

Optimalisering av energibruk i frysetunneler - modellering

Jon Arve Urseth Engebakken

Master i energi og miljø

Oppgaven levert: Juni 2008

Hovedveileder: Trygve Magne Eikevik, EPT

Biveileder(e): Ola M Magnussen, SINTEF

Oppgavetekst

Bakgrunn

Norsk fiskeriindustri fryser inn store kvanta med fisk i de ulike sesonger. Disse anleggene er store med en typisk innfrysningsskapasitet på 400-600 tonn fisk i døgnet. Ved design av anleggene er det ofte ikke lagt vekt på energibruk, men kun på produksjonskapasitet. Etter innlasting av fisk, startes anlegget og kjøler ned og fryser fisken. Etter hvert som fisken kjøles ned reduseres varmemestrømmen fra fisken. Slike frystunneler har store vifter som sirkulerer den kalde luften over fisken. Disse viftene går normalt for full styrke selv om varmemestrømmen fra fisken reduseres. Derved utgjør viftens energi en større og større del av kuldeytelsen for frysetunnelen. For å kunne optimalisere energibruk for kompressor og vifter er det behov for å utvikle beregningsverktøy for frysetunneler. Det er på institutt og SINTEF avdeling under utvikling programvare for tørking av produkter i tørketunneler. Dette programmet kan lett videreutvikles for frysetunneler. Det skal gjennom denne oppgaven utvikles modeller med forenklinger for frysing av fiskeblokker.

Mål

Målsettingen med oppgaven er å utvikle modelleringsverktøy for frysetunneler.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Gjennomføre litteraturstudie for frysetunnelers energibruk, samt modellering av disse
2. Videreutvikle modell for produkt og luftfordeling i frysetunnel
3. Utarbeide modeller for frysetunnelens hovedkomponenter
4. Gjennomføre en optimalisering av energibruk ved styring av luftmengde kontra kompressorkapasitet
5. Utarbeide forslag til videre utvikling av modellen

" - "

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

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

Oppgaven gitt: 15. januar 2008


Hovedveileder: Trygve Magne Eikevik, EPT

FORORD

Denne rapporten har som formål å gi en innsikt i hva jeg har gjort i forbindelse med min avsluttende masteroppgave våren 2008 ved NTNU, Trondheim.

I starten av rapporten blir det sett på hva som innvirker på energibruken i en frysetunnel og hvordan frysetunneler er blitt modellert. Midtdelen som også er hoveddelen av rapporten, tar for seg datamodellering av et produkt som gjennomgår en innfrysingsprosess. I siste del av rapporten blir resultater fra simuleringer gjennomført med datamodellen sammenlignet med målinger ved Domstein Meløy.

Vil takke min veileder Trygve M. Eikevik for kommentarer og innspill underveis om hva som burde være med i modellen. Vil også takke Kristina Norne Widell for ideen med å lage en manual for simuleringsmodellen, og for måleresultater som modellen kunne sammenlignes med.


Jon Arve U. Engebakken

Trondheim juni 2008

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven har sett på hva som innvirker på en frysetunnels energibruk og hvordan frysetunneler fram til i dag er blitt modellert og hva som har vært hovedhensikten med modelleringen. Hovedtyngden av oppgaven har gått ut på å lage en datamodell av et produkt som fryses inn. Modellen har tatt høyde for de parameterne som innvirker på varmestrømmen fra produktet under innfrysningen, som lufthastighet og lufttemperatur rundt produktet, varmemotstand som følge av emballasje og de termodynamiske egenskaper for selve produktet. Til grunn for modellen er det blitt benyttet en implisitt numerisk modell hvor produktet ble delt opp i mindre kontrollvolum for beregning av de interne varmestrømmene. I forbindelse med datamodellen ble det laget et brukergrensesnitt i Excel.

Litteraturstudiet omkring energibruken i frysetunnelen, fant at det i hovedsak er viftene og kjøleanlegget i frysetunnelen som energibruken i hovedsak er knyttet til. Der det i kjøleanlegget er kompressorarbeidet som står for hovedtyngden av energibehovet. Dette kompressorarbeidet er direkte koblet opp mot den kuldeytelsen som anlegget må yte for at innfrysningen skal skje. Denne kuldeytelsen er lik varmelasten i frysetunnelen, som ble funnet til å bestå av varmestrømmen fra produktene, varme avgitt fra viftene, transmisjons og infiltrasjonstap, avriming av fordampere og nedkjøling av reolene som produktene er lastet på.

Resultater fra datamodellen for produktet ble sammenlignet med måleresultater fra Domstein Måløy. Sammenligningen viste at datamodellen brukte noe kortere tid på å fryse ned produktet slik at en bestemt temperatur midt i produktet ble nådd, enn hva målingene fra frysetunnelen på Måløy viste. Dette avviket kan ordnes med å legge inn en større varmemotstand på produktets overflate, eventuelt å korrigere formelen som ble brukt til å beregne varmeovergangstallet mellom produkt og luft.

Brukergravesnittet som ble laget i Excel tar for seg innlegging av parametere til simuleringsmodellen og kjøring av simuleringen. I tillegg er det mulig å hente ut forskjellige resultater fra simuleringen. Ved et videre arbeid med modellen bør grensesnittet systematiseres, slik det er nå er det til dels noe uoversiktlig med tanke på plassering av resultater.

SUMMARY

This Master thesis have seen on which factors that influence on the energy use in freezing tunnels, how those has been modelled and what the purpose whit the modelling was. The main focus in this thesis has been to make a computer model of a product which freezes to a temperature below the freezing point. The model has take into consideration of the variables which influence on the heat stream from the product in the freezing process, as airspeed, air temperature around the product, thermal resistance as a consequence of packaging and the thermal properties of the product. The computer model of the product is build on an implicit numeric model where the product is split up into smaller control volumes. In connection whit the computer model an user interface wash made in Excel.

The literature study about the energy consumption in a freezing tunnel, found that the fans and the refrigerator system in the freezing tunnel was the components that stands for most of the energy consumption. Where the compressor work is the main part of the power demands in the refrigerator system. The compressor work depends on the refrigeration load for the freezing tunnel. Where the refrigeration load includes the heat removed from the product, heat from the fans, transmission and infiltration load, defrosting of the evaporator and cooling of the product trolleys.

Result from the computer model was compared whit measuring results from Domstein Måløy. The comparison indicated that the computer model used shorter time to freeze the product to a fixed temperature, than the measuring result from Måløy showed. This difference can be adjusted by changing the heat resistance on the surface of the product, or by changing the formula for the convective heat transfer coefficient between the air and the product in the model.

In the user interface made in Excel it is possible to insert values for the different parameters used in the computer model and start the simulation. It is also possible to get result from the simulation. In future work whit the model, the user interface should be systematized. Today the interface is to difficult to follow consideration the placing of the result.

Innholdsfortegnelse

1 Innledning.....	1
2 Litteraturstudie.....	2
2.1 Energibruk i frysetunneler.....	2
2.2 Modellering av frysetunneler.....	5
3 Modellering.....	8
3.1 Teori.....	8
3.2 Programmering av produktmodell.....	11
3.3 Modellering av tunnel.....	18
3.4 Grensesnitt.....	19
4. Resultater.....	21
4.1 Resultater fra simuleringsmodellen.....	21
4.2 Måleresultater.....	22
5. Diskusjon.....	25
6. Konklusjon/videre arbeid.....	29
Referanseliste.....	30
Vedlegg	
A Brukermanual	
B Bakgrunnsdata Måløy	
C Termodynamiske egenskaper for torsk og makrell	

Notasjon

A	Areal [m ²]
C	varmekapasitet [J/K]
C _p	varmekapasitet [J/ kgK]
d	tykkelse
f_H	funksjon for entalpi
f_T	funksjon for temperatur
H	entalpi
h	konvektivt varmeovergangstall [W/m ² K]
k	konduktivitet varmeovergangstall [W/m K]
L	lengde
\dot{M}	massestrøm [kg/s]
Nu	Nusselt tall
Pr	Prandtl tall
\dot{Q}	Varmestrøm [W]
q''	varmefluks
R	varmemotstand [m ² °C / w]
Re	Reynolds tall
u	hastighet [m/s]
U	totalt varmegjennomgangstall

Greske bokstaver

ρ	tetthet [kg / m ³]
ΔH	entalpidifferanse
ΔT	temperaturdifferanse [°C]
$\Delta \tau$	tidskritt [s]
Δx	bredde på kontrollvolum
Δy	høyden på kontrollvolum
μ	viskositet
ν	kinetisk viskositet

Superskript

m	indeksring for tidsskritt
+	mellom to noder: i og i+1 eller j og j+1
-	mellom to noder: i og i-1 eller j og j-1
*	approsimert

Subskript

f	fluid
i	indeksring for noder i y-retning
j	indeksring for noder i x-retning
tot	total
x	i x-retning
y	i y-retning

1 Innledning

I forbindelse med foredling og produksjon av næringsmidler fra fiskeindustrien, blir mange av produktene frosset ned for å bevare kvaliteten og holdbarheten. Til dette brukes fryseanlegg som kan ta store kvanta på en gang, typisk 400-600 tonn. Ved utarbeidelse av disse anleggene er det i hovedsak blitt lagt vekt på kapasiteten, men i den senere tid har fokus også blitt rettet mot anleggenes energibruk. I starten av fryseprosessen etter at produktet er lastet inn og selve innfrysningen startes opp, er varmemstrømmen fra produktene den største varmelasten i frysetunnelen. For å få sirkulasjon på lufta i frysetunnelen er det satt inn vifter som også bidrar til varmelasten. Viftene går i hovedsak ved full styrke gjennom hele fryseprosessen, og etter hvert som produktene fryses ned avtar varmemstrømmen fra produktene og varmelasten fra viftene utgjør en stadig større del av varmelasten i tunnelen.

Ved å lage en datamodell av en frysetunnel vil det kunne være mulig å optimalisere energibruken ved fryseprosessen. Dette gjøres ved å se på viftehastigheten i forhold til kompressorarbeid. Fordelen med en datamodell framfor å kjøre fullskala forsøk, er at fullskala forsøk både er kostbare og kan føre til at produkter blir ødelagt.

I starten av denne oppgaven er det blitt sett på hva som bidrar til energibruken i en batch frysetunnel, hvordan tidligere modeller av frysetunneler er blitt modellert og hva som var formålet med disse modellene. Hovedtyngden av oppgaven er blitt viet utviklingen av en datamodell for et produkt som blir frosset inn, med tanke på å kunne ta hensyn til de forskjellige parameterne som vil innvirke på varmemstrømmen fra produktet under innfrysningen. Til å kontrollere modellen er den blitt sammenlignet med måleresultater fra Domstein Måløy. Det er ikke gått inn på hvordan andre komponenter i en frysetunnel skal modelleres, og det er således ikke vært mulig å kjøre simuleringer for optimalisering av energibruken i tunnelen. For å vise resultatene er det utarbeidet et brukergrensesnitt hvor de enkelte parameterne for simuleringen kan legges inn før simuleringen kjøres.

2 Litteraturstudie

Denne delen av oppgaven er delt inn i to. I første del tar for seg hva som bidrar til energibruken i en frysetunnel. Og i andre del blir sett på hvordan frysetunneler har blitt modellert.

2.1 Energibruk i frysetunneler

I denne litteraturstudien er det fokusert på energibruken i en batch frysetunnel hvor luftfrysing blir brukt til nedfrysing av produktet. Dette er en type fryseprosess av i alt fire fryseprosesser som blir brukt i frysetunneler. Sammen med kontaktfrysing, kryogenfrysing og kryomekanisk utgjør luftfrysing de fire ulike fryseprosessene for frysetunneler (INDUSTRIAL FOOD-FREEZING SYSTEMS, 2006). I tillegg til denne inndelingen kan frysetunnelene deles inn i batch (periodiske) og kontinuerlige frysetunneler.

En batch frysetunnel med luftfrysing består i hovedsak av et rom, en eller flere vifter og et fryseanlegg. Fryseprosessen starter med at rommet blir fylt med en gitt produktmengde. Når den angitte produktmengden har blitt lastet inn blir rommet stengt av og selve innfrysingen startes opp. Innfrysingen foregår ved at fryseanlegget, som består av en fordampner, en kompressor og en kondensator, senker temperaturen i rommet til under temperaturen i produktet. Denne temperaturforskjellen fører til en varmestrøm fra produktet til lufta slik at temperaturen i produktet senkes. For å øke varmeovergangen mellom lufta og produktet, og mellom lufta og fordampneren på fryseanlegget, brukes vifter til å sirkulere lufta i rommet. Fryseprosessen er ferdig når temperaturen i produktet har nådd en ønsket temperatur.

Studerer man fryseprosessen kan man se at prosessen i hovedsak blir tilført elektrisk effekt gjennom viftene og kompressoren (Harrison & Bishop, 1985). I tillegg til disse komponentene kan det bli tilført noe elektrisk effekt i forbindelse med avriming av fordampneren på kjøleanlegget.

Som nevnt er målsetningen med å ha en vifte i tunnelen er å sirkulere lufta i tunnelen slik at varmeovergangen mellom produktet og lufta, og mellom lufta og fordampneren økes. Luftsirkulasjonen reduserer også tiden det tar for den oppvarmede luften rundt produktet å komme seg fra produktet og bort til fordampneren som fjerner varmen fra tunnelen. Dette fører videre til at frysetiden reduseres. Da hastigheten på luften er en av de faktorene som øker varmeovergangstallet mellom fast stoff og fluid (Incropera & DeWitt, 2002), vil det i utgangspunktet være ønskelig med så stor hastighet som mulig. En annen ting som påvirker varmeovergangstallet mellom luft og produkt, er om produktet er innpakket. Hvis man også tar hensyn til at det i forbindelse med emballeringen ofte oppstår luftlommer mellom produktet og emballasjen, får man følgende uttrykk for den totale varmeovergangsmotstanden mellom produkt og luft

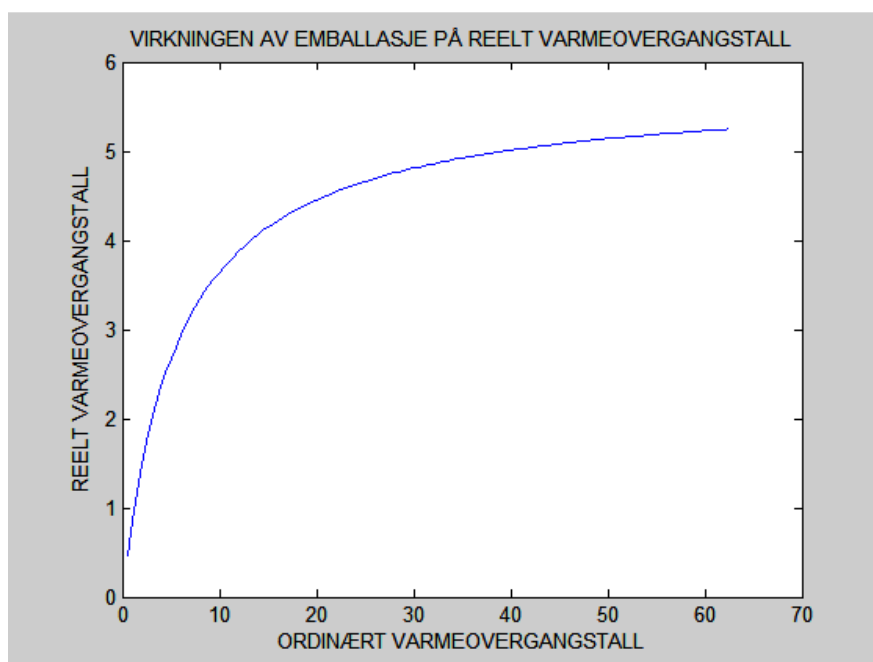
$$R_{tot} = \frac{1}{h} + \frac{d_{emballasje}}{k_{emballasje}} + \frac{d_{luft}}{k_{luft}}$$

Lig. 1

som videre gir følgende uttrykk for varmeovergangstall mellom luft og produkt

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{d_{emballasje}}{k_{emballasje}} + \frac{d_{luft}}{k_{luft}}} \quad \text{Fig. 2}$$

Tar man utgangspunkt i et normalt varmeovergangstall mellom produkt og luft i frysetunnel uten emballasje på $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ (Fellows, 2000). For så å pakke inn produktet med en plastfilm som utgjør $1,5 \text{ mm}$ og som i tillegg danner et luftlag rundt produktet på 3 mm , vil det virkelige varmeovergangstallet bli $4,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$. Det er da blitt brukt følgende verdier: $d_{plast}/k_{plast} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ (Magnussen & Nordtvedt, 2006), $d_{luft}/k_{luft} = 0,003\text{m} / 0,0223 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0,135 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ (der k_{luft} er tatt ved 250 K (Incropera & DeWitt, 2002)) og $1/h = 1/25 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$. Hvis man så øker lufthastighet slik at det opprinnelige varmeovergangstallet økes fra $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ til $40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, vil det endelige varmeovergangstallet bli $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, altså en økning på $7,5 \%$, mens økningen i utgangspunktet var på 60% . Når man tenker seg at denne økningen skulle vært framskaffet av viften, ser man at en forholdsvis stor økning i vifteeffekt gir en relativt lav økning av varmeovergangen fra produktet.



Figur 1 Sammenhengen mellom ordinært varmeovergangstall og reelt varmeovergangstall, når produktet er pakket inn.

En annen grunn til at viftene kan bruke mer effekt enn de i virkeligheten trenger, er hvis det er åpninger rundt produktreolene. ettersom den sirkulerte luften tar minste motstandsvei (Johnston, Nicholson, Roger, & Stroud, 1994), vil mye av luften gå utenom reolene hvis det er åpninger rundt produktreolene. Dette fører til at deler av vifteeffekten blir brukt til å sirkulere luft som ikke er med på å kjøle ned produktet. Så for at effekten som blir tilført viften skal bli brukt mest mulig effektivt, må det forhindres at luften får mulighet til å gå utenom produktene. I tillegg til at luften som sirkuleres i størst mulig grad skal passere produktene, bør hastighetsfeltet til luften være så uniformt som mulig forbi produktene. Dette for at innfrysningen av produktene skal være så lik som mulig i hele tunnelen. Hvis det er

store hastighetsforskjeller i tunnelen vil produktene som ligger i høyhastighetssonene oppnå den ønskede temperaturen tidligere enn de som ligger i lavhastighetsfelt. Noe som fører til at viftene sirkulerer mer luften enn det som trengs på slutten av innfrysningen, ettersom de nedfrosne produktene ikke trenger noen luftsirkulasjon lengre. Under et forsøk (Kolbe, Ling, & Wheeler, 2004) hvor sardinkasser à 11 kg ble brukt som produkt, ble maksimal frysetid redusert med ca. 2 timer fra 12,6 timer til 10,5 timer ved å sperre for omluft og ved å optimalisere strømningsfeltet i frysetunnelen. Total energireduksjon for fryseprosessen ble beregnet til 12 %.

Viftenes overforbruk av effekt, øker i tillegg arbeidet til fryseanlegget da viften avgir varme som fryseanlegget må fjerne igjen. I starten utgjør den tilleggsvarmen en liten del av varmelasten til fryseanlegget, men mot slutten når varmestrømmen fra produktene avtar, vil varmeeffekten fra viftene utgjøre en vesentlig del av varmelasten til fryseanlegget. Varmelasten fra viften vil for en effektiv frysetunnel utgjøre 25 – 30 % av den totale varmelasten. Til sammenligning vil varmelasten fra viftene i en lite effektiv frysetunnel være større enn varmelasten fra produktene (Johnston, Nicholson, Roger, & Stroud, 1994). I forsøket til Kolbe, Ling & Wheeler i 2004, ble det også gjort forsøk for å optimalisere viftebruken ved å innføre Variable Frequency Drive, VFD, for styring av viftene. Ved å styre viftene slik at de først fikk maks fart etter 45 min, og for så å redusere hastigheten til 75 % etter 3,5 time, økte de den maksimale frysetiden med 8 %. Til tross for en forlenget frysetid reduserte de det totale energiforbruket med 11 % målt i forhold til energibruken etter optimaliseringen av strømningsfeltet. Målt i forhold til energiforbruket før optimaliseringen, var reduksjonen på 22 %, mens frysetiden var redusert med 1 time.

Kompressorarbeidet er avhengig av varmelasten til fryseanlegg i tillegg til temperaturløftet det må arbeide mot. Temperaturløftet er i starten av fryseprosessen relativt lite, men ettersom temperaturen i tunnelen senkes blir temperaturløftet større. Med en omgivelsestemperatur på 15 °C og en tunneltemperatur på -35 °C, blir temperaturløftet som kompressoren må utføre på 60 °C. Da er det lagt til at temperaturen i henholdsvis fordamperen og kondensatoren må ligge 5 °C under tunneltemperaturen og 5 °C over omgivelsestemperaturen for at det skal skje en varmeoverføring. Varmelasten til fryseanlegget består som nevnt av varme fra produktene og viftene, i tillegg består varmelasten av varme som kommer inn i tunnelen i form av transmisjonstap og infiltrasjonstap, nedkjøling av reoler, varme fra avrimingsprosessen og annet teknisk utstyr. Varmelasten i forbindelse med avrimingen oppstår når fuktighet i lufta har rimt fast til fordamperen og skal tines vekk. Etter hvert som fuktig luft kondenserer og rimer på fordamperen, reduseres varmeovergangen i fordamperen. Til slutt blir dette rimlaget så tykt at det må tines av for at varmevekslingen skal foregå innenfor ønskede rammer. For å fjerne rimlaget stopper fryseprosessen opp og det blir tilført varme slik at rimlaget smelter av.

Transmisjonstapet til tunnelen er lineært avhengig av temperaturforskjellen mellom omgivelsesluften og lufta i tunnelen. I starten av fryseprosessen har lufta i tunnelen og omgivelseslufta omtrent samme temperatur, men etter hvert som temperaturen i tunnelen senkes øker temperaturforskjellen og dermed transmisjonstapet. Da temperaturreduksjonen i tunnelen i hovedsak foregår i starten og det deretter blir tilnærmet konstant temperatur, blir også transmisjonstapet tilnærmet konstant i store deler av prosessen. I ASHRAE Handbook –

Refrigeration (REFRIGERATED-FACILITY DESIGN, 2006) er det for en frysetunnel med operativ tunneltemperatur på $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ anbefalt at veggene skal ha en varmemotstand på 7,9 til $8,8\text{ m}^2\text{K/W}$ og $8,8$ til $10,6\text{ m}^2\text{K/W}$ i taket. For en slik tunnel med omgivelsestemperatur på $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, vil varmestrømmen gjennom veggen være:

$$q'' = \Delta T \cdot U = \Delta T \cdot \frac{1}{R} = \frac{(15 - (-35))\text{ }^{\circ}\text{C}}{8,4\text{ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C/W}} = 5,95\text{ W/m}^2 \quad \text{Fig. 3}$$

I ENØK i kuldeanlegg (Magnussen & Nordtvedt, 2006) er det i en beregning for energibruken av en frysetunnel med lastekapasitet på 100 tonn, kommet til et energibehov på $0,106\text{ kWh/kg}$ frosset vare. Samlet energibehov ble da beregnet til $10\text{ }000\text{ kWh}$ når frysetiden var 17 timer.

