ølen har målinger av energibruk i ulike deler av slaktelinja. For å kunne vurdere energibruken i slaktlinja ble derfor temperaturer og energibruk i kuldeanlegg målt.

Kompressorer

Fatland Jæren har et to-trinns kuldeanlegg med tre kompressorer på hvert trinn. Effektmålerne ble prioritert brukt på de to største kompressorene på hver trinn, siden disse brukes til regulering av ytelsen. Den minste kompressoren på hvert trinn opererer med tilnærmet maksimal ytelse hele tiden. Den elektriske effekten levert til disse kompressorene ble kun målt et på ett enkelt tidspunkt.

På Fatland Ølen leveres kjølingen i slaktelinja av mange mindre, enkeltstående anlegg. To målere ble brukt til å dekke hver sin kompressor som leverer kjøling til spesialfryseren, del 1 og del 2. De to siste målerne målte effekten levert til kompressorene som leverer kjøling til kjølerommene for gris og storfe (felles kompressor), og kompressoren som leverer kjøling til hengehallen for slakt og kjølerommet for grovstykket kjøtt (felles kompressor).

For de samme kompressorene ble knappeloggere benyttet for å estimere arbeidsmediets temperatur ulike steder i kuldekretsen. Knappeloggene ble festet til uisolerte rør, med temperaturføleren vendt mot røret, og med et lag isolasjon utenpå. Loggerne ble festet med tape. Slike temperaturmålinger ble gjennomført ved kompressorens innløp og utløp, og ved utløpet av kondensatoren. I de delene av kuldekretsen arbeidsmediet opptrer i gassform ble loggerne forsøkt plassert på rørets overside, mens de for rør med væskefase ble plassert på undersiden.

Fordampere

Kjølelasten ytt av fordamperne ble forsøkt estimert ved hjelp ved å måle temperaturen i luftstrømmen inn og ut av fordamperne. For finne temperaturen ved innløp og utløp ble 2–3 knappeloggere feste til ståltråd hengt opp foran et tverrsnitt av

innløpet og utløpet. Der det var mulig ble loggerne plassert på fordampere, ellers ble de plassert i luftstrømmen så nær fordampere som mulig. Det ble også plassert 1–2 knappeloggere på fordamperrørene, for å finne fordampningstemperaturen, der det var gjennomførbart. Disse loggerne ble festet på samme måte som for kompressorene.

Det var flere steder vanskelig å komme til for å måle ved fordampere. På Fatland Jæren ble det kun gjennomført måling av lufttemperaturer inn og ut av fordampere på utligningsrommet for gris. På Fatland Ølen ble det gjennomført måling i kjølerommet for gris. Fordampere i spesialfryseren var ikke tilgjengelig, men lufttemperaturer inn og ut av fordampere ble forsøkt målt ved å henge knappeloggere så nær fordampere som mulig.

Med verdier for temperatur inn og ut av kompressor, og lufthastighet gjennom fordampere ble varme avgitt fra lufta estimert som

$$\dot{Q}_{luft} = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{V}\rho c_p\Delta T, \quad (3.1)$$

der \dot{V} er volumstrømmen (m^3/s), ρ og c_p er henholdsvis massetetthet (kg/m^3) og spesifikk varmekapasitet (kJ/kgK) for lufta, og ΔT er temperaturredifferansen mellom lufta inn og ut av kompressoren. I ligning (3.1) er det antatt konstant spesifikk varmekapasitet.

Den totale kuldeytelsen fra fordampere ble beregnet som

$$\dot{Q}_{fordampere} = \dot{Q}_{luft} + P_{vifte} + \dot{m}_{kondens}h_{fg}, \quad (3.2)$$

der P_{vifte} er vifteeffekten avgitt til lufta som varme (kW), $\dot{m}_{kondens}$ er massestrømmen av kondens på fordampereflaten og h_{fg} er den latente varmen fra vannets faseovergang til enten væske eller is på fordampereflaten, avhengig av fordampningstemperaturen.

Vekttap

Produktvekt ble målt flere steder i produksjonen, for å kunne sammenligne vekt-tapet i de to slaktelinjene. Veiingen ble gjennomført med vektene som brukes i produksjonen. Den første målingen fant sted rett etter slakting, etter at innvoller

og hode var fjernet, rett før nedkjølingen av slaktet begynte. Den siste veiingen ble foretatt på Ølen, rett før skjæring. Slaktene ble veid hele, det vil si totalvekten av de to halvdelene. I tillegg til de 3 slaktene med temperaturloggere, ble vekt registrert for 5 andre slakt fra hvert slakteri.

3.3 Produktlast

Produktlast under nedkjøling ble beregnet på bakgrunn av kjøttets komposisjon, og de termiske egenskapene til komponentene. Komposisjonen til ulike produkter ble hentet fra ASHRAE (2006), USDA (2009) og USDA (2010). Termisk konduktivitet, tetthet og spesifikk varmekapasitet for komponentene i maten ble beregnet med modeller utviklet av Choi og Okos (1986) (ifølge ASHRAE (2006)). For å finne produktlast under superkjøling ble også initialt frysepunkt og isfraksjon beregnet.

3.3.1 Initialt frysepunkt

Når temperaturen faller under det initielle frysepunktet begynner vann i væskeform å fryse til is i produktet. Når temperaturen stiger over det initielle frysepunktet smelter den siste mengden is i produktet. I de tilfeller der det den ikke var oppgitt, ble den initielle frysepunktstemperaturen beregnet med en korrelasjon utviklet av Chang (1981) (ifølge ASHRAE (2006)):

$$t_{if} = -1,97 + 1,47x_w. \quad (3.3)$$

I ligning (3.3) er t_{if} den initielle frysepunkttemperaturen ($^{\circ}\text{C}$) og x_w er massefraksjonen av vann i produktet.

Enkelte av produktene hentet fra ASHRAE (2006) hadde også informasjon om frysepunkt, basert på empiriske data. Disse verdiene ble ikke brukt i forbindelse med beregning av produktlast, siden de aktuelle temperaturene lå lavere enn initialt frysepunkt observert under tidligere arbeid ved SINTEF Energi (Indergård, E og Stevik, A., personlig kommunikasjon juni 2011). Verdiene gitt fra ligning (3.3) ga høyere verdi enn de empiriske dataene fra ASHRAE (2006), og ble derfor brukt i beregningene.

3.3.2 Isfraksjon

Basert på Raoults lov utviklet Chen (1985) (ifølge ASHRAE (2006)) dette estimat for massefraksjon av is i mat:

$$x_{ice} = \frac{x_s R T_0^2 (t_{if} - t)}{M_s L_0 t_f t}, \quad (3.4)$$

med

x_s = Total massefraksjon av tørrstoff

M_s = Molvekt av løselige tørrstoffer (kg/kmol)

R = Universell gasskonstant (kJ/kmolK)

T_0 = Frysepunkt for vann (K)

L_0 = Latent smeltevarme ved frysepunktet (kJ/kg)

t_{if} = Initialt frysepunkt (°C)

t = Mattemperatur (°C)

Av størrelsene i ligning (3.4) er molvekten av løselige tørrstoffer ukjent, men kan ifølge ASHRAE (2006) estimeres som

$$M_s = \frac{x_s R T_0^2}{-(x_w - x_b) L_0 t_{if}}. \quad (3.5)$$

Ved å bruke dette estimatet i ligning (3.4) fant Miles (1974) (ifølge ASHRAE (2006)) dette estimatet for isfraksjonen i mat:

$$x_{ice} = (x_w - x_b) \left(1 - \frac{t_f}{t}\right). \quad (3.6)$$

I ligning (3.5) og (3.6) er x_b massefraksjonen av bundet vann. Denne kan ifølge ASHRAE (2006) estimeres som

$$x_b = 0,4x_p, \quad (3.7)$$

der x_p er massefraksjonen av protein.

På grunn av erfaringer med at estimatet i ligning (3.6) overestimerer isfraksjonen ved lave temperaturer og underestimerer den ved høye temperaturer, utviklet Tchigeov (1979) (ifølge ASHRAE (2006)) en empirisk relasjon for estimering av isfraksjon:

$$x_{ice} = \frac{1,105x_w}{1 + \frac{0,7138}{\ln(t_{if} - t + 1)}} \quad (3.8)$$

Undesøkelser gjennomført av Becker og Fricke (1999), Fricke og Becker (2001) og Fricke og Becker (2002) viste (ifølge ASHRAE (2006)) at Chens estimat (ligning 3.4 ga det beste resultatet sammenlignet med eksperimentelle data, tett fulgt av Tchigeovs estimat (ligning (3.8)). Siden verdier for molmassen av oppløste stoffer ikke var kjent, ble Tchigeovs estimat benyttet i utregningene av isfraksjon.

3.3.3 Massetetthet

Massetettheten til kjøttet ble estimert som

$$\rho = \frac{1 - \varepsilon}{\sum_i x_i / \rho_i}, \quad (3.9)$$

der ε uttrykker matvarens porøsitet (ASHRAE, 2006). For kjøtt er porøsiteten lik 0.

3.3.4 Spesifikk varmekapasitet

Den spesifikke varmekapasiteten for mat kan, for temperaturer over det initielle frysepunktet, uttrykkes som

$$c_p = \sum_i (c_{p,i} x_i), \quad (3.10)$$

der $c_{p,i}$ og x_i er henholdsvis den spesifikke varmekapasiteten og massefraksjonen til komponent i . Under det initielle frysepunktet må man for den tilsynelatende spesifikke varmekapasiteten, i tillegg til følbare varme, også ta hensyn til latent varme fra faseovergangen mellom vann og is.

Schwarzberg (1981) utviklet (ifølge ASHRAE (2006)) en forenklet metode for å finne tilsynelatende spesifikk varmekapasitet under frysepunktet:

$$c_{p,a} = c_f + (x_w - x_b) \left(\frac{L_0 (t_0 - t_f)}{t_0 - t} \right). \quad (3.11)$$

I ligning (3.11) er c_f den spesifikke varmekapasiteten (kJ/kgK) i maten når den er fullstendig fryst (ved -40 °C), t_0 frysepunktet for vann (0 °C), t_f det initielle frysepunktet for maten (°C), t den aktuelle temperaturen i maten (°C), og L_0 den smeltevarmen for is (333,6 kJ/kg). Ved temperaturer lavere enn den som kreves for maksimal isfraksjon, kan ligning (3.10) igjen benyttes.

3.3.5 Spesifikk entalpi

Den spesifikke varmekapasiteten c_p er gitt som

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p. \quad (3.12)$$

Man kan derfor finne den spesifikke entalpien h ved å integrere c_p over temperaturen T :

$$h = \int c_p dT. \quad (3.13)$$

Ved å benytte ligning (3.10) får man entalpien for matenheten:

$$h = \int \sum_i c_{p,i} x_i dT = \sum_i x_i \int c_{p,i} dT. \quad (3.14)$$

For temperaturer under det initielle frysepunktet må man, som for den spesifikke varmekapasiteten, ta hensyn til den latente varmen fra faseovergangen mellom is og vann. En mulighet er da å integrere den tilsynelatende spesifikke varmekapasiteten, gitt ved for eksempel ligning (3.11) (ASHRAE, 2006).

Dersom man kjenner isfraksjonen x_{ice} ved den aktuelle temperaturen kan man finne entalpien ved å anta at alt vannet ble frosset ut ved 0 °C og regne ut smeltevarmen for isfraksjonen ved 0 °C. Uttrykket for den totale spesifikke entalpien blir da:

$$h = \sum_i x_i \int c_{p,i} dT + x_{ice} h_{fg,0}, \quad (3.15)$$

der x_{ice} betraktes som is, mens den resterende vannfraksjonen $x_w - x_{ice}$ betraktes som væske. Isfraksjonen behandles som vann ved temperaturer over 0 °C og som is ved temperaturer under 0 °C. De andre komponentene behandles på samme måte som ved temperaturer over det initielle frysepunktet. I utregningene av spesifikk entalpi ble 0 °C valgt som referanse, det vil si spesifikk entalpi lik 0. Smeltevarmen $h_{fg,0}$ er lik smeltevarmen ved frysepunktet for rent vann, 0 °C.

Termisk konduktivitet

Den termiske konduktiviteten for de ulike komponentene er oppgitt som funksjon av temperaturen i modellen til Choi og Okos (1986) (ifølge ASHRAE (2006)). I

et matstykke er konduktivitet, i tillegg til komposisjon og temperatur, avhengig av strukturen.

Murakami og Okos (1989) la (ifølge ASHRAE (2006)) fram en mulighet for å beskrive konduktiviteten i mat som komponenter med ulik konduktivitet koblet i serie eller parallell, som en analogi til elektrisk motstand. Konduktivitet parallelt med muskelfiberne kan uttrykkes slik:

$$k_{\parallel} = \sum_i x_i^v k_i, \quad (3.16)$$

der

$$x_i^v = \frac{x_i/\rho_i}{\sum_n x_n/\rho_n} \quad (3.17)$$

er volumfraksjonen av komponent i . Konduktiviteten vinkelrett på muskelfiberne kan uttrykkes slik:

$$k_{\perp} = \frac{1}{\sum_i (x_i^v/k_i)}. \quad (3.18)$$

k_{\parallel} og k_{\perp} representerer øvre og nedre grense for konduktiviteten i de fleste matvarer (ASHRAE, 2006).

3.4 Kjølelast

I tillegg til produktlasten må kuldeanleggene fjerne varme på grunn av transmisjon, infiltrasjon og interne laster i kjølerommet.

3.4.1 Transmisjon

På grunn av temperaturdifferansen mellom det nedkjølte rommet og omgivelsene, vil varme trenge inn i kjølerommet gjennom konstruksjonen. Under stasjonære forhold, er den følbare varmestrømmen gjennom en vegg, et tak eller et gulv gitt som

$$q = UA\Delta t, \quad (3.19)$$

hvor U er den totale varmegjennomgangstallet for en flate, A er arealet av flaten og Δt er temperaturdifferansen mellom rommet og omgivelsene (ASHRAE, 2006).

	Østvendt	Sørvendt	Vestvendt	Flatt tak
Overflate	[K]	[K]	[K]	[K]
Mørk flate	5	3	5	11
Middels mørk	4	3	4	9
Lys flate	3	2	3	5

Tabell 3.2: Temperaturjustering av utetemperatur for beregning av transmisjonsvarme gjennom solutsatte flater. Virkningen av sollyset estimert som økning i utetemperaturen (ASHRAE, 2006).

Varmegjennomgangstallet avhenger av veggkonstruksjonen, og varmeovergangen ved de to overflatene.

For en flate er U-verdien gitt som

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_i \frac{x_i}{k_i} + \frac{1}{h_o}}, \quad (3.20)$$

der h_i og h_o er koeffisientene for overflatekonveksjonen på henholdsvis innsiden og utsiden, mens x_i og k_i er tykkelsen av og konduktiviteten til parallelle sjikt av de ulike materialene i vegg (ASHRAE, 2006).

Dersom en flate vender utendørs vil sollyset kunne påvirke transmisjonsvarmen gjennom flaten. Sollysets påvirkning kan estimeres gjennom en økning av utendørstemperaturen, avhengig av himmelretningen og overflaten. Gjennomsnittsverdier for et døgn er gitt i tabell 3.2 (ASHRAE, 2006).

3.4.2 Infiltrasjon

Infiltrasjonsvarme skyldes at kald luft fra det kalde rommet byttes ut med varm luft fra utsiden, gjennom åpninger i konstruksjonen. Den gjennomsnittlige infiltrasjonsvarmen gjennom en døråpning er

$$q_t = qD_t D_f (1 - E), \quad (3.21)$$

der q er varmekraften ved fullstendig etablert strømming gjennom døråpningen, D_t er tidsfraksjonen døra står åpen, D_f er døras strømningsfaktor og E er effek-

tiviteten til eventuelle hindringer i døråpningen (ASHRAE, 2006).

Gosney og Olama (1975) utviklet (ifølge ASHRAE (2006) denne ligningen for infiltrasjonslasten ved fullstendig etablert strømning:

$$q = 0,221A(h_i - h_r)\rho_r \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_r}\right)^{0,5} (gH)^{0,5} F_m, \quad (3.22)$$

hvor

$$F_m = \left(\frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_r}{\rho_i}\right)^{1/3}} \right)^{1,5}. \quad (3.23)$$

A er størrelsen på døråpningen, H er høyden på døråpningen og g er gravitasjonskonstanten. h_i og h_r er den spesifikke entalpien til henholdsvis infiltrasjonslufta og lufta i kjølerommet, mens ρ_i og ρ_r er tettheten til de to luftstrømmene.

Tidsfaktoren D_t i ligning (3.21) uttrykker andelen av tida døra står åpen. For en tidsperiode θ_d er tidsfaktoren

$$D_t = \frac{(P\theta_p + 60\theta_o)}{3600\theta_d}. \quad (3.24)$$

I ligning (3.24) er P antallet ganger døra blir åpnet i løpet av tidsperioden θ_d og θ_p er tiden det tar fra døren åpnes til den er lukket igjen ved en vanlig passasje. For en konvensjonell svingdør, ligger θ_p vanligvis mellom 15 og 25 sekunder, mens den for raskere dører kan være nede i 3 sekunder (ASHRAE, 2006). θ_o benyttes dersom døra blir stående oppe utover åpne-lukke-tiden, og er summen av tiden døra står åpen.

Strømningsfaktoren D_f i ligning (3.21) uttrykker forholdet mellom strømningsforholdene i den aktuelle situasjonen, sammenlignet med en fullstendig utviklet strømning. I en dør som står åpen over tid, uten hindringer i strømningslinjen, vil D_f derfor være lik 1. Når en dør åpnes tar det ca. 3 sekunder til fullstendig strømning er etablert, og for kortere åpningstider vil D_f derfor kunne være ulik 1. Hendrix et al. (1989) anbefaler (ifølge ASHRAE (2006)) D_f lik 1,1 dersom temperaturdifferansen mellom kjølerommet og infiltrasjonslufta er mindre enn 11 °C, og D_f lik 0,8 dersom temperaturdifferansen er større.

For å redusere infiltrasjonslasten kan man installere hindringer i døråpningen. Med luftsluse og skyvedør eller dør med plastgardin kan infiltrasjonen reduseres

med inntil 95 %. Verdien av E i ligning (3.21) blir da 0,95. For dører uten hindringer vil E være lik 0 (ASHRAE, 2006).

3.4.3 Internlast

I tillegg til transmisjon og infiltrasjon må kuldeanlegget fjerne varme fra utstyr og persontrafikk. Lys, truck og prosesseringsutstyr avgir varme til rommet. I tillegg vil viftene i kuldeanlegget avgi varme.

Varmen avgitt av personer kan estimeres som

$$q_p = 272 - 6t, \quad (3.25)$$

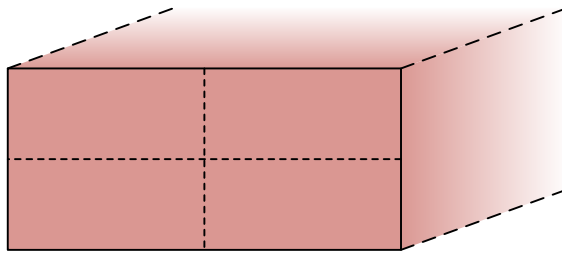
der t er temperaturen i rommet (ASHRAE, 2006). Ligning (3.25) gir varmetilskuddet som effekt (W). Personer som kommer inn i rommet fra varmere omgivelser har med seg ekstra overflatevarme. Dersom det er mye trafikk inn og ut, er et konservativt estimat å multiplisere ligning (3.25) med 1,25 ifølge ASHRAE (2006).

3.5 Numeriske beregninger

Nedkjølingstid for hele stykker av nakke i skallfryser ble estimert ved hjelp av FVM (finite volume method). I simuleringene ble kjøttstykket estimert som en rektangulær søyle med uendelig lengde. Problemet ble på denne måten forenklet til et to-dimensjonalt tilfelle, og beregningene ble gjennomført for et tverrsnitt av kjøttstykket, som vist i figur 3.1. I figur 3.2 er tverrsnittet av en nakkekotelett med bein vist.

Ved å anta at kjøttstykket hadde uniform komposisjon, ble det utnyttet at de termiske egenskapene i tverrsnittet ville være symmetrisk om akser vertikalt og horisontalt gjennom midten av tverrsnittet. Simuleringene ble derfor gjennomført for én fjerdedel av tverrsnittet. Denne delen ble delt opp i NI celler i bredden og NJ celler i høyden, som vist i figur 3.3.

Varmetransporten i kjøttstykket er gitt av den to-dimensjonale, transiente



Figur 3.1: Tverrsnitt av kjøttstykke estimert som en uendelig rektangulær søyle.



Figur 3.2: Bilde av nakkekotelett (Foto: Erlend Indergård, SINTEF Energi AS).

konduksjonsligningen:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.26)$$

I ligning (3.26) er c_p den spesifikke varmekapasiteten, T temperaturen, t tiden, k den termiske konduktiviteten, og x og y bredde og høyde i kartesiske koordinater. For den termiske konduktivitet ble ligning (3.18) brukt. Muskelfiberne i kjøttet går vinkelrett gjennom tverrsnittet, så varmeledningen både i x- og y-retning går vinkelrett på fiberretningen.

Siden verdiene for den spesifikke varmekapasiteten endrer seg mye rundt det initielle frysepunktet ble utregningen delt opp i to utregninger. Først ble entalpiendringen for hver enkelt celle estimert. Deretter ble denne entalpiendringen brukt til å estimere nye verdier for temperatur og isfraksjon i hver enkelt celle.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\perp} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{\perp} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.27)$$

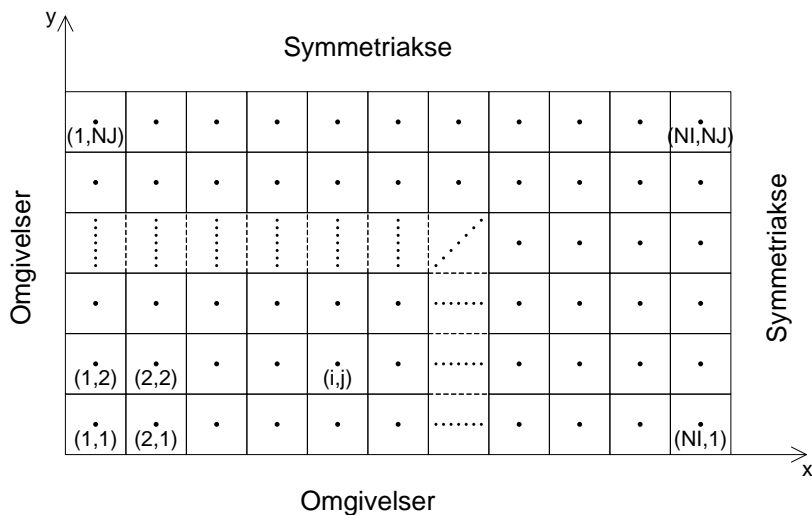
Utregningene ble gjennomført med et ekvidistant rutenett med $NI \times NJ$ celler, som vist i figur 3.3. Verdier for temperatur og isfraksjon ble regnet ut for sentrum av hver celle, med dimensjon $\Delta x \times \Delta y$. Det ble antatt at tettheten var konstant under kjølingen, slik at cellenes masse var konstant. Massen av hver enkelt celle var da:

$$\Delta m = \rho \Delta x \Delta y. \quad (3.28)$$

Utregningen av entalpi ble også regnet ut i to steg. Først ble netto varme inn i hver enkelt celle beregnet, og deretter endringen i spesifikke entalpi. Med Eulers eksplisitte metode for tiden og sentral FVM kunne netto varme inn i en intern celle P, som vist i figur 3.4, uttrykkes slik:

$$\dot{Q}_P = \dot{q}_{P,e} - \dot{q}_{P,w} + \dot{q}_{P,n} + \dot{q}_{P,s} \quad (3.29)$$

$$\dot{Q}_P = \left(k_{\perp} \frac{\partial T}{\partial x} A \right)_e - \left(k_{\perp} \frac{\partial T}{\partial x} A \right)_w + \left(k_{\perp} \frac{\partial T}{\partial y} A \right)_n - \left(k_{\perp} \frac{\partial T}{\partial y} A \right)_s \quad (3.30)$$



Figur 3.3: Rutenett med NI celler i bredden og NJ celler i høyden, for beregning av kjøletid i skallfryser.

Esitmering med sentral FVM i rom, og ekvidistant grid, ga

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_e = \frac{T_E - T_P}{x_E - x_P} = \frac{T_E - T_P}{\Delta x} \quad (3.31a)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_w = \frac{T_P - T_W}{x_P - x_W} = \frac{T_P - T_W}{\Delta x} \quad (3.31b)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_n = \frac{T_N - T_P}{x_E - x_P} = \frac{T_N - T_P}{\Delta y} \quad (3.31c)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_s = \frac{T_P - T_S}{x_P - x_S} = \frac{T_P - T_S}{\Delta y} \quad (3.31d)$$

og

$$A_e = A_w = \Delta y \quad (3.32a)$$

$$A_n = A_s = \Delta x. \quad (3.32b)$$

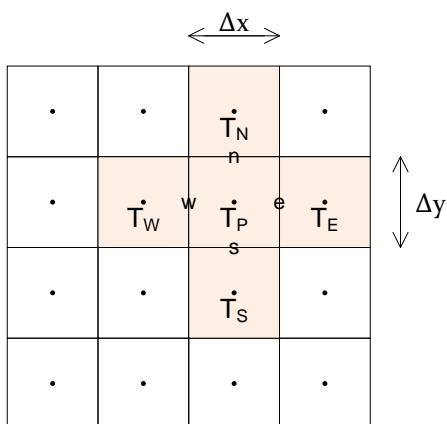
For den termiske konduktiviteten ble aritmetisk middelvei brukt:

$$k_{\perp,e} = \frac{k_{\perp,E} + k_{\perp,P}}{2} \quad (3.33a)$$

$$k_{\perp,w} = \frac{k_{\perp,P} + T_{\perp,W}}{2} \quad (3.33b)$$

$$k_{\perp,n} = \frac{k_{\perp,N} + k_{\perp,P}}{2} \quad (3.33c)$$

$$k_{\perp,s} = \frac{k_{\perp,P} + k_{\perp,S}}{2}. \quad (3.33d)$$



Figur 3.4: Celle P i rutenett, med grenser e, w, n, s og naboceller E, W, N, S.

3.5.1 Betingelser

Som grensebetingelse for den nordlige grensen, symmetrilinje, ble det antatt varmestrøm lik 0, det vil si

$$\dot{Q}_{P,n} = \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_n = 0. \quad (3.34)$$

Det samme ble antatt for den østlige grensen:

$$\dot{Q}_{P,e} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_e = 0. \quad (3.35)$$

For den vestlige grensen ble det antatt konvektive varmeovergang med overflatetemperatur lik T_P :

$$\dot{Q}_{P,w} = h_{surface} (T_P - T_{air}) \Delta y \quad (3.36)$$

Varmestrømmen på den sørlige grensen ble estimert på samme måte:

$$\dot{Q}_{P,s} = h_{surface} (T_P - T_{air}) \Delta x. \quad (3.37)$$

Som initialbetingelse ble det antatt at produktet hadde uniform temperatur T_0 , og uniform isfraksjon før kjølingen begynte.

3.5.2 Temperatur og spesifikk entalpi

Etter å ha regnet ut verdier for netto varme inn i hver enkelt celle, ble spesifikk entalpi (kJ/kg) i hver enkelt celle regnet ut som:

$$\Delta h_P = \frac{\dot{Q}_P \Delta t}{1000 \Delta m}, \quad (3.38)$$

med \dot{q}_P (W), Δt (s) og Δm (kg).

For å finne frysepunkttemperaturen i en matvare med is, ble Tchigeovs estimat for isfraksjon, ligning (3.8), brukt. Med Tchigeovs estimat ble uttrykket for frysepunktstemperatur t_f slik:

$$t_f = t_{if} + 1 - \exp\left(\frac{0,7138}{1,105x_w/x_{ice} - 1}\right), \quad (3.39)$$

der x_w er den totale massefraksjonen av vann (både væske og is), mens x_{ice} er massefraksjonen av is. For hvert tidsskritt ble frysepunkttemperaturen regnet ut med den gjennomsnittlige isfraksjonen. Det ble antatt at hele kjøttstykket hadde samme frysepunkt.

Smeltevarmen ved det nye frysepunktet ble beregnet som:

$$h_{fg,t_f} = h_{fg,0} + h_{water}(t_f) - h_{ice}(t_f), \quad (3.40)$$

der $h_{water}(t_f)$ og $h_{ice}(t_f)$ er den spesifikke entalpien til henholdsvis vann og is ved temperaturen t_f .

For å bestemme temperatur og isfraksjon i hver enkelt celle ble det for hvert tidsskritt regnet ut entalpigrenser for maksimal isfraksjon, h_{maxice} og minimal isfraksjon (frysepunktet), h_{freeze} . Disse grensene ble regnet ut med ligning (3.15), med temperatur lik frysepunktet t_f . For h_{maxice} ble isfraksjonen satt lik $x_w - x_b$, mens for h_{freeze} ble isfraksjonen satt lik 0.

Den spesifikke entalpien i cella kan tenkes å være i én av tre mulige tilstander. I tilstand 1 ligger den spesifikke entalpien i cella høyere enn h_{freeze} og det vil ikke være noe is i cella. I tilstand 2 er at den spesifikke entalpien lavere enn h_{maxice} , og alt fritt vann er fryst. Den tredje tilstanden ligger et sted i mellom med spesifikke entalpi lavere enn h_{freeze} , men høyere enn h_{maxice} . I denne tilstanden vil kun en andel av det frie vannet være fryst.

Dersom den spesifikke entalpien i cella er i samme tilstand, 1 eller 2, både før og etter et tidsskritt, vil det ikke være noen endring av isfraksjonen i cella. Den nye temperaturen ble da estimert ved bruk av konstant spesifikk varmekapasitet, evaluert ved den gamle temperaturen i cella:

$$T_P^{n+1} = T_P^n + \frac{\Delta h_P}{c_p(T_P^n)}. \quad (3.41)$$

For tilfeller der entalpien i cella lå mellom h_{freeze} og h_{maxice} både før og etter tidsskrittet, ble temperaturen satt lik frysetemperaturen t_f , og ny isfraksjon regnet ut som

$$x_{ice,P}^{n+1} = x_{ice,P}^n + \frac{\Delta h_P}{h_{fg}(t_f)}. \quad (3.42)$$

Dersom tilstanden før og etter tidsskrittet ikke var den samme, tilstanden i cella først satt lik grensetilstanden nærmest den nye tilstanden, enten maksimal isfraksjon eller ingen isfraksjon. Deretter ble det regnet ut en ny verdi for $\Delta h_{i,j}$, ved å trekke fra entalpidifferansen mellom tilstanden i cella før tidsskrittet og den aktuelle grensetilstanden, h_{freeze} eller h_{maxice} .

Den nye temperaturen og isfraksjonen i cella ble regnet ut med den nye verdien for $\Delta h_{i,j}$, og ligning (3.41) eller (3.42), avhengig av tilstanden etter tidsskrittet. Dersom den nye entalpien i cella etter lå mellom verdiene h_{freeze} og h_{maxice} , ble temperaturen i cella satt lik frysepunktet t_f .

3.5.3 Nedkjøling

Utregningene ble stoppet når den gjennomsnittlige spesifikke entalpien i cellene var mindre enn den ønskede spesifikke entalpien i produktet etter utligning.

3.5.4 Utligning

Utligningstiden før produktet får uniform is- og temperaturfordeling kan simuleres på samme måte. Resultatet fra simuleringen av superkjølingsprosessen brukes da som initialbetingelse. Siden temperaturen i skallet er lavere enn lagringstemperaturen, vil produktet i begynnelsen ta opp varme fra omgivelsene. For at sluttproduktet skal ha samme entalpi som etter superkjølingen, må produktet avgi noe varme igjen mot slutten av utligningsprosessen.

Varmeovergangstallet ved utligning vil være mye mindre enn under superkjøling, på grunn av mye lavere lufthastighet. Som en forenkling kan man anta at produktet i utligningsprosessen ikke utveksler varme med omgivelsene, men at det kun foregår intern varmeoverføring.

For å estimere utligningstiden ble 2-normen,

$$\|T\|_2 = \left(\Delta x \Delta y \sum_{i=1}^{NI} \sum_{j=1}^{NJ} T_{i,j} \right)^{1/2} \quad (3.43)$$

brukt. Simuleringen ble stoppet når tonormen av temperaturendringen i løpet av et tidsskritt var tilstrekkelig mindre enn tonormen av temperaturendringen i det første tidsskrittet:

$$\|T^{n+1} - T^n\|_2 \leq \epsilon \|T^1 - T^0\|_2. \quad (3.44)$$

Programmeringen ble gjennomført i Fortran90, og Matlab (MathWorks) ble brukt til plotting av grafer. For egenskaper for kjølemedier og luft ble Rnlib og hx(p)lib (SINTEF) brukt. Disse er tilleggspakker i Excel. Programmeringskoden er vist i vedlegg E.

Kapittel 4

Resultater

4.1 Slakterilinjer

Fatland AS er et familieselskap som ble etablert i 1892. I dag har Fatland slakterier på Ølen, Jæren og i Oslo, i tillegg til egen foredlingsavdeling i Sandefjord. Fatlands største kunder er dagligvarekjedene Coop og Norgesgruppen. Selskapet hadde i 2009 en omsetning på 2,217 milliarder kroner. Tall fra 2009 viser en slaktemengde på 30 700 tonn, skjæremengde 32 300 tonn og foredling av 23 000 tonn. Totalt hadde Fatland-konsernet rundt 540 ansatte i 2008 (Fatland, 2009; Fatland, 2010).

Gris blir slaktet både på Fatland Jæren og Fatland Ølen. De to slakteriene samarbeider om nedkjøring av slakt, alt grisekjøtt skjæres på Fatland Ølen og alt storfekjøtt skjæres på Fatland Jæren. Etter kjøling og utligning blir gris slaktet på Jæren transportert til Ølen. Etter skjæring på Fatland Ølen blir en del av produktene sendt ut til grossist for salg, mens andre produkter sendes til andre anlegg for videre bearbeiding. Beskrivelsen av slaktelinjene er basert på observasjoner gjort under opphold på slakteriet, målinger gjennomført på slakteriet og informasjon fra ansatte i Fatland AS.

4.1.1 Slakterilinje Fatland Jæren

Slaktetall for Fatland Jæren 3. mai 2011 er vist i tabell 4.1. Det ble hovedsaklig slaktet gris denne dagen. En skisse av slakterilinja på Fatland Jæren med tidspunkter observert under oppholdet på slakteriet er vist i figur B.1 i vedlegg B.

Slakt	Antall	Totalvekt (kg)	Snittvekt (kg)
Gris	477	40419	84,7
Storfe	70	26177	374,0

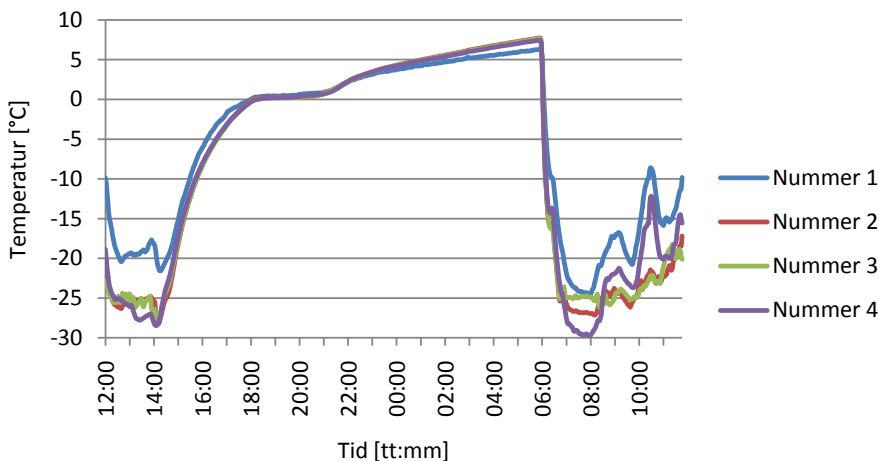
Tabell 4.1: Slaktemengder Fatland Jæren 3. mai 2011

Nedkjøling

Umiddelbart etter slakting og veiing startes kjølingen av griseslaktene. Slakteriet Fatland Jæren AS benytter rask nedkjøling av griseslakt. Med rask nedkjølingen senkes temperaturen i slaktet raskt nok til at slaktet kan sendes til slakteriet på Ølen samme dag som de slaktes, og skjæringen av slakt kan da begynne dagen etter slakting. For å oppnå rask kjøling benytter Fatland Jæren en sjokk-kjøler. I sjokk-kjøleren er temperaturen lav og lufthastigheten høy, slik at slaktets overflatetemperatur synker raskt. Settpunkttemperaturen i sjokk-kjøleren er $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Halve griseskrotter følger en hengebane gjennom sjokk-kjøleren, og hver gris oppholder seg ca. 70 minutter i sjokk-kjøleren. Sjokk-kjølerens utforming, med hengebaner og plassering av fordampere, er illustrert i figur C.1 i vedlegg C. Under korte opphold i slaktingen stoppes framdriften i hengbanen, samtidig som sjokk-kjøleren er i drift. Kjøletiden i sjokk-kjøleren blir derfor opp mot 80 minutter for noen av slakteskrottene (Fatland Jæren, personlig kommunikasjon).