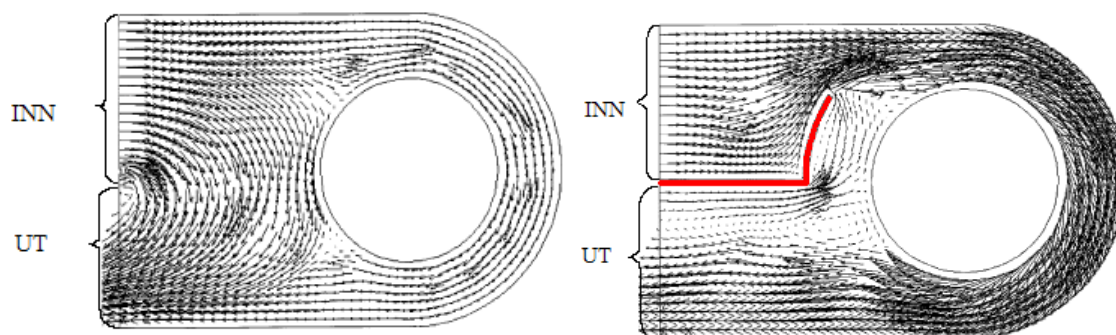
2.2 Modellering av frysetunneler

For å se på hvilke parametere som virket inn på energibruken i en frysetunnel modellerte Harrison og Bishop i 1985 en frysetunnel. For å verifisere modellen brukte de målinger fra en frysetunnel brukt til innfrysing av produkter fra sitrusfrukter. Produktet de brukte i modellen var bokser med juicekonsentrat. I modellen ble produktet modellert ved hjelp av en numerisk finite-difference metode. Gjennomsnittshastigheter, vifteeffekt og luftåpninger ble basert på målinger gjennomført i frysetunnelen. Videre ble kompressoreffekten beregnet ut fra varmebalansen til frysetunnelen, og varmeovergangstallet ble beregnet ut fra en formel for Nu tallet. Ut fra modellen fant de ut at det var mest lønnsomt med en så lav temperatur som mulig i frysetunnelen, samt at Nu tallet var så lite som mulig. Dette førte til at den optimale frysetiden ble tilnærmet lik den frysetiden som trengtes for at kvaliteten på produktet skulle ligge innen for de stilte kravene.

For å optimalisere de årlige kostnadene for en semi-batch tunnel, lagde Kiranoudis og Markatos (1999) en datamodell for å simulere hva ulike parametere hadde å si for kostnadene. Modellen ble bygget opp av matematiske modeller for de forskjellige komponentene. Blant komponentene som ble modellert var varmevekslerne i fryseanlegget (fordamper og kodensator), effekt til kompressoren i fryseanlegget, vifteeffekt i forbindelse med sirkulasjon av luften og interne varmestrømmer i produktet som i dette tilfellet var kjøttstykker. Parameterne som ble variert for optimaliseringen var antall reoler med varer i tunnelen, temperaturen i tunnelen og sirkulert luftmengde under innfrysingen, temperaturene i varmevekslerne til fryseanlegget og totalt antall tunneler.

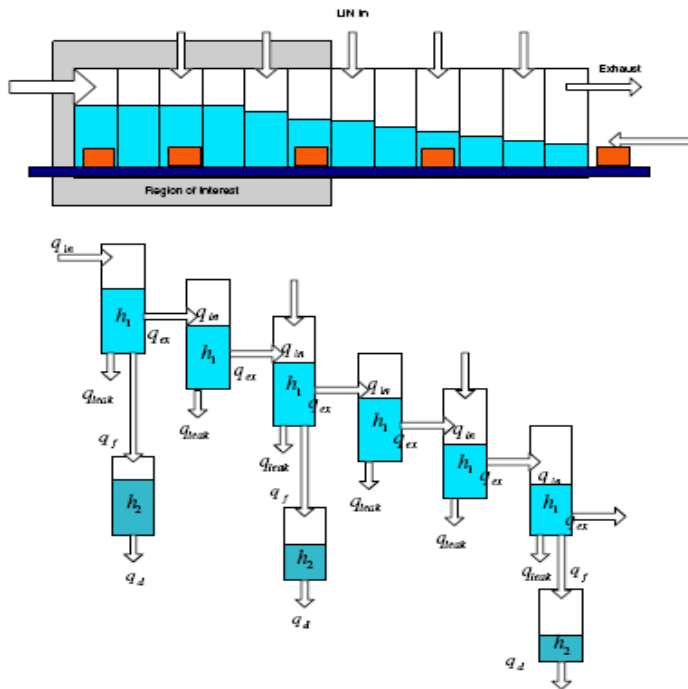
I 2003 lagde Huan, Ma og He (2003) en datamodell av en spiralfryser for å kunne optimalisere luftstrømmene i denne typen frysere. De så på hvordan strømningsmønsteret i tunnelen endret seg ved å legge inn forskjellige luftskjermer for luftstrømmen inn på produktspiralen. Til å modellere brukte de en numerisk analysemetode hvor kontrollvolum metoden ble benyttet sammen med et kryssoppdelingsskjema. For å løse den iterative regneprosessen ble SLOR-metoden benyttet, og for å løse ligningssettet ble SIMPLE algoritmen av S. V. Patankar og D. B. Spalding brukt. Samtidig ble k - ε -modellen inkludert for å modellere turbulensen i tunnelen. Til kontroll av modellen, foretok de målinger i en testrigg

der produktet som ble brukte var pakker av bønnemasse på 400 g. Gjennom simuleringene kunne de øke lufthastigheten i frysesonen i tunnelen 2,5 -2,7 ganger ved å lede luftstrømmen i ønsket retningen uten at de måtte øke vifteeffekten. Frysetiden for produktet ble da ved en temperatur på $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ redusert til 74,3 min fra en opprinnelig frysetid på 88 min. Noe som tilsvarer en reduksjon på 15,6 %. Tilsvarende reduksjon for en temperatur på $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ var på 21,7 %, der frysetiden gikk ned fra 86 min til 67,3 min. Dette ga en teoretisk økning i energieffektiviteten på 18-28 %, mens den praktiske reduksjonen ble antatt å være noe mindre.



Figur 2 Bilde til venstre: luftstrøm i spiralfryseren før luftskjerming var lagt inn, til høyre: luftstrøm etter at luftskjerming er lagt inn. (Huan, Ma, & He, 2003)

For å optimalisere lengden av en kryogenisk frysetunnel og se på temperaturfeltet i denne basert på en gitt produktstrøm og varmelast, lagde Shaikh og Prabhu (2007) en modell av en kryogenisk frysetunnel. Til å modellere tunnelen valgte de en tankmodell der tunnelen ble delt inn i 40 soner, der hver sone ble beskrevet som en tank der innholdet i tanken var den gjenværende kjølekapasiteten til kryogenet. Den gjenværende kjølekapasiteten ble funnet ved å kjøre en varmelast for sonen hvor varmelasten ble basert på entalpistrømmer inn og ut av sonen. En av varmestømmene i sonen var varmestømmen fra produktet. Til å modellere fryseprosessen i produktet ble Phams ligninger benyttet for produktet sammen med temperaturfeltet i tunnelen. Ved å kjøre en iterativprosess for sonen produktet befant seg i ble varmelasten for sonen funnet. Etter at prosessen konvergente i en sone ble produktet sendt videre til neste sone. Når temperaturen i produktet fikk den ønskede temperaturen, hadde produktet gått langt nok og ønsket tunnallengde var funnet. Til sammenligning av tunnallengden som funnet i datamodellen, ble Planks ligning, Nagaoka modell og Phams modell brukt til å finne tunnallengden. Det viste seg at Planks ligning ga at produktet oppnådde den ønskede temperaturen etter 70 % av tunnallengden som ble funnet i datamodellen, mens Nagaokas modell og Phams modell ga den ønskede produkttemperaturen etter henholdsvis 80 % og 85 % av tunnallengden funnet i datamodellen. Det vil si at hvis disse modellene hadde blitt brukt for estimere tunnallengde som trengtes for produktet, ville produktet ikke fått den temperaturen det skulle ha når det kom ut av tunnelen.



Figur 3 Skisse av tankegangen ved tankmodellen. (Shaikh & Prabhu, 2007)

Det er blitt utviklet få datamodeller som simulerer dynamikken i en frysetunnel med tanke på varmelasten og energibruken. De modellene som er utviklet har normalt fått inn disse prosessene som en del av optimaliseringen av andre aspekter ved en frysetunnel, som de økonomiske og produksjonsrate.

3 Modellering

Denne delen av oppgaven er delt inn i 4 deler. Den første tar for seg teori omkring hvordan produktet kan bli modellert. Den andre delen tar for seg hvordan selve programmeringen av modellen for produktet er blitt gjennomført. Den tredje går inn på modelleringen av selve tunnelen. Den fjerde og siste tar for seg grensesnittet for simuleringmodellen og koblingen mellom grensesnittet og modellen.

3.1 Teori

Produktmodellen som ble utarbeidet i Modellering av energibruk i frysetunneler (Engebakken, 2007) ble vurdert så dårlig at en ny produktmodell måtte utarbeides. For å finne en god modell for beregningen av varmestrømmen ut av produktet ble det sett på om det fantes noen numeriske modeller som var utviklet for beregning av forløpet til varmestrømmene i et produkt som blir frosset ned slik at det blir en faseovergang mellom væske og fast stoff. Hovedproblemet med beregning av varmetransporten fra et produkt som blir frosset, er hvordan man skal ta hensyn til den latente varmen som produktet avgir i faseovergangen. I tillegg er det en rask endring av de termodynamiske egenskapene til produktet rundt frysepunktet. Det var også ønskelig at modellen hadde behov for få beregninger og iterasjoner for å komme fram til svaret, slik at simuleringstiden ble så rask som mulig.

I en oversikt over forskjellige modeller for beregning av varme- og massetransport (Pham, Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review, 2006), ble det funnet en implisitt metode (Pham, A fast, unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change, 1985) for å beregne varmetransporten ut av et produkt som ble frosset ned. Fordelen med å bruke en implisitt metode er at den ikke trenger iterasjoner for å komme fram til et svar for et gitt tidspunkt, noe som trengs for en eksplisitt metode. Dette fører til at beregningene er raske å gjennomføre, i motsetning til eksplisitte metoder der det går med mye tid til å kjøre iterasjoner for det enkelte tidsskrittet for å få et godt svar. Metoden som Pham utviklet var for en endimensjonal varmeledning. For å kunne simulere varmestrømmen fra produktmodellen mer reell, ble det sett på metoder for å kunne utvide modellen til også å gjelde for todimensjonale beregninger. Det ble funnet en numerisk implisitt metode som Bonacina og Comini hadde utviklet i 1973 for en todimensjonal varmeberregning som metoden til Pham kunne settes inn i. Denne modellen ga følgende ligningssett som måtte løses:

$$\begin{aligned}
& -\frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta x^2} k_x^- T_{ij-1}^{(m+1)*} + \left[1 + \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta x^2} (k_x^+ + k_x^-) \right] T_{ij}^{(m+1)*} - \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta x^2} k_x^+ T_{ij+1}^{(m+1)*} \\
& = \left\{ \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta x^2} [k_x^+ (T_{ij+1}^m - T_{ij}^m) - k_x^- (T_{ij}^m - T_{ij-1}^m)] \right. \\
& \quad \left. + \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta y^2} [k_y^+ (T_{i+1,j}^m - T_{ij}^m) - k_y^- (T_{ij}^m - T_{i-1,j}^m)] \right\} \\
& \quad + \left\{ T_{ij}^{m-1} + \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta x^2} [k_x^+ (T_{ij+1}^{m-1} - T_{ij}^{m-1}) - k_x^- (T_{ij}^{m-1} - T_{ij-1}^{m-1})] \right. \\
& \quad \left. + \frac{4}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta y^2} [k_y^+ (T_{i+1,j}^{m-1} - T_{ij}^{m-1}) - k_y^- (T_{ij}^{m-1} - T_{i-1,j}^{m-1})] \right\}
\end{aligned}$$

Fig. 4

og:

$$\begin{aligned}
& -\frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta y^2} k_y^- T_{i-1,j}^{m+1} + \left[1 + \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta y^2} (k_y^+ + k_y^-) \right] T_{ij}^{m+1} - \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta y^2} k_y^+ T_{i+1,j}^{m+1} \\
& = T_{ij}^{(m+1)*} - \frac{2}{3} \frac{\Delta\tau}{C\Delta y^2} [k_y^+ (T_{i+1,j}^{m-1} - T_{ij}^{m-1}) - k_y^- (T_{ij}^{m-1} - T_{i-1,j}^{m-1})]
\end{aligned}$$

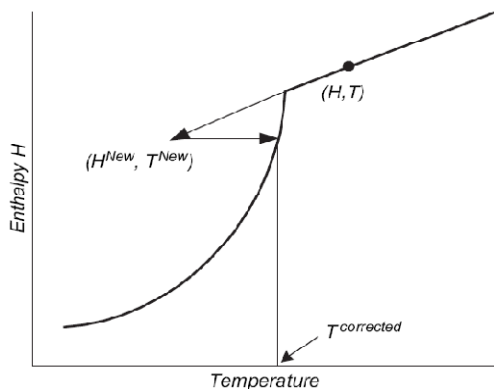
Fig. 5

Ligningssettet løses ved først å bruke ligning 1 til å beregne temperatuere i nodene radvis ved hjelp av tridiagonal matrise algoritmen, TDMA. For så å løse ligning 2 ved hjelp av TDMA til å beregne temperatuere for hver kolonne med noder.

Til å håndtere den latente varme som frigis ved faseovergangen benytter modellen til Pham et temperaturkorrigeringsledd for de temperatuere som blir funnet for hvert enkelt tidskritt ved hjelp av den implisitte metoden. Denne korrigeringen ble foretatt med følgende ligning:

$$T_{ij}^{m+1}(\text{korrigert}) = f_T [f_H(T_{ij}^{m-1}) + C_{ij}^m (T_{ij}^{m+1} - T_{ij}^{m-1})] \quad \text{Fig. 6}$$

Der f_T er en funksjon for temperaturen basert på entalpiverdier, og f_H er en funksjon for entalpien basert på temperaturverdier. I Figur 4 er framgangsmetoden for å finne den nye temperaturen skissert.



Figur 4 Grafisk framvisning av temperaturkorrigering. (Pham, Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review, 2006)

Videre bruker modellen en eksplisitt metode for å ta hånd om den varierende varmekapasiteten $C_{i,j}^m$:

$$C_{i,j}^m = \frac{\Delta H^*}{T_{i,j}^* - T_{i,j}^m} \quad \text{Fig. 7}$$

Der ΔH^* ble uttrykt:

$$\Delta H^* = \frac{2\Delta t}{(\Delta y)^2} [k_y^+(T_{i+1,j}^{m+1} - T_{i,j}^{m+1}) + k_y^-(T_{i-1,j}^{m+1} - T_{i,j}^{m+1})] + \frac{2\Delta t}{(\Delta x)^2} [k_x^+(T_{i,j+1}^{m+1} - T_{i,j}^{m+1}) + k_x^-(T_{i,j-1}^{m+1} - T_{i,j}^{m+1})] \quad \text{Fig. 8}$$

og T^* ble uttrykt:

$$T^* = f_T [f_H (T_{i,j}^{m-1}) + \Delta H^*] \quad \text{Fig. 9}$$

Videre uttrykkes:

$$k_x^+ \approx k \left(T_{i,j+\frac{1}{2}}^m \right) \cong k \left(\frac{T_{i,j+1}^m + T_{i,j}^m}{2} \right) \quad \text{Fig. 10}$$

$$k_x^- \approx k \left(T_{i,j-\frac{1}{2}}^m \right) \cong k \left(\frac{T_{i,j}^m + T_{i,j-1}^m}{2} \right) \quad \text{Fig. 11}$$

$$k_y^+ \approx k \left(T_{i+\frac{1}{2},j}^m \right) \cong k \left(\frac{T_{i+1,j}^m + T_{i,j}^m}{2} \right) \quad \text{Fig. 12}$$

$$k_y^- \approx k \left(T_{i-\frac{1}{2},j}^m \right) \cong k \left(\frac{T_{i,j}^m + T_{i-1,j}^m}{2} \right) \quad \text{Fig. 13}$$

På grensene kan k_x og k_y uttrykkes:

$$k_x = h * \Delta x \quad \text{Fig. 14}$$

$$k_y = h * \Delta y \quad \text{Fig. 15}$$

Hvor h er det konvekktive varmeovergangstallet mellom produktoverflaten og luften rundt produktet.

Varmestrømmen ut fra produktet ved et gitt tidsskritt beregnes ved å summere varmemstrømmen mellom hvert enkelt kontrollvolum langs overflaten på produktet og luften. Mens den samlede varmemstrøm fra produktet gjennom fryseprosessen finnes ved å integrere samlet varmemstrøm fra produktet for et tidsskritt, over alle tidsskrittene.

Det gjennomsnittlige varmeovergangstallet mellom produkt og luft kan beregnes som følger (Incropera & DeWitt, 2002):

$$\bar{h} = \frac{k_f \bar{Nu}}{L} \quad \text{Fig. 16}$$

Der k_f er konduktiviteten til det omkring liggende fluidet, Nu er Nusselt tallet som er en funksjon av Prandtl's tall og Reynolds tallet og L er lengden på overflaten som varmeovergangen foregår over.

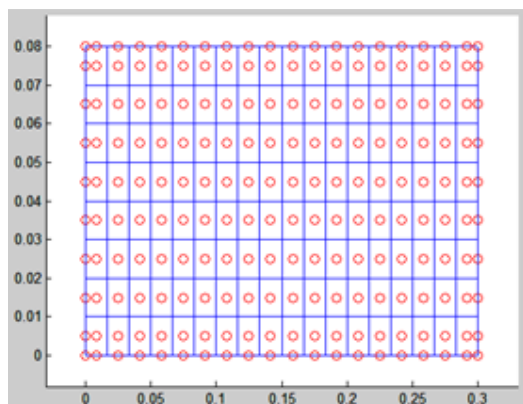
For produkt som er emballert vil varmeovergangen bli redusert som følge av at emballasjen vil fungere som isolasjon. Det reelle varmeovergangstallet ved et slikt tilfelle kan beregnes med følgende ligning:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h} + R_{emballasje}} \quad \text{Lig. 17}$$

der $R_{emballasje}$ er varmemotstanden for emballasjen i m^2K/W .

3.2 Programmering av produktmodell

Til å programmere produktmodellen ble programmet Emacs, som benytter programmeringsspråket C, benyttet. Programmeringen begynte med å lage rutiner for å dele produktet opp i mindre kontrollvolum etter ønsket antall noder i høyden og bredden av produktet. Rutinen ble laget slik at antall kontrollvolum er to mindre enn antall noder som blir angitt i den aktuelle retningen, dette fordi det blir plassert en node på overflaten av produktet på begge sider som ikke har noe kontrollvolum. Rutinene beregnet blant annet kontrollvolumenes senterplassering og flatestørrelser. Det ble benyttet uniformt nettverk i rutinene, slik at alle kontrollvolumene ble like store og for at rutinen ikke skulle bli for kompleks.



Figur 5 Plassering av noder og kontrollvolum i produktet.

Videre ble rutiner for beregning av konduktive og konvekktive varmovergangstall laget. I starten ble disse verdiene satt til en fast verdi, konduktivitet $0,5 \text{ W/mK}$ og konvektivitet $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, dette for å se om modellen ville fungere noenlunde før den ble belastet med for mange variable. Så ble ligning 4 og 5, som er selve kjerne i beregningen av varmestrømmen ut av produktet, lagt inn i en rutine. Samtidig med at rutinen for ligning 4 og 5 ble lagt inn ble det laget rutiner for beregning av ligning 8 og 9 slik at $C_{i,j}^m$ i ligning 7 kunne beregnes. Til

rutinene for ligning 8 og 9 trengtes funksjoner for beregning av f_H og f_T . Disse ble laget med bakgrunn i tabellverdier generert i et Excel-ark som brukte formler fra ASHREE til å beregne forskjellige termodynamiske egenskaper for matvarer basert på innholdet av proteiner, fett, vann, osv. I dette tilfellet ble torsk brukt som produkt. Tabellverdiene ble plottet i Matlab, før det ble gjennomført en kurvetilpasning slik at kurvene kunne framstilles ved hjelp av en ligning som kun var avhengig av en variabel. I første omgang ble det laget kurvetilpasning for entalpien til produktet, slik at entalpien kunne bestemmes ut fra en gitt temperatur og motsatt, slik at temperaturen kunne finnes fra en gitt entalpiverdi. Funksjonene ble også brukt i forbindelse med temperaturkorrigeringen, som ble foretatt for hvert enkelt kontrollvolum etter at ligning 4 og 5 var løst med TDMA.

For å teste modellen ble det laget et enkelt testprogram som anga parametere og startverdier for modellen. Følgende parametere og startverdier ble benyttet:

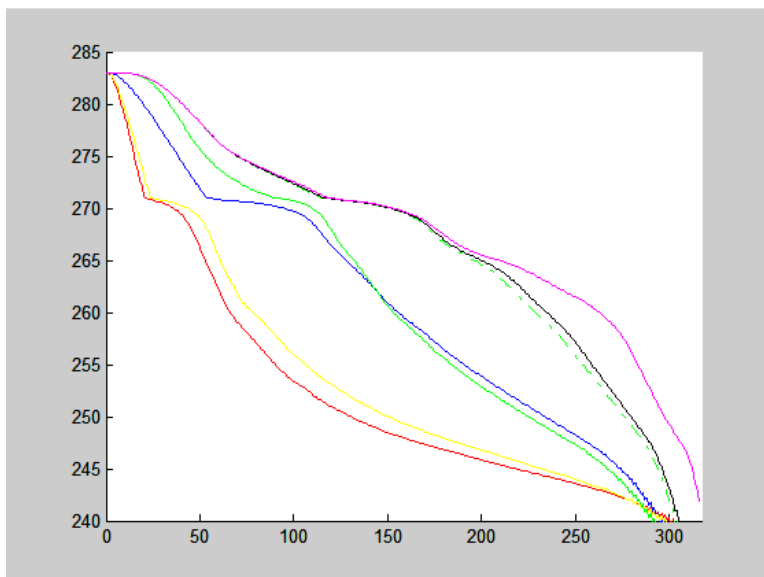
Produktets lengde:	0,5 m
Produktets bredde:	0,3 m
Produktets høyde:	0,08 m
Produkt tetthet:	1010kg/m ³
Starttemperatur på produktet:	283 K
Tunneltemperatur:	243 K
Antall noder i høyden:	13
Antall noder i bredden:	20
Tidsskritt:	4 s

I tillegg produserte testprogrammet resultatfiler over temperaturforløpet i produktet. Blant annet var det en fil som inneholdt temperaturen for alle nodene for alle tidsskrittene, og en fil som inneholdt temperaturene for hvert tidsskritt for noen av nodene. Den første resultatfilen ble lastet opp i et matlab-skript som lagde en animasjon av endringen av temperaturen i produktet som følge av tiden. Dette for lettere å se forløpet til innfrysningen i produktet. Mens den andre var grunnlag for grafer som viste temperaturen i noen noder som følge av tiden.

Steg \node	2,2	2,7	7,2	7,7
0	283.000	283.000	283.000	283.000
1	283.000	283.000	283.000	283.000
2	270.280	270.258	280.936	281.773
3	266.205	266.232	280.625	281.313
4	260.880	258.871	277.435	278.763
5	256.430	255.093	278.024	279.144
6	250.911	257.358	274.887	275.988
7	263.910	261.092	275.063	276.398
8	253.630	256.395	272.967	274.088
9	254.497	256.254	272.413	275.148
10	257.258	253.143	271.946	270.947
11	255.879	256.110	272.999	274.650
12	254.455	254.669	270.813	272.057
13	250.679	253.791	271.537	270.945
14	255.882	253.624	270.904	272.570

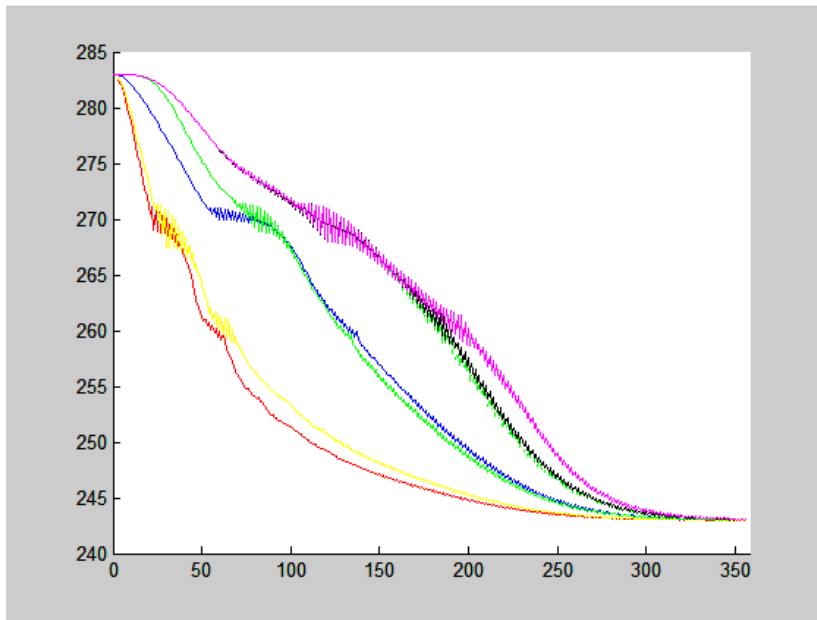
Tabell 1 Oversikt over temperaturforløpet til noen av nodene etter de første 14 tidsskrittene.

Som man kan se av tallene i tabell 1 så oscillerte temperaturene i nodene. Denne oscillasjonen økte etter hvert slik at simuleringen ikke ble fullført. Noe av årsaken til denne oscillasjonen viste seg å stamme fra at tunneltemperaturen i de to tidskrittene før selve simuleringen startet ble satt til 243 K og ikke lik begynnelsestemperaturen til produktet på 283 K. Etter at tunneltemperaturen ble satt lik produkttemperaturen for de to tidskrittene før selve starten av simuleringen ble oscillasjonene i simuleringen borte.



Figur 6 Temperaturforløpet for noen av nodene i produktet.

Når nye grafer over temperaturforløpet nå ble skissert, se Figur 6, dukket det opp et nytt problem opp. Som man kan se av grafen så flater ikke temperaturen for de enkelte nodene ut mot temperaturen som var satt for luften i tunnelen. I stedet så stuper temperaturene i de enkelte nodene på slutten av simuleringen. I et forsøk på finne ut hva som forårsaket dette, ble temperaturkorrigeringen som ble benyttet kuttet ut. Kurvene som nå dukket opp for temperaturforløpet i nodene, flatet ut som de skulle mot den gitte tunneltemperaturen. Men som en bivirkning, som man kan se i Figur 7, så dukket det opp nye svingninger i temperaturforløpet.



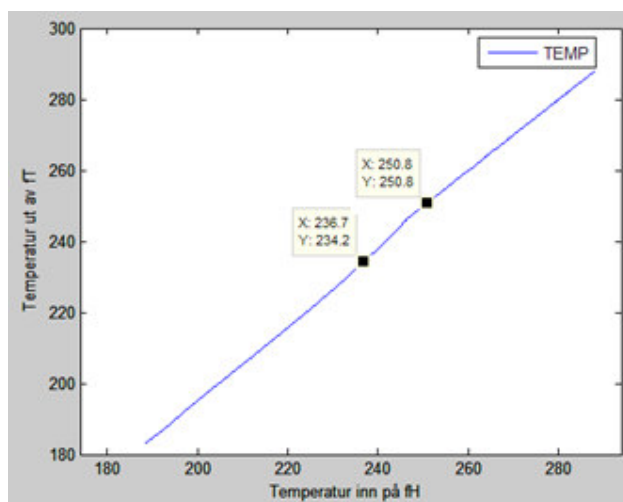
Figur 7 Temperturforløp for noen noder, når ikke temperaturkorrigering er benyttet.

Dette viste at i tillegg til å håndtere den raske endringen i entalpi ved faseovergangen, så fjernet temperaturkorrigeringen oscillasjoner i beregningene. Som et ledd i undersøkelsen med å finne ut av hva som var årsaken til at temperaturen i modellen med temperaturkorrigeringen ikke flatet ut, ble varmestrømmen fra produktet i de to modellene sammenlignet med varmestrømmen fra produktet basert på entalpidifferanser for produktet mellom starttemperaturen og tunneltemperaturen. Varmestrømmen ut fra produktet ved et tidskritt ble beregnet ved å summere varmestrømmen mellom kontrollvolumene og luften i tunnelen. For å få den totale varmestrømmen fra produktet ble varmestrømmene for alle tidskrittene summert. Til å begynne med i disse testene ble det benyttet 10 noder i høyden og 50 i bredden i produktet. Testen viste at modellen uten temperaturkorrigering ga en samlet varmestrøm fra produktet som var 3,4 % større enn varmestrømmen basert på entalpidifferanser, mens modellen med temperaturkorrigering ga en varmestrøm som var ca 28 % større. Og da hadde produktet på slutten av simuleringen avgitt varme til omgivelsene ettersom temperaturen på overflaten var lavere enn temperaturen i tunnelen. Etter denne innledende testen ble det gjennomført flere tester der antallet noder i høyden og bredden ble endret på. Resultatene av disse testene viste at varmestrømmen fra produktet varierte kraftig ut fra antall noder som ble benyttet.

Etter disse resultatene ble hele programmeringen gått gjennom etter mulig feil. I denne gjennomgangen ble det avdekket at grensebetingelsene for produktet var satt inn feil. Formlene for k_x og k_y på grensen var endret i forhold til det som sto i ligningene. I programmeringen var følgende ligninger brukt for varmeovergangstallet på overflaten til produktet: $k_x = \Delta y * h$ og $k_y = \Delta x * h$ i stedet for $k_x = \Delta x * h$ og $k_y = \Delta y * h$.

Denne rettelser førte til at den simulerte varmestrømmen ut av produktet ble mer lik den som baserte seg på entalpidifferanser. Samtidig med at resultatene ble mer stabil med hensyn på

valget av antallet noder. Men fortsatt flatet ikke temperaturen i produktet ut mot temperaturen i tunnelen når temperaturkorrigering ble brukt i modellen. Dette førte til at kurvetilpasningen og tilhørende funksjoner for entalpien til produktet, f_T og f_H , ble kontrollert. Da disse funksjonene er innvers av hverandre, ble kontrollen gjennomført ved å sette inn forskjellige temperaturer inn i f_H . Entalpiverdien som man da fikk ut ble så satt inn i f_T . I teorien skulle temperaturen som en da får ut være den samme som man satte inn i f_H . Det viste seg at når den innsatte temperaturen ble lavere enn 246.6 K, ble temperaturen som kom ut lavere enn den innsatte. Slik at når temperaturen skulle korrigeres ble den satt til en lavere verdi enn det den egentlig skulle være, noe som førte til at temperaturen i produktet i stedet for å flate ut, sank kraftig på slutten av simuleringen. Etter denne oppdagelsen ble alle funksjonene som var basert på kurvetilpasning kontrollert for avvik og korrigerert.



Figur 8 Temperatur ut i forhold til temperatur inn ved kontroll av f_T og f_H

Under feilsøkingen ble det i tillegg kjørt en kurvetilpasning for å lage en funksjon for CP-verdier basert på temperaturverdier. Dette for å se om feilen kunne ligge i approksimasjonen av varmekapasiteten $C_{i,j}^m$ i ligning 7. Denne funksjonen ble beholdt slik at beregningen av $C_{i,j}^m$ foregikk med funksjonen fra kurvetilpasningen og ikke med approksimasjonen ut fra tidligere verdier som den opprinnelige modellen gjorde.

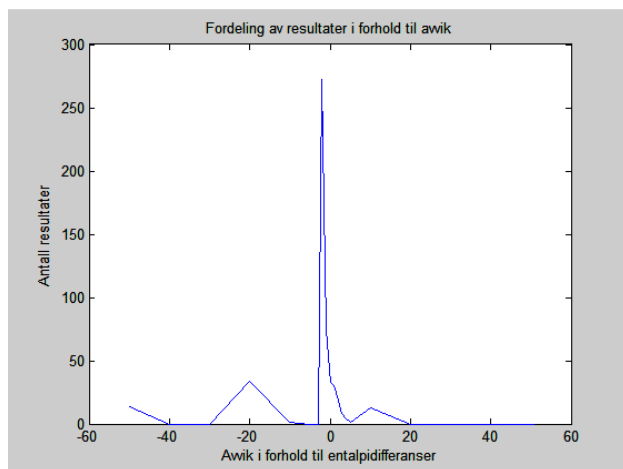
Etter disse feilrettingene og korrigeringsene ble modellen stabil. Videre ble det nå laget en rutine som varierte skrittlengden på tidsskrittene. Rutinen ble lagd slik at det første tidsskrittet i simuleringen ble 1 sek, men det andre ble 2 sek, det tredje 3 sek osv til tidsskrittene ble 350 sek lange. Etter at denne tidsskritt lengden nåes, holdes resten av tidsskrittene på den samme lengden, altså 350 sek. Grunnen til at det ble lagd en rutine for varierende tidsskritt lengde var for å redusere simuleringstiden. Og ettersom temperaturgradientene er størst i starten ble det valg små tidsskritt i starten og større tidsskritt etter hvert som temperaturgradientene blir mindre. Det ble også på samme tidspunkt lagd en funksjon for konduktiviteten i produktet basert på den samme kurvetilpasningsmetoden som nevnt tidligere, slik at konduktiviteten heretter ble avhengig av temperaturen i hver enkelt node. I tillegg ble det gått over til å bruke harmonisk midling for konduktiviteten på grensen mellom to kontrollvolum i stedet for den

aritmetiske midlingen som kom fra modellen fra Bonacina og Comini. Dette ble gjort fordi den harmoniske midlingen gir et riktigere bilde på konduktiviteten på grensen mellom to kontrollvolum hvis det skulle være store forskjeller i konduktiviteten fra et kontrollvolum til det neste. Hvis for eksempel konduktiviteten i en node er svært lav, 0,1 W/mK. Mens den er stor i den neste, 10 W/mK, vil konduktiviteten på grensen med aritmetiske midling gi:

$$k_x = \frac{0,1+10}{2} = 5,05 \text{ W/mK}, \text{ mens harmoniske midling vil gi: } k_x = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 10}{0,1+10} = 0,20 \text{ W/mK}.$$

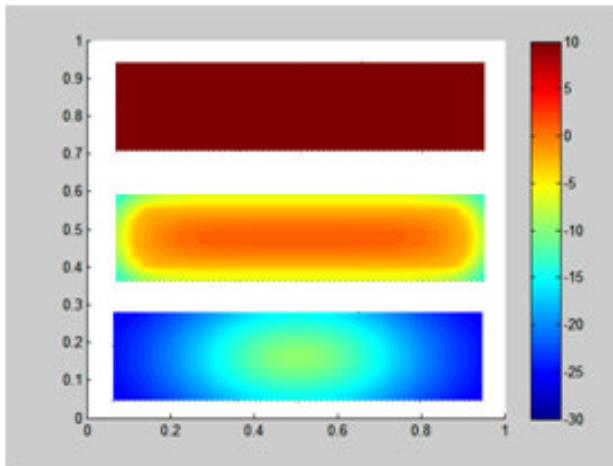
For at simuleringene ikke skulle gå over flere tidsskritt enn det som var nødvendig, så ble det lagt inn en intern test i simuleringene slik at simuleringen ble avbrutt når en ønsket temperatur var oppnådd i den midterste noden i produktet. Denne temperaturen ble i utprøvingen av modellen valg til å være 0,1 K over tunneltemperaturen.

For å finne ut om antallet noder i høyden og bredden hadde noen stor innvirkning på den beregnede varmestrømmen ut fra produktet, ble det gjennomført en simulering der antallet noder i høyden og bredden ble variert. Resultatene vist at antallet noder hadde en liten innvirkning på den beregnede varmestrømmen sammenlignet med varmestrømmen beregnet ut fra entalpidifferanser. Resultatene viste at med kun tre noder i høyden eller i bredden så ble den beregnede varmestrømmen fra produktet veldig liten. Ca. 50 % mindre med 3 noder i høyden og ca 25 % mindre med det samme antallet i bredden. Med fire noder i høyden lå den beregnede varmestrømmen 7- 8 % over varmestrømmen fra entalpidifferanser. For resten av kombinasjonene av noder lå resultatene for beregnet varmestrøm mellom -3 % og 3 % i forhold til varmestrømmen fra entalpidifferanser. Der hovedtyngden av resultatene lå litt under varmestrømmen fra entalpidifferanser.



Figur 9 Fordeling av resultater i forbindelse med nodetest.

Ut fra testen ble det valgt å bruke 10 noder i høyden og 50 noder i bredden. Den beregnede varmestrømmen fra produktet ble da beregnet til å være 0,59 % mindre enn varmestrømmen fra entalpidifferanser. Da var størrelsen på produktet satt til 0,5 m * 0,3 m * 0,08 m.



Figur 10 Montasje over utviklingen av temperaturen i produktet. Øverste vises temperaturen i produktet før fryseprosessen starter.

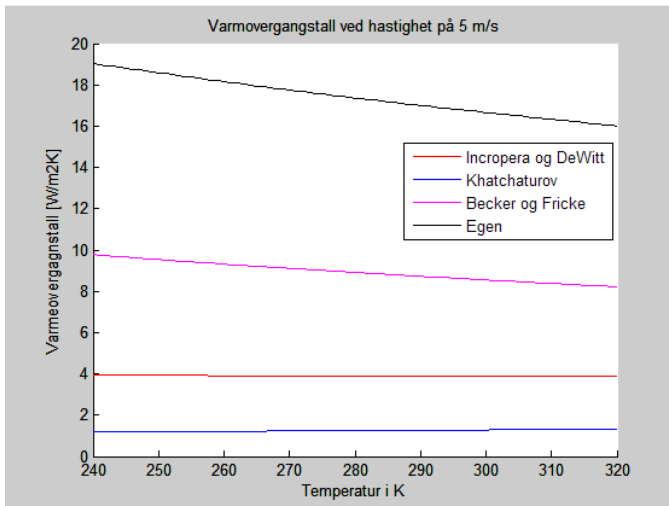
Da modellen nå ga fornuftige resultater ble det satt i gang arbeid med å implementere en rutine som beregnet varmeovergangstallet mellom luft og produkt. Som utgangspunkt for rutinen ble ligning 16 benyttet, der varmeovergangstallet beregnes ved hjelp av konduktiviteten til lufta (omkring liggende fluid), lengden på overflaten (lengden av produktsidene som ligger parallelt med luftstrømmen) og Nusselt tallet. For at rutinen skulle gi et tilnærmet riktig varmeovergangstall ble flere modeller for Nusselt tallet prøvd ut.

$Nu = 4.5 * Re^{0.28}$	Khatchaturov 1958
$Nu = 0.664 * Re^{0.5} * Pr^{\frac{1}{3}}$	Frank P. Incropera, David P. DeWitt
$Nu = 0.0154 * Re^{0.818} * Pr^{0.3}$	Becker og Fricke 2004

Testen viste at alle de tre modellen for Nu tallet ga et for lite varmeovergangstall. Etter som modellen til Becker og Fricke var den modellen som ga det beste resultatet, ble det bestemt å endre konstantleddet til denne fra 0,0154 til 0,03 slik at varmeovergangstallet ble større og mer likt det som er vanlig i frysetunneler. Modellen som ble brukt for Nu tallet ble da som følger:

$$Nu = 0.03 * Re^{0.818} * Pr^{0.3} \quad \text{Fig. 18}$$

der $Pr = \frac{c_p * \mu}{k_f}$ og $Re = \frac{u * L}{\nu_f}$.



Figur 11 Varmeovergangstall som følge av forskjellige Nu tall

Videre ble rutinen for konvektivt varmeovergangstall endret ved å sette inn ligning 17 i rutinen, slik at den også tok høyde for at produktet kunne være emballert og dermed ville få en større varmemotstand. Økningen av varmemotstanden ble lagt inn i variabelen $R_{emballasje}$. Når det ikke var noen emballasje/eller noe annet som øker varmemotstanden, så ble denne parameteren satt til null.

3.3 Modellering av tunnel

For å få samlet varmestrøm fra produktene i tunnelen og hvordan temperaturen i tunnelen ville endre seg i løpet av fryseprosessen, ble det modellert en frysetunnel. Til å begynne med var parameterne for tunnelen; høyden og bredde på tunnelen, antall vogner med produkter i tunnelen angitt som antall vogner som sto etter hverandre og antall produkter i hver vogn. Hastighetsfeltet i tunnelen ble antatt uniformt og temperaturen inn på første vogn ble antatt konstant. For å finne temperaturutviklingen i tunnelen, ble først varmestrømmen fra et produkt i første vogn simulert for et tidskritt. Varmestrømmen fra det ene produktet ble så multiplisert med antall produkter pr vogn. Denne totale varmestrømmen ble så brukt til å beregne temperaturøkningen til luften over den første vognen etter følgende formel:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_{tot \text{ fra produkt}}}{\dot{M}_{luft}} \quad \text{Lig. 19}$$

Hvor:

$$\dot{M}_{luft} = (A_{tunnel} - A_{produkt} * \text{Antall}_{produkt}) * u_{luft} * \rho_{luft} \quad \text{Lig. 20}$$

Der u_{luft} er lufthastigheten i tunnelen og ρ_{luft} er tettheten til lufta. Tettheten til lufta ble satt konstant til $1,43 \text{ kg/m}^3$.

Lufttemperaturen som gikk ut fra den første vognen ble brukt som inntemperatur på den neste vognen. Der den samme prosessen ble foretatt. Når prosessen var gjennomført for all

vognene, starten prosessen forfra igjen for neste tidsskritt. Prosessen ble gjentatt til temperaturen i produktet på den siste vognen fikk en ønsket temperatur.

Videre ble modellen utvidet ved å dele opp hver vogn i hyller. Dette for at hastigheten i tunnelen skulle kunne varieres med høyden i tunnelen slik at varmestrømmen ville variere fra de enkelte produktene i hver vogn. I denne forbindelse ble beregningen for temperaturøkningen endret ved å beregne luftmengden som passerte hvert enkelt produkt. Dette ble gjennomført ved å ta tverrsnittsarealet som luften kunne passere forbi en vogn og dele det på antall produkt i hver vogn. Det ble her antatt at produktene var jevnt fordelt i tverrsnittet av tunnelen slik at alle produktene hadde likt tverrsnittsareal for luft. For å få luftmengden som passerte over produktene, ble dette tverrsnittsarealet multiplisert med lufthastigheten over det enkelte produkt. For å få temperaturendringen over produktet ble så varmestrømmen fra det enkelte produkt delt på luftmengden fra produktet. Det ble antatt at luften holdt den samme høyden gjennom hele tunnelen. Hastighetene for de enkelte vognene og hyllene ble lagt inn ved å skrive dem inn i et regneark i brukergrensesnittet. På denne måten kan hastighetsfeltet i tunnelen bli beregnet ved hjelp at en strømningssimulering, før det blir lagt inn i modellen.

3.4 Grensesnitt

For at simuleringsmodellen skulle være lettere å bruke for andre person ble det valg å bruke Excel som brukergrensesnitt. For å kunne bruke Excel som brukergrensesnitt måtte rutinene som foretok selve simuleringen, som var skrevet i språket C, kobles opp mot Excel ved hjelp av en dll-fil (Dynamic-link library). Denne filen inneholdt både rutiner som kunne sende informasjon fra Excel og til rutinene i C, og hente informasjon fra rutinene i C og gi disse til Excel. For at Excel skulle kunne nyttiggjøres seg av disse rutinene måtte den aktuelle arbeidsboken i Excel være åpen for bruk av makroer. I tillegg måtte rutinene som fantes i dll-filen deklarerer i Visual Basic.

Ved de første forsøkene på å koble Excel opp mot dll-filen fikk ikke Excel kontakt med rutinene i dll-filen. Dette viste seg å skyldes at matrisen som tok vare på temperaturfeltet for produktet var deklarerert så store at Excel ikke kunne håndtere de rutinene som benyttet seg av denne matrisen. Ved å redusere størrelsen på denne matrisen fikk Excel kontakt med rutinene og simuleringen kunne kjøres.

Selve Excel-boken består av flere faner, der den første fanen inneholder en oversikt over parameterne til modellen, bortsett fra hastighetene over hvert enkelt produkt, og mulighet til å endre noen av dem. I tillegg inneholder den knapper som når de blir aktivert med musepekeren, kjører forskjellige rutiner som blant annet å legge inn parameterne inn i modellen, og å kjøre simuleringen. De parameterne som ikke kan bli endret på den første fanen kan bli endret på de påfølgende fanene. Disse endringene er linket til den første fanen slik at denne til enhver tid er oppdatert med de ønskede parameterne. For at modellen skal få de nye parameterne må rutinen for å legge inn parameterne kjøres ved å aktivisere knappen

Legge inn parametere. Etter at denne rutinen er kjørt, vil de innlagte parametrene vises i kolonnen bak kolonnen for innleggelse av parametere. Parametrene blir også lagt inn hvis knappen *Kjør Simulering* blir aktivert.