Temperaturen i sjokk-kjøleren 3.–4. mai 2011 er vist i figur 4.1. Da kjølingen av de første slaktene begynte morgenen 4. mai var temperaturen nede på settpunktet, men sjokk-kjøleren klarte ikke å holde temperaturen nede under kjølingen utover formiddagen. Målingene viste høyest temperatur nærmest inngangen til sjokk-kjøleren. På dette punktet har slakteskrottene fremdeles høy overflatetemperatur, og den åpne inngangen gir luftstrømning mellom sjokk-kjøleren og det



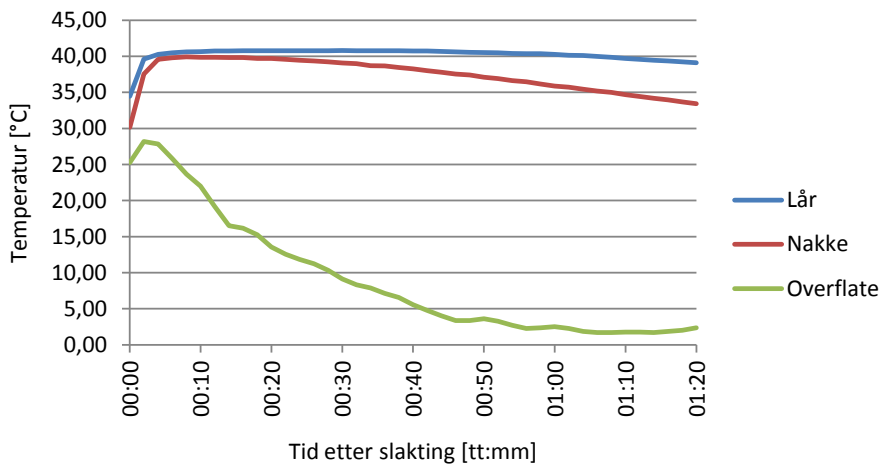
Figur 4.1: Temperatur i sjokk-kjøler Jæren 3.–4. mai 2011. Plasseringen av måleinstrumentene er vist i figur C.1

omgivende utligningsrommet.

Fordamperene i sjokk-kjøleren er kun i drift når den brukes til kjøling. Etter at det siste slaktet har passert gjennom, skrur kjølingen av, og temperaturen i sjokk-kjøleren stiger. Fordamperne i sjokk-kjøleren blir derfor satt i drift ca. 1 time før den første grisen er ferdig slaktet, for å senke temperaturen til ønsket nivå innen den første grisen er slaktet og veid (Hjelmtveit, M., personlig kommunikasjon 3. mai 2011). Som vist i figur 4.1 steg temperaturen i sjokk-kjøleren til over 5 °C i løpet av natten det døgnet målingene ble gjennomført.

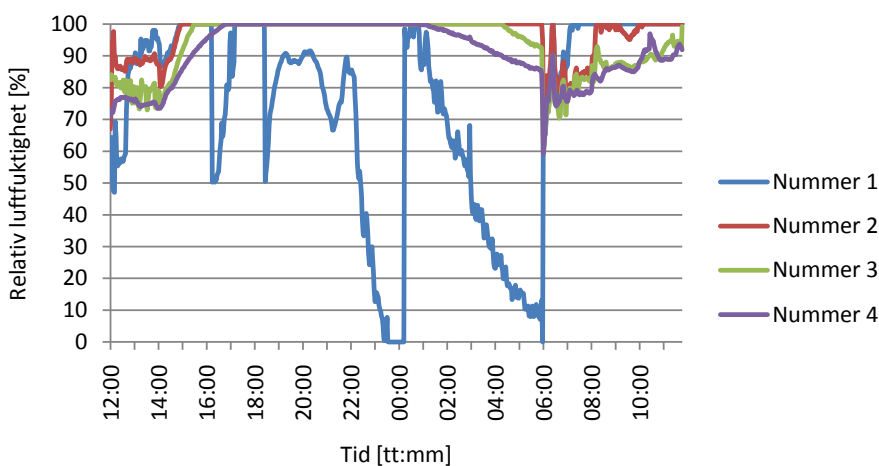
Målte temperaturer i lår, nakke og overflate for griseslaktene under oppholdet i sjokk-kjøleren er vist i figur 4.2. Verdiene i figuren er gjennomsnittet av verdiene for seks halve griseskrotter. Overflatetemperaturen sank raskt, og var under 3 °C ved utløpet av sjokk-kjøleren. I kjernen i låret var temperaturendringen liten, under 2 °C temperaturdifferanse mellom innløp og utløp. Temperaturen i kjernen i nakken, som er tynnere, sank mer, og temperaturdifferansen mellom innløp og utløp var ca. 6 °C.

Målinger av relativ luftfuktighet er vist i figur 4.3. I driftstiden lå målt re-



Figur 4.2: Temperatur i griseslakt i sjokk-kjøler Fatland Jæren 3. mai 2011. Verdiene i figuren er gjennomsnittet av målingene i seks halve griseskrotter. Temperaturloggerne var plassert i kjernen i låret, kjernen i nakken og overflaten på låret. Slaktene oppholdt seg i sjokk-kjøleren i ca. 76 minutter.

lativ luftfuktighet på de fire punktene i sjokk-kjøleren mellom 70 % og 100 %. Måleinstrumentet plassert ved innløpet av sjokk-kjøleren (nummer 1) ga større variasjon i måleverdiene enn de andre målerne. Forskjellen i relativ luftfuktighet på de forskjellige målepunktene kan delvis skyldes forskjellen i temperatur. Figur D.3 i vedlegg D viser den absolutte fuktigheten ved de forskjellige målepunktene, basert på målingene av temperatur og relativ luftfuktighet. I begynnelsen av måleperioden, mellom kl. 12.00 og kl. 00.00, var den absolutte luftfuktigheten registrert ved målepunktene 2, 3 og 4 lik.



Figur 4.3: Relativ luftfuktighet i sjokk-kjøler Jæren 3.–4. mai 2011. Plasseringen av måleinstrumentene er vist i figur C.1 i vedlegg C

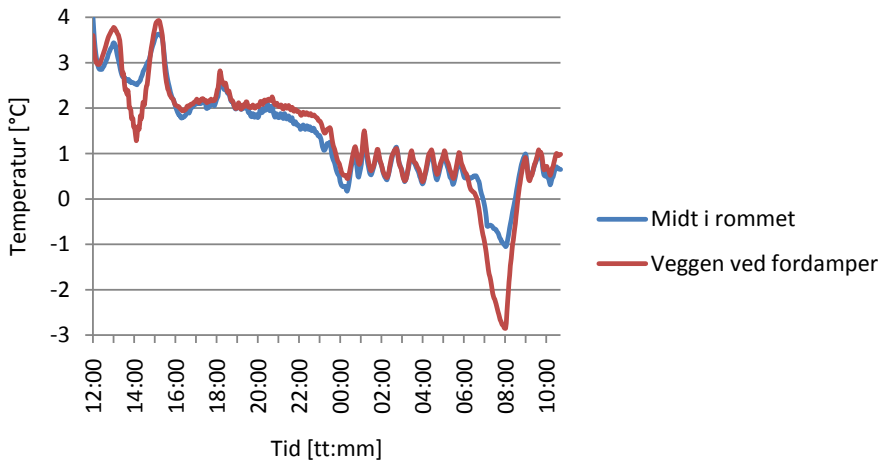
Utligning

Etter oppholdet i sjokk-kjøleren følger griseskrottene en hengebane videre til et kjølt utligningslager. Hensikten med utligningslageret er både utjevning av temperaturen etter sjokk-kjøleren, og ytterligere senking av temperaturen før transport. Fatland Jæren har tre utligningsrom plassert ved utgangen av sjokk-kjøleren. Det største rom fylles først, før de andre rommene eventuelt fylles,

dersom det er nødvendig.

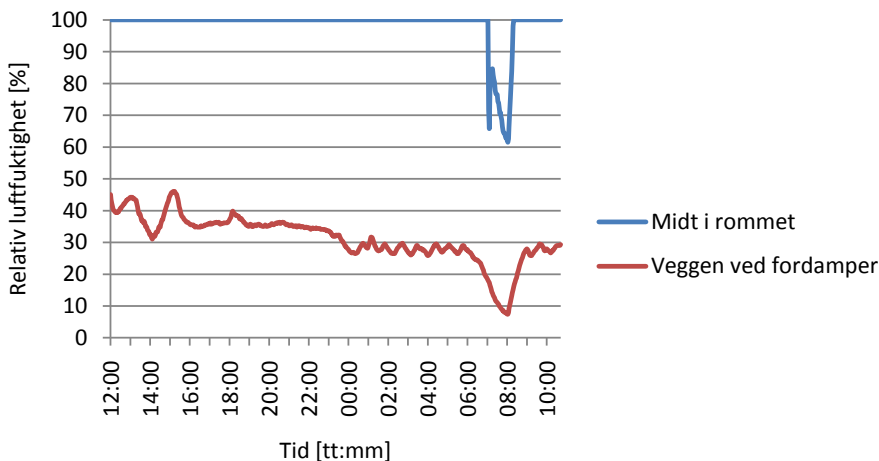
De halve grisekrottene henger på utligningslageret fram til de skal transporteres til Fatland Ølen, eller de flyttes til et hengelager. Med dagens produksjon trengs det mer enn én transport daglig for å få transportert alle slaktene. De første blir transportert natten etter slaktning, en full transport med kun svine-slakt. Siden kjølingen har kommet lengst, sendes grisene som ble slaktet tidligst på dagen med den første transporten. Tidspunktet for den første transporten er ca. kl. 24 (Fatland Jæren, personlig kommunikasjon 3. mai 2011).

De resterende slaktene som ikke kommer med den første transporten blir transportert neste dag, ca. kl. 14. I tillegg til griseslakt, inneholder denne transporten andre produkter som skal sendes til Fatland Ølen for videreforedling eller pakking. Grisekrottene som sendes med ettermiddagstransporten plasseres på et hengelager ettermiddagen etter slaktning, og henger der fram til de skal transporteres (Fatland Jæren, personlig kommunikasjon 3. mai 2011).



Figur 4.4: Temperatur i utligningsrom for gris Fatland Jæren, 3.-4. mai 2011.

Målinger av temperatur og relativ luftfuktighet på utligningsrommet for gris er vist i figur 4.4 og figur 4.5. Temperaturen på utligningslageret steg om formiddagen, da rommet ble fylt med griseslakt fra sjokk-kjøleren. Med unntak av noen



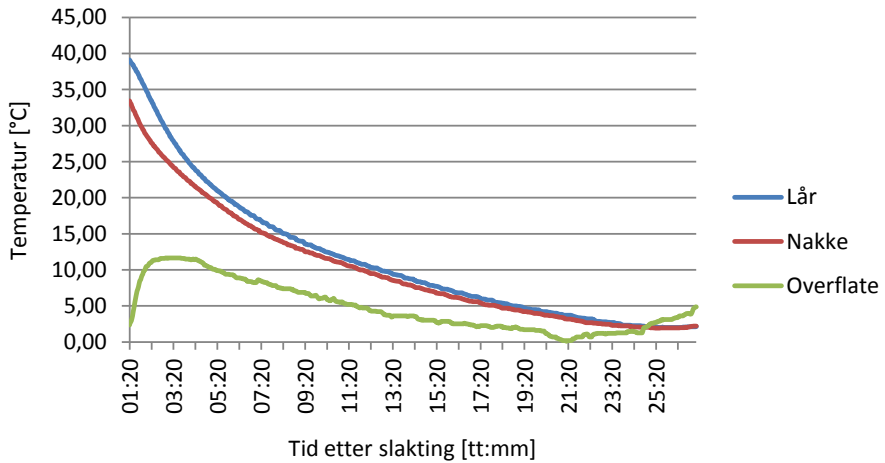
Figur 4.5: Relativ luftfuktighet i utligningsrom for gris Fatland Jæren, 3.-4. mai 2011.

korte perioder med økning, blant annet under avriming, sank romtemperaturen etter hvert som slaktene ble kjølt ned. Ved tidspunkt for utsending av slakt for transport til Ølen ca. kl. 24 hadde temperaturen sunket til ca. 1 °C. Om natten holdt kuldeanlegget temperaturen mellom 0,5 °C og 1 °C. Settpunktstemperaturen i utligningsrommet er 1 °C.

Målingene av relativ luftfuktighet er tydelig forskjellig på de to målepunktene. Som vist i figur 4.5 i vedlegg D var den målte relative fuktigheten midt i rommet 100 % gjennom hele måleperioden, med unntak av under det kraftige temperaturfallet rundt kl. 08. Den relative luftfuktigheten målt ved veggen viser derimot svært lav fuktighet, mellom 30 % og 40 % store deler av måleperioden.

Som vist i figur 4.6 steg overflatetemperaturen etter at slaktet ble flyttet til utligningsrommet. Varmeovergangen mellom overflaten og omgivelsene var mindre enn varmegjennomgangen innover i slaktet. Først etter to timer på utligningslageret hadde temperaturen i slakteskrottene utjevnet seg nok til at temperaturen i overflaten begynte å synke igjen. Kjernetemperaturen i nakke og lår sank under hele oppholdet på utligningslageret. Da slaktene ble flyttet over for transport var

temperaturen i både lår og nakke under 3°C . På det laveste var overflatetemperaturen ca. 0°C , men steg noe mot slutten, og var ca. 5°C ved omlasting for transport.



Figur 4.6: Temperatur i griseslakt på utligningslager Fatland Jæren 3–4. mai 2011. Temperaturene er gjennomsnittet av målingene i seks halve griseskrotter.

4.1.2 Transport av slakt

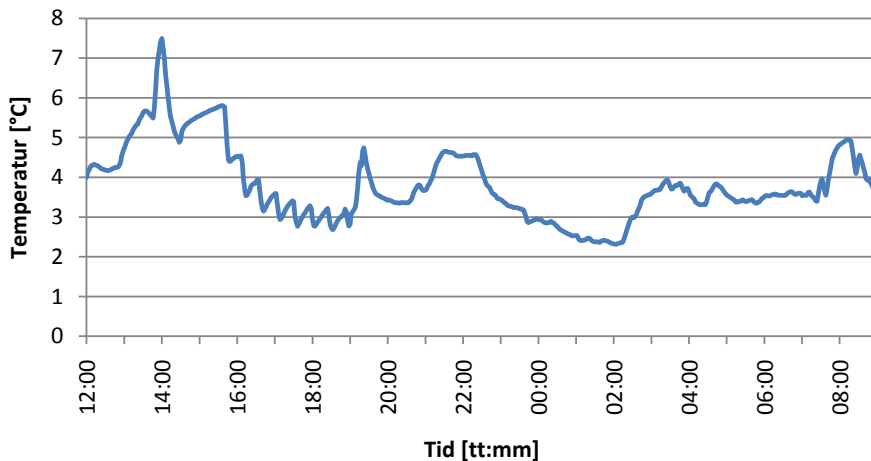
Slaktene blir flyttet over i bil fra et eget utlastingsrom. Her blir også slaktene veid før transporten. Slaktene flyttes i puljer ut på utlastingsrommet, veies og flyttes direkte over i bilen gjennom en sluse i utlastingsrommet. Flyttingen foregår på hengebane, og slaktene henger under transporten.

Distansen mellom slakteriene Fatland Jæren og Fatland Ølen er ca. 130 km, og tranporttiden for slakteriproduktene er ca. 2,5 timer (Fatland Jæren, personlig kommunikasjon 4. mai 2011). Transporten med avreise fra Fatland Jæren ca. kl. 24 ankommer Ølen i løpet av natten, men slaktene blir værende i bilen fram til arbeidsdagen begynner på Fatland Ølen neste morgen. Den andre transporten, med avreise ca. kl. 14 ankommer Ølen ca. kl. 17.30, og blir lastet over på slakteriet og inn på en hengehall umiddelbart. Der henger slaktene til skjæringen begynner neste morgen (Fatland Ølen, personlig kommunikasjon).

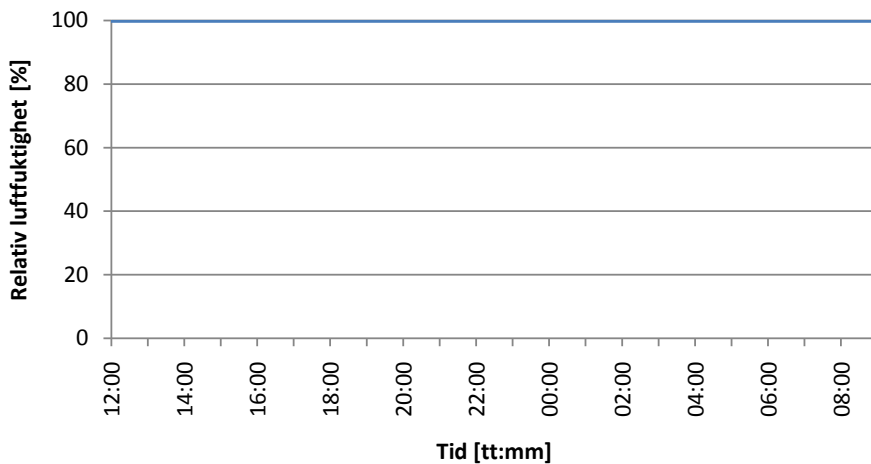
Lufttemperaturen under ettermiddagstransporten 4. mai er vist i figur 4.7. Under lasting ble slaktene i en kort periode utsatt for temperaturer opptil 7 °C. Lufttemperaturen sank under transporten, fra ca. 5 °C ved avreise til ca. 3 °C ved ankomst Ølen.

Som vist i figur 4.8 var den målte relative luftfuktigheten 100 % under hele transporten. Vekttapet på grunn av fordunsting var derfor minimalt. Verdiene for temperatur og relativ luftfuktighet i figur 4.7 og figur 4.8 er gjennomsnittet av resultatene fra to loggere.

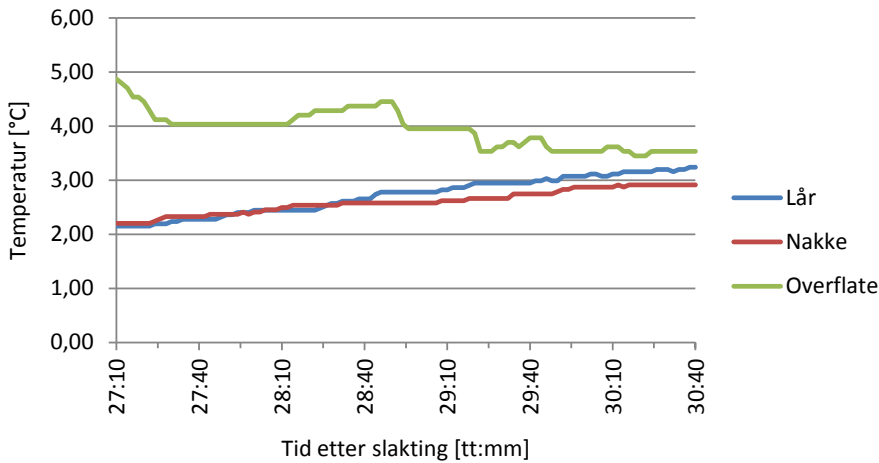
Figur 4.9 viser at overflatetemperaturen i slakteskrottene endret seg lite under transporten fra Fatland Jæren til Fatland Ølen. Fra ca. 5 °C ved transportstart sank overflatetemperaturen til ca. 3,5 °C ved transportslutt. På grunn av temperaturøkningen i overflaten i perioden før transporten økte kjernetemperaturen i lår og nakke med ca. 1 °C under transporten. Ved transportslutt var forskjellen i temperatur mellom overflate og kjerne mindre enn 1 °C. Temperaturen var innenfor kravet på 7 °C under hele transporten.



Figur 4.7: Temperatur under transport av griseslakt mellom Fatland Jæren og Fatland Ølen 4. mai 2011.



Figur 4.8: Relativ luftfuktighet under transport av griseslakt mellom Fatland Jæren og Fatland Ølen 4. mai 2011



Figur 4.9: Temperatur i griseslakt under transport mellom Fatland Jæren og Fatland Ølen 4. mai 2011. Temperaturene er gjennomsnittet av målingene i seks halve griseskrotter.

4.1.3 Slakterilinje Fatland Ølen

Slaktetall for Fatland Ølen 5. mai 2011 er vist i tabell 4.2 (Fatland Ølen, personlig kommunikasjon 6. mai 2011). Også på Ølen ble det for det meste slaktet gris i perioden da temperaturmålingene ble gjennomført. En skisse av produktflyten gjennom slakteriet fram til skjæring er vist i figur B.2 i vedlegg B.

Slakt	Antall	Totalvekt (kg)	Snittvekt (kg)
Gris	491	40766	83,0
Storfe	19	5339	281,0
Sau/lam	78	2106	27,0

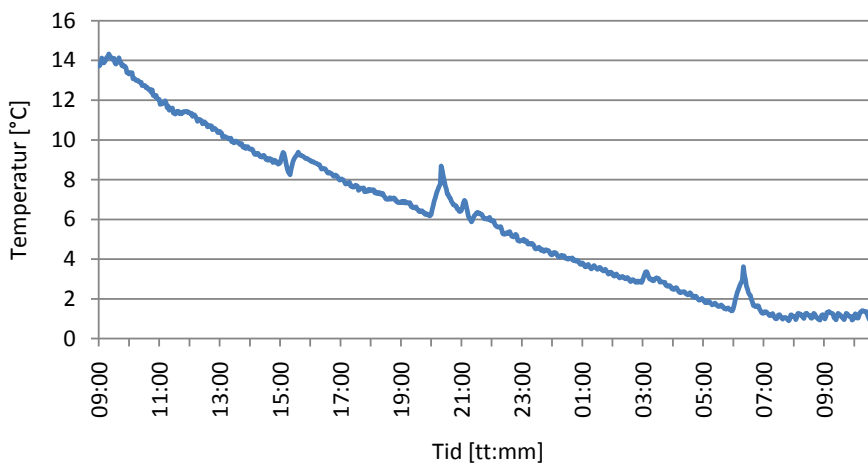
Tabell 4.2: Slaktemengder Fatland Jæren 5. mai 2011

Nedkjøling

På Fatland Ølen blir griseslaktene kjølt konvensjonelt. Etter hvert som de er ferdig slaktet og veid flyttes de inn på et kjølerom, og henger der til neste morgen. Slaktene blir da flyttet over i en hengehall, så kjølerommet kan brukes til nye slakt igjen. Slakteriet har flere kjølerom. Et rom fylles med slakt, før man begynner å fylle det neste. Slaktene fra rommet fylt først, hentes først inn i hengehallen, og skjæres først.

Temperatur og relativ luftfuktighet i hovedkjølerommet for gris, det rommet som først ble fylt med slakt, er vist i figur 4.10 og figur 4.11. Disse målingene ble gjennomført 5.–6. mai 2011.

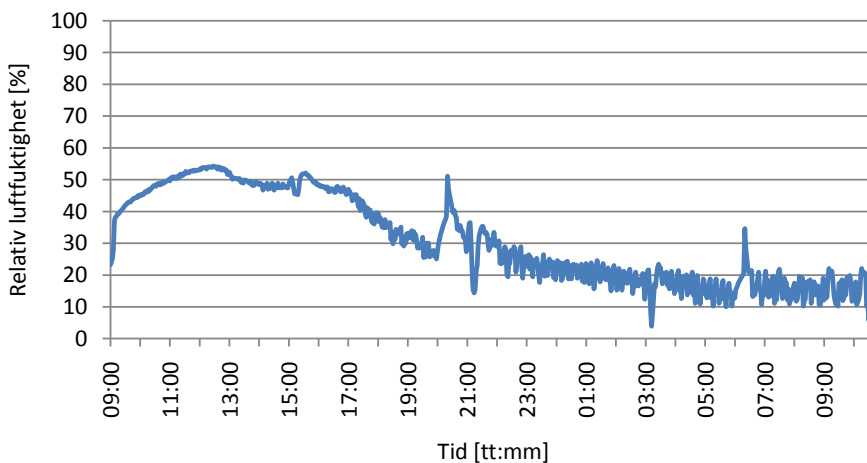
Varmetilskuddet er stort under innlasting av slakt, og romtemperaturen var derfor høy på formiddagen i måleperioden. Utover ettermiddagen, kvelden og natten sank romtemperaturen jevnt, etter hvert som temperaturen på slakteskrottene sank. Unntaket var under korte perioder med avriming av fordamperne.



Figur 4.10: Temperatur i kjølerom for gris på Fatland Ølen. Målt 5.–6. mai 2011

Romtemperaturen sank under 2 °C ca. kl. 05, morgenen etter at slaktene ble fylt inn. Som figur 4.10 viser, var temperaturen ca. 1 °C om formiddagen den

6. mai 2011. Det foregikk ingen slakting denne dagen, så kjølerommet ble tømt om morgenen den 6. mai. Målingene av relativ luftfuktighet, i figur 4.11, var lave. Den relative luftfuktigheten var hele tiden under 60 %. I perioden griseslaktene ble flyttet ut på hengehallen var målingene av relative luftfuktighet mellom 10 % og 20 %.

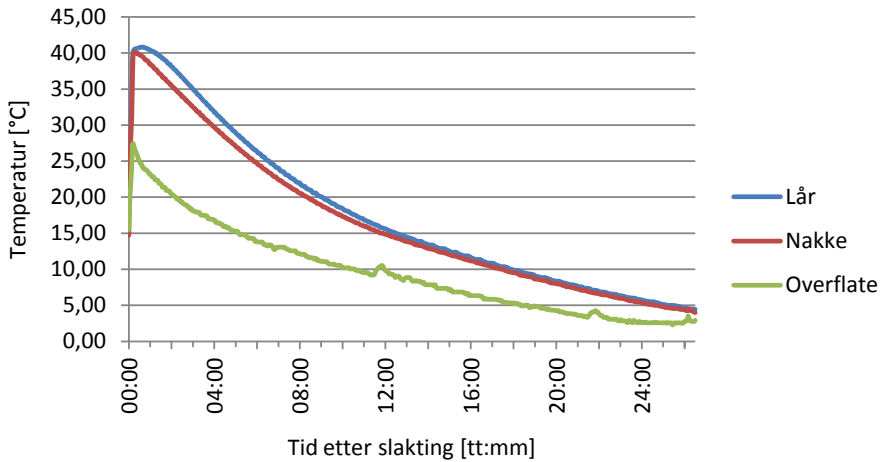


Figur 4.11: Relativ luftfuktighet i kjølerom for gris på Fatland Ølen. Målt 5.–6. mai 2011.

Målte temperaturer i slakt under kjøling på Ølen er vist i figur 4.12. Det tok ca. 15 timer før temperaturen i overflaten hadde sunket under 7°C og ca. 20,5 timer før temperaturen hadde sunket under 4°C . Temperaturen i det termiske senteret i låret falt under 7°C og 4°C etter henholdsvis 22 og 28 timer.

Hovedkjølerommet for gris fylles helt, før de resterende griseslaktene henges på det andre kjølerommet. Dette kjølerommet brukes også til kjølingen av sau/lam, som utgjør små mengder sammenlignet med gris utenfor lammesesonen.

Figur 4.13 viser temperaturen i de to kjølerommene som ble benyttet til kjøling av griseslakt i måleperioden. Kjølerom 2 ble fylt på ettermiddagen, og temperaturreduksjonen er derfor forsinket i forhold til kjølerom 1. Temperaturen på kjølerom 1 synker under 8°C ca. kl. 17, ca. 3 timer før temperaturen på kjøle-



Figur 4.12: Temperatur i griseslakt under nedkjøling på Fatland Ølen 5–6. mai 2011. Temperaturene er gjennomsnittet av målingene i seks halve griseskrotter.

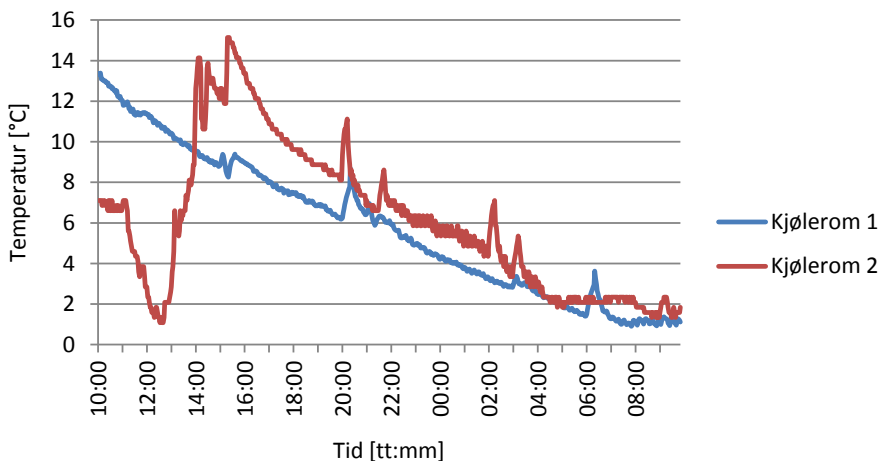
rom 2.

Reduksjonen i romtemperatur gikk fortere på kjølerom 2, og ca. kl. 05 neste morgen sank temperaturen i begge rommene under 2 °C. Det ble ikke gjennomført målinger av produkttemperaturer i kjølerom 2, så det er ikke mulig å sammenligne kjernetemperaturen i skrottene under nedkjøling.

Skjæring

Mellom nedkjølingen og skjæringen blir slakteskrottene oppbevart i en hengehall. Hensikten med hengehallen er holde temperaturen i slaktet jevn. Det foregår ingen nedkjøling, kun vedlikeholdskjøling. I tillegg til gris, henger også sau/lam og storfe i hengehallen. Storfe som henger her har blitt slaktet og kjølt ned på Ølen, og venter på transport til Fatland Jæren, for å skjæres der.

Tiden slakteskrottene oppholder seg i hengehallen varierer. Slaktene som kommer fra Fatland Jæren om ettermiddagen blir lastet inn i hengehallen ca. kl. 17.30,



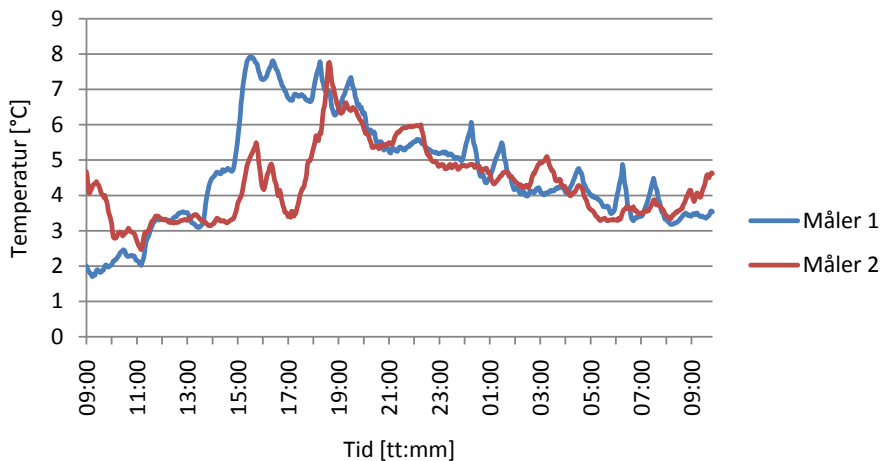
Figur 4.13: Temperatur i to kjølerom for gris på Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011. Kjølerom 1 ble fylt først, og resterende slaktene ble hengt på kjølerom 2.

og blir der til de skjæres påfølgende dag. Den andre transporten fra Jæren ankommer i løpet av natten. Disse oppbevares i bilen fram til morgenen, og flyttes inn på hengehallen i løpet av morgenen.

Griseskrottene fra Ølen flyttes ut av kjølerommene om morgen eller formiddagen dagen etter slaktning, for å få plass til nye slakt for nedkjøling. Rommet med slakt som har hengt lengst til kjøling flyttes først ut i hengehallen. Noen av disse har kun kort oppholdstid i hengehallen, og går direkte til skjæring. Skjæringen av griser slaktet på Ølen, og griser sendt med den første transporten fra Jæren begynner litt over et døgn etter at de første grisene ble slaktet. Griseslaktene som kommer med ettermiddagstransporten fra Jæren blir skåret ca. to døgn etter slaktningen begynte, som vist i figur B.2 i vedlegg B.

Temperatur og relativ luftfuktighet i hengehallen på Fatland Ølen 5.–6. mai er vist i figur 4.14 og figur 4.15. Temperaturen i hengehallen varierte mellom 2 °C og 8 °C i måleperioden. Måleren plassert nærmest kjølerommene ga svært varierende verdier for den relative luftfuktigheten, mens målingen nærmest rommet

for skjæring viste 100 %.

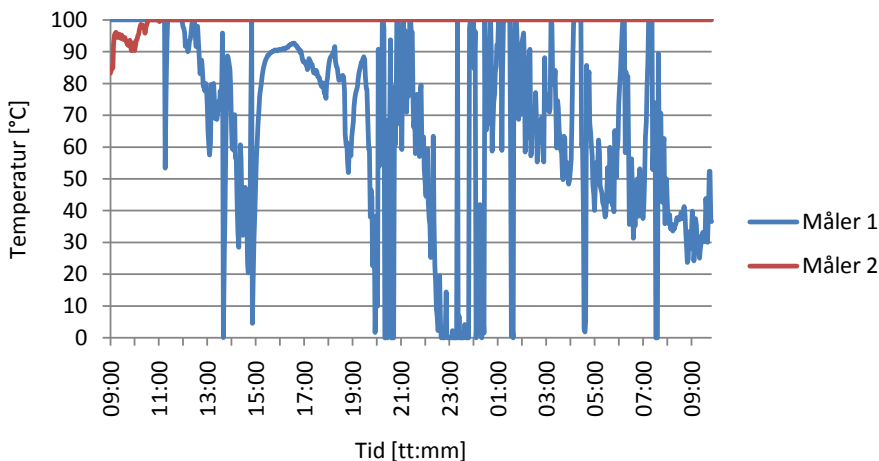


Figur 4.14: Temperatur i hengehall på Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011. Måler 1 var plassert nær utgangen fra kjølerommene, mens måler 2 var plassert nær inngangen til rommet for grovskjæring av slakt.

Grovskjæring

Under den første nedskjæringen blir de halve griseskrottene delt i større stykningsdeler, som beskrevet i kapittel 2.6. De forskjellige kuttene går til forskjellige produkter. Noen av produktene holdes kjølt, noen fryses og noen røykes.

Temperaturen i rommet for grovskjæring 5.–6. mai 2011 er vist i figur 4.16. Mens det foregikk skjæring av halve griseskrotter 5. mai var temperaturen i rommet mellom 5 °C og 6 °C. Det er ingen fordampere i rommet, så kjølingen leveres av de omliggende rommene. Inngangen mellom hengehallen og rommet for grovskjæring er åpen.