G36										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		Inn variable til modellen	NØKKELE	Legg til parametere		Henter	Kjør Simulering		Hent resultat	
3	Tunnel	Tunnel bredde [m]	A	1.3	1.3	1.3				
4		Tunnel høyde [m]	B	2.2	2.2	2.2				
5			C		Parameter C er ukjent	Parameter C er ukjent				
6		Temperatur inn på tunnelen [K]	D	243	243	243				
7		Tetthet for luften i tunnelen [kg/m ³]	E	1.43128	1.43128	1.43128				
8		CP for luften i tunnelen [J/kg K]	F	1003	1003	1003				
9		Antall vogner i tunnelen	G	4	4	4	Parameter G er ukjent			
10	Produkt	Bredde [m]	H	0.3	0.3	0.3				
11		Høyde [m]	I	0.08	0.08	0.08				
12		Lengde [m]	J	0.5	0.5	0.5				
13		Tetthet [kg/m ³]	K	1010	1010	1010				
14		Starttemperatur [K]	L	283	283	283				
15		Avslutnings temperatur i siste produkt [K]	M	242.9	242.9	242.9				
16		Antall produkt pr vogn	N	3	3	3	Parameter N er ukjent			
17		Antall produkt i høyden pr vogn	O	3	3	3	Parameter O er ukjent			
18	Varmemotstand	Diversiden av produktet m ² K/W	P	0.05	0.05	0.05	Parameter P er ukjent			
19	på produkt	Sidene av produktet m ² K/W	Q	0	0	0				
20		Undersiden av produktet m ² K/W	R	0.05	0.05	0.05				
21										
22										
23										
24										
25		Kan endres fritt								
26		endres andre plasser								
27		Endringer her må også gjøres i C								
28										

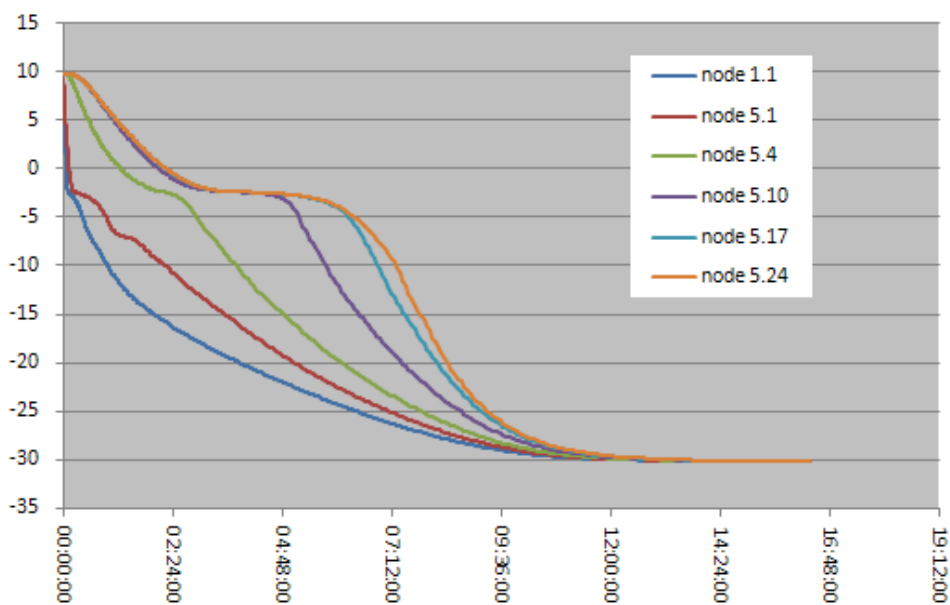
Figur 12 Utsnitt fra brukergrensenettet.

De resterende fanene inneholder mulighet for å hente ut forskjellige resultater fra simuleringen. Blant annet oversikt over temperaturforløpet til ønskede noder for ønskede produkt og oversikt over temperaturen inn på produktvognene og ut fra siste vogn.

For å få de forskjellige tingene til skje når knappene blir aktivert, er knappene tilskrevet forskjellige rutiner ved hjelp av Visual Basic. Versjonene av Visual Basic og Excel som er benyttet var Visual Basic 6.5 og Excel 2007.

4. Resultater

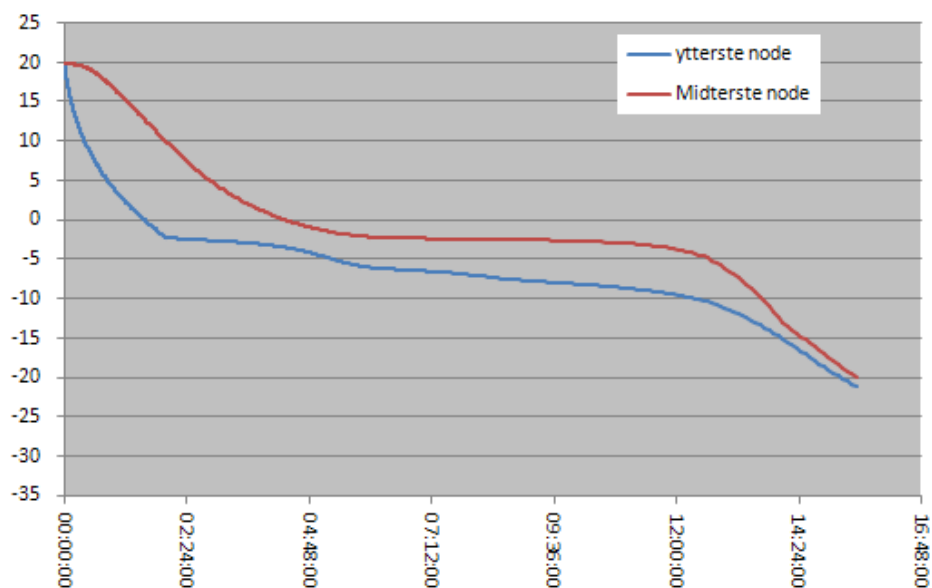
4.1 Resultater fra simuleringsmodellen



Figur 13 Temperaturforløp for noen noder når produktet fryses ned til tunneltemperatur, -30 °C.

Parametere som ligger til grunn for simuleringen som ligger bak Figur 13:

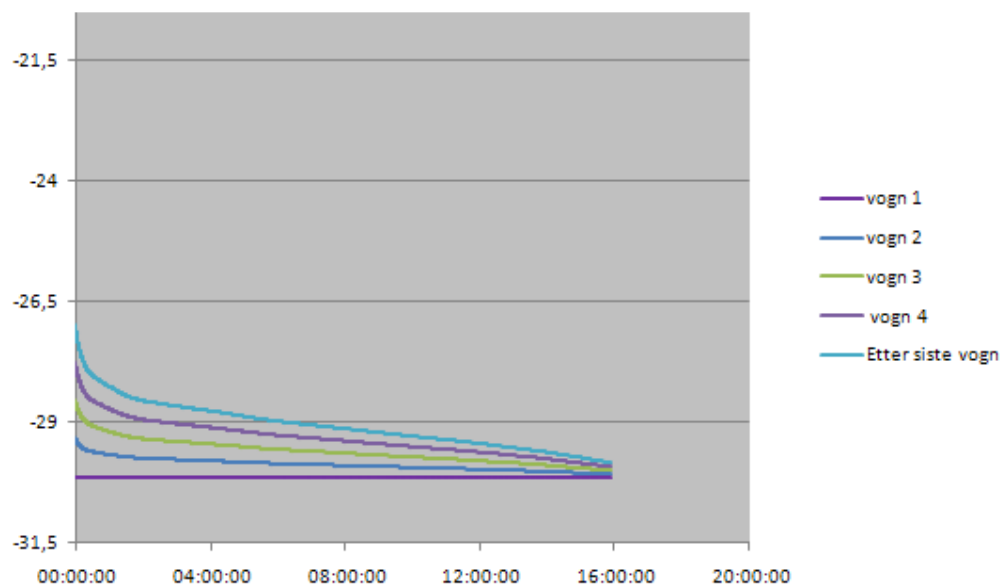
Konstant temperatur inn på produktet: -30 °C
Simuleringen avbrutt når midterste node nådde: -29.9 °C
Tillagt varmemotstand på overflaten: ingen
Lufthastighet over produktene: 6 m/s
Produktstørrelse: 0,55m * 0,35m * 0,1 m
Starttemperatur i produktet: 10 °C



Figur 14 Temperaturforløpet til et produkt fram til midterste node har nådd -20 °C.

Parametere som ligger til grunn for simuleringen som ligger bak Figur 14:

Konstant temperatur inn på første produktvogn: -30 °C
Simuleringen avbrutt når midterste node i produkt på siste produktvogn nådde: -20.0 °C
Tillagt varmemotstand på overflaten: 0,05m² K /W på over- og undersiden
Lufthastighet over produktene: 6 m/s, lik for alle vogner og hyller
Produktplassing: Tredje produktvogn i luftretningen, hylle tre
Totalt antall produktvogner: 4
Antall hyller i hver vogn: 4
Produktstørrelse: 0,55m * 0,35m *0,1 m
Starttemperatur i produktet: 20 °C



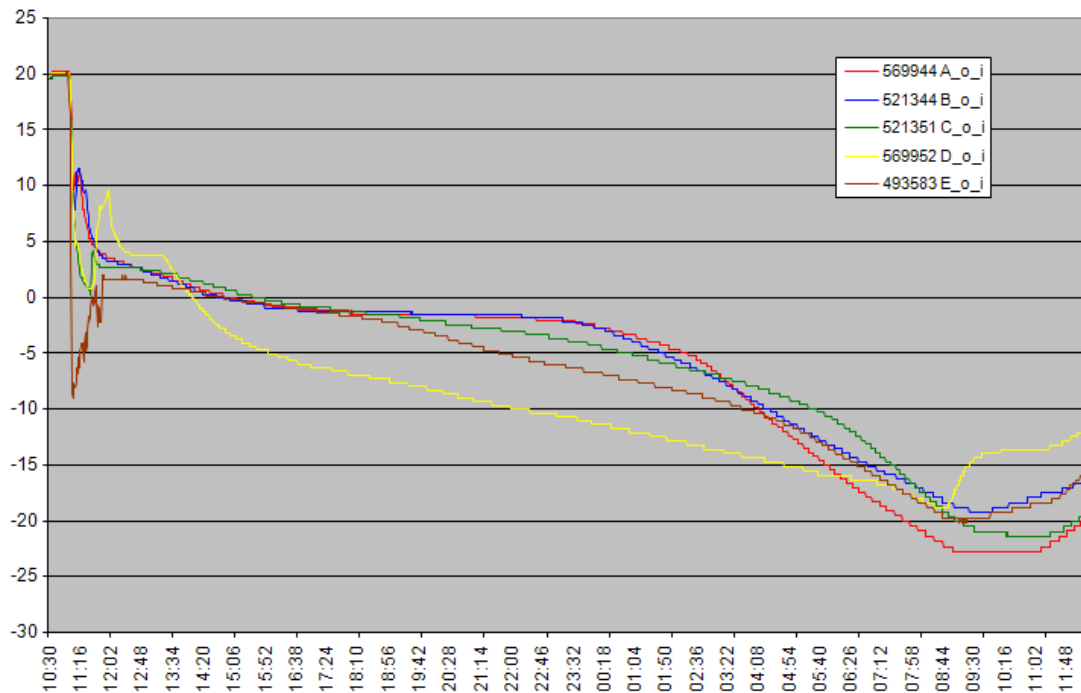
Figur 15 Temperaturforløpet på luft inn på hver vogn og ut fra siste vogn.

Parametere som ligger til grunn for simuleringen som ligger bak Figur 15:

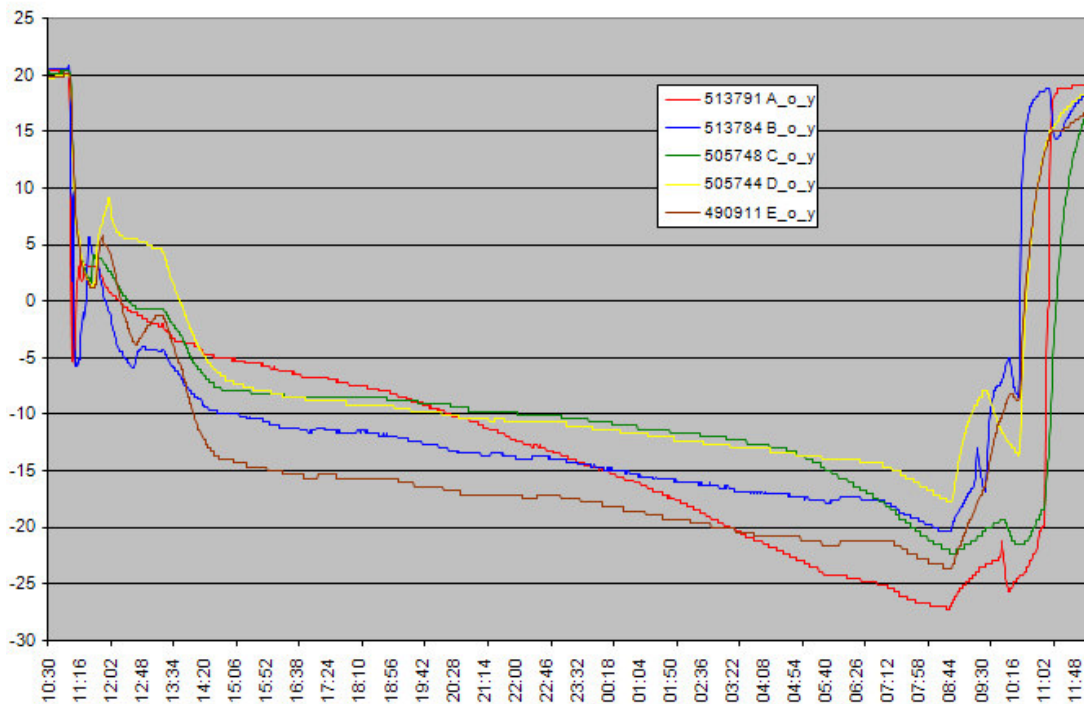
Konstant temperatur inn på første produktvogn: -30 °C
Simuleringen avbrutt når midterste node i produkt på siste produktvogn nådde: -20.0 °C
Tillagt varmemotstand på overflaten: 0,05m² K /W på over- og undersiden
Lufthastighet over produktene: 5 m/s, lik for alle vogner og hyller
Totalt antall produktvogner: 4
Antall hyller i hver vogn: 10
Antall produkt pr hylle: 3
Produktstørrelse: 0,55 m* 0,35 m *0,1 m
Starttemperatur i produktet: 20 °C

4.2 Måleresultater

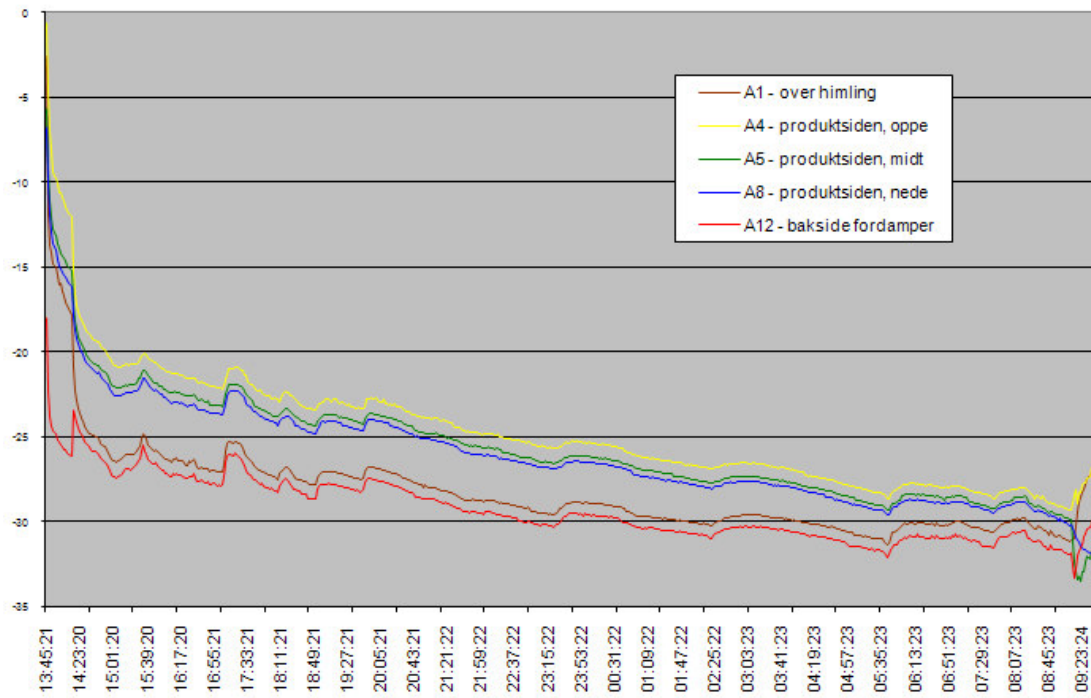
Resultatene i dette avsnittet stammer fra målinger foretatt i frysetunnelene ved Domstein Måløy AS, under innfrysning av makrell. For nærmere oppsett av måleutstyr og informasjon om frysetunnelen, se vedlegg B



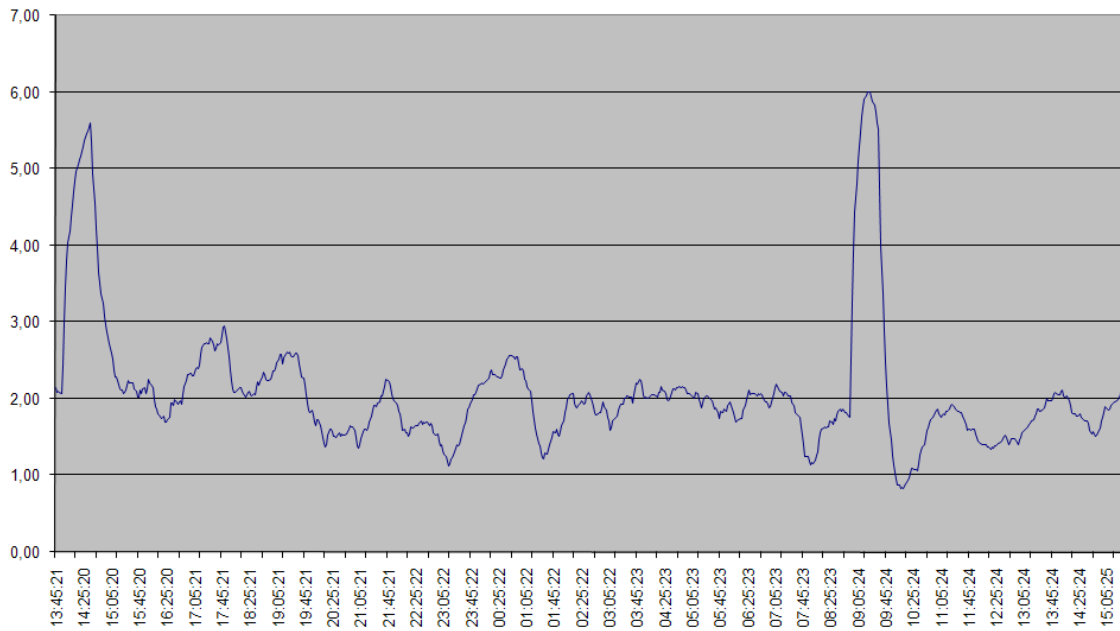
Figur 16 Temperaturforløpet i midten av utvalgte kasser.



Figur 17 Temperaturforløpet under lokket i utvalgte kasser.



Figur 18 Temperaturforløpet til utvalgte punkter i tunnelen.



Figur 19 Hastighetsutvikling i tunnelen, over himling

5. Diskusjon

Ved å studere temperaturforløpet til de enkelte nodene i Figur 13, ser man at temperaturen i starten går raskt nedover fra initialtemperaturen til den flater ut mot ca. $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, før den igjen raskt faller, til den flater ut mot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ som er temperaturen luften i tunnelen er satt til. Hvis man sammenligner temperaturen hvor utflatingen foregår, ca. $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, med frysepunktet for det simulerte produktet, torsk. Ser man at det sammenfaller bra, da frysepunktet for torsk er $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Denne utflatingen rundt frysepunktet kan skyldes at det frie vannet i produktet går over fra flytende form til fast form. I denne forbindelse blir det avgitt varme i form av latent varm fra produktet uten at skjer en temperaturendring i selve produktet. Som man kan se av Figur 13 blir denne platåfasen lenger jo nærmere midten av produktet man kommer. Noe som er naturlig da temperaturgradientene i midten er mindre, slik at den momentane varmestrømmen blir mindre og som igjen fører til at tiden det tar å fjerne den latente varmen øker.

Ser man på temperaturkurven for noden 5.1 ser en at etter platåfasen ved $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ er det antydning til en ny platåfase. Dette ser en også antydning til på Figur 14 for noden på yterflaten til produktet. En årsak til denne nye platåfasen kan være at en node innenfor den aktuelle noden, har kommet til platåfasen rundt frysepunktet. Dette fører som nevnt til at temperaturen en stund blir tilnærmet konstant, men temperaturen i en node kan også bli konstant hvis varmestrømmen ut er lik varmestrømmen inn. For at dette skal skje må temperaturene i nabonodene til en gitt node holdes konstant, ettersom varmestrømmen mellom to noder er en funksjon av temperaturredifferansen mellom dem. Denne betingelsen oppnås når noden innenfor når frysepunktet og man har antatt konstant temperatur i tunnelen.

Sammenligner man temperaturutviklingen i midten av det simulerte produktet vist i Figur 14, og den temperaturutviklingen målt midt i produkter ved Domstein Måløy, Figur 16. Ser man at tiden det tok før produktet i simuleringen hadde nådd $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ var ca. 15,5 time, mens det i den reelle tunnelen tok 22 timer. Ser man derimot på tidsforløpet i Figur 18, virker det som om innfrysningssyklusen går over 19 timer. Altså 3 timer mindre enn det en kan få inntrykk av at syklusen tar i Figur 16 og Figur 17. I tillegg står det i bakgrunnsdataene at dimensjonerende kuldeytelse er beregnet ved en temperatur reduksjon fra $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ på 18 timer. Dette kan tyde på at målingene i Figur 16 og Figur 17 er noe misvisende når det gjelder tidsaspektet for innfrysningsprosessen, og at den reelle innfrysningstiden er noe lavere enn disse viser. Men uansett hvilken av måleseriene man tar utgangspunkt i, så bruker datamodellen for kort tid sammenlignet med målingene på å fryse inn produktene.

Denne forskjellen kan tyde på at varmeovergangen i simuleringen er for stor i forhold til hva den i virkeligheten er. Det er som nevnt flere faktorer som virker inn på varmeovergangstallet, blant annet det konvektive varmeovergangstallet mellom overflaten på produktet og lufta, varmemotstand som følge av emballasje og temperaturforskjell mellom produkt og luft. I datamodellen er det konvektive varmeovergangstallet modellert ved hjelp av en formel som er avhengig av lufthastigheten og lufttemperaturen. En mulig feilkilde til varmestrømmen fra produktet er at denne formelen ikke er helt korrekt. En annen feilkilde er hastigheten over

produktene som ble satt til 6 m/s med bakgrunn i bakgrunnsdataene for tunnelen. Hvis den virkelige hastigheten over produktene er lavere enn dette vil varmestrømmen bli overdimensjonert. En tredje feilkilde er at i simuleringen ble varmemotstanden for emballasjen rundt produktet satt likt for over- og undersiden av produktet. I virkeligheten vil varmemotstanden på oversiden være større enn på undersiden som følge av at produktet blir presset mot bunn av emballasjen av egenvekten. Dette hindrer at isolerende luftlommer mellom produkt og emballasje oppstår. Mens på oversiden er det ingenting som presser produktet mot emballasjen slik at luftlommene unngås. I modellen er det i tillegg brukt en konstant temperatur inn på første vogn i tunnelen fra første sekund av i innfrysningen, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Men som man kan se av Figur 18 så er det først i andre halvdel at temperaturen inn på første produktvogn når denne temperaturen. Dette vil si at temperaturforskjellen i modellen mellom produkt og luft er større enn den i virkeligheten er i store deler av simuleringen. Dette vil også gjøre sitt til at tiden det tar før produktet når en gitt temperatur blir kortere for simuleringen enn i virkeligheten.

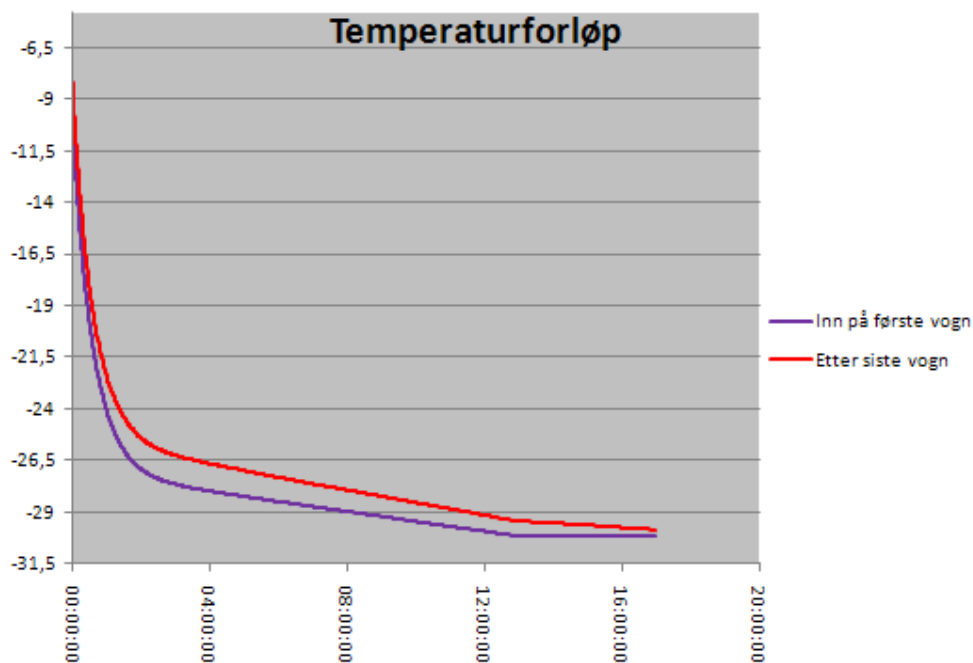
Sammenlignes fasongen på kurvene i Figur 16 og kurven for midterste node i Figur 14, kan man at kurvene A_o_i og B_o_i har til nærmet likt forløp som kurven i Figur 14. Mens kurvene C_o_i og E_o_i ikke har den markerte platåfasen som kurven i Figur 14 har. Den største forskjellen mellom kurvene i målingene og i simuleringen er at temperaturen i starten faller raskere i målingene enn i simuleringen. I tillegg har målingene en slakere temperaturkurve inn mot platåfasen. Dette kan skyldes at det i simuleringen ble brukt torsk som produkt, mens i målingene var produktet makrell. Ettersom torsk har høyere varmekapasitet (3.75 kJ/kgK) enn makrell (3.308 kJ/kgK), vil temperaturen raskere bli redusert i makrellen enn i torsken, da det er mindre varme som må fjernes fra makrellen for å få en gitt temperatur reduksjon. Men dette kan også forklares med at varmeavgivelsen i en startperiode har vært høy i måletunnelen på grunn av høy lufthastighet, se Figur 19. Når lufthastigheten etter en time er blitt redusert, har varmeavgivelsen avtatt og temperaturen i produktet faller ikke så raskt lenger. Dette kan også forklare den slakere temperaturkurven inn på platåfasen som man kan se i måleresultatene i forhold til simuleringsresultatene.

Sammenlignes temperturforløpet til ytterste node i Figur 14 med de målte temperaturene i Figur 17, kan man se at temperaturforløpet ligger lavere i målingene enn i simuleringen og at temperaturene i målingene faller mye raskere i starten. I tillegg mangler temperaturforløpet fra målingene platåfasen ved innfrysningspunktet. Dette kan skyldes at målingene er foretatt mellom emballasjen og produktet, og blir derfor en måling på lufttemperaturen i kassen. Noe som medfører at temperaturforløpet er avhengig av de termodynamiske egenskapene til luften, som ved disse temperaturene ikke har noen faseovergang. Mens temperaturen i simuleringen er hentet fra en node som ligger rett innenfor overflaten på produktet, der det i hovedsak er de termodynamiske egenskapene til produktet som innvirker på temperaturforløpet.

I Figur 15 kan en se at lufttemperaturen i tunnelen i starten av simuleringen øker med ca $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ fra lufta går inn på første produktvogn til den går ut fra den siste produktvoggen. Men størrelsen på denne temperaturdifferansen avtar raskt i starten og er etter en time nede i $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. På slutten er denne temperaturforskjellen bare $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hvis man sammenligner med

temperaturdifferansen mellom temperatur himling (temperatur inn på første produktvogn) og temperaturene inn på fordampere i Figur 18, så er den også ca 3 °C i starten på innfrysningen. Men i motsetning til endringen i temperaturdifferansen i simuleringen, er denne temperaturdifferansen i målingen nærmest konstant gjennom hele fryseprosessen. Bare i andre halvdel av innfrysningen blir denne temperaturdifferansen målbart redusert. Hovedgrunnen til denne forskjellen mellom måleresultatene og simuleringen, er at simuleringen har en fast temperatur inn på første produktvogn samtidig med at lufthastigheten holdes konstant. Når temperaturen og luftmengden inn holdes konstant, vil varmemengden som blir avgitt fra produktet bli redusert. Dette fordi temperaturforskjellen mellom produkt og luft avtar når produktet avkjøles. I frysetunnelen hvor måleresultatene er hentet fra, blir temperaturen inn på første vogn gradvis redusert slik at temperaturforskjellen mellom produkt og luft opprettholdes når produktet avkjøles.

Da en konstant temperatur inn på tunnelen er en av hovedfaktorene for at resultatene fra simuleringene avviker fra måleresultatene, er det blitt foretatt en ny simulering hvor temperaturen inn på tunnelen varierer. Temperaturvariasjonskurven fikk et tilnærmet likt forløp som temperaturforløpet til A1 i Figur 18. For å få til dette ble laget en temperaturfunksjon med bakgrunn i temperaturforløpet til A1 i Figur 18. Temperaturfunksjonen ble så satt inn i en rutine i simuleringsmodellen, slik at inntemperaturen inn på første vogn for et gitt tidsskritt ble bestemt av total tiden fram det gitte tidsskrittet.



Figur 20 Temperaturen på lufta inn på første vogn og ut fra siste vogn

Parametere som ligger til grunn for simuleringen som ligger bak Figur 20/ Figur 15:

- Variabel temperatur inn på første produktvogn med laveste temperatur -30,0 °C
- Simuleringen avbrutt når midterste node i produkt på siste produktvogn nådde: -20,0 °C
- Tillagt varmemotstand på overflaten: 0,05m² K /W på over- og undersiden
- Lufthastighet over produktene: 5 m/s, lik for alle vogner og hyller

Totalt antall produktvogner: 4
Antall hyller i hver vogn: 10
Antall produkt pr hylle: 3
Produktstørrelse: 0,55 m* 0,35 m *0,1 m
Starttemperatur i produktet: 20 °C

Med varierende temperatur inn på første vogn, tok det ca. 17 timer før det siste produktet hadde nådd den ønskede temperaturen, noe som er 1,5 time lengre enn for simuleringen med konstant temperatur. Dette førte til at tidsavviket i forhold til målingene i Figur 16 og Figur 17 ble redusert til 5 timer, en reduksjon av avviket på $1,5 \text{ t} / 6,5 \text{ t} * 100 \% \approx 23 \%$. Mens i forhold til måleseriene i Figur 18 ble avviket redusert til 2 timer, en reduksjon av avviket på $1,5 \text{ t} / 3,5 \text{ t} * 100 \% \approx 43 \%$. Selv med varierende inntemperatur underestimerte simuleringen frysetiden, men reduksjonen av avviket viser at simulering med varierende temperatur inn er essensielt for at modellen skal gi et riktig svar.

Sammenlignes lufttemperaturen inn på første vogn og ut fra siste vogn i den nye simuleringen, med de tilsvarende temperaturene i Figur 15, ser man at temperaturdifferansen i den nye simuleringen er jevnere enn den var i den gamle. Men fortsatt er det en vesentlig forskjell i temperaturdifferansen mellom start og slutt. I tillegg er temperaturdifferansen i starten blitt mindre, 1,9 °C mot ca. 3 °C i den gamle. Dette kan tyde på at luftmengden pr produkt brukt i simuleringen er større enn luftmengden pr produkt i virkeligheten. Det vil si at mellomrommet mellom produktene i datamodellen er for stort i forhold til virkeligheten.

6. Konklusjon/videre arbeid

Hvis man sammenligner resultatene fra datamodellen og måleresultatene ved Domstein Meløy, ser en at datamodellen for produktet gir tilnærmet sammenfallende resultatene med målingene. Det som i hovedsak skiller simuleringresultatene fra måleresultatene når det gjelder produktet er tidsaspektet. Produktet i datamodellen blir raskere frosset ned til en gitt temperatur i forhold til de det er foretatt målinger på. Denne forskjellen kan reduseres ved å legge inne en større varmemotstand for overflaten av produktet eller å justere formelen for varmeovergangstallet mellom produktet og lufta. I tillegg bør det kjøres en strømmingssimulering først slik at hastigheten over de enkelte produktene kan finnes. Med disse justeringene vil produktmodellen være fullt brukbar til å simulere varmeavgivelsen fra produktene. I tillegg til bør det sees på forholdet mellom tunneltverrsnitt og antall produkt i pr vogn i modellen.

For at modellen lettere skal kunne kjøres for andre varer enn torsk bør Excel-arket som de termodynamiske egenskapene til torsk ble hentet fra, kobles direkte opp mot Excel-arket for frysetunnelen. Slik det er nå så må de termodynamiske egenskapene for eventuelle andre varer først kurvetilpasses før de settes inn i kildekode som simulerer innfrysningen. Denne kurvetilpasningen er arbeidskrevende, samtidig med at det er lett å gjøre feil som påvirker nøyaktigheten.

For å kunne kjøre simuleringer som beregner effektbehov og energibruk, må andre komponenter som hører til i en frysetunnel modelleres og settes sammen med den eksisterende modellen.

Det bør sees på hvordan temperaturfeltet til de enkelte produktene blir lagret og tatt vare på. Slik det er i dag blir temperaturene for alle nodene tatt vare på for alle tidsskrittene. Dette fører til at rutine for simulering av varmestrømmen ut av produktene tar stor plass og er på grensen til hva Excel klarer å ta inn gjennom en dll-fil. Man kan stille spørsmål ved behovet for å ta vare på alle temperaturene. Hvis de ikke behøves kan rutine endres slik at temperaturene for de tidsskrittene som behøves for å beregne neste temperaturfelt kun blir tatt vare på, dette vil redusere størrelsen på rutinen vesentlig. Tanken bak å ta vare på alle resultatene slik som det er i dag, er at man kan lage grafer over hvordan temperaturforløpet i produktet utvikler seg for den gitte simuleringen.

Ved en videre utvikling av modellen må grensesnittet i Excel systematiseres og gjøres mer oversiktlig. Slik det er i dag kan det være vanskelig å vite hva som må gjøres for at simuleringen skal kunne kjøres og hvordan parametere kan endres for en ny simulering. I tillegg må det lages et system som kan ta vare på opplysninger fra en simulering til den neste for en eventuell sammenligning. Slik som det er i dag er det ingen mulighet for å lagre resultater fra en simulering til en annen utenom å kopiere dem og lime dem inn igjen i et annet Excel-ark.

Referanseliste

- Bonacina, C., & Comini, G. (1973). On the solution of the nonlinear heat conduction equations by numerical methods. *International Journal of Heat Transfer*, pp. 581-589.
- Engebakken, J. (2007). *Modellering av energibruk i frysetunneler*.
- Fellows, P. J. (2000). *Food processing Technology*. Woodhead Publishing Limited.
- Harrison, M. A., & Bishop, P. J. (1985, Mai). Parametric study of economical energy usage in freezing tunnels. *International Journal of Refrigeration*, 8, pp. 29-36.
- Huan, Z., Ma, Y., & He, S. (2003, September). Airflow blockage and guide technology on energy saving for spiral quick-freezer. *International Journal of Refrigeration*, 26, pp. 644-651.
- Incropera, .. F., & DeWitt, D. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Fifth Edition ed.). John Wiley & Sons.
- (2006). INDUSTRIAL FOOD-FREEZING SYSTEMS. In *ASHRAE Handbook - Refrigeration*. ASHRAE.
- Johnston, W. A., Nicholson, F. J., Roger, A., & Stroud, G. D. (1994). *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS*. Retrieved 11 22, 2007, from Freezing and refrigerated storage in fisheries:
<http://www.fao.org/docrep/003/v3630e/V3630E05.htm>
- Kiranoudis, C. T., & Markatos, N. C. (1999). Design of tray tunnels for food deep chilling. *Journal of Food Engineering*, 40, pp. 35-46.
- Kolbe, E., Ling, Q., & Wheeler, G. (2004, april). *Oregon Sea Grant*. Retrieved 11 30, 2007, from Conserving energy in blast freezers using variable frequency drives:
http://seagrant.oregonstate.edu/sgpsubs/onlinepubs/fisheng/IETC_Report.pdf
- Magnussen, O. M., & Nordtvedt, T. S. (2006). *ENØK i kuldeanlegget*. Trondheim: SINTEF Energiforskning AS.
- Pham, Q. T. (1985, november). A fast, unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28, pp. 2079-2084.
- Pham, Q. T. (2006, September). Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review. *International Journal of Refrigeration*, 29, pp. 876-888.
- (2006). REFRIGERATED-FACILITY DESIGN. In *ASHRAE Handbook - Refrigeration*. ASHRAE.
- Shaikh, N. I., & Prabhu, V. (2007). Mathematical modeling and simulation of cryogenic tunnel freezers. *Journal of Food Engineering*, 80, pp. 701-710.

MANUAL

for

Simuleringsmodell av en frysetunnel

av

Jon Arve U Engebakken

Innholdsfortegnelse

Innledning	A1
Basis Emacs	A2
Klipp og lim, kopiere.....	A3
Angre	A4
Søk	A4
Søk erstatt	A4
Diverse problemer.....	A5
Deklamasjon av funksjoner/rutiner	A6
Kompilering i Emacs	A6
Start for kompilering	A8
En fil kompilering.....	A8
Flere filer kompilering	A9
Filer for frysetunnelmodell	A10
Makefile	A10
Trinn 1: Hvilket program skal bruke dll-filen	A11
Trinn 2: Hvilke filer skal inngå i makefile.....	A11
Trinn 3. Kompilering.....	A12
Diverse problemer.....	A13
Kalle fryssim.dll fra Excel.....	A14
Plassering av fryssim.dll	A14
Andre problemer	A15
Excel – Brukergrensesnitt.....	A15
Parametere	A15
Produktplassering	A16
Hastigheter	A17
Resultater_Temp	A17
Resultater_tunnel	A17
Resultater_Tfelt	A18
Div	A18
Nøkler	A19
Diverse problem	A19
Åpning av Visual Basic.....	A19

Innledning

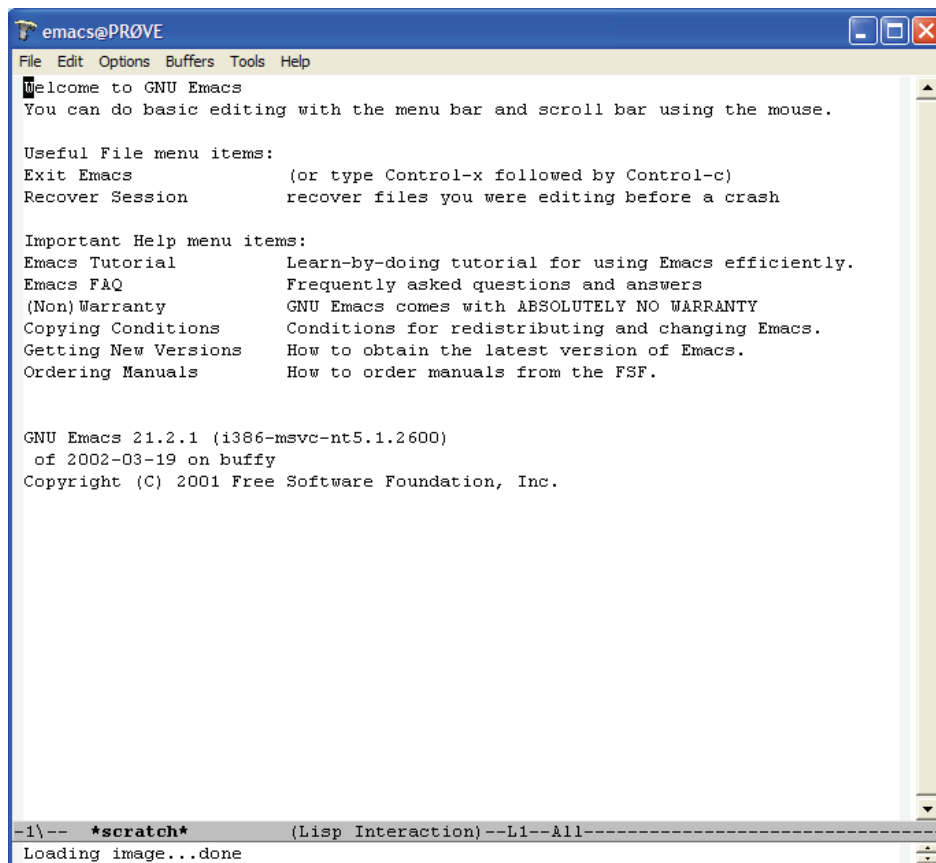
Denne manualen er laget i forbindelse med utarbeidelsen av en datamodell for en frysetunnel. Den er ment brukt som en lett innføring i de ulike programmer som behøves for å kunne arbeide videre med modellen. Innføringen tar bare for seg det som er nødvendig for å komme i gang med programmene og går ikke inn i dybden på noe punkt. Vanlige problemer som kan gi grå hår er også forsøkt omtalt.

På slutten av manualen blir grensesnittet som det i dag framgår gjennom gått.

Basis Emacs

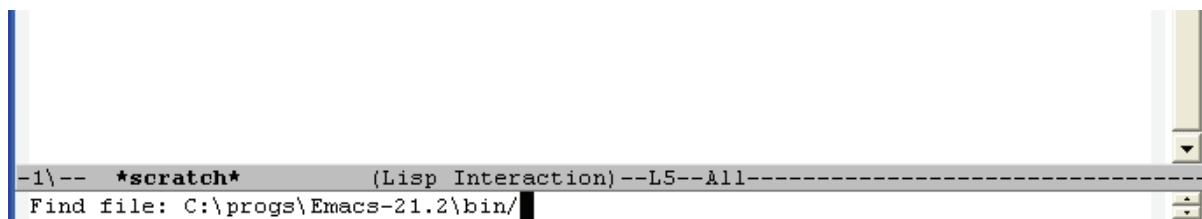
Inneholder grunnleggende operasjoner i emacs.

Åpningsbilde når emacs blir åpnet.



For å åpne en fil for redigering:

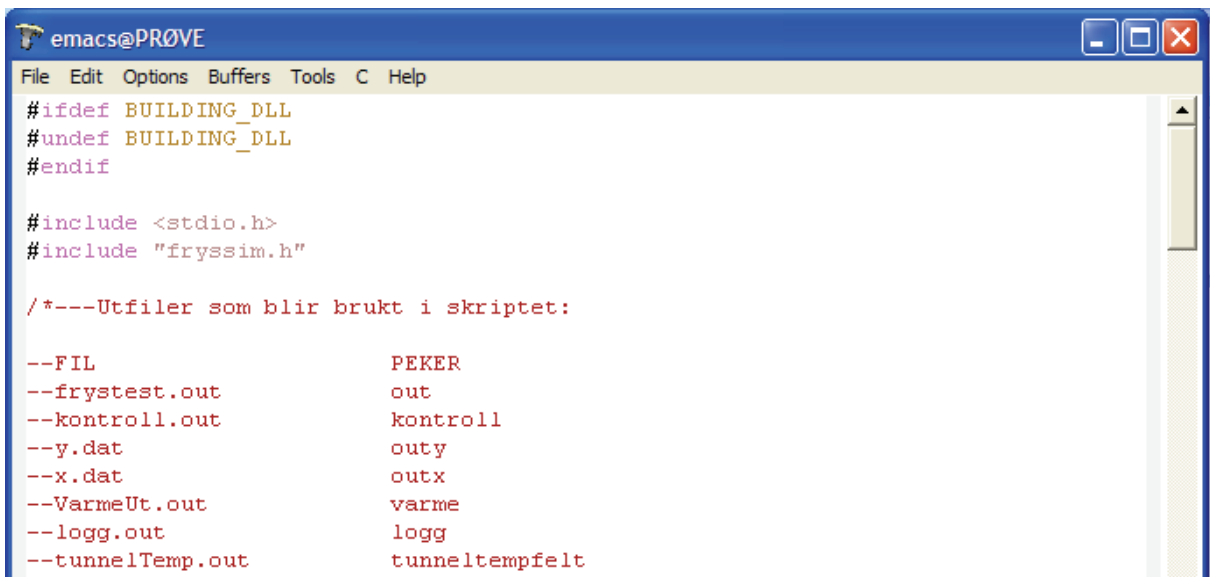
Trykk først **Ctrl + x** så **Ctrl + f** slik at markøren kommer opp nederst i vinduet:



Skriv inn hele adressen til filen og trykk **Enter**

```
-1\-- *scratch* (Lisp Interaction) --L5--All-----  
Find file: C:\progs\afdsim\frystunnel.c
```

Filen åpner seg. Hvis det ikke er noen fil med det navnet, kommer det opp en blank skjerm. Dette er også metoden for å lage en ny fil. Den nye filen blir ikke laget før du lagrer den.



```
emacs@PRØVE  
File Edit Options Buffers Tools C Help  
#ifdef BUILDING_DLL  
#undef BUILDING_DLL  
#endif  
  
#include <stdio.h>  
#include "fryssim.h"  
  
/*---Utfiler som blir brukt i skriptet:  
  
--FIL                PEKER  
--frystest.out       out  
--kontroll.out       kontroll  
--y.dat              outy  
--x.dat              outx  
--VarmeUt.out        varme  
--logg.out           logg  
--tunnelTemp.out     tunneltempfelt
```

For å lagre en fil trykk **ctrl + x** så **ctrl + s**, følgende melding dukker opp nederst:

```
--\-- frystunnel.c (C Abbrev) --L4--Top-----  
Wrote c:/progs/afdsim/frystunnel.c
```

Klipp og lim, kopiere

Flytt markøren til starten eller slutten av teksten du vil klippe ut/kopiere og trykk **ctrl+space**, Mark set dukker opp nederst i vinduet.

```
FILE *tunneltempfelt = fopen("tunnelTemp.out", "w");
rewind (tunneltempfelt);

int i,j,k,l; //iterasjonsparametere
int tid; //Antall tisperioder
--\-- frystunnel.c (C Abbrev)--L37-- 1%-----
Mark set
```

Flytt så markøren til den andre siden av teksten du skal klippe ut/kopiere og trykk **ctrl + w**. Teksten du nå har markert vil bli borte fra skjermen, for å lime den inn igjen gå flytt markøren til hvor du skal ha teksten og trykk **ctrl + y**. Hvis du skal kopiere teksten, trykk **ctrl + y** for å sette teksten tilbake til der du hentet den fra før du flytter markøren dit du skal sette inn kopien og trykk **ctrl + y**.