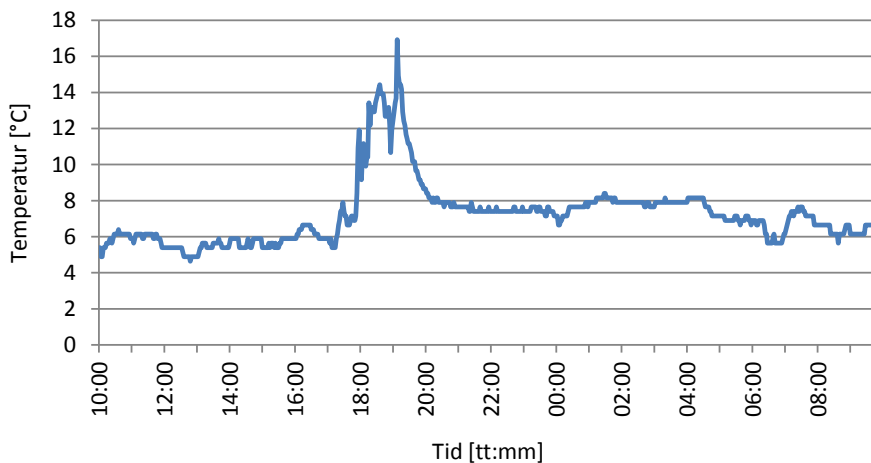


Figur 4.15: Relativ luftfuktighet i hengehall på Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011. Måler 1 var plassert nær utgangen fra kjølerommene, mens måler 2 var plassert nær inngangen til rommet for grovskjæring av slakt.

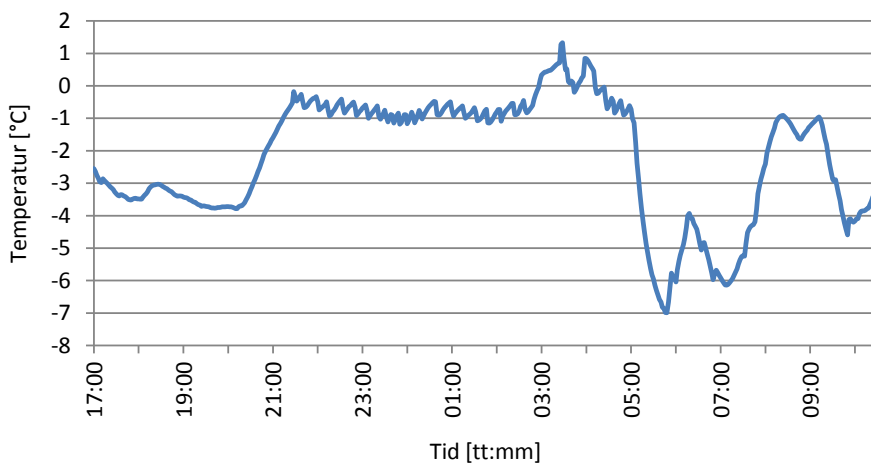
Spesialfryser

Enkelte stykningsdeler blir delt opp og skivet på Fatland Ølen. Skivingen skjer i en huggemaskin. For å gjøre huggingen enklere, med renere kutt og mindre svinn, blir produktene delvis fryst før hugging. Huggingen blir bedre med delvis fryste varer fordi produktet blir stivere (Fatland Ølen, personlig kommunikasjon, 5. mai 2011). For å oppnå delvis frysing bruker Fatland Ølen et fryserom med settpunktstemperatur $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kalt spesialfryser. En forenklet skisse av spesialfryseren er vist i figur C.2 i vedlegg C. Figur 4.17 og figur 4.18 viser målt temperatur og fuktighet i spesialkjøleren mellom 5. og 6. mai 2011.

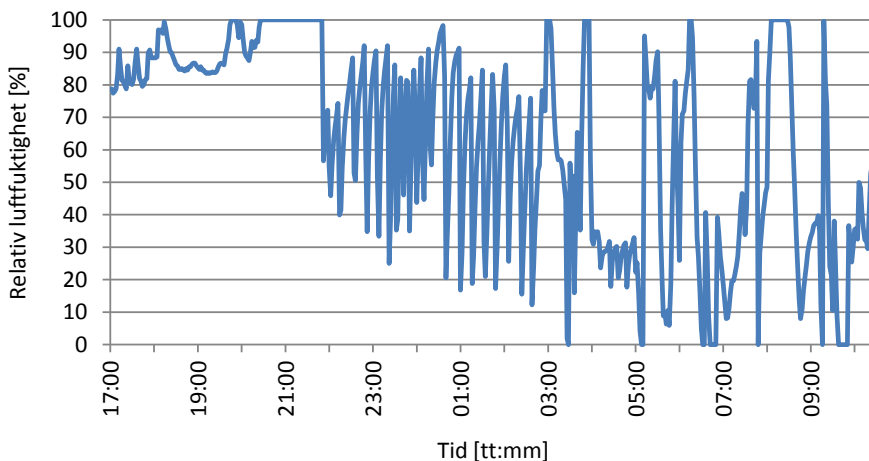
Stykker fra nakke og kotelettkam blir hengt inn i spesialfryseren etter skjæring, og henger der over natten. Neste dag blir stykkene hentet ut, hugget og pakket, før de flyttes ut på kjølelager. Inne i spesialfryseren henger kjøttstykkene på stativ som henger fra baner i taket. Temperaturer i kjerne og overflate under kjøling av svinenakker i spesialfryser 5.–6. mai 2011 er vist i figur 4.19, sammen



Figur 4.16: Temperatur i rom for grovstykking av slakt på Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011. Verdiene er gjennomsnittet av temperaturmålingene gjennomført med to knappeloggere.



Figur 4.17: Temperatur i spesialfryser Fatland Ølen, 5.–6. mai 2011.



Figur 4.18: Relativ luftfuktighet i spesialfryser Fatland Ølen, 5.–6. mai 2011.

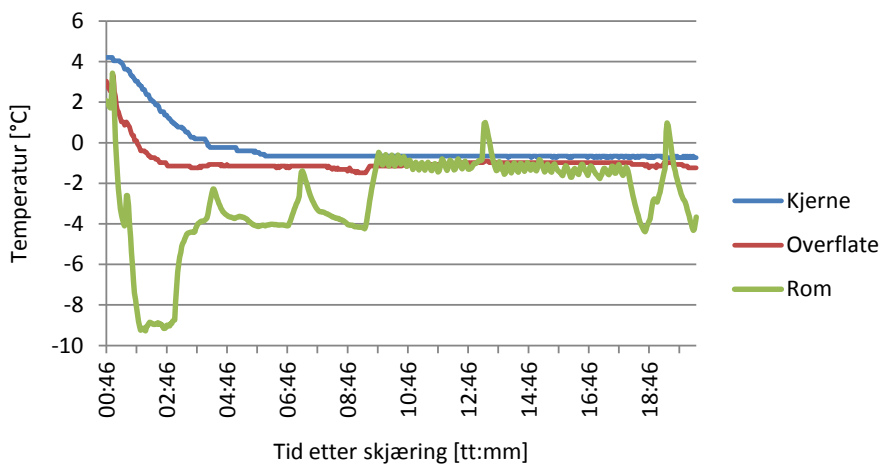
med romtemperaturen.

Temperaturen i spesialfryseren varierte mye i løpet av tiden svinenakkene med temperaturmåling hang der. Ca. én time etter at nakkene ble flyttet inn på spesialfryseren var romtemperaturen så lav som $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Med den lave romtemperaturen tok det ca. 3,5 timer fra nakkene ble flyttet inn i spesialfryseren med kjernetemperatur $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ til kjernetemperaturen hadde sunket under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Etter at temperaturen i kjøttet hadde nådd det initielle frysepunktet flatet temperaturkurven ut, og temperaturfallet ble mindre. Temperaturen i rommet var også høyere, mellom $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da nakkestykkene hadde vært inne i spesialfryseren i ca. 9 timer, kl. 20.45, stoppet kjølingen, og temperaturen i rommet var omtrent lik overflatetemperaturen i kjøttet. Ca. to timer før nakkene ble hentet ut fra spesialfryseren var

Kjølelager

Ølen har et to-etasjes kjølelager for ferdige, ferske varer. Det er delvis åpent mellom de to etasjene, gulvet i 2. etasje dekker ca. halvparten av arealet. Tem-

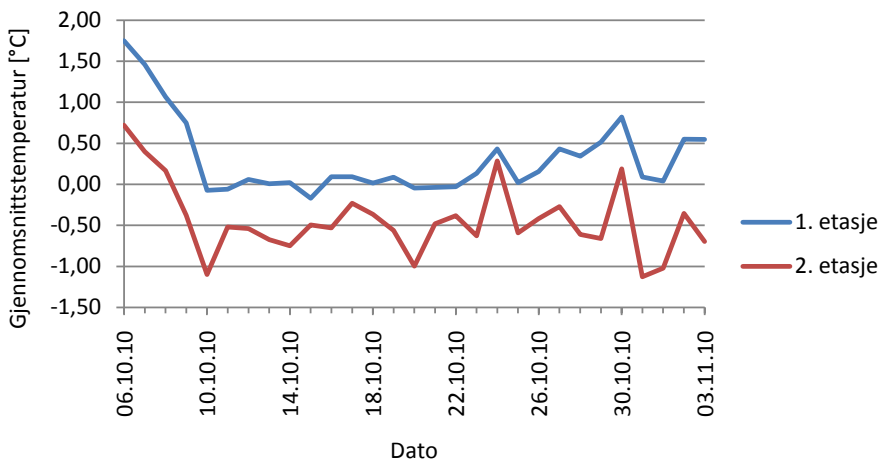


Figur 4.19: Temperatur i kjerne og overflate i svinenakke, og romtemperatur, under kjøling i spesialfryser Fatland Ølen, 5.-6. mai 2011. Temperaturene i svinenakke er gjennomsnittet av temperaturmålinger i seks nakker slaktet på Fatland Jæren 3. mai 2011

peraturen på kjølelageret skal ligge mellom 2 °C og 4 °C

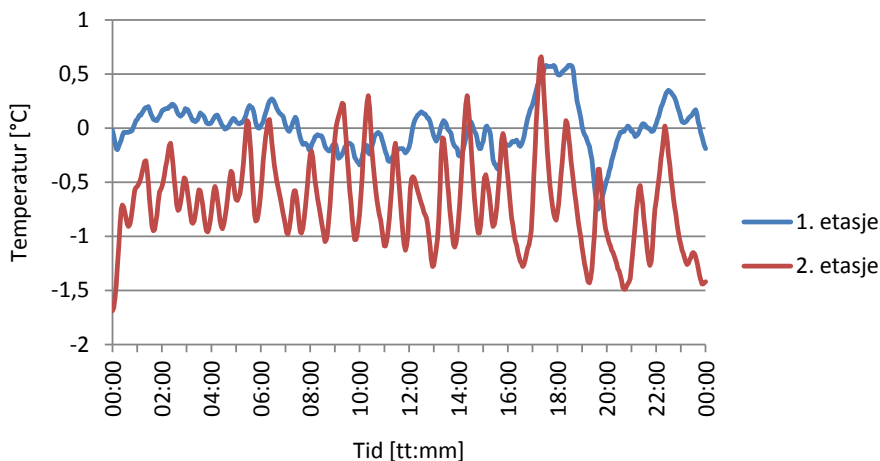
Ferdigpakkede produkter kommer inn på kjølelageret fra plukkageret i 2. etasje. Noen av varene pakkes på paller i 2. etasje, mens andre sendes ned til 1. etasje på et transportbånd langs veggen. Varene transporteres på paller i etasjene, og flyttes mellom etasjene av en robot.

Gjennomsnittlig temperatur per døgn er vist i figur 4.20. I den nederste etasjen varierer gjennomsnittstemperaturen per døgn mellom 0 °C og 1,5 °C, mens gjennomsnittstemperaturen i den øverste etasjen varierer mellom -1 °C og 0,5 °C. Den øverste etasjen har gjennom hele måleperioden lavere gjennomsnittlig døgn-temperatur enn den nederste etasjen.



Figur 4.20: Gjennomsnittstemperatur per døgn på kjølelager for pakkede produkter ved Fatland Ølen. Målingene ble gjennomført i perioden 6. oktober til 3. november 2010.

Figur 4.21 viser temperaturen på kjølelageret gjennom et utvalgt døgn, onsdag 13. oktober 2010. Temperaturen varierer hele døgnet, i begge etasjer, men variasjonen er størst i den øverste etasjen.



Figur 4.21: Temperatur målt gjennom et døgn i kjølelager for pakkeprodukter ved Fatland Ølen. Målingene ble gjennomført onsdag 13. oktober 2010.

Frysing

Deler av kjøttproduksjonen sendes ikke ut på markedet direkte, men lagres fryst på Fatland Ølen. Hvilke produkter som fryses, og mengden som fryses varierer med de aktuelle bestillingene den enkelte dag, men i gjennomsnitt blir ca. 20–30% av kjøttet fryst. Tendensen er at mer og mer blir omsatt ferskt (Fatland Ølen, personlig kommunikasjon, 25. mai 2011).

Behovet for frysing varierer med sesongene. Omsetningen av grisekjøtt er stor før jul og i grillsesongen. I disse periodene blir lite eller ingen produkter fryst. I april–mai blir kun 5–10% av produksjonen fryst. Om sommeren er det mindre aktivitet i industrien, mindre varer går til videreforedling, og omtrent 40 % av produktene fryses i juli måned. Blant annet blir ribbe frosset inn om sommeren, for å omsettes frossen i julebord- og julesesongen. Om høsten fryses 20–30% av produksjonen, men disse varene holdes ikke fryst like lenge (Fatland Ølen, personlig kommunikasjon, 25. mai 2011).

Flere plott av temperatur og relativ luftfuktighet i produksjonslokalene er vist i vedlegg D.

4.1.4 Vekttap

Som beskrevet i kapittel 3.2.3 ble slaktevekt registrert etter skjæring, før transport og før skjæring. På grunn av en feil i vektregistreringssystemet, ble disse avlesningene feil. De oppgitte verdiene for slaktevekt indikerte at enkelte slakt fra Fatland Ølen økte vekten under kjøling, mens slaktene fra Fatland Jæren hadde et betydelig vekttap. I forbindelse med utregning av utbetaling til produsent blir en justert vekt med diverse fradrag brukt (Fatland Ølen, personlig kommunikasjons, 5. mai 2011).

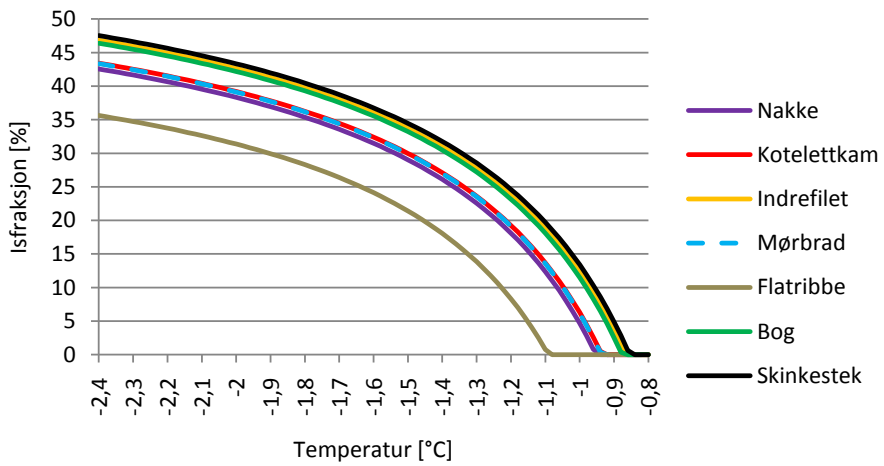
En mulig grunn til de urealistiske verdiene for vekttap kan skyldes at denne vekten ble oppgitt på enkelte punkter, eller at vekten enkelte steder ble oppgitt med sammen med vekten av kroken slaktet henger i når det følger hengebanene. Siden det ikke har vært mulig å finne årsaken til målefeilene, og justere for disse, har registreringen av vekttap ikke blitt brukt. Det var derfor ikke mulig å bestemme konsekvensene av de ulike kjølemetodene, og forskjellige transporttidspunkt.

4.2 Superkjøling

4.2.1 Isfraksjon

Siden de ulike stykningsdelene fra gris har forskjellig komposisjon vil de også ha forskjellig frysepunkt. Ved superkjølt lagring på samme temperatur, vil de ulike produktene derfor ha forskjellig isfraksjon etter utligning. Figur 4.22 viser isfraksjonen i ulike stykningsdeler som funksjon av temperaturen. Verdiene ble estimert med ligning (3.3) og (3.8).

Kurvene for bog, skinkestek og indrefilet har relativt lik form, ca. 1 % differanse i isfraksjon for en gitt temperatur. Isfraksjonen i disse stykkene har blitt estimert uten bein. Stykkene nakke, kotelettkam og mørbrad har blitt estimert med bein, og har relativt lik kurve for isfraksjonen. Sammenlignet med stykkene uten bein er isfraksjonen i disse ca. 5-8 % lavere, for en gitt temperatur i



Figur 4.22: Isfraksjon i ulike stykningsdeler ved varierende temperatur. Komposisjoner hentet fra ASHRAE (2006) og USDA (2009). Det initiale frysepunktet ble estimert med ligning (3.3) og isfraksjoner estimert med ligning (3.8).

superkjølingsområdet.

Temperaturen på det superkjølte lageret må velges slik at alle produktene har en tilfredsstillende isfraksjon under lagring. Flatribbe har mindre vanninnhold enn de andre stykningdelene vist i figur 4.22. Det estimerte frysepunktet er derfor lavere, og for en gitt temperatur er den estimerte isfraksjonen i flatribbe betydelig mindre enn i andre stykningdelene. En lagringstemperatur som gir 10 % is i flatribbe (ca. $-1,23$ °C), vil i over 25 % is i produktene med mest vanninnhold, med dette estimatet. Det er mer enn ønskelig, med tanke på økte drypptap.

Dersom isfraksjonen skal holdes under 20 % for alle produktene vist i figur 4.22, må lagringstemperaturen være ca. $-1,1$ °C eller høyere. Med unntak av flatribbe, vil isfraksjonen i alle de viste produktene ligge mellom 12 % og 20 % ved lagringstemperatur $-1,1$ °C. Estimert isfraksjon i tynnribbe er under 1 % ved denne temperaturen. Avhengig av om man vil holde isfraksjonen i produktene med mest vann under 20 % eller isfraksjonen i produktene med minst vann over 5 %, vil egnede lagringstemperaturer ligge i området $-1,15$ – $(-1,10)$ °C. Ifølge SINTEF Energis tidligere erfaringer er en isfraksjon mellom 5 % og 20 % ønskelig (Indergård, E., personlig kommunikasjon mai 2011).

4.2.2 Kjøletid

Siden små forskjeller i temperatur gir store endringer i isfraksjon er det viktig at nedkjølingstiden i skallfryseren er nøyaktig. Figur 4.25 viser estimert isfraksjon i skallfryser ved varierende kjøletid for rektangulære nakkestykker med ulik dimensjon. Kjøletiden blir betydelig lenger ved med økt størrelse på kjøttstykket. Nakken hugges til koteletter før utligning, noe som betyr at det vil være stor forskjell i isfraksjonen i kotelettene etter hugging.

Superkjølingsforsøk ble gjennomført av SINTEF Energi AS. Estimert kjøletid for å nå 10 % is ved utligning var ca. 7 minutter (Indergård, E., personlig kommunikasjon mai 2011).

Figur 4.23 viser estimert temperaturprofil i et tverrsnitt av en svinenakke etter kjøling i skallfryser til 10 % isfraksjon. Temperaturen i kjernen endres ikke i løpet av kjøletida, mens temperaturen i overflaten synker ned mot temperaturen

Stykke	Utligningstemperatur (°C)		
	-1,05	-1,10	-1,15
Nakke	9	12	15
Kotelettkam	10	14	17
Indrefilet	16	19	21
Mørbrad	10	14	17
Flatribbe	0	1	5
Bog	15	18	21
Skinkestek	17	20	22

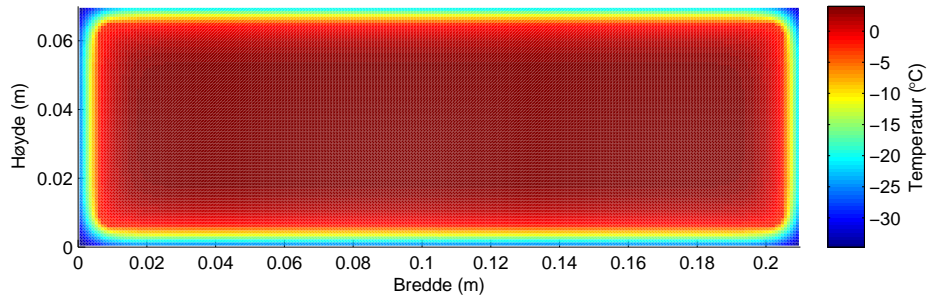
Tabell 4.3: Estimert isfraksjon (%) i ulike stykningdeler ved utvalgte utligningstemperaturer. Komposisjoner hentet fra ASHRAE (2006) og USDA (2009). Det initiale frysepunktet ble estimert med ligning (3.3) og isfraksjoner estimert med ligning (3.8).

i den kjølede lufta. Som vist i figur 4.24 dannes det kun is nære overflaten. Alt det frie vannet nær overflaten er fryst etter oppholdet i skallfryseren.

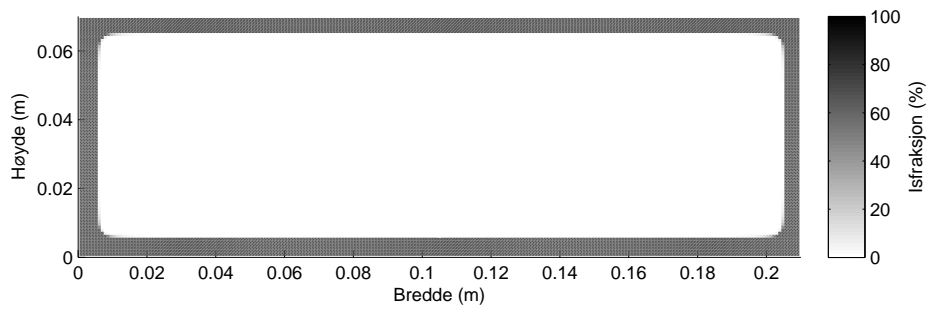
Simuleringene viser at små forskjeller i tykkelse gir store forskjeller i kjøletid. Som vist i figur 4.25 tar det ca. 1 minutt lenger tid å kjøle kjøttet tilsvarende 10 % isfraksjon etter utligning, dersom størrelsen på stykket økes med 1 cm i høyden og 3 cm i bredden. Oppholdtiden som vil gi ca. 10 % isfraksjon etter utligning i et rektangulært stykke på 7×21 cm ville gitt over 12 % is i et stykke på 6×18 cm og ca. 8 % is i et stykke på 8×24 cm.

Dersom koteletten med gjennomsnittlig tykkelse kjøles ned til spesifikk entalpi tilsvarende entalpien etter utligning på kjølelager, vil mindre koteletter få lavere entalpien og større koteletter høyere entalpien, enn etter utligning. Det betyr at de små nakkekotelettene må ta opp netto varme i løpet av utligningstiden, mens de store nakkekotelettene må avgi netto varme.

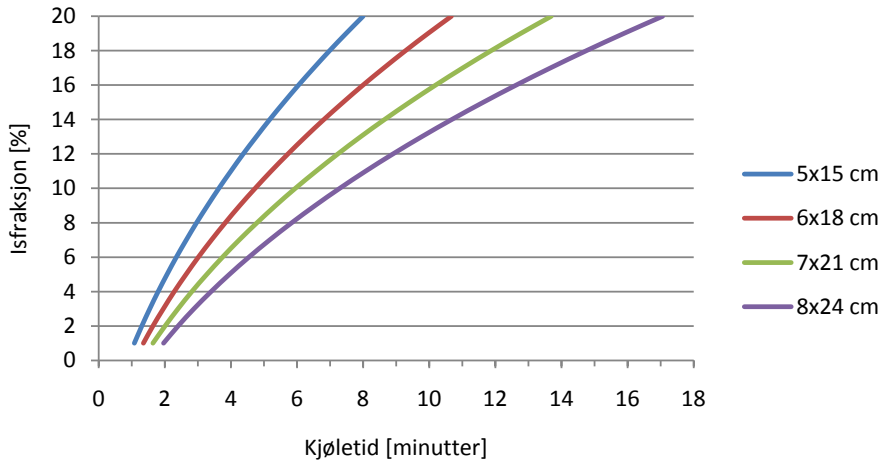
Kjøletiden i skallfryseren vil også være avhengig av behandlingen produktet har fått før kjølingen. Temperaturen i kjøttet før kjøling avhenger av temperaturen i slaktet før skjæring og oppbevaringen etter skjæring. Dersom kjøttet lagres



Figur 4.23: Estimert temperaturgradient i tverrsnitt av svinenakke etter skallfryser.



Figur 4.24: Estimert fordeling av is i tverrsnitt av svinenakke etter skallfryser.



Figur 4.25: Estimert isfraksjon i rektangulære nakkestykker med ulik dimensjon som funksjon av nedkjølingstiden i skallfryser. Forholdet mellom høyde og bredde er det samme for alle kjøttstykkene. Nedkjøling med varmeovergangstall $200 \text{ W/m}^2\text{K}$, lufttemperatur $-38 \text{ }^\circ\text{C}$. Tykkelse variert fra 5 til 8 cm og bredde variert fra 15 til 24 cm.

på et kjølelager før superkjøling er temperaturen på kjølelageret avgjørende for temperaturen i kjøttet rett før kjøleprosessen. Tabell 4.4 viser estimert virkning av innløpstemperatur på kjøletid. Kjøletiden ble estimert for stykker av nakke med rektangulært tverrsnitt 7×21 cm, til spesifikk entalpi tilsvarende utlignings-temperatur på $-1,1$ °C.

Temperatur inn (°C)	Kjøletid (min)
2	6,1
4	7,2
6	8,4

Tabell 4.4: Estimert kjøletid for nakkestykker med ulik innløpstemperatur. Kjøletiden ble estimert for utløpsentalpi tilsvarende utligning til $-1,1$ °C.

Ifølge JBT FoodTech (2011) ligger varmeovergangstallet i ADVANTEC™ Impingement freezer mellom $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ og $250 \text{ W/m}^2\text{K}$. Lufthastigheten ut fra dysene er over 38 m/s . Dyser blåser lufta direkte mot produktets overflate, både ovenfra og nedenfra, hardt nok til å bryte ned grensesjiktet rundt produktet (JBT FoodTech, 2011). Under forsøk med kjøling av aluminiumsblokker i skallfryser ble varmeovergangstallet for varierende lufthastighet målt til mellom $180 \text{ W/m}^2\text{K}$ og $250 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Eikevik, T.M., personlig kommunikasjon, mai 2011).

Tabell 4.5 viser varmeovergangstallets betydning for kjøletiden. Små variasjoner i varmeovergangstall gir liten innvirkning på nedkjølingstiden. Resultatene antyder at mindre variasjoner i lufthastighet over produktene kan tolereres uten å gi stor variasjon i resultatet etter kjøling.

Tabell 4.6 viser estimert kjøletid for nakkestykket ved forskjellig lufttemperatur. Som vist har det stor betydning for kjøletiden om skallfryseren kan drives med R404A som kuldemedium eller R717. Tabell 4.6 viser også viktigheten av god temperaturkontroll inne i skallfryseren.

Konduktiviteten er den begrensende faktoren for varmeoverføringen mellom kjøtt og luft. Ved å benytte modellen for parallell konduktivitet i stedet for vinkelrett, ble nedkjølingstiden til 10 % is redusert fra ca. 6 minutter til ca. 4 minutter.

Varmeovergangstall (W/mK)	Kjøletid (min)
150	8,4
190	7,4
200	7,2
210	7,0
250	6,5

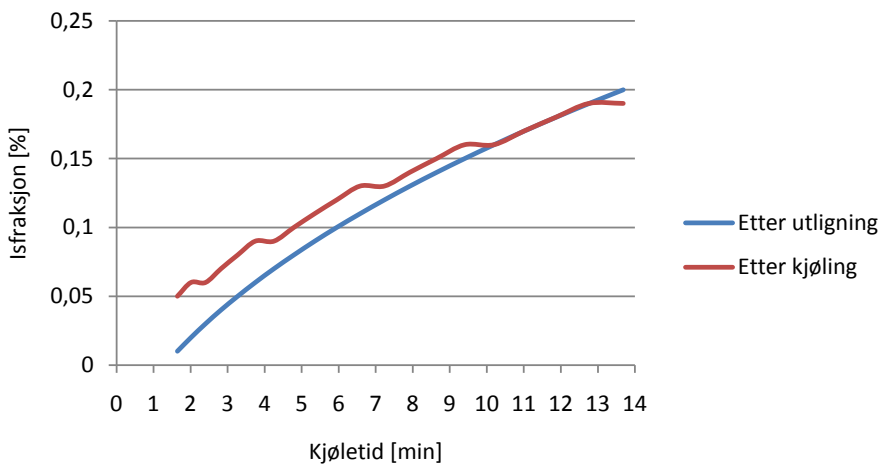
Tabell 4.5: Estimert kjøletid for nakkestykker ved kjøling i skallfryser med ulikt konvektivt varmeovergangstall. Kjøletiden ble estimert for utløpsentalpi tilsvarende utligning til $-1,1$ °C.

Lufttemperatur (°C)	Kjøletid (min)
-30	9,3
-35	7,9
-38	7,2
-40	6,8

Tabell 4.6: Estimert kjøletid for nakkestykker ved kjøling i skallfryser med ulik lufttemperatur. Kjøletiden ble estimert for utløpsentalpi tilsvarende utligning til $-1,1$ °C.

Figur 4.26 viser estimert isfraksjon i superkjølt svinenakke umiddelbart etter skallfrysing, og etter utjevning på kjølelager. De estimerte verdiene viser at isfraksjonen umiddelbart etter kjøling ikke nødvendigvis er lik isfraksjonen etter utligning. Ved kort nedkjølingstid er isfraksjonen i produktet høyere etter kjøling enn ved utligning. For lengre kjøletider blir isfraksjonen mindre umiddelbart etter kjøling enn etter utligning.

På grunn av den lave konduktiviteten i kjøttet tar det lang tid å kjøle ned kjernen i kjøttet. For å oppnå samme entalpi som ønsket etter utligning må det derfor fryses ut større mengder vann nær overflaten. Etter hvert som produktet fryser synker temperaturen i overflaten. På grunn av den lave konduktiviteten synker temperaturen i overflaten langt under frysepunktet, mens temperaturen i kjernen fortsatt er høy. Entalpien i produktet synker uten at det dannes noe særlig mer is. Ved lengre kjøletider vil derfor isfraksjonen umiddelbart etter kjøling kunne være lavere enn etter utligning.



Figur 4.26: Estimert isfraksjon i rektangulært tverrsnitt av svinenakke, ved ulike kjøletider. Verdiene er estimert i et stykke med tverrsnitt 21×7 cm, med varmeovergangstall 200 W/mK , lufttemperatur -38°C og produkttemperatur før kjøling 4°C .

Avhengig av valgt isfraksjon ved lagring og kjølehastigheten, vil isfraksjonen før og etter utligning være forskjellig. Med tanke på direkte måling av isfraksjonen, som beskrevet i kapittel 2.7.5, er det derfor viktig å kartlegge forholdet mellom isfraksjon før og etter utligning.

4.3 Etablering av superkjølingslinje

En superkjølingslinje for ferdige produkter krever en nedkjøling av produktene til ønsket entalpi og et lager for oppbevaring ved superkjølingstemperatur.

4.3.1 Nedkjøling

En alternativ løsning for nedkjøling av produkter for superkjøling, er å benytte den eksisterende spesialfryseren. Denne brukes i dag hovedsaklig til kjøling av nakke og kotelettkam, før disse blir kuttet til koteletter. Disse stykkene blir sendt gjennom spesialfryseren for at en andel av vannet i produktet skal fryse. Det gjør produktet stivere, og av den grunn enklere å kutte i skiver. I perioder blir også en del ytrefilet kjølt i spesialfryseren. I dag utnyttes spesialfryseren fullt ut, én dags produksjon av nakke og kotelettkam er nok til å fylle rommet (Fatland Ølen, personlig kommunikasjon, 3. mai 2011).

For å kunne fjerne nok varme må produktene oppbevares i spesialfryseren over natten. Kapasiteten er ikke stor nok til å rekke nedkjølingen i løpet av arbeidstiden. Siden det ikke er noe aktivitet med kutting og pakking om natten, er det ikke hensiktsmessig at kjøleprosessen fullføres før neste morgen. Kapasiteten vil være begrenset av spesialfryserens størrelse. Spesialfryseren vil derfor ikke kunne kjøle større mengder produkter enn den gjør i dag.

4.3.2 Skallfryser

Et alternativ til den eksisterende spesialfryseren, er å benytte en skallfryser (impingement freezer) i nedkjølingsprosessen. På grunn av lav temperatur og stor lufthastighet vil nedkjølingen i en skallfryser gå raskere enn i spesialfryseren.

ADVANTEC® Impingement Freezer

ADVANTEC® Impingement Freezer er en skallfryser fra JBT FoodTech. SINTEF Energi AS benytter en spesialutgave av denne, laget for eksperimentell bruk. I forbindelse med lagringsforsøk med superkjølt nakke, ble denne benyttet til å kjøle produktene til superkjølingstemperatur. SINTEF Energis skallfryser har

R404A som kuldemedium, og under superkjølingsforsøkene var temperaturen i skallfryseren $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kjøleanlegget kan drives med enten R404A eller R717 som kuldemedium, eller sekundærkjøling med pumpe-sirkulasjon.

Ifølge de nye tekniske spesifikasjonene fra JBT FoodTech (2011) leveres ikke ADVANTEC® Impingement Freezer lenger med R404A som kuldemedium. Skallfryseren kan leveres med R717 som kuldemedium, sekundærkjøling med pumpe-sirkulasjon, eller med et patentert system kalt LVS (low volume system) som reduserer trykktapet og mengden kuldemedium i systemet (JBT FoodTech, 2011). Dersom man ønsker et fordampningstrykk høyere enn én atmosfære, blir minimal fordampningstemperatur med R717 ca. $-33,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Med R404A blir minimum fordampningstemperatur ca. $-45,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. R717 som kuldemedium vil derfor gi en begrensning i temperaturen i skallfryseren, sammenlignet med R404A

ADVANTEC® Impingement Freezer kan leveres i ulike størrelser, både ulik lengde og ulik bredde. De ulike alternativene er vist i tabell 4.7 og tabell 4.8. Spesialfryser-rommet på Fatland Ølen har lengde ca. 9,3 m og bredde ca. 5,0 m. Det betyr at kun de to korteste modellene, modul 1 og modul 1,5, er aktuelle for dette rommet. Når det gjelder fryserens bredde er begge modellene aktuelle.

Moduler	Total lengde (mm)	Effektiv lengde (mm)
1	6410	4725
1,5	8666	6981
2	11710	9450
2,5	13966	11706
3 (2×1,5)	16222	13962
3 (3×1)	17010	14175

Tabell 4.7: Tilgjengelige lengder for ADVANTEC® Impingement Freezer (JBT FoodTech, 2011).

Hastigheten på Beltene i impulsfryseren kan varieres, slik at kjøletiden endres. Hastigheten kan varieres innenfor et avgrenset intervall. Ulike mulige hastighetsintervaller og resulterende oppholdstid for modul 1 og modul 1,5 er vist i tabell 4.9. Produktene aktuelle for superkjøling har relativt lang superkjølingstid,

Modell	Totalbredde (mm)	Effektiv bredde (mm)
xM-1250-1	3860	1220
xM-1800-1	4340	1770
xM-1250-2	3860	2x595
xM-1800-2	4340	2x870

Tabell 4.8: Tilgjengelige bredder for ADVANTEC® Impingement Freezer (JBT FoodTech, 2011).

så alternativ 4 vurderes som mest egnet Impulsfryseren kan også leveres med to like brede, parallelle belter, som kan operere med ulik hastighet. For å ha mulighet til å kunne kjøle to produkttyper på samme tid er to-delt belte den beste løsningen for superkjølingslinje i slakteriet.

Alternativ	Beltehastighet (m/min)	Oppholdstid	
		Modul 1 (min)	Modul 2 (min)
1	1,2–24	0,2–4	0,3–6
2	0,7–15	0,3–6,5	0,5–8
3	0,5–10	0,5–10	0,8–12
4	0,3–6	1–14	1,4–20

Tabell 4.9: Tilgjengelige beltehastigheter for ADVANTEC® Impingement Freezer (JBT FoodTech, 2011).

Egnet lengde og bredde for skallfryseren avhenger av produkttypene og produktmengdene som ønskes superkjølt. Tabell 4.10 viser estimert tidsforbruk ved kontinuerlig kjøling av nakkestykker på ett bånd. Hvert stykke ble antatt å kreve lengde 0,40 m og bredde 0,26 m på båndet. Den største mulige dimensjonen gir total operasjonstid på 2,2 timer. Med delt bånd, vil kjøling av 2000 nakker kreve 4,4 timers drift på det ene båndet.

Med to bånd kan to produkter med forskjellig kjøletid kjøles samtidig. Dersom man ønsker en superkjølingslinje for flere produkter bør disse samles opp og

Lengde (mm)	Bredde (mm)			
	1220	595	1770	870
4725	4,3	9,9	3,2	6,4
6981	2,9	6,7	2,2	4,4

Tabell 4.10: Beregnet tidsforbruk (timer) for kjøling av 2000 nakkerstykker, ved kjøletid 7 minutter med forskjellige størrelser på skallfryseren. For beregningene er det antatt at hver nakke krever lengde 0,40 m og bredde 0,26 m på båndet.

sendes gjennom skallfryseren i puljer, slik at man slipper å endre båndhastigheten hele tiden. Størrelsen på puljene (tiden mellom bytte av produkt for kjøling) vil avhenge av lagringsmulighetene for produktene, og antallet produkter. Ved begynnelsen av dagen vil det komme produkter like fort som de skjæres, mens det etter hvert som man bygger opp lager med produkter kan skallfryseren mates kontinuerlig. Når lageret av et produkt er sendt gjennom, bytter man produkt.

Dersom man skal kjøle produktene i puljer må man ha et egnet mellomlager for produktene før de kjøles. Siden produkttemperaturen før skallfrysing er avgjørende for resultatet, bør mellomlageret ha god temperaturrekontroll.

For produkter som skal deles opp etter skallfrysing er det mest hensiktsmessig å skallfryse dem uemballert. For ferdige produkter kan man spare eventuelle vekttap ved å skallfryse med emballasje. Vakuumpakking vil gi liten ekstra varmemotstand, mens produkter pakket i modifisert atmosfære ikke vil egne seg for skallfrysing.

4.3.3 Kjølelager

De superkjølte produktene oppbevares ved samme temperaturen som den ønskede temperaturen i produktet etter utligning. Man kan derfor ikke oppbevare produktene sammen med kjølte produkter ved 2–4 °C, uten å miste isfraksjonen i produktet.

Som nevnt i kapittel 2.7.6 er det viktig at romtemperaturen på kjølelageret er relativt konstant. Ekspedisjonen som brukes som lager for kjølte produkter i dag oppfyller ikke kravene til temperaturkontroll. Ekspedisjonen har stor takhøyde og mye trafikk. For å unngå problemer med varierende romtemperatur bør man derfor bygge et eget lager for superkjølte produkter inne i ekspedisjonen. Med et eget lager kan man redusere påvirkningen utenfra, slik at temperatur blir mer stabil. Det gir også muligheten til å ha ett temperaturnivå for superkjølte produkter og ett temperaturnivå for kjølte produkter.

Lageret for superkjølte produkter trenger en egen fordamper for å holde temperaturnivået. Dersom man velger å installere en skallfryser på spesialfryseren, kan kuldeanlegget som i dag brukes til å kjøle spesialfryseren brukes til det superkjølte lageret.

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Slakterilinje

Resultatene viser at slakteriet ikke har problemer med å oppfylle nedkjølingskravene beskrevet i kapittel 2.3. Selv om målinger av slaktevekt ikke kunne gjennomføres, er det sannsynlig at vekttapet i slaktelinja på Fatland Ølen kan reduseres med raskere kjøling. Temperaturreduksjonen i slaktet skjer betydelig raskere på Fatland Jæren enn på Fatland Ølen.

5.2 Skallfryser

De estimerte verdiene for kjøletid viser at driftsbetingelsene i skallfryseren har stor betydning for kjøleprosessen. Siden mange av disse betingelsene har blitt forenklet ut ifra ulike antagelser i beregningene, er derfor er ikke beregningene gode nok til å fastslå riktig kjøletid.

Estimeringen av kjøletid i skallfryseren viser at forholdet mellom overflate og masse er viktig for kjølehastigheten. Overflaten er bestemmende for hvor fort varmen fjernes fra produktet, mens massen er bestemmende for hvor mye varme som må fjernes.

Siden forholdene under superkjølingen har stor betydning for isfraksjonen i

sluttproduktet, bør konsekvensene av kjøling til for mye is eller for lite is kartlegges. I tillegg til å påvirke kvaliteten til det enkelte produkt kan nedkjøling til for lavt eller for høyt temperaturnivå gi vanskelige arbeidsforhold for kuldeanlegget på det superkjølte lageret.

5.3 Superkjølt produksjonslinje

Superkjøling av produkter kan i begrenset omfang gjennomføres med den eksisterende spesialfryseren. Men dersom det er ønskelig å superkjøle større mengder må man investere i en skallfryser. Skallfryseren vil gi større kapasitet, raskere nedkjøling og mindre kvalitetstap. En superkjølt produksjonslinje kan redusere behovet for nedfrysing av sesongvarer. For eksempel kan fersk ribbe til julesesongen kan produseres på et tidligere tidspunkt.

5.3.1 Superkjølt distribusjon

I denne omgang har ikke superkjølt distribusjon blitt vurdert. Omsetningstiden etter slakteriet er relativt kort, og varene flyttes relativt raskt ut i butikk. Superkjølt distribusjon vil kreve superkjølingsforhold også under transport. Da må man enten ha egen transport for disse produktene, eller adskilte rom med forskjellig temperatur i transporten. Superkjøling er foreløpig mest gunstig for slakteriene, som får større muligheter til å selge ferske produkter.

Superkjølt distribusjon kan vurderes for transport av produkter innad i Fatland-konsernet, for stykker som skjæres på Ølen og fraktes til Sandefjord for påleggsproduksjon.

5.4 Feilkilder

5.4.1 Målinger på slakteri

Målingene på slakteriene ble kun gjennomført i underkant av et døgn. For å kunne avgjøre om målingene er representative for den gjennomsnittlige driften, må målingene gjennomføres over en lengre periode. Måleinstrumentene ble plassert

ut på formiddagen, og hentet inn igjen neste formiddag. Målingene dekket derfor slutten av én produksjonsdag, og begynnelsen av en annen.

Målingene av relativ luftfuktighet viser store variasjoner. Målere plassert i samme rom viser gir forskjellige måleverdier, og for enkelte målinger varierer luftfuktigheten mellom 0 % og 100 % i løpet av kort tid. Det er tydelig at loggerne har problemer når fuktigheten er nær 100 %. Målingene av relativ luftfuktighet er derfor ikke til å stole på, og det er vanskelig å gjøre betraktninger omkring fordunstningstap utifra disse.

5.4.2 Estimering av kjøletid

På grunn av antagelsene og forenklingene som ble gjort i forbindelse med estimering av kjøletid, er det stor usikkerhet i svarene. For å finne den korrekte kjøletiden må eksperimentelle forsøk gjennomføres. Komposisjonen er ikke uniform, og det vil være store forskjeller innad i produktet. Bein, og isolerende fettlag, vil også kunne påvirke nedkjølingsprosessen.

Kjøttstykkene kan i nedkjølingsprosessen, i utgangspunktet ikke antas å oppføre seg som uendelige søyler. Men for stykker som deles opp umiddelbart etter skjæring vil ikke nedkjølingen av endestykkene påvirke isfraksjonen i stykkene på midten.

5.5 Videre arbeid

På grunn av begrensninger i tid og tilgang på informasjon, er det flere momenter ved etablering av superkjølingslinje som kunne vært interessant å kartlegge mer detaljert. For å kunne gjøre en helhetlig vurdering av kjølelinja for griseslakt bør det gjennomføres flere målinger, over en lengre periode enn det som var mulig i dette arbeidet.

5.5.1 Vekttap

På grunn av manglende datagrunnlag var det ikke mulig å finne vekttap gjennom slaktelinjene på Fatland Jæren og Fatland Ølen. Det ville være interessant å finne

vektttap på grunn av forunsting under nedkjølingen av halve griseskrotter, både på Jæren og Ølen. Ved å veie slaktene før og etter kjøling, før og etter transport, og før skjæring kan man finne vektttetapet i de ulike delprosessene.

Ønskelig å finne forskjellen i vektttap mellom rask og konvensjonell kjøling. Sammenligne vektttap gjennom sjokk-kjøler og utligning på Jæren med vektttap gjennom kjølerom på Ølen, for å finne forskjellen mellom de to kjøleprosessene. Målingene vil kunne avdekke hvor stor reduksjon i vektttap man kan forvente ved å installere rask kjøling på Fatland Ølen. Med rask kjøling på Ølen vil det være mulig å skjære grisen samme dag som den blir slaktet.

Vektmåling før og etter transport kan avdekke størrelsen på vektttetapet i transport mellom de to slakteriene. Ved å sammenligne vektttetapet mellom slakt fra Jæren sendt med transport natten etter slakting og slakt fra Jæren sendt med transport neste ettermiddag, kan man finne konsekvensen av ett ekstra døgn opphold mellom slakting og skjæring.

5.5.2 Superkjølingslinje

Denne rapporten har kun skissert muligheter for etablering av superkjølingslinje. Før man eventuelt investerer i utstyr for superkjøling og superkjølt lagring, bør man gjøre en grundigere analyse av mulighetene. Med tanke på størrelsen på en eventuell skalfryser og et superkjølt lager er man avhengig av å bestemme hvor stor andel av produksjonen som eventuelt skal superkjøles.

Dersom man kun ønsker å superkjøle en mindre del av produksjonen, kan man bruke spesialfryseren til nedkjøling av til superkjølingstemperatur. For å kunne vurdere lønnsomheten av å installere en skalfryser, bør man gjennomføre forsøk med nedkjøling til superkjølingstemperatur i spesialfryseren, blant annet for å finne vektttetapet under nedkjøling. Det vil gjøre det mulig å sammenligne investeringskostandene ved installering av skalfryser med besparelsene på grunn av redusert vektttap.

Superkjøling kan være et alternativ også for annet kjøtt enn svin. Slakteriet bør før en investeringen vurdere mulighetene for superkjølingslinje for sau/lam. Slaktesesongen for sau/lam er kort, og superkjølt kan utvide perioden hvor kjøtt

fra sau/lam kan omsettes ferskt.

Miljø

Etablering av superkjølingslinje og superkjølt lager vil kreve investeringer i nytt utstyr og materiell. Fra et miljøperspektiv bør miljøpåvirkningen ved produksjon og drift av dette vurderes opp i mot miljøpåvirkningen med dagens drift og utstyr. Dette kan gjennomføres med en LCA-analyse. I en slik analyse er nye investeringer, muligheter for redusert energibruk og redusert svinn viktige faktorer.

Kapittel 6

Konklusjon

6.1 Slakterilinje

De gjennomførte målingene i slakteriene viser at slakteriet oppfyller kravene i forskriftene, når det gjelder temperaturer i produkter og produksjonslokaler. Litteraturen antyder at vekttapet i slakterilinja på Fatland Ølen kan reduseres ved å øke nedkjølingshastigheten. Det samme gjelder reduksjon av lagringstiden for slaktene som slaktes på Fatland Jæren, og skjæres på Fatland Ølen. Siden vekttapet ikke kunne beregnes, kan det ikke fremmes noen konklusjon, men en vurdering av vekttap bør gjennomføres.

6.2 Etablering av superkjølingslinje

Temperaturmålingene indikerer at den eksisterende spesialfryseren kan kjøle produkter til superkjølt nivå, men kun i begrensede mengder. Den langsomme nedkjølingsprosessen vil ifølge den foreliggende litteraturen, gi økte vekttap og redusert kvalitet i sluttproduktet. For å finne ut om spesialfryseren egner seg til superkjøling, bør det gjennomføres forsøk i spesialfryseren eller tilsvarende omgivelser, med nedkjøling til og lagring ved superkjølt temperatur. Sluttproduktet etter lagring bør sammenlignes med superkjølte produkter kjølt med skallfryser.

Dersom man ønsker en superkjølt produksjonslinje for en større andel enn hva som lar seg gjøre med spesialfryseren, bør man investere i en skallfryser. Med skallfryser kan nedkjølingstiden reduseres kraftig slik at produktene kan prosesseres videre samme dag. Skallfryser gir mulighet for å superkjøle større mengder kjøtt og med mindre kvalitetstap.

6.3 Superkjølt lager

Temperaturnivået på det aktuelle kjølelageret på Fatland Ølen tilfredsstillende ikke kravene til et superkjølt lager. De superkjølte produktene kan ikke lagres på samme temperatur som konvensjonelt kjølte produkter. Varierende temperatur under lagring gir tap av holdbarhet og kvalitet for superkjølte produkter og de superkjølte produktene er avhengig av en mer stabil temperatur enn tilfellet er på det store kjølelageret. Det bør derfor investeres i et eget kjølerom for de superkjølte produktene, med temperaturregulering og ytelse uavhengig av omgivelsene.

Temperaturen på kjølelageret er kompromiss mellom holdbarhet og kvalitet. Økt isfraksjon gir generelt forlenget holdbarhet, men med mulig tap av kvalitet som konsekvens. På grunn av forskjeller i sammensetning av næringsstoffer, vil det ulike produktene har ulik isfraksjon ved den samme temperaturen. Lagringstemperaturen må derfor velges slik at alle produktene lagres med en akseptabel isfraksjon. De estimerte verdiene for isfraksjon antyder at lagringstemperaturen bør ligge i området $-1,15$ – $(-1,10)$ °C, avhengig hvilke produkter som skal kjøles. Ved denne temperaturen vil magre produkter ha en relativt høy isfraksjon, mens de fete produktene generelt vil ha en lav isfraksjon.

6.4 Nedkjølingstid

Både produktdimensjon, lufttemperatur, varmeovergangstall, konduktivitet og produkttemperatur før kjøling hadde betydelig innvirkning på den estimerte nedkjølingstiden i skallfryser. Det viste at et slikt forenklet estimat ikke er godt nok til å bestemme den faktiske kjøletiden, siden det er stor usikkerhet i de ulike

parameterne. Kjøletiden må bestemmes eksperimentelt, for de gitte forholdene skallfryseren opererer ved.

Selv om estimatet ikke er nøyaktig nok til å fastslå kjøletiden, viser resultatene konsekvensene av variasjon i parameterne. Isfraksjonen oppnådd ved en gitt kjøletid vil variere, både mellom produkter og innenfor det hvert enkelt produkt. Det betyr at produkter vil måtte avgi eller motta netto varme under utligning. Dette gjelder spesielt for produkter som deles opp rett etter kjøling.

Referanseliste

- Animalia (2009) Kjøttets tilstand 2009. [online]. Tilgjengelig fra: http://www.animalia.no/upload/Filer%20til%20nedlasting/KT09/Kj%c3%b8ttets_tilstand_2009.pdf. [Lastet ned 12. juni 2011].
- Aparicio, C., Otero, L., Guignon, B., Molina-García, A. D. og Sanz, P. D. (2008) Ice content and temperature determination from ultrasonic measurements in partially frozen foods. *Journal of Food Engineering*, 88(2), 272–279.
- ASHRAE (Red.) (2006) *2006 ASHRAE Handbook – Refrigeration (S-I edition)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Becker, B. R. og Fricke, B. A. (1999) Food thermophysical property models. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 26(5), 627–636, (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Billiard, F. (2005) Refrigerating Equipment, Energy Efficiency and Refrigerants. [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.iifiir.org/en/doc/1059.pdf>. [Lastet ned 14. desember 2010].
- Borch, E. og Arinder, P. (2002) Bacteriological safety issues in red meat and ready-to-eat meat products, as well as control measures. *Meat Science*, 62(3), 381–390.

- Borch, E., Nesbakken, T. og Christensen, H. (1996) Hazard identification in swine slaughter with respect to foodborne bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 30(1–2), 9–25.
- Briley, G. C. (1980) Energy efficiency in mechanical refrigeration systems for the meat industry. *International Journal of Refrigeration*, 3(1), 37–41.
- Brown, T. og James, S. J. (1992) Process design for pork chilling. *International Journal of Refrigeration*, 15(5), 281–289.
- Bustabad, O. M. (1999) Weight loss during freezing and the storage of frozen meat. *Journal of Food Engineering*, 41(1), 1–11.
- Calm, J. M. (2002) Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 25(3), 293–305.
- Calm, J. M. (2006) Comparative efficiencies and implications for greenhouse gas emissions of chiller refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 29(5), 833–841.
- Calm, J. M. (2008) The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook. *International Journal of Refrigeration*, 31(7), 1123–1133.
- Campañone, L. A., Salvadori, V. O. og Mascheroni, R. H. (2001) Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods. *Journal of Food Engineering*, 47(2), 69–79.
- Carlsson-Kanyama, A. og Faist, M. (2000) Energy use in the food sector: A data survey. AFR report 291, Sweden, February 2000. (Sitert etter James, S. J. og James, C., 2010).
- Chang, H. D. (1981) Correlations of enthalpies of food systems. *Journal of Food Science*, 46, 1493, (Sitert etter ASHRAE, 2006).

- Chen, C. S. (1985) Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of foods: Enthalpy and apparent specific heat. *Journal of Food Science*, 50, 1158, (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Choi, Y. og Okos, M. R. (1986) Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. I LeMaguer, M. og Jelen, P. (Red.), *Food Engineering and Process Applications*, (ss. 93–101), Elsevier Applied Science, London (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Coulomb, D. (2008) Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment. *Trends in Food Science & Technology*, 19(8), 413–417.
- Duun, A. S., Hemmingsen, A. K. T., Haugland, A. og Rustad, T. (2008) Quality changes during superchilled storage of pork roast. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 2136–2143.
- ECDC (2010) *Annual Epidemiological Report on Communicable Diseases in Europe 2010*. European Centre for Disease Prevention and Control.
- Fatland (2009) Årsberetning 2008. [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.fatland.no/newsread/readimage.aspx?WCI=GetByID&IMAGEID=1&DOCID=10490>. [Lastet ned 30. november 2010].
- Fatland (2010) Fatland AS. [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.fatland.no/newsread/news.asp?N=5129>. [Lastet ned 30. november 2010].
- FOR-2008-12-19-1618 (2008) *Forskrift om dypfryste næringsmidler*. Helse- og omsorgsdepartementet, <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20081219-1618.html>.
- FOR-2008-12-22-1624 (2008) *Forskrift om særlige hygieneregler for næringsmidler av animalsk opprinnelse (animaliehygieneforskriften)*. Fiskeri- og kystdepartementet, Helse- og omsorgsdepartementet og Landbruks- og matdepartementet, <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20081222-1624.html>.

- Fricke, B. A. og Becker, B. R. (2001) Evaluation of thermophysical property models for foods. *International Journal of HVAC&R Research*, 7(4), 311–330, (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Fricke, B. A. og Becker, B. R. (2002) Evaluation of thermophysical property models for foods (RP-888). Presentert ved ASHRAE Winter Meeting, 12.–16. januar 2002, Atlantic City, (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Fritzson, A. og Berntsson, T. (2006) Efficient energy use in a slaughter and meat processing plant – opportunities for process integration. *Journal of Food Engineering*, 76(4), 594–604.
- Gigiel, A. J. og James, S. J. (1984) Chilling and storage of pig carcasses using high humidity air as produced by an ice bank cooler. *Meat Science*, 11(1), 1–12.
- Gosney, W. B. og Olama, H. A. L. (1975) Heat and enthalpy gains through cold room doorways. *Proceedings of the Institute of Refrigeration*, vol. 72, 31–41, (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Granum, P. E. (Red.) (1996) *Smittsomme sykdommer fra mat : næringsmiddelbårne infeksjoner og intoksikasjoner*. Kristiansand: Høyskoleforlaget AS.
- Greer, G. G., Gill, C. O. og Dilts, B. D. (1994) Evaluation of the bacteriological consequences of the temperature regimes experienced by fresh chilled meat during retail display. *Food Research International*, 27(4), 371–377.
- Grujić, R., Petrović, L., Pikula, B. og Amidžić, L. (1993) Definition of the optimum freezing rate – 1. Investigation of structure and ultrastructure of beef *M. longissimus dorsi* frozen at different freezing rates. *Meat Science*, 33(3), 301–318.
- Halimic, E., Ross, D., Agnew, B., Anderson, A. og Potts, I. (2003) A comparison of the operating performance of alternative refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, 23(12), 1441–1451.

- Haugland, A., Aune, E. J. og Hemmingsen, A. K. T. (2005) Superchilling – innovative processing of fresh food. *Eurofreezer 2005: Individual Quick Freezing of Foods, Sofia (Bulgaria)*.
- Hendrix, W. A., Henderson, D. R. og Jackson, H. Z. (1989) Infiltration heat gains through cold storage room doorways. *ASHRAE Transactions*, 95(2), (Siteretter ASHRAE, 2006).
- Humphrey, T. og Jørgensen, F. (2006) Pathogens on meat and infection in animals – Establishing a relationship using campylobacter and salmonella as examples. *Meat Science*, 74(1), 89–97.
- IIR (2002) Report on Refrigeration Sector Achievements and Challenges. [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.iifiir.org/en/doc/1085.pdf>. [Lastet ned 14. desember 2010].
- James, S. J., Gigiell, A. J. og Hudson, W. R. (1983) The ultra rapid chilling of pork. *Meat Science*, 9(1), 63–78.
- James, S. J. og James, C. (2002) *Meat refrigeration*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- James, S. J. og James, C. (2010) The food cold-chain and climate change. *Food Research International*, 43(7), 1944–1956.
- James, S. J., James, C. og Evans, J. A. (2006) Modelling of food transportation systems – a review. *International Journal of Refrigeration*, 29(6), 947–957.
- JBT FoodTech (2011) Tekniske spesifikasjoner for Frigoscandia ADVANTEC™ Impingement Freezer fra JBT FoodTech. Informasjon mottatt på e-post.
- Jones, S. D. M., Greer, G. G., Jeremiah, L. E., Murray, A. C. og Robertson, W. M. (1991) Cryogenic chilling of pork carcasses: Effects on muscle quality, bacterial populations and palatability. *Meat Science*, 29(1), 1–16.

- Jones, S. D. M., Jeremiah, L. E. og Robertson, W. M. (1993) The effects of spray and blast-chilling on carcass shrinkage and pork muscle quality. *Meat Science*, 34(3), 351–362.
- Josephsen, J. O. og Schøyen, R. (Red.) (1997) *Mikroorganismer og sykdom : lærebok i mikrobiologi for helsepersonell*. Oslo: Ad Notam Gyldendal AS, 7 utg.
- Koehler, J., Tegethoff, W. J., Westphalen, D. og Sonnenkalb, M. (1997) Absorption refrigeration system for mobile applications utilizing exhaust gases. *Heat and Mass Transfer*, 32(5), 333–340.
- Likar, K. og Jevšnik, M. (2006) Cold chain maintaining in food trade. *Food Control*, 17(2), 108–113.
- Magnussen, O. M., Haugland, A., Hemmingsen, A. K. T., Johansen, S. og Nordtvedt, T. S. (2008) Advances in superchilling of food – Process characteristics and product quality. *Trends in Food Science & Technology*, 19(8), 418–424.
- McMullan, J. T. (2002) Refrigeration and the environment – issues and strategies for the future. *International Journal of Refrigeration*, 25(1), 89–99.
- Miles, C. A. (1974) Meat freezing – Why and how? I *Proceedings of the Meat Research Institute*, bd. Symposium No. 3, Bristol, (ss. 15.1–15.7), (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Mohanraj, M., Jayaraj, S. og Muraleedharan, C. (2009) Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants – A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(1), 108–119.
- Molina, M. J. og Rowland, F. S. (1974) Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810–812.
- Murakami, E. G. og Okos, M. R. (1989) Measurement and prediction of thermal properties of foods. I Singh, R. P. og Medina, A. G. (Red.), *Food Properties*

and *Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems*, (ss. 3–48), Kluwer Academic, Dordrecht, (Sisert etter ASHRAE, 2006).

- Nesbakken, T., Eckner, K., Høidal, H. K. og Røtterud, O.-J. (2003) Occurrence of *Yersinia enterocolitica* and *Campylobacter* spp. in slaughter pigs and consequences for meat inspection, slaughtering, and dressing procedures. *International Journal of Food Microbiology*, 80(3), 231–240.
- Nesbakken, T., Eckner, K. og Røtterud, O.-J. (2008) The effect of blast chilling on occurrence of human pathogenic *Yersinia enterocolitica* compared to *Campylobacter* spp. and numbers of hygienic indicators on pig carcasses. *International Journal of Food Microbiology*, 123(1–2), 130–133.
- Nesbakken, T. og Skjerve, E. (1996) Interruption of microbial cycles in farm animals from farm to table. *Meat Science*, 43(1), 47–57.
- Nørrung, B. og Buncic, S. (2008) Microbial safety of meat in the European Union. *Meat Science*, 78(1–2), 14–24.
- Nygård, K., Vold, L., Heier, B. T., Bruun, T. og Kapperud, G. (2010) *Årsrapport – Matbårne infeksjoner og utbrudd i 2009. Meldingssystem for smittsomme sykdommer (MSIS) og Veibasert system for utbruddsvarsling (Vesuv)*. Nasjonalt folkehelseinstitutt.
- Opplysningskontoret for egg og kjøtt (2011) Oppdelingsguide gris. [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.matprat.no/nyttig-a-vite/oppdeling/gris/>. [Lastet ned 12. juni 2011].
- Owen, M. S. (Red.) (2009) *2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals (I-P edition)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Pearson, A. (2008) Refrigeration with ammonia. *International Journal of Refrigeration*, 31(4), 545–551.

- Petrović, L., Grujić, R. og Petrović, M. (1993) Definition of the optimum freezing rate – 2. Investigation of the physico-chemical properties of beef *M. longissimus dorsi* frozen at different freezing. *Meat Science*, 33(3), 319–331.
- Pham, Q. T. (1989) Effect of supercooling on freezing time due to dendritic growth of ice crystals. *International Journal of Refrigeration*, 12(5), 295–300.
- Ramírez, C. A., Patel, M. og Blok, K. (2006) How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries. *Energy*, 31(12), 2047–2063.
- Repice, C. og Stumpf, A. (2007) Energy efficiency in transport refrigeration. I Proceedings , International Congress of Refrigeration, Beijing, China, Paper No. ICR07-D2-362. (Siterter etter Tassou, S. A. et al., 2009).
- Savell, J., Mueller, S. L. og Baird, B. E. (2005) The chilling of carcasses. *Meat Science*, 70(3), 449–459.
- Schwarzberg, H. G. (1981) Mathematical analysis of the freezing and thawing of food. Presentert ved AIChE Summer Meeting, Detroit, MI, (Siterter etter ASHRAE, 2006).
- Sekiya, A. (2007) The evaluation of time variation global warming effects, TWPA and CWP, for CFC alternatives. *Journal of Fluorine Chemistry*, 128(10), 1137–1142.
- Sovacool, B. K. (2008) Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 36(8), 2950–2963.
- Stevik, A., Duun, A. S., Rustad, T., O’Farrell, M., Schulerud, H. og Ottestad, S. (2010) Ice fraction assessment by near-infrared spectroscopy enhancing automated superchilling process lines. *Journal of Food Engineering*, 100(1), 169–177.

- Tassou, S. A., De-Lille, G. og Ge, Y. T. (2009) Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Applied Thermal Engineering*, 29(8–9), 1467–1477.
- Tchigeov, G. (1979) Thermophysical processes in food refrigeration technology. Food Industry, Moskva, (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- USDA (2009) USDA Nutrient Data Set for Fresh Pork (From SR), Release 2.0. [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/12354500/Data/Pork/Pork09.pdf>. [Lastet ned 21. mars 2011].
- USDA (2010) USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 23. [online]. Tilgjengelig fra: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/12354500/Data/SR23/reports/sr23fg10.pdf>. [Lastet ned 6. juni 2011].
- van der Wal, P. G., Engel, B., van Beek, G. og Veerkamp, C. H. (1995) Chilling pig carcasses: Effects on temperature, weight loss and ultimate meat quality. *Meat Science*, 40(2), 193–202.
- Van Moeseke, W., De Smet, S., Claeys, E. og Demeyer, D. (2001) Very fast chilling of beef: effects on meat quality. *Meat Science*, 59(1), 31–37.
- Zhou, G. H., Xu, X. L. og Liu, Y. (2010) Preservation technologies for fresh meat – A review. *Meat Science*, 86(1), 119–128.

Vedlegg A

Draft paper

Feasibility study for establishing a super chilled production line in a slaughterhouse

Bjørn Austbø

June 14, 2011

Abstract

The possibility for establishing a superchilled production line for pork at a slaughterhouse was investigated. The capacity of existing refrigeration rooms was found to be too small to enable a superchilled production line for more than pork chops. For larger quantities installing an impingement freezer was considered. The cooling time for Boston butt was estimated by FVM. The results indicate that small differences in product size have a considerable impact on the cooling time, and that the estimated values must be supplemented by experimental work.

1 Introduction

Meat is usually stored cooled at 2–7 °C, or frozen below -18 °C. Cold storage provides high quality, but limited shelf life, whereas frozen storage provides long shelf life, with possible loss in quality. Super chilling is a conservation method in between chilling and freezing, as a compromise between shelf life and quality. Superchilled production and storage can provide longer shelf life than chilling, and less loss in quality than freezing.

At superchilled storage the product is kept at a temperature below the initial freezing point, often 1–2 °C below. The product is stored with an amount of the water content frozen (Magnussen et al., 2008). The freezing point in a food stuff

depend upon the concentration of solutes in the water, but is for most products in the range $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Duun et al., 2008).

As the temperature is lowered below the initial freezing point ice crystals start to form. As water is frozen, the solute concentration in the rest of the liquid water is increased, and the freezing point is lowered. In contrast to pure water freezing at one temperature, the water in the food stuff will freeze over a temperature range. The super chilled product is stored at a temperature in this range.

Most of the microbial activity is terminated at superchilling temperatures, and growth and toxin production of pathogenic bacteria able to grow below $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ is significantly reduced (Haugland et al., 2005; Duun et al., 2008). However, chemical and physical changes in the food may still take place, and are in some cases even accelerated (Haugland et al., 2005).

By superchilled storage at $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Duun et al. (2008) found the shelf life of pork roast to be increased from 2 weeks at storage temperature $2\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}$, to 16 weeks. In temperature abused storage, with four temperatures up to $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ during the storage period, the microbial growth was equal to the conventionally chilled reference at $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Duun et al., 2008). Thus, to increase the shelf life of meat by superchilling the storage temperature must be controlled.

Duun et al. (2008) found small variations in the storage temperature, between $1\text{--}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ to be tolerated. The ice stored in the product serves as a cold reservoir, allowing the product to take up small amounts of ambient heat load, keeping the product temperature low (Magnussen et al., 2008). For the shelf life, the product temperature should be kept as low as possible, but for the quality the ice fraction must be limited.

The ice crystals formed during freezing can cause dehydration of cells and muscle contraction during thawing (Magnussen et al., 2008). As the ice fraction increases, the increased solute concentration can cause denaturation of muscle proteins and structural damage of membranes. This may result in increased drip loss, reduced water holding capacity and textural changes (Duun et al., 2008).

Freezing rate is also crucial to the quality of the food. Petrović et al. (1993) found slow freezing of beef *M. longissimus dorsi* to give more product drip loss

than fast freezing, due to the structural changes in the muscle fibers. Slow freezing result in larger, irregular ice crystals, compared to fast freezing. Grujić et al. (1993) found that in fast freezing of beef *M. longissimus dorsi* ice crystals were formed both between and within the fibers, while in slow freezing the ice crystals were only formed between the fibers.

As the solute concentration is lower between the fibers than within, the freezing point temperature here is higher. Thus, in slow freezing the intercellular water will freeze first. When the intercellular water starts freezing the difference in solute concentration between and within the muscle fibers increases, and to equalize the concentration water diffuses from the cells to the intercellular space. Ice crystal formation in within the fibers is unlikely, even if the temperature reaches the freezing point, because growth of existing crystals is more probable than formation of new crystals (Grujić et al., 1993).

In fast freezing formation of ice within the fibers take place, because the temperature reduction is so fast that ice crystals can form before the water has time to leave the cells. Thus, more and smaller ice crystals are formed during fast freezing and fiber damage is smaller (Grujić et al., 1993).

2 Materials and methods

2.1 Slaughter line

The slaughter line for pork at to slaughterhouses was studied. At the first slaughterhouse six half pork carcasses were followed through blast chilling and equalization, before transported to the second slaughterhouse for cutting. Also at the second slaughterhouse six half pork carcasses were followed from slaughter, through chilling to cutting. After cutting six primal cuts of Boston butt/shoulder blade (from the carcasses followed from the first slaughterhouse) were followed through further chilling, cutting, storage and transport to wholesale storage.

Throughout the slaughter line product and ambient conditions were measured. Product temperatures were measured with iButton® DS1992L (Maxim Integrated Products, Inc.) and ambient temperature and relative humidity mea-

sured with Tiny Tag PLUS 2 TGP-4500 (Gemini Data Loggers). Product temperatures were measured in the center of the shoulder, center of the leg and the surface of the leg. Both product and ambient condition measurements were logged every two minutes.

2.2 Superchilling

Superchilling heat load and time consumption were estimated. Food composition data for different cuts of pork were taken from ASHRAE (2006), USDA (2009) and USDA (2010). From the composition thermal conductivity, density and specific heat for the different food components were estimated from models by Choi and Okos (1986) (according to ASHRAE (2006)).

The initial freezing point t_{if} was estimated by a correlation developed by Chang (1981) (according to ASHRAE (2006)):

$$t_{if} = -1,97 + 1,47x_w, \quad (1)$$

where x_w is the total water fraction in the food stuff. The ice fraction x_{ice} at temperatures t below the initial freezing point was estimated as

$$x_{ice} = \frac{1,105x_w}{1 + \frac{0,7138}{\ln(t_{if}-t+1)}}, \quad (2)$$

an empirical relation proposed by Tchigeov (1979) (according to ASHRAE (2006)).

Specific enthalpy was estimated by integrating the model for specific heat:

$$h = \int c_p dT. \quad (3)$$

For temperatures below the initial freezing point, ice fraction was first found from equation (2). The specific enthalpy was then calculated from equation (3), assuming all water freezing at 0 °C, integrating the ice fraction as liquid above 0 °C and as ice below 0 °C, and adding the heat of fusion.

The cooling time to reach superchilling enthalpy levels for Boston butt in an impingement freezer, was estimated by the finite element method (FVM). The Boston butt was assumed to behave as an infinite rectangular rod, with uniform

composition. The cooling time was calculated using the 2D conduction equation,

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (4)$$

for a cross-section of the infinite rod. Assuming heat flow perpendicular to the muscle fibers, the thermal conductivity was estimated as

$$k_{\perp} = \frac{1}{\sum_i (x_i^v / k_i)}, \quad (5)$$

with k_i the thermal conductivity and x_i^v the volume fraction of component of component i . Equation (5) was proposed by Murakami and Okos (1989) (according to ASHRAE (2006)), as an analogy to electrical resistance. The volume fraction of component i was calculated as

$$x_i^v = \frac{x_i / \rho_i}{\sum_n x_n / \rho_n}, \quad (6)$$

with ρ_i / ρ_n the density of the component.

The simulation was performed with the explicit Euler method in time and the central FVM in space, for one fourth of the cross-section, taking advantage of the symmetry. As an initial condition the meat was assumed to have a uniform temperature. At the symmetry boundaries no heat flux was assumed, and at the boundaries to the ambient air convective heat transfer was assumed. The heat transfer coefficient was assumed to be 200 W/m²K and the air temperature -38 °C.

3 Results and discussion

A superchilled production line would require a system for cooling the products to superchilling temperature and a storage for the superchilled products. The alternative solutions for the cooling system is to utilize the existing refrigeration capacity or to install a impingement freezer.

3.1 Storage

Today all the fresh products are kept in a two story cold storage until transport to wholesale storage or retail sale. Daily average temperatures in the cold storage for packed products, measured October to November 2010, are shown in figure 1. As indicated in the figure the refrigeration system is unable to keep a stable temperature in the large storage room. The daily average temperature on the ground floor is about 0.5 °C higher than the temperature on the first floor, and the variation in daily average temperature is more than 1.5 °C for both floors during the measurement period.