Angre

For å angre på det siste som er gjort trykk **ctrl+x** etterfulgt av **u**. For å gå lengre tilbake repeter prosessen.

Søk

For å søke etter tekst i dokumentet trykk **ctrl+s** for å søke nedover, trykk for **ctrl+r** for å søke oppover. Skriv inn det du søker etter. Markøren vil automatisk hoppe til det første ordet som er likt det du søker etter. Trykk **ctrl+s** / **ctrl+r** for å søke videre. For å avslutte søket trykk **ctrl+g** for å gå tilbake til hvor du startet søket, eller en piltast for gå holde deg der hvor markøren står i forbindelse med søket.

```
int i,j,k,l; //iterasjonspara
--\ ** frystunnel.c (C Abbr
I-search:
Ned
```

```
int i,j,k,l; //itera
--\ ** frystunnel.c
I-search backward:
Opp
```

Søk erstatt

Hvis du skal erstatte en tekst med en annen, f. eks. et variabelnavn med et annet. flere plasser i dokumentet, kan det være greit å bruke denne metoden. Metoden søker bare nedover så det kan lønne seg å gå langt opp i dokumentet for å få med seg alle endringene. Trykk **alt + %** (alt +shift +5)

```
--\ ** frystunnel.c
Query replace:
```

Skriv inn det som skal erstattes og trykk **Enter**. Skriv så inn det som skal erstatte den ønskede og trykk **Enter**. For hvert funn får du spørsmål om du skal erstatte funnet. Trykk **y** for ja og **n** for nei. For å avslutte søket trykk **q**. Søket vil også automatisk avsluttes når det ikke finnes flere å erstatte.

```
--\ ** frystunnel.c (C Abbrev)--L
Query replace tekst with: tekst2
```

```

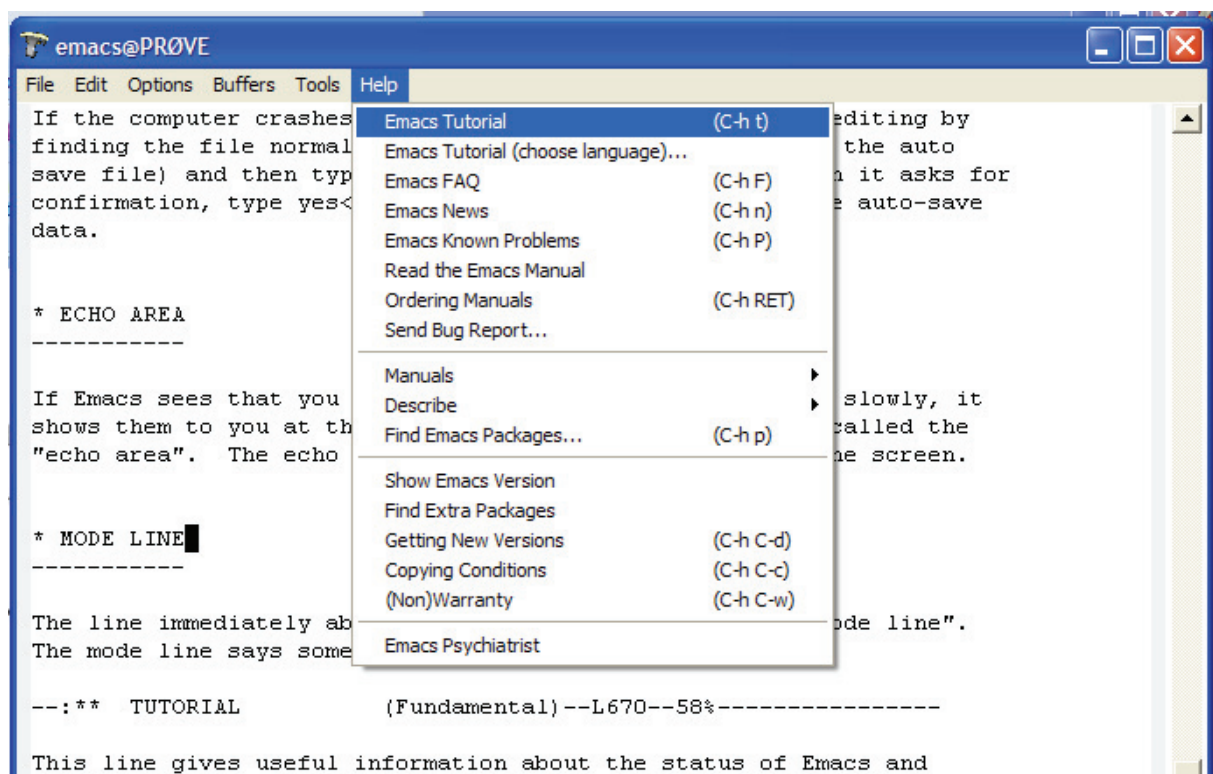
tekst
}

return 0;
}

--\ ** frystunnel.c (C Abbrev) --L276--Bot-----
Query replacing tekst with tekst2: (? for help)

```

For mer hjelp gå til:

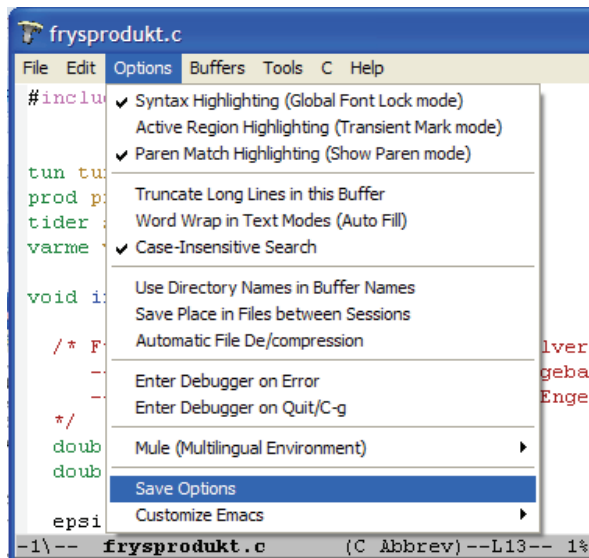


eller trykk **Ctrl + h** etterfulgt av **t**

Diverse problemer

Hvis man bare får lese dokumentene og ikke endret dem, er det mest sannsynlig at vedkommende filer er skrivebeskyttet. Gå til filen i Windows utforsker og endre status til filen.

For at teksten i emacs skal få farge koding må du velge "syntax highlighting" og "parent matching" under "options" i emacs. For å lagre innstillingene gå til "Save Options".



Deklamasjon av funksjoner/rutiner

Deklamasjonene er bygget opp som følger:

Hva rutinen returnerer(ingen verdi, heltall, desimaltall osc.)

Navn på rutinen

Innparametere til rutinen (hva slag type innparametere det er og de interne navnene til disse)

Eksempel:

```
void finnTemperatur(int steg, double temp);
```

void beskriver hva rutinen returnerer

finnTemperatur er navnet på rutinen

steg og temp er de interne navnene på innparametere som blir sendt til funksjonen

int og double beskriver hva slags type variabel steg og temp er

void = ingen verdi

int = heltall

double = desimaltall

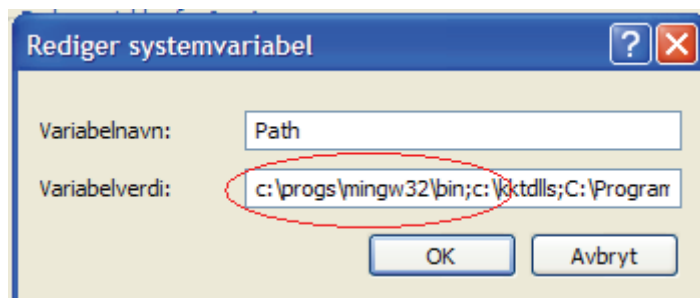
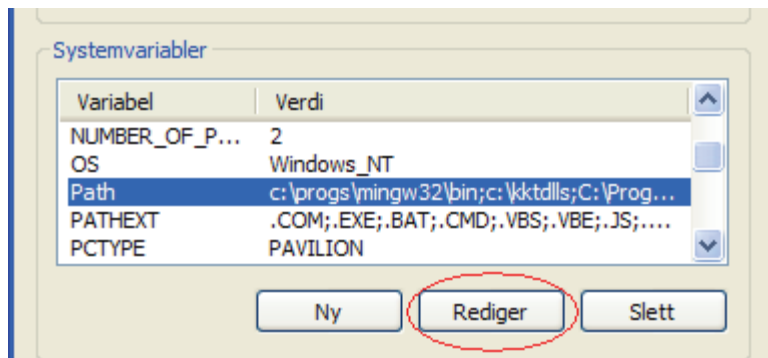
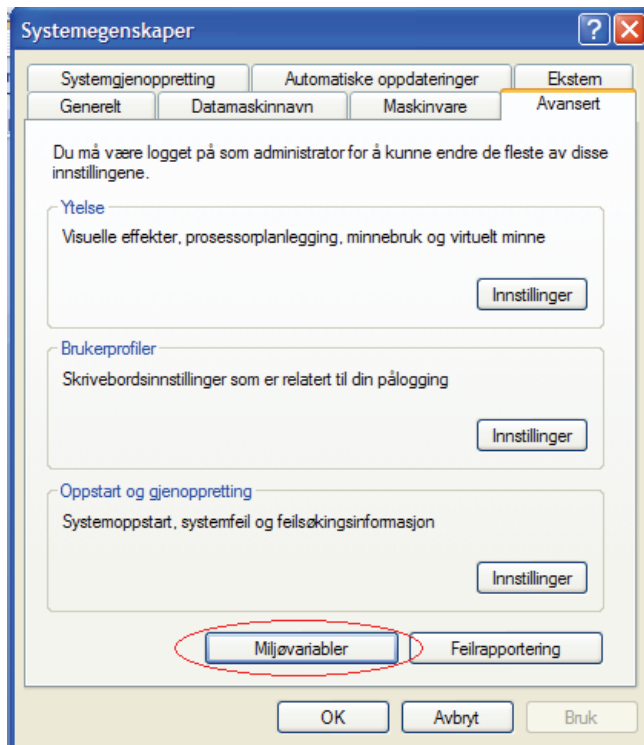
Kompilering i Emacs

For å kunne kompilere i emacs må mingw32 være lagt inn og en path til mingw32\bin være lagt inn.

For å legge til en path må du gå i control panel -> system -> faneark "advanced" -> enviroment variables.

Legg til nevnte hele adressen til mingw32\bin i path og skilletegn er som før semikolon ";".

Eksempel på path er: c:\progs\mingw32\bin



Start for kompilering

For å kompilere trykkes først **alt + x** slik at M-x kommer opp i nederst til venstre.

```
FILE *tunneltempfelt = fopen("tunnelTemp.out", '
rewind (tunneltempfelt);
--\-- frystunnel.c      (C Abbrev)--L9--Top-----
M-x
```

skriv inn **compile** og trykk **Enter**.

```
FILE *tunneltempfelt = fopen
rewind (tunneltempfelt);
--\-- frystunnel.c      (C Abb
M-x compile
```

Følgende skal komme opp

```
rewind (varme);

FILE *tunneltempfelt = fopen("tunnelTemp
rewind (tunneltempfelt);
--\-- frystunnel.c      (C Abbrev)--L9--To
Compile command: make -k
```

En fil kompilering

Hvis det bare er en fil som skal kompileres og man ikke har en makefile liggene i katalogen sammen med filen, gjøres følgende for å kompilere filen:

fjern **make -k** i komandovinduet nederst, slik at bare **Compile command:** står igjen

```
--\-- prove.c
Compile command:
```

Skriv så inn **gcc -w -o** pluss navnet som programmet skal kalles med og navnet på filen som inneholder skriptet til programmet.

```
--\-- prove.c      (C Abbrev)--L12--A11---
Compile command: gcc -w -o prove prove.c
```

I dette tilfellet er **prove** navnet som programmet kalles med og **prove.c** filen som skriptet til programmet ligger i.

Flere filer kompilering

Hvis det er flere filer som skal likes sammen til et program er det anbefalt å bruke en makefile som samkjører filene.

Hvis det ligger en makefile i den samme katalogen som filen som du skal kompilere så er det bare å skriv inn navnet på filen som skal kompileres. I dette tilfelle frystunnel og trykk **Enter**

```
FILE *tunneltempfelt = fopen("tunnelTem  
rewind (tunneltempfelt);  
--\-- frystunnel.c (C Abbrev)--L26--  
Compile command: make -k frystunnel
```

Noe lignende som dette skal dukke opp:

```
--x.dat          outx  
--VarmeUt.out    varme  
--logg.out       logg  
--tunnelTemp.out tunneltempfelt  
--\-- frystunnel.c (C Abbrev)--L9--Top-----  
d c:/progs/afdsim/  
make -k frystunnel  
gcc -I. -g -Wall -Wstrict-prototypes -c -o frystunnel.o frystunnel.c  
frystunnel.c: In function 'main':  
frystunnel.c:47: warning: unused variable 'varmeut'  
frystunnel.c:47: warning: unused variable 'avvik'  
frystunnel.c:47: warning: unused variable 'hjelpvar'  
gcc -I. -g -Wall -Wstrict-prototypes -o frystunnel frystunnel.o fryssim.lib  
  
Compilation finished at Thu Apr 17 17:15:02  
  
-1\** *compilation* (Compilation:exit [0])--L1--All-----
```

Filer for frysetunnelmodell

Foreløpig består modellen av tre c-filer med tilhørende h-filer. h-filene består hovedsakelig av deklarasjoner over funksjoner og rutiner som er nøyere beskrevet i c-filene. Disse filene danner utgangspunktet for en dll-filen som andre program trenger for å få tilgang til modellen. Brukergrensesnittet til modellen er et Excel dokument som er koblet til nevnte dll-fil. Excel filen har formatet xlsx som er en Excel 2007 fil.

Filer

frystertermo.c	Inneholder funksjoner som beregner termodynamiske egenskaper for produktet og for luft.
frysprodukt.c	Inneholder funksjoner som har med beregningen av varmestrømmen ut av produktet.
fryssim.c	Inneholder rutiner som kan kalles gjennom dll-filen. Disse kan kalles fra forskjellige programmer som f. eks. Excel. Dette er hovedfilen av c-filene. I tillegg til vanlig definisjon av rutiner, må rutiner som skal inngå i fryssim.c og kommunisere med Excel og andre program ha DLLIMPORT foran definisjonen av rutinen.
frystertermo.h	Inneholder deklarasjonene over rutinene som er i frystertermo.c
frysprodukt.h	Inneholder deklarasjonene over rutinene som er i frysprodukt.c. I tillegg inneholder filen opprettelsen over globale tabeller og variabler.
fryssim.dll	Filen som linker c-filene til andre program.
fryssim.lib	Formål uviss. Henger igjen fra tørkemodell.
fryssim.h	Inneholder deklarasjonene over rutinene som er i fryssim.c
Frysetunnel.xlsx	Excel fil som brukes som grensesnitt for modellen.
makefile	Fil med oppskrift for hvordan fryssim.dll skal lages.

Makefile

For å linke c-filene som modellen består av sammen til en dll-fil under kompileringen brukes det en makefile. Nedenfor følger hva som må passes på i makefile for at denne kompileringen skal fungere riktig.

Trinn 1: Hvilket program skal bruke dll-filen

For at dll-filen skal kunne kjøres sammen med Excel må EXCELOPT settes til `-mrtd`

```
makefile
File Edit Options Buffers Tools Makefile Help
#####
# Remember to set the EXCELOPT flag correct #
#                                           #
#####
EXCELOPT = -mrtd # for use with EXCEL/DELPHI on main module
#EXCELOPT =      # for use with C/C++/FORTRAN etc
CC = gcc
FF = g77
```

Hvis dll-filen skal brukes fra en testfil i emacs må `-mrtd` flagget fjernes:

```
makefile
File Edit Options Buffers Tools Makefile Help
#####
# Remember to set the EXCELOPT flag correct #
#                                           #
#####
#EXCELOPT = -mrtd # for use with EXCEL/DELPHI
EXCELOPT =      # for use with C/C++/FORTRAN
CC = gcc
FF = g77
```

Trinn 2: Hvilke filer skal inngå i makefile

For hver nye c-fil som modellen består av, må det oppføres en o-fil med samme navn som c-filen under AFDOBJs. Under er de filene som modellen i dag består av innskrevet.

```
INCLUDE = -I.

CFLAGS = $(INCLUDE) $(DEBUG) $(WARN) $(OPT)
FFLAGS = -g

AFDOBJs = $(OBJDIR)/frysprodukt.o \
          $(OBJDIR)/frystermod.o \
          $(OBJDIR)/fryssim.o

LIBS = $(FORLIB)
```

I tillegg må disse o-filene skrives inn på følgende måte legger ned i makefile.

```
#
$(OBJDIR)/frysprodukt.o:      $(SRCDIR)/frysprodukt.c
    $(CC) -c $(CFLAGS) -o $@ $<

$(OBJDIR)/frystermo.o:      $(SRCDIR)/frystermo.c
    $(CC) -c $(CFLAGS) -o $@ $<
```

Hvis navnet på hovedfilen skal endres må hele makefile gjennomgås og fryssim byttes ut med navnet på den nye hovedfilen.

Skal det lages en testfil i emacs kan denne filen legges inn makefile for kompilering ved å skrive inn navnet på testfilen på det viste stedet. frystunnel.o må også endres til navn.o

```
# Making test program
frystunnel: frystunnel.o $(DLL_NAME)
    $(CC) $(CFLAGS) -o $@ $@.o $(DLL_EXP_LIB)
```

I tillegg må følgende linje endres slik at navnene passer med det nye navnet.

```
$(OBJDIR)/frystunnel.o:      $(SRCDIR)/frystunnel.c
    $(CC) -c $(CFLAGS) -o $@ $<
```

Trinn 3. Kompilering

Når filene som inngår i modellen skal kompileres er det bare to filer som trenger å bli kompilert. fryssim.lib og fryssim.dll. Er det ikke er lagt til noen flere filer trenger man ikke å røre makefile, hvis ikke dll-filen skal brukes av et annet program enn det som sist er blitt brukt (man går fra å bruke Excel-filen til å bruke en testfil i emacs eller motsatt, se trinn 1). Først må filen fryssim.lib kompileres og så fryssim.dll. Hele filnavnet må skrives inn når disse filene skal kompileres.

```
--(Unix)**  makefile      (Makefile) --L104--Bot---
Compile command: make -k fryssim.dll
```

For å slippe å måtte skrive inn og kompilere filnavnene hver for seg, kan begge kompileres samtidig ved å skrive innfølgende linje i makefile:

```
all: fryssim.lib fryssim.dll
```

Når det nå skal kompileres skal det skrives inn følgende:

```
# making test program
--(Unix)** makefile (Makefile)--L6
Compile command: make -f makefile
```

Legge merke til at -k er byttet ut med -f. Det som nå skjer er at kompileringen går gjennom makefile for å se om det er noe å kompilere. Hvis ikke linjen med **all:** ikke er med vil kompileringen gå gjennom makefile til det første som kan kompileres for så kompilere det, og når den er ferdig med det gir den seg med kompileringen. Slik makefile er i dag ville fryssim.lib blitt kompilert hvis ikke **all:** linjen var med ettersom den er første av kommandoene som kan bli kompilert går på fryssim.lib:

```
# making implib
fryssim.lib: $(DLL_OBJS)
    dlltool --dllname fryssim.dll --output-lib fryssim.lib $(DLL_OBJS)
```

Er litt på tynn is når det gjelder hvordan alt rundt make og makefile fungerer, neden for er det gitt noen linker som kan være til hjelp.

http://www.sethi.org/classes/cet375/lab_notes/lab_04_makefile_and_compilation.html

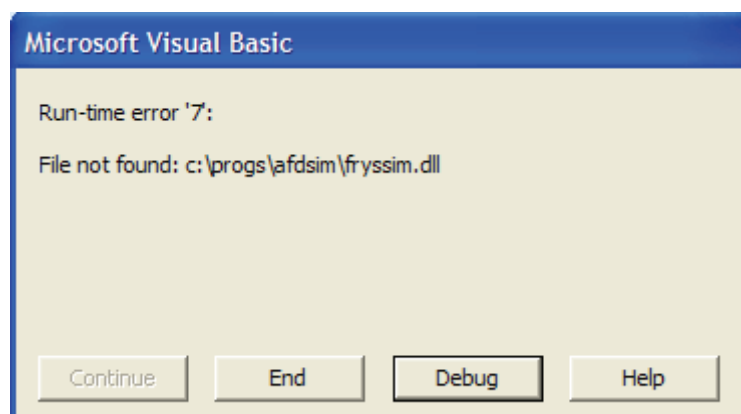
<http://www.cs.umd.edu/class/spring2002/cmsc214/Tutorial/makefile.html>

<http://www.csee.usf.edu/~jcarlo1/tutorials/make.html>

Diverse problemer

For at endringer i h-filene skal bli oppdaget når filene blir kompilert, må også den tilhørende c-filen blitt endret. Det holder å trykke space eller gjøre noe lignende.

For at dll-filen skal kunne kalles fra Excel kan ikke globale variabler/tabeller være for store. Grensen ligger antagelig rundt 64 000 000 elementer totalt/for en tabell. Er det for mange elementer i dll-filen kommer følgende feilmelding opp i Excel hvis rutinene i dll-filen blir forsøkt kalt:



Kalle fryssim.dll fra Excel

Når rutinene i fryssim.dll skal kalles fra Excel er det viktig at rutinene er likt deklamert i Excel (Visual Basic) som i h-filen som har deklamert dem i emacs. Neden for er det vist hvordan noen av rutinene er deklamert i Visual basic og i emacs, Visual basic først

```
Declare Function frysTunnel Lib "c:\progs\afdsim\fryssim.dll" () As Integer
Private Declare Sub frys Lib "c:\progs\afdsim\fryssim.dll" (ByVal id As String, _
                                                         ByVal verdi As Double, _
                                                         ByRef feil As Integer)

Private Declare Sub frysINT Lib "c:\progs\afdsim\fryssim.dll" (ByVal id As String, _
                                                             ByVal verdi As Long, _
                                                             ByRef feil As Integer)
```

```
DLLIMPORT
int frysTunnel(void);

DLLIMPORT
void frys (const char *id, double verdi, int *feil);

DLLIMPORT
void frysINT(const char *id, int verdi, int *feil);
```

Variabeltype	Visual basic	Emacs
Heltall	Integer	int
bokstav	String	(const) char
desimaltall	double	double

Variabler som sender verdier fra Excel til rutinen får ByVal foran seg i Visual basic, mens variabler som får verdier i rutinen som returner tilbake til Excel for ByRef foran seg i Visual basic.

Heltallsvariable som sender verdier inn i rutinen blir i Visual Basic kalt Long istedenfor Integer.

Heltallsvariable som får verdi i rutinen kalles som vanlig Integer.

I rutinene som er vist ovenfor har variablene *id* og *verdi* fått verdier i Excel som de tar med seg inn i rutinen, mens *feil* for tilegnet en verdi i rutinen som den tar med seg tilbake til Excel.