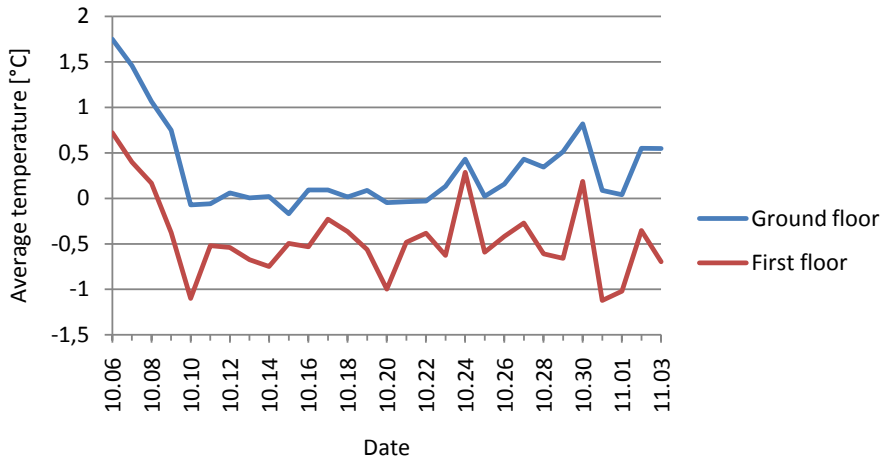


Figure 1: Daily average temperatures in the cold storage for packed products, measured October to November 2010.

As storage temperature variations have a great negative impact on the quality and shelf life of superchilled products, the cold storage is not suitable for superchilled storage as it is today. A possible solution is to establish a smaller superchilled storage inside the existing storage. In a smaller storage the temperature regulation would be easier, as the disturbance from truck and people traffic, product loading and shipping, can be reduced. The superchilled storage should

be equipped with an evaporator, to provide faster temperature regulation. A superchilled storage is also required, as the storage temperature of the superchilled products will be lower than for conventionally chilled products.

Different pork cuts have different composition, thus the thermal properties will also differ. In figure 2 ice fraction for different pork cuts at different temperatures is shown. The values are estimated from equation (1) and (2). As indicated in the figure different cuts would have different ice fractions at the same temperature. For the same temperature, the ice fraction in bone-in cuts of Boston butt, top loin and sirloin is 5-10 % lower than in boneless cuts of tenderloin, shoulder and pork roast. Cuts of spareribs have a higher fraction of fat than the other cuts. Thus the estimated freezing point of spareribs is relatively low.

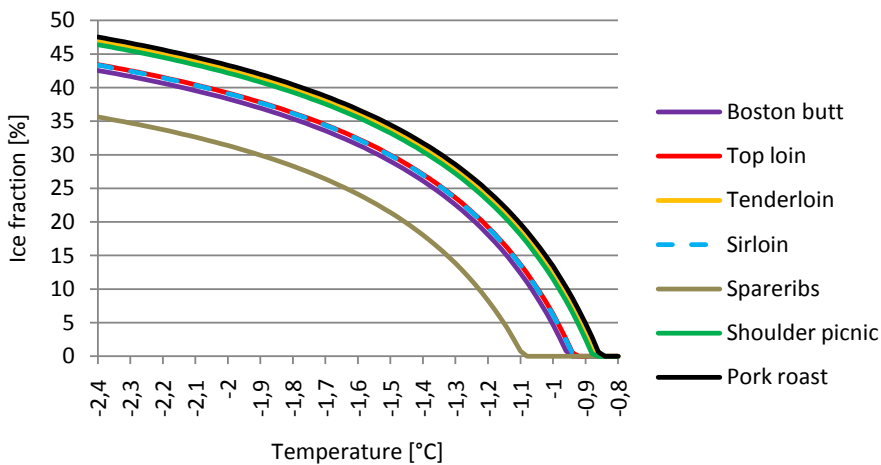


Figure 2: Estimated ice fraction for different cuts of pork as a function of product temperature.

If one storage is to be used for all cuts, the storage temperature must be chosen for all to have a satisfactory ice fraction. At the estimated freezing point for spareribs the estimated ice fraction in pork roast is more than 18 %. For the estimated ice fraction in spareribs to be more than 5 %, the temperature must be lowered to -1.15 °C, which would give 22 % ice in the cuts of pork

roast. The optimum storage temperature would depend on the cuts chosen for superchilling. If all cuts are chosen, the consequences of high ice fraction in lean products must be evaluated against the consequences of low ice fraction in fat products. The estimated values indicate a temperature in the range $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. For the calculations of Boston butt cooling time, a storage temperature of $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ was chosen.

Figure 2 also indicates that small variations in equalized product temperature will result in large variations in ice fractions. For Boston butt initially stored at $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and an ice fraction of about 12 %, a temperature of abuse of $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ will result in ice fractions varying from 5 % to 17 %. This again substantiates the importance of a stable and correct storage temperature. The superchilled storage is only designed to maintain the temperature of the products, thus the heat load must be removed before storage.

3.2 Cooling

For easier and cleaner cuts, pieces of Boston butt and loin, and in periods a quantity of tenderloin, are partially frozen before chopping. This is done in a small refrigeration room with temperature $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. The room is filled as the carcasses are cut and the cuts are cooled over night. The room is big enough for the daily production of chops from Boston butt and loin. The average cooling curve for six pieces of Boston Butt during chilling in this room is illustrated in figure 3, together with the air temperature.

When leaving the refrigeration room for chopping, the temperature of the thermal center is $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the surface temperature $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. As the initial freezing point was estimated to be $-0.95\text{ }^{\circ}\text{C}$, the products had a small ice fraction. The refrigeration system was not running the entire period, indicating that refrigeration room has capacity to reduce the temperature even more.

The possibility for using this refrigeration room to cool the superchilled products is limited by the size and capacity of the room. The cooling time is too long to enable further handling and packing the same day as cutting. As all the space is used when filled with Boston butt and loin, the refrigeration room can not be

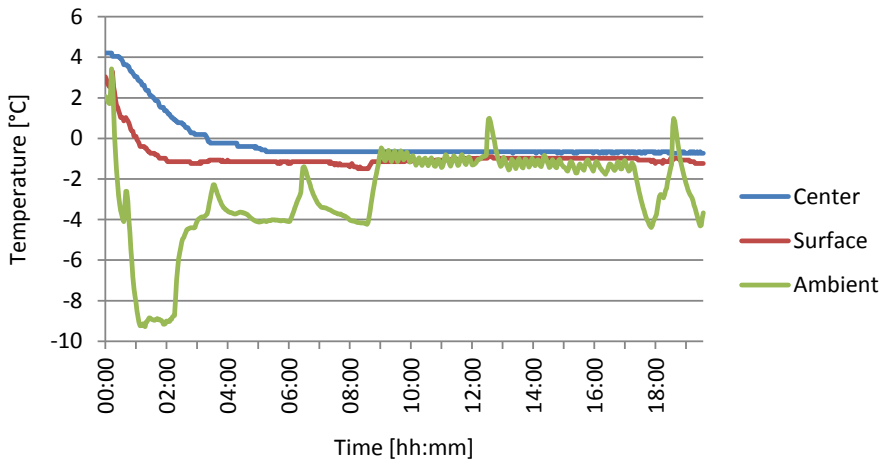


Figure 3: Temperature during partial freezing of Boston butt before chopping. Product temperatures shown are the arithmetic mean of temperatures measured in six pieces of Boston butt.

used to cool larger amounts than it does today. This suggests that the possibility to use this refrigeration room in a superchilled production line is restricted to a superchilled line for pork chops only. Another drawback with the refrigeration room for superchilling is the long chilling time, as slow freezing involves increased drip loss, and for unpacked products evaporative losses.

For faster chilling and larger capacity, installing a impingement freezer is an alternative. In an impingement freezer low temperature and high air velocity is used to rapidly chill the surface of the product. The estimated temperature profile in a rectangular cross-section of Boston butt is shown in figure 4. The temperature of the core is unchanged, while the surface is cooled to the temperature of the cooling air. Ice is formed only close to the surface.

The estimated chilling time for a rectangular piece of Boston butt with cross-section 21×7 cm was about 7.5 minutes.

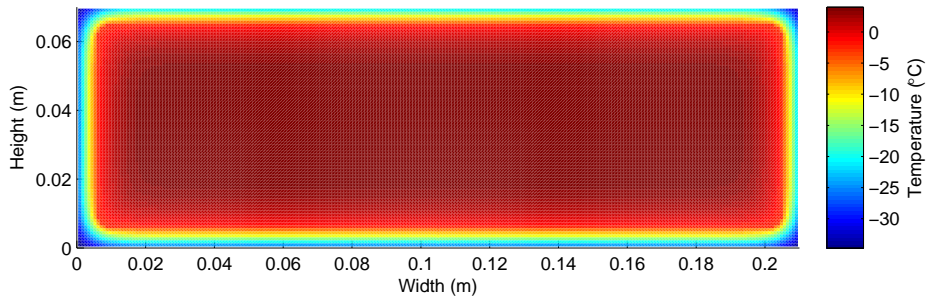


Figure 4: Estimated temperature profile in Boston butt rectangular cross-section, after cooling in impingement freezer to the enthalpy level providing 10 % ice fraction after equalization.

4 Conclusion

Installing an impingement freezer will enable fast superchilling, with high food quality. As the cooling time is highly dependent on the size of the individual product, special care must be taken in the chilling process. To retain long shelf life and high quality a superchilled cold storage should be installed.

References

- ASHRAE (Red.) (2006) *2006 ASHRAE Handbook – Refrigeration (S-I edition)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Chang, H. D. (1981) Correlations of enthalpies of food systems. *Journal of Food Science*, 46, 1493, (Sitert etter ASHRAE, 2006).
- Choi, Y. and Okos, M. R. (1986) Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. I LeMaguer, M. and Jelen, P. (Red.), *Food Engineering and Process Applications*, (ss. 93–101), Elsevier Applied Science, London (Sitert etter ASHRAE, 2006).

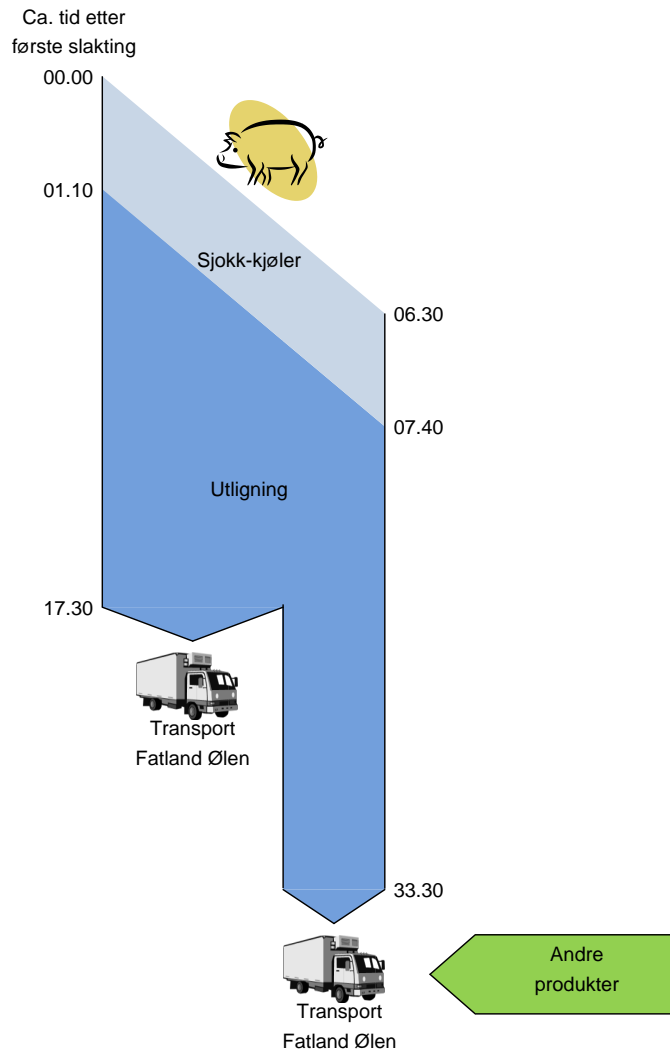
- Duun, A. S., Hemmingsen, A. K. T., Haugland, A. and Rustad, T. (2008) Quality changes during superchilled storage of pork roast. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 2136–2143.
- Grujić, R., Petrović, L., Pikula, B. and Amidžić, L. (1993) Definition of the optimum freezing rate – 1. Investigation of structure and ultrastructure of beef *M. longissimus dorsi* frozen at different freezing rates. *Meat Science*, 33(3), 301–318.
- Haugland, A., Aune, E. J. and Hemmingsen, A. K. T. (2005) Superchilling – innovative processing of fresh food. *Eurofreezer 2005: Individual Quick Freezing of Foods, Sofia (Bulgaria)*.
- Magnussen, O. M., Haugland, A., Hemmingsen, A. K. T., Johansen, S. and Nordtvedt, T. S. (2008) Advances in superchilling of food – Process characteristics and product quality. *Trends in Food Science & Technology*, 19(8), 418–424.
- Murakami, E. G. and Okos, M. R. (1989) Measurement and prediction of thermal properties of foods. I Singh, R. P. and Medina, A. G. (Red.), *Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems*, (ss. 3–48), Kluwer Academic, Dordrecht, (Cited by ASHRAE, 2006).
- Petrović, L., Grujić, R. and Petrović, M. (1993) Definition of the optimum freezing rate – 2. Investigation of the physico-chemical properties of beef *M. longissimus dorsi* frozen at different freezing. *Meat Science*, 33(3), 319–331.
- Tchigeov, G. (1979) Thermophysical processes in food refrigeration technology. Food Industry, Moscow, (Cited by ASHRAE, 2006).
- USDA (2009) USDA Nutrient Data Set for Fresh Pork (From SR), Release 2.0. [online]. Available: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/12354500/Data/Pork/Pork09.pdf>. [Downloaded March 21st 2011].
- USDA (2010) USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 23. [online]. Available from: <http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/>

Place/12354500/Data/SR23/reports/sr23fg10.pdf. [Downloaded June 6th 2011].

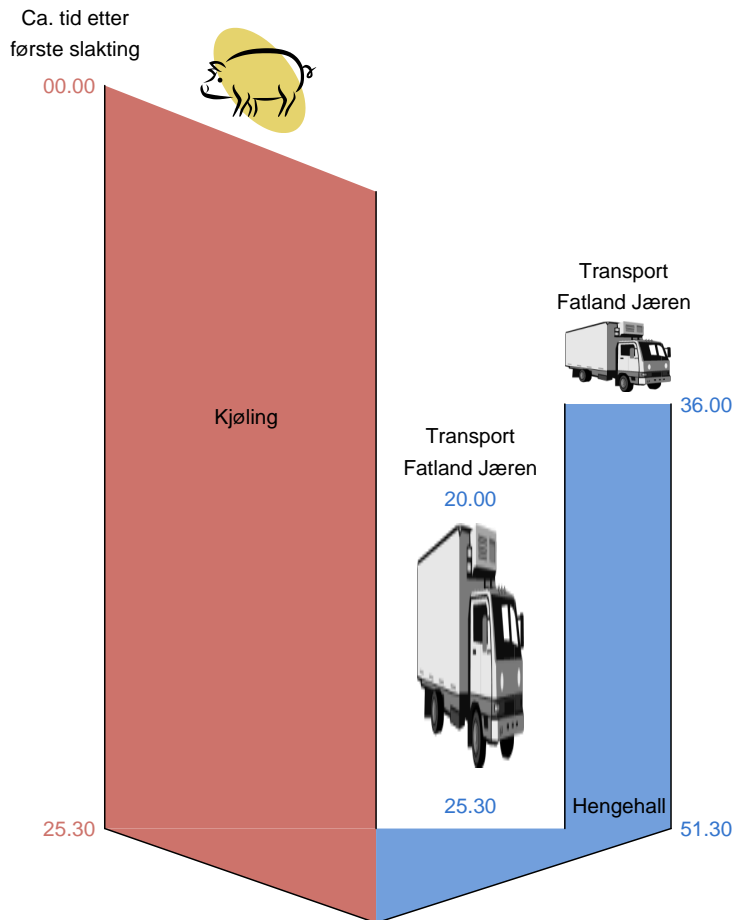
Vedlegg B

Produktflyt slakterilinjer

Skisser av produktflyten i slakterilinjene ved Fatland Jæren og Fatland Ølen, fram til skjæring.



Figur B.1: Produktflyt og med ca. oppholdstider i slaktelinje Fatland Jæren. Tid etter første slakting (uten skala) angitt på den vertikale aksene og tilnærmet mengde angitt på den horisontale aksene.



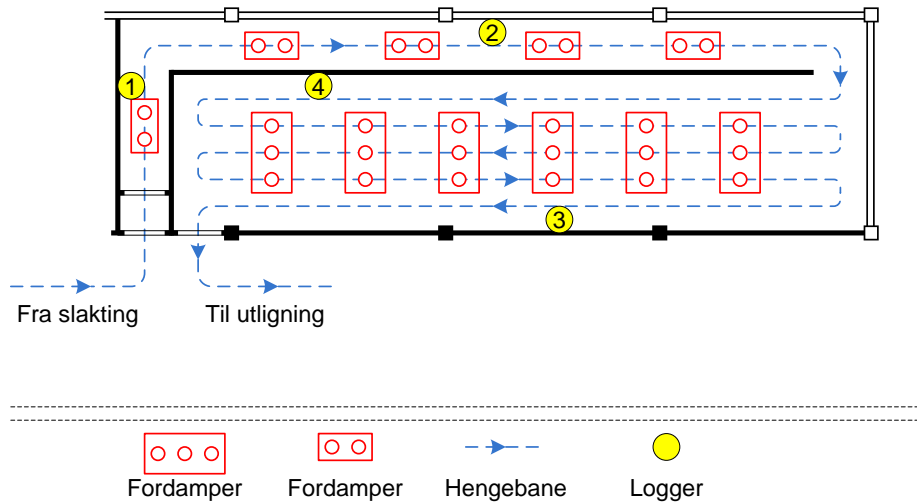
Figur B.2: Produktflyt og med ca. oppholdstider i slaktelinje Fatland Ølen. Tid etter første slakting (uten skala) angitt på den vertikale aksene og tilnærmet mengde angitt på den horisontale aksene. Blått viser gris slaktet på Jæren og rødt gris slaktet på Ølen. Tiden for slaktene fra Jæren en fortsettelse fra slakterilinja på Jæren, vist i figur B.1. De to partiene som ankommer fra Jæren har blitt slaktet hver sin dag.

Vedlegg C

Planskisser

C.1 Fatland Jæren

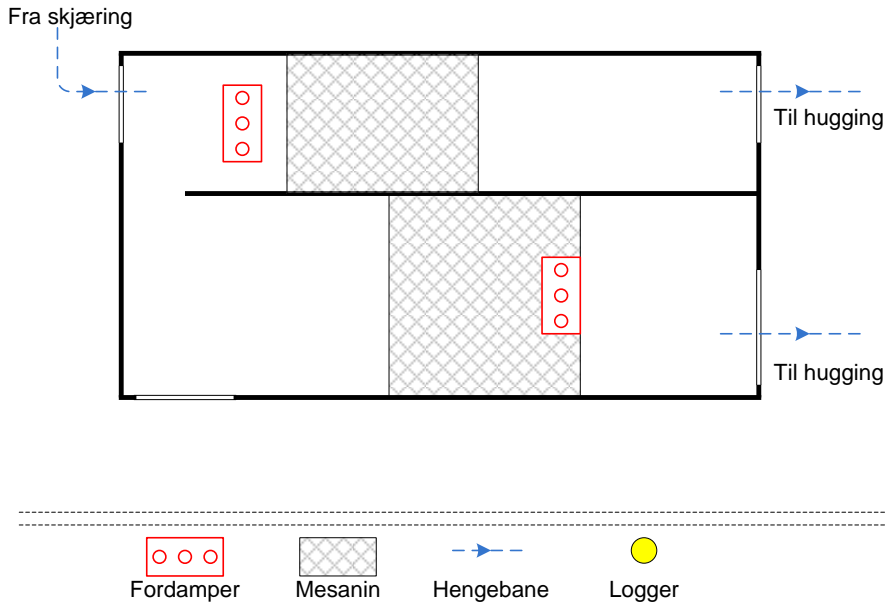
C.1.1 Sjøkk-kjøler



Figur C.1: Planskisse for sjokk-kjøler Fatland Jæren, med hengebane og plassering av fordampere inntegnet. Plassering av loggere for temperatur og luftfuktighet er vist med gule sirkler.

C.2 Fatland Ølen

C.2.1 Spesialfryser



Figur C.2: Planskisse for spesialfryser Fatland Ølen.

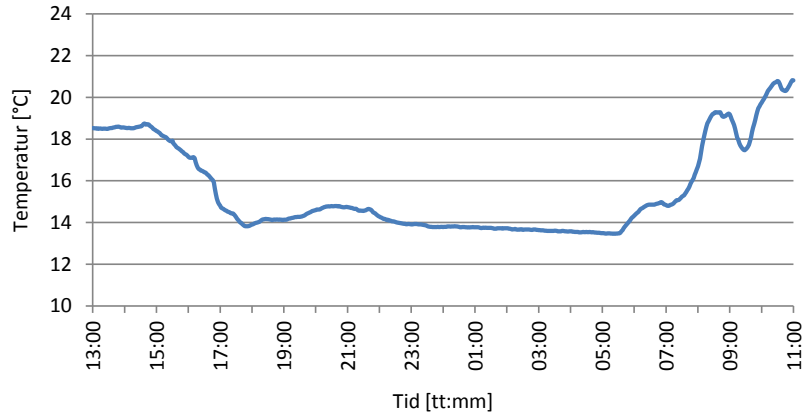
Vedlegg D

Grafer

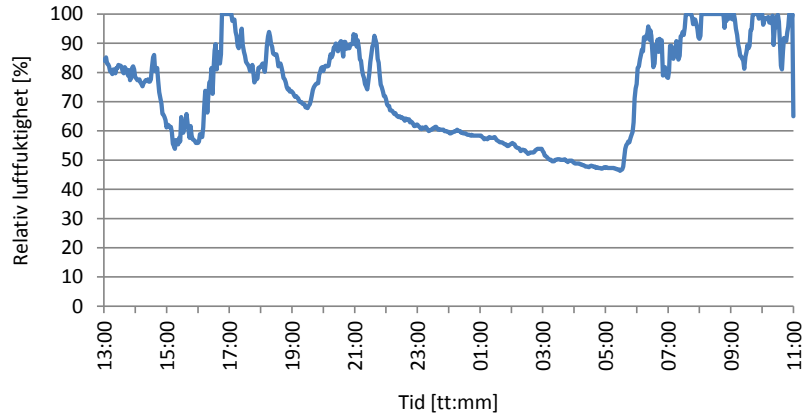
D.1 Målinger i slaktelinje

D.1.1 Slaktelinje Fatland Jæren

Slaktehall

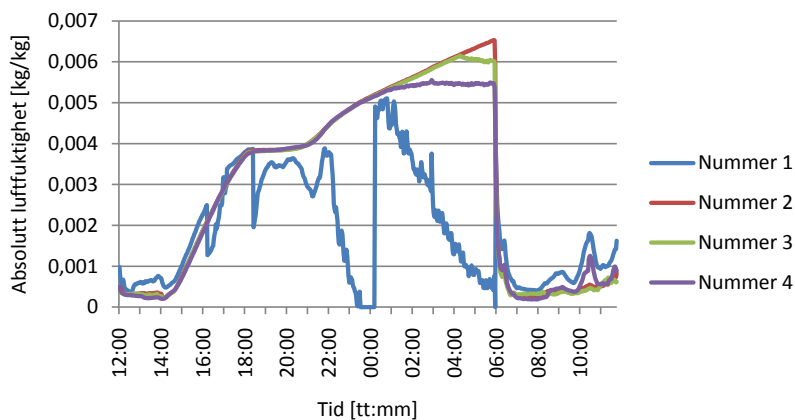


Figur D.1: Temperatur i slaktehall Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011.



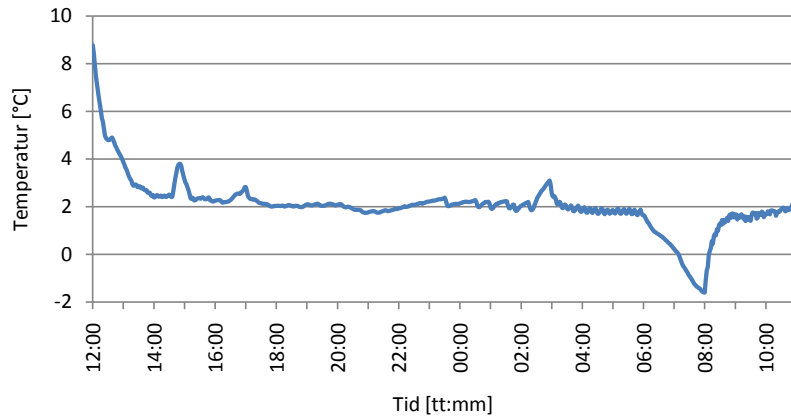
Figur D.2: Relativ luftfuktighet i slaktehall Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011.

Sjokk-kjøler

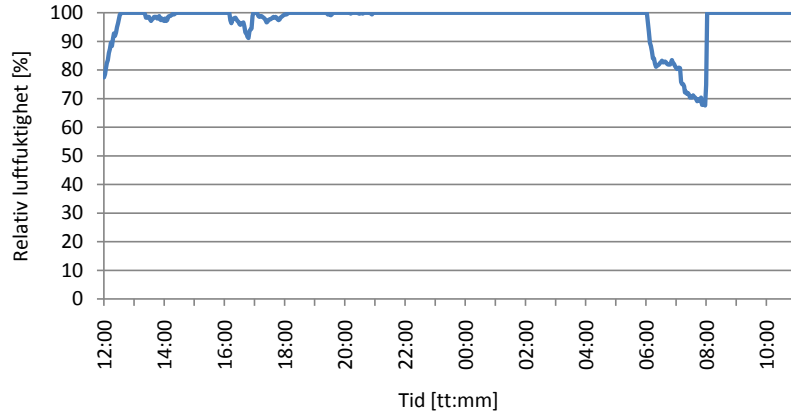


Figur D.3: Absolutt luftfuktighet i sjokk-kjøler Jæren 3.–4. mai 2011. Plasseringen av måleinstrumentene er vist i figur C.1 i vedlegg C. Beregnet utifra målinger av temperatur og relativ luftfuktighet vist i figur 4.1 og figur 4.3.

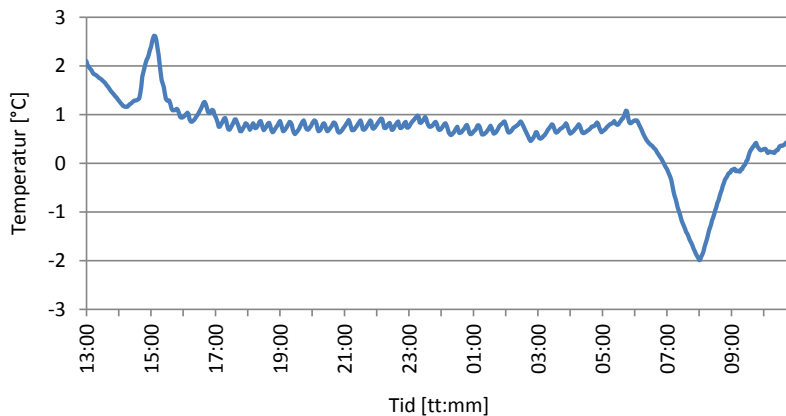
Utligningsrom



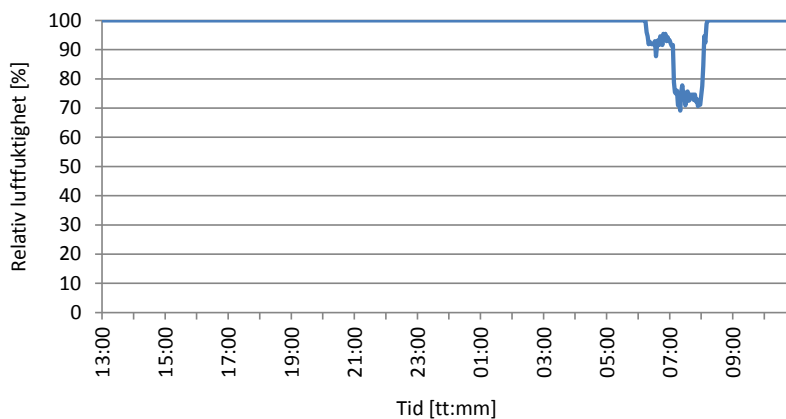
Figur D.4: Temperatur i utligningsrom 1 Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011. Lite lagring her under måleperioden.



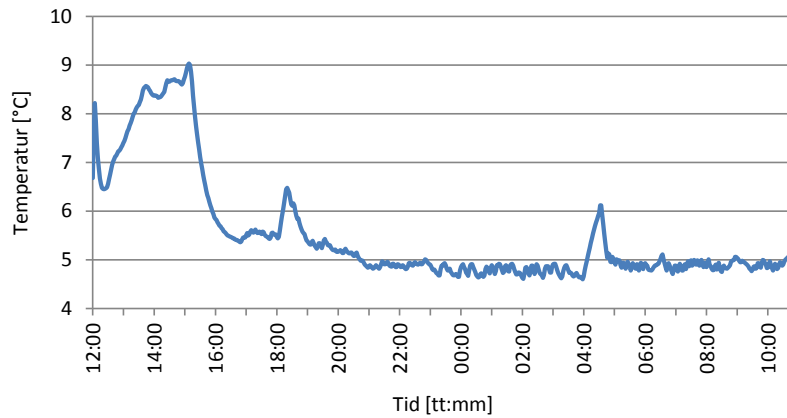
Figur D.5: Relativ luftfuktighet i utligningsrom 1 Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011. Lite lagring her under måleperioden.



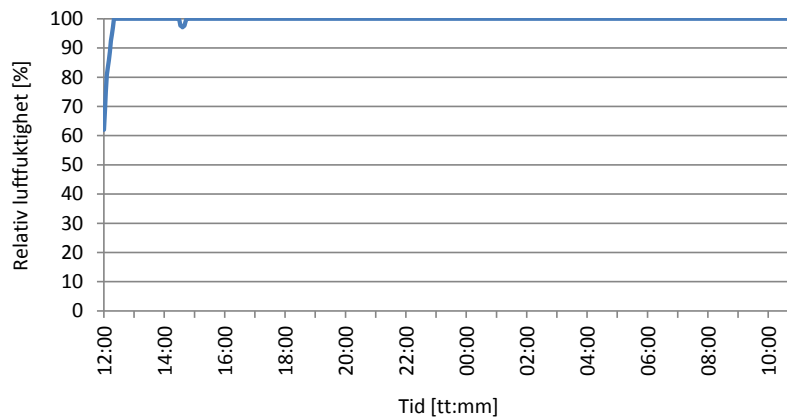
Figur D.6: Temperatur i utligningsrom 2 Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011.



Figur D.7: Relativ luftfuktighet i utligningsrom 2 Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011.

Hengehall

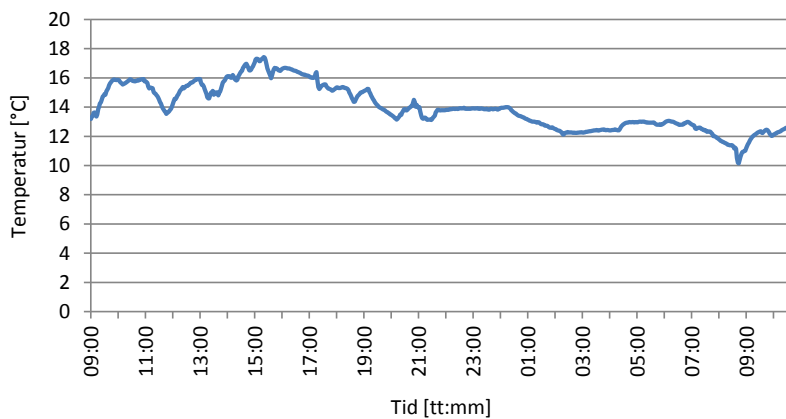
Figur D.8: Temperatur i hengehall Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011. Griseslakt som sendes med ettermiddagstransport oppbevares her om natten.



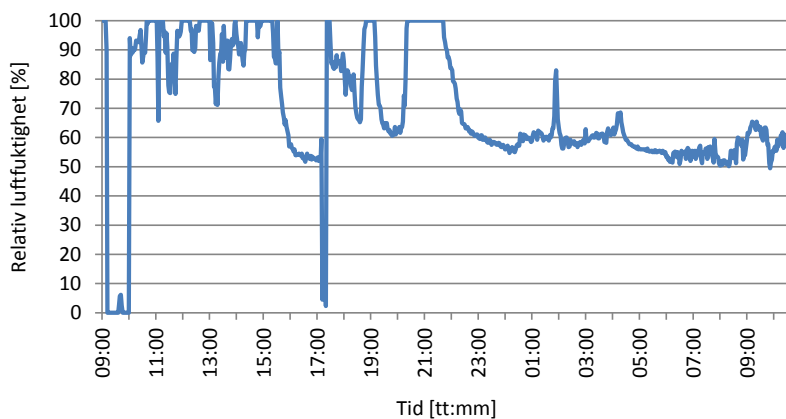
Figur D.9: Relativ luftfuktighet i hengehall Fatland Jæren, målt 3.–4. mai 2011. Griseslakt som sendes med ettermiddagstransport oppbevares her om natten.

D.1.2 Slaktelinje Fatland Ølen

Slaktehall

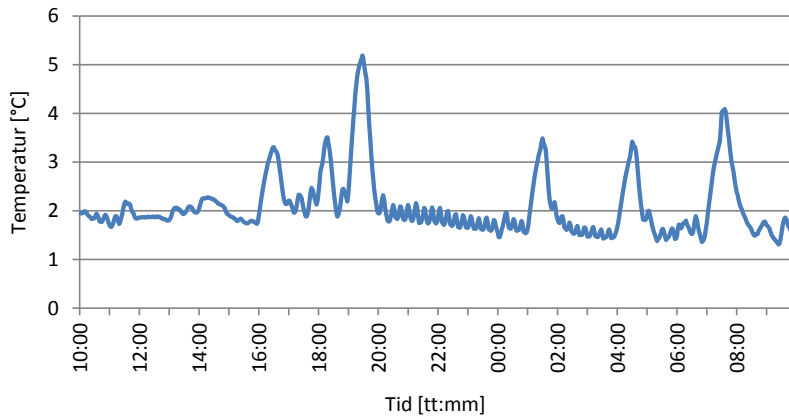


Figur D.10: Temperatur i slaktehall Fatland Ølen, målt 5.-6. mai 2011.

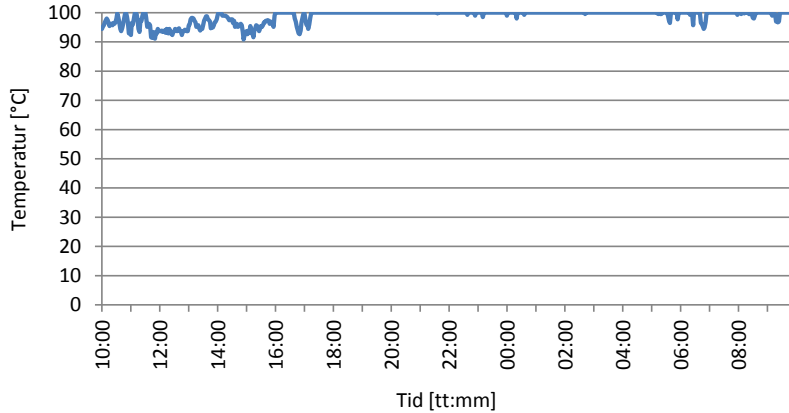


Figur D.11: Relativ luftfuktighet i slaktehall Fatland Ølen, målt 5.-6. mai 2011.

Lager for grovstykket

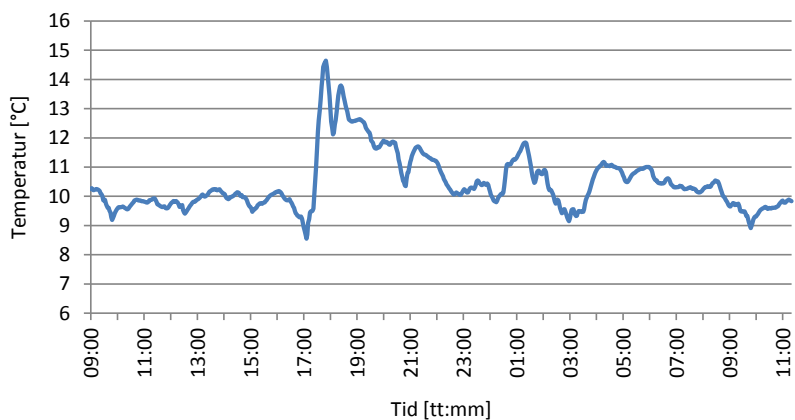


Figur D.12: Temperatur i kjølelager for grovstykket kjøtt Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

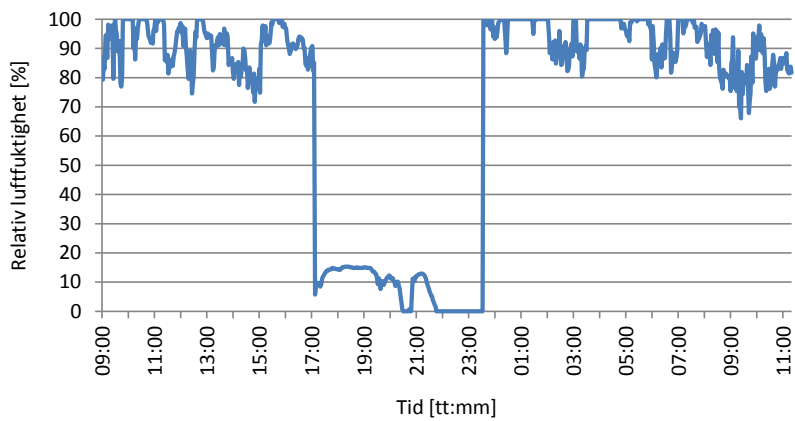


Figur D.13: Relativ luftfuktighet i kjølelager for grovstykket kjøtt Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

Kjølegang

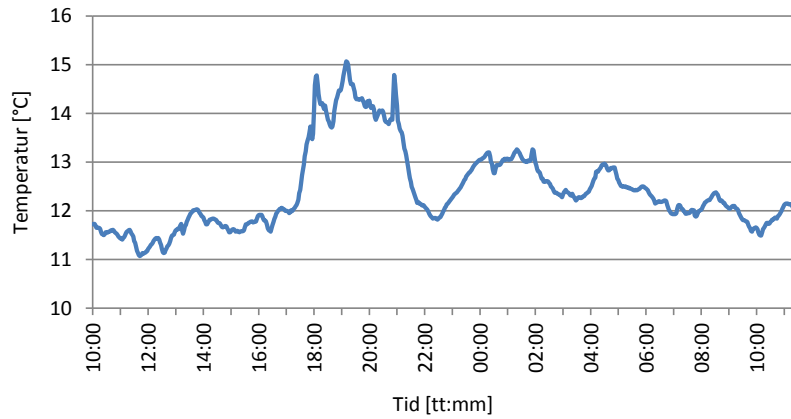


Figur D.14: Temperatur i kjølegang Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

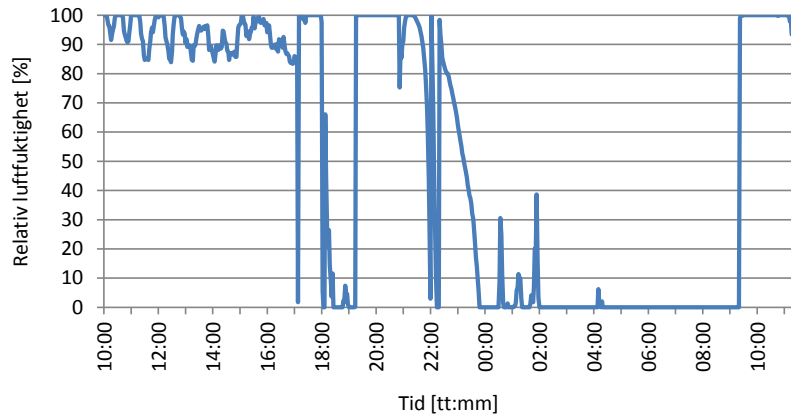


Figur D.15: Relativ luftfuktighet i kjølegang Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

Skjærehall

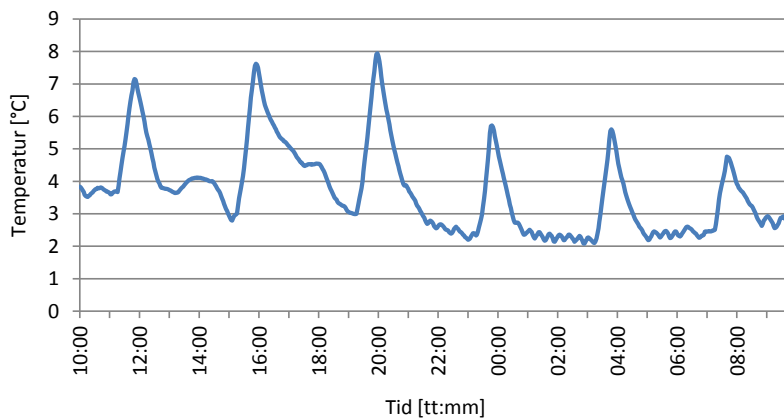


Figur D.16: Temperatur i skjærehall Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

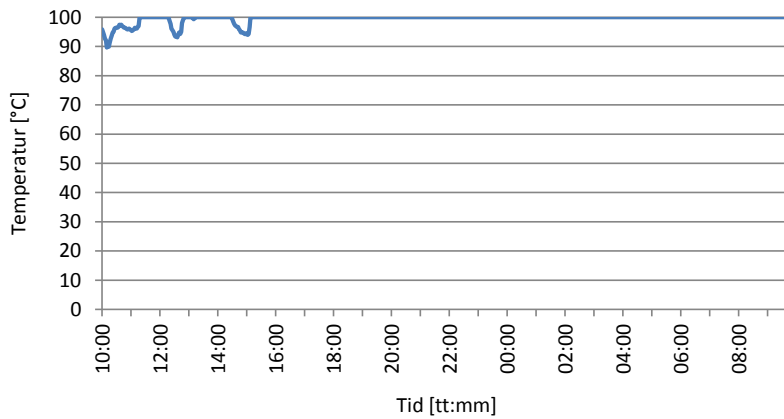


Figur D.17: Relativ luftfuktighet i skjærehall Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

Kjølemagasin før spesialfryser

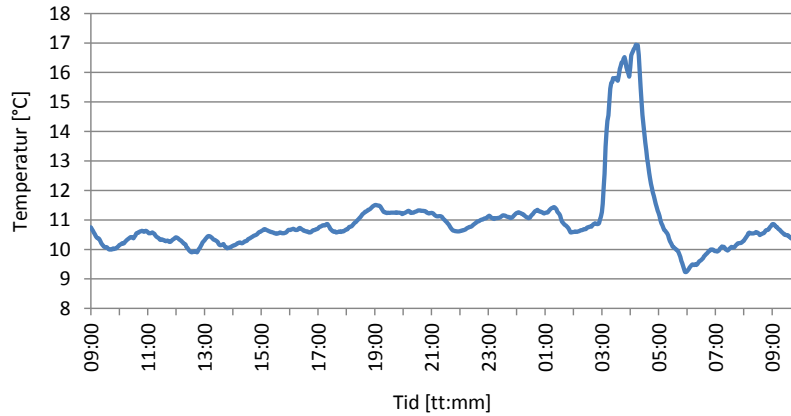


Figur D.18: Temperatur i kjølemagasin Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

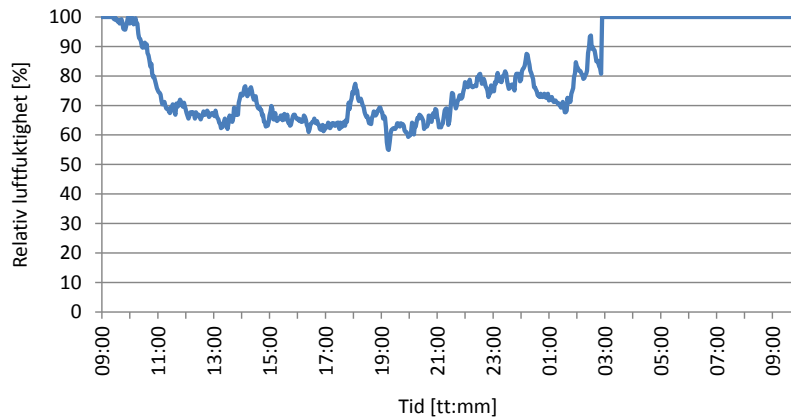


Figur D.19: Relativ luftfuktighet i kjølemagasin Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

Pakkerom

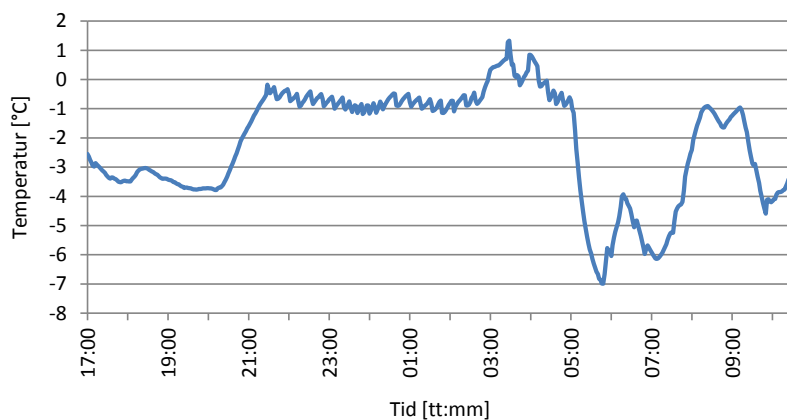


Figur D.20: Temperatur i rom for pakking av ferske varer Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

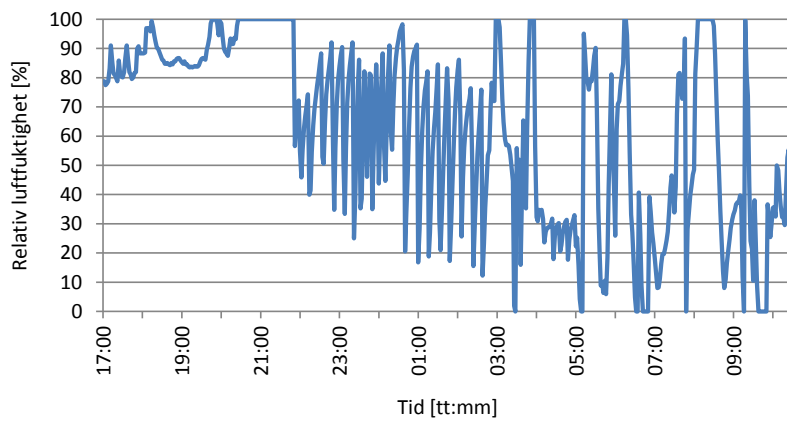


Figur D.21: Relativ luftfuktighet i rom for pakking av ferske varer Fatland Ølen, målt 5.–6. mai 2011.

Spesialfryser



Figur D.22: Temperatur i spesialfryser 1 Fatland Ølen, målt 5.-6. mai 2011.



Figur D.23: Relativ luftfuktighet i spesialfryser 1 Fatland Ølen, målt 5.-6. mai 2011.

Vedlegg E

Programmeringskode

E.1 Fortran

Programmeringskode i Fortran for beregning av kjøle hastighet ved hjelp av FVM (finite volume method). Resultatene ble plottet ble Matlab-kode som vist i vedlegg E.2.

```

1  !Estimate of cooling time in impingement freezer
2  ! and equalization time in cold storage
3
4  !||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
5  !||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
6  MODULE declarations
7  !Declaration of variables
8  IMPLICIT NONE
9  PRIVATE
10
11 !Product:
12 DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: xw, xp, xf, xc, xfi, xa !Food composition
    constants
13 DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: tif, tf !Freezing point temperature
14 DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: width, height, volume, density, mass !Food
    dimensions
15
16 !Inlet/outlet conditions:
17 DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: tin, icein, hin !Inlet condition
18 DOUBLE PRECISION,PUBLIC,ALLOCATABLE,DIMENSION(:) :: tout !
    Temperature after equalization
19 DOUBLE PRECISION,PUBLIC,ALLOCATABLE,DIMENSION(:) :: iceout !Ice
    fraction after equalization
20 DOUBLE PRECISION,PUBLIC,ALLOCATABLE,DIMENSION(:) :: hout !
    Temperature at outlet
21 DOUBLE PRECISION,PUBLIC,ALLOCATABLE,DIMENSION(:) :: timeout !Cooling
    time
22 DOUBLE PRECISION,PUBLIC,ALLOCATABLE,DIMENSION(:) :: iout !Ice
    fraction after cooling
23 INTEGER,PUBLIC :: n
24
25 !Ice:
26 DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: xb, maxice, aveice, fusion !Ice formation
    variables

```

```

27
28  !Grid:
29  INTEGER,PUBLIC :: NI,NJ  !Number of cells
30  DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: dx,dy,dm !Cell dimensions
31
32  !Time:
33  DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: dt,dtcool , time, time2 !Timestep and
      total time
34
35  !Surface heat transfer:
36  DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: tair,taircool , hsurface , hsurfcool , Qtot
      !Heat transfer surroundings
37  DOUBLE PRECISION,PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: qsurface !
      Surface heat flux
38
39  !Results:
40  DOUBLE PRECISION,PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) :: T,Told ,xice ,
      xwater ,q,dh,h !Result matrices
41  DOUBLE PRECISION,PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) :: Tcool ,
      xicecool ,hcool !Result matrices cooling
42  DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: enthalpy ,Tave ,Tavecool ,enthalpycool !
      Average values
43
44  !Thermal properties
45  DOUBLE PRECISION,PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) :: rhoConstants
      , kConstants ,CpConstants !Function constants
46  DOUBLE PRECISION,PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:,:) :: rhoComp ,
      kComp !Component properties
47  DOUBLE PRECISION,PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) :: rho ,kpar ,
      kper !Cell properties
48  DOUBLE PRECISION,PUBLIC, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) :: kparx ,kpary ,
      kperx ,kpery !Conductivity at cell borders
49
50  !Constants:
51  DOUBLE PRECISION,PUBLIC :: zero !Zero value
52
53
54  END MODULE declarations
55  !////////////////////////////////////
56  !////////////////////////////////////

```

```

57
58 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
59 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
60 MODULE sub
61 CONTAINS
62
63 ! |!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
64 SUBROUTINE initialize()
65 ! Initializing variables
66 ! -----
67 USE declarations
68 IMPLICIT NONE
69 INTEGER :: i
70 ! -----
71 zero = 0 !Constant used in functions for 0 as input value
72
73 ! Food composition:
74 xw = 0.6923 !Mass fraction water (-)
75 xp = 0.1743 !Mass fraction protein (-)
76 xf = 0.1230 !Mass fraction fat (-)
77 xc = 0 !Mass fraction carbohydrate (fiber included) (-)
78 xfi = 0 !Mass fraction fiber (-)
79 xa = 0.0083 !Mass fraction ash (-)
80
81 ! Freezing:
82 CALL initialFreezingPoint(xw,tif) !Initial freezing point (°C)
83 !tif = -2.2 !Initial freezing point (°C)
84 tf = tif !Current freezing point (°C)
85 CALL fusionHeat(tf ,fusion) !Heat of fusion (kJ/kg)
86
87 ! Product information:
88 ! Inlet condition:
89 tin = 4 !Uniform product temperature at inlet (°C)
90 CALL iceFraction(tin ,tf ,xw ,icein) !Total mass fraction of ice at
    inlet (-)
91 CALL foodEnthalpy(tin ,hin) !Specific enthalpy of food at inlet (kJ/
    kg)
92 aveice = icein !Average ice fraction in cells (-)
93
94 ! Outlet conditions:

```

```

95  n = 20 !Number of scenarios
96  ALLOCATE(tout(n), iceout(n), hout(n), timeout(n), iout(n))
97  DO i = 1, n
98      tout(i) = -1.1
99      CALL iceFraction(tout(i), tf, xw, iceout(i))
100     !iceout(i) = 0.01*i !Ice fraction out (-)
101     !CALL freezingTemperature(xw, tif, iceout(i), tout(i)) !Temperature
        out (°C)
102     CALL foodEnthalpy(tout(i), hout(i)) !Enthalpy out (kJ/kg)
103  END DO
104
105  ! Surface heat transfer:
106  tair = -38 !Temperature of cooling air (°C)
107  taircool = tair !Temperature of cooling air (°C)
108  hsurface = 200 !Surface heat transfer coefficient (W/m2K)
109  hsurfcool = hsurface !Surface heat transfer coefficient during
        cooling (W/m2K)
110
111  ! Product dimensions:
112  width = 0.105 !Half width of cross-section (m) (x-direction)
113  height = 0.035 !Half height of cross-section (m) (y-direction)
114  volume = width*height !Volume of slice with unity length (m3)
115  CALL foodDensity(tin, density) !Density of food (kg/m3)
116  mass = density*volume !Mass of slice with unity length (kg)
117
118  ! Cell dimensions
119  NI = 210 !Number of cells in x-direction
120  NJ = 70 !Number of cells in y-direction
121  dx = width/NI !Cell width (m)
122  dy = height/NJ !Cell height (m)
123  dm = mass/(NI*NJ) !Cell mass (kg)
124
125  dt = 0.01 !Timestep (s)
126  time = 0 !Total cooling time (s)
127
128  xb = 0.4*xp !Mass fraction of bound water (-)
129  maxice = xw-xb !Maximum cell ice fraction (-)
130
131  ALLOCATE(T(NI, NJ), Told(NI, NJ), xice(NI, NJ), xwater(NI, NJ))

```

```

132  ALLOCATE(q(NI,NJ),dh(NI,NJ),rho(NI,NJ),kpar(NI,NJ),kper(NI,NJ),h(NI
      ,NJ))
133  ALLOCATE(Tcool(NI,NJ),xicecool(NI,NJ),hcool(NI,NJ))
134  T(:, :) = tin !Current cell temperatures (°C)
135  Told(:, :) = 0 !Cell temperatures last timestep (°C)
136  Tcool(:, :) = 0 !Cell temperature after cooling (°C)
137  xice(:, :) = icein !Current cell ice fraction (-)
138  xicecool(:, :) = 0 !Cell ice fraction after cooling (-)
139  xwater(:, :) = xw-icein !Current cell water fraction (-)
140  h(:, :) = hin !Current cell specific enthalpy (kJ/kg)
141  hcool(:, :) = 0 !Cell specific enthalpy after cooling (kJ/kg)
142  q(:, :) = 0 !Net heat into cell (W)
143  dh(:, :) = 0 !Current cell specific enthalpy change (kJ/kg)
144  rho(:, :) = 0 !Current cell density (kg/m3)
145  kpar(:, :) = 0 !Current cell parallel conductivity (W/mK)
146  kper(:, :) = 0 !Current cell perpendicular conductivity (W/mK)
147
148  ALLOCATE(rhoComp(NI,NJ,7),kComp(NI,NJ,7))
149  rhoComp(:, :, :) = 0 !Component cell density (kg/m3)
150  kComp(:, :, :) = 0 !Component cell conductivity (kg/m3)
151
152  ALLOCATE(kparx(NI-1,NJ),kpary(NI,NJ-1),kperx(NI-1,NJ),kpery(NI,NJ
      -1))
153  kparx(:, :) = 0 !Cell border parallel conductivity in x-direction (W
      /mK)
154  kpary(:, :) = 0 !Cell border parallel conductivity in y-direction (W
      /mK)
155  kperx(:, :) = 0 !Cell border perpendicular conductivity in x-
      direction (W/mK)
156  kpery(:, :) = 0 !Cell border perpendicular conductivity in y-
      direction (W/mK)
157
158  ALLOCATE(qsurface(NI+NJ))
159  qsurface(:) = 0 !Net heat from surroundings (W)
160
161  Qtot = 0 !Total heat from surroundings (kJ)
162
163  RETURN
164  END SUBROUTINE initialize
165  ! //////////////////////////////////////

```

```

166
167 ! |||
168 SUBROUTINE initConstants()
169 ! Initializing constants for rho, k and Cp functions
170 !  $\rho(t) = a + b*t + c*t^2$ 
171 !  $k(t) = a + b*t + c*t^2$ 
172 !  $C_p(t) = a + b*t + c*t^2$ 
173 ! t : Temperature (°C)
174 ! a : Constants in column 1
175 ! b : Constants in column 2
176 ! c : Constants in column 3
177 ! _____
178 USE declarations
179 IMPLICIT NONE
180 ! _____
181 ALLOCATE(rhoConstants(7,3),kConstants(7,3),CpConstants(8,3))
182
183 rhoConstants(1,:) = (/ 997.18, 0.0031439, -0.0037574 /) !Water
184 rhoConstants(2,:) = (/ 916.89, -0.13071, 0. /) !Ice
185 rhoConstants(3,:) = (/ 1329.9, -0.51840, 0. /) !Protein
186 rhoConstants(4,:) = (/ 925.59, -0.41757, 0. /) !Fat
187 rhoConstants(5,:) = (/ 1599.1, -0.31046, 0. /) !Carbohydrate
188 rhoConstants(6,:) = (/ 1311.5, -0.36589, 0. /) !Fiber
189 rhoConstants(7,:) = (/ 2423.8, -0.28063, 0. /) !Ash
190
191 kConstants(1,:) = (/ 0.57109, 0.0017625, -0.0000067036 /) !Water
192 kConstants(2,:) = (/ 2.2196, -0.0062489, 0.00010154 /) !Ice
193 kConstants(3,:) = (/ 0.17881, 0.0011958, -0.0000027178 /) !Protein
194 kConstants(4,:) = (/ 0.18071, -0.00027604, -0.00000017749 /) !Fat
195 kConstants(5,:) = (/ 0.20141, 0.0013874, -0.0000043312 /) !
      Carbohydrate
196 kConstants(6,:) = (/ 0.18331, 0.0012497, -0.0000031683 /) !Fiber
197 kConstants(7,:) = (/ 0.32962, 0.0014011, -0.0000029069 /) !Ash
198
199 CpConstants(1,:) = (/ 4.1289, -0.000090864, 0.0000054731 /) !Water
      above 0°C
200 CpConstants(2,:) = (/ 2.0623, 0.0060769, 0. /) !Ice
201 CpConstants(3,:) = (/ 2.0082, 0.0012089, -0.0000013129 /) !Protein
202 CpConstants(4,:) = (/ 1.9842, 0.0014733, -0.0000048008 /) !Fat

```



```

203  CpConstants(5,:) = (/ 1.5488, 0.0019625, -0.0000059399 /) !
      Carbohydrate
204  CpConstants(6,:) = (/ 1.8459, 0.0018306, -0.0000046509 /) !Fiber
205  CpConstants(7,:) = (/ 1.0926, 0.0018896, -0.0000036817 /) !Ash
206  CpConstants(8,:) = (/ 4.1289, -0.0053062, 0.00099516 /) !Water
      below 0°C
207  RETURN
208  END SUBROUTINE initConstants
209  ! //////////////////////////////////////
210
211  ! |||
212  SUBROUTINE initialFreezingPoint(xw,tif)
213  ! Estimated ice fraction (Tchigeov)
214  ! -----
215  IMPLICIT NONE
216  DOUBLE PRECISION,INTENT(IN):: xw
217  DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT):: tif
218  ! -----
219  tif = -1.97+1.47*xw
220
221  RETURN
222  END SUBROUTINE initialFreezingPoint
223  ! //////////////////////////////////////
224
225  ! |||
226  SUBROUTINE iceFraction(t,tf,xw,xice)
227  ! Estimated ice fraction (Tchigeov)
228  ! -----
229  IMPLICIT NONE
230  DOUBLE PRECISION,INTENT(IN):: t,tf,xw
231  DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT):: xice
232  ! -----
233  IF (t .GE. tf) THEN
234  xice = 0
235  ELSE
236  xice = 1.105*xw/(1 + 0.7138/LOG(tf - t + 1))
237  END IF
238
239  RETURN
240  END SUBROUTINE iceFraction

```

```

241 ! //////////////////////////////////////
242
243 ! |||
244 SUBROUTINE freezingTemperature(xw,tif,xice,tf)
245 ! Estimated freezing temperature tf(°C) (from Tchigeov's ice
      fraction equation)
246 ! -----
247 IMPLICIT NONE
248 DOUBLE PRECISION,INTENT(IN):: xw,tif,xice
249 DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT):: tf
250 ! -----
251 IF (xice .GT. 0) THEN
252   tf = tif + 1 - EXP(0.7138/(1.105*xw/xice-1))
253 ELSE
254   tf = tif
255 END IF
256
257 RETURN
258 END SUBROUTINE freezingTemperature
259 ! //////////////////////////////////////
260
261 ! |||
262 SUBROUTINE fusionHeat(temp,hfg)
263 ! Heat of fusion hfg(kJ/kg) at temperature temp(°C)
264 ! -----
265 USE declarations
266 IMPLICIT NONE
267 DOUBLE PRECISION,INTENT(IN):: temp
268 DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT):: hfg
269 DOUBLE PRECISION :: hwater,hice
270 ! -----
271 hwater = CpConstants(8,1)*temp + CpConstants(8,2)/2*temp**2 +
      CpConstants(8,3)/3*temp**3
272 hice = CpConstants(2,1)*temp + CpConstants(2,2)/2*temp**2 +
      CpConstants(2,3)/3*temp**3
273 hfg = 333.6 + hwater - hice
274
275 RETURN
276 END SUBROUTINE fusionHeat
277 ! //////////////////////////////////////

```

```

278
279 ! |||
280 SUBROUTINE foodEnthalpy(temp, hfood)
281 ! Food enthalpy hfood(kJ/kg) at temperature temp(°C)
282 ! -----
283 USE declarations
284 IMPLICIT NONE
285 DOUBLE PRECISION,INTENT(IN) :: temp
286 DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT) :: hfood
287 DOUBLE PRECISION :: hw, hi, hp, hf, hc, hfi, ha, xi
288 ! -----
289 IF (temp .GE. 0) THEN
290   hw = CpConstants(1,1)*temp + CpConstants(1,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(1,3)/3*temp**3
291 ELSE
292   hw = CpConstants(8,1)*temp + CpConstants(8,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(8,3)/3*temp**3
293 END IF
294
295 hi = CpConstants(2,1)*temp + CpConstants(2,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(2,3)/3*temp**3
296 hp = CpConstants(3,1)*temp + CpConstants(3,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(3,3)/3*temp**3
297 hf = CpConstants(4,1)*temp + CpConstants(4,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(4,3)/3*temp**3
298 hc = CpConstants(5,1)*temp + CpConstants(5,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(5,3)/3*temp**3
299 hfi = CpConstants(6,1)*temp + CpConstants(6,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(6,3)/3*temp**3
300 ha = CpConstants(7,1)*temp + CpConstants(7,2)/2*temp**2 +
        CpConstants(7,3)/3*temp**3
301
302 CALL iceFraction(temp, tif, xw, xi)
303
304 hfood = (xw-xi)*hw + xi*hi + xp*hp + xf*hf + (xc-xfi)*hc + xfi*hfi
        + xa*ha - xi*333.6
305
306 RETURN
307 END SUBROUTINE foodEnthalpy
308 ! //

```

```

309
310 ! |||
311 SUBROUTINE foodEnthalpy2(water,ice,hfood)
312 ! Food enthalpy hfood(kJ/kg) at freezing point temperature
313 ! _____
314 USE declarations
315 IMPLICIT NONE
316 DOUBLE PRECISION,INTENT(IN) :: water,ice
317 DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT) :: hfood
318 DOUBLE PRECISION :: hw,hi,hp,hf,hc,hfi,ha
319 ! _____
320 hw = CpConstants(8,1)*tf + CpConstants(8,2)/2*tf**2 + CpConstants
      (8,3)/3*tf**3
321 hi = CpConstants(2,1)*tf + CpConstants(2,2)/2*tf**2 + CpConstants
      (2,3)/3*tf**3
322 hp = CpConstants(3,1)*tf + CpConstants(3,2)/2*tf**2 + CpConstants
      (3,3)/3*tf**3
323 hf = CpConstants(4,1)*tf + CpConstants(4,2)/2*tf**2 + CpConstants
      (4,3)/3*tf**3
324 hc = CpConstants(5,1)*tf + CpConstants(5,2)/2*tf**2 + CpConstants
      (5,3)/3*tf**3
325 hfi = CpConstants(6,1)*tf + CpConstants(6,2)/2*tf**2 + CpConstants
      (6,3)/3*tf**3
326 ha = CpConstants(7,1)*tf + CpConstants(7,2)/2*tf**2 + CpConstants
      (7,3)/3*tf**3
327
328 hfood = water*hw + ice*hi + xp*hp + xf*hf + (xc-xfi)*hc + xfi*hfi +
      xa*ha - ice*333.6
329
330 RETURN
331 END SUBROUTINE foodEnthalpy2
332 ! //////////////////////////////////////
333
334 ! |||
335 SUBROUTINE foodSpecificHeat(water,ice,temp,Cpfood)
336 ! Food specific heat Cpfood(kJ/kgK) at temperature temp(°C)
337 ! _____
338 USE declarations
339 IMPLICIT NONE
340 DOUBLE PRECISION,INTENT(IN) :: water,ice,temp

```

```

341  DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT) :: Cpfood
342  DOUBLE PRECISION :: w,i,p,f,c,fi,a
343  ! -----
344  IF (temp .GE. 0) THEN
345      w = CpConstants(1,1) + CpConstants(1,2)*temp + CpConstants(1,3)*
          temp**2
346  ELSE
347      w = CpConstants(8,1) + CpConstants(8,2)*temp + CpConstants(8,3)*
          temp**2
348  END IF
349
350  i = CpConstants(2,1) + CpConstants(2,2)*temp + CpConstants(2,3)*
          temp**2
351  p = CpConstants(3,1) + CpConstants(3,2)*temp + CpConstants(3,3)*
          temp**2
352  f = CpConstants(4,1) + CpConstants(4,2)*temp + CpConstants(4,3)*
          temp**2
353  c = CpConstants(5,1) + CpConstants(5,2)*temp + CpConstants(5,3)*
          temp**2
354  fi = CpConstants(6,1) + CpConstants(6,2)*temp + CpConstants(6,3)*
          temp**2
355  a = CpConstants(7,1) + CpConstants(7,2)*temp + CpConstants(7,3)*
          temp**2
356
357  Cpfood = water*w + ice*i + xp*p + xf*f + (xc-xfi)*c + xfi*fi + xa*a
358
359  RETURN
360  END SUBROUTINE foodSpecificHeat
361  ! //////////////////////////////////////
362
363  ! |||
364  SUBROUTINE foodDensity(temp,rhofood)
365  ! Food density rhofood(kg/m3) at temperature temp(°C)
366  ! -----
367  USE declarations
368  IMPLICIT NONE
369  DOUBLE PRECISION,INTENT(IN) :: temp
370  DOUBLE PRECISION,INTENT(OUT) :: rhofood
371  DOUBLE PRECISION :: w,i,p,f,c,fi,a,xi
372  ! -----

```

```

373  w = rhoConstants(1,1) + rhoConstants(1,2)*temp + rhoConstants(1,3)*
      temp**2
374  i = rhoConstants(2,1) + rhoConstants(2,2)*temp + rhoConstants(2,3)*
      temp**2
375  p = rhoConstants(3,1) + rhoConstants(3,2)*temp + rhoConstants(3,3)*
      temp**2
376  f = rhoConstants(4,1) + rhoConstants(4,2)*temp + rhoConstants(4,3)*
      temp**2
377  c = rhoConstants(5,1) + rhoConstants(5,2)*temp + rhoConstants(5,3)*
      temp**2
378  fi = rhoConstants(6,1) + rhoConstants(6,2)*temp + rhoConstants(6,3)
      *temp**2
379  a = rhoConstants(7,1) + rhoConstants(7,2)*temp + rhoConstants(7,3)*
      temp**2

380
381  CALL iceFraction(temp, tif ,xw, xi)
382
383  rhofood = 1/((xw-xi)/w + xi/i + xp/p + xf/f + (xc-xfi)/c + xfi/fi +
      xa/a)

384
385  RETURN
386  END SUBROUTINE foodDensity
387  ! //////////////////////////////////////
388
389  ! |||
390  SUBROUTINE conductivityComponent()
391  ! Cell component conductivity (W/mK)
392  ! _____
393  USE declarations
394  IMPLICIT NONE
395  INTEGER :: i
396  ! _____
397  DO i =1,7
398     kComp(:, :, i) = kConstants(i,1)+kConstants(i,2)*T(:, :)+kConstants(i
      ,3)*T(:, :)**2
399  END DO
400
401  RETURN
402  END SUBROUTINE conductivityComponent
403  ! //////////////////////////////////////

```

```

404
405 ! |||
406 SUBROUTINE densityComponent()
407 ! Cell component density (kg/k3)
408 ! -----
409 USE declarations
410 IMPLICIT NONE
411 INTEGER :: i
412 ! -----
413 DO i =1,7
414   rhoComp(:, :, i) = rhoConstants(i,1)+rhoConstants(i,2)*T(:, :)+
      rhoConstants(i,3)*T(:, :)**2
415 END DO
416
417 RETURN
418 END SUBROUTINE densityComponent
419 ! //////////////////////////////////
420
421 ! |||
422 SUBROUTINE densityCell()
423 ! Cell density (kg/m3)
424 ! -----
425 USE declarations
426 IMPLICIT NONE
427 ! -----
428 rho(:, :) = 1/(xwater(:, :)/rhoComp(:, :, 1) + xice(:, :)/rhoComp(:, :, 2)
      + xp/rhoComp(:, :, 3)&
429 &+ xf/rhoComp(:, :, 4) + (xc-xfi)/rhoComp(:, :, 5) + xfi/rhoComp(:, :, 6)
      + xa/rhoComp(:, :, 7))
430
431 RETURN
432 END SUBROUTINE densityCell
433 ! //////////////////////////////////
434
435 ! |||
436 SUBROUTINE conductivityParallel()
437 ! Cell conductivity in fiber direction
438 ! -----
439 USE declarations
440 IMPLICIT NONE

```

```

441  DOUBLE PRECISION,DIMENSION(NI,NJ,7)  :: krho
442  INTEGER  :: i
443  ! -----
444  DO i =1,7
445     krho (:, :, i) = kComp (:, :, i)/rhoComp (:, :, i)
446  END DO
447  kpar (:, :) = xwater (:, :) *krho (:, :, 1)+xice (:, :) *krho (:, :, 2)+xp*krho
      (:, :, 3)+xf*krho (:, :, 4)&
448  &+xc*krho (:, :, 5)+xfi*krho (:, :, 6)+xa*krho (:, :, 7)
449  kpar (:, :) = kpar (:, :) *rho (:, :)
450
451  RETURN
452  END SUBROUTINE conductivityParallel
453  ! //////////////////////////////////////
454
455  ! |||
456  SUBROUTINE conductivityPerpendicular ()
457  ! Cell conductivity opposite to fiber direction
458  ! -----
459  USE declarations
460  IMPLICIT NONE
461  DOUBLE PRECISION,DIMENSION(NI,NJ,7)  :: krho
462  INTEGER  :: i
463  ! -----
464  DO i =1,7
465     krho (:, :, i) = kComp (:, :, i)*rhoComp (:, :, i)
466  END DO
467  kper (:, :) = xwater (:, :)/krho (:, :, 1)+xice (:, :)/krho (:, :, 2)+xp/krho
      (:, :, 3)+xf/krho (:, :, 4)&
468  &+xc/krho (:, :, 5)+xfi/krho (:, :, 6)+xa/krho (:, :, 7)
469  kper (:, :) = 1/(kper (:, :) *rho (:, :))
470
471  RETURN
472  END SUBROUTINE conductivityPerpendicular
473  ! //////////////////////////////////////
474
475  ! |||
476  SUBROUTINE totalHeat ()
477  ! Cell conductivity opposite to fiber direction
478  ! -----