Plassering av fryssim.dll

For at simuleringene skal kunne kjøres fra Excel er det essensielt at fryssim.dll ligger på den plasseringen som er oppgitt i forbindelse med deklamasjon i Visual Basic. Hvis filen flyttes må den nye plasseringen angis i forbindelse med deklamasjonen i Visual Basic.

```
Private Declare Sub frysINT Lib "c:\progs\afdsim\fryssim.dll" (ByVal id As String, _
                                                             ByVal verdi As Long, _
                                                             ByRef feil As Integer)
```



Angivelse av plasseringen til fryssim.dll.

Andre problemer

Variable som er heltall og som kan bli større/mindre enn +/- 34 767 må ha betegnelsen **long** i stedet for **int**.

Excel – Brukergrensesnitt

Brukergrensesnittet simuleringsmodellen er en Excel arbeidsbok som er delt opp i flere faner. Følgende faner er arbeidsboken delt opp i:

Parametere, Produktplassering, Div, Resultater_Temp, Hastigheter, Resultater_tunnel, Resultater_Tfelt, Nøklere.

For å få de forskjellige tingene til skje når knappene blir aktivert, er knappene tilskrevet forskjellige rutiner ved hjelp av Visual Basic. Versjonene av Visual Basic og Excel som er benyttet var Visual Basic 6.5 og Excel 2007.

Nedenfor er det gitt en beskrivelse av hver enkelt fane.

Parametere

G36									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1									
2		Inn variable til modellen	NØKKELE	Legg til parametere		Hen ter	Kjør Simulering		Hent resultat
3	Tunnel	Tunnel bredde [m]	A	1.3	1.3	1.3			
4		Tunnel høyde [m]	B	2.2	2.2	2.2			
5			C	Parameter C er ukjent	Parameter C er ukjent				
6		Temperatur inn på tunnelen [K]	D	243	243	243			
7		Tetthet for luften i tunnelen [kg/m ³]	E	1,43128	1,43128	1,43128			
8		CP for luften i tunnelen [J/kg K]	F	1003	1003	1003			
9		Antall vogner i tunnelen	G	4	4	Parameter G er ukjent			
10	Produkt	Bredde [m]	H	0.3	0.3	0.3			
11		Høyde [m]	I	0.08	0.08	0.08			
12		Lengde [m]	J	0.5	0.5	0.5			
13		Tetthet [kg/m ³]	K	1010	1010	1010			
14		Starttemperatur [K]	L	283	283	283			
15		Avslutnings temperatur i siste produkt [K]	M	242.9	242.9	242.9			
16		Antall produkt pr vogn	N	9	9	Parameter N er ukjent			
17		Antall produkt i høyden pr vogn	O	3	3	Parameter O er ukjent			
18	Varmemotstand	Oversiden av produktet m ² K/W	P	0.05	0.05	Parameter P er ukjent			
19	på produkt	Sidene av produktet m ² K/W	Q	0	0				
20		Undersiden av produktet m ² K/W	R	0.05	0.05				
21									
22									
23									
24									
25		Kan endres fritt							
26		endres andre plasser							
27		Endringer her må også gjøres i C							
28									

Fanen inneholder feltet for innlegging av forskjellige parametere til modellen. I det lille området står det en oversikt over hvilke parametere som det er mulig å endre på. Skal det legges til flere variable til modellen må også endringen skje i filene i Emacs. Parametere med grønn bakgrunnsfarge kan endres fritt i arket. Parametere med rød bakgrunn endres i fanen **Produktplassering**. I tillegg må hastighetene over de enkelte hyllene legges inn i fanen **Hastigheter**.

Øverst i fanen er det satt inn knapper som utfører forskjellige operasjoner. Disse blir utført ved å trykke på knappen med musepekeren.

Legg til parametere: Legger inn parameterne som er skrevet inn, inn i dll-filen

Henter: Henter ut de verdiene som er lagt inn i dll-filen

Kjør simulering: Legger først inn parameterne som er skrevet inn, inn i dll-filen (samme som Legg til parametere). Før den starter og kjører simuleringen med de gitte parameterne.

Hent resultat: Henter lufttemperaturen inn på alle vogner og hyller i simuleringen samt temperaturene ut fra den siste vognen. Når dette blir gjort blir, byttes den aktive fanen automatisk til fanen **Resultater_Temp**. *Kjør simulering* må kjøres først for at det skal komme noen resultater.

Produktplassering

På fanen **Produktplassering** blir noen av parameterne som modellen trenger langt inn. Disse parameterne angår størrelsen på selve tunnelen og antall og størrelse på produktet. Produktet er formet som en rektangulær eske.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Parametere i forbindelse med tunnelen: størrelse på tunnelen, antall vogner og antall produkt pr vogn						
2		Høyde [m]	Bredde [m]	Lengde [m]		Areal [m ²]	
3	Tunnel størrelse	2.2	1.3	5		2.86	
4	Produkt størrelse	0.08	0.3			0.024	
5							
6		i Høyden	i Bredden	i Lengden	Totalt		
7	Antall vogner	1	1	4	4		
8	Antall produkt pr vogn	3	3	1	9	0.216	
9	Produkt avstand	0.65333333	0.13333333	1			
10							
11					Areal for luft	2.644	
12							
13							
14							
15							

Feltene som er grønne kan fritt endres innen for disse grensene: Antall produkter pr vogn i høyden kan maks være 10 og antall vogner i lengden kan maks være 10. Skal disse verdiene være større må henholdsvis HYLLER og VOGNER endres i filen frysprodukt.h. Hvis verdien i et av de blå feltene blir negativ, er det for mange produkter i en enkelt vogn og antallet må reduseres.

Hastigheter

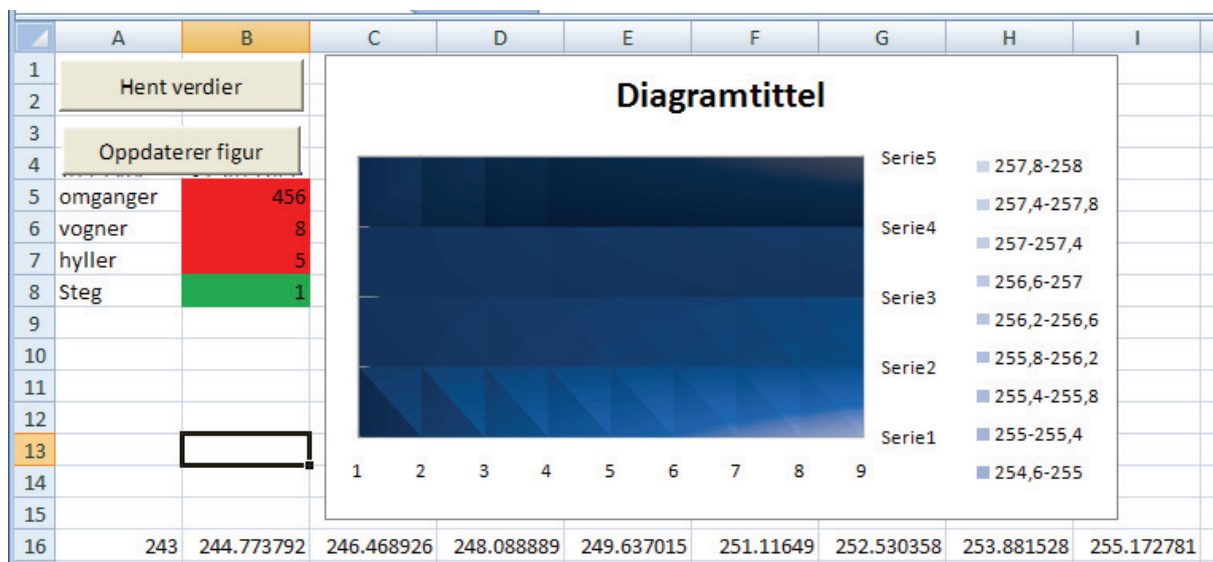
Fanen inneholder felter for innsetting av hastigheten på luften over hver enkelt hylle i hver vogn. Hvis det ikke er fylt inn nok hastigheter i forhold til angitte hyller og vogner, vil det ved forsøk på å kjøre simulering bli gitt en feilmelding og fanen vil bli aktivert.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	[Formellinje] K	
1	Hastigheter over produktene i de forskjellige høydene i vognene.										
2											
3	Høyde/Vogn	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	2	5	5	5	5	5	5	5	5		
6	3	9	9	9	9	9	9	9	9		
7	4	5	5	5	5	5	5	5	5		
8	5	1	1	1	1	1	1	1	1		
9	6	7	7	7	7	7	7	7	7		
10	7	4	4	4	4	4	4	4	4		
11	8	1	1	1	1	1	1	1	1		
12	9	9	9	9	9	9	9	9	9		
13	10	5	5								
14											
15											

Resultater_Temp

Fanen vil automatisk bli aktivert når knappen *Hent resultat* blir trykket på i fanen **Parametere**. Fanen inneholder temperaturene inn på hver enkelt hylle i hver vogn, samt temperaturen ut fra hyllene i siste vogn. I tillegg blir akkumulert avgitt varme fra hvert enkelt produkt skrevet ut for hvert tidsskritt (hylle og vogn). Total varmeavgivelse fra produktene blir sammenlignet med varmeavgivelse ved entalpidifferanser, og et prosentvis avvik blir oppgitt under kolonnen med resultater for hvert enkelt produkt. Også momentan varmeavgivelse fra hvert produkt for hvert tidsskritt blir listet opp.

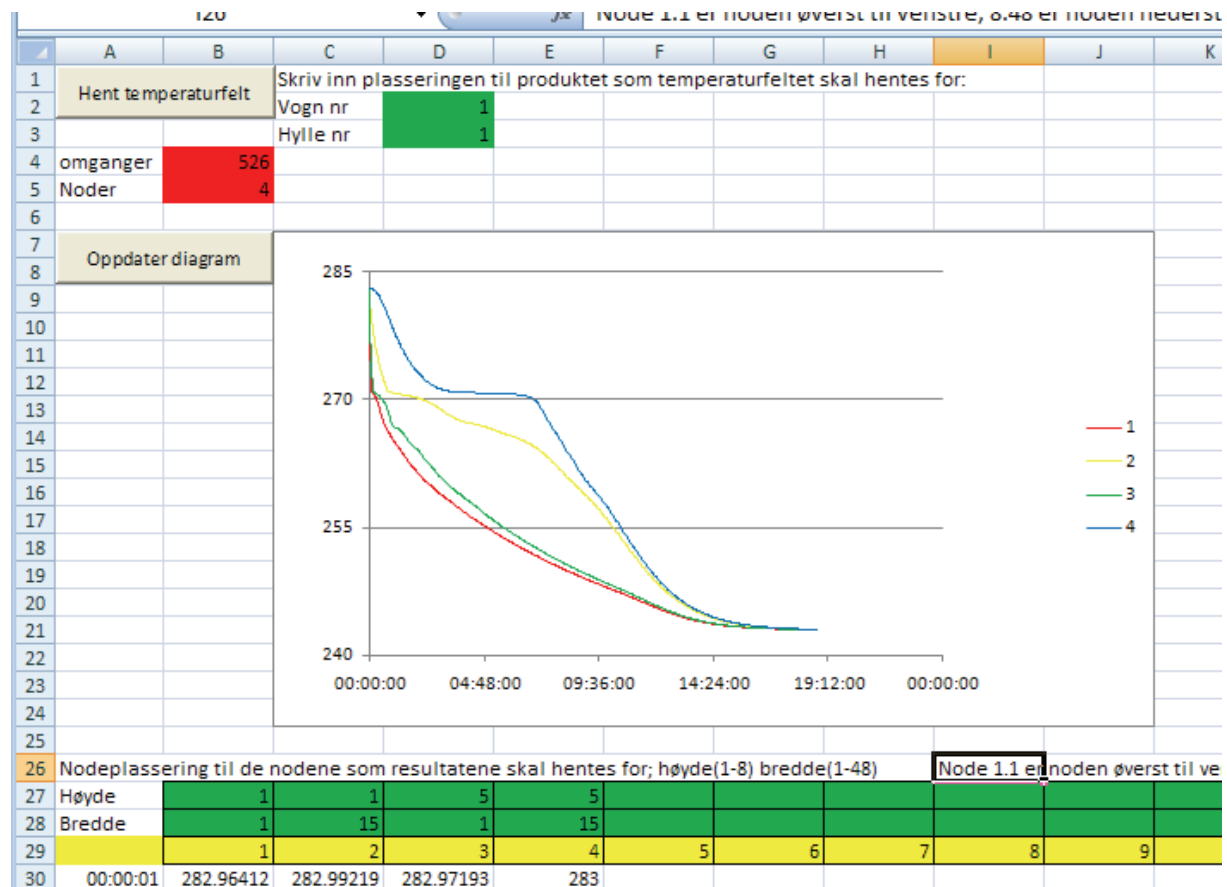
Resultater_tunnel



Også denne fanen inneholder resultater over temperaturene inn på alle hylle og vognene i tunnelen. For å hente resultatene må det først kjøres en simulering, før knappen *Hent verdier* blir trykket. Ved å trykke på knappen *Oppdater figur* vil det bli vist en animasjon over temperaturutviklingen i

tunnelen. Tallet i den grønne cellen angir hvor mange tidsskritt det er mellom hvert nye bilde i animasjonen. Tallene i de røde cellene blir automatisk oppdatert når knappen *Hent verdier* blir aktivert. Disse angir hvor mange tidsskritt, antall vogner og antall hyller som simuleringen som ligger bak resultatene som ligger på fanen hadde. Hvis det ligger resultater på fanen kan animasjonen kjøres uten at en simulering må kjøres.

Resultater_Tfelt



Fanen inneholder muligheter for å hente temperaturutviklingen for valgfrie noder i et av produktene som er blitt simulert. I de to grønne cellene øverst blir plasseringen til produktet angitt, vogn og hylle. I de to grønne radene blir de ønskede nodene angitt. Den øverste raden angir den vertikale plasseringen til noden i produktet, og den nederste raden angir den horisontale plasseringen i produktet. Den gule raden angir hva som skal stå ved måleserien i figuren. Tallene i de røde cellene blir automatisk oppdatert når knappen *Hent resultatfelt* blir aktivert. Disse angir hvor mange tidsskritt som simuleringen som resultatene på fanen brukte og hvor mange noder som det er blitt hentet resultater for. Den første kolonnen av resultater beskriver reell tid som simuleringen har brukt så langt, (tt.mm.ss).

Div

Har ingen reell funksjon, brukes til mellom lagring av resultater under diverse tester.

Nøkler

Har ingen reell funksjon, brukes til mellomlagring av resultater under tester.

Diverse problem

Når Excel skal kommunisere med dll-filen, har Excel en tendens til å gjøre en feil eller annen feil slik at Excel blir nødt til å avsluttes og startes på nytt. I de fleste tilfeller gjøres dette automatisk etter at følgende feilmelding kommer opp:



Hva som gjør dette er uvisst, da dette kan skje for en prosess som allerede er blitt flere ganger på rad, som for eksempel når resultater skal hentes inn fra dll-filen. En mulig feilkilde er at datamaskinen har for litt minne.

Åpning av Visual Basic

For å åpne Visual Basic: Åpne et Excel dokument og trykk **alt + F11**. (Det er finnes flere metoder.)

VEDLEGG B

Bakgrunnsdata og måleoppsett for frysetunnel på Måløy

04.04.2008

Dimensjonerende størrelser for tunneler og kuldeanlegg

Aalvik, Johan, *Frysing av makrell i esker i tverrblåst innfrysingstunnel*, STF11 F94007, -94

1. Frysetunneler

5 st tverrblåste

1.1. Avstand

Innvendig hovedmål: LxBxH:	19.1 m x 6.8 m x 7.1 m
Høyde opp til falsk himling:	4.8 m
Høyde over himling:	1.6 m
Avstand mellom første vognrad og vegg:	0.8 m
Vognrad, dybde (4 vogner):	4.5 m
Avstand mellom siste vognrad og fordamper:	0.35 m
Fordamperdybde:	0.4 m
Avstand mellom fordamper og vegg:	0.75 m
Lengde en seksjon:	6.3 m (tre seksjoner)

1.2. Drift

Når en seksjon er lastet, åpnes det for kuldemedium til fordamperne og viftene startes.

1.3. Mengder

Dimensjonerende mengde fisk per tunnel:	105.6 tonn
Antall reoler per tunnel:	96
Antall rekker:	14 ? (14x4x2=112)
Antall hyller per reol:	11
Antall kasser per hylle:	5
Mengde fisk per kasse:	20 kg
Fisk per reol:	1100 kg

1.4. Areal

Samlet effektiv vareoverflate (kasser) per reol:	26.4 m ²
Samlet effektiv vareoverflate per tunnel:	2 534.4 m ²

1.5. Luftmengde

Totalt tunneltverrsnitt:	91.7 m ²
Varer og reoler dekker:	60 m ²
Dimensjonerende luftmengde for en tunnel:	200 m ³ /s
Antall vifter per tunnel:	9 (à 22.2 m ³ /s)
Lufthastigheten tomt tverrsnitt:	2.14 m/s
Lufthastigheten fylt tverrsnitt:	6.3 m/s

1.6. Kuldeytelse

Dimensjonerende kuldeytelse for en tunnel:	610 kW (enl. konsulent)
(varer fra +5 til -25° på 18 h, transmisjonstap 40 kW, viftevarme 55 kW)	
Viftens motors nominelle effekt:	22 kW
Kraftforbruk dim. tilstand:	17.9 kW
Motorvirkningsgrad:	89 %
Beregnet totalt tilført effekt pga viftevarme:	178 kW (en tunnel) mer enn dimensjonert
Beregnet transmisjonstap:	mindre enn dimensjonert
Maks. samtidig kuldebehov	2000 kW (3.3 tunneler i full drift)

1.7. Fordampere

3 seksjoner med 5 blokker i høyden	
Ytelse:	690 kW
Maks fordampningstemperatur :	-35 °C
Dim. inngående lufttemperatur	-28 °C
Luftens temperaturredifferanse:	3 °C

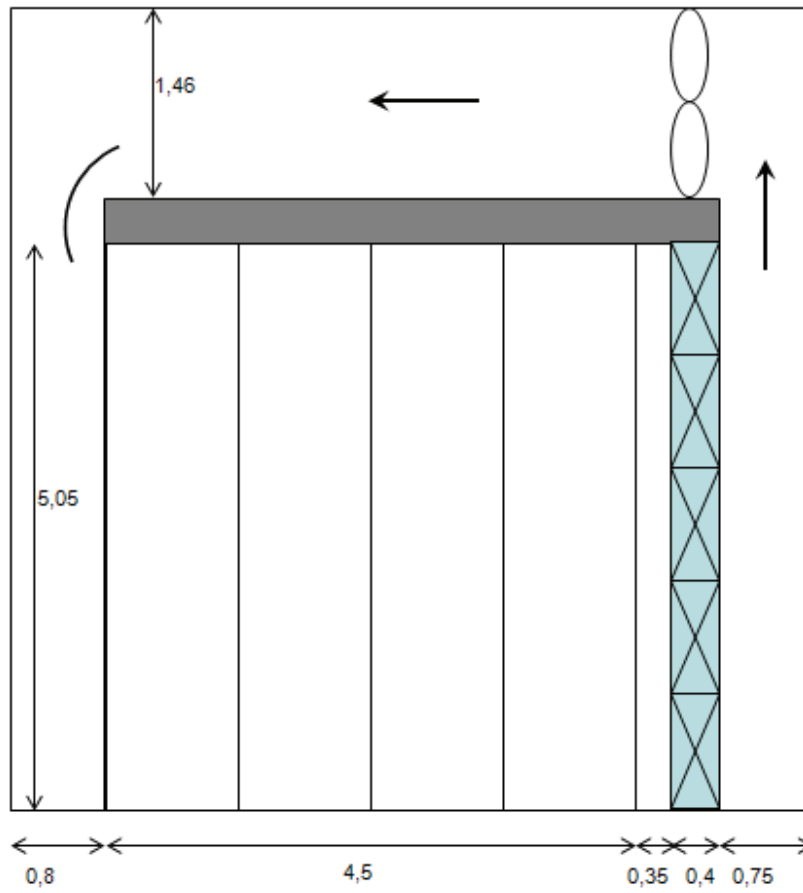
1.8. Kompressorene

Dim. fordampningstemperatur:	-38 °C
Dim. kondenseringstemperatur:	20 °C

Skisser over tunnelen

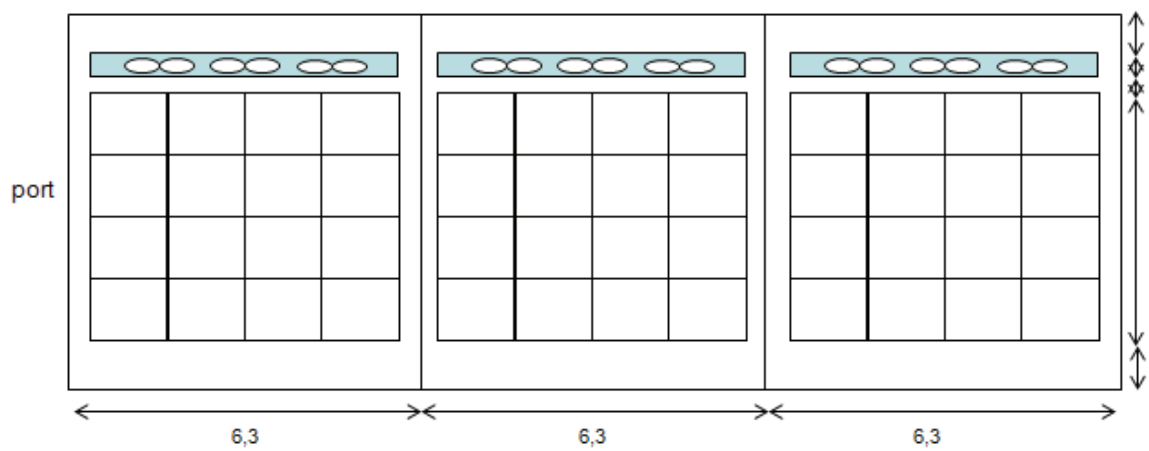
sett fra port

[m]

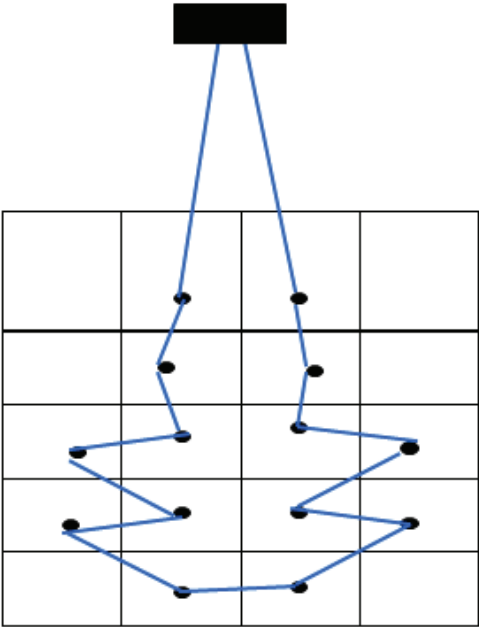


från ovan

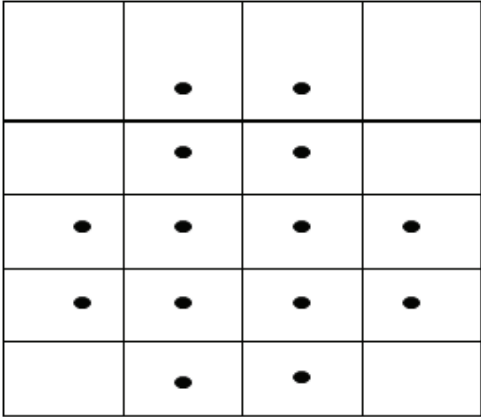
[m]