```



```

479  USE declarations
480  IMPLICIT NONE
481  INTEGER :: i
482  ! _____
483  DO i=1,(NI+NJ)
484    Qtot = Qtot+qsurface(i)
485  END DO
486
487  RETURN
488  END SUBROUTINE totalHeat
489  ! //////////////////////////////////////
490
491  ! |||
492  SUBROUTINE heatFlux()
493  ! Calculate net cell heat for timestep
494  ! _____
495  USE declarations
496  IMPLICIT NONE
497  INTEGER :: i,j
498  ! _____
499  !Boundary conduction coefficients:
500  kparx = (kpar(1:NI-1,1:NJ)+kpar(2:NI,1:NJ))/2
501  kparj = (kpar(1:NI,1:NJ-1)+kpar(1:NI,2:NJ))/2
502  kperx = (kper(1:NI-1,1:NJ)+kper(2:NI,1:NJ))/2
503  kperj = (kper(1:NI,1:NJ-1)+kper(1:NI,2:NJ))/2
504
505  FORALL (i=2:NI-1, j=2:NJ-1)
506    !Interior cells:
507    q(i,j) = kperx(i,j)*(T(i+1,j)-T(i,j))/dx*dy - kperx(i-1,j)*(T(i,j)
      -T(i-1,j))/dx*dy&
508    &+ kperj(i,j)*(T(i,j+1)-T(i,j))/dy*dx- kperj(i,j-1)*(T(i,j)-T(i,j
      -1))/dy*dx
509
510    !Right boundary (no heat flux):
511    q(NI,j) = 0 - kperx(NI-1,j)*(T(NI,j)-T(NI-1,j))/dx*dy + kperj(NI,j
      )*(T(NI,j+1)-T(NI,j))/dy*dx&
512    &- kperj(NI,j-1)*(T(NI,j)-T(NI,j-1))/dy*dx
513
514    !Upper boundary (no heat flux):

```

```

515   q(i,NJ) = kperx(i,NJ)*(T(i+1,NJ)-T(i,NJ))/dx*dy - kperx(i-1,NJ)*(T
      (i,NJ)-T(i-1,NJ))/dx*dy&
516   + 0 - kpery(i,NJ-1)*(T(i,NJ)-T(i,NJ-1))/dy*dx
517
518   !Upper right boundary (no heat flux):
519   q(NI,NJ) = 0 - kperx(NI-1,NJ)*(T(NI,NJ)-T(NI-1,NJ))/dx*dy + 0 -
      kpery(NI,NJ-1)*(T(NI,NJ)-T(NI,NJ-1))/dy*dx
520
521   !Left boundary (convection):
522   q(1,j) = kperx(1,j)*(T(2,j)-T(1,j))/dx*dy - hsurface*(T(1,j)-tair)
      *dy&
523   &+ kpery(1,j)*(T(1,j+1)-T(1,j))/dy*dx - kpery(1,j-1)*(T(1,j)-T(1,
      j-1))/dy*dx
524
525   !Lower boundary (convection):
526   q(i,1) = kperx(i,1)*(T(i+1,1)-T(i,1))/dx*dy - kperx(i-1,1)*(T(i,1)
      -T(i-1,1))/dx*dy&
527   &+ kpery(i,1)*(T(i,2)-T(i,1))/dy*dx - hsurface*(T(i,1)-tair)*dx
528
529   !Lower left boundary (convection):
530   q(1,1) = kperx(1,1)*(T(2,1)-T(1,1))/dx*dy - hsurface*(T(1,1)-tair)
      *dy&
531   &+ kpery(1,1)*(T(1,2)-T(1,1))/dy*dx - hsurface*(T(1,1)-tair)*dx
532
533   !Upper left boundary (no flux + convection):
534   q(1,NJ) = kperx(1,NJ-1)*(T(2,NJ)-T(1,NJ))/dx*dy - hsurface*(T(1,NJ)
      )-tair)*dy&
535   &+ 0 - kpery(1,NJ-1)*(T(1,NJ)-T(1,NJ-1))/dy*dx
536
537   !Lower right boundary (no flux + convection):
538   q(NI,1) = 0 - kperx(NI-1,1)*(T(NI,1)-T(NI-1,1))/dx*dy + kpery(NI
      ,1)*(T(NI,2)-T(NI,1))/dy*dx&
539   &- hsurface*(T(NI,1)-tair)*dx
540   END FORALL
541
542   !Surface heat transfer:
543   qsurface(1:NI) = hsurface*(tair-T(:,1))*dx*dt/1000
544   qsurface(NI+1:NI+NJ) = hsurface*(tair-T(1,:))*dy*dt/1000
545   CALL totalHeat()
546

```



```

585     CALL foodSpecificHeat(xw,zero,tf,cpfood)
586     T(i,j) = tf + dhh/cpfood
587     xice(i,j) = 0
588     ELSE IF ((h(i,j)+dh(i,j)) .GT. hmaxice) THEN !Less than max ice
           after
589     xice(i,j) = xice(i,j) - dh(i,j)/fusion
590     T(i,j) = tf
591     ELSE !Max ice after
592     xice(i,j) = maxice
593     dhh = dh(i,j) + (h(i,j)-hmaxice)
594     CALL foodSpecificHeat(xb,maxice,tf,cpfood)
595     T(i,j) = tf + dhh/cpfood
596     END IF
597     ELSE !Max ice before
598     IF ((h(i,j)+dh(i,j)) .GT. hfreeze) THEN !No ice after
599     xice(i,j) = 0
600     dhh = dh(i,j) + (h(i,j)-hfreeze)
601     CALL foodSpecificHeat(xw,zero,tf,cpfood)
602     T(i,j) = tf + dhh/cpfood
603     ELSE IF ((h(i,j)+dh(i,j)) .GT. hmaxice) THEN !Less than max ice
           after
604     dhh = dh(i,j) + (h(i,j)-hmaxice)
605     xice(i,j) = xice(i,j)-dhh/fusion
606     T(i,j) = tf
607     ELSE !Max ice after
608     CALL foodSpecificHeat(xb,maxice,T(i,j),cpfood)
609     T(i,j) = T(i,j) + dh(i,j)/cpfood
610     END IF
611     END IF
612     END DO
613     END DO
614
615     h = h+dh
616
617     RETURN
618     END SUBROUTINE temperatureChange
619     ! //////////////////////////////////////
620
621     ! |||
622     SUBROUTINE resultfile()

```

```

623 ! Print the numerical results to files
624 ! -----
625 USE declarations
626 IMPLICIT NONE
627 INTEGER :: i,j
628 ! -----
629 10 FORMAT(5f10.2)
630
631 OPEN(10,FILE='nakkestatistikk.dat',STATUS='UNKNOWN')
632 WRITE(10,*) 'COOLING SIMULATION'
633 WRITE(10,*) '-----'
634 WRITE(10,*) 'Product: Shoulder'
635 WRITE(10,*) ' '
636 WRITE(10,*) 'THERMAL PROPERTIES'
637 WRITE(10,*) 'Composition:'
638 WRITE(10,*) 'xw [-]: ',xw
639 WRITE(10,*) 'xp [-]: ',xp
640 WRITE(10,*) 'xf [-]: ',xf
641 WRITE(10,*) 'xc [-]: ',xc
642 WRITE(10,*) 'xfi [-]: ',xfi
643 WRITE(10,*) 'xa [-]: ',xa
644 WRITE(10,*) 'Initial freezing point:'
645 WRITE(10,*) 'tif [°C] : ',tif
646 WRITE(10,*) ' '
647 WRITE(10,*) 'SIMULATION DATA'
648 WRITE(10,*) 'Product data:'
649 WRITE(10,*) '1/2 height [m]: ',height
650 WRITE(10,*) '1/2 width [m]: ',width
651 WRITE(10,*) 'denisty in [kg/m3]: ',density
652 WRITE(10,*) 'Mass(1m lenght) [kg]: ',mass
653 WRITE(10,*) 'Temperature in [°C]: ',tin
654 WRITE(10,*) 'icefraction in [-]: ',icein
655 WRITE(10,*) 'Enthalpy in [kJ/kg]: ',hin
656 WRITE(10,*) 'Temperature out [°C]: ',tout(n)
657 WRITE(10,*) 'Icefraction out [-]: ',iceout(n)
658 WRITE(10,*) 'Enthalpy out [kJ/kg]: ',hout(n)
659 WRITE(10,*) ' '
660 WRITE(10,*) 'GRID'
661 WRITE(10,*) 'Cells in x-direction: ',NI
662 WRITE(10,*) 'Cells in y-direction: ',NJ

```

```

663         WRITE(10,*) 'Cell width dx: ',dx
664         WRITE(10,*) 'Cell height dy: ',dy
665     WRITE(10,*) ' '
666     WRITE(10,*) 'COOLING'
667     WRITE(10,*) 'Air temperature [°C]: ',taircool
668     WRITE(10,*) 'Surface heat transfer coefficient [W/m2K]: ',
        hsurfcool
669     WRITE(10,*) 'dt [s]: ',dtcool
670     WRITE(10,*) 'Cooling time [s]: ', time
671     WRITE(10,*) 'Heat removed [kJ]: ',Qtot
672     WRITE(10,*) 'Heat removed [kJ/kg]: ',Qtot/mass
673     WRITE(10,*) 'EQUALIZATION'
674     WRITE(10,*) 'Air temperature [°C]: ',tair
675     WRITE(10,*) 'Surface heat transfer coefficient [W/m2K]: ',hsurface
676     WRITE(10,*) 'dt [s]: ',dt
677     WRITE(10,*) 'Cooling time [s]: ', time2
678     WRITE(10,*) ' '
679
680     WRITE(10,*) 'xice(-): ', 'T(°C): ',&
681     &'h(kJ/kg): ', 'ice(-): ',&
682     &'time(s): '
683         WRITE(10,10) icein ,tin ,hin ,icein ,zero
684     DO i=1,SIZE(timeout)
685         WRITE(10,10) iceout(i) ,tout(i) ,hout(i) ,iout(i) ,timeout(i)
686     END DO
687     CLOSE(10)
688
689     OPEN(20,FILE='nakketider.dat',STATUS='UNKNOWN')
690     DO i=1,SIZE(timeout)
691         WRITE(20,10) iceout(i) ,tout(i) ,hout(i) ,iout(i) ,timeout(i)
692     END DO
693     CLOSE(20)
694
695     OPEN(30,FILE='nakkematisercool.dat',STATUS='UNKNOWN')
696     DO i=1,NI
697         DO j=1,NJ
698             WRITE(30,*) Tcool(i,j) ,xicecool(i,j) ,hcool(i,j)
699         END DO
700     END DO
701     CLOSE(30)

```



```

742  IMPLICIT NONE
743  INTEGER :: i,j
744  ! -----
745  time = 0
746  enthalpy = hin
747  j=0
748
749  DO i =1,n
750  DO WHILE (enthalpy .GT. hout(i))!Cool until food enthalpy equals
      outlet enthalpy
751  CALL simulation() !Calculate one timestep
752  time = time + dt !Update totale time
753
754  WRITE(*,*) 'Progression: ',(hin-enthalpy)/(hin-hout(n))*100 !
      Screen update
755
756  j = j+1
757  IF (MOD(j,60) .EQ. 0) THEN
758  WRITE (*,*) 'Total cooling time (min) : ', time/60 !Screen
      update
759  END IF
760  END DO
761
762  iout(i) = aveice
763  timeout(i) = time
764  END DO
765
766  Tcool = T
767  xicecool = xice
768  hcool = h
769  hsurfcool = hsurface
770  dtcool = dt
771
772  RETURN
773  END SUBROUTINE coolingSimulation
774  ! //////////////////////////////////////
775
776  ! |||
777  SUBROUTINE equalizationSimulation()
778

```



```

779  ! -----
780  USE declarations
781  IMPLICIT NONE
782  DOUBLE PRECISION :: norm1,norm2,eps
783  INTEGER :: i
784  ! -----
785  i = 0
786  eps = 1e-6 !Stopping criterion
787  time2 = 0
788  !tair = -2
789  hsurface = 0
790  dt = 1
791  !T(1,1) = tout
792
793  Told = T
794  CALL simulation()
795  CALL twonorm(T,Told,norm1)
796  norm2 = norm1
797
798  DO WHILE (norm2 .GT. (eps*norm1))
799  Told = T
800  CALL simulation()
801  CALL twonorm(T,Told,norm2)
802  time2 = time2+dt
803
804  i = i+1
805  WRITE (*,*) i
806  IF (MOD(i,60) .EQ. 0) THEN
807  WRITE (*,*) 'Total equalization time : ', time2
808  CALL average(T,Tave)
809  END IF
810  END DO
811
812  RETURN
813  END SUBROUTINE equalizationSimulation
814  ! //////////////////////////////////////
815
816  ! |||
817  SUBROUTINE simulation()
818  ! Calculations for one time step

```

```

819  ! -----
820  USE declarations
821  IMPLICIT NONE
822  ! -----
823  CALL conductivityComponent() !Update component conductivity
824  CALL densityComponent() !Update component density
825
826  CALL densityCell() !Update cell density
827  CALL conductivityParallel() !Update cell parallel conductivity
828  CALL conductivityPerpendicular() !Update cell perpendicular
      conductivity
829
830  CALL heatFlux() !Calculate heat flux and enthalpy change
831  CALL temperatureChange() !Calculate new temperatures, ice fractions
      and enthalpies
832
833  xwater(:, :) = xw - xice(:, :) !Calculate new water fractions
834  CALL average(h, enthalpy) !Calculate food specific enthalpy
835  CALL average(xice, aveice) !Calculate average food ice fraction
836  CALL freezingTemperature(xw, tif, aveice, tf) !Calculate new freezing
      temperature
837  CALL fusionHeat(tf, fusion) !Calculate new fusion heat value
838
839  RETURN
840  END SUBROUTINE simulation
841  ! //////////////////////////////////////
842
843  ! |||
844  SUBROUTINE twonorm(new, old, norm)
845  ! Calculate 2-norm
846  ! -----
847  USE declarations
848  IMPLICIT NONE
849  DOUBLE PRECISION, DIMENSION(NI, NJ), INTENT(IN) :: new, old
850  DOUBLE PRECISION, INTENT(OUT) :: norm
851  INTEGER :: i, j
852  ! -----
853  norm=0
854
855  DO i=1, NI

```

```

856   DO j=1,NJ
857     norm=norm+(new(i , j)-old(i , j))**2
858   END DO
859 END DO
860 norm=norm**0.5
861
862 RETURN
863 END SUBROUTINE twonorm
864 ! //////////////////////////////////////
865
866 END MODULE sub
867 ! //////////////////////////////////////
868 ! //////////////////////////////////////
869
870 ! |||
871 ! |||
872 program cooling
873 ! Program for cooling time estimation
874 ! -----
875 USE declarations
876 USE sub
877 IMPLICIT NONE
878 ! -----
879 ! Initialize variables:
880 CALL initConstants()
881 CALL initialize()
882
883 ! Estimate cooling time:
884 CALL coolingSimulation()
885     CALL equalizationSimulation()
886
887 ! Print results
888 CALL resultfile()
889
890 STOP
891 END PROGRAM cooling
892 ! //////////////////////////////////////
893 ! //////////////////////////////////////

```


E.2 Matlab

Programmeringskode i Matlab for å visualisere beregningene av kjøletid i Fortran, vedlegg E.1

```
1  clear all
2  clc
3
4  load 'shouldercool.dat';
5  T1 = shouldercool(:,1);
6  xice1 = shouldercool(:,2);
7  h1 = shouldercool(:,3);
8
9  width = 0.105;
10 height = 0.035;
11
12 ni=120;
13 nj=40;
14
15 T = zeros(2*ni,2*nj);
16 xice = zeros(2*ni,2*nj);
17 h = zeros(2*ni,2*nj);
18
19 for i=1:ni
20     for j=1:nj
21         k=j+(i-1)*nj;
22         T(i,j)=T1(k);
23         T(i,2*nj-(j-1))=T1(k);
24         T(2*ni-(i-1),2*nj-(j-1))=T1(k);
25         T(2*ni-(i-1),j)=T1(k);
26         xice(i,j)=xice1(k);
27         xice(i,2*nj-(j-1))=xice1(k);
28         xice(2*ni-(i-1),2*nj-(j-1))=xice1(k);
29         xice(2*ni-(i-1),j)=xice1(k);
30         h(i,j)=h1(k);
31         h(i,2*nj-(j-1))=h1(k);
32         h(2*ni-(i-1),2*nj-(j-1))=h1(k);
33         h(2*ni-(i-1),j)=h1(k);
34     end
35 end
```

```
36 xice = xice*100;
37
38 dx = width/ni;
39 dy = height/nj;
40 x = dx/2:dx:2*width-dx/2;
41 y = dy/2:dy:2*height-dy/2;
42 [X,Y] = meshgrid(x,y);
43
44 Tfig = figure(1);
45 surface(X,Y,T')
46 axis equal tight
47 xlabel('Bredde (m)')
48 ylabel('Høyde (m)')
49 xlim([0 2*width])
50 ylim([0 2*height])
51 colorbar
52 ylabel(colorbar, 'Temperatur (\circC)')
53 shading flat
54 print(Tfig, '-dpdf', 'temperaturnakke.pdf')
55
56 iceFig = figure(2);
57 colormap(flipud(gray))
58 surface(X,Y,xice')
59 axis equal tight
60 xlabel('Bredde (m)')
61 ylabel('Høyde (m)')
62 xlim([0 2*width])
63 ylim([0 2*height])
64 colorbar
65 caxis([0 100])
66 ylabel(colorbar, 'Isfraksjon (%)')
67 shading flat
68 print(iceFig, '-dpdf', 'isnakke.pdf')
69
70 hFig = figure(3);
71 colormap(jet)
72 surface(X,Y,h')
73 axis equal tight
74 xlabel('Bredde (m)')
75 ylabel('Høyde (m)')
```

```
76 xlim([0 2*width])
77 ylim([0 2*height])
78 colorbar
79 ylabel(colorbar, 'Spesifikk entalpi (kJ/kg)')
80 shading flat
81 print(iceFig, '-dpdf', 'entalpinakke.pdf')
```


E.3 Excel VBA

Makroer for utregning av produktlast i Excel.

```

1  Attribute VB_Name = "Module1"
2  Option Explicit
3
4  Sub thermalConductivityConstants(ByVal component As String, a As
      Double, b As Double, c As Double)
5      'Constants in thermal property model for termal conductivity
6      'k = a + b*t + c*t^2
7      'k      : Thermal conductivity (W/mK)
8      't      : Temperature (°C)
9      Select Case component
10         Case Is = "Protein"
11             a = 0.17881
12             b = 0.0011958
13             c = -0.0000027178
14         Case Is = "Fat"
15             a = 0.18071
16             b = -0.00027604           'Sjekk ASHRAE-feil
17             c = -0.00000017749
18         Case Is = "Carbohydrate"
19             a = 0.20141
20             b = 0.0013874
21             c = -0.0000043312
22         Case Is = "Fiber"
23             a = 0.18331
24             b = 0.0012497
25             c = -0.0000031683
26         Case Is = "Ash"
27             a = 0.32962
28             b = 0.0014011
29             c = -0.0000029069
30         Case Is = "Water"
31             a = 0.57109
32             b = 0.0017625
33             c = -0.0000067036
34         Case Is = "Ice"
35             a = 2.2196
36             b = -0.0062489

```

```
37         c = 0.00010154
38     End Select
39 End Sub
40
41 Sub thermalDiffusivityConstants(ByVal component As String, a As
42     Double, b As Double, c As Double)
43     'Constants in thermal property model for termal diffusivity
44     'alpha = a + b*t + c*t^2
45     'alpha: Thermal diffusivity (m^2/s)
46     't : Temperature (°C)
47     Select Case component
48         Case Is = "Protein"
49             a = 0.000000068714
50             b = 0.0000000047578
51             c = -1.4646E-12
52         Case Is = "Fat"
53             a = 0.000000098777
54             b = -0.00000000012569
55             c = -3.8286E-14
56         Case Is = "Carbohydrate"
57             a = 0.000000080842
58             b = 0.00000000053052
59             c = -2.3218E-12
60         Case Is = "Fiber"
61             a = 0.000000073976
62             b = 0.00000000051902
63             c = -2.2202E-12
64         Case Is = "Ash"
65             a = 0.00000012461
66             b = 0.00000000037321
67             c = -1.2244E-12
68         Case Is = "Water"
69             a = 0.00000013168
70             b = 0.00000000062477
71             c = -2.4022E-12
72         Case Is = "Ice"
73             a = 0.0000011756
74             b = -0.0000000060833
75             c = 0.00000000095037
76     End Select
```

```
76 End Sub
77
78 Sub densityConstants(ByVal component As String, a As Double, b As
    Double, c As Double)
79     'Constants in thermal property model for density
80     'rho = a + b*t + c*t^2
81     'rho : Density (kg/m^3)
82     't   : Temperature (°C)
83     Select Case component
84         Case Is = "Protein"
85             a = 1329.9
86             b = -0.5184
87             c = 0
88         Case Is = "Fat"
89             a = 925.59
90             b = -0.41757
91             c = 0
92         Case Is = "Carbohydrate"
93             a = 1599.1
94             b = -0.31046
95             c = 0
96         Case Is = "Fiber"
97             a = 1311.5
98             b = -0.36589
99             c = 0
100        Case Is = "Ash"
101            a = 2423.8
102            b = -0.28063
103            c = 0
104        Case Is = "Water"
105            a = 997.18
106            b = 0.0031439
107            c = -0.0037574
108        Case Is = "Ice"
109            a = 916.89
110            b = -0.13071
111            c = 0
112    End Select
113 End Sub
114
```

```
115 Sub specificHeatConstants(ByVal component As String, a As Double, b
    As Double, c As Double, t As Double)
116     'Constants in thermal property model for specific heat
117     'cp = a + b*t + c*t^2
118     'cp : Specific heat (kJ/kgK)
119     't : Temperature (°C)
120     Select Case component
121         Case Is = "Protein"
122             a = 2.0082
123             b = 0.0012089
124             c = -0.0000013129
125         Case Is = "Fat"
126             a = 1.9842
127             b = 0.0014733
128             c = -0.0000048008
129         Case Is = "Carbohydrate"
130             a = 1.5488
131             b = 0.0019625
132             c = -0.0000059399
133         Case Is = "Fiber"
134             a = 1.8459
135             b = 0.0018306
136             c = -0.0000046509
137         Case Is = "Ash"
138             a = 1.0926
139             b = 0.0018896
140             c = -0.0000036817
141         Case Is = "Water"
142             If t <= 0 Then
143                 a = 4.1289
144                 b = -0.0053062
145                 c = 0.00099516
146             Else
147                 a = 4.1289
148                 b = -0.000090864
149                 c = 0.0000054731
150             End If
151         Case Is = "Ice"
152             a = 2.0623
153             b = 0.0060769
```

```
154         c = 0
155     End Select
156 End Sub
157
158 Function componentConductivity(ByVal component As String, ByVal t As
    Double) As Double
159     'Calculating thermal conductivity (W/mK) for food component at
        temperature t
160     't : Temperature (°C)
161     Dim a As Double, b As Double, c As Double
162     Call thermalConductivityConstants(component, a, b, c)
163     componentConductivity = a + b * t + c * t ^ 2
164 End Function
165
166 Function componentDiffusivity(ByVal component As String, ByVal t As
    Double) As Double
167     'Calculating thermal diffusivity (m2/s) for food component at
        temperature t
168     't : Temperature (°C)
169     Dim a As Double, b As Double, c As Double
170     Call thermalDiffusivityConstants(component, a, b, c)
171     componentDiffusivity = a + b * t + c * t ^ 2
172 End Function
173
174 Function componentDensity(ByVal component As String, ByVal t As
    Double) As Double
175     'Calculating density (kg/m3) of food component at temperature t
176     't : Temperature (°C)
177     Dim a As Double, b As Double, c As Double
178     Call densityConstants(component, a, b, c)
179     componentDensity = a + b * t + c * t ^ 2
180 End Function
181
182 Function componentSpecificHeat(ByVal component As String, ByVal t As
    Double) As Double
183     'Calculating specific heat (kJ/kgK) for food component at
        temperature t
184     't : Temperature (°C)
185     Dim a As Double, b As Double, c As Double
186     Call specificHeatConstants(component, a, b, c, t)
```

```

187     componentSpecificHeat = a + b * t + c * t ^ 2
188 End Function
189
190 Function componentEnthalpy(ByVal component As String, ByVal t As
      Double) As Double
191     'Calculating spesific enthalpy (kJ/kg) for food component at
           temperature t
192     'Reference temperature 0°C
193     't : Temperature (°C)
194     Dim a As Double, b As Double, c As Double
195     Call specificHeatConstants(component, a, b, c, t)
196     componentEnthalpy = a * t + b / 2 * t ^ 2 + c / 3 * t ^ 3
197 End Function
198
199 Function fractionBoundWater(ByVal xP As Double) As Double
200     'Mass fraction of bound water estimated from the mass fraction of
           protein
201     'xP : Protein mass fraction
202     fractionBoundWater = 0.4 * xP
203 End Function
204
205
206 Function iceFractionMiles(ByVal t As Double, ByVal tf As Double,
      ByVal xW As Double, ByVal xP As Double) As Double
207     'Prediction of ice fraction (Miles)
208     't : Temperature (°C)
209     'tf : Initial freezing point temperature (°C)
210     'xw : Mass fraction of water in unfrozen food
211     'xp : Mass fraction of protein
212     If t >= tf Then
213         iceFractionMiles = 0
214     Else
215         Dim Xb As Double
216         Xb = fractionBoundWater(xP) 'Estimated mass
           fraction of bound water in food
217         iceFractionMiles = (xW - Xb) * (1 - tf / t) 'Estimated ice
           fraction
218     End If
219 End Function
220

```

```

221 Function iceFractionTchigeov(ByVal t As Double, ByVal tf As Double,
    ByVal xW As Double) As Double
222     'Prediction of ice fraction (Tchigeov)
223     't: Temperature (°C)
224     'tf: Initial freezing point temperature (°C)
225     'xw: Mass fraction of water in unfrozen food
226     If t >= tf Then
227         iceFractionTchigeov = 0
228     Else
229         iceFractionTchigeov = 1.105 * xW / (1 + 0.7138 / Log(tf - t +
            1)) 'Estimated ice fraction
230     End If
231 End Function
232
233 Function foodDensity(ByVal xW As Double, ByVal xP As Double, ByVal
    xF As Double, ByVal xC As Double, ByVal xFi As Double, ByVal xA
    As Double, ByVal tf As Double, ByVal t As Double) As Double
234     'Calculating food density (kg/m3) at temperature t (°C) based on
        food composition, assuming porosity = 0
235     'xw : Mass fraction of water in unfrozen food
236     'xp : Mass fraction of protein in food
237     'xf : Mass fraction of fat in food
238     'xc : Mass fraction of carbohydrate (fiber included) in food
239     'xfi : Mass fraction of fiber in food
240     'xa : Mass fraction of ash in food
241     'tf : Initial freezing temperature (°C)
242     't : Temperature (°C)
243
244     Dim xice As Double, eps As Double
245     Dim w As Double, i As Double, P As Double, f As Double, c As
        Double, fi As Double, a As Double
246
247     'xice = iceFractionTchigeov(t, Tf, xw)
248     xice = iceFractionMiles(t, tf, xW, xP) 'Mass fraction of ice
        at temperature t
249     eps = 0 'Porosity of food (0
        for singular food)
250
251     w = componentDensity("Water", t) 'Density of water
252     i = componentDensity("Ice", t) 'Density of ice

```

```

253 P = componentDensity("Protein", t)           'Density of protein
254 f = componentDensity("Fat", t)               'Density of fat
255 c = componentDensity("Carbohydrate", t)      'Density of
      carbohydrate
256 fi = componentDensity("Fiber", t)           'Density of fiber
257 a = componentDensity("Ash", t)              'Density of ash
258
259 foodDensity = (1 - eps) / ((xW - xice) / w + xice / i + xP / P +
      xF / f + (xC - xFi) / c + xFi / fi + xA / a)
260 End Function
261
262 Function foodSpecificHeat(ByVal xW As Double, ByVal xP As Double,
      ByVal xF As Double, ByVal xC As Double, ByVal xFi As Double,
      ByVal xA As Double, ByVal tf As Double, ByVal t As Double) As
      Double
263 'Calculating food specific heat (kJ/kgK) at temperature t (°C)
      based on food composition
264 'xw : Mass fraction of water in unfrozen food
265 'xp : Mass fraction of protein in food
266 'xf : Mass fraction of fat in food
267 'xc : Mass fraction of carbohydrate (fiber included) in food
268 'xfi : Mass fraction of fiber in food
269 'xa : Mass fraction of ash in food
270 'tf : Initial freezing temperature (°C)
271 't : Temperature (°C)
272
273 Dim w As Double, i As Double, P As Double, f As Double, c As
      Double, fi As Double, a As Double
274 w = componentSpecificHeat("Water", t)        'Specific heat for
      water
275 i = componentSpecificHeat("Ice", t)          'Specific heat for
      ice
276 P = componentSpecificHeat("Protein", t)      'Specific heat for
      protein
277 f = componentSpecificHeat("Fat", t)         'Specific heat for
      fat
278 c = componentSpecificHeat("Carbohydrate", t) 'Specific heat for
      carbohydrate
279 fi = componentSpecificHeat("Fiber", t)       'Specific heat for
      fiber

```



```

280     a = componentSpecificHeat("Ash", t)           'Specific heat for
           ash
281
282     If t >= tf Then
283         foodSpecificHeat = xW * w + xP * P + xF * f + (xC - xFi) * c +
           xFi * fi + xA * a
284     Else
285         Dim fusion As Double, Xb As Double
286         fusion = 333.6
287         Xb = fractionBoundWater(xP)
288         foodSpecificHeat = 1.55 + 1.26 * (xP + xF + xC + xA) - (xW -
           xP) * fusion * tf / (t ^ 2)
289
290     End If
291 End Function
292
293 Function foodEnthalpy(ByVal xW As Double, ByVal xP As Double, ByVal
           xF As Double, ByVal xC As Double, ByVal xFi As Double, ByVal xA
           As Double, ByVal tf As Double, ByVal t As Double) As Double
294     'Calculating food enthalpy (kJ/kg) at temperature t (°C) based on
           food composition
295     'xw  : Mass fraction of water in unfrozen food
296     'xp  : Mass fraction of protein in food
297     'xf  : Mass fraction of fat in food
298     'xc  : Mass fraction of carbohydrate (fiber included) in food
299     'xfi : Mass fraction of fiber in food
300     'xa  : Mass fraction of ash in food
301     'tf  : Initial freezing temperature (°C)
302     't   : Temperature (°C)
303
304     Dim w As Double, i As Double, P As Double, f As Double, c As
           Double, fi As Double, a As Double
305     w = componentEnthalpy("Water", t)           'Specific enthalpy for
           water (kJ/kg)
306     i = componentEnthalpy("Ice", t)             'Specific enthalpy for
           ice (kJ/kg)
307     P = componentEnthalpy("Protein", t)        'Specific enthalpy for
           protein (kJ/kg)
308     f = componentEnthalpy("Fat", t)           'Specific enthalpy for
           fat (kJ/kg)

```

```

309   c = componentEnthalpy("Carbohydrate", t)   'Specific enthalpy for
        carbohydrate (kJ/kg)
310   fi = componentEnthalpy("Fiber", t)         'Specific enthalpy for
        fiber (kJ/kg)
311   a = componentEnthalpy("Ash", t)           'Specific enthalpy for
        ash (kJ/kg)
312
313   If t >= tf Then
314       foodEnthalpy = xW * w + xP * P + xF * f + (xC - xFi) * c + xFi
        * fi + xA * a
315   Else
316       Dim fusion As Double, xice As Double
317       fusion = 333.6                          'Latent heat of
        fusion of water at 273,15 K (kJ/kg)
318       xice = iceFractionTchigeov(t, tf, xW)
319       'xice = iceFractionMiles(t, tf, xW, xP)   'Estimated ice
        fraction
320       foodEnthalpy = (xW - xice) * w + xice * i + xP * P + xF * f +
        (xC - xFi) * c + xFi * fi + xA * a - xice * fusion
321   End If
322 End Function
323
324 Function foodApparentEnthalpy(ByVal xW As Double, ByVal xP As Double
        , ByVal xF As Double, ByVal xC As Double, ByVal xFi As Double,
        ByVal xA As Double, ByVal tf As Double, ByVal t As Double) As
        Double
325   'Calculating food enthalpy (kJ/kg) at temperature t (°C) based on
        food composition
326   'xw : Mass fraction of water in unfrozen food
327   'xp : Mass fraction of protein in food
328   'xf : Mass fraction of fat in food
329   'xc : Mass fraction of carbohydrate (fiber included) in food
330   'xfi : Mass fraction of fiber in food
331   'xa : Mass fraction of ash in food
332   'tf : Initial freezing temperature (°C)
333   't : Temperature (°C)
334
335   Dim w As Double, i As Double, P As Double, f As Double, c As
        Double, fi As Double, a As Double

```

```

336     w = componentEnthalpy("Water", t)           'Specific enthalpy for
           water (kJ/kg)
337     i = componentEnthalpy("Ice", t)           'Specific enthalpy for
           ice (kJ/kg)
338     P = componentEnthalpy("Protein", t)       'Specific enthalpy for
           protein (kJ/kg)
339     f = componentEnthalpy("Fat", t)          'Specific enthalpy for
           fat (kJ/kg)
340     c = componentEnthalpy("Carbohydrate", t) 'Specific enthalpy for
           carbohydrate (kJ/kg)
341     fi = componentEnthalpy("Fiber", t)       'Specific enthalpy for
           fiber (kJ/kg)
342     a = componentEnthalpy("Ash", t)         'Specific enthalpy for
           ash (kJ/kg)
343
344     If t >= tf Then
345         foodApparentEnthalpy = xW * w + xP * P + xF * f + (xC - xFi) *
           c + xFi * fi + xA * a
346     Else
347         Dim fusion As Double, xice As Double
348         fusion = 333.6                       'Latent heat of
           fusion of water at 273,2 K (kJ/kg)
349         xice = iceFractionTchigeov(t, tf, xW)
350         'xice = iceFractionMiles(t, tf, xW, xP) 'Estimated ice
           fraction
351         foodApparentEnthalpy = (xW - xice) * w + xice * i + xP * P +
           xF * f + (xC - xFi) * c + xFi * fi + xA * a - xice *
           fusion
352     End If
353 End Function
354
355 Function foodConductivityParallel(ByVal xW As Double, ByVal xP As
           Double, ByVal xF As Double, ByVal xC As Double, ByVal xFi As
           Double, ByVal xA As Double, ByVal tf As Double, ByVal t As
           Double) As Double
356     'Calculating food conductivity (parallel) (W/mK) at temperature t
           (°C) based on food composition
357     'xw : Mass fraction of water in unfrozen food
358     'xp : Mass fraction of protein in food
359     'xf : Mass fraction of fat in food

```

```

360  'xc  : Mass fraction of carbohydrate (fiber included) in food
361  'xfi : Mass fraction of fiber in food
362  'xa  : Mass fraction of ash in food
363  'tf  : Initial freezing temperature (°C)
364  't   : Temperature (°C)
365
366  Dim w As Double, i As Double, P As Double, f As Double, c As
      Double, fi As Double, a As Double
367  w = componentConductivity("Water", t) / componentDensity("Water",
      t)           'Thermal conductivity for water (W/mK)
368  i = componentConductivity("Ice", t) / componentDensity("Ice", t)
      'Thermal conductivity for ice (W/mK)
369  P = componentConductivity("Protein", t) / componentDensity("
      Protein", t)           'Thermal conductivity for protein (W/
      mK)
370  f = componentConductivity("Fat", t) / componentDensity("Fat", t)
      'Thermal conductivity for fat (W/mK)
371  c = componentConductivity("Carbohydrate", t) / componentDensity("
      Carbohydrate", t)     'Thermal conductivity for carbohydrate (W/
      mK)
372  fi = componentConductivity("Fiber", t) / componentDensity("Fiber"
      , t)           'Thermal conductivity for fiber (W/mK)
373  a = componentConductivity("Ash", t) / componentDensity("Ash", t)
      'Thermal conductivity for ash (W/mK)
374
375  Dim density As Double
376  density = foodDensity(xW, xP, xF, xC, xFi, xA, tf, t)
377
378  If t >= tf Then
379      foodConductivityParallel = (xW * w + xP * P + xF * f + (xC -
      xFi) * c + xFi * fi + xA * a) * density
380  Else
381      Dim xice As Double
382      'xice = iceFractionTchigeov(t, tf, xw)
383      xice = iceFractionMiles(t, tf, xW, xP)
384      foodConductivityParallel = ((xW - xice) * w + xice * i + xP *
      P + xF * f + (xC - xFi) * c + xFi * fi + xA * a) * density
385  End If
386  End Function
387