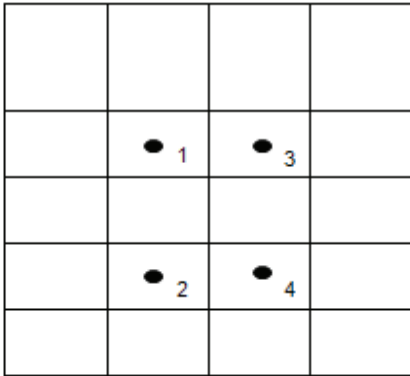
Oversikt over måleoppsett



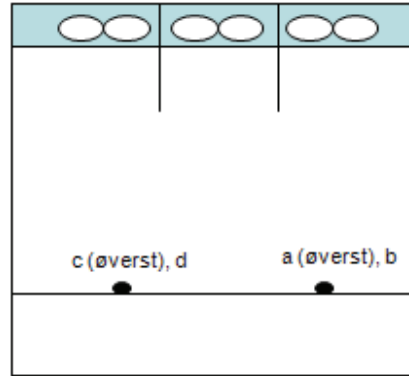
Termosøyle 1, sett fra produksiden



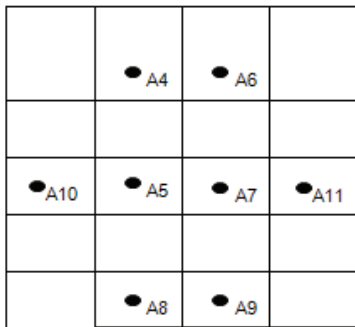
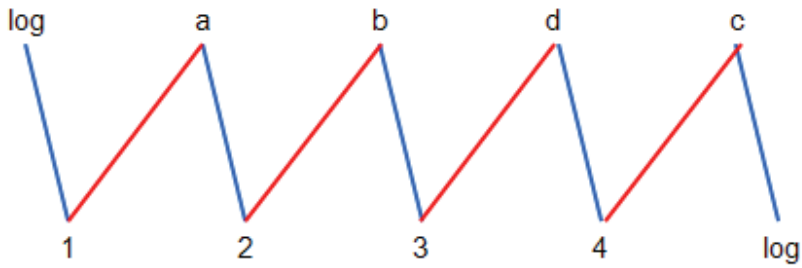
Termosøyle 1, sett fra baksiden av fordampner



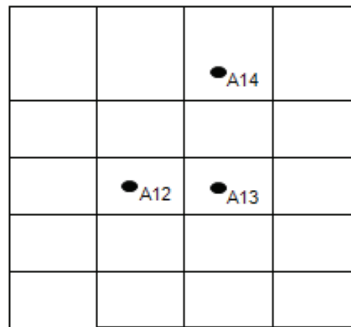
Termosøyle 2, sett fra produktsiden



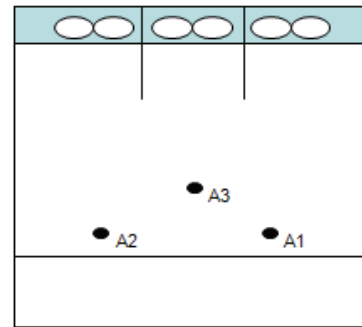
Termosøyle 2, etter vifter



Absoluttmålinger, sett fra produktsiden

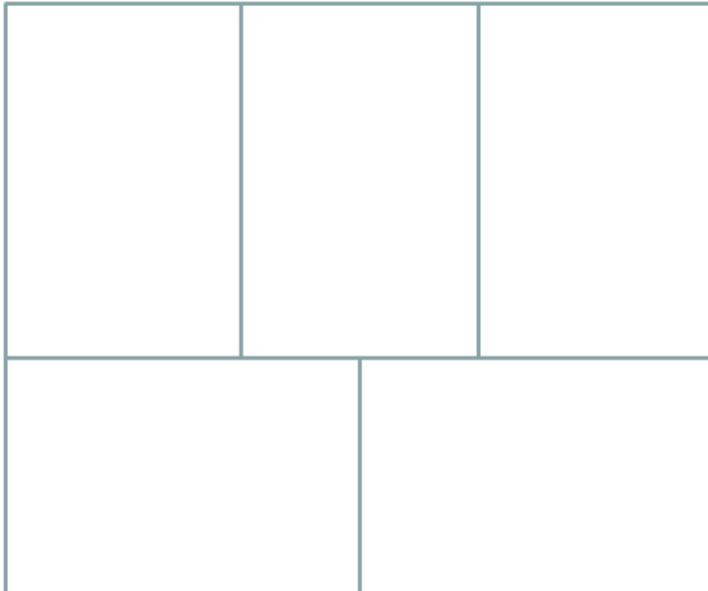


Absoluttmålinger, sett fra baksiden av fordampner



Termosøyle 2, etter vifter

Plassering av 5 esker på en reolhylle



Oversikt over plasseringen til kassene som det ble foretatt temperaturmålinger i

1					X
2					X
3					X
4					X
5					X
6	A (nedre)			B (nedre)	X
7					X
8			D (övre)		X
9	C (nedre)			E (nedre)	X
10					X
11					X
12					X
13					X
14					X

Første kolonne angir reol nummer, og siste marker fordampere.

		reg.nr.		plassering	hylle	reolrad	i kassen
x	17	490911	E o y	E	oppe (11)	9	under lokk
x	19	493583	E o i	E	oppe (11)	9	midt
x	20	493587	E n i	E	nede (1)	9	midt
x	13	505744	D o y	D	oppe (11)	8	under lokk
x	9	505748	C o y	C	oppe (11)	9	under lokk
x	14	505750	D n y	D	nede (1)	8	under lokk
x	18	505753	E n y	E	nede (1)	9	under lokk
x	6	505754	B n y	B	nede (1)	6	under lokk
x	10	505756	C n y	C	nede (1)	9	under lokk
x	5	513784	B o y	B	oppe (11)	6	under lokk
x	2	513785	A n y	A	nede (1)	6	under lokk
x	1	513791	A o y	A	oppe (11)	6	under lokk
x	7	521344	B o i	B	oppe (11)	6	midt
x	8	521350	B n i	B	nede (1)	6	midt
x	11	521351	C o i	C	oppe (11)	9	midt
x	3	569944	A o i	A	oppe (11)	6	midt
x	16	569946	D n i	D	nede (1)	8	midt
x	15	569952	D o i	D	oppe (11)	8	midt
x	12	569955	C n i	C	nede (1)	9	midt
x	4	569956	A n i	A	nede (1)	6	midt

VEDLEGG C Termodynamiske egenskaper for torsk og makrell

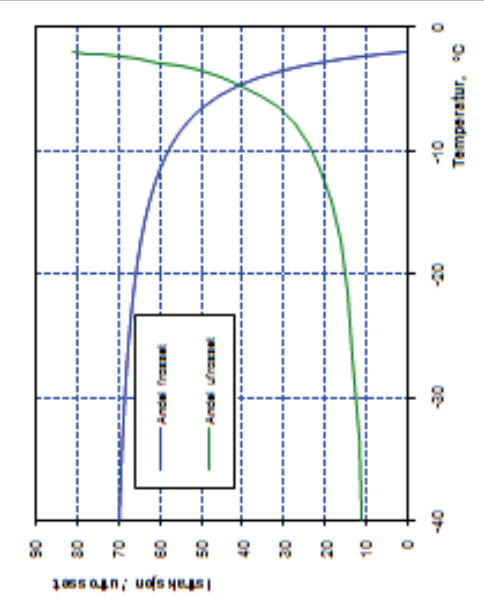
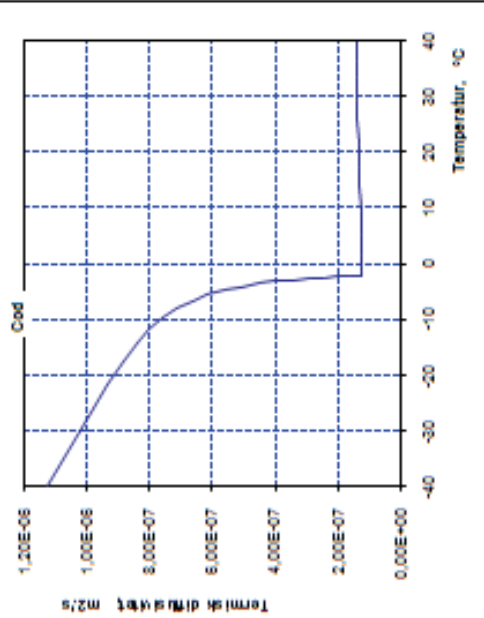
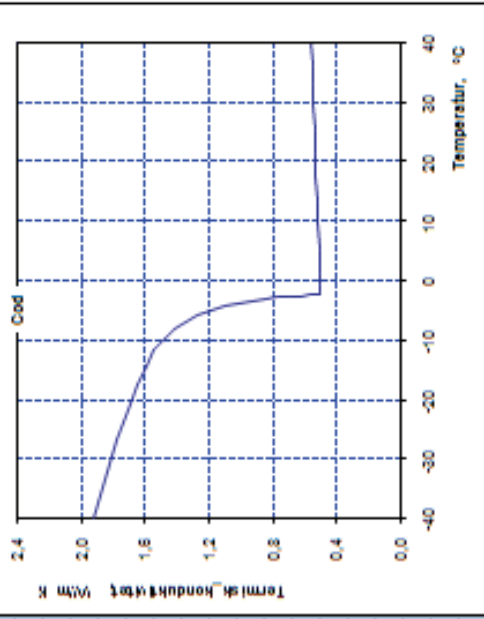
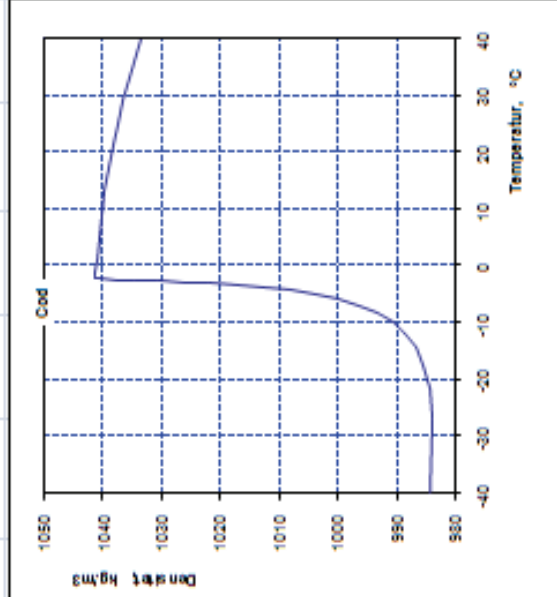
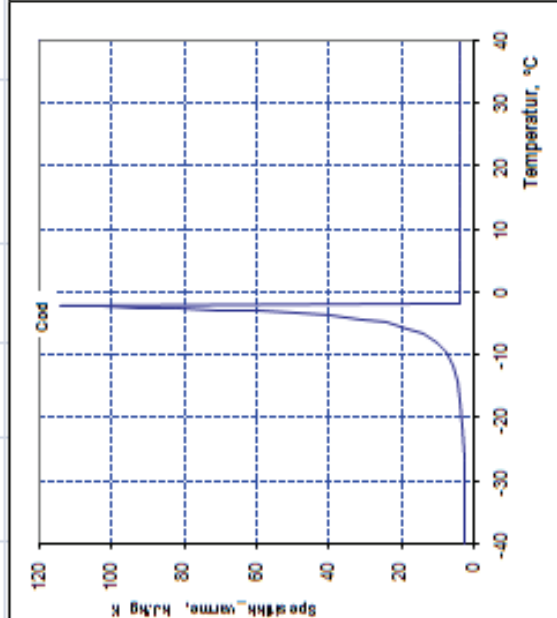
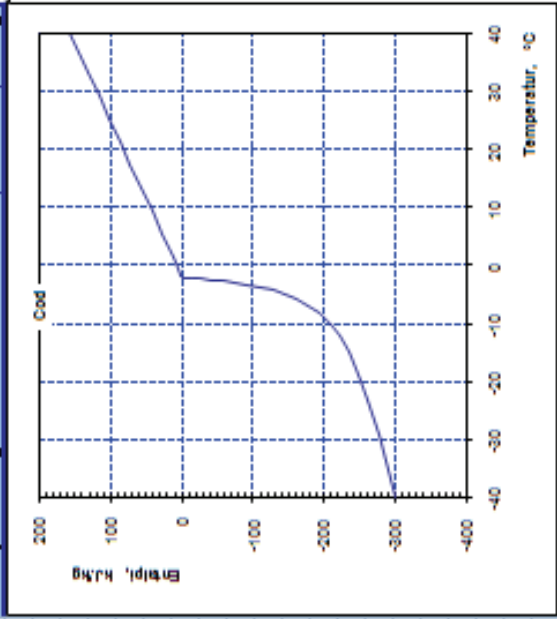
Her er beregningene for plottning av kurver

Næringsmiddel: **Cod**

ENTALPI		Spesifikk varme	Tetthet	Varmeledningsevne	Termisk diffusivitet	Is/vann data		
kJ/kg	kJ/kgK	kg/m ³	W/mK	m ² /s	Ice/water Term_kon	Ice/water Dens	Sp_heat Ice/water	
-40.00	-301.12	-40.00	2.127	40.00	-40.00	1.1219E-06	-41.70	
-29.20	-276.80	-26.89	2.539	-26.89	-26.89	9.8448E-07	922.34	1.808884
-23.38	-261.77	-21.69	2.943	21.69	-21.69	9.2975E-07	921.26	1.859141
-18.80	-247.92	-17.57	3.548	-17.57	-17.57	8.8269E-07	920.40	1.898977
-15.20	-234.62	-14.31	4.443	14.31	-14.31	8.3955E-07	919.72	1.930552
-12.36	-221.32	-11.72	5.746	-11.72	-11.72	7.9767E-07	918.19	1.955558
-10.12	-207.60	-9.67	7.604	9.67	-9.67	7.5515E-07	918.76	1.975419
-8.36	-193.14	-8.04	10.194	-8.04	-8.04	7.1070E-07	918.42	1.991144
-6.97	-177.74	-6.75	13.709	6.75	-6.75	6.6356E-07	918.15	2.003608
-5.88	-161.32	-5.73	18.336	-5.73	-5.73	6.1347E-07	917.94	2.013487
-5.02	-143.96	-4.92	24.227	4.92	-4.92	5.6062E-07	917.77	2.021319
-4.35	-125.89	-4.28	31.460	-4.28	-4.28	5.0568E-07	917.64	2.027526
-3.81	-107.46	-3.77	40.002	3.77	-3.77	4.4965E-07	917.53	2.032446
-3.39	-89.08	-3.37	49.697	-3.37	-3.37	3.9376E-07	917.45	2.036346
-3.06	-71.20	-3.05	60.266	3.05	-3.05	3.3933E-07	917.38	2.039437
-2.80	-54.26	-2.80	71.342	-2.80	-2.80	2.8760E-07	917.33	2.041887
-2.60	-38.60	-2.60	82.521	2.60	-2.60	2.3959E-07	917.29	2.043883
-2.44	-24.46	-2.44	93.415	-2.44	-2.44	1.9603E-07	917.15	2.050146
-2.31	-11.97	-2.31	103.697	2.31	-2.31	1.5730E-07	917.02	2.056223
-2.21	-1.14	-2.21	113.129	-2.21	-2.21	1.2352E-07	916.94	2.059869
-2.20	0.00	-2.2	114.143	-2.2	-2.2	1.1997E-07	916.90	2.061692
-1.70	1.87	-1.7	3.746	-1.7	-1.7	1.2028E-07	916.89	2.062239
-1.30	13.08	1.3	3.737	1.3	1.3	1.2207E-07	0.00	0.571
5.30	28.04	5.3	3.738	5.3	5.3	1.2439E-07	997.17	4.128754
9.3	43.00	9.3	3.739	9.3	9.3	1.2665E-07	997.07	4.128557
13.3	57.97	13.3	3.740	13.3	13.3	1.2883E-07	996.85	4.128535
17.3	72.96	17.3	3.741	17.3	17.3	1.3095E-07	996.51	4.128688
21.3	87.95	21.3	3.743	21.3	21.3	1.3299E-07	996.05	4.129017
25.3	102.96	25.3	3.744	25.3	25.3	1.3496E-07	995.46	4.129520
29.3	117.99	29.3	3.746	29.3	29.3	1.3686E-07	994.76	4.130199
33.3	133.04	33.3	3.747	33.3	33.3	1.3869E-07	993.94	4.131053
40.0	158.28	40.0	3.749	40.0	40.0	1.4001E-07	993.80	4.132081
							991.93	4.133286
							990.75	4.134665

Frysepunkt for vann

Spesifikk varme over frysepunkt	3.751
Spesifikk varme under frysepunkt	2.368
Latent varme	211.61
Temp	Entalpi
-40.00	-301.12
-2.20	-211.61
0.00	0.00
40.0	158.28



Her er beregningene for plottning av kurver

Næringsmiddel: **Mackerel, Atlantic**

ENTALPI		Spesifikk varme		Tetthet		Varmeledningsevne		Termisk diffusivitet		Is/vann data			
	kJ/kg	kJ/kgK	W/mK	kg/m ³	m ² /s	Ice/water Term_kon	Ice/water Dens	Sp_heat Ice/water					
-40.00	-252.84	-40.00	2.267	-40.00	1028.9	-40.00	8.6787E-07	10.53	-40.00	53.024	10.53	-40.00	0.000
-29.20	-227.33	-26.89	2.579	-26.89	1027.8	-26.89	7.6442E-07	11.13	-33.43	52.418	11.13	-33.43	2.061692
-23.38	-212.13	-21.69	2.885	-21.69	1027.8	-21.69	7.2321E-07	12.03	-26.88	51.517	12.03	-26.88	2.062239
-18.80	-198.64	-17.57	3.343	-17.57	1028.2	-17.57	6.8775E-07	13.13	-21.68	50.416	13.13	-21.68	2.062294
-15.20	-186.20	-14.31	4.021	-14.31	1029.0	-14.31	6.5521E-07	14.47	-17.56	49.081	14.47	-17.56	2.062294
-12.36	-174.26	-11.72	5.008	-11.72	1030.2	-11.72	6.2360E-07	16.07	-14.30	47.476	16.07	-14.30	2.062294
-10.12	-162.41	-9.67	6.415	-9.67	1031.9	-9.67	5.9148E-07	17.98	-11.71	45.568	17.98	-11.71	2.062294
-8.36	-150.30	-8.04	8.376	-8.04	1034.0	-8.04	5.5789E-07	20.22	-9.66	43.329	20.22	-9.66	2.062294
-6.97	-137.73	-6.75	11.037	-6.75	1036.4	-6.75	5.2225E-07	22.81	-8.03	40.742	22.81	-8.03	2.062294
-5.88	-124.58	-5.73	14.541	-5.73	1039.3	-5.73	4.8435E-07	25.74	-6.74	37.806	25.74	-6.74	2.062294
-5.02	-110.87	-4.92	19.003	-4.92	1042.5	-4.92	4.4437E-07	29.01	-5.72	34.538	29.01	-5.72	2.062294
-4.35	-96.74	-4.28	24.480	-4.28	1046.0	-4.28	4.0279E-07	32.57	-4.91	30.983	32.57	-4.91	2.062294
-3.81	-82.43	-3.77	30.948	-3.77	1049.6	-3.77	3.6037E-07	36.34	-4.27	27.207	36.34	-4.27	2.062294
-3.39	-68.24	-3.37	38.290	-3.37	1053.3	-3.37	3.1807E-07	40.25	-3.76	23.299	40.25	-3.76	2.062294
-3.06	-54.49	-3.05	46.293	-3.05	1057.0	-3.05	2.7686E-07	44.19	-3.36	19.361	44.19	-3.36	2.062294
-2.80	-41.49	-2.80	54.681	-2.80	1060.5	-2.80	2.3770E-07	48.05	-3.04	15.497	48.05	-3.04	2.062294
-2.60	-29.49	-2.60	63.147	-2.60	1063.9	-2.60	2.0135E-07	51.75	-2.79	11.804	51.75	-2.79	2.062294
-2.44	-18.68	-2.44	71.396	-2.44	1066.9	-2.44	1.6837E-07	55.19	-2.59	8.363	55.19	-2.59	2.062294
-2.31	-9.13	-2.31	79.182	-2.31	1069.7	-2.31	1.3905E-07	58.32	-2.43	5.230	58.32	-2.43	2.062294
-2.21	-0.87	-2.21	86.324	-2.21	1072.1	-2.21	1.1347E-07	61.11	-2.30	2.440	61.11	-2.30	2.062294
-2.20	0.00	-2.2	87.092	-2.2	1072.3	-2.2	1.1078E-07	63.55	-2.20	0.000	63.55	-2.20	2.062294
-1.70	1.65	-1.7	3.295	-1.7	1072.3	-1.7	1.1103E-07						
-0.70	4.94	-0.7	3.290	-0.7	1072.1	-0.7	1.1152E-07						
1.30	11.51	1.3	3.288	1.3	1071.9	1.3	1.1250E-07						
5.30	24.67	5.3	3.290	5.3	1071.2	5.3	1.1441E-07						
9.3	37.85	9.3	3.292	9.3	1070.5	9.3	1.1625E-07						
13.3	51.05	13.3	3.294	13.3	1069.7	13.3	1.1805E-07						
17.3	64.26	17.3	3.295	17.3	1068.8	17.3	1.1978E-07						
21.3	77.49	21.3	3.297	21.3	1067.8	21.3	1.2145E-07						
25.3	90.74	25.3	3.299	25.3	1066.8	25.3	1.2307E-07						
29.3	104.00	29.3	3.302	29.3	1065.6	29.3	1.2463E-07						
33.3	117.29	33.3	3.304	33.3	1064.3	33.3	1.2612E-07						
40.0	139.59	40.0	3.306	40.0	1062.0	40.0	1.2721E-07						
			40.0				1.2851E-07						
			3.308										
			2.450										
			160.24										
			Entalpi										
			-40.00										
			-252.84										
			-2.20										
			-160.24										
			-2.20										
			0.00										
			40.0										
			139.59										
			Temp										
			-40.00										
			-252.84										
			-2.20										
			-160.24										
			-2.20										
			0.00										
			40.0										
			139.59										
			Spesifikk varme over frysepunkt										
			3.308										
			2.450										
			160.24										
			Spesifikk varme under frysepunkt										
			160.24										
			2.20										
			160.24										
			2.20										
			0.00										
			40.0										
			139.59										
			Latent varme										
			160.24										
			2.20										
			160.24										
			2.20										
			0.00										
			40.0										
			139.59										

Frysepunkt for vann