```

```

388 Function foodConductivityPerpendicular(ByVal xW As Double, ByVal xP
      As Double, ByVal xF As Double, ByVal xC As Double, ByVal xFi As
      Double, ByVal xA As Double, ByVal tf As Double, ByVal t As
      Double) As Double
389   'Calculating food conductivity (perpendicular) (W/mK) at
      'temperature t (°C) based on food composition
390   'xw : Mass fraction of water in unfrozen food
391   'xp : Mass fraction of protein in food
392   'xf : Mass fraction of fat in food
393   'xc : Mass fraction of carbohydrate (fiber included) in food
394   'xfi : Mass fraction of fiber in food
395   'xa : Mass fraction of ash in food
396   'tf : Initial freezing temperature (°C)
397   't : Temperature (°C)
398
399   Dim w As Double, i As Double, P As Double, f As Double, c As
      Double, fi As Double, a As Double
400   w = componentConductivity("Water", t) * componentDensity("Water",
      t) 'Thermal conductivity for water (W/mK)
401   i = componentConductivity("Ice", t) * componentDensity("Ice", t)
      'Thermal conductivity for ice (W/mK)
402   P = componentConductivity("Protein", t) * componentDensity("
      Protein", t) 'Thermal conductivity for protein (W/
      'mK)
403   f = componentConductivity("Fat", t) * componentDensity("Fat", t)
      'Thermal conductivity for fat (W/mK)
404   c = componentConductivity("Carbohydrate", t) * componentDensity("
      Carbohydrate", t) 'Thermal conductivity for carbohydrate (W/
      'mK)
405   fi = componentConductivity("Fiber", t) * componentDensity("Fiber"
      , t) 'Thermal conductivity for fiber (W/mK)
406   a = componentConductivity("Ash", t) * componentDensity("Ash", t)
      'Thermal conductivity for ash (W/mK)
407
408   Dim density As Double
409   density = foodDensity(xW, xP, xF, xC, xFi, xA, tf, t)
410
411   If t >= tf Then
412     foodConductivityPerpendicular = 1 / ((xW / w + xP / P + xF / f
      + (xC - xFi) / c + xFi / fi + xA / a) * density)

```

```

413  Else
414      Dim xice As Double
415      xice = iceFractionTchigeov(t, tf, xW)
416      'xice = iceFractionMiles(t, tf, xW, xP)
417      foodConductivityPerpendicular = 1 / (((xW - xice) / w + xice /
          i + xP / P + xF / f + (xC - xFi) / c + xFi / fi + xA / a)
          * density)
418  End If
419  End Function
420
421  Function conductivityKopelman(ByVal xW As Double, ByVal xP As Double
      , ByVal xF As Double, ByVal xC As Double, ByVal xFi As Double,
      ByVal xA As Double, ByVal tf As Double, ByVal t As Double) As
      Double
422      'Calculating food conductivity (W/mK) at temperature t (°C)
          based on food composition
423      'xW : Mass fraction of water in unfrozen food
424      'xP : Mass fraction of protein in food
425      'xF : Mass fraction of fat in food
426      'xC : Mass fraction of carbohydrate (fiber included) in food
427      'xFi : Mass fraction of fiber in food
428      'xA : Mass fraction of ash in food
429      'tf : Initial freezing temperature (°C)
430      't : Temperature (°C)
431
432      Dim kW As Double, kI As Double, kP As Double, kF As Double, kC As
          Double, kFi As Double, kA As Double
433      kW = componentConductivity("Water", t) 'Thermal
          conductivity for water (W/mK)
434      kI = componentConductivity("Ice", t) 'Thermal
          conductivity for ice (W/mK)
435      kP = componentConductivity("Protein", t) 'Thermal
          conductivity for protein (W/mK)
436      kF = componentConductivity("Fat", t) 'Thermal
          conductivity for fat (W/mK)
437      kC = componentConductivity("Carbohydrate", t) 'Thermal
          conductivity for carbohydrate (W/mK)
438      kFi = componentConductivity("Fiber", t) 'Thermal
          conductivity for fiber (W/mK)

```

```

439    kA = componentConductivity("Ash", t)           'Thermal
         conductivity for ash (W/mK)
440
441    Dim rhoW As Double, rhoI As Double, rhoP As Double, rhoF As
         Double, rhoC As Double, rhoFi As Double, rhoA As Double
442    rhoW = componentDensity("Water", t)           'Thermal conductivity
         for water (W/mK)
443    rhoI = componentDensity("Ice", t)             'Thermal conductivity
         for ice (W/mK)
444    rhoP = componentDensity("Protein", t)         'Thermal conductivity
         for protein (W/mK)
445    rhoF = componentDensity("Fat", t)             'Thermal conductivity
         for fat (W/mK)
446    rhoC = componentDensity("Carbohydrate", t)   'Thermal conductivity
         for carbohydrate (W/mK)
447    rhoFi = componentDensity("Fiber", t)         'Thermal conductivity
         for fiber (W/mK)
448    rhoA = componentDensity("Ash", t)            'Thermal conductivity
         for ash (W/mK)
449
450    Dim xv1 As Double, xv2 As Double
451    Dim k As Double, rho As Double, x As Double
452
453    k = kW
454    rho = rhoW
455    x = xW
456
457    'Mixture Water/ice
458    If t < tf Then
459        Dim xice As Double
460        'xice = iceFractionTchigeov(t, tf, xw)
461        xice = iceFractionMiles(t, tf, xW, xP)
462        xW = xW - xice
463
464        xv1 = xvA(xW, xice, rhoW, rhoI)
465        xv2 = 1 - xv1
466
467        k = kMix(xv1, xv2, kW, kI)
468        rho = rhoMix(xv1, xv2, rhoW, rhoI)
469    End If

```

```
470
471   'Mixture with protein
472   If xP > 0 Then
473       xv1 = xVA(x, xP, rho, rhoP)
474       xv2 = 1 - xv1
475       k = kMix(xv1, xv2, k, kP)
476       rho = rhoMix(xv1, xv2, rho, rhoP)
477       x = x + xP
478   End If
479
480   'Mixture with fat
481   If xF > 0 Then
482       xv1 = xVA(x, xF, rho, rhoF)
483       xv2 = 1 - xv1
484       k = kMix(xv1, xv2, k, kF)
485       rho = rhoMix(xv1, xv2, rho, rhoF)
486       x = x + xF
487   End If
488
489   'Mixture with carbohydrate
490   If xC > 0 Then
491       xv1 = xVA(x, (xC - xFi), rho, rhoC)
492       xv2 = 1 - xv1
493       k = kMix(xv1, xv2, k, kC)
494       rho = rhoMix(xv1, xv1, rho, rhoC)
495       x = x + (xC - xFi)
496   'Mixture with fiber
497   If xFi > 0 Then
498       xv1 = xVA(x, xFi, rho, rhoFi)
499       xv2 = 1 - xv1
500       k = kMix(xv1, xv2, k, kFi)
501       rho = rhoMix(xv1, xv2, rho, rhoFi)
502       x = x + xFi
503   End If
504   End If
505
506   'Mixture with ash
507   If xA > 0 Then
508       xv1 = xVA(x, xA, rho, rhoA)
509       xv2 = 1 - xv1
```



```

510         k = kMix(xv1, xv2, k, kA)
511         rho = rhoMix(xv1, xv2, rho, rhoA)
512         x = x + xA
513     End If
514
515     conductivityKopelman = k
516
517 End Function
518
519 Function xvA(ByVal xA As Double, ByVal Xb As Double, ByVal rhoA As
        Double, ByVal rhoB As Double) As Double
520     'Calculate the volume fraction of component A in a two component
        mixture
521     'xA : Mass fraction of component A
522     'xB : Mass fraction of component B
523     'rhoA : Density of component A
524     'rhoB : Density of component B
525
526     xvA = (xA / rhoA) / (xA / rhoA + Xb / rhoB)
527 End Function
528
529 Function rhoMix(ByVal xvA As Double, ByVal xvB As Double, ByVal rhoA
        As Double, ByVal rhoB As Double) As Double
530     'Calculate the density of a two component mixture
531     'xvA : Volumetric fraction of component A
532     'xvB : Volumetric fraction of component B
533     'rhoA : Density of component A
534     'rhoB : Density of component B
535
536     rhoMix = xvA * rhoA + xvB * rhoB
537 End Function
538
539 Function kMix(ByVal xvA As Double, ByVal xvB As Double, ByVal kA As
        Double, ByVal kB As Double) As Double
540     'Calculate the thermal conductivity of a two component mixture
541     'xvA : Volumetric fraction of component A
542     'xvB : Volumetric fraction of component B
543     'kA : Thermal conductivity of component A
544     'kB : Thermal conductivity of component B
545

```

```

546   Dim kC As Double, M As Double, L As Double
547
548   If xvA > xvB Then
549       kC = kA
550       L = xvB ^ (1 / 3)
551       If kA > kB Then
552           M = xvB ^ (2 / 3)
553       Else
554           M = xvB ^ (2 / 3) * (1 - kB / kA)
555       End If
556   Else
557       kC = kB
558       L = xvA ^ (1 / 3)
559       If kB > kA Then
560           M = xvA ^ (2 / 3)
561       Else
562           M = xvA ^ (2 / 3) * (1 - kA / kB)
563       End If
564   End If
565
566   kMix = kC * (1 - M) / (1 - M * (1 - L))
567 End Function
568
569 Function kMixParallel(ByVal xvA As Double, ByVal xvB As Double,
570   ByVal kA As Double, ByVal kB As Double) As Double
571   'Calculate the parallel thermal conductivity of a two component
572   'mixture
573   'xvA : Volumetric fraction of component A
574   'xvB : Volumetric fraction of component B
575   'kA : Thermal conductivity of component A
576   'kB : Thermal conductivity of component B
577
578   If xvA > xvB Then
579       kMixParallel = kA * (1 - xvB * (1 - kB / kA))
580   Else
581       kMixParallel = kB * (1 - xvA * (1 - kA / kB))
582   End If
583 End Function

```

```

584 Function kMixPerpendicular(ByVal xVA As Double, ByVal xVB As Double,
    ByVal kA As Double, ByVal kB As Double) As Double
585     'Calculate the perpendicular thermal conductivity of a two
    component mixture
586     'xVA : Volumetric fraction of component A
587     'xVB : Volumetric fraction of component B
588     'kA : Thermal conductivity of component A
589     'kB : Thermal conductivity of component B
590
591     Dim kC As Double, n As Double, P As Double
592
593     If xVA > xVB Then
594         kC = kA
595         kD = kB
596         n = xVB ^ 0.5
597     Else
598         kC = kB
599         kD = kA
600         n = xVA ^ 0.5
601     End If
602     P = n * (1 - kD / kC)
603
604     kMixPerpendicular = kC * (1 - P) / (1 - P * (1 - n))
605 End Function
606
607 Function initialFreezingTemperatureMeat(ByVal xW) As Double
608     'Predicted initial freezing temperature (°C) as a function of
    water content
609     initialFreezingTemperatureMeat = -1.97 + 1.47 * xW
610 End Function
611
612 Function specificHeatChen(ByVal xs) As Double
613     'Prediction of specific heat (kJ/kg) for food with unknown
    composition
614     'xs: Mass fraction of solids
615     specificHeatChen = 4.19 - 2.3 * xs - 0.628 * xs ^ 3
616 End Function
617
618 Function UValue2(ByVal hin As Double, ByVal hout As Double, k() As
    Double, x() As Double) As Double

```

```

619      'Calculate the overall heat transfer coefficient  $U$  ( $W/m^2K$ ) for
        wall element
620      'hin : Inside surface convection heat transfer coefficient ( $W/m$ 
        ^2K)
621      'hout : Outside surface convection heat transfer coefficient ( $W/m$ 
        ^2K)
622      'k() : Heat conductivity of material ( $W/mK$ )
623      'x() : Thickness of material (m)
624
625      Dim R As Double, i As Integer
626
627      For i = 0 To (UBound(k) - 1)
628          R = R + x(i) / k(i)
629      Next
630
631      R = R + 1 / hin + 1 / hout
632      UValue2 = 1 / R
633  End Function
634
635  Function UValue(ByVal hin As Double, ByVal hout As Double, ByVal
        conductivity As Range, ByVal thickness As Range) As Double
636      'Calculate the overall heat transfer coefficient  $U$  ( $W/m^2K$ ) for
        wall element
637      'hin : Inside surface convection heat transfer
        coefficient ( $W/m^2K$ )
638      'hout : Outside surface convection heat transfer
        coefficient ( $W/m^2K$ )
639      'conductivity : Heat conductivity of materials ( $W/mK$ )
640      'thickness : Thickness of materials (m)
641
642      Dim R As Double, k() As Double, x() As Double, i As Integer
643
644      Call RangeToArray(conductivity, k)
645      Call RangeToArray(thickness, x)
646
647      For i = 0 To (UBound(k) - 1)
648          R = R + x(i) / k(i)
649      Next
650
651      R = R + 1 / hin + 1 / hout

```

```

652     UValue = 1 / R
653 End Function
654
655 Sub RangeToArray(ByVal rng As Range, ary() As Double)
656     'Store values from one-dimensional range in an array
657     Dim n As Integer, i As Integer
658     Dim v As Integer, h As Integer
659
660     If rng.Rows.Count > rng.Columns.Count Then
661         n = rng.Rows.Count
662         v = 1
663         h = 0
664     Else
665         n = rng.Columns.Count
666         v = 0
667         h = 1
668     End If
669
670     ReDim ary(n)
671
672     For i = 0 To (n - 1)
673         ary(i) = rng.Cells(1, 1).Offset(v * i, h * i).Value
674     Next
675
676 End Sub
677 Function transmissionLoad(ByVal a As Double, ByVal tin As Double,
        ByVal tout As Double, ByVal hin As Double, ByVal hout As Double,
        ByVal k As Range, ByVal x As Range) As Double
678     'Calculate the transmission heat load (kW)
679     'A : Area of surface (m2)
680     'tin : Inside temperature (°C)
681     'tout : Outside temperature (°C)
682     'hin : Inside surface convection heat transfer coefficient (W/m
        ^2K)
683     'hout : Outside surface convection heat transfer coefficient (W/m
        ^2K)
684     'k() : Heat conductivity of material (W/mK)
685     'x() : Thickness of material (m)
686
687     Dim u As Double     'Overall heat transfer coefficient

```

```

688     u = UValue(hin , hout , k , x) / 1000
689
690     transmissionLoad = u * a * (tout - tin)
691 End Function
692
693 Function transmissionLoad2(ByVal a As Double , ByVal tin As Double ,
        ByVal tout As Double , ByVal hin As Double , ByVal hout As Double ,
        k() As Double , x() As Double) As Double
694     'Calculate the sensible heat gain ...
695     'A      : Area of surface (m2)
696     'tin    : Inside temperature (°C)
697     'tout   : Outside temperature (°C)
698     'hin    : Inside surface convection heat transfer coefficient (W/m
        ^2K)
699     'hout   : Outside surface convection heat transfer coefficient (W/m
        ^2K)
700     'k()    : Heat conductivity of material (W/mK)
701     'x()    : Thickness of material (m)
702
703     Dim u As Double           'Overall heat transfer coefficient
704     u = UValue(hin , hout , k , x)
705
706     transmissionLoad2 = u * a * (tout - tin)
707 End Function
708
709 Function sunEffect(ByVal surface As String , ByVal direction As
        String) As Double
710     'Temperature adjustment (°C) for sunlit surface
711     'surface : Surface brightness (Dark, Medium or Light)
712     'direction : Compass point (East, South, West or Roof)
713     Select Case surface
714         Case Is = "Dark"
715             Select Case direction
716                 Case Is = "East"
717                     sunEffect = 5
718                 Case Is = "South"
719                     sunEffect = 3
720                 Case Is = "West"
721                     sunEffect = 5
722                 Case Is = "Roof"

```

```

723         sunEffect = 11
724     End Select
725     Case Is = "Medium"
726         Select Case direction
727             Case Is = "East"
728                 sunEffect = 4
729             Case Is = "South"
730                 sunEffect = 3
731             Case Is = "West"
732                 sunEffect = 4
733             Case Is = "Roof"
734                 sunEffect = 9
735         End Select
736     Case Is = "Light"
737         Select Case direction
738             Case Is = "East"
739                 sunEffect = 3
740             Case Is = "South"
741                 sunEffect = 2
742             Case Is = "West"
743                 sunEffect = 3
744             Case Is = "Roof"
745                 sunEffect = 5
746         End Select
747 End Select
748 End Function
749
750 Function doorway(ByVal doorPassages As Integer, ByVal openTime As
    Double, ByVal opened As Double, ByVal period As Double) As
    Double
751     'Calculation of doorway open-time factor as fraction of
        timeperiod
752     'doorPassages : Number of doorway passages
753     'openTime     : Time for open-closing per passage (seconds)
754     'opened       : Time the door simply stands open (min)
755     'period       : Time period (hours)
756
757     doorway = (doorPassages * openTime + 60 * opened) / (3600 *
        period)
758 End Function

```

```

759 Function infiltrationEstablished (ByVal h As Double, ByVal w As
      Double, ByVal tin As Double, ByVal tout As Double, ByVal RHIn As
      Double, ByVal RHOut As Double) As Double
760   'Infiltration heat load for fully established flow (kW) (Gosney
      and Olama)
761   'h      : Height of doorway (m2)
762   'w      : Width of doorway (m)
763   'tIn    : Temperature of inside air (°C)
764   'tOut   : Temperature of outside air (°C)
765   'RHIn   : Relative humidity of inside air (%)
766   'RHOut  : Relative humidity of outside air (%)
767
768   Dim hin As Double, hout As Double, rhoIn As Double, rhoOut As
      Double
769   Dim G As Double
770
771   G = 9.81                                     'Gravitational
      constant (m/s2)
772   hin = hx_h_trh(101.325, tin, RHIn) / 1000   'Enthalpy of
      inside air (kJ/kg)
773   hout = hx_h_trh(101.325, tout, RHOut) / 1000 'Enthalpy of
      outside air (kJ/kg)
774   rhoIn = 1 / hx_vfukt_trh(101.325, tin, RHIn) 'Density of
      inside air (kg/m3)
775   rhoOut = 1 / hx_vfukt_trh(101.325, tout, RHOut) 'Density of
      outside air (kg/m3)
776
777   infiltrationEstablished = 0.221 * h * w * (hout - hin) * rhoIn *
      (1 - rhoOut / rhoIn) ^ 0.5 * (G * h) ^ 0.5 * densityFactor(
      rhoIn, rhoOut)
778
779 End Function
780
781 Function infiltrationEstablished2 (ByVal a As Double, ByVal h As
      Double, ByVal hin As Double, ByVal hout As Double, ByVal rhoIn
      As Double, ByVal rhoOut As Double) As Double
782   'Infiltration heat load for fully established flow (kW) (Gosney
      and Olama)
783   'A      : Area of doorway (m2)
784   'H      : Height of doorway (m)

```



```

785      'hIn      : Enthalpy of inside air (kJ/kg)
786      'hOut     : Enthalpy of outside air (kJ/kg)
787      'rhoIn    : Density of inside air (kg/m^3)
788      'rhoOut   : Density of outside air (kg/m^3)
789
790      Dim G As Double
791      G = 9.81          'Gravitational constant (m/s^2)
792
793      infiltrationEstablished2 = 0.221 * a * (hout - hin) * rhoIn * (1
          - rhoOut / rhoIn) ^ 0.5 * (G * h) ^ 0.5 * densityFactor(rhoIn
          , rhoOut)
794
795      End Function
796
797      Function densityFactor(ByVal rhoIn As Double, ByVal rhoOut As Double
          ) As Double
798          'Density factor
799          'rhoIn    : Density inside refrigerated area (kg/m^3)
800          'rhoOut   : Density outside refrigerated area (kg/m^3)
801
802          densityFactor = (2 / (1 + (rhoIn / rhoOut) ^ (1 / 3))) ^ 1.5
803      End Function
804
805      Function flowFactor(ByVal tin As Double, ByVal tout As Double) As
          Double
806          'Flow factor: Ratio of actual air exchange to fully established
          flow
807          If Abs(tout - tin) <= 11 Then
808              flowFactor = 1.1
809          Else
810              flowFactor = 0.8
811      End Function
812
813      Function infiltrationDirectFlow(ByVal a As Double, ByVal v As Double
          , ByVal tin, ByVal tout, ByVal RHIn As Double, ByVal RHOut As
          Double, ByVal Dt As Double) As Double
814          'Infiltration heat load by direct flow through doorways (kW)
815          'A      : Area of opening (m^2)
816          'V      : Average air velocity (m/s)
817          'tIn    : Temperature of inside air (°C)

```

```

818   'tOut : Temperature of outside air (°C)
819   'RHIn : Relative humidity of inside air (%)
820   'RHOut: Relative humidity of outside air (%)
821   'Dt   : Portion of the time the doorway is open
822
823   Dim hin As Double, hout As Double, rhoIn As Double
824   hin = hx_h_trh(101.325, tin, RHIn) / 1000           'Enthalpy of
      inside air (kJ/kg)
825   hout = hx_h_trh(101.325, tout, RHOut) / 1000      'Enthalpy of
      outside air (kJ/kg)
826   rhoIn = 1 / hx_vfukt_trh(101.325, tin, RHIn)      'Density of
      inside air (kg/m3)
827
828   infiltrationDirectFlow = v * a * (hin - hout) * rhoIn * Dt
829 End Function
830
831 Function heatPersons(ByVal n As Integer, ByVal t As Double) As
      Double
832   'Heat load from people (kW)
833   'n : Number of people
834   't : Room temperature (°C)
835
836   heatPersons = n * (272 - 6 * t)
837 End Function
838
839 Function heatPersons2(ByVal n As Integer, ByVal t As Double, ByVal
      Dt As Double) As Double
840   'Average heat load from people (kW)
841   'n : Number of people
842   't : Room temperature (°C)
843   'Dt: Fraction of time people are present in the room
844
845   heatPersons2 = n * (272 - 6 * t) * Dt
846 End Function
847
848
849 Sub insertFood(ByVal category As String, ByVal name As String, ByVal
      xW As Double, ByVal xP As Double, ByVal xF As Double, ByVal xC
      As Double, ByVal xFi As Double, ByVal xA As Double, ByVal tf As
      Double, ByVal estimate As Boolean, ByVal ref As String)

```

```
850      'Insert food item in food database
851  Dim location As Range
852
853      'Find the right starting row for the food category:
854  Set location = Worksheets(2).Range("B9")
855  Do While UCase(location.Value) <> UCase(category)
856      Set location = location.Offset(1, 0)
857  Loop
858  Set location = location.Offset(0, 1)
859
860      'Find the right row for the name (alphabetically)
861  Do While UCase(location.Value) < UCase(name) And UCase(location.
      Value) <> "" And (UCase(location.Offset(0, -1).Value) = "" Or
      UCase(location.Offset(0, -1).Value) = UCase(category))
862      Set location = location.Offset(1, 0)
863  Loop
864
865      'Special approach for beginning and end of category field:
866  If location.Offset(0, -1).Value = category Then
867      location.Offset(1, 0).EntireRow.Insert
868      location.Offset(1, 0).Value = location.Value
869      location.Offset(1, 1).Value = location.Offset(0, 1).Value
870      location.Offset(1, 2).Value = location.Offset(0, 2).Value
871      location.Offset(1, 3).Value = location.Offset(0, 3).Value
872      location.Offset(1, 4).Value = location.Offset(0, 4).Value
873      location.Offset(1, 5).Value = location.Offset(0, 5).Value
874      location.Offset(1, 6).Value = location.Offset(0, 6).Value
875      location.Offset(1, 7).Formula = componentSumFormula(location.
      Offset(1, 0))
876      location.Offset(1, 10).Value = location.Offset(0, 10).Value
877  If location.Offset(0, 9).Value <> "" Then
878      location.Offset(1, 9).Value = location.Offset(0, 9).Value
879      location.Offset(1, 8).Formula = freezingPointFormula(
      location.Offset(1, 0))
880  Else
881      location.Offset(1, 8).Value = location.Offset(0, 8).Value
882  End If
883  ElseIf location.Value = "" Then
884      location.Offset(-1, 0).EntireRow.Insert
885  Set location = location.Offset(-1, 0)
```

```

886     location.Offset(-1, 0).Value = location.Value
887     location.Offset(-1, 1).Value = location.Offset(0, 1).Value
888     location.Offset(-1, 2).Value = location.Offset(0, 2).Value
889     location.Offset(-1, 3).Value = location.Offset(0, 3).Value
890     location.Offset(-1, 4).Value = location.Offset(0, 4).Value
891     location.Offset(-1, 5).Value = location.Offset(0, 5).Value
892     location.Offset(-1, 6).Value = location.Offset(0, 6).Value
893     location.Offset(-1, 7).Formula = componentSumFormula(location .
        Offset(-1, 0))
894     location.Offset(-1, 10).Value = location.Offset(0, 10).Value
895     If location.Offset(0, 9).Value <> " " Then
896         location.Offset(-1, 9).Value = location.Offset(0, 9).Value
897         location.Offset(-1, 8).Formula = freezingPointFormula(
            location.Offset(-1, 0))
898     Else
899         location.Offset(-1, 8).Value = location.Offset(0, 8).Value
900     End If
901     Else
902         location.EntireRow.Insert
903         Set location = location.Offset(-1, 0)
904     End If
905
906     'Insert food values in database:
907     location.Value = name
908     location.Offset(0, 1).Value = xW
909     location.Offset(0, 2).Value = xP
910     location.Offset(0, 3).Value = xF
911     location.Offset(0, 4).Value = xC
912     location.Offset(0, 5).Value = xFi
913     location.Offset(0, 6).Value = xA
914     location.Offset(0, 7).Formula = componentSumFormula(location)
915     location.Offset(0, 10).Value = ref
916     If estimate = True Then
917         location.Offset(0, 8).Formula = freezingPointFormula(location)
            '=initialFreezingTemperatureMeat(" & location.Offset(0,
            1).Address(False, False) & ")'
918         location.Offset(0, 9).Value = "Estimated□freezing□point"
919     Else
920         location.Offset(0, 8) = tf
921         location.Offset(0, 9).Value = " "

```

```

922     End If
923
924 End Sub
925 Function componentSumFormula(ByVal S As Range) As String
926     'Formula text for calculating sum of components for food item
927     componentSumFormula = "=" & S.Offset(0, 1).Address(False, False)
928         —
929         & "+" & S.Offset(0, 2).Address(False,
930             False) _
931         & "+" & S.Offset(0, 3).Address(False,
932             False) _
933         & "+" & S.Offset(0, 4).Address(False,
934             False) _
935         & "+" & S.Offset(0, 6).Address(False,
936             False)
937 End Function
938
939 Function freezingPointFormula(ByVal S As Range) As String
940     'Formula text for predicted initial freezing point
941     freezingPointFormula = "=initialFreezingTemperatureMeat(" & S.
942         Offset(0, 1).Address(False, False) & ")"
943 End Function
944
945 Sub prodForm()
946     'Open form to add new food item to database
947     frmProduct.Show
948 End Sub
949
950 Sub insertProduct(category As String, name As String, number As
951     Double, mass As Double, length As Double, width As Double, tin
952     As Double, tout As Double, time As Double)
953     Dim cell As Range
954     Dim xW As Double, xP As Double, xF As Double, xC As Double, xFi
955         As Double, xA As Double, tf As Double
956
957     Call foodProperties(name, xW, xP, xF, xC, xFi, xA, tf)
958
959     Set cell = Worksheets(1).Range("B20")
960
961     Do While cell.Value <> ""
962         Set cell = cell.Offset(1, 0)

```

```
953     Loop
954
955     cell.Value = category
956     cell.Offset(0, 2).Value = name
957     cell.Offset(0, 3).Value = number
958     cell.Offset(0, 4).Value = mass
959     cell.Offset(0, 5).Value = length
960     cell.Offset(0, 6).Value = width
961     cell.Offset(0, 7).Value = tin
962     cell.Offset(0, 10).Value = tout
963     cell.Offset(0, 15).Value = time
964
965     cell.Offset(0, 22).Value = xW
966     cell.Offset(0, 23).Value = xP
967     cell.Offset(0, 24).Value = xF
968     cell.Offset(0, 25).Value = xC
969     cell.Offset(0, 26).Value = xFi
970     cell.Offset(0, 27).Value = xA
971     cell.Offset(0, 28).Value = tf
972 End Sub
973
974 Function bottom(first As Range) As Range
975     Dim entries As Integer
976     Dim cat As Range
977
978     Set bottom = first
979     Set cat = Worksheets(1).Range("B20")
980     Do While cat.Offset(1, 0) <> ""
981         Set cat = cat.Offset(1, 0)
982         Set bottom = bottom.Offset(1, 0)
983     Loop
984 End Function
985
986 Sub foodForm()
987     'Open form to add new food item to database
988     frmFoodstuff.Show
989 End Sub
990
991 Sub drpFood_Change()
```

```
992      'Fill in information for the food item chosen in the drop down
993          list
994      Dim number As Integer
995      Dim foodSource As Range
996      number = Worksheets(1).Shapes("drpFood").ControlFormat.Value
997      Set foodSource = Worksheets(2).Range("C8").Offset(number, 0)
998
999      Worksheets(1).Range("B12").Value = foodSource.Value
1000     Worksheets(1).Range("C12:H12").Value = Range(foodSource.Offset(0,
1001         1), foodSource.Offset(0, 6)).Value
1002     Worksheets(1).Range("J12").Value = foodSource.Offset(0, 8).Value
1003 End Sub
1004
1005 Sub drpCategory_Fill()
1006     'Populate the category drop down list
1007     Dim n As Integer, i As Integer, cell As Range
1008     Worksheets(1).Shapes("drpCategory").ControlFormat.RemoveAllItems
1009
1010     Set cell = Worksheets(2).Range("C9")
1011     n = Range(cell, cell.End(xlDown)).Rows.Count
1012
1013     Set cell = Worksheets(2).Range("B9")
1014
1015     For i = 0 To (n - 1)
1016         If cell.Offset(i, 0).Value <> "" Then
1017             Worksheets(1).Shapes("drpCategory").ControlFormat.AddItem
1018                 cell.Offset(i, 0).Value
1019         End If
1020     Next
1021 End Sub
1022
1023 Sub drpCategory_Change()
1024     'Change drop down list for food name when category is changed
1025     Dim number As Integer, category As String
1026     number = Worksheets(1).Shapes("drpCategory").ControlFormat.Value
1027     category = Worksheets(1).Shapes("drpCategory").ControlFormat.List
1028         (number)
1029     Call drpName_Fill(category)
```

```
1028 End Sub
1029
1030 Sub drpName_Fill(category As String)
1031     'Populate the name drop down list
1032     Dim cell As Range
1033
1034     Worksheets(1).Shapes("drpName").ControlFormat.RemoveAllItems
1035
1036     Set cell = Worksheets(2).Range("B9")
1037     Do While cell.Value <> category
1038         Set cell = cell.Offset(1, 0)
1039     Loop
1040
1041     Do While (cell.Value = "" Or cell.Value = category) And cell.
        Offset(0, 1).Value <> ""
1042         Worksheets(1).Shapes("drpName").ControlFormat.AddItem cell.
            Offset(0, 1).Value
1043         Set cell = cell.Offset(1, 0)
1044     Loop
1045 End Sub
1046
1047 Sub drpName_Change()
1048     'Change food information when food name is changed
1049     Dim number As Integer, food As String
1050
1051     number = Worksheets(1).Shapes("drpName").ControlFormat.Value
1052     food = Worksheets(1).Shapes("drpName").ControlFormat.List(number)
1053
1054     Call compFill(food)
1055 End Sub
1056
1057 Sub compFill(foodName As String)
1058     'Fill in information for the chosen food name
1059     Dim xW As Double, xP As Double, xF As Double, xC As Double, xFi
        As Double, xA As Double, tf As Double
1060     Call foodProperties(foodName, xW, xP, xF, xC, xFi, xA, tf)
1061     Worksheets(1).Range("K10") = xW
1062     Worksheets(1).Range("K11") = xP
1063     Worksheets(1).Range("K12") = xF
1064     Worksheets(1).Range("K13") = xC
```



```

1065     Worksheets(1).Range("K14") = xFi
1066     Worksheets(1).Range("K15") = xA
1067     Worksheets(1).Range("K19") = tf
1068 End Sub
1069
1070 Sub drpShape_Fill()
1071     'Populate the shape drop down list
1072     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.RemoveAllItems
1073     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "Infinite_
        slab"
1074     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "Infinite_
        cylinder"
1075     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "Sphere"
1076     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "Squat_
        cylinder" 'Erstatt med bare sylindere?
1077     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "Short_
        cylinder" 'Erstatt med bare sylindere?
1078     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "Infinite_
        rod"
1079     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "
        Rectangular_brick"
1080     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "2D_
        irregular_shape"
1081     Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.AddItem "3D_
        irregular_shape"
1082 End Sub
1083
1084 Sub drpShape_Change()
1085     'Make changes when the chosen shape is changed
1086     Dim number As Integer ', shape As String
1087
1088     number = Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.Value
1089     'shape = Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.List(
        number)
1090
1091     Select Case number
1092         Case Is = 1
1093             Worksheets(1).Range("D17") = "Thickness"
1094             Worksheets(1).Range("D18") = ""
1095             Worksheets(1).Range("D19") = ""

```

```

1096     Case Is <= 3
1097         Worksheets(1).Range("D17") = "Diameter"
1098         Worksheets(1).Range("D18") = ""
1099         Worksheets(1).Range("D19") = ""
1100     Case Is <= 5
1101         Worksheets(1).Range("D17") = "Diameter"
1102         Worksheets(1).Range("D18") = "Length"
1103         Worksheets(1).Range("D19") = ""
1104     Case Is = 6
1105         Worksheets(1).Range("D17") = "Width_1"
1106         Worksheets(1).Range("D18") = "Width_2"
1107         Worksheets(1).Range("D19") = ""
1108     Case Else
1109         Worksheets(1).Range("D17") = "Width"
1110         Worksheets(1).Range("D18") = "Length"
1111         Worksheets(1).Range("D19") = "Height"
1112     End Select
1113 End Sub
1114
1115 Sub btnSave_Click()
1116     'Save the cooling data for a food item
1117     Dim name As String, category As String, shape As String
1118     Dim nameNumber As Integer, categoryNumber As Integer, shapeNumber
1119         As Integer
1120     Dim foodRange As Range
1121
1122     nameNumber = Worksheets(1).Shapes("drpName").ControlFormat.Value
1123     name = Worksheets(1).Shapes("drpName").ControlFormat.List(
1124         nameNumber)
1125
1126     categoryNumber = Worksheets(1).Shapes("drpCategory").
1127         ControlFormat.Value
1128     category = Worksheets(1).Shapes("drpCategory").ControlFormat.List
1129         (categoryNumber)
1130
1131     shapeNumber = Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.
1132         Value
1133     shape = Worksheets(1).Shapes("drpShape").ControlFormat.List(
1134         shapeNumber)

```

```
1130
1131     Set foodRange = Worksheets(3).Range("C9")
1132
1133     Do While foodRange.Value < name And foodRange.Value <> ""
1134         Set foodRange = foodRange.Offset(1, 0)
1135     Loop
1136
1137     Do While foodRange.Value = name And foodRange.Offset(0, 2).Value
        < shape
1138         Set foodRange = foodRange.Offset(1, 0)
1139     Loop
1140
1141     foodRange.EntireRow.Insert
1142     Set foodRange = foodRange.Offset(-1, 0)
1143
1144     foodRange.Value = name
1145     foodRange.Offset(0, 1) = category
1146     foodRange.Offset(0, 2) = shape
1147     Range(foodRange.Offset(0, 3), foodRange.Offset(0, 5)).Value =
        Worksheets(1).Range("E17:E19").Value
1148     Range(foodRange.Offset(0, 6), foodRange.Offset(0, 8)).Value =
        Worksheets(1).Range("E22:E24").Value
1149     Range(foodRange.Offset(0, 9), foodRange.Offset(0, 10)).Value =
        Worksheets(1).Range("E27:E28").Value
1150     foodRange.Offset(0, 11) = Worksheets(1).Range("E31").Value
1151     Range(foodRange.Offset(0, 12), foodRange.Offset(0, 13)).Value =
        Worksheets(1).Range("Q16:Q17").Value
1152     Range(foodRange.Offset(0, 14), foodRange.Offset(0, 16)).Value =
        Worksheets(1).Range("Q10:Q12").Value
1153     Range(foodRange.Offset(0, 17), foodRange.Offset(0, 19)).Value =
        Worksheets(1).Range("Q23:Q25").Value
1154
1155 End Sub
```